



Ministério da
Ciência e Tecnologia



INPE-15784-TDI/1527

**MODELOS DE TRANSFERÊNCIA RADIATIVA NO
ESTUDO DA CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA EM
CANA-DE-AÇÚCAR, UTILIZANDO DADOS
HIPERESPECTRAIS**

Daniela Arnold Tisot

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelo Dr. Antônio Roberto Formaggio, aprovada em 17 de abril de 2009.

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/07.06.19.44>>

INPE
São José dos Campos
2009

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) 3945-6911/6923

Fax: (012) 3945-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO:

Presidente:

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

Membros:

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

Dr. Haroldo Fraga de Campos Velho - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

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

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

Dr. Ralf Gielow - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

Dr. Wilson Yamaguti - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

BIBLIOTECA DIGITAL:

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

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

Jefferson Andrade Ancelmo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

Simone A. Del-Ducca Barbedo - Serviço de Informação e Documentação (SID)

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

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

Marilúcia Santos Melo Cid - Serviço de Informação e Documentação (SID)

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

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Viveca Sant´Ana Lemos - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
Ciência e Tecnologia



INPE-15784-TDI/1527

**MODELOS DE TRANSFERÊNCIA RADIATIVA NO
ESTUDO DA CONCENTRAÇÃO DE CLOROFILA EM
CANA-DE-AÇÚCAR, UTILIZANDO DADOS
HIPERESPECTRAIS**

Daniela Arnold Tisot

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelo Dr. Antônio Roberto Formaggio, aprovada em 17 de abril de 2009.

Registro do documento original:

<<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2009/07.06.19.44>>

INPE
São José dos Campos
2009

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Tisot, Daniela Arnold.

T529m Modelos de transferência radiativa no estudo da concentração de clorofila em cana-de-açúcar, utilizando dados hiperespectrais / Daniela Arnold Tisot. – São José dos Campos : INPE, 2009.

112p. ; (INPE-15784-TDI/1527)

Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009.

Orientador : Dr. Antônio Roberto Formaggio.

1. Cana-de-açúcar. 2. Estimativa de clorofila. 3. Modelos de transferência radiativa. 4. Modelo Prospect. 5. Madelo Sailh. 6. Índices de vegetação. 7. Dados hiperespectrais. 8. Sensor Hyperion. I.Título.

CDU 528.813

Copyright © 2009 do MCT/INPE. Nenhuma parte desta publicação pode ser reproduzida, armazenada em um sistema de recuperação, ou transmitida sob qualquer forma ou por qualquer meio, eletrônico, mecânico, fotográfico, reprográfico, de microfilmagem ou outros, sem a permissão escrita da Editora, com exceção de qualquer material fornecido especificamente no propósito de ser entrado e executado num sistema computacional, para o uso exclusivo do leitor da obra.

Copyright © 2009 by MCT/INPE. No part of this publication may be reproduced, stored in a retrieval system, or transmitted in any form or by any means, electronic, mechanical, photocopying, recording, microfilming or otherwise, without written permission from the Publisher, with the exception of any material supplied specifically for the purpose of being entered and executed on a computer system, for exclusive use of the reader of the work.

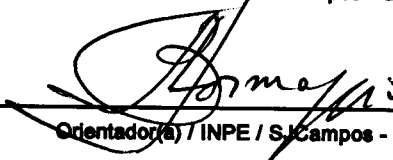
Aprovado (a) pela Banca Examinadora
em cumprimento ao requisito exigido para
obtenção do Título de Doutor(a) em
Sensoriamento Remoto

Dr. Bernardo Friedrich Theodor Rudorff



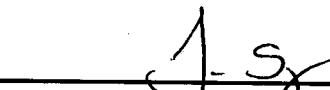
Presidente / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Antonio Roberto Formaggio



Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Lênio Soares Galvão



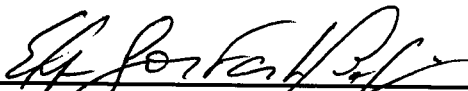
Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Camilo Daleles Rennó



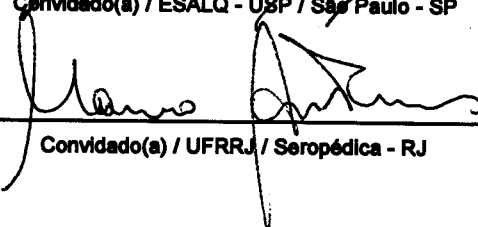
Membro da Banca / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Edgar Gomes Ferreira de Beauclair



Convidado(a) / ESALQ - USP / São Paulo - SP

Dr. Mauro Antonio Homem Antunes



Convidado(a) / UFRRJ / Seropédica - RJ

Aluno (a): Daniela Arnold Tisot

São José dos Campos, 17 de abril de 2009

“...a tarefa não é tanto a de ver o que ninguém ainda viu, mas a de pensar o que ninguém ainda pensou sobre o que todos vêem...”.

Arthur Schopenhauer

Ao meu marido, Rogério, por estar ao meu lado em todos os momentos.

A meu filho, Pedro, por despertar-me todos os dias (e muitas noites), fazendo destes dias os mais felizes.

A meus pais, Orley e Maria Inês, e a meu querido irmão, Rodrigo, por sempre estarem ao meu lado e por, simplesmente, acreditarem.

AGRADECIMENTOS

Ao Rogério Costa Campos, pela valiosa contribuição com seu conhecimento em modelos de transferência radiativa e pela implementação do modelo SAILH;

Ao professor Dr. Antonio Roberto Formaggio, pela orientação, amizade e sinceridade que caracterizou nosso trabalho;

Ao professor Dr. Edgar Gomes Ferreira de Beauclair por viabilizar o contato com os gerentes técnicos das usinas;

Aos gerentes técnicos da área agrícola das usinas Costa Pinto/Grupo Cosan e Iracema/Grupo São Martinho por viabilizarem as coletas de dados;

Aos colegas Silvio, Rogério, Salete, Ieda, Daniela e Elizabeth, ao meu orientador Antonio Roberto Formaggio e aos motoristas do INPE pelo auxílio nas exaustivas campanhas de coletas de dados de campo;

Ao Dr. Luíz Antônio Gallo (CEBTEC/ESALQ/USP) por ceder seu laboratório para a realização das análises bioquímicas;

Ao Dr. Dar Roberts (Universidade da Califórnia – Santa Barbara/UCSB, Califórnia, E.U.A.), responsável pelo *Visualization & Image Processing for Environmental Research Laboratory (VIPER Lab)* e aos colegas Seth Peterson, Izaya Numata, Eliza Bradley, Ryan Perroy, Kelly Roth, Dylan Parent, Kerry Halligan e Stefan Gaston pelo convívio e experiência enriquecedora;

À Dra. Susan Ustin (Universidade da Califórnia – San Diego/UCSD, Califórnia, E.U.A.), responsável pelo *Center for Spatial Technologies and Remote Sensing (CSTARS)*, pelo treinamento para a utilização dos modelos de transferência radiativa utilizados nesta pesquisa, por fornecer o código do modelo PROSPECT e pelo suporte na implementação do modelo SAILH;

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela bolsa de estudos concedida;

A todos aqueles que de alguma forma contribuíram para a realização deste trabalho, meu sincero agradecimento.

RESUMO

Com base na hipótese de que diferenças na composição bioquímica de folhas e de dosséis refletem-se em feições hiperespectrais distintas, a presente pesquisa teve como objetivos: avaliar a interferência das folhas senescidas dos dosséis de cana-de-açúcar nos dados espectrais orbitais; identificar os índices hiperespectrais de vegetação menos sensíveis aos efeitos da estrutura de dossel na reflectância da cultura da cana-de-açúcar por meio do modelo de transferência radiativa PROSAILH; e, gerar modelos estatísticos para a estimação do conteúdo de clorofila de cana-de-açúcar baseada em índices hiperespectrais simulados em escala de dossel, permitindo a posterior espacialização desta variável *pixel-a-pixel* na imagem *Hyperion*. Talhões de cinco cultivares de cana-de-açúcar foram estudados em diferentes ciclos de desenvolvimento e subdivididos em talhões de treinamento e de validação dos modelos estatísticos. A equação de melhor potencial preditivo ($r = -0,97$, $r^2 = 0,94$, RMEQ = 2,39 $\mu\text{g Ccl.cm}^{-2}\text{MV}$ e CV (RMEQ) = 9 %) foi baseada na correlação entre o índice *PRI2* simulado pelo modelo PROSAILH e os dados de clorofila medidos dos respectivos talhões. Ao utilizar a equação nos talhões destinados à validação, o desempenho da equação para estimar o conteúdo de clorofila foi considerado satisfatório, resultando em valores de $r = 0,43$, RMEQ = 2,92 $\mu\text{g Ccl.cm}^{-2}\text{MV}$ e CV(RMEQ) = 10%, no entanto, com coeficiente de determinação muito baixo ($r^2 = 0,18$). A partir desta equação, um mapa de clorofila espacializada *pixel-a-pixel* foi produzido para as áreas canavieiras da imagem *Hyperion*. A pequena variabilidade do conteúdo de clorofila dos talhões estudados analisada em laboratório é supostamente um forçante para a baixa variabilidade observada no mapa de clorofila produzido com a aplicação do método.

RADIATIVE TRANSFERENCE MODEL TO STUDY SUGARCANE CHLOROPHYLL CONCENTRATION USING HYPERSPECTRAL DATA

ABSTRACT

Regarding the strong connection between canopy leaf biochemical compound and spectral features, this research is aimed at: evaluating the effect of the senesced leaves on hyperspectral orbital data from sugarcane canopies; using PROSAILH modeling to point out less sensitive spectral indices to sugarcane canopy structure; and developing statistical models relating sugarcane canopy chlorophyll content to hyperspectral indices to map surface canopy chlorophyll variability from *Hyperion* image. Five sugar cane varieties growing through different phenological cycle were selected to build and test theoretical statical models. The best predictive model ($r = -0,97$, $r^2 = 0,94$, RMEQ = 2,39 $\mu\text{g Ccl.cm}^{-2}\text{MV}$ e CV(RMEQ) = 9 %) came out from *PRI2* spectral index which was simulated in the PROSAILH mode. The model performed satisfactorily on estimating canopy chlorophyll content ($r = 0,43$, RMEQ = 2,92 $\mu\text{g Ccl.cm}^{-2}\text{MV}$ e CV(RMEQ) = 10%) regardless it has shown low r^2 value ($r^2 = 0,18$). Finally, the model was used to produce a theoretical map of sugar cane chlorophyll content variability from *Hyperion* index image. Variability of leaf chlorophyll content acquired from biochemical analysis are supposed to impose low chlorophyll variability over sugarcane chlorophyll dispersion map.

SUMARIO

Pag.

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

1	INTRODUÇÃO	25
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	29
2.1	Cultura da cana-de-açúcar	29
2.2	Sensoriamento remoto e cana-de-açúcar	31
2.3	Conteúdo de clorofila foliar: influência no comportamento espectral da folha e determinação remota	33
2.3.1	<i>Métodos de determinação do conteúdo de clorofila foliar</i>	34
2.3.1.1	Métodos destrutivos	35
2.3.1.2	Métodos não-destrutivos	35
2.4	Complexidade da determinação do conteúdo de clorofila em dosséis	36
2.5	Modelagem em agricultura.....	38
2.5.1	<i>Índices espectrais de vegetação</i>	39
2.5.2	<i>Modelos de transferência radiativa</i>	40
2.5.2.1	Modelo de reflectância de folha	41
2.5.2.2	Modelo de reflectância de dossel	42
2.6	Métodos de estimação de componentes bioquímicos de dossel	44
2.6.1	<i>Estudo das relações estatísticas diretas entre medidas de conteúdos bioquímicos foliares e de reflectância de dossel</i>	44
2.6.2	<i>Aplicação das relações obtidas em nível foliar para o nível de dossel</i>	44
2.6.3	<i>Inversão de modelos de transferência radiativa</i>	46
2.6.4	<i>Transferência da relação existente em nível foliar para o nível de dossel (scaling up) por meio de modelos de transferência radiativa</i>	48
3	MATERIAL E MÉTODOS	49

3.1	Área de estudo	49
3.2	Correção da imagem <i>Hyperion</i>	51
3.2.1	Correção de pixels anômalos	51
3.2.2	Correção atmosférica	51
3.2.3	Transformação <i>Minimum Noise Fraction</i>	52
3.3	Amostragem dos talhões.....	52
3.3.1	Amostragem de folhas.....	52
3.3.1.1	Folhas para determinação de conteúdo de clorofila	52
3.3.1.2	Folhas para determinação de conteúdo de água e de matéria seca	53
3.3.2	Determinação de <i>bioquímica foliar</i>	53
3.3.2.1	Conteúdo de clorofila.....	53
3.3.2.2	Conteúdo de água e de matéria seca.....	54
3.3.3	Reflectância de folha	54
3.3.3.1	Determinação do parâmetro estrutural N	55
3.3.4	Determinação da reflectância de solo, dos parâmetros geométricos de visada e de iluminação e dos parâmetros estruturais de dossel	56
3.3.4.1	Reflectância de solo	56
3.3.4.2	Parâmetros geométricos de visada e de iluminação	56
3.3.4.3	Parâmetros estruturais de dossel	56
3.4	Contribuição das folhas senescidas na composição da reflectância de dossel de cana-de-açúcar.....	58
3.5	Teste de sensibilidade dos índices de vegetação à variação do conteúdo de clorofila	60
3.6	Estimação de componentes bioquímicos de dossel de cana-de-açúcar (Fase A)	64
3.6.1	Modelo <i>SAILH</i>	65
3.6.2	Índices hiperespectrais	65
3.6.3	Modelos estatísticos.....	67
3.6.4	Índices <i>Hyperion</i>	67
3.6.5	Estimação de componentes bioquímicos.....	67
3.6.6	Avaliação.....	67
3.7	Validação da metodologia (Fase B).....	68
3.7.1	Dados do sensor <i>Hyperion</i>	68
3.7.2	Índices <i>Hyperion</i>	68
3.7.3	Estimação de componentes bioquímicos.....	68
3.7.4	Avaliação.....	68
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO	69

4.1	Determinação da distribuição angular de folhas dos talhões estudados	69
4.2	Contribuição das folhas senescentes na composição da reflectância de dossel de cana-de-açúcar.....	72
4.3	Sensibilidade dos índices à variação do conteúdo de clorofila.....	76
4.4	Sensibilidade dos índices à variação da arquitetura de dossel.....	78
4.5	Estimação do conteúdo de clorofila de dossel de cana-de-açúcar	79
4.5.1	<i>Fase de treinamento (Fase A)</i>	79
4.5.2	<i>Fase de validação (Fase B)</i>	83
5	CONCLUSÕES	87
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	91
	APÊNDICE A	103
	APÊNDICE B	105

LISTA DE FIGURAS

2.1 – Modelo de folhas com uma única camada (a) e com N camadas (b).	41
3.1 – Glebas amostradas nesta pesquisa (linhas brancas) e imageadas pelo sensor <i>Hyperion</i> /EO-1, localizadas nas áreas da Usina Iracema (Grupo São Martinho) e da Usina Costa Pinto (Grupo COSAN/FBA).	49
3.2 – Fluxograma das principais etapas da metodologia.	53
3.3 – Representação das folhas +3 de todos os colmos de uma planta.	52
3.4 – Reflectância e transmitância de folhas senescentes utilizada nas simulações.	55
3.5 – Espectros de folha verde de cana-de-açúcar simulados pelo modelo PROSPECT-4, utilizando intervalo de variação de conteúdo de clorofila de 10 a 35 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$	63
4.1– Médias dos espectros simulados com diferentes combinações de DAFV e DAFS correspondentes às combinações V_aC_1 (a), V_aC_2 (b), V_cC_3 (c) e V_cC_4 (d) e a média dos espectros adquiridos pelo <i>Hyperion</i> para as mesmas combinações V_nC_n	69
Figura 4.2 – Erro médio absoluto ($\rho\cdot\lambda^{-1}$), obtido entre os espectros simulados com diferentes combinações de DAF (verdes/senescentes) para os tratamentos V_aC_1 (a), V_aC_2 (b), V_cC_3 (c) e V_cC_4 e a média dos espectros adquiridos pelo <i>Hyperion</i> para os mesmos tratamentos.	70
4.3 – Erro médio absoluto, por banda, obtido entre os espectros simulados com diferentes combinações de DAF (verdes/senescentes) para a combinação V_cC_4 e a média dos espectros adquiridos pelo <i>Hyperion</i> para a mesma.	71
4.4 – Reflectância de dossel simulada pelo modelo PROSAILH para diferentes valores de IAFV e IAFS, utilizando DAFS planófila e DAFV erectófila (a) e planófila (b).	73
4.5 – Reflectância de dossel simulada pelo modelo PROSAILH para diferentes valores de IAFS, utilizando-se DAFS planófila e DAFV erectófila (a, b e c) e planófila (d, e e f); o IAFV utilizado foi igual a dois (a e d), quatro (b e e) e seis (c e f).	75

4.6 - Correlação entre as variáveis conteúdo de clorofila medido ($\mu\text{g Ccl.cm}^{-2}\text{MV}$) e índice de vegetação simulados pelo modelo PROSAILH.....	80
4.7 – Regressão entre conteúdo de clorofila medido ($\mu\text{g Ccl.cm}^{-2}\text{MV}$) e estimado ($\mu\text{g Ccl.cm}^{-2}\text{MV}$), baseada no índice de vegetação <i>PRI2</i> , correspondentes às áreas de treinamento..	82
4.8 - Regressão entre conteúdo de clorofila medido ($\mu\text{g Ccl.cm}^{-2}\text{MV}$) e estimado ($\mu\text{g Ccl.cm}^{-2}\text{MV}$), baseada no índice de vegetação <i>PRI2</i> , correspondentes às áreas de teste.	84
4.9 - Conteúdo de clorofila ($\mu\text{g Ccl.cm}^{-2}\text{MV}$) espacializado <i>pixel-a-pixel</i> , em talhões localizados na área da Usina Costa Pinto (Grupo COSAN/FBA), a partir da equação baseada no índice <i>PRI2</i>	85

LISTA DE TABELAS

- 3.1 – Cultivares de cana-de-açúcar selecionadas para o estudo e respectivos ciclos de desenvolvimento..... 50
- 3.2 – Valores nominais e intervalos dos parâmetros de entrada utilizados nas simulações de reflectâncias de dossel pelo modelo PROSAILH, para o estudo da contribuição das folhas senescidas no espectro de dossel. 59
- 3.3 – Índices de vegetação hiperespectrais, com suas respectivas fórmulas e referências, usados neste estudo. 61
- 3.4 – Valores nominais e intervalo dos parâmetros utilizados nas simulações da reflectância foliar pelo modelo PROSPECT – 4 para a realização do teste de sensibilidade dos índices à variação do conteúdo de clorofila. 62
- 3.5 – Valores nominais e intervalos dos parâmetros de entrada utilizados nas simulações de reflectâncias de dossel pelo modelo PROSAILH, para o teste de sensibilidade à arquitetura de dossel. 66
- 4.1 – Parâmetros associados à equação linear que descreve o efeito da variação do conteúdo de clorofila (C_{cb} , $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$) nos índices hiperespectrais de vegetação estudados. 77
- 4.2 – Coeficientes de correlação (r) e determinação (r^2) das equações de estimação de conteúdo de clorofila geradas a partir de índices de vegetação de espectros simulados e conteúdo de clorofila medido..... 79
- 4.3 – Coeficientes de correlação (r) e de determinação (r^2), Erro Médio (EM), Raíz da Média do Erro ao Quadrado (RMEQ) e Coeficiente de Variação da RMEQ (CV(RMEQ), %) correspondentes às oito regressões entre conteúdo de clorofila estimada, utilizando-se índices calculados a partir dos dados *Hyperion*, e medida. 81
- 4.4– Coeficientes de correlação (r) e de determinação (r^2), Erro Médio (EM), Raíz da Média do Erro ao Quadrado (RMEQ) e Coeficiente de Variação da RMEQ (CV(RMEQ), %) correspondentes à regressão entre conteúdo de clorofila estimada, utilizando-se o índice *PRI2* calculado a partir dos dados *Hyperion*, e medida. 83

LISTA DE SIGLAS E SÍMBOLOS

REM	radiação eletromagnética
VIS	região espectral do visível
IVP	infravermelho próximo
VIVP	região do visível e infravermelho próximo
IVC	infravermelho de ondas curtas
IAF	índice de área foliar
DAF	distribuição angular de folhas
FDD	função de densidade de distribuição angular
MTR	modelos de transferência radiativa
AIS	<i>Airborne Imaging Spectrometer</i>
AVIRIS	<i>Airborne Visible/Infrared Imaging Spectrometer</i>
EO-1	<i>Earth Observing-1</i>
CASI	<i>Compact Airborne Spectrographic Imager</i>
$V_n C_n$	combinações entre cultivares e ciclos de desenvolvimento
MNF	transformação <i>Minimum Noise Fraction</i>
C_{Cl}	conteúdo de clorofila $a + b$ ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\text{MV}$);
C_a	conteúdo de água ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\text{ MV}$)
C_{ms}	conteúdo de matéria seca ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}\text{ MV}$)
N	estrutura do mesofilo foliar (arranjo celular)
ρ	reflectância
τ	transmitância
θ_{visada}	ângulo zenital de visada do sensor
θ_{sol}	ângulo zenital de iluminação

1 INTRODUÇÃO

A participação da cultura da cana-de-açúcar (*Saccharum* spp.) na economia nacional nas últimas décadas tem aumentado em virtude da importância dada à questão energética mundial, o que torna a cultura objeto de estudo de inúmeras pesquisas voltadas a práticas de adubação nitrogenada que visem o aumento da produtividade sem danificar o meio-ambiente.

No entanto, os procedimentos usuais de análise foliar para recomendação de adubação têm demonstrado ineficiência na resolução de problemas como os da variação de produtividade numa mesma área e os da aplicação excessiva de nitrogênio em áreas isoladas da lavoura, fator este de poluição ambiental. Isto confirma a necessidade de estudo e desenvolvimento de novas metodologias baseadas em dados de sensores remotos que auxiliem na identificação das áreas com presença de estresse e que requeiram manejo específico e quantidades apropriadas do nutriente.

Embora em nosso País trabalhos demonstrem o potencial de uso do sensoriamento remoto em levantamentos e discriminação de áreas canavieiras, em discriminação de cultivares e em estimação de produtividade (FORTES; DEMATTÊ, 2006; GALVÃO et al., 2005; JOAQUIM, 1998; RUDORFF; BATISTA, 1985, 1990, 1991, 2004; TISOT et al., 2007), poucos esforços são direcionados ao monitoramento das condições nutricionais dos canaviais com dados sensoriados remotamente.

A estimativa do conteúdo de clorofila nas folhas pode ser considerada como indicativo dos níveis de nitrogênio nas folhas, porém, fatores como estágio de crescimento, clima, genética (cultivares diferentes) e hora do dia em que os dados são coletados podem contribuir para as variações nas medidas de clorofila. Medidores de clorofila, como o clorofilômetro SPAD-502, fornecem informações auxiliares ao manejo da adubação nitrogenada, porém sua utilização torna-se inviável em grande escala, além de ser ineficiente na detecção de áreas isoladas no interior das lavouras.

Com os desenvolvimentos tecnológicos no campo dos sensores remotos orbitais, vislumbram-se potencialidades de coletas de dados de forma rápida, precisa e

otimizada, podendo-se estimar diversas propriedades dos canaviais. Por exemplo, utilizando-se dados oriundos de sensores orbitais hiperespectrais, mapas de clorofila de talhões de cana-de-açúcar poderão ser gerados a partir da estimativa do conteúdo de clorofila do dossel da cultura, possibilitando a identificação de variações de nitrogênio existentes nos talhões, fornecendo assim importantes informações às práticas de manejo da adubação nitrogenada dentro do contexto da agricultura de precisão.

A absorção da radiação eletromagnética (REM) pelas clorofilas *a* e *b* (presentes nos cloroplastos) varia com o comprimento de onda, com forte absorção na região espectral do visível (VIS) correspondente ao azul (400-500 nm) e ao vermelho (600-700 nm) e menor absorção na região correspondente ao verde (500-600 nm), possibilitando a identificação de vegetação sadia e de vegetação sob estresse pela análise de suas feições espectrais.

Embora as propriedades ópticas de um dossel sejam extremamente dependentes da interferência causada pelas propriedades ópticas das folhas e, conseqüentemente, de sua composição bioquímica, estas são insuficientes para explicar as características de reflectância de um dossel imageado por sensores remotos (COLWELL, 1974), em que outros fatores e origens de reflectância e de espalhamento da radiação são introduzidos (PETERSON et al., 1988), como as propriedades ópticas do solo e as características estruturais de dossel (presença ou não de folhas senescidas, índice de área foliar _ IAF_ e distribuição angular de folhas _ DAF_ verdes e/ou senescidas).

Índices ópticos hiperespectrais sensíveis à variação de bioquímica foliar são comumente utilizados para a estimação de conteúdo de clorofila a partir de dados de reflectância de dossel. No entanto, para que índices de vegetação originados em estudo foliar possam ser utilizados para a predição de conteúdo de clorofila de dossel, métodos envolvendo modelos de transferência radiativa (MTR), capazes de estabelecer conexões entre folha e dossel devem ser mais explorados.

O uso de MTR de folha e de dossel acoplados permite que a aplicação de índices de vegetação gerados em escala de folha seja avaliada em diversos dosséis hipotéticos,

selecionando aqueles de maior sensibilidade ao conteúdo de clorofila e de menor sensibilidade aos demais fatores inerentes ao meio capazes de interferir na resposta espectral do mesmo.

Desta forma, considerando a hipótese de que diferenças no conteúdo de clorofila de folhas e de dosséis refletem-se em feições hiperespectrais distintas e que as folhas senescidas dos dosséis interferem nestas feições, a presente pesquisa teve como objetivos:

- a) avaliar a interferência das folhas senescidas dos dosséis de cana-de-açúcar nos dados espectrais orbitais;
- b) identificar os índices hiperespectrais de vegetação menos sensíveis aos efeitos da estrutura de dossel da cultura de cana-de-açúcar utilizando modelos de transferência radiativa; e
- c) gerar modelos estatísticos para estimar o conteúdo de clorofila de cana-de-açúcar com base em índices hiperespectrais simulados em escala de dossel, permitindo a posterior espacialização desta variável *pixel-a-pixel* na imagem *Hyperion*.

2 FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 Cultura da cana-de-açúcar

A cultura da cana-de-açúcar estabeleceu no Brasil ciclos de grande importância econômica e social, por gerar divisas e ser fonte de energia renovável. A cana-de-açúcar e seus co-produtos são a segunda principal fonte de energia no País, representando 16% da oferta, atrás apenas do petróleo.

Os principais produtos produzidos a partir da cana-de-açúcar são o álcool e o açúcar. Estima-se para a safra 2009/2010 cerca de 26,3 bilhões de litros de álcool e 31,2 milhões de toneladas de açúcar (3% e 7%, respectivamente, a mais que a produção obtida na safra anterior), posicionando o Brasil no primeiro lugar mundial em produção de açúcar (UNICA, 2009). De acordo com a previsão feita pelo Plano Decenal do setor energético, a demanda interna de etanol deverá crescer em torno de 11% ao ano até 2017 e, conseqüentemente, a área de cultivo da cultura.

As principais variedades cultivadas na região Centro-Sul são: SP77-5181, SP79-1011, SP80-1816, SP80-1842, SP80-3280, SP81-3250, SP83-2847, SP83-5073, SP84-2025, SP84-1431, SP85-3877, SP85-5077, SP86-46, SP86-155, SP87-365, SP89-1115, SP90-1638, RB72-454, RB83-5486, RB85-5036, RB85-5113, RB85-5156, RB85-5536, RB85-5453, RB86-5230, RB86-7515, IAC87-3396 e PO88-62 (SOCICANA, 2008). A seguir seguem as principais características, de cinco das cultivares mais plantadas no Estado de São Paulo, descritas por Arizono (2003):

RB85-5453: boa brotação de soqueira; bom perfilhamento e fechamento de entrelinhas, hábito de crescimento ereto, raro tombamento, colmos medianamente empalhados, folhas de largura e comprimento médios com curvatura na ponta, média exigência em solos, muito exigente em água.

RB85-5536: boa germinação, ótima brotação de soqueira, médio perfilhamento da cana-planta e alto da cana-soca, velocidade de crescimento regular, porte médio, tomba com certa facilidade, hábito de crescimento ereto e aberto, colmos semi-empalhados, folhas

de largura e comprimento médios arqueadas.

RB72-454: germinação regular, má brotação das socas por pisoteio em solos argilosos úmidos, médio perfilhamento da cana-planta e da cana-soca, regular velocidade de crescimento, porte médio, hábito de crescimento ereto, bom fechamento das entrelinhas, raro tombamento, alta densidade de colmo, colmos empalhados, folhas novas espetadas podendo apresentar-se dobradas nas pontas e folhas mais velhas curvadas no terço inferior.

SP80-3280: crescimento inicial vigoroso, intermediário perfilhamento, bom fechamento de entrelinhas, regular tombamento, média exigência em fertilidade do solo e boa brotação de soqueira.

SP80-1816: rala na cana-planta mas diferencia-se pela brotação de soqueira, rápido desenvolvimento vegetativo, porte ereto, excelente perfilhamento e fechamento de entrelinhas, não apresenta tombamento, média exigência em fertilidade do solo.

Na região Centro-Sul, a safra de cana-de-açúcar tem início no mês de abril e termina em novembro do mesmo ano, dependendo da época de maturação da variedade cultivada. As variedades para finalidades industriais podem ser: precoces, quando no início da safra (abril, no Estado de São Paulo) já apresentam alto teor de açúcar; médias, quando o teor é atingido em meados de julho a agosto, e tardias, quando entram em maturação a partir do mês de setembro (CESAR; SILVA, 1993).

Dos fatores intrínsecos à planta, responsáveis pela elevada produção vegetal, destaca-se o IAF, o qual varia entre as cultivares. A arquitetura foliar do dossel da cultura também tem sua importância; a disposição vertical das folhas em relação ao colmo proporciona maior penetração da luz no interior do dossel (que geralmente possui alta densidade populacional), refletindo em maior capacidade fotossintética (MAGALHÃES, 1987).

Quanto aos fatores externos, a aplicação de adubo nitrogenado contribui indiretamente com o aumento da produção, pois, ao elevar o teor de nitrogênio, ocorre um incremento na produção de fitomassa e, conseqüentemente, do IAF. Contrariamente, havendo

deficiência de nitrogênio, a planta apresenta redução na síntese de clorofila e de aminoácidos essenciais e na energia necessária à produção de carboidratos e esqueletos carbônicos (ALEXANDER, 1973; EPSTEIN, 1975; MALAVOLTA; HAAG, 1964; SILVEIRA, 1980; VAN DILLEWIJN, 1952), prejudicando a fotossíntese.

A busca por baixos custos de produção e altos rendimentos implica em conhecer detalhadamente o ambiente no qual a cultura está inserida. No entanto, em virtude da inexistência de áreas agrícolas em condições perfeitamente homogêneas quanto ao estado nutricional e à fitossanidade das plantas, é necessário o desenvolvimento de tecnologias, como as baseadas em dados de sensores remotos, que possibilitem a identificação de áreas no interior dos canaviais em que as plantas apresentem sintomas de estresse, evitando assim que a produtividade da cultura seja afetada.

2.2 Sensoriamento remoto e cana-de-açúcar

As investigações de sensoriamento remoto em áreas de cana-de-açúcar foram inicialmente realizadas com sensores multiespectrais e abordavam questões importantes como: classificação e mapeamento (MENDONÇA, 1989; RUDORFF et al., 2004; TARDIN et al., 1992), manejo (YANG et al., 1997), estimativa de produtividade (RUDORFF, 1985; RUDORFF; BATISTA, 1990) e discriminação varietal (FORTES; DEMATTÊ, 2006; JOAQUIM, 1998).

A partir de meados da década de oitenta, o sensoriamento remoto hiperespectral (sensores com bandas espectrais estreitas localizadas em específicas posições do espectro) obteve expressivo avanço tecnológico, aumentando a habilidade humana de mapear atributos de vegetação (CURRAN et al., 2001). O uso destes instrumentos possibilita a aquisição de dados com resolução espectral suficiente para reconstituir bandas de absorção, as quais apresentam o potencial de fornecer informações sobre os conteúdos de componentes bioquímicos de dosséis vegetais.

Com o desenvolvimento de sensores hiperespectrais aerotransportados, como o *Airborne Imaging Spectrometer* (AIS) e o *Airborne Visible/Infrared Imaging*

Spectrometer (AVIRIS), foi possível o advento do sensoriamento remoto hiperespectral orbital, destacando-se atualmente o imageador hiperespectral *Hyperion*, a bordo do satélite *Earth Observing-1* (EO-1) lançado em 21 de novembro de 2000 (NASA, 2008).

O sensor *Hyperion* possui resolução espectral e intervalo de amostragem de 10 nm, com 242 bandas espectrais potenciais, o que o torna atualmente a melhor opção para estudos (a partir de dados orbitais) de componentes bioquímicos de plantas. O *Hyperion* possui dois espectrorradiômetros, um para a região do VIS e infravermelho próximo (IVP) e outro para a região do infravermelho de ondas curtas (IVC), faixa de imageamento de 7,5 km, resolução espacial de 30 m e temporal de 16 dias (considerando visada nadir).

Recentes estudos indicam as vantagens do uso de sensores hiperespectrais na obtenção de informações qualitativas ou quantitativas da vegetação, no entanto, em poucos deles foram utilizados dados hiperespectrais oriundos de sensores orbitais para o estudo da cultura da cana-de-açúcar. Dentre eles, destacam-se os realizados por Apan et al. (2004), ao estudar índices hiperespectrais de vegetação para detecção de doença foliar (*Puccinia kuehnii*) em cana-de-açúcar; Galvão et al. (2005), ao discriminar cinco cultivares de cana-de-açúcar usando valores de reflectância das bandas, razões de reflectância e índices hiperespectrais; e Tisot et al. (2005), ao discriminar cultivares de cana-de-açúcar por classificação supervisionada.

Embora em nosso País trabalhos demonstrem o grande potencial do uso do sensoriamento remoto no estudo do comportamento espectral da cana-de-açúcar, ainda existe carência de conhecimento referente a este assunto. Com o uso de dados adquiridos pelo sensor *Hyperion*, torna-se possível avaliar o uso da tecnologia do sensoriamento remoto hiperespectral não apenas para a diferenciação de cultivares de cana-de-açúcar como também para a estimação de conteúdo de clorofila, considerado um bioindicador do estado nutricional.

2.3 Conteúdo de clorofila foliar: influência no comportamento espectral da folha e determinação remota

A manifestação de estresses nutricionais nas plantas é resultado da ação de um ou mais fatores, como: pragas, doenças, características físico-químicas do solo e temperatura e umidade inadequadas.

Os bioindicadores do estado nutricional, por serem críticos à ação fotossintética ou por serem produtos da mesma, podem dar indícios do estado de sanidade ou de estresse da cultura. A clorofila é um fotoreceptor responsável por converter a energia solar em energia química, desempenhando uma importante função na fotossíntese das plantas (VERON; SEELY, 1966).

Por ser indicador da capacidade fotossintética da planta, o conteúdo de clorofila foliar é um dos mais importantes bioindicadores de estresse nutricional em vegetação, assim como do estágio de crescimento e da produtividade da cultura (WHITTAKER; MARKS 1975). Ainda, em virtude da presença de nitrogênio nas moléculas de clorofila, faz-se evidente a forte relação existente entre conteúdo de clorofila e conteúdo de nitrogênio nas folhas (YODER; PETTIGREW-CROSBY, 1995), podendo assim ser utilizado como estimador dos níveis de nitrogênio na cultura (BLACKMER; SCHEPERS, 1995; DAUGHTRY et al., 2000; PIEKIELEK et al., 1995; JOHNSON et al., 1994) e, indiretamente, no solo (WOOD et al. 1993).

As folhas de cana-de-açúcar apresentam uma estrutura interna especializada denominada Anatomia de Kranz, caracterizada por um feixe vascular bastante desenvolvido rodeado por células denominadas células da bainha do feixe vascular, que apresentam cloroplastos geralmente sem a presença de grana. Estas células são rodeadas por células mesofílicas paliçádicas contendo cloroplastos com a presença de grana, muito semelhantes aos cloroplastos das plantas C3. É nas células da bainha do feixe vascular e nas células paliçádicas que ocorre a fotossíntese nas plantas C4 (VAN DILLEWIJN, 1952). As clorofilas *a* e *b* (presentes nos cloroplastos) são os pigmentos mais importantes, sendo que a absorção da REM varia com o comprimento de onda,

com forte absorção na região espectral do VIS correspondente ao azul (400-500 nm) e ao vermelho (600-700 nm) e menor absorção na região correspondente ao verde (500-600 nm).

Os outros pigmentos presentes na folha são normalmente mascarados pela absorção causada pelas clorofilas *a* e *b*. Este é o caso de pigmentos como os β -carotenos e as xantofilas, absorvedores da REM na região correspondente ao azul. Em estágios avançados de senescência e sob condições de estresse, o conteúdo de clorofila nas folhas decresce permitindo a predominância de outros pigmentos, principalmente dos β -carotenos, dos taninos e das xantofilas. Diferenças entre a reflectância de vegetação sadia e de vegetação sob estresse, devido a mudanças nos níveis de pigmentos, são detectadas no *green peak* (pico posicionado na região espectral do verde, aproximadamente em 550 nm) e no *red edge* (transição entre a baixa reflectância na região do vermelho e a alta reflectância na do IVP, entre 690 e 750 nm) (CARTER, 1994; GITELSON; MERZLYAK, 1996; ROCK et al., 1988; VOGELMANN et al., 1993). Isto permite que a avaliação dos níveis de pigmentos da cultura da cana-de-açúcar seja realizada por métodos de detecção remota com sensores hiperespectrais, identificando as plantas sob estresse em virtude da variação do conteúdo de clorofila.

Interpretações de feições espectrais da cultura da cana-de-açúcar requerem algum entendimento da sua morfologia e fisiologia. Como a organização dos tecidos foliares e o metabolismo primário são comuns a todas as cultivares, as diferenças entre cultivares da cultura e para cultivares em crescimento sob condições diferenciadas são expressas por alterações nas proporções dos constituintes foliares.

2.3.1 Métodos de determinação do conteúdo de clorofila foliar

Os diferentes métodos de determinação do conteúdo de clorofila foliar podem ser divididos em duas categorias: métodos destrutivos e não-destrutivos. Na primeira categoria são utilizadas amostras de folhas coletadas para a realização de análises bioquímicas laboratoriais, destruindo o tecido foliar; enquanto que na segunda instrumentos ópticos são utilizados diretamente sobre as folhas sem a necessidade de

coletá-las, preservando o tecido foliar.

2.3.1.1 Métodos destrutivos

Considerados os métodos tradicionais para determinação de conteúdo de clorofila, estes métodos incluem a coleta de amostras de folhas, destruição do limbo foliar, extração dos pigmentos com solventes e leitura da absorvância da solução em espectrofotômetro. Estes valores, obtidos em três comprimentos de onda distintos, são utilizados em equações empíricas para que o conteúdo de clorofila seja calculado.

Dentre os solventes utilizados para a extração de clorofila (*a* e *b*), os mais usuais são os miscíveis, como: metanol, etanol e acetona, podendo haver variações em suas concentrações.

Estes métodos, como os propostos por Arnon (1949) e Lichtenthaler (1987), embora consagrados no meio científico, apresentam desvantagens que devem ser consideradas principalmente quando grande número de amostras foliares é analisado: elevados custos laboratoriais e com solventes; tempo para a realização das análises, principalmente quando o processo de centrifugação faz-se necessário; e o mais importante, destruição do tecido foliar, o qual afeta o desenvolvimento da planta.

Em virtude das desvantagens apresentadas acima, métodos não-destrutivos foram desenvolvidos com base nas propriedades espectrais ópticas da clorofila.

2.3.1.2 Métodos não-destrutivos

Equipamentos ópticos, como o SPAD-502 (Minolta Corporation, Japão), realizam determinações rápidas e não-destrutivas de níveis de clorofila foliar. O princípio de funcionamento é a transmitância adquirida nas regiões espectrais do vermelho e do IVP (650 nm e 940 nm).

O valor de clorofila em unidade SPAD é positivamente relacionado ao conteúdo de clorofila foliar extraído com solvente (ARGENTA et al., 2001; CASTELLI et al., 1996); no entanto, trata-se de uma relação linear meramente empírica por não considerar diferenças morfológicas e outros pigmentos foliares absorvedores de

radiação (carotenóides, antocianinas etc.).

A variação dos coeficientes na equação linear entre espécies de plantas (AHMAD et al., 1999) sugere a necessidade de calibrar as leituras dos valores SPAD com os conteúdos de clorofila extraídos em laboratório para cada variedade de cana-de-açúcar a ser estudada e até mesmo para mesma variedade porém em fases de desenvolvimento diferentes. Ainda, a utilização deste tipo de equipamento torna-se inviável quando o objetivo é a detecção de estresse nutricional em áreas isoladas no interior de canaviais.

2.4 Complexidade da determinação do conteúdo de clorofila em dosséis

A possibilidade de adquirir dados espectrais de dosséis com sensores remotos imageadores permite que a determinação do conteúdo de clorofila dos canaviais não fique limitada às bordaduras dos talhões; no entanto, embora as propriedades ópticas de um dossel sejam extremamente dependentes da interferência causada pelas propriedades ópticas das folhas e, conseqüentemente, de sua composição bioquímica, estas são insuficientes para explicar as características de reflectância de um dossel imageado por sensores remotos (COLWELL, 1974), em que outros fatores e origens de reflectância e de espalhamento da radiação são introduzidos (PETERSON et al., 1988).

Propriedades ópticas do solo e características estruturais de dossel, como IAF e DAF, contribuem para a variação angular do espalhamento dos fótons no interior do dossel (GOEL, 1988; MYNENI; ASRAR, 1993). Neste contexto, o espalhamento dos fótons é orientado em um espaço tridimensional, onde interage com as múltiplas superfícies que compõem o dossel (ASNER, 1998).

Dosséis mais erectófilos, como o da cultura da cana-de-açúcar, contribuem significativamente em maior absorvância no VIS e maior reflectância no IVP em relação a dosséis de arquitetura planófila, como o da soja (JACKSON; PINTER, 1986). Esta característica estrutural é altamente desejável na cultura da cana-de-açúcar, pois maior é a penetração da radiação no dossel e, conseqüentemente, maior a atividade fotossintética da planta. No entanto, em canaviais imageados por sensores remotos, a

arquitetura mais erectófila favorece a interferência de constituintes não-fotossinteticamente ativos nos dados espectrais adquiridos, em virtude do elevado espalhamento da radiação incidente na região do IVP pelas folhas senescidas presas aos colmos, conforme constatação feita por Galvão et al. (2005)

Este efeito causado na reflectância de dosséis devido à DAF é muito afetado em função dos ângulos zenitais de visada do sensor e de iluminação solar (GOEL, 1988). Na ausência do efeito *hotspot*, a reflectância das plantas com folhas eretas decresce na região do VIS com o aumento do ângulo zenital solar, enquanto na região do IVP aumenta (KIMES, 1984).

Para fins de sensoriamento remoto, os dosséis são usualmente descritos por um dos seis tipos de DAF descritos por De Wit (1965): planófila, erectófila, plagiófila, extremófila, uniforme e esférica.

Como nem todas as folhas de um dossel possuem a mesma inclinação, a DAF é caracterizada por uma função de densidade de distribuição angular (FDD) e não apenas pela inclinação média das folhas (GUYOT et al., 1989). A FDD de folhas é não-dimensional e determina a probabilidade de área da folhagem da planta estar orientada em uma dada direção zenital (ROSS; NILSON, 1967).

Quanto à cultura da cana-de-açúcar, as diferenças espectrais entre dosséis estão relacionadas à arquitetura foliar, às diferenças de biomassa e à concentração de água e de nutrientes nas folhas (JOAQUIM, 1998). Também a proporção de sombreamento no interior do dossel e a quantidade de folhas senescidas presas aos colmos são consideradas fatores importantes na diferenciação espectral, em virtude da potencial influência exercida por estes na resposta espectral dos dosséis da cultura (GALVÃO et al., 2005).

Desta maneira, diferenças de comportamento espectral foliar e de dossel da cultura podem ser associadas a parâmetros agrônômicos (IAF e DAF) e a parâmetros bioquímicos particulares a cada variedade. Vale ressaltar que diferentes áreas ocupadas por uma mesma variedade de cana-de-açúcar podem apresentar comportamentos

espectrais diferenciados, devendo-se levar em consideração fatores como: o estágio de desenvolvimento da cultura; o solo, se irrigado ou não; a época de plantio; a posição solar (época do ano e latitude-longitude); o sistema de cultivo e a posição no relevo.

2.5 Modelagem em agricultura

Modelo é uma representação de um sistema em determinada forma de linguagem, não necessariamente a linguagem matemática.

Os modelos matemáticos são descrições construídas em linguagem matemática, mediante simplificações do sistema, enquanto que a modelagem é o processo de desenvolvimento desta representação. A simulação inclui os processos necessários para a operacionalização ou solução do modelo, visando simular o que acontece no sistema, muitas vezes ainda não testado em cenário real (DE WIT, 1978).

Entende-se por sistema um conjunto de elementos que descrevem as principais características de uma situação real a estudar, sendo que a seleção destes elementos depende dos objetivos do estudo (DE WIT, 1978; PESSOA et al., 1997). Quanto melhor a interpretação dada aos fenômenos envolvidos no sistema, maior exatidão será alcançada na sua descrição (PESSOA et al., 1997).

Os modelos matemáticos podem ser classificados em dois grandes grupos: (i) modelos mecanísticos, e (ii) modelos empíricos. Os modelos mecanísticos permitem entender a resposta de um sistema biológico a uma ação de um agente externo (interação sistema-meio), como a resposta espectral da folha adquirida por sensores orbitais à ação da incidência da radiação solar em dosséis de cana-de-açúcar. O sistema é subdividido em compartimentos que interagem entre si. O entendimento da interação entre estes compartimentos possibilita compreender o mecanismo de funcionamento do sistema (THORNLEY, 1976).

No meio agrônomo, os modelos matemáticos mais difundidos são os empíricos. São essencialmente descritivos e identificados por equações matemáticas capazes de representar os dados experimentais de forma aceitável (PROSSER, 1993), no entanto,

apenas descrevendo o fato observado sem possibilitar a compreensão do mecanismo de funcionamento do sistema (THORNLEY, 1976). Por resultar exclusivamente de dados experimentais, qualquer tipo de extrapolação para condições diferentes daquelas em que os dados originais foram obtidos é extremamente limitada. Em consequência, a experimentação é feita de forma repetitiva no espaço e no tempo, até que se consiga acumular um volume considerável de informações que permitam parametrizar os resultados e fazer inferências e previsões calibradas (PESSOA et al., 1997). Exemplo de sua aplicação em sensoriamento remoto é a estimativa de componentes bioquímicos de dosséis utilizando índices de vegetação gerados em escala de folha para dados adquiridos por sensores orbitais. Cabe salientar que os dois tipos de modelos são úteis e amplamente utilizados pelos pesquisadores, porém, o modelo mecanístico, sempre que possível, é preferível (THORNLEY, 1976).

2.5.1 Índices espectrais de vegetação

Índices ópticos hiperespectrais sensíveis à variação de bioquímica foliar são comumente utilizados para a estimação de conteúdo de clorofila a partir de dados de reflectância de dossel. No entanto, alguns estudos desconsideram o fato de que estes índices são gerados em escala de folha, onde as relações obtidas entre dados espectrais e o componente bioquímico em questão são facilmente observadas (GAMON et al., 1997; GAMON; SURFUS, 1999; GITELSON et al., 1999; PEÑUELAS et al., 1997).

Ao utilizar índices de vegetação no mapeamento de atributos da vegetação, deve-se levar em consideração que seus valores poderão ser influenciados não apenas em função da estrutura dos dosséis (IAF e DAF), mas também dos fatores inerentes ao meio, como: solo, componentes não-fotossintéticos do dossel (folhas senescidas presas aos colmos, no caso da cultura da cana-de-açúcar) e ângulos zenitais de iluminação e de visada.

A seleção de índices de vegetação capazes de amenizar os efeitos causados pelas estruturas internas das folhas e pelos fatores inerentes ao meio não é simples, em virtude das inúmeras possibilidades de combinações de faixas espectrais e de transformações. Esta seleção é realizada de maneira empírica, em que dados espectrais adquiridos em

laboratório ou a campo são analisados usando técnicas estatísticas (CARTER, 1994).

Para que os índices de vegetação originados em estudo foliar possam ser utilizados em grande escala para a estimação de conteúdo de clorofila de dossel, métodos envolvendo modelos de MTR, capazes de estabelecer conexões entre folha e dossel devem ser mais explorados.

O uso de MTR de folha e de dossel acoplados permite que a aplicação de índices de vegetação gerados em escala de folha seja avaliada em diversos dosséis hipotéticos, selecionando-se aqueles de maior sensibilidade ao conteúdo de clorofila e de menor sensibilidade aos demais fatores inerentes ao meio capazes de interferir na resposta espectral do mesmo.

Desta maneira, as interações fóton-vegetação nas duas diferentes escalas (folha e dossel) são consideradas adequadamente, evitando que uma simples relação entre a reflectância de folha e o conteúdo de clorofila, para um dado comprimento de onda, seja estabelecida para a estimação deste em escala de dossel.

2.5.2 Modelos de transferência radiativa

Em virtude das restrições de aplicação de modelos estatísticos gerados a partir de conteúdo de componentes bioquímicos e índices de vegetação, métodos físicos foram desenvolvidos possibilitando o seu uso integrado a índices sensíveis aos componentes bioquímicos de interesse. Estes métodos são baseados tanto nos processos de transferência radiativa que ocorrem no interior do dossel quanto nos que explicam a influência de componentes bioquímicos foliares na resposta espectral (JACQUEMOUD et al., 1995).

Dentre os modelos de transferência radiativa utilizados para modelar a reflectância de folha e a de dosséis homogêneos, destacam-se o modelo de reflectância foliar PROSPECT (JACQUEMOUD; BARET, 1990) e o de reflectância de dossel SAIL (*Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves*), respectivamente (VERHOEF, 1984). A descrição destes modelos é feita a seguir.

2.5.2.1 Modelo de reflectância de folha

O desenvolvimento de modelos físicos foliares surgiu em virtude da necessidade de descrever as propriedades ópticas da folha de forma mais precisa. Os modelos mais simples, chamados *Plate Models*, consideram a lâmina foliar como uma única camada de absorção e espalhamento (ALLEN et al., 1969). Nos mais complexos (*Ray Tracing Models*) todas as células são descritas em detalhes (ALLEN et al., 1973). Estes são os únicos modelos capazes de considerar a complexidade da estrutura interna foliar (forma, tamanho, posição e conteúdo bioquímico).

Dentre os modelos de reflectância de folha mais conhecidos pode-se citar o modelo PROSPECT, desenvolvido por Jacquemoud e Baret (1990), o qual simula as propriedades ópticas da folha de 400 a 2.500 nm com um número de parâmetros de entrada mínimo para facilitar a sua inversão.

Este modelo, baseado no *Plate Model* desenvolvido por Allen et al. (1969; 1970) que considera uma folha como uma lâmina compacta com superfícies rugosas (Figura 2.1a), foi estendido a folhas não compactas com N camadas separadas por $N - 1$ espaços airados (Figura 2.1b).

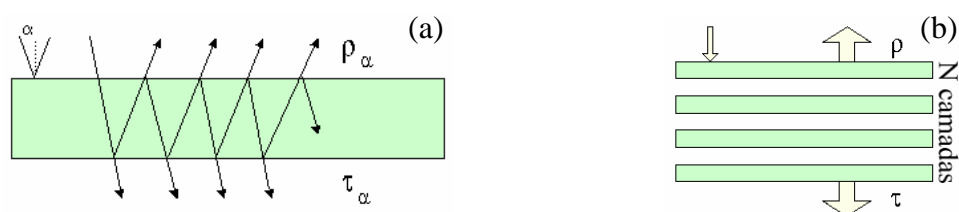


Figura 2.1 – Modelo de folhas com uma única camada (a) e com N camadas (b).

Fonte: Adaptada de Jacquemoud e Ustin (2001).

O modelo original requer apenas três parâmetros de entrada (parâmetro estrutural N , conteúdo de clorofila e conteúdo de água), no entanto, apenas as propriedades ópticas de folhas verdes podem ser simuladas.

No intuito de viabilizar a simulação das propriedades ópticas também de folhas secas, componentes da parede celular passaram a ser considerados (proteína, celulose,

hemicelulose e lignina) no modelo, simulando com sucesso a reflectância e a transmitância de folhas de milho secas artificialmente (caracterizadas por poucas interfaces ar-parede celular) (JACQUEMOUD et al., 1996); já Baret e Fourty (1997) optaram por considerar o conteúdo de matéria seca como um todo, ao invés de discretizá-lo em seus componentes bioquímicos.

De forma geral, no modelo PROSPECT o espalhamento é descrito por quatro parâmetros: ângulo de incidência máximo que define o ângulo sólido (Ω) do feixe que incide na folha (α), coeficiente de transmissividade (θ), índice de refração espectral (n) e parâmetro que caracteriza a estrutura do mesófilo foliar (N). A absorção é modelada utilizando-se um coeficiente de absorção k , produto do coeficiente de absorção espectral específico (K) (o qual possui relação com o parâmetro θ) de cada componente bioquímico pelo conteúdo do componente em questão. A matemática do modelo é descrita por Jacquemoud et al. (1990).

Nas versões mais recentes do modelo PROSPECT (versões 4 e 5), as constantes ópticas e físicas referentes aos parâmetros rugosidade de superfície foliar (definida por α), coeficiente de absorção e índice de refração dos componentes bioquímicos foliares foram calibradas e validadas. Da mesma forma que na versão original, o PROSPECT-4 assume todos os pigmentos fotossintéticos (clorofilas e carotenóides) como sendo apenas clorofila, gerando bons resultados ao simular a reflectância e a transmitância de folhas verdes, visto que a resposta espectral dos carotenóides neste caso é mascarada pela presença de clorofila. O PROSPECT-5 foi desenvolvido no intuito de inserir nos espectros simulados a contribuição exercida pelos carotenóides na região espectral do visível, parâmetro este relevante, porém, somente quando espectros de folhas senescentes são simulados (FERET et al., 2008).

2.5.2.2 *Modelo de reflectância de dossel*

Modelos de reflectância de dossel podem ser classificados em quatro diferentes categorias, dependendo das hipóteses e da teoria usada em sua formulação. Diferentes tipos de dossel apresentam características que permitem determinadas suposições e conseqüentemente o uso de um modelo de reflectância de dossel em particular. Por

exemplo: dosséis agrícolas de culturas anuais podem ser facilmente consideradas como meio turvo horizontalmente homogêneo. Esta categoria pode ser dividida em 3 tipos, sendo que neste ítem será dada ênfase apenas à aplicação da teoria de Kubelka_Munk (K-M). Uma discussão mais detalhada das categorias de modelos de reflectância de dossel e de seus respectivos tipos pode ser encontrada em Goel (1988).

Em modelos de meio turvo, o dossel é considerado um meio plano infinitamente prolongado em que dimensões não aleatórias, distâncias ou distribuições de elementos são ignoradas. A arquitetura do dossel é definida pelo IAF e pela DAF e, portanto, nenhum efeito geométrico, além da inclinação das folhas, é considerado. Em cada camada, os elementos da vegetação são tratados como pequenas partículas absorvedoras e espalhadoras, com propriedades ópticas e geométricas fornecidas ao modelo. Esta categoria de modelo é útil principalmente para simulação de dosséis densos, como os de trigo, soja e milho (GOEL, 1988). Até o momento, é desconhecido o relato do uso deste modelo, acoplado ou não a um modelo de reflectância foliar, para o estudo de dosséis de cana-de-açúcar.

O modelo *Scattering by Arbitrarily Inclined Leaves* (SAIL) desenvolvido por Verhoef (1994), versão melhorada do modelo *Suits* (SUITS, 1972), computa coeficientes de espalhamento e de absorção para qualquer ângulo foliar. O modelo é função do ângulo de visada considerando as folhas de inclinação arbitrária sob a suposição de que a distribuição foliar em azimute é uniforme. Em muitos modelos de reflectância de dossel, a fração de área foliar para os respectivos ângulos é considerada azimutalmente simétrica e é considerada como uma boa aproximação para muitos tipos de vegetação.

Em cada camada do dossel, a DAF é discretizada em oito grupos de frequência de inclinação no intervalo de 0° a 80° , a cada 10° , e em seis grupos no intervalo de 80° a 90° , a cada 2° . Este refinamento a partir dos 80° é usado em virtude dos coeficientes de extinção e de espalhamento serem muito sensíveis a variações de DAF nesta faixa de inclinação foliar quando o ângulo zenital de visada está a nadir (GOEL, 1988).

Os parâmetros utilizados como entrada no modelo SAIL são: ângulo zenital de visada

do sensor, ângulo azimutal de visada do sensor em relação ao sol, ângulo zenital de iluminação, DAF, IAF, reflectância e transmitância de folha e reflectância de solo.

2.6 Métodos de estimação de componentes bioquímicos de dossel

Quatro diferentes metodologias são comumente aplicadas em predições de conteúdo de componentes bioquímicos a partir de reflectância de dossel adquirida por sensores aerotransportados ou orbitais. Cada uma delas possui vantagens e limitações, de acordo com a complexidade da abordagem da modelagem selecionada e com o grau de aplicabilidade em sensoriamento remoto, se local ou generalizada (ZARCO-TEJADA et al., 2001).

2.6.1 Estudo das relações estatísticas diretas entre medidas de conteúdos bioquímicos foliares e de reflectância de dossel

Neste caso nenhuma medida de reflectância foliar é realizada. Desta forma, a relação entre reflectância de dossel e conteúdo de componentes bioquímicos foliares se dá por relações estatísticas. Nos casos de estudo realizados por Johnson et al. (1994) e por Matson et al. (1994), resultados da análise multivariada, utilizando o procedimento stepwise, entre bandas de reflectância do sensor AVIRIS e conteúdos de clorofila, de amido, de lignina, de nitrogênio total e IAF, apresentaram bons coeficientes de determinação para bandas específicas. No entanto, embora correlações significantes tenham sido encontradas, não pode ser inferida capacidade preditiva em outras áreas de estudo à equação gerada, visto que as relações derivadas empiricamente para a área em questão foram afetadas pela espécie vegetal em questão, pela estrutura de dossel (IAF e DAF), pela influência do solo e pela geometria de visada e iluminação específica àquela imagem.

2.6.2 Aplicação das relações obtidas em nível foliar para o nível de dossel

A aplicação das relações em nível foliar diretamente sobre dados de reflectância de dossel por meio de índices ópticos é considerada um método tradicional para a

estimação de componentes bioquímicos de dossel.

Esta metodologia permite a derivação de relações baseadas em índices ópticos calculados a partir de comprimentos de onda onde sutis mudanças na reflectância da folha correspondem a processos biofísicos específicos, os quais se objetiva medir em nível de dossel. A análise de regressão múltipla, utilizando o procedimento stepwise, é usada frequentemente para desenvolver algoritmos de predição a partir de reflectância foliar. Estes algoritmos são então aplicados aos dados de reflectância de dossel, como os adquiridos pelo sensor AIS (PETERSON et al., 1988) e pelo sensor AVIRIS (ZAGOLSKI et al., 1996). Por serem dependentes da espécie e da área de estudo a partir da qual foi gerada a equação de regressão (CHAPPELLE et al., 1992; GITELSON; MERZLYAK, 1997), as relações estatísticas derivadas em nível foliar por esta metodologia precisam ser calibradas para serem utilizadas na estimação de componentes bioquímicos em nível de dossel. Isto se deve ao fato das diferenças entre os dois meios: um onde a relação é derivada (folha) e outro onde a equação será aplicada para estimação (dossel), isto é, um dossel não pode ser assimilado a partir de uma pilha de folhas. Após a calibração, a equação será uma função da estrutura do dossel da espécie vegetal em questão e da geometria de visada do sensor, porém referente àquele momento de aquisição da imagem. Conforme demonstrado por Jacquemoud (1993), as variações de arquitetura de dossel, geralmente parametrizadas pela orientação foliar e pelo IAF, induzem distorções espectrais.

Alguns estudos foram realizados no intuito de identificar as bandas espectrais menos sensíveis à mudança de nível de aquisição de dados, comparando-se os valores dos índices obtidos em nível foliar com os obtidos em nível de dossel, minimizando assim os efeitos causados pelo dossel nos valores dos índices (YODER; PETTIGREW-CROSBY, 1995; KUPIEC; CURRAN, 1995). No entanto, estes índices poderão ser considerados apenas para a situação em que foram estudados, ou seja, para as especificidades daquela estrutura de dossel (IAF e DAF), daquele solo e daqueles ângulos de iluminação e visada do sensor referentes àquela data de aquisição dos dados. Para que os índices possam ser aplicados de maneira generalizada para determinado gênero ou espécie vegetal, utilizando-se esta abordagem, muitas imagens devem ser

adquiridas abrangendo uma grande variação dos fatores acima citados, e para cada área de estudo dados de campo devem ser coletados para a avaliação do método.

Ao estimarem o conteúdo de clorofila de dossel utilizando a equação de regressão obtida em estudo foliar sobre dados do sensor AVIRIS, Miller et al. (1990) observaram que a estrutura de dossel afetou negativamente os resultados da pesquisa.

Sims e Gamon (2002) confirmaram a utilidade do índice *red edge* ao estimar o conteúdo de clorofila foliar em várias espécies vegetais por meio da reflectância de dossel. No entanto, os autores observaram que as relações foram afetadas pela variação na espessura das folhas entre espécies, assim como pela alteração da espessura durante o desenvolvimento das folhas.

Correlações entre índices espectrais e clorofila das folhas são demonstradas em estudos de dosséis uniformes (BLACKBURN, 1998b; JAGO et al., 1999). Porém, quando a estrutura de dossel é variável, muitos índices tornam-se insensíveis às alterações no conteúdo de clorofila em virtude da interferência causada pela estrutura de dossel e pelas características morfológicas das folhas (MATSON et al., 1994; PINAR; CURRAN, 1996).

2.6.3 Inversão de modelos de transferência radiativa

Nesta abordagem, um modelo de reflectância de folha é acoplado a um modelo de reflectância de dossel para que componentes bioquímicos foliares possam ser estimados a partir da inversão dos modelos.

Inicialmente, os dois modelos acoplados são utilizados para simular a transferência radiativa de dossel (modo direto). Isto é realizado em duas etapas:

- a) conteúdos de componentes bioquímicos são utilizados como entrada no MTR de folha para simular reflectância e transmitância foliar;
- b) as propriedades ópticas simuladas de folha entram no modelo de dossel

juntamente com os demais parâmetros exigidos pelo MTR de dossel para simular a reflectância de dossel.

Após simulada a transferência radiativa de dossel, realiza-se então a inversão numérica (modo inverso) dos modelos (JACQUEMOUD, 1993; JACQUEMOUD et al., 1995; KUUSK, 1991; DEMAREZ; GASTELLU-ETCHEGORRY, 2000; WEISS et al., 2000; JACQUEMOUD et al., 2000) a partir dos dados de reflectância de dossel reais. No entanto, apenas os parâmetros utilizados como entrada no modelo foliar (modo direto) podem ser estimados a partir da reflectância de dossel real.

O processo de inversão de um modelo significa determinar aqueles parâmetros (utilizados como entrada nos modelos, no modo direto) que minimizam as diferenças entre os dados de reflectância de dossel reais (imagem) e os simulados pelo modelo, podendo-se utilizar índices de vegetação na equação de inversão (ZARCO-TEJADA et al., 2001).

Estimativas satisfatórias de conteúdo de clorofila foram obtidas com este método em culturas agrícolas com dados obtidos pelo sensor aerotransportado *Compact Airborne Spectrographic Imager* (CASI). No estudo, Jacquemoud et al. (2000) compararam a inversão de quatro diferentes modelos de reflectância de dossel acoplados ao MTR de folha PROSPECT.

Os MTR de folha e de dossel acoplados podem suportar um grande número de variáveis que descrevam as características de dossel, o que os torna capazes de simular a reflectância de dossel (modo direto) com grande acurácia. No entanto, para estimar a bioquímica foliar a partir de espectros de reflectância de dossel (modo inverso), normalmente opta-se por acoplar modelos mais simples. A utilização de modelos complexos pode afetar a inversão numérica dos modelos (DAWSON et al., 1999), em virtude das ambigüidades na solução. Isto ocorre em função da grande quantidade de parâmetros de entrada envolvidos para descrever as características de dossel e que, no momento da inversão, podem afetar de mesma maneira a sua reflectância (GOEL, 1988).

A principal vantagem deste método é que nenhuma amostragem espectral de folha é necessária para derivar relações estatísticas (ZARCO-TEJADA et al., 2001; ZARCO-TEJADA et al., 2002). Dentre as desvantagens, destaca-se a insensibilidade às mudanças espectrais sutis decorrentes de processos biofísicos específicos, como por exemplo da degradação da clorofila durante a senescência (ZARCO-TEJADA et al., 2001).

2.6.4 Transferência da relação existente em nível foliar para o nível de dossel (scaling up) por meio de modelos de transferência radiativa

Na metodologia *scaling up*, as mesmas relações entre conteúdo de componentes bioquímicos e reflectância de dossel são obtidas, porém por transferência dos índices ópticos do nível de folha para o de dossel (*scaling up*) por meio de modelos de transferência radiativa (ZARCO-TEJADA et al., 1999; DAUGHTRY et al., 2000; ZARCO-TEJADA et al., 2000a; ZARCO-TEJADA et al., 2000b; ZARCO-TEJADA et al., 2004).

A principal vantagem do uso de modelos de reflectância de dossel como parte do cálculo das relações entre índices e conteúdos bioquímicos é que o modelo de reflectância evita a realização da etapa de pós-calibração para compensar a estrutura de dossel e a geometria de visada. Por considerar informações de estrutura de dossel e de geometria de visada na etapa de *scaling up*, as equações estatísticas geradas podem ser usadas diretamente para estimar bioindicadores em dados de reflectância de dossel (ZARCO-TEJADA et al., 2001).

Esta abordagem possibilita, através da simulação, a busca por sutis alterações na reflectância devidas a processos biofísicos específicos. Além disso, proporciona o estudo de diferentes índices de vegetação em diferentes condições ambientais, permitindo a seleção de índices menos sensíveis aos efeitos de arquitetura de dossel e de geometria de visada e iluminação. No entanto, o principal objetivo deste método é gerar algoritmos preditivos que podem ser utilizados em diferentes condições de dosséis, e não simplesmente avaliar correlações estatísticas entre reflectância adquirida pelo sensor e medidas de campo (ZARCO-TEJADA et al., 2001).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

O estudo foi realizado em áreas de duas Usinas de cana-de-açúcar localizadas na região fisiográfica da Depressão Periférica do Estado de São Paulo (ALMEIDA, 1964) com clima classificado como Cwa (clima temperado úmido com inverno seco e verão quente), segundo sistema proposto por Wladimir Köppen em 1900 (PEEL et al., 2007).

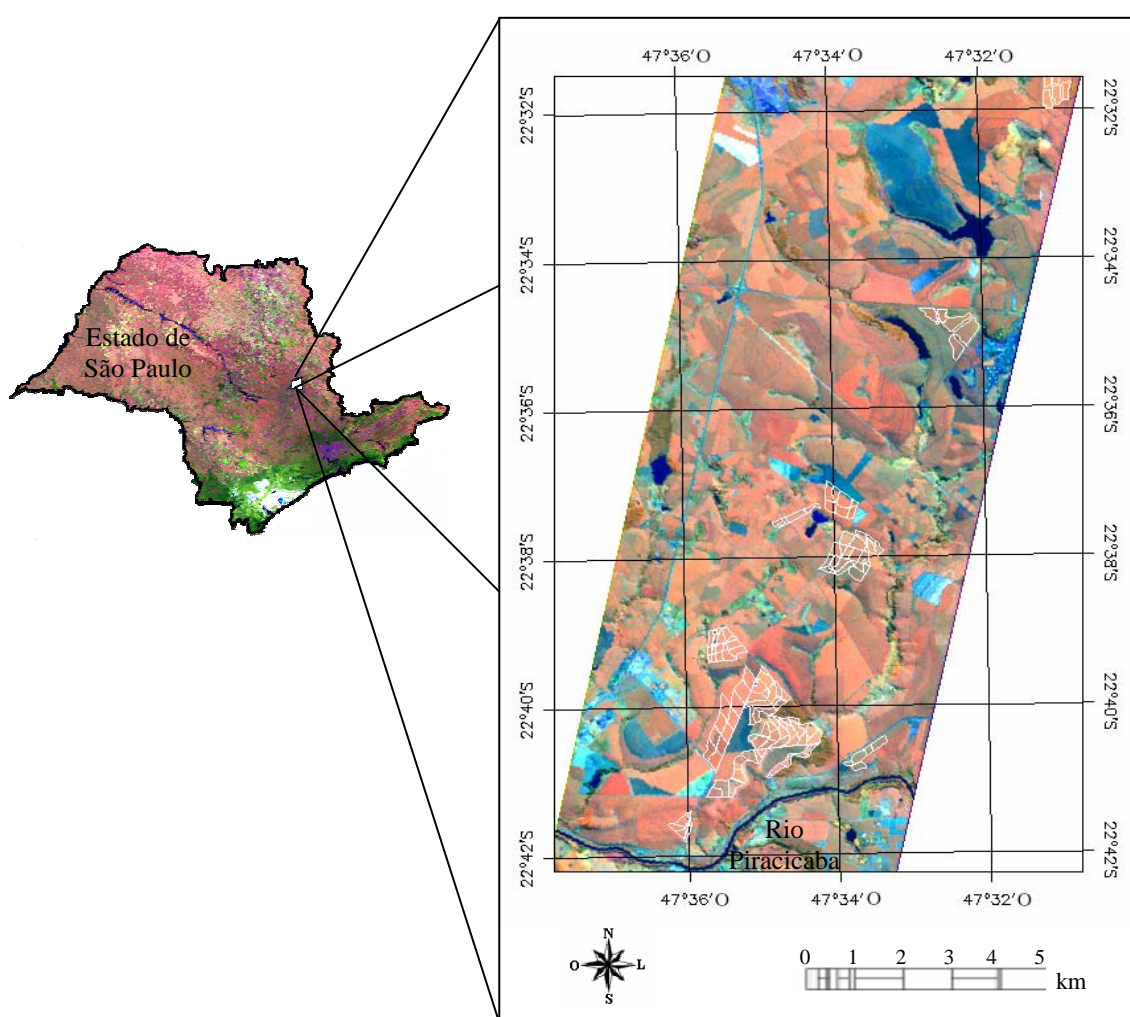


Figura 3.1 – Glebas amostradas nesta pesquisa (linhas brancas) e imageadas pelo sensor *Hyperion/EO-1*, localizadas nas áreas da Usina Iracema (Grupo São Martinho) e da Usina Costa Pinto (Grupo COSAN/FBA). Imagem adquirida em 19 de junho de 2004.

A Usina Costa Pinto (Grupo COSAN/FBA) localiza-se no município de Piracicaba, aproximadamente nas coordenadas 22°34' Latitude S e 47°31' Longitude O, em altitude média de 546 m; já a Usina Iracema (Grupo São Martinho), localiza-se no município de Iracemápolis, aproximadamente nas coordenadas 22°42' Latitude S e 47°38' Longitude O, em altitude média de 600 m (Figura 3.1).

A campanha de coleta de dados foi realizada na semana do dia 19 de junho de 2004 e a aquisição da imagem do sensor *Hyperion/EO-1* ocorreu nesta mesma data.

A variabilidade dos parâmetros agrônômicos foi obtida a partir da seleção de cinco cultivares de cana-de-açúcar (RB85-5453, RB85-5536, RB72-454, SP80-3280 e SP80-1816) dentre as mais cultivadas no Estado de São Paulo e diferenciadas com relação à estrutura do dossel. Cada cultivar (*V*) foi subdividida em grupos de diferentes ciclos de desenvolvimento (*C*), conforme indicado na Tabela 3.1, abrangendo um total de 17 combinações $V_n C_n$.

Tabela 3.1 – Cultivares de cana-de-açúcar selecionadas para o estudo e respectivos ciclos de desenvolvimento.

Cultivares	Ciclos de Desenvolvimento
V_a RB85-5453	C_1 – cana planta de 18 meses, plantio em março de 2003, 1º corte em junho de 2004
	C_2 – 2ª soca, último corte em agosto de 2003, 3º corte em agosto de 2004
	C_3 – 1ª soca, último corte em março de 2003, 2º corte em julho de 2004
V_b RB72-454	C_1 – 6ª soca, último corte em setembro de 2003, 7º corte em setembro de 2004
	C_2 – 6ª soca, último corte em outubro de 2003, 7º corte em outubro de 2004
V_c RB85-5536	C_1 – 6ª soca, último corte em junho de 2003, 7º corte em agosto de 2004
	C_2 – 6ª soca, último corte em junho de 2003, 7º corte em agosto de 2004
	C_3 – cana planta de 18 meses, plantio em março de 2003, 1º corte em setembro de 2004
	C_4 – 1ª soca, último corte em julho de 2003, 2º corte em agosto de 2004
	C_5 – cana planta de 12 meses, plantio em outubro de 2003, 1º corte em outubro de 2004
V_d SP80-1816	C_1 – 1ª soca, último corte em agosto de 2003, 2º corte em agosto de 2004
	C_2 – cana planta de 12 meses, plantio em agosto de 2003, 1º corte em agosto de 2004
	C_3 – cana planta de 12 meses, plantio em novembro de 2003, 1º corte em novembro de 2004
V_e SP80-3280	C_1 – cana planta de 18 meses, plantio em fevereiro de 2003, 1º corte em agosto de 2004
	C_2 – cana planta de 12 meses, plantio em outubro de 2003, 1º corte em outubro de 2004
	C_3 – 1ª soca, último corte em outubro de 2003, 2º corte em outubro de 2004
	C_4 – 1ª soca, último corte em setembro de 2003, 2º corte em setembro de 2004

O estudo de cada uma das 17 combinações V_nC_n foi realizado em talhões pertencentes a uma mesma gleba. Para isto, cinco talhões (repetições – R_n) foram sorteados para representá-la, totalizando 85 talhões amostrados, sendo dez pertencentes à área da Usina Iracema e os demais à da Usina Costa Pinto.

3.2 Correção da imagem *Hyperion*

3.2.1 Correção de pixels anômalos

As primeiras 12 bandas na região do visível e infravermelho próximo (VIVP) e muitas bandas localizadas na região espectral do IVC são influenciadas pela ocorrência de *stripes*, causados pela diferença de calibração entre os detectores do sensor. Vale lembrar que a aquisição de dados do sensor *Hyperion* ocorre no modo *pushbroom*, com um detector para cada coluna e para cada banda.

Embora muitos *pixels* anômalos já estejam corrigidos no nível L1R de processamento da imagem, *pixels* intermitentes, com baixo valor de número digital (ND) quando comparado a seus vizinhos, ainda permanecem após esta fase de processamento.

O algoritmo para detecção e correção de *stripes*, proposto por Goodenough et al. (2003), foi utilizado neste estudo sobre os dados *Hyperion* adquiridos em 19 de junho de 2004, onde o valor do ND dos *pixels* da coluna identificada como *stripe* é substituído pela média dos valores de ND dos seus *pixels* vizinhos, considerando que os *pixels* mais próximos possuem maior correlação espacial com o *pixel* central.

3.2.2 Correção atmosférica

No nível L1R (*Level 1 Radiometric*) de processamento da imagem, 198 bandas espectrais são fornecidas radiometricamente calibradas, ao invés de 242, devido a baixa responsividade dos detectores em alguns canais espectrais. As bandas calibradas são de 8 a 57 para o VIVP e de 77 a 224 para o IVC.

Devido à região de sobreposição entre o VIVP (bandas 56 e 57, correspondentes aos comprimentos de onda 915,23 nm e 925,41 nm) e o IVC (bandas 77 e 78,

correspondentes aos comprimentos de onda 912,45 nm e 922,54 nm), apenas 196 bandas são consideradas úteis (USGS, 2008).

Os dados de radiância da imagem *Hyperion* foram convertidos em dados de reflectância de superfície utilizando o programa *Atmospheric Correction Now* (ACORN) versão 5.0 (modo 1.5pb), baseado no código de transferência radiativa MODTRAN-4 (BERK et al., 1999).

Mesmo após a correção atmosférica, as bandas posicionadas em torno de 1.400 nm e 1.900 nm foram descartadas em virtude da forte absorção atmosférica exercida pelo vapor d'água nesta região, limitando o uso das mesmas.

3.2.3 Transformação *Minimum Noise Fraction*

Após a correção atmosférica, a transformação *Minimum Noise Fraction* (MNF) foi aplicada sobre os dados da imagem para segregar ruídos estruturados espacialmente na imagem (GREEN et al., 1988). Um total de 10 bandas MNF, contendo dados coerentes, foram utilizadas na transformação MNF inversa.

3.3 Amostragem dos talhões

Os dados foram coletados a partir da amostragem dos 85 talhões estudados. Estes dados foram utilizados para alimentar os MTR de folha (PROSPECT – 4) e de dossel (SAILH) bem como para avaliar o erro da estimativa do conteúdo de clorofila (Figura 3.2).

3.3.1 Amostragem de folhas

As amostras de folhas foram coletadas para a determinação do conteúdo de clorofila, de água e de matéria seca.

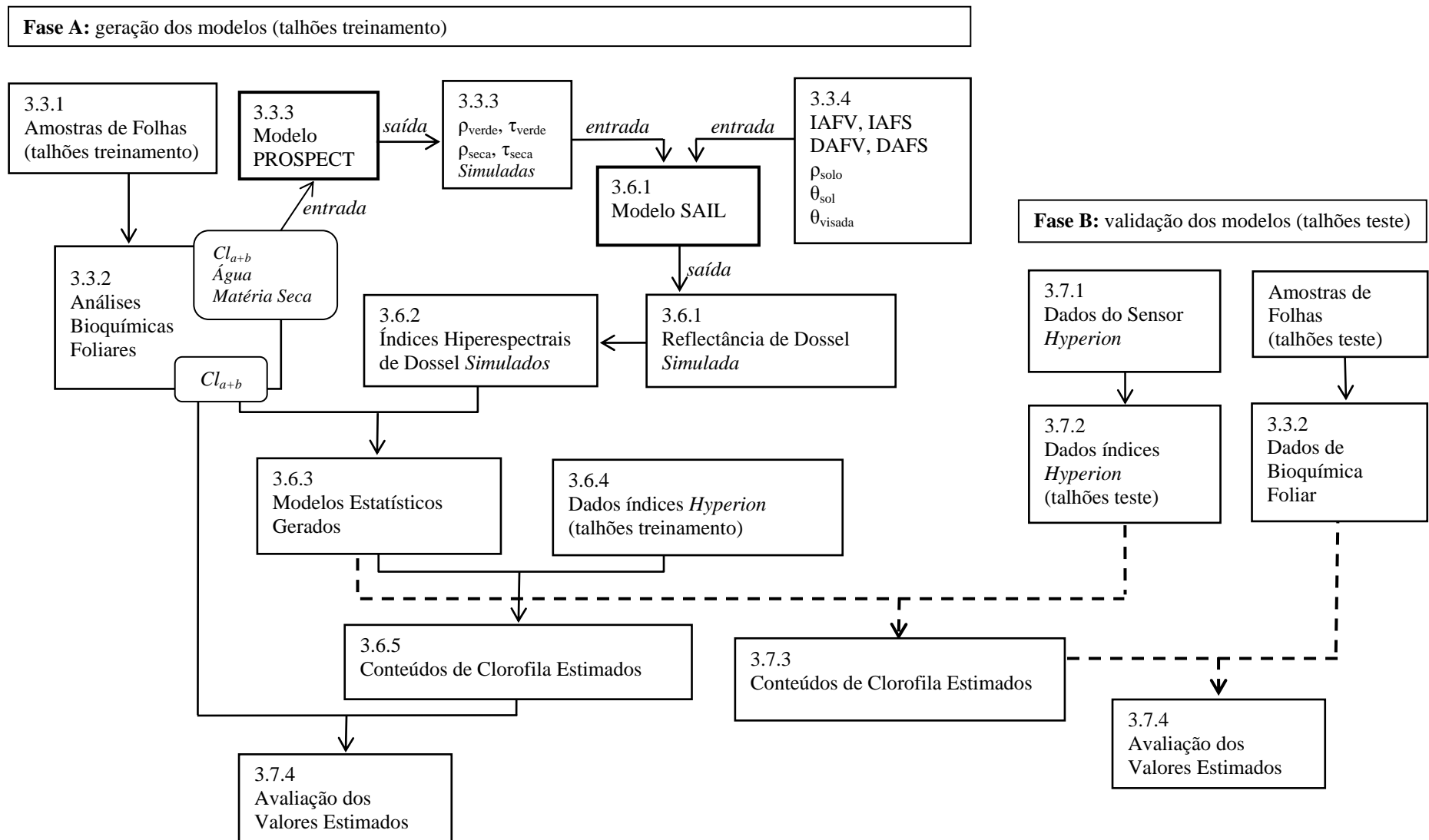


Figura 3.2 – Fluxograma das principais etapas da metodologia.

3.3.1.1 Folhas para determinação de conteúdo de clorofila

Para fins de análises bioquímicas foliares, recomenda-se a coleta da folha +3 (folha completamente expandida) apenas do colmo primário (por ser o mais desenvolvido) da touceira (CESAR; SILVA, 1993). No entanto, para melhor representação estatística do parâmetro, em cada talhão foram amostradas as folhas +3 de todos os colmos de uma planta (touceira) (Figura 3.3), obtendo-se melhores relações com os espectros do sensor *Hyperion*.

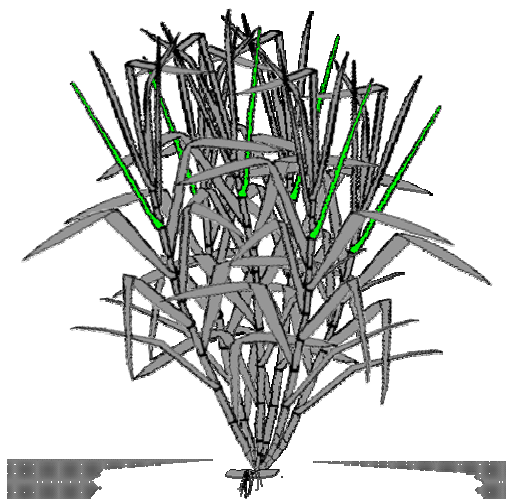


Figura 3.3 – Representação das folhas +3 de todos os colmos de uma planta.

As folhas +3 da planta representante do talhão foram coletadas, embaladas em sacos plásticos vedados e, em seguida, estes foram armazenados em caixa de isopor contendo gelo, evitando assim a perda de água por transpiração e impedindo a degradação da clorofila.

3.3.1.2 Folhas para determinação de conteúdo de água e de matéria seca

Para estas determinações, todas as folhas verdes e todas as folhas senescentes de dez colmos consecutivos na linha de plantio, de cada talhão, foram amostradas (Figura A.1) e embaladas separadamente (Figura A.2), procedendo-se em seguida a pesagem dos sacos. Detalhes das metodologias adotadas para estas determinações estão descritos a seguir.

3.3.2 Determinação de bioquímica foliar

3.3.2.1 Conteúdo de clorofila

Os sacos plásticos contendo as folhas +3 foram encaminhados ao Laboratório do Centro de Biotecnologia Agrícola (CEBTEC) da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ/USP). Para cada repetição, dez folhas +3 foram escolhidas aleatoriamente, pesadas e então medida a sua área com o aparelho Li-3001C *Area Meters*, obtendo assim uma relação entre área foliar e peso, para que o valor da extração (Figura A.3) possa ser extrapolado para área.

Posteriormente, os terços médios de todas as folhas coletadas foram picados e homogeneizados, retirando-se aleatoriamente sub-amostras de 10 g e, em seguida, procedendo-se à metodologia de extração de clorofila proposta por Arnon (1949), que utiliza como reagente a acetona 80% (Figura A.4.a).

Para cada extrato, cinco repetições de leitura foram realizadas num espectrofotômetro de absorção, nos comprimentos de onda 645 nm e 663 nm (Figura A.4.b). Os valores de concentração de clorofila *a* e de clorofila *b* (g.L^{-1}) são dados pelas seguintes equações (ARNON, 1945):

$$\text{Cl } a = 0,0127 * A_{663} - 0,00269 * A_{645} \quad (3.1)$$

$$\text{Cl } b = 0,00229 * A_{645} - 0,00468 * A_{663} \quad (3.2)$$

onde, A_{645} corresponde ao valor de absorvância medido no espectrofotômetro (STRICKLAND; PARSONS, 1972) no comprimento de onda 645 nm, e A_{663} ao valor

medido no comprimento de onda 663 nm.

Após a determinação dos teores de clorofila, os resultados obtidos pelas Equações 3.1 e 3.2 foram expressos em miligramas de clorofila por grama de matéria-verde ($\text{mg Cl} \cdot \text{g MV}^{-1}$) e posteriormente transformados para micrograma de clorofila por área de folha ($\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2}$).

3.3.2.2 *Conteúdo de água e de matéria seca*

Dez folhas por amostra foram escolhidas aleatoriamente, realizando-se a pesagem e a medição da sua área foliar para possibilitar posteriores extrapolações.

Os sacos contendo as folhas verdes e as senescidas, previamente pesados, foram conduzidos à estufa de ventilação forçada, procedendo-se à secagem por 48 horas à temperatura de 55°C. Em seguida, os sacos foram novamente pesados para a determinação do peso seco das amostras, o que permite o cálculo posterior do conteúdo de água.

3.3.3 *Reflectância de folha*

Em virtude da indisponibilidade de equipamentos capazes de adquirir dados espectrais de folhas na região do VIS e do IVC na ocasião da coleta de dados, o modelo de transferência radiativa de folha PROSPECT (JACQUEMOUD; BARET, 1990) foi utilizado com o intuito de simular a reflectância e a transmitância hemisféricas de folhas verdes dos talhões amostrados em função das seguintes variáveis de entrada:

$$R(\lambda) = f(C_{Cl}, C_a, C_{ms}, N) \quad (3.3)$$

C_{Cl} corresponde ao conteúdo de clorofila $a + b$ ($\mu\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \text{MV}$); C_a ao conteúdo de água ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \text{MV}$); C_{ms} , ao conteúdo de matéria seca ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-2} \text{MV}$); e N à estrutura do mesófilo foliar (arranjo celular).

Quanto às propriedades espectrais de folhas senescidas, por não estarem diretamente relacionadas ao objeto de interesse (conteúdo de clorofila), optou-se por medir os espectros destas em laboratório com o espectrorradiômetro *FieldSpec Pro FR* (Analytical Spectral Devices, Inc. Boulder, USA) (com amplitude de medição espectral de 350 a 2.500 nm e 10 nm de resolução espectral) acoplado à esfera integradora Li-Cor

1800-12S (Li-COR, Inc., Lincoln, Nebraska, USA), também no estágio de maturação da cultura, em uma nova campanha de coleta de dados realizada em junho de 2006. Em todas as simulações de dossel, para representar a reflectância e a transmitância das folhas senescidas, utilizou-se a média de dez espectros (

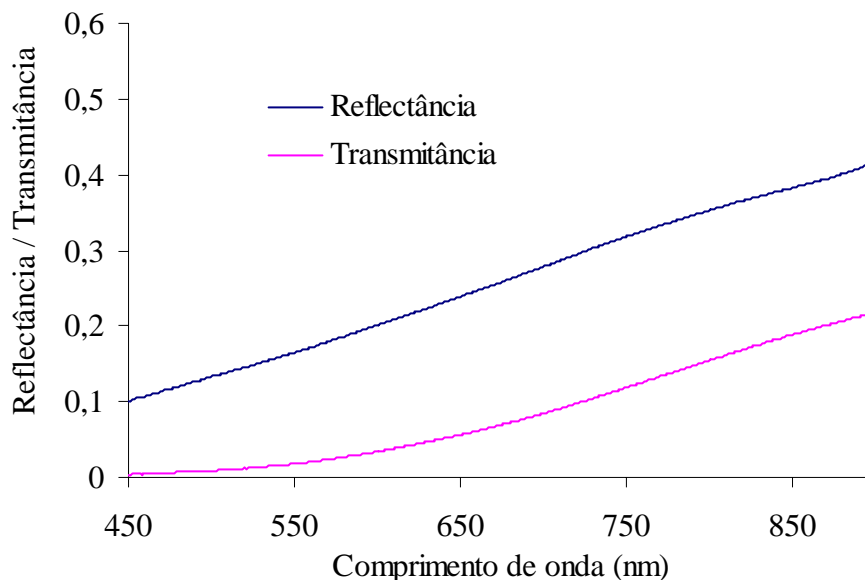


Figura 3.4).

Figura 3.4 – Reflectância e transmitância de folhas senescidas utilizada nas simulações.

As propriedades ópticas simuladas de folhas verdes e medidas de folhas senescidas foram utilizadas como parâmetros de entrada do modelo SAILH para que a reflectância do dossel fosse simulada.

3.3.3.1 Determinação do parâmetro estrutural N

Para o parâmetro N foi atribuído o valor 1,4, conforme utilizado por Jaquemoud et al. (2000) e Haboudane et al. (2002) para a cultura do milho. De acordo com Jaquemoud (1993), valores no intervalo entre 1 e 1,5 podem ser utilizados para folhas com mesofilo compacto (monocotiledôneas), como é o caso da cultura da cana-de-açúcar.

3.3.4 *Determinação da reflectância de solo, dos parâmetros geométricos de visada e de iluminação e dos parâmetros estruturais de dossel*

3.3.4.1 *Reflectância de solo*

Para a obtenção de medidas de reflectância de solo (ρ_{solo}), foram coletadas em junho de 2006, amostras nos talhões estudados em 2004 correspondentes aos solos: NITOSSOLO VERMELHO, LATOSSOLO EUTROFÉRICO, LATOSSOLO VERMELHO E ARGISSOLO VERMELHO (EMBRAPA, 1999). As amostras de solos foram embaladas em sacos plásticos e devidamente identificadas e encaminhadas ao Laboratório de Radiometria (LARAD) do Departamento de Sensoriamento Remoto do INPE/MCT. A reflectância das amostras de solo foi obtida utilizando-se o espectrorradiômetro *FieldSpec Pro FR* (*Analytical Spectral Devices, Inc. Boulder, USA*). As amostras foram estudadas na condição de Terra Fina Seca ao Ar, peneiradas em malha de 2 mm

3.3.4.2 *Parâmetros geométricos de visada e de iluminação*

O ângulo zenital de visada do sensor ($\theta_{visada} = 3,2402^\circ$) e o de iluminação ($\theta_{sol} = 56,1624^\circ$) foram obtidos a partir dos metadados da imagem *Hyperion* adquirida em 19 de junho de 2004 às 10:30 hs da manhã (USGS, 2006).

3.3.4.3 *Parâmetros estruturais de dossel*

Os parâmetros *hotspot*, índice de área foliar e distribuição angular de folhas utilizados como entrada no modelo SAILH, foram determinados tanto para folhas verdes (*hotspotV*, IAFV e DAFV) quanto para folhas senescentes presas aos colmos (*hotspotS*, IAFS e DAFS).

3.3.4.3.1 *Determinação do parâmetro hotspot*

O parâmetro *hotspot* foi determinado utilizando os valores médios de comprimento de folha e de altura de dossel. O valor 0,4, utilizado neste estudo, foi obtido pela seguinte equação:

$$S = L/H \quad (3.4)$$

S corresponde ao parâmetro *hotspot*, L ao comprimento de folha e H à altura do dossel.

3.3.4.3.2 Determinação do índice de área foliar

O IAFV e o IAFS foram determinados pela relação entre número de folhas, peso, área foliar e área de terreno amostrado. Para isto, em cada talhão realizou-se a contagem do número de colmos presentes em dois metros contínuos na linha de plantio. A partir dos mesmos dez colmos amostrados para a determinação do conteúdo de água e de matéria seca (item 3.3.2.2) foram determinados o número de folhas verdes e o de folhas senescidas por colmo e, posteriormente, todas as folhas verdes e todas as folhas senescidas foram embaladas separadamente (Figura A.2), procedendo-se em seguida a pesagem dos sacos. Dez folhas por amostra foram escolhidas aleatoriamente, realizando-se a pesagem e a medição da sua área foliar as quais possibilitaram a realização de posteriores extrapolações.

3.3.4.3.3 Determinação da distribuição angular de folhas

A arquitetura de dosséis de diferentes cultivares de cana-de-açúcar, apesar de caracterizados na literatura, apresentam principalmente nos estádios de maior desenvolvimento da cultura grande desuniformidade de DAF em condições ambientais naturais.

A caracterização da DAF a campo (para cada variedade e ciclo de desenvolvimento de interesse) é de difícil realização em virtude da complexidade da estrutura da planta, sendo praticamente inviável realizá-la na posição natural da planta, principalmente em estágios avançados de crescimento. Como opção, a determinação da DAF pode ser realizada a partir de colmos coletados individualmente, no entanto, isto pode implicar na obtenção de resultados pouco representativos devido à alteração da disposição natural dos colmos.

Na tentativa de obter as funções que melhor descrevam a DAF dos dosséis correspondentes aos 85 talhões estudados, simulações foram realizadas com o

PROSAILH utilizando os valores medidos correspondentes a cada talhão variando, para cada um deles, a DAFV e DAFS (Tabela B.1), resultando em 1.360 simulações ($17 V_n C_n \times$ cinco repetições \times quatro DAFS \times quatro DAFV). As funções de distribuição esférica, planófila, plagiófila e erectófila, de DeWit (1965), foram utilizadas para as duas camadas de dossel.

Com base na interpretação dos gráficos de espalhamento do Erro Médio Absoluto (EMA, $\rho \cdot \lambda^{-1}$) calculado entre os espectros simulados e os medidos, por comprimento de onda, a DAF correspondente ao espectro simulado de menor erro foi atribuída à combinação $V_n C_n$ em questão.

A análise visual dos gráficos contendo as médias dos espectros de cada combinação DAFV \times DAFS, para cada $V_n C_n$, também foi realizada. Os espectros correspondentes a cada uma delas foram comparados aos espectros adquiridos pelo sensor *Hyperion* para os mesmos $V_n C_n$, utilizando-se também a médias destes.

3.4 Contribuição das folhas senescidas na composição da reflectância de dossel de cana-de-açúcar

O efeito de uma subcamada de folhas senescidas na reflectância de dossel de cana-de-açúcar foi investigado, baseado nas relações entre espectros de dossel simulados pelo modelo PROSAILH (PROSPECT e SAILH acoplados) e medidos (*Hyperion*). A investigação da perturbação causada pelas folhas senescidas é indispensável quando o objetivo é estimar o conteúdo de clorofila de dosséis de cana-de-açúcar. Embora o objeto de estudo desta pesquisa (conteúdo de clorofila) está presente apenas nas folhas fotossinteticamente ativas do dossel, porém, os dados espectrais adquiridos pelo sensor são resultantes da interação da radiação em todo o perfil do dossel.

Neste estudo, foi utilizada a implementação numérica do modelo SAIL (CAMPOS, 2009) em múltiplas camadas para calcular quatro fluxos (dois hemisféricos e dois direcionais) em termos de propriedade óptica de folhas e da função G de Ross e Nilson (1967). O modelo teórico base para a implementação é o proposto por Kuusk (2001). Isto possibilitou simular a interação da radiação em dosséis com duas camadas de

folhas, uma com folhas verdes e outra com folhas senescentes. Desta forma, a necessidade de considerar (ou não) a camada de folhas senescentes nos estudos de estimativa de conteúdo de clorofila de dossel de cana-de-açúcar foi investigada. Nas simulações, as propriedades ópticas de folhas e os parâmetros estruturais de dossel correspondentes a ambas camadas foram considerados.

Para facilitar o entendimento das relações entre a radiação incidente e a arquitetura do dossel, apenas os dois extremos de DAFV foram utilizados, planófila e erectófila; quanto à DAFS, a distribuição planófila foi mantida fixa em todas as simulações para favorecer um efeito mais pronunciado das folhas senescentes nos espectros (Tabela 3.2).

Os valores dos parâmetros correspondentes à simulação das propriedades ópticas de folhas verdes (N , C_{cl} , C_a e C_{ms}) foram mantidos fixos, utilizando-se os valores médios dos talhões $V_a C_I R_n$. (Tabela 3.2)

Duas simulações foram realizadas neste estudo. Na primeira, os valores de IAFS e de DAFS foram mantidos fixos, possibilitando a comparação entre os espectros simulados e a análise do comportamento espectral do dossel de cana-de-açúcar com diferentes valores de IAFV; sendo o valor de DAFS = 2 eleito para representar a camada de folhas senescentes nesta simulação (Tabela 3.2). Na segunda simulação, os valores de IAFS variaram de 0,5 a 4, para determinar a contribuição das folhas senescentes nos espectros gerados na simulação anterior.

Tabela 3.2 – Valores nominais e intervalos dos parâmetros de entrada utilizados nas simulações de reflectâncias de dossel pelo modelo PROSAILH, para o estudo da contribuição das folhas senescentes no espectro de dossel.

		N	Cl	Cw	Cm	IAF	DAF ¹
Primeira Simulação	Folha Verde	1,4	31,4708	0,0274	0,0122	2 a 6 (passo: 0,5)	2 e 4
	Folha Senescente	----- espectro medido -----				2	2
Segunda Simulação	Folha Verde	1,4	31,4708	0,0274	0,0122	2, 4 e 6	2 e 4
	Folha Senescente	----- espectro medido -----				0,5 a 4 (passo: 0,5)	2

¹ DAF correspondente: 1 esférica, 2 planófila, 3 plagiófila e 4 erectófila.

A primeira e a segunda simulação resultaram em 18 (nove IAFV × um IAFS × dois

DAFV × um DAFS) e 48 (três IAFV × oito IAFS × dois DAFV × um DAFS) espectros simulados, respectivamente.

3.5 Teste de sensibilidade dos índices de vegetação à variação do conteúdo de clorofila

Antes de iniciar as etapas referentes à estimação do conteúdo de clorofila de dosséis de cana-de-açúcar, foram pré-selecionados a partir de diversas publicações científicas diferentes índices de vegetação sensíveis ao conteúdo de clorofila foliar (Tabela 3.3).

Tabela 3.3 – Índices de vegetação hiperespectrais, com suas respectivas fórmulas e referências, usados neste estudo.

Índice de Vegetação	Equação	Referência
<i>Average reflectance (Average)</i>	Reflectância média entre 750 e 850 nm	Strachan et al. (2002)
<i>Pigment Specific Simple Ratio (Chlorophyll a) (PSSRa)</i>	R800/R680	Blackburn (1998a)
<i>Pigment Specific Simple Ratio (Chlorophyll b) (PSSRb)</i>	R800/R635	Blackburn (1998a)
<i>Simple Ratio (SR550)</i>	R800/R550	Gitelson e Merzlyak (1994)
<i>Simple Ratio (SR680)</i>	(R800/R680)	Sims e Gamon (2002)
<i>Simple Ratio (SR705)</i>	R750/R705	Gitelson e Merzlyak (1994)
<i>Simple Ratio (SR710)</i>	R750/R710	Zarco-Tejada et al. (2001)
<i>Normalized Difference (ND660)</i>	(R750-R660)/(R750+R660)	Gitelson e Merzlyak (1994)
<i>Normalized Difference (ND680)</i>	(R800-R680)/(R800+R680)	Sims e Gamon (2002)
<i>Normalized Difference (ND705)</i>	(R750-R705)/(R750+R705)	Gitelson e Merzlyak (1994)
<i>Normalized Difference (ND677)</i>	(R774-R677)/(R774+R677)	Zarco-Tejada et al. (1999)
<i>Modified Normalized Difference (mND705)</i>	(R750-R445)/(R750+R705-2R445)	Sims e Gamon (2002)
<i>Photochemical Reflectance Index (PRI1)</i>	(R531-R570)/(R531+R570)	Gamon et al. (1992)
<i>Photochemical Reflectance Index (PRI2)</i>	(R550-R531)/(R550+R531)	Zarco-Tejada et al. (1999)
<i>Photochemical Reflectance Index (PRI3)</i>	(R570-R539)/(R570+R539)	Zarco-Tejada et al. (1999)
<i>Photochemical Reflectance Index (PRI4)</i>	(R524-R575)/(R524+R575)	Zarco-Tejada et al. (1999)
<i>Structure-Independent Pigment Index (SIPI1)</i>	(R800-R445)/(R800-R680)	Peñuelas et al. (1995)
<i>Structure-Independent Pigment Index (SIPI2)</i>	(R800-R450)/(R800-R650)	Peñuelas et al. (1995)
<i>Plant Senescence Reflectance Index (PSRI)</i>	(R680-R500)/R750	Merzlyak et al. (1999)
<i>Simple Ratio Pigment Index (SRPI)</i>	(R430/R680)	Peñuelas et al. (1995)
<i>Normalized Pigments Chlorophyll Ratio Index (NPCI)</i>	(R680-R430)/(R680+R430)	Peñuelas et al. (1994)
<i>Greenness Index (G)</i>	(R554/R677)	-
<i>Simple Ratio (Licht1)</i>	(R440/R690)	Lichtenthaler et al. (1996)
<i>Simple Ratio (SR677)</i>	(R774/R677)	Rouse et al. (1974)
<i>Simple Ratio (Licht2)</i>	(R800-R680)/(R800+R680)	Lichtenthaler et al. (1996)
<i>Vogelmann (Volg1)</i>	(R740/R720)	Vogelmann et al. (1993)
<i>Vogelmann (Volg2)</i>	(R734-R747)/(R715+R726)	Zarco-Tejada et al. (1999)
<i>Simple Ratio (GM1)</i>	(R750/R700)	Gitelson e Merzlyak (1994)
<i>Simple Ratio (GM2)</i>	R750/R550	Gitelson e Merzlyak (1994)
<i>Simple Ratio (Carter)</i>	R695/R760	Carter (1994)
<i>Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index (MCARI)</i>	[(R700-R670)-0,2(R700-R550)](R700/R670)]	Daughtry et al. (2000)
<i>Transformed Chlorophyll Absorption in Reflectance Index (TCARI)</i>	3[(R700-R670)-0,2(R700-R550)](R700/R670)]	Haboudane et al. (2002)
<i>Optimized Soil-Adjusted Vegetation Index (OSAVI)</i>	(1+0,16)(R800-R670)/(R800+R670+0,16)	Roundeaux et al. (1996)
<i>Ratio TCARI/OSAVI</i>	TCARI/OSAVI	Haboudane et al. (2002)
<i>Curvature index (CI)</i>	(R675*R690)/(R683 ²)	Zarco-Tejada et al. (2000 ^b ,b)
<i>Triangular Vegetation Index (TVI)</i>	0,5-[120*(R750-R550)-200*(R670-R550)]	Broge e Leblanc (2000)
<i>Red-edge Inflection Point: four-point interpolation (Red-edge_FPI)</i>	(Ver autor)	Dawson e Curran (1998)
<i>Red Edge Position: four-point interpolation (REP_FPI)</i>	(Ver autor)	Dawson e Curran (1998)
<i>Red Well Position (RWP_FPI)</i>	(Ver autor)	Dawson e Curran (1998)
<i>Red-edge: linear (Red-edge_linear)</i>	(Ver autor)	Guyot et al. (1992)
<i>Red Edge Position: linear (REP_linear)</i>	(Ver autor)	Guyot et al. (1992)

Em virtude da pequena variação do conteúdo de clorofila dos talhões amostrados e do estreito intervalo de sua ocorrência, fato esperado ao basear a pesquisa em um único estágio de desenvolvimento da cultura (estádio de maturação), realizou-se um teste de sensibilidade dos índices à variação do conteúdo de clorofila foliar para o intervalo de ocorrência amostrado (10 a 35 $\mu\text{g Cl} \cdot \text{cm}^{-2}$).

Para a realização deste teste, espectros de folhas verdes foram simulados pelo modelo de transferência radiativa PROSPECT – 4 possibilitando a análise do comportamento dos índices às pequenas variações do conteúdo de clorofila no intervalo de 10 a 35 $\mu\text{g Cl} \cdot \text{cm}^{-2}$ e a posterior comparação da mesma com a análise realizada em escala de dossel.

Com a utilização de modelo de transferência radiativa de folha para a realização deste estudo, foi garantida a variação apenas do conteúdo de clorofila entre os espectros a serem analisados, mantendo as demais características inerentes à folha, representadas no modelo pelo conteúdo de água (C_a) e de matéria seca (C_{ms}), e pelo parâmetro que caracteriza o mesofilo foliar (N), constantes.

A partir das 17 combinações $V_n C_n$, uma foi selecionada ao acaso para servir como base nestas simulações, utilizando os valores médios de suas repetições referentes ao C_a , C_{ms} e N , variando o conteúdo de clorofila (parâmetro C_{cl}) no intervalo de ocorrência observado para os 85 talhões (Tabela 3.4).

Tabela 3.4 – Valores nominais e intervalo dos parâmetros utilizados nas simulações da reflectância foliar pelo modelo PROSPECT – 4 para a realização do teste de sensibilidade dos índices à variação do conteúdo de clorofila.

Parâmetros	Valores Nominais e Intervalos
C_{cl}	10 a 35 $\mu\text{g.cm}^{-2}$ (passo: 1 $\mu\text{g.cm}^{-2}$)
C_a	0,0273 g.cm^{-2}
C_{ms}	0,0123 g.cm^{-2}
N	1,4

Os métodos de amostragem foliar e de determinação dos parâmetros requeridos pelo modelo PROSPECT – 4 para a realização das simulações estão descritos detalhadamente nos ítems 3.3.1 e 3.3.2.

Os índices de vegetação foram calculados a partir dos 26 espectros simulados pelo modelo (26 valores de C_{cl}) (Figura 3.5). Por meio de análise de regressão simples, avaliou-se a correlação entre variação dos valores de cada índice (variável dependente) em função da variação do conteúdo de clorofila (variável independente), utilizando critérios baseados na análise dos valores do coeficiente de determinação (r^2) e da significância do coeficiente angular.

Para analisar a significância do coeficiente angular (a) foi utilizado o teste F , considerando $\alpha=0,05$.

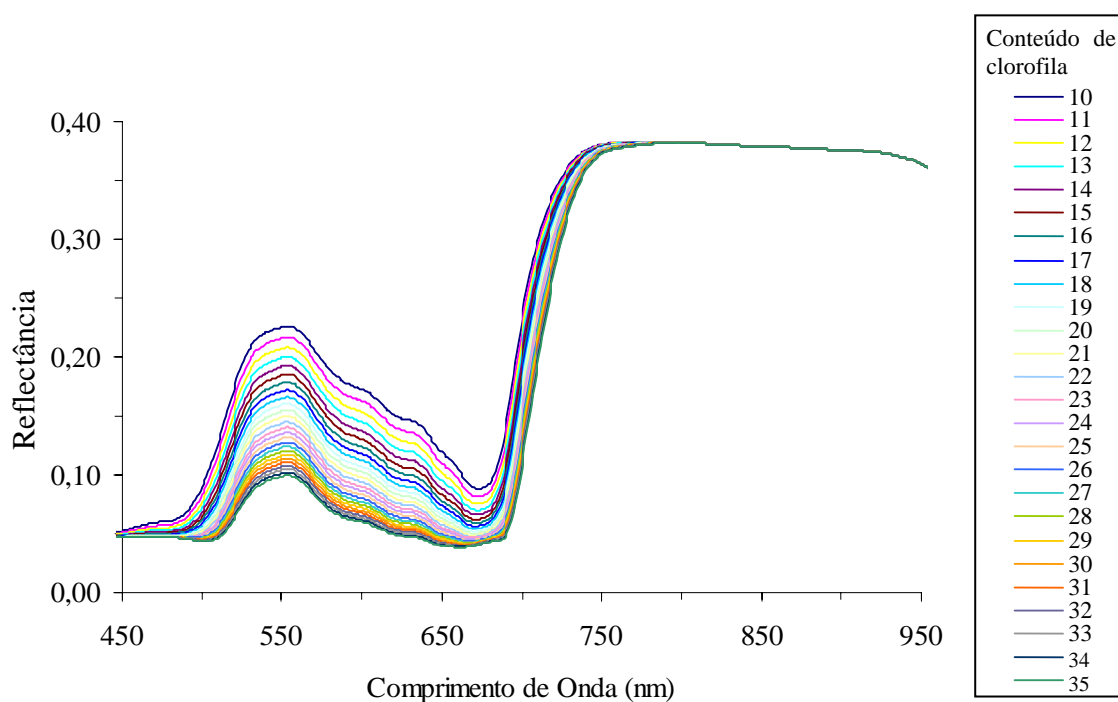


Figura 3.5 – Espectros de folha verde de cana-de-açúcar simulados pelo modelo PROSPECT-4, utilizando intervalo de variação de conteúdo de clorofila de 10 a 35 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$.

Dois critérios de análise foram estabelecidos para identificar os índices insensíveis às pequenas variações do conteúdo de clorofila ocorridas no intervalo de 11 a 35 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$:

- a) índices de vegetação com coeficientes de correlação inferiores a 0,50 (em módulo), considerados de baixa correlação linear entre as duas variáveis analisadas, e
- b) índices correspondentes às correlações lineares não significativas à 5% de probabilidade ($P > 0,05$).

3.6 Estimação de conteúdo de clorofila de dossel de cana-de-açúcar (Fase A)

A metodologia proposta para estimar o conteúdo de clorofila de dosséis de cana-de-açúcar via dados hiperespectrais orbitais baseia-se na transferência de relações geradas na escala de folha entre conteúdo de clorofila e índices de vegetação, para a escala de dossel (*scaling-up*). Para estabelecer esta transferência de relação, o modelo de transferência radiativa SAILH (versão do modelo SAIL que leva em consideração o efeito *hotspot*) será utilizado para simular a reflectância de dossel, conforme ilustrado pelo fluxograma da Figura 3.2 e descrito detalhadamente nos itens a seguir.

Os espectros de dossel referentes aos 85 talhões foram simulados pelo modelo PROSAILH, utilizando nas simulações os valores dos parâmetros de entrada apresentados na Tabela B.1. No entanto, aos parâmetros de DAF verde e senescente de cada V_nC_n , foram atribuídas às funções de distribuição estabelecidas pelo método proposto no item 3.3.4.3.3.

A metodologia está dividida em duas fases, a de geração das equações semi-empíricas de estimação de clorofila, realizada a partir de combinações de V_nC_n destinados ao treinamento do método, e a de validação das equações.

Os cinco talhões amostrados para cada V_nC_n passaram a ser considerados sub-amostras ao invés de repetições, fazendo com que cada V_nC_n fosse composta pela média de suas sub-amostras; caso contrário, cada espectro simulado a partir de valores únicos precisaria corresponder à média dos espectros adquiridos pelo *Hyperion* de todos os *pixels* do talhão correspondente. Isto implicaria em equações de estimação geradas a partir de espectros simulados não representativos de V_nC_n . Vale lembrar, que os cinco

talhões selecionados para representar cada $V_n C_n$ pertenciam a uma mesma gleba e, portanto, com homogeneidade de topografia, práticas de manejo e classes de solo.

A área de treinamento foi composta por aproximadamente $\frac{1}{2}$ dos 17 $V_n C_n$, selecionados ao acaso; os demais foram utilizados na composição da área de teste das equações de estimação.

3.6.1 Modelo SAILH

Os valores de reflectância de dossel foram gerados via SAILH em função das variáveis de entrada ângulos zenitais de iluminação e de visada do sensor (θ_{sol} , θ_{visada}), efeito *hotspot*, índice de área foliar de folhas verdes e de senescidas (IAFV, IAFS), distribuição angular de folhas verdes e de senescidas (DAFV, DAFS), reflectância de solo ($\rho_{solo(\lambda)}$) (item 3.3.4), e reflectância e transmitância hemisférica de folhas verdes e de folhas senescidas ($\rho_{verde(\lambda)}$, $\tau_{verde(\lambda)}$, $\rho_{senescente(\lambda)}$, $\tau_{senescente(\lambda)}$) (item 3.3.3).

$$R(\lambda) = f(GEOMETRIA, ESTRUTURA, ESPECTRO) \quad (3.5)$$

GEOMETRIA corresponde ao θ_{sol} e θ_{visada} ; *ESTRUTURA* ao IAFV e IAFS, e à DAFV e DAFS; e *ESPECTRO* à $\rho_{verde(\lambda)}$, $\tau_{verde(\lambda)}$, $\rho_{senescente(\lambda)}$, $\tau_{senescente(\lambda)}$ e $\rho_{solo(\lambda)}$.

3.6.2 Índices hiperespectrais

Normalmente, para garantir variabilidade dos dados amostrados nos estudos referentes à estimação de conteúdo de clorofila, o conjunto amostral é composto por folhas de diferentes espécies de plantas ou então a partir de uma mesma espécie, porém em diferentes estádios de desenvolvimento. No entanto, quando diferentes amostras de uma mesma espécie e em um mesmo estágio de desenvolvimento são estudados o intervalo de ocorrência da variação do conteúdo de clorofila é pequeno, havendo necessidade da utilização de índices sensíveis não apenas ao intervalo de ocorrência como também às pequenas variações do conteúdo de clorofila presentes neste intervalo.

O modelo de transferência radiativa PROSAILH foi utilizado para identificar os índices de vegetação, previamente estudados em escala de folha, menos sensíveis às diversas

variações de arquitetura de dosséis de cana-de-açúcar (IAFV, IAFS, DAFV e DAFS).

Foram utilizadas neste estudo quatro DAF (esférica, planófila, plagiófila e erectófila) já definidas na literatura, tanto para a simulação da camada de folhas verdes quanto da de folhas senescentes. Os valores de IAF também variaram, no intervalo de 2 a 6 para o IAFV e de 0,5 a 4 para o IAFS.

Para possibilitar a comparação entre os espectros simulados, os valores dos demais parâmetros de entrada do modelo, de ocorrência característica do estágio de desenvolvimento em que a cultura foi estudada, foram mantidos fixos (Tabela 3.5), resultando em 1.152 simulações (nove IAFV × oito IAFS × quatro DAFV × quatro DAFS).

Tabela 3.5 – Valores nominais e intervalos dos parâmetros de entrada utilizados nas simulações de reflectância de dossel pelo modelo PROSAILH, para o teste de sensibilidade à arquitetura de dossel.

	N	Cl	Cw	Cm	IAF	DAF ¹
Folha Verde	1,4	31,4708	0,0274	0,0122	2 a 6 (passo: 0,5)	1 a 4
Folha Senescente	-----	espectro medido	-----	-----	0,5 a 4 (passo: 0,5)	1 a 4

¹ DAF correspondente: 1 esférica, 2 planófila, 3 plagiófila e 4 erectófila.

Os índices de vegetação previamente analisados em escala de folha foram então calculados a partir de 1.152 espectros simulados (nove IAFV × oito IAFS × quatro DAFV × quatro DAFS), selecionando-se os com valores mais estáveis entre as diferentes estruturas de dossel simuladas, ou seja, com os menores valores de coeficiente de variação (C.V.). De acordo com a classificação proposta por Gomes (1985), adotada neste estudo, os valores são classificados como baixos quando menores do que 10%, médios quando de 10% a 20%, altos quando de 20% a 30% e muito altos quando maiores do que 30%.

Definidos os índices a serem utilizados na estimação de conteúdo de clorofila, estes foram novamente calculados, porém, a partir da média dos espectros simulados correspondentes a cada $V_n C_n$ de treinamento.

3.6.3 Modelos estatísticos

A partir dos índices selecionados na etapa anterior, a análise de regressão foi realizada entre os valores simulados dos índices e a média do conteúdo de clorofila. Com isto, equações semi-empíricas foram obtidas em escala de dossel, uma para cada índice de vegetação utilizado.

Após a obtenção das equações de estimação de conteúdo de clorofila de dosséis de cana-de-açúcar, realizou-se a avaliação do coeficiente de correlação das equações.

Para analisar os coeficientes de correlação, equações com $|r| < 0,50$ foram considerados de baixa correlação linear entre as duas variáveis analisadas e, portanto, descartadas das etapas seguintes da metodologia.

3.6.4 Índices Hyperion

Os mesmos índices de vegetação calculados para a média dos espectros simulados dos V_nC_n de treinamento foram calculados para a média dos adquiridos pelo *Hyperion*, originando valores medidos de índices para cada V_nC_n .

3.6.5 Estimação de conteúdo de clorofila

Posteriormente, os valores dos índices calculados a partir dos dados *Hyperion* foram utilizados como variáveis independentes nos respectivos modelos estatísticos gerados (item 3.6.3), estimando-se os conteúdos de clorofila (variável dependente) de cada V_nC_n .

3.6.6 Avaliação

Nesta fase foi realizada uma comparação entre os valores estimados de conteúdo de clorofila pelos modelos com os valores medidos em laboratório.

Esta comparação baseou-se nos valores do coeficiente de correlação linear (r), do Erro Médio (EM, $\mu\text{g Ccl.cm}^{-2}\text{MV}$), do erro padrão da estimativa (equivalente à da Raiz da Média do Erro ao Quadrado_RMEQ, $\mu\text{g Ccl.cm}^{-2}\text{MV}$) e do Coeficiente de Variação da RMEQ (CV(RMEQ), %) referentes às correlações das estimativas com os conteúdos de

clorofila medidos em laboratório.

3.7 Validação da metodologia (Fase B)

A fase da validação é crucial para se obter um indicativo das potencialidades e da sensibilidade da metodologia desenvolvida.

3.7.1 Dados do sensor *Hyperion*

Para a validação do método desenvolvido (Fase A), os V_nC_n não utilizados para gerar os modelos estatísticos foram utilizados para compor a área de validação.

3.7.2 Índices *Hyperion*

Os índices de vegetação utilizados na Fase A foram calculados a partir da média dos dados *Hyperion* de cada V_nC_n de teste, originando os respectivos valores medidos de índices.

3.7.3 Estimação de componentes bioquímicos

Com os valores medidos dos índices obtidos, o conteúdo de clorofila foi estimado para cada V_nC_n de teste pelo modelo estatístico gerado, conforme ilustrado no fluxograma da Figura 3.2.

3.7.4 Avaliação

Para a avaliação do desempenho das equações geradas por esta metodologia, foram analisados os valores dos coeficientes de correlação linear (r), do Erro Médio (EM, $\mu\text{g Ccl.cm}^{-2}\text{MV}$), da Raiz da Média do Erro ao Quadrado (RMEQ, $\mu\text{g Ccl.cm}^{-2}\text{MV}$) e do Coeficiente de Variação da RMEQ (CV(RMEQ), %) referentes às correlações das estimativas com os conteúdos de clorofila medidos em laboratório.

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Determinação da distribuição angular de folhas dos talhões estudados

Em geral, observou-se boa correspondência entre os espectros simulados pelo modelo PROSAILH e os adquiridos pelo *Hyperion*, destacando-se as combinações V_aC_1 , V_aC_2 , V_cC_3 e V_cC_4 (Figura 4.1).

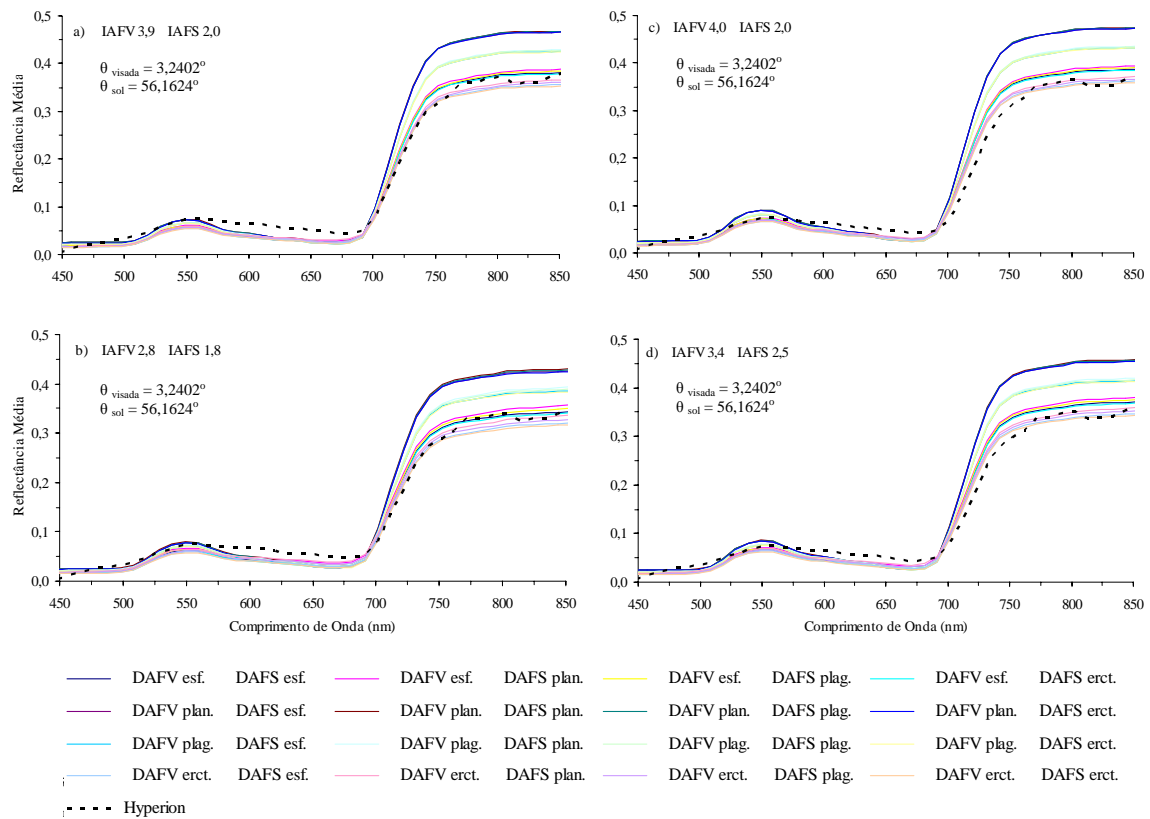


Figura 4.1– Médias dos espectros simulados com diferentes combinações de DAFV e DAFS correspondentes às combinações V_aC_1 (a), V_aC_2 (b), V_cC_3 (c) e V_cC_4 (d) e a média dos espectros adquiridos pelo *Hyperion* para as mesmas combinações V_nC_n . $\theta_{visada} = 3,2402^\circ$ e $\theta_{sol} = 56,1624^\circ$.

Ao analisar os valores dos Erros Médios Absolutos (EMA) para cada combinação de IAFV e IAFS, por banda espectral, na região em que estão posicionadas as bandas das quais os índices de vegetação para estimação de clorofila (450 a 850 nm) são derivados, observou-se que a combinação DAFV erectófila e DAFS planófila (erectófila/planófila)

foi a que mais se aproximou dos espectros *Hyperion* para todos os tratamentos (Tabela B.2; Figura 4.2).

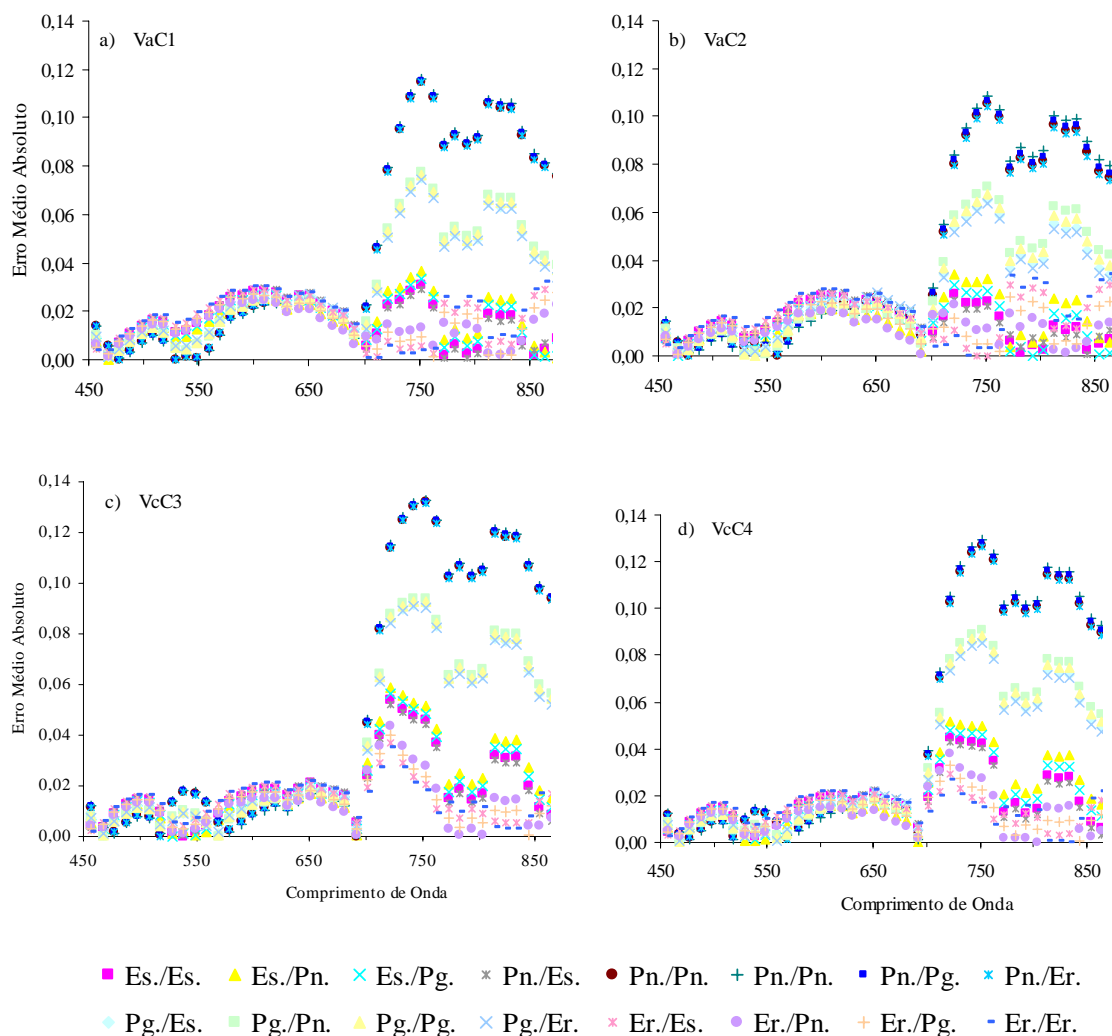


Figura 4.2 – Erro médio absoluto ($\rho.\lambda^{-1}$), obtido entre os espectros simulados com diferentes combinações de DAF (verdes/sensescentes) para os tratamentos V_aC_1 (a), V_aC_2 (b), V_cC_3 (c) e V_cC_4 e a média dos espectros adquiridos pelo *Hyperion* para os mesmos tratamentos.

Embora a DAF erectófila/planófila tenha sido eleita para representar também os dosséis dos tratamentos correspondentes à variedade SP80-3280 (V_cC_n), constatou-se, ao analisar o EMA por bandas da região espectral correspondente ao IVP, que a DAF desta

variedade não foi bem representada pelas combinações das quatro funções teóricas de distribuição angular de folhas utilizadas neste estudo, principalmente em casos de IAFV elevado (Tabela B.2; Figura 4.3), como é o caso do tratamento V_eC_4 (IAFV = 4,3 e IAFS = 1,4).

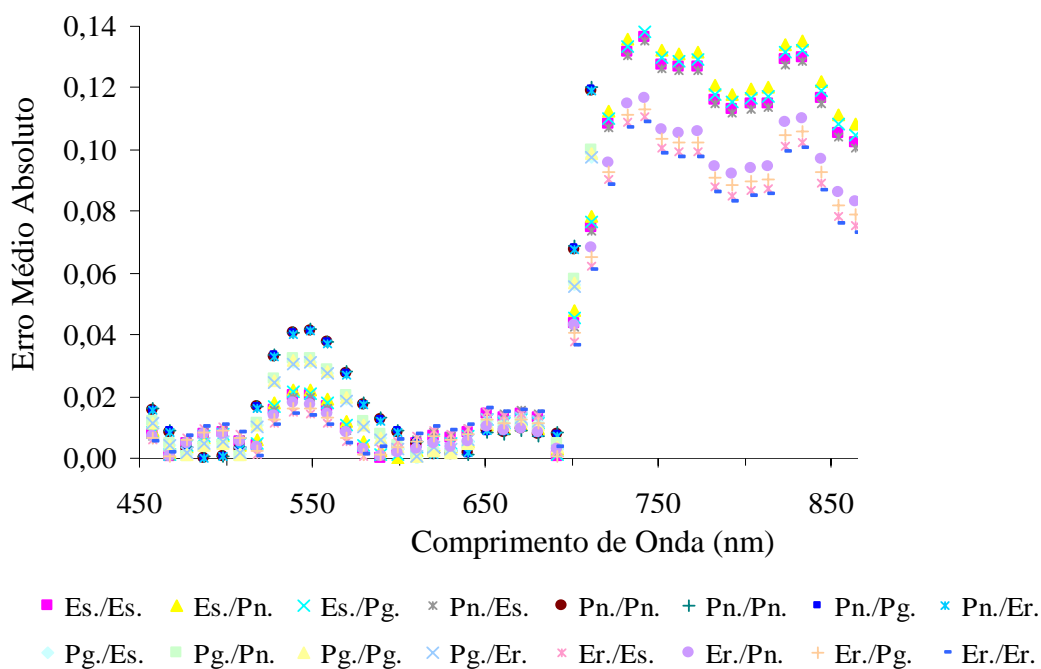


Figura 4.3 – Erro médio absoluto, por banda, obtido entre os espectros simulados com diferentes combinações de DAF (verdes/sensescentes) para a combinação V_eC_4 e a média dos espectros adquiridos pelo *Hyperion* para a mesma.

A utilização dos espectros simulados para as combinações V_eC_n , na etapa de geração dos modelos semi-empíricos de estimação de clorofila, implicaria na obtenção de fracos estimadores se gerados a partir de índices de vegetação com bandas posicionadas na faixa do IV. Ainda, a baixa representatividade da DAF para V_eC_n pela combinação destas quatro FDD sugere a necessidade de funções mais adequadas para melhor descrever a arquitetura do dossel e, conseqüentemente, reduzir o erro entre espectros simulados pelo modelo e adquiridos pelo sensor orbital.

4.2 Contribuição das folhas senescentes na composição da reflectância de dossel de cana-de-açúcar

De acordo com os espectros simulados, para os dosséis de arquitetura foliar erectófila e planófila na primeira camada (Figura 4.4a,b), observa-se que a participação das folhas senescentes na resposta espectral foi menor nas situações em que a camada de folhas verdes apresenta DAFV planófila, considerando-se nas simulações a DAFS planófila para favorecer maior efeito das folhas senescentes nos espectros (Figura 4.4b).

A arquitetura planófila no topo do dossel faz com que grande parte da radiação incidente seja diretamente espalhada na direção do sensor, nos comprimentos de onda do IVP, o que resulta em valores de reflectância elevados nesta região espectral e um incremento dos mesmos à medida que o valor do IAFV aumenta (Figura 4.4b); já no vermelho, a diferença do comportamento espectral em condições de baixo e alto IAFV manteve-se praticamente inalterado indicando a forte absorção da radiação na primeira camada de folhas verdes, mesmo na situação em que o IAFV foi igual ao IAFS (lembrando que os espectros foram simulados com valor fixo, IAFS = 2). Isto se deve provavelmente à pequena quantidade de radiação incidente na segunda camada do dossel favorecida por este tipo de arquitetura, diminuindo assim o efeito causado pela reflectância das folhas senescentes nesta região espectral.

Efeito contrário é observado quando a arquitetura da primeira camada é erectófila (Figura 4.4a). Esta permite maior penetração da radiação incidente no interior do dossel e, conseqüentemente, maior interação dos fótons com ambas as camadas. Comparando-se ao caso anterior (Figura 4.4b), percebem-se menores valores de reflectância nos comprimentos de onda do IVP que aumenta com incrementos de IAFV.

Na região espectral do vermelho, o aumento do IAFV causou significantes alterações na reflectância (Figura 4.4a), observando-se que quanto maior o IAFV menor a reflectância da radiação nesta região, ou seja, menor a contribuição das folhas senescentes na reflectância do dossel.

Em ambos os casos de DAFV, os valores das reflectâncias simuladas na região do IVP

saturaram a partir do valor de IAFV = 3,5, sugerindo uma possível limitação do modelo em estimar o efeito da camada de folhas senescidas na reflectância do dossel (Figura 4.4).

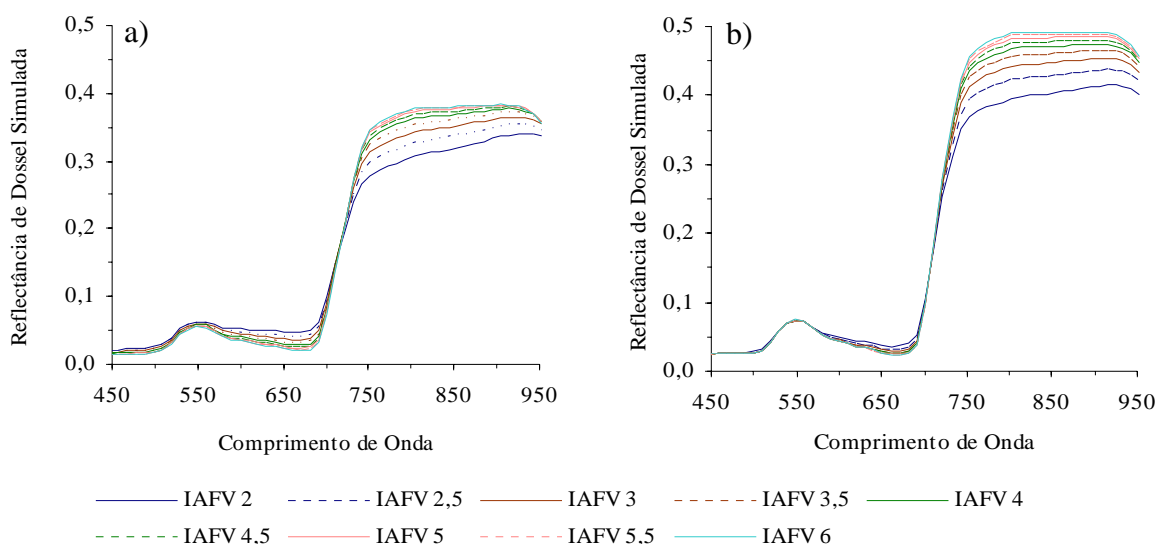


Figura 4.4 – Reflectância de dossel simulada pelo modelo PROSAILH para diferentes valores de IAFV, utilizando DAFS planófila e DAFV erectófila (a) e planófila (b). $\theta_{visada} = 3,2402^\circ$ e $\theta_{sol} = 56,1624^\circ$.

Para determinar a contribuição das folhas senescidas nestes espectros simulados, novas simulações foram realizadas para as mesmas combinações de DAF, no entanto, com IAFV = 2, 4 a 6, e com IAFS = 0,5 a 4 (

Figura 4.5).

Observa-se, em todos os espectros simulados cuja camada de folhas verdes é caracterizada pela DAF planófila, que a reflectância nas regiões do VIS (com exceção do vermelho) e do IVP é mais elevada em relação à dos espectros de DAFV erectófila, quando comparados IAFS equivalentes.

Na região do vermelho, em que ocorre forte absorção da radiação pela clorofila, observa-se reflectância mais elevada nos espectros simulados com dados de DAFV erectófila e de IAFV igual a dois e quatro. Isto ocorre devido à maior penetração da radiação em dosséis de DAFV erectófila, favorecendo a penetração e o espalhamento da radiação incidente no topo do dossel em direção à camada inferior. Na ausência de

folhas senescidas esta arquitetura favoreceria o aumento da absorção da radiação nesta região espectral.

A partir de $IAFV = 3,5$, observou-se nos espectros de dossel com DAFV planófila saturação da reflectância simulada na região do vermelho na condição de $IAFS > 0,5$; já no IVP um pequeno incremento na reflectância foi observado, no entanto, o valor do IAFS pouco interferiu neste resultado (

Figura 4.5f).

Quando caracterizados por DAFV erectófila, a participação das folhas senescidas torna-se mais evidente na reflectância dos dosséis, principalmente em condições de baixo IAFV (

Figura 4.5a). No entanto, com $IAFV = 4$, observa-se que o incremento do IAFS praticamente não altera a reflectância simulada do dossel simulada no modo PROSAILH, havendo distinção apenas do espectro simulado com $IAFS = 0,5$ dos demais (

Figura 4.5b). Com $IAFV = 6$ esta distinção é evidenciada apenas no IVP, região espectral em que a camada de folhas senescidas, por menor que seja, ainda possui participação na reflectância do dossel.

Na região do vermelho, a densa camada de folhas verdes foi responsável pela absorção quase que completa da radiação incidente no topo do dossel, fazendo com que nesta região os espectros se equivalessem aos de um dossel sem a camada de folhas senescidas.

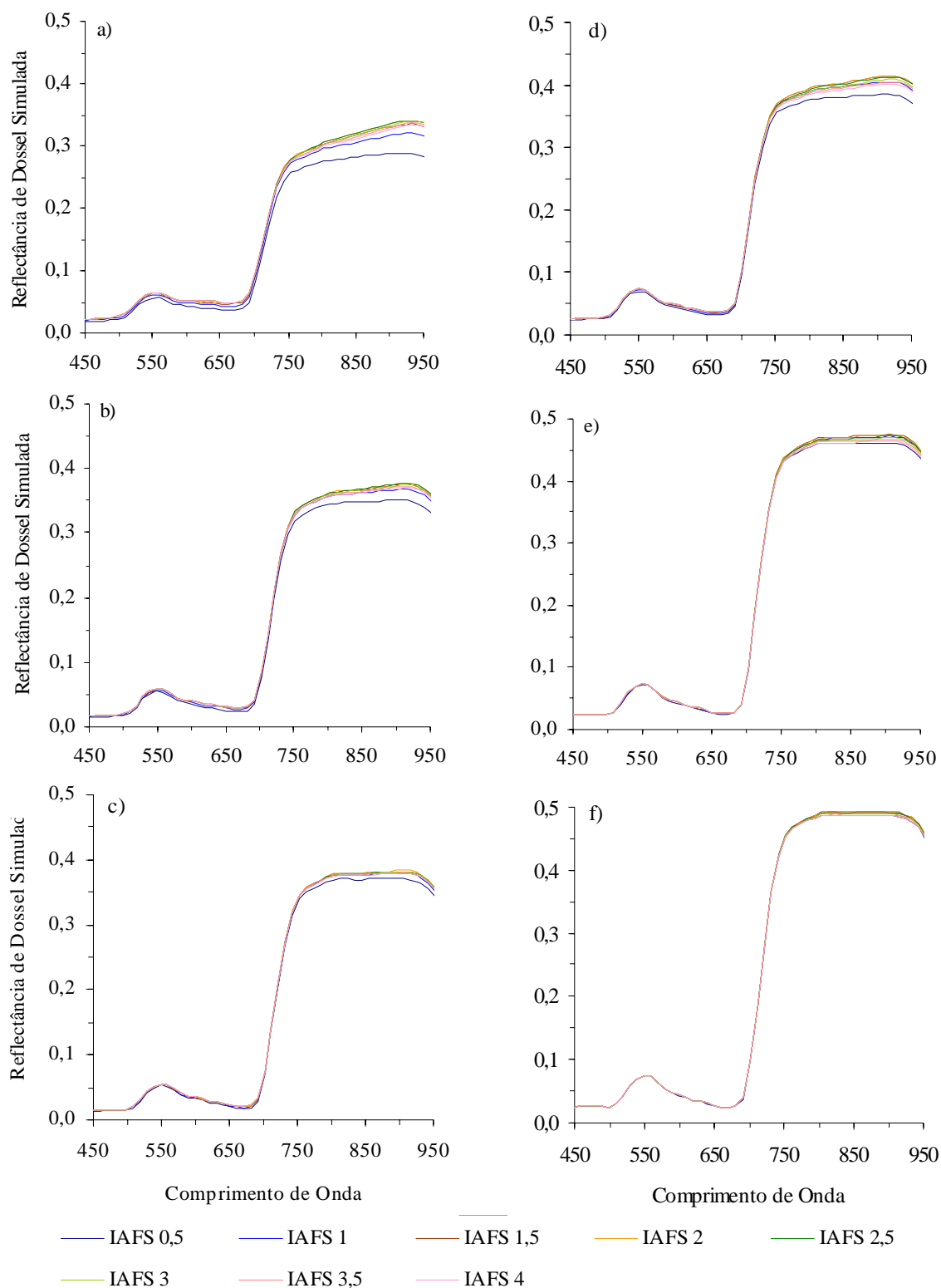


Figura 4.5 – Reflectância de dossel simulada pelo modelo PROSAILH para diferentes valores de IAFS, utilizando-se DAFS planófila e DAFV erectófila (a, b e c) e planófila (d, e e f); o IAFV utilizado foi igual a dois (a e d), quatro (b e e) e seis (c e f). $\theta_{visada} = 3,2402^\circ$ e $\theta_{sol} = 56,1624^\circ$.

4.3 Sensibilidade dos índices à variação do conteúdo de clorofila

Analisando-se os resultados do coeficiente de correlação (r) apresentados na Tabela 4.1, observa-se a presença de correlação linear significativa entre a variação do conteúdo de clorofila (variável independente) e os valores dos índices (variável dependente) estudados.

Os índices considerados mais sensíveis à pequena variação no conteúdo de clorofila no intervalo de interesse, com EPE próximo a zero, coeficiente de determinação igual a $\pm 1,00$ e coeficiente angular significativo a probabilidade de 5%, foram: *Average*, *PSSRb*, *SR550*, *SR705*, *SR710*, *ND705*, *mSR705*, *mND705*, *Licht1*, *Vog1*, *Vog2*, *Volg3*, *GMI*, *GM2* e *TCARI/OSAVI*; no entanto, isto não significa que estes índices sejam bons estimadores de conteúdo de clorofila em escala de dossel.

Dos demais índices, o *PRI2* também apresentou bons resultados: $r = 0,98$, significância de linearidade a 5% de probabilidade e Erro Padrão da Estimativa (EPE) de $1,65 \mu\text{g Ccl.cm}^{-2}$. Quanto ao índice *SRPI2*, apesar do coeficiente de correlação elevado ($r = -0,93$) e coeficiente linear significativo, a distância entre a Soma dos Quadrados do Resíduo ($SQRes$) em relação à Soma dos Quadrados da Regressão ($SQReg$), em termos absolutos, foi inferior quando comparada à dos índices anteriores.

Embora os coeficientes angulares estimados para os índices *REP_FPI* e *REP_linear* tenham apresentado valores próximos de zero ($a = 1,067$), estes valores foram grandes o suficiente (considerando valores absolutos) para demonstrar o efeito linear significativo entre a variação do conteúdo de clorofila e os valores dos índices ($P < 0,05$).

Os índices *G*, *PRI4* e *TVI* foram os que apresentaram maior EPE (6,555, 5,119 e 5,049 $\mu\text{g Ccl.cm}^{-2}$, respectivamente). Ainda assim foi evidenciada correlação entre as variáveis ($r = -0,54$, $0,69$, $-0,75$ e $-0,76$, respectivamente), além de efeito linear da variável independente sobre a variável dependente à probabilidade de 5% ($P < 0,05$).

Tabela 4.1 – Parâmetros associados à equação linear que descreve o efeito da variação do conteúdo de clorofila ($\mu\text{g } C_{cl}.\text{cm}^{-2}$) nos índices hiperespectrais de vegetação estudados.

Índices	r	r2	Soma dos Quadrados da Regressão	Soma dos Quadrados dos Resíduos	Coefficiente Angular	Intercepto	Erro Padrão da Estimativa	p
<i>Average</i>	-1,00	1,00	1.462,489	0,011	-20.713,481	7902,965	0,022	<0,001
<i>PSSRa</i>	0,97	0,94	1.375,977	86,523	5,012	-13,338	1,899	<0,001
<i>PSSRb</i>	1,00	1,00	1.462,023	0,477	4,397	-1,299	0,141	<0,001
<i>SR550</i>	1,00	1,00	1.460,062	2,438	11,461	-8,712	0,319	<0,001
<i>SR680</i>	0,97	0,94	1.375,977	86,523	5,012	-13,338	1,899	<0,001
<i>SR705</i>	1,00	1,00	1.461,302	1,198	23,380	-22,447	0,223	<0,001
<i>SR710</i>	1,00	1,00	1.461,991	0,509	38,052	-38,148	0,146	<0,001
<i>ND660</i>	0,94	0,89	1.297,647	164,853	99,826	-51,227	2,621	<0,001
<i>ND680</i>	0,92	0,85	1.237,655	224,845	128,837	-73,514	3,061	<0,001
<i>ND705</i>	1,00	1,00	1.455,437	7,063	97,850	-7,568	0,542	<0,001
<i>ND677</i>	0,91	0,84	1.223,899	238,601	134,688	-78,807	3,153	<0,001
<i>mND705</i>	1,00	1,00	1.458,258	4,242	78,632	-11,571	0,420	<0,001
<i>PRI1</i>	0,99	0,98	1.426,860	35,640	3.472,842	-6,512	1,219	<0,001
<i>PRI2</i>	0,98	0,96	1.396,791	65,709	677,711	-9,521	1,655	<0,001
<i>PRI3</i>	-0,99	0,98	1.438,381	24,119	-854,642	-17,409	1,002	<0,001
<i>PRI4</i>	-0,75	0,57	833,478	629,022	-1.638,835	-17,320	5,119	<0,001
<i>SIPI1</i>	-0,90	0,81	1.189,637	272,863	-155,528	-24,216	3,372	<0,001
<i>SIPI2</i>	-0,93	0,86	1.256,016	206,484	-90,313	182,424	2,933	<0,001
<i>PSRI</i>	-0,96	0,93	1.353,008	109,492	-2.254,734	117,894	2,136	<0,001
<i>SRPI</i>	0,97	0,95	1.386,853	75,647	43,645	27,784	1,775	<0,001
<i>NPCI</i>	-0,96	0,91	1.333,929	128,571	-69,276	-15,250	2,315	<0,001
<i>G</i>	-0,54	0,29	431,199	1.031,301	-21,607	84,174	6,555	0,004
<i>Licht1</i>	1,00	1,00	1.461,139	1,361	38,717	28,157	0,238	<0,001
<i>SR677</i>	0,97	0,93	1.363,256	99,244	4,991	47,300	2,034	<0,001
<i>Licht2</i>	0,92	0,85	1.237,655	224,845	128,837	81,938	3,061	<0,001
<i>Vog1</i>	1,00	1,00	1.462,500	0,000	111,047	-3,547	0,004	<0,001
<i>Vog2</i>	-1,00	1,00	1.460,194	2,306	-591,641	-14,253	0,310	<0,001
<i>GM1</i>	1,00	1,00	1.460,232	2,268	13,218	-73,514	0,307	<0,001
<i>GM2</i>	1,00	1,00	1.460,566	1,934	11,940	-113,057	0,284	<0,001
<i>Carter</i>	-0,97	0,95	1.389,373	73,127	-81,832	0,657	1,746	<0,001
<i>MCARI</i>	-0,97	0,93	1.362,182	100,318	-95,474	1,428	2,044	<0,001
<i>TCARI</i>	-0,97	0,93	1.362,182	100,318	-31,825	-11,023	2,044	<0,001
<i>OSAVI</i>	0,92	0,84	1.225,115	237,385	169,748	-9,521	3,145	<0,001
<i>TCARI/OSAVI</i>	-1,00	0,99	1.451,546	10,954	-17,213	46,363	0,676	<0,001
<i>CI</i>	-0,96	0,92	1.341,890	120,610	-102,275	51,919	2,242	<0,001
<i>TVI</i>	-0,76	0,58	850,623	611,877	-11,719	51,919	5,049	<0,001
<i>Red-edge_FPI</i>	-0,91	0,83	1.215,685	246,815	-976,451	-86,763	3,207	<0,001
<i>REP_FPI</i>	0,97	0,95	1.390,214	72,286	1,607	47,636	1,735	<0,001
<i>RWP_FPI</i>	0,97	0,95	1.390,214	72,286	2,143	142,117	1,735	<0,001
<i>Red-edge_linear</i>	-0,91	0,83	1.215,685	246,815	-976,451	295,517	3,207	<0,001
<i>REP_linear</i>	0,97	0,95	1.390,214	72,286	1,607	234,333	1,735	<0,001

Apesar de não satisfazer os critérios para ser considerado insensível à pequenas variações de conteúdo de clorofila ($|r| > 0,50$ e $P < 0,05$), o que sugere efeito linear da variável independente sobre a variável dependente a 0,05 de significância, o índice *G* apresentou valor de Soma dos Quadrados do Resíduo (*SQRes*) muito superior ao da Soma dos Quadrados da Regressão (*SQReg*) e variação na resposta dos índices em função da variação do conteúdo de clorofila muito baixa, de apenas 29%.

Vale lembrar que os índices para a estimação de componentes bioquímicos foram gerados pelos seus respectivos autores em escala de folha pela relação entre o conteúdo bioquímico de amostras de folhas e os dados espectrais das mesmas amostras, evitando assim a interferência de outros fatores que não os relacionados ao comportamento espectral da folha nos espectros analisados. Quando uma boa relação não é obtida para variação dos valores dos índices (obtidos em escala de folha) em função da variação do conteúdo de clorofila, dificilmente esta relação é estabelecida em escala de dossel (considerando o mesmo intervalo de valores de clorofila) de forma significativa. Sendo assim, pode-se concluir que o índice *G* dificilmente será considerado sensível às pequenas variações do conteúdo de clorofila no intervalo de 10 a 35 $\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$ quando estudado em dossel.

4.4 Sensibilidade dos índices à variação da arquitetura de dossel

A partir dos espectros simulados de dossel, com diferentes combinações de IAFV, IAFS, DAFV e DAFS, os que apresentaram maior sensibilidade às variações da arquitetura de dossel foram os índices *PSRI* (84,9%), *NPCI* (50,8%) e *PRI4* (48,9%), classificados com C.V. muito alto (superior a 30%), segundo Gomes (1985).

Dos 41 índices de vegetação estudados (Tabela B.3), 18 foram classificados como de baixa variação, sendo considerados de baixa sensibilidade às variações da arquitetura de dossel e, portanto, selecionados para a etapa de estimação do conteúdo de clorofila de dossel das combinações $V_n C_n$ estudadas. São eles: *RWP_FPI* (1,3%); *REP_FPI* (1,8%); *SIPI2* (2,0%); *SIPI1* (2,2%); *Vog1* (3,7%); *PRI2* (3,4%); *ND660*, *ND680* e *Licht2*

(4,6%); *ND677* (4,8%); *CI* (5,2%); *mND705* (5,9%); *ND705* (6,6%); *SR710* (7,0%); *OSAVI* (7,0%); *SR550* e *GM2* (8,2%), e *REP_linear* (9,1%).

4.5 Estimação do conteúdo de clorofila de dossel de cana-de-açúcar

4.5.1 Fase de treinamento (Fase A)

Nesta fase da metodologia, oito V_nC_n foram selecionados aleatoriamente para compor os talhões de treinamento, a partir das quais equações de estimação de clorofila foram geradas.

Das 18 equações geradas pela regressão dos índices simulados e os conteúdos de clorofila (ítem 3.6.3) (Figura 4.2), com base na análise do coeficiente de correlação, oito foram eleitas para dar seqüência à metodologia (Tabela 4.3).

Tabela 4.2 – Coeficientes de correlação (r) e determinação (r^2) das equações de estimação geradas a partir de índices de vegetação de espectros simulados e conteúdo de clorofila medido em laboratório.

Índices Simulados	r	r^2
<i>SR550</i>	0,74	0,54
<i>SR710</i>	0,57	0,33
<i>ND660</i>	0,39	0,15
<i>ND680</i>	0,36	0,13
<i>ND705</i>	0,54	0,29
<i>ND677</i>	0,36	0,13
<i>mND705</i>	0,59	0,34
<i>PRI2</i>	0,63	0,39
<i>SIP11</i>	-0,39	0,15
<i>SIP12</i>	-0,50	0,25
<i>Licht2</i>	0,36	0,13
<i>Vog1</i>	0,56	0,32
<i>GM2</i>	0,71	0,51
<i>OSAVI</i>	0,08	0,01
<i>CI</i>	0,01	0,00
<i>REP_FPI</i>	0,06	0,00
<i>RWP_FPI</i>	0,06	0,00
<i>REP_linear</i>	0,09	0,01

Conforme apresentado na tabela acima, as equações correspondentes aos índices *SR550*, *SR710*, *ND705*, *mND705*, *PRI2*, *SIP12*, *Vog1* e *GM2* apresentaram coeficientes de correlação satisfatórios de acordo com o critério adotado ($r = 0,74, 0,57, 0,54, 0,59,$

0,63, -0,50, 0,56 e 0,71, respectivamente) (Figura 4.6).

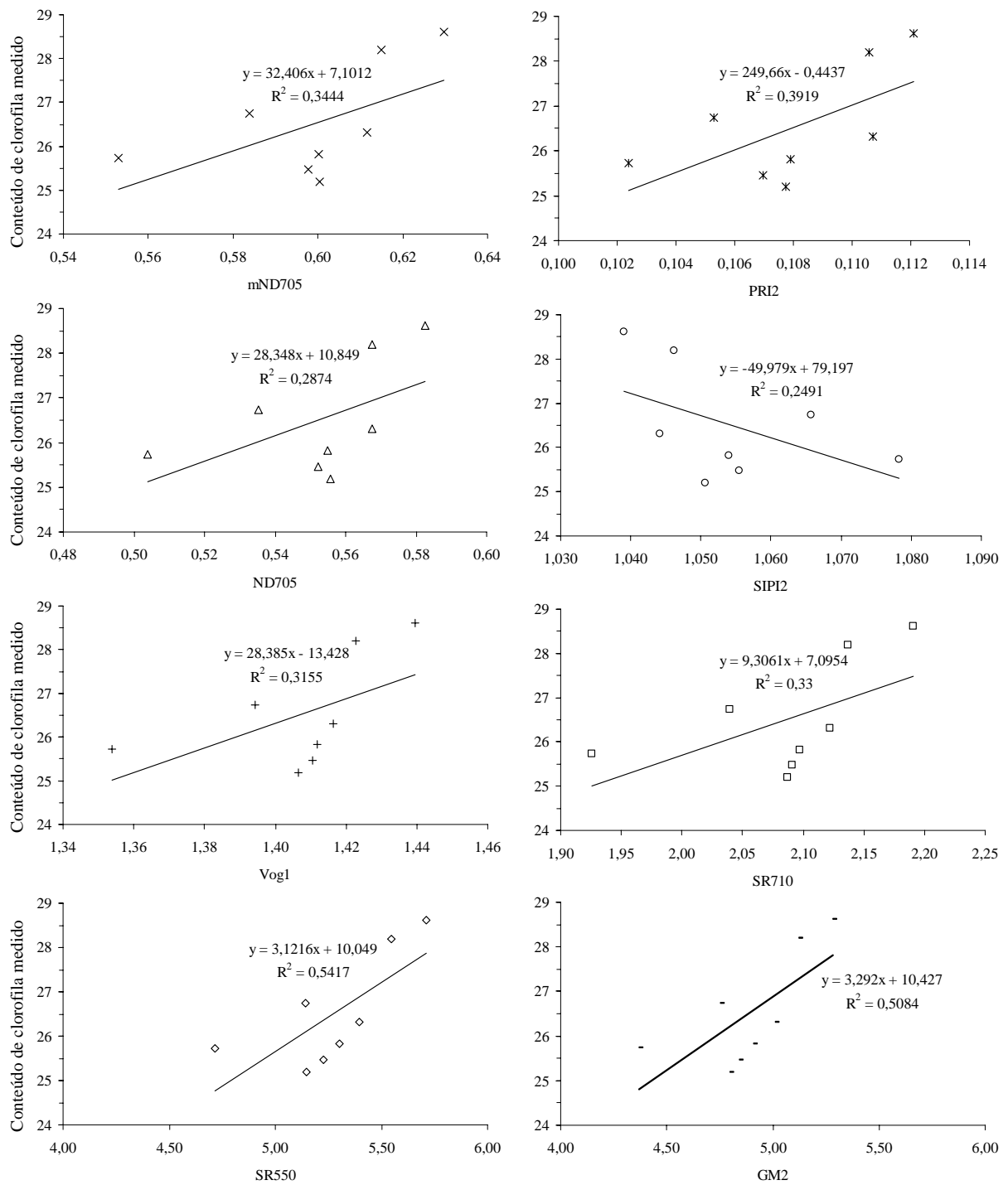


Figura 4.6 – Correlação entre as variáveis conteúdo de clorofila medido ($\mu\text{g } Ccl.\text{cm}^{-2}\text{MV}$) e índice de vegetação simulados pelo modelo PROSAILH.

Os índices de vegetação correspondentes às oito equações selecionadas, geradas pela regressão dos índices simulados e os conteúdos de clorofila (ítem 3.6.3), foram calculados a partir dos dados *Hyperion* (ítem 3.6.4) e os valores obtidos utilizados como variáveis independentes nas respectivas equações.

Os valores dos erros das estimativas do conteúdo de clorofila das áreas de treinamento estão apresentados na Tabela 4.3.

Tabela 4.3 – Coeficientes de correlação (r) e de determinação (r^2), Erro Médio (EM), Raíz da Média do Erro ao Quadrado (RMEQ) e Coeficiente de Variação da RMEQ (CV(RMEQ)) correspondentes às oito regressões entre conteúdo de clorofila estimado, utilizando-se índices calculados a partir dos dados *Hyperion*, e medido em laboratório.

Índices <i>Hyperion</i>	r	r^2	EM --- $\mu\text{g Ccl.cm}^{-2}\text{MV}$ ---	RMEQ	CV (RMEQ) %
<i>SR550</i>	-0,38	0,15	-2,01	2,88	12
<i>SR710</i>	-0,33	0,11	1,06	3,20	12
<i>ND705</i>	-0,45	0,20	0,48	2,31	9
<i>mND705</i>	-0,43	0,18	-0,19	2,37	9
<i>PRI2</i>	-0,97	0,94	0,33	2,39	9
<i>SIPI2</i>	-0,30	0,09	-6,07	6,47	32
<i>Vogl</i>	-0,27	0,07	2,14	3,75	13
<i>GM2</i>	-0,43	0,19	-3,12	3,68	16

As correlações negativas obtidas ao utilizar os valores dos índices de vegetação medidos (dados *Hyperion*) nas equações geradas com os valores simulados podem ser explicadas pelos seguintes fatores:

- a) a atribuição do valor 1,4 ao parâmetro N (estrutura foliar, modelo PROSPECT);
- b) a baixa representatividade das FDD utilizadas, que diminuiu a acurácia dos dados de reflectância de dossel simulados; e
- c) a pequena variabilidade dos conteúdos de clorofila nos talhões estudados aliada à baixa relação sinal-ruído do sensor *Hyperion*.

De acordo com os valores de EM, as equações referentes aos índices *SR550*, *mND705*, *SIP12* e *GM2* apresentaram tendência para subestimar os valores de conteúdo de clorofila; já as referentes aos demais, para superestimar.

As equações correspondentes aos índices *SR550*, *ND705*, *mND705* e *PRI2* resultaram em pequenos erros de estimação do conteúdo de clorofila (RMEQ = 2,88, 2,31, 2,37 e 2,39 $\mu\text{g Ccl.cm}^{-2}\text{MV}$). Ao normalizar o RMEQ em relação à média (CV(RMEQ)) observou-se que, das equações de menor erro, as correspondentes aos índices *ND705*, *mND705* e *PRI2* produziram erros mais estáveis, com apenas 9% de variação (Tabela 4.3).

Com base nesta avaliação de desempenho dos modelos estatísticos, concluiu-se que a equação de melhor correlação linear ($|r| > 0,50$) foi atribuída à do índice *PRI2* ($r = -0,97$), com coeficiente de determinação também elevado ($r^2 = 0,94$) (Figura 4.7). Este resultado aliado ao pequeno erro de estimação conferiu a esta equação a melhor capacidade de predição do conteúdo de clorofila de dossel, sendo, portanto, selecionada para a segunda fase da metodologia, a de validação.

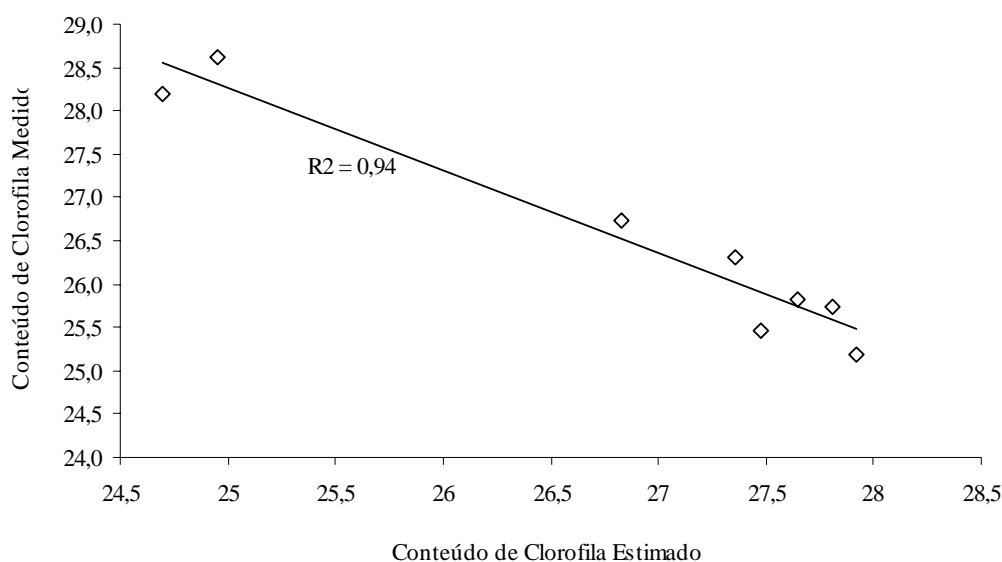


Figura 4.7 – Regressão entre conteúdo de clorofila medido ($\mu\text{g Ccl.cm}^{-2}\text{MV}$) e estimado ($\mu\text{g Ccl.cm}^{-2}\text{MV}$), baseada no índice de vegetação *PRI2*, correspondentes às áreas de treinamento.

4.5.2 Fase de validação (Fase B)

Nesta fase da metodologia, a partir das V_nC_n não utilizados na fase de geração dos modelos estatísticos, a equação de estimação de conteúdo de clorofila selecionada na fase anterior foi validada.

O índice *PRI2* foi calculado a partir dos espectros médios *Hyperion* das V_nC_n de teste e os valores obtidos utilizados como variáveis independentes na equação gerada na fase de treinamento (item 3.7.3).

Tabela 4.4– Coeficientes de correlação (r) e de determinação (r^2), Erro Médio (EM), Raíz da Média do Erro ao Quadrado (RMEQ) e Coeficiente de Variação da RMEQ (CV(RMEQ)) correspondentes à regressão entre conteúdo de clorofila estimado, utilizando-se o índice *PRI2* calculado a partir dos dados *Hyperion*, e medido em laboratório.

Índices <i>Hyperion</i>	r	r^2	EM --- $\mu\text{g Ccl.cm}^2\text{MV}$ ---	RMEQ	CV (RMEQ) %
<i>PRI2</i>	0,43	0,18	0,02	2,92	10

De acordo com o valor de EM (Tabela 4.4), a equação de estimação de conteúdo de clorofila, gerada com base no índice de vegetação *PRI2*, apresentou tendência para subestimar os valores de conteúdo de clorofila.

O valor de RMEQ (2,92 $\mu\text{g Ccl.cm}^2\text{MV}$), demonstrou bom desempenho da equação para estimar o conteúdo de clorofila, com CV(RMEQ) entre os talhões amostrados de 10%; ainda, o coeficiente de correlação entre as variáveis foi satisfatório ($r = 0,43$), no entanto, com coeficiente de determinação muito baixo ($r^2 = 0,18$) (Figura 4.8).

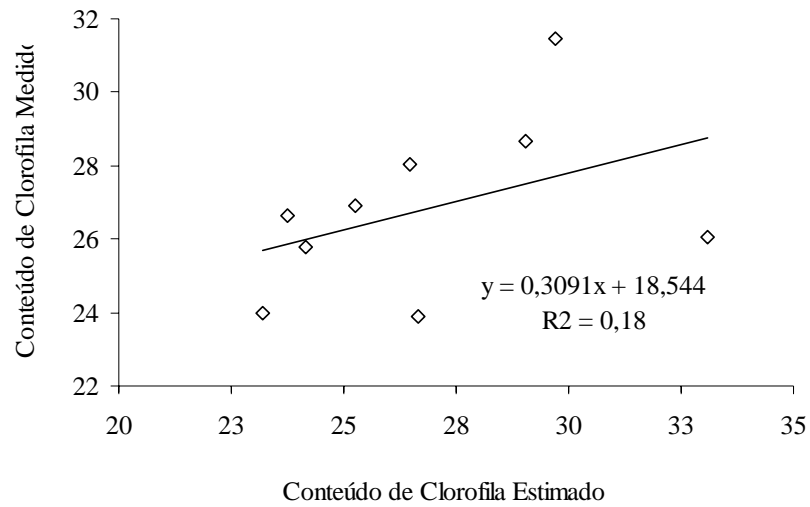


Figura 4.8 – Regressão entre conteúdo de clorofila medido ($\mu\text{g } Ccl.\text{cm}^{-2}\text{MV}$) e estimado ($\mu\text{g } Ccl.\text{cm}^{-2}\text{MV}$), baseada no índice de vegetação *PRI2*, correspondentes às áreas de validação.

A partir desta equação, um mapa de clorofila espacializada pixel-a-pixel foi produzido para as áreas canavieiras da imagem *Hyperion* (Figura 4.9).

No mapa apresentado na Figura 4.9 observa-se que a clorofila varia nos talhões no intervalo de 24 a 38 $\mu\text{g}.\text{cm}^{-2}$ de clorofila.

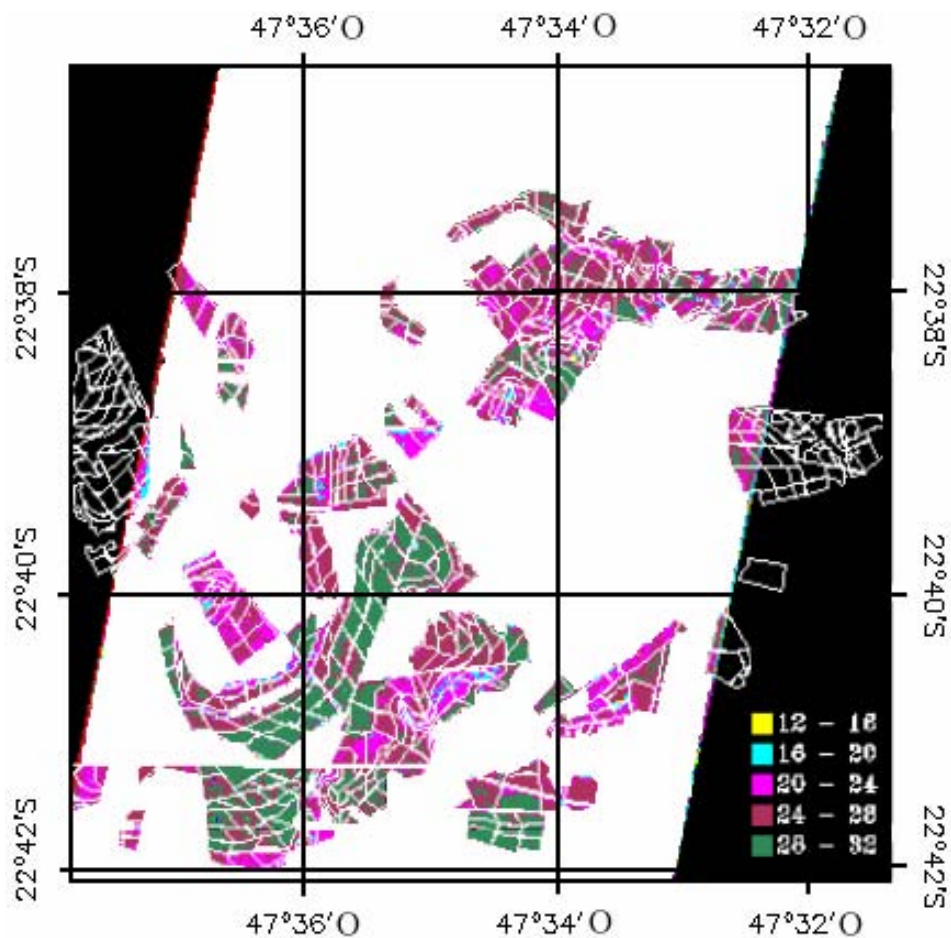


Figura 4.9 – Conteúdo de clorofila ($\mu\text{g Ccl.cm}^2\text{MV}$) espacializado *pixel-a-pixel*, em talhões localizados na área da Usina Costa Pinto (Grupo COSAN/FBA), a partir da equação baseada no índice *PRI2*.

A baixa dispersão do conteúdo de clorofila obtido nas análises bioquímicas também é observada na superfície de variação de clorofila mapeada (Figura 4.9) dentro dos talhões. Pela aplicação do modelo baseado no índice *PRI2*, selecionado pelos critérios adotados na metodologia deste trabalho, conclui-se que a homogeneidade do ambiente de produção induziu baixa variabilidade e pequena amplitude nos valores de clorofila na folha, que por sua vez, refletiu-se na variabilidade do conteúdo de clorofila no dossel mapeado.

5 CONCLUSÕES

Ao serem estabelecidas diferentes combinações de DAF verde e senescente, o modelo de transferência radiativa PROSAILH simulou de forma satisfatória os espectros adquiridos pelo sensor *Hyperion* ao considerar a combinação DAFV erectófila e DAFS planófila. No entanto, os espectros simulados dos talhões correspondentes às $V_e C_n$ apresentaram valores de Erro Médio Absoluto elevados na região do IVP. Isto implicaria na geração de estimadores de clorofila não consistentes se gerados a partir de índices de vegetação com bandas posicionadas na faixa do IVP.

A baixa representatividade da DAF para os talhões V_e , por qualquer uma das quatro combinações das FDD utilizadas sugere a necessidade da utilização de funções alternativas e, possivelmente, específicas para a cultura da cana-de-açúcar. No entanto, a limitação pode estar relacionada à hipótese do modelo SAILH em considerar homogênea a distribuição dos elementos de dossel nas camadas de estratificação consideradas para este estudo.

Por meio de simulações de reflectância de dossel de cana-de-açúcar, utilizando-se o modelo PROSAILH, ficou evidenciada a contribuição das folhas senescidas na resposta espectral dos dosséis de cana-de-açúcar. No entanto, ao analisar os espectros simulados, pode-se observar saturação na reflectância na região de IVP a partir de valores de IAFV = 3,5, independentemente da combinação de DAF utilizada, sugerindo uma possível limitação do modelo quando a camada de folhas senescidas passa a ser considerada.

Ao testar a sensibilidade dos índices de vegetação utilizando o modelo PROSPECT-4 para o intervalo de ocorrência de conteúdo de clorofila no período de maturação da cultura de cana-de-açúcar, a equação referente ao índice PRI2 apresentou $r = 0,98$, além de significância de linearidade a 5% de probabilidade e $EPE = 1,65 \mu\text{g Cl.cm}^{-2}$.

Das simulações realizadas pelo modelo PROSAILH para identificar os índices insensíveis a diferentes combinações de DAF e IAF verde e senescente, os índices RWP_FPI (C.V. = 1,3%) e REP_FPI (C.V. = 1,8%) foram os menos sensíveis à variação de estrutura de dossel; já o índice $PRI2$ apresentou uma variação de 3,4% entre

as diferentes situações estudadas, sendo o sexto índice menos sensível. Foram descartados, com base nesta análise, 23 índices de vegetação considerados sensíveis à variação da arquitetura de dossel. Vale lembrar que estas simulações foram feitas com parâmetros de folha fixos para isolar o efeito do dossel sobre os espectros simulados; no entanto, analisando o aspecto fisiológico da cultura, alguns destes espectros podem não ser encontrados na natureza.

Na fase de estimação de conteúdo de clorofila de dossel, a equação gerada entre índices simulados dos talhões de treinamento e clorofila medida que apresentou melhor coeficiente de correlação foi baseada no índice *SR550* ($r^2 = 0,74$), sendo a baseada no índice *PRI2* ($r^2 = 0,74$) a terceira dentre as oito melhores.

O índice *PRI2* dos dados *Hyperion* correspondentes às áreas de treinamento, ao serem utilizados sobre a equação do referido índice, resultou na equação de melhor potencial de estimação ($r = -0,97$, $r^2 = 0,94$, RMEQ = 2,39 $\mu\text{g Ccl.cm}^{-2}\text{MV}$ e CV (RMEQ) = 9 %).

Ao validar a equação em talhões não utilizados na fase de geração do modelo estatístico, o desempenho da equação para estimar o conteúdo de clorofila foi considerado satisfatório, resultando em valores de $r = 0,43$, RMEQ = 2,92 $\mu\text{g Ccl.cm}^{-2}\text{MV}$ e CV(RMEQ) = 10%, no entanto, com coeficiente de determinação muito baixo ($r^2 = 0,18$).

A partir desta equação, um mapa de clorofila espacializada *pixel-a-pixel* que confirmou a baixa dispersão do conteúdo clorofila no dossel foi produzido para as áreas canavieiras da imagem *Hyperion*.

5. 1 Considerações finais

Esta pesquisa buscou abordar um novo método para estimar o conteúdo de clorofila em dosséis de cana-de-açúcar. A utilização de MTR de folha e de dossel acoplados possibilita que índices de vegetação gerados em escala de folha sejam avaliados em diversos dosséis hipotéticos, selecionando-se aqueles de maior sensibilidade ao conteúdo de clorofila e de menor sensibilidade aos demais fatores inerentes ao meio, capazes de interferir na resposta espectral dos dosséis. Este método é mais apropriado do que o uso de relações empíricas entre a reflectância de folha e o conteúdo de clorofila para a estimação deste parâmetro em escala de dossel.

A partir dos resultados obtidos, novos estudos deverão ser realizados atentando para alguns fatores verificados na presente pesquisa, os quais foram responsáveis pela baixa correlação entre conteúdo de clorofila medido e estimado. Estes fatores foram os seguintes:

- a) o uso de um único modelo gerado para estimar o conteúdo de clorofila, a partir de diferentes cultivares de cana-de-açúcar e em diferentes ciclos de desenvolvimento;
- b) ausência de medidas de reflectância de folhas, que seriam utilizadas como referência na transição de escala de folha para escala de dossel;
- c) pequena variabilidade do conteúdo de clorofila nos talhões estudados, aliada à baixa relação sinal-ruído do sensor *Hyperion* e ao pequeno número de amostras;
- d) parametrização empírica do N (estrutura foliar) no modelo PROSPECT; e
- e) baixa representatividade das FDD, sugerindo a necessidade da utilização de funções alternativas e, possivelmente, específicas para a cultura da cana-de-

açúcar.

Além disso, outro fator a ser considerado em futuras pesquisas é a questão de validações em épocas diferentes de aquisição de imagem e a partir de outras cultivares de cana-de-açúcar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AHMAD, I. S.; REID, J. F.; NOGUCHI, N.; HANSEN, A. C. Nitrogen sensing for precision agricultural using chlorophyll maps. In: ASAE/CSAE-SCGR ANNUAL INTERNATIONAL MEETING, 1999, Toronto, ON, Canada. **Proceedings...**Toronto: ASAE/CSAE-SCGR., 1999.
- ALEXANDER, A. G. **Sugarcane physiology**. Elsevier Scientific Publishing Company, 1973. 752p.
- ALLEN, W. A.; GAUSMAN, H. W.; RICHARDSON, A. J. Willstätter-Stoll theory of leaf reflectance evaluation by ray tracing. **Applied Optics**, v.12, n.10, p.2448-2453, 1973.
- ALLEN, W. A.; GAUSMAN, H. W.; RICHARSON, A. J.; THOMAS, J. R. Interaction of isotropic light with compact plant leaf. **Journal of the Optical Society of America**, v.59, n.10, 1376-1379, 1969.
- ALLEN, W. A.; GAYLE, ; RICHARSON, A. J. Plant canopy irradiance specified by the Duntley equations. **Journal of the Optical Society of America**, v.60, n.3, p.372-376, 1970.
- ALMEIDA, F. F. M. 1964. Fundamentos geológicos do relevo paulista. **Boletim do Instituto Geográfico e Geológico**, São Paulo, v.41, p.169-263.
- ANALYTICAL SPECTRAL DEVICE INC (ASDI). **Soil and vegetation spectrometer**, Nov. 2005. Disponível em: <<http://www.asdi.com/products-AgriSpec.asp>>. Acesso em: Nov. 2005.
- APAN, A.; HELD, A.; PHINN, S.; MARKLEY, J. Detecting sugarcane ‘orange rust’ disease using EO-1 *Hyperion* hyperspectral imagery. **International Journal of Remote Sensing**, v.25, n.2, p.489-498, 2004.
- ARGENTA, G.; SILVA, P. R. F. da; BARTOLINI, C. G.; FORSTHOFER, E. L.; STRIEDER, M. L. Relação da leitura do clorofilômetro com os teores de clorofila extraível e nitrogênio na folha de milho. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Lavras, v. 13, n. 2, p. 158-167, 2001.
- ARIZONO, H. **Bula 2003**. São Carlos: Universidade Federal de São Carlos, 2003. 43p.
- ARNON, D. I. Copper enzymes in isolated chloroplasts. Polyphrenol oxidase in *Beta vulgaris*. **Plant Physiology**, v.24, p.1-15, 1949.
- ASNER, G. P. Biophysical and biochemical sources of variability in canopy reflectance **Remote Sensing of Environment**, v.64, p.234-253, 1998.

ASSOCIAÇÃO DOS PLANTADORES DE CANA DE GUARIBA (SOCICANA).

Variedades de cana, Fev. 2004. Disponível em:

<<http://www.coplana.com/gxpsites/hgxpp001.aspx?1,5,317,O,P,0,,.html>>. Acesso em: Dez. 2008.

BARET, F., FOURTY, T. H. Estimation of leaf water content and specific leaf weight from reflectance and transmittance measurements, **Agronomie**, v.17, p.455-464, 1997.

BERK, A.; ANDERSON, G. P.; BERNSTEIN, L. S.; ACHARYA, P. K.; DOTHE, H.; MATTHEW, M. W.; ADLER-GOLDEN, S. M.; CHETWYND, J. H.; RICHTSMEIER, S. C.; PUKALL, B.; ALLRED, C. L.; JEONG, L. S.; HOKE, M. L. MODTRAN4 Radiative transfer modeling for atmospheric correction. In: SPIE OPTICAL SPECTROSCOPIC TECHNIQUES AND INSTRUMENTATION FOR ATMOSPHERIC AND SPACE RESEARCH III, 1999, Denver. **Proceedings...** Denver: SPIE, v.3756, 1999.

BLACKBURN, G. A. Quantifying chlorophylls and carotenoids at leaf and canopy scales: an evolution of some hyperspectral approaches. **Remote Sensing of Environment**, v.66, n.3, p.273-285, 1998b.

BLACKBURN, G. A. Spectral indices for estimating photosynthetic pigment concentrations: a test using senescent tree leaves. **International Journal of Remote Sensing**, v.19, n.4, p. 657-675, 1998a.

BLACKMER, T. M.; SCHEPERS, J. S. Use of a chlorophyll meter to monitor nitrogen status and schedule fertigation of corn. **Journal of Production Agriculture**, v.8, p.56-60, 1995.

BROGE, N. H.; LEBLANC, E. Comparing prediction power and stability of broadband and hyperspectral vegetation indices for estimation of green leaf area index and canopy chlorophyll density. **Remote Sensing of Environment**, v.76, p.156-172, 2000.

CAMPOS, R. C. **Modelo de transferência radiativa para dosséis descontínuos regulares (GRART)**: aplicação para dosséis de café. São José dos Campos, 2009. 146p. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE-15678-TDI/1452)

CARTER, G. A. Ratios of leaf reflectances in narrow wavebands as indicators of plant stress. **International Journal of Remote Sensing**, v.15, p.697-703, 1994.

CASTELLI, F.; CONTILLO, R.; MICELI, F. Non-destructive determination of leaf chlorophyll content in four crop species. **Journal of Agronomy and Crop Science**, Berlin, v. 177, p. 275-283, 1996.

CESAR, M. A. A.; SILVA, F. C. **A cana-de-açúcar como matéria-prima para a indústria sucroalcooleira**. Piracicaba, ESALQ, 1993. 108p.

CHAPELLE, E.W.; KIM, M.S.; MCMURTREY, J.E. Ratio analysis of reflectance spectra (RARS): an algorithm for the remote estimation of the concentrations of chlorophyll a, chlorophyll b and the carotenoids in soybean leaves. **Remote Sensing of Environment**. v.39, n.3, p.239-247, 1992.

COLWELL, J. E. Vegetation canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v.3, p.175-183, 1974.

CURRAN, P. J.; DUNGAN, J. L.; PETERSON, D. L. Estimating the foliar biochemical concentration of leaves with reflectance spectrometry: testing the Kokaly and Clark methodologies. **Remote Sensing of Environment**. v.76, p.349-359, 2001.

DAUGHTRY, C. S. T.; WALTHALL, C. L.; KIM, M. S.; BROWN DE COLSTON, E.; MCMURTREY, J. E. Estimating corn leaf chlorophyll concentration from leaf and canopy reflectance. **Remote Sensing of Environment**. v.74, n.2, p. 229-239, 2000.

DAWSON, T. P.; CURRAN, P. J. A new technique for interpolating the reflectance red edge position. **International Journal of Remote Sensing**, v.19, p.2133–2139, 1998.

DAWSON, T. P.; CURRAN, P.J.; NORTH, P. R. J.; PLUMMER, S. E. The propagation of leaf biochemical absorption features in forest canopy reflectance: a theoretical analysis. **Remote Sensing of Environment**, v.67, p.147-159, 1999.

DE WIT, C. T. **Photosynthesis of leaf canopies**. Wageningen, Netherlands: Pudoc. Institute for Biology and Chemistry Research on Field Crops and Herbage, , 1965. 57p. (Agriculture Research Report 663).

DE WIT, C.T. **Simulation of assimilation, respiration, and transpiration of crops**. Wageningen: Centre for Agricultural Publishing and Documentation, 1978. 141p.

DEMAREZ, V.; GASTELLU-ETCHEGORRY, J. P. A modeling approach for studying forest chlorophyll content. **Remote Sensing of Environment**, v.71, p. 226–238, 2000.

EMBRAPA – EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, 1999. 412p.

EPSTEIN, E. **Nutrição mineral de plantas: princípios e perspectivas**. Tradução de Malavolta, E. São Paulo: EDUSP, Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1975. 341p.

FERET, J. B.; FRANÇOIS, C.; ASNER, G. P.; GITELSON, A. A.; MARTIN, R. E.; BIDEL, L. P. R.; USTIN, S. L.; MAIRE, G.; JACQUEMOUD, S. PROSPECT-4 and 5: advances in the leaf optical properties model separating photosynthetic pigments. **Remote Sensing of Environment**, v.112, 3030–3043, 2008.

- FORTES, C. ; DEMATTE, J. A. M. . Discrimination of sugarcane varieties using Landsat 7 ETM+ spectral data. **International Journal of Remote Sensing**, Piracicaba, SP, Brazil, v. 27, n. 7, p. 1395-1412, 2006.
- GALVÃO, L. S.; FORMAGGIO, A. R.; TISOT, D. A. Discrimination of sugarcane varieties in Southeastern Brazil with EO-1 *Hyperion* data. **Remote Sensing of Environment**. v.94, n.4, p.523-534, 2005.
- GAMON J.A.; SERRANO, L.; SURFUS. J. S. The photochemical reflectance index: an optical indicator of photosynthetic radiation use efficiency across species, functional types, and nutrient levels. **Oecologia**, v.112, n.4, p.492-501, 1997.
- GAMON, J. A.; PEÑEULAS, J.; FIELD, C. B. A narrow-waveband spectral index that tracks diurnal changes in photosynthetic efficiency. **Remote Sensing of Environment**. v.41, p.35–44, 1992.
- GAMON, J. A.; SURFUS, J. S. Assessing leaf pigment content and activity with a reflectometer. **New Phytologist**, v.143, p.105-117, 1999.
- GITELSON, A. A.; MERZLYAK, M. N. Spectral reflectance changes associated with autumn senescence of *Aesculus hippocastanum* L. and *Acer platanoides* L. leaves: spectral features and relation to chlorophyll estimation. **Journal of Plant Physiology**, v.143, p.286–292, 1994.
- GITELSON, A. A.; MERZLYAK, M. N. Signature analysis of leaf reflectance spectra: algorithm development for remote sensing of chlorophyll. **Journal of Plant Physiology**, v.148 p.494-500, 1996.
- GITELSON, A. A.; MERZLYAK, M. N. Remote estimation of chlorophyll content in higher plant leaves. **International Journal of Remote Sensing**, v.18, p.2691-2697, 1997.
- GITELSON, A. A.; BUSCHMAN, C.; LICHTENTHALER, H. K. The chlorophyll fluorescence ratio F735/F700 as an accurate measure of chlorophyll content in plants. **Remote Sensing of Environment**, v.69, p.296-302, 1999.
- GOEL, N. Models of vegetation canopy reflectance and their use in estimation of biophysical parameters from reflectance data. **Remote Sensing Reviews**, v.4, p.1-212, 1988.
- GOMES, P. F. **Curso de estatística experimental**. São Paulo: Nobel, 1985.467p.
- GOODENOUGH, D. G.; DYK, A.; NIEMANN, O.; PEARLMAN, J. S.; CHEN, H.; HAN, T.; MURDOCH, M.; WEST, C. Processing *HYPERION* and ALI for Forest Classification. **IEEE Transaction of Geoscience and Remote Sensing**, v.41, n.2, p.1321-1331, 2003.

- GREEN, A. A.; BERMAN, M.; SWITZER, P.; CRAIG, M. D. A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.26, p.65-74, 1988.
- GUYOT, G.; BARET, F.; JACQUEMOUD, S. Imaging spectroscopy for vegetation studies. In: TOSELLI, F. (ed.). **Imaging spectroscopy: fundamentals and prospective application**, 1992. p.145–165.
- GUYOT, G.; GUYON, D.; RIOM, J. Factors affecting the spectral response of forest canopies: a review. **Geocarto International**, v.3, p.3-17, 1989.
- HABOUDANE, D.; MILLER, J. R.; TREMBLAY, N.; ZARCO-TEJADA, P. J.; DEXTRAZE, L. Integrated narrow-band vegetation indices for prediction of crop chlorophyll content for application to precision agriculture. **Remote Sensing of Environment**, v.81, p.416–426, 2002.
- JACKSON, R. D.; PINTER, P. J. Spectral response of architecturally different wheat canopies. **Remote Sensing of Environment**, v. 20, p.43-56, 1986.
- JACQUEMOUD, S. Inversion of the PROSPECT + SAIL canopy reflectance model from AVIRIS equivalent spectra: theoretical study. **Remote Sensing of Environment**, v.44, p. 281–292, 1993.
- JACQUEMOUD, S.; BACOUR, C.; POILVE, H.; FRANGI, J. P. Comparison of four radiative transfer models to simulate plant canopies reflectance: direct and inverse mode. **Remote Sensing of Environment**. v. 74, p. 471–481, 2000.
- JACQUEMOUD, S.; BARET, F. PROSPECT: a model of leaf optical properties spectra. **Remote Sensing of Environment**, v.34, n.2, p.75-91, 1990.
- JACQUEMOUD, S.; BARET, F.; ANDRIEU, B.; DANSON, F. M.; JAGGARD, K. Extraction of vegetation biophysical parameters by inversion of the PROSPECT + SAIL models on sugar beet canopy reflectance data. **Remote Sensing of the Environment**, v.52, p.163–172, 1995.
- JACQUEMOUD, S.; USTIN, S. Leaf optical properties: a state of the art. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM PHYSICAL MEASUREMENTS & SIGNATURES IN REMOTE SENSING, 8.,2001, France. **Proceedings...** France: [s.n], 2001, p.223-232.
- JACQUEMOUD, S.; USTIN, S.L.; VERDEBOUT, J.; SCHMUCK, G.; ANDREOLI, G.; HOSGOOD, B. Estimating leaf biochemistry using the PROSPECT leaf optical properties model. **Remote Sensing of Environment**, v.56, p.194-202, 1996.

JAGO, R. A.; CUTLER, M. E. J.; CURRAN, P. J. Estimating canopy chlorophyll concentration from field and airborne spectra. **Remote Sensing of Environment**, v.68, p. 217– 224, 1999.

JOAQUIM, A. C. **Identificação de variedades de cana-de-açúcar em três classes texturais de solos, na região de Araraquara – SP, através de análise de nível de cinza em imagens LANDSAT/TM**. Campinas, 1998. 118p. Dissertação (M. S.) – Faculdade de Engenharia Agrícola – Universidade Estadual de Campinas.

JOHNSON, L. F.; HLAVKA, C. A.; PETERSON, D. L. Multivariate analysis of AVIRIS data for canopy biochemical estimation along the Oregon transect. **Remote Sensing of Environment**, v. 47, p.216–230, 1994.

KIMES, D. S. Modeling the directional reflectance from complete homogenous vegetation canopies with various leaf-orientation distributions. **Journal of the Optical Society of America**, v.1, p.725-737, 1984.

KUPIEC, J. A.; CURRAN, P. J. Decoupling effects of the canopy and foliar biochemicals in AVIRIS spectra. **International Journal of Remote Sensing**, v.16, p.1731–1739, 1995.

KUUSK A. The inversion of the Nilson-KuusK canopy reflectance model, a test case. **International Geoscience and Remote Sensing Symposium**, Helsinki, Finland, p.1547-1550, 1991,

KUUSK, A. A two-layer canopy reflectance model. **Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer**, v.71, p.1-9, 2001.

LICHTENTHALER, H. K. Chlorophylls and carotenoids: pigment photosynthetic biomembranes. In: Colowick, S. P.; Kaplan, N. O. (Ed.). **Methods in Enzymology**, San Diego, v.148, p.362-385, 1987.

LICHTENTHALER, H. K.; GITELSON, A. A.; LANG, M. Non-destructive determination of chlorophyll content of leaves of a green and an aurea mutant of tobacco by reflectance measurements. **Journal of Plant Physiology**, v. 148, p.483-493, 1996.

MAGALHÃES, A. C. N. Ecofisiologia da cana-de-açúcar: aspectos do metabolismo do carbono na planta. In: Castro, P. R. C.; Ferreira, S. O.; Yamada, T. (Coord.) **Ecofisiologia da produção**. Piracicaba: Associação Brasileira para Pesquisa da Potassa e do Fosfato. p.113-118, 1987.

MALAVOLTA, E.; HAAG, N. P. Nutrição e adubação. In: Malavolta, E. (Ed.) **Cultura e adubação da cana-de-açúcar**. São Paulo: Instituto Brasileiro da Potassa, 1964. p.237-278.

MATSON, P.; JOHNSON, L.; BILLOW, C.; MILLER, J.; PU, R. Seasonal patterns and remote spectral estimation of canopy chemistry across the Oregon transect. **Ecological Application**, v.4, p.280–298, 1994.

MENDONÇA, F. J.; BATISTA, G. T.; TARDIN, A. T. **Projeto CANASATE**: sensoriamento remoto aplicado ao levantamento da cultura canavieira. São José dos Campos: INPE, n.4902, 1989. 17p.

MERZLYAK, M. N., GITELSON, A. A., CHIVKUNOVA, O. B.; RAKITIN, V. Y. Non-destructive optical detection of pigment changes during leaf senescence and fruit ripening. **Physiologica Plantarum**. v.106, p.135–141. 1999

MILLER, J. R.; FREEMANTLE, J.; BELANGER, M. J.; ELVIDGE, C. D.; BOYER, M. G.. Potential for determination of leaf chlorophyll content using AVIRIS. **In: AIRBORNE VISIBLE/INFRARED IMAGING SPECTROMETER (AVIRIS) WORKSHOP, 2., 1990, Pasadena. Proceedings...**, Pasadena, CA. USA: JPL, 1990 p.72-77.

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

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION. (NASA) **Earth Observing – 1**. Pre-Launch, Launch & Early Orbit Operations, Nov. 2002. Disponível em: <<http://eo1.gsfc.nasa.gov/miscPages/launch.html>>. Acesso em: Nov. 2008.

PEEL, M. C.; FINLAYSON, B. L.; MCMAHON, T. A. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. **Hydrology and Earth System Sciences**, v.11, p.1633-1644, 2007.

PEÑUELAS, J.; BARET, F.; FILELLA, I. Semi-empirical indices to assess carotenoids/chlorophyll a ratio from leaf spectral reflectance. **Photosynthetica**, v.31, p.221–230, 1995.

PEÑUELAS, J.; GAMÓN, J. A.; FREDEEN, A. L.; MERINO, J.; FIELD, C. B. Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen and water-limited sunflower leaves. **Remote Sensing of Environment**, v.48, p.135-146, 1994.

PEÑUELAS, J.; PINOL, R. O.; OGAYA, R.; FILELLA, I. Estimation of plant water concentration by the reflectance water index WI (R900/R970). **International Journal of Remote Sensing**, v.18, p.2869–2875, 1997.

PESSOA, M. C. P. Y.; LUCHIARI, A. J.; FERNANDES, E. N.; LIMA, M. A. Principais modelos matemáticos e simuladores utilizados para análise de impactos ambientais das atividades agrícolas. EMBRAPA. CNPMA. **Documentos**, Jaguariúna, EMBRAPA/CNPMA, n. 8, 83p., 1997.

PETERSON, D. L.; ABER, J.D.; MATSON, P. A.; CARD, D. H.; SWANBERG, N.; WESSMAN, C.; SPANNER, M. Remote sensing of forest canopy and leaf biochemical contents. **Remote Sensing of Environment**, v.24, p.85-108, 1988.

PIEKIELEK, W. P.; FOX, R. H.; TOTH, J. D.; MACNEAL, K. E. Use of chlorophyll meter at the early dent stage of corn to evaluate nitrogen sufficiency, **Agronomy Journal**. v.87, p.403-408, 1995.

PINAR, A.; CURRAN, P. J. Grass chlorophyll and the reflectance red edge. **International Journal of Remote Sensing**. v.17, p.351–357, 1996.

PROSSER, J. I. Mathematical modelling of genetically engineered microorganisms in the environment. In: EDWARDS, C. (Ed.) **Monitoring genetically manipulated microorganisms in the environment**. New York: John Wiley, 1993.

ROCK, B. N.; HOSHIZAKI, T.; MILLER, J. R. Comparison of in situ and airborne spectral measurements of the blue shift associates with forest decline. **Remote Sensing of Environment**, v.24, p.109-127, 1988.

ROSS, J.; NILSON, T. The spatial orientation of leaves in crop stands and its determination. In: NICHIPOROVICH, A. A. **Photosynthesis of productive systems**. Jerusalem, Israel Program of Science. Translated, 1967. p.86-99.

ROUNDEAUX, G.; STEVEN, M.; BARET, F. Optimization of soil-adjusted vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v.55, p.95-107, 1996.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SHELL, J. A.; DEERING, D. W.; HARLAN, J. C. **Monitoring the vernal advancement of retrogradation of natural vegetation**. Greenbelt, MD: NASA/GSFC, 1974, 371 p. Final Report, Type III.

RUDORFF, B. F. T. **Dados Landsat na estimativa da produtividade agrícola da cana-de-açúcar**. São José dos Campos. 114p. (INPE-3744-TDL/202). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1985.

RUDORFF, B. F. T.; BATISTA, G. T. Wheat yield estimation at the farm level using TM Landsat and agrometeorological data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 12, n. 12, p. 2477–2484, Dec. 1991.

RUDORFF, B. F. T.; BATISTA, G. T. Yield estimation of sugarcane based on agrometeorological-spectral models. **Remote Sensing of Environment**, v.33, n.3, p.183-192, Sept. 1990.

RUDORFF, B. F. T.; BERKA, L. M. S.; XAVIER, A. C.; MOREIRA, M. A.; DUARTE, V.; ROSA, V. G. C.; SHIMABUKURO, Y. E. **Estimativa de área plantada com cana-de-açúcar em municípios do Estado de São Paulo por meio de imagens de satélites e técnicas de geoprocessamento: ano safra 2003/2004**. São José dos Campos (SP), Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE). 48 p. 2004. (INPE-10791-RPQ/759).

SILVEIRA, J. A. G. **Aspectos bioquímicos e fisiológicos da relação K:N em cana-de-açúcar (*Sacharum spp*) cv. NA 56-76 cultivada em solução nutritiva**. Piracicaba, 1980. 127p. Dissertação (Mestrado) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Universidade de São Paulo.

SIMS, D. A.; GAMON, J. A. Relationship between leaf pigment content and spectral reflectance across a wide range of species, leaf structures and developmental stages. **Remote Sensing of Environment**, v.81, p.337–354, 2002.

STRACHAN, I. B.; PATTEY, E.; BOISVERT, J. B. Impact of nitrogen and environmental conditions on corn as detected by hyperspectral reflectance. **Remote Sensing of Environment**, v.80, p.213–224, 2002.

STRICKLAND, J. D. H.; PARSONS, T. R. A practical handbook of seawater analysis. **Bulletin of the Fisheries Research Board of Canada**, v.2, p.167, 1972.

SUITS, G. H. Azimuthal variation in directional reflectance of vegetative canopies. **Remote Sensing of Environment**, v.2, p.175-182, 1972.

TARDIN, A. T.; ASSUNÇÃO, G. V.; SOARES, J. V. Análise preliminar de dados TM para discriminação de café, citrus e cana-de-açúcar na região de Furnas, MG, Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.27, p.1355-1361, 1992.

THORNLEY, J. H. M. **Mathematical models in plant physiology**: a quantitative approach to problems in plant and crop physiology. London: Academic Press, 1976. 318p.

TISOT, D. A.; FORMAGGIO, A. R.; RENNÓ, C. D.; GALVÃO, L. S. Eficácia de dados *Hyperion*/EO-1 para identificação de alvos agrícolas: uma comparação com dados ETM⁺/LANDSAT-7. **Engenharia Agrícola**, v.27, n.2, Jaboticabal, May/Aug., 2007.

UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR (UNICA) **Moagem de cana na safra 2009/2010 na região Centro-Sul pode atingir 550 milhões de toneladas**. Abr. 2008. Disponível em: <<http://www.unica.com.br/releases/show.asp?rlsCode=%7B6B0A6260-026A-42FB-B4F1-ADE8CAA469F8%7D>>. Acesso em: Jun. 2009.

UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY(USGS) **Data properties: *Hyperion***, Jun. 2008. Disponível em: <http://eo1.usgs.gov/userGuide/index.php?page=hyp_prop>. Acesso em: Out. 2008.

- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY(USGS). **Global visualization view: Hyperion**. Disponível em: < <http://glovis.usgs.gov/>>. Acesso em: Dez. 2006.
- VAN DILLEWIJN, C. **Botany of sugarcane**. 1.ed. Waltham: Chronica Botanica, 1952. 371p.
- VERHOEF, W. Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modeling: the SAIL model. **Remote Sensing of Environment**, v.16. p.125-141, 1984.
- VERON, L. P.; SEELY, G. R. **The chlorophylls**. New York: Academic Press, 1966.
- VOGELMANN, J. E.; ROCK, B. N.; MOSS, D. M. Red edge spectral measurements from sugar maple leaves. **International Journal of Remote Sensing**, v.14, 1563-1575, 1993.
- WEISS, M.; BARET, F.; MYNENI, R. B.; PRAGNERE, A.; KNYAZIKHIN, Y. Investigation of a model inversion technique to estimate canopy biophysical variables from spectral and directional reflectance data. **Agronomie**, v.20, p.3-22, 2000.
- WHITTAKER, R. H.; MARKS, P. L. **Methods of assessing terrestrial productivity**, in *Primary Productivity of the Biosphere* (H. Lieth and R. H. Whittaker, Eds), Springer-Verlag, New York, p. 55-118. 1975.
- WOOD, C. W.; REEVES, D. W; HIMELRICK, D. G.. Relationships between chlorophyll meter readings and leaf chlorophyll concentration, N status, and crop yield: a review. **AGRONOMY SOC.**, 1993, New Zealand. **Proceedings...** New Zealand: [s.n], 1993. , p.1-9, v.23.
- WOOLLEY, J. T. Reflectance and transmittance of light leaves. **Plant Physiology**, v.47, p.656-662, 1971.
- YANG, X. H.; ZHOU, Q. M.; MELVILLE, M. Estimating local sugarcane evapotranspiration using Landsat TM image and a VITT concept. **International Journal of Remote Sensing**, v.18, p.453-459, 1997.
- YODER, B. J.; PETTIGREW-CROSBY, R. E. Predicting nitrogen and chlorophyll content and concentrations from reflectance spectra (400-2500 nm) at leaf and canopy scales. **Remote Sensing of Environment**, v.53, n.2, p.199-211, 1995.
- ZAGOLSKI, F.; PINEL, V.; ROMIER, J.; ALCAYDE, D.; FOTANARI, J.; GASTELLU-ETCHEGORRY, J. P.; GIORDANO, G.; MARTY, G.; JOFFRE, R. Forest canopy chemistry with high spectral resolution remote sensing. **International Journal of Remote Sensing**, v.17, p.1107-1128, 1996.

ZARCO-TEJADA, P. J.; MILLER, J. R.; MOHAMMED, G. H.; NOLAND, T. L.; SAMPSON, P. H. Canopy optical indices from infinite reflectance and canopy reflectance models for forest condition monitoring: application to hyperspectral CASI data. IEEE INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM, IGARSS'99, 1999, Hamburg, Germany. **Proceedings...** Hamburg: IEEE, 1999.

ZARCO-TEJADA, P. J.; MILLER, J. R.; MOHAMMED, G. H.; NOLAND, T. L. Chlorophyll fluorescence effects on vegetation apparent reflectance: I. Leaf-level measurements and model simulation. **Remote Sensing of Environment**, v.74, n.3, p.582–595, 2000a.

ZARCO-TEJADA, P. J.; MILLER, J. R.; MOHAMMED, G. H.; NOLAND, T. L.; SAMPSON, P. H. Chlorophyll fluorescence effects on vegetation apparent reflectance: II. Laboratory and airborne canopy-level measurements with hyperspectral data. **Remote Sensing of Environment**, v.74, n.3, p.596-608, 2000b.

ZARCO-TEJADA, P. J.; MILLER, J. R.; MOHAMMED, G. H.; NOLAND, T. L.; SAMPSON, P. H. Vegetation stress detection through chlorophyll a + b estimation and fluorescence effects on hyperspectral imagery. **Journal of Environmental Quality**, v.31, n.5, p.1433–1441, 2002.

ZARCO-TEJADA, P. J.; MILLER, J. R.; MORALES, A.; BERJÓN, A.; AGÜERA, J. Hyperspectral indices and model simulation for chlorophyll estimation in open-canopy tree crops. **Remote Sensing of Environment**, v.90, p.463–476, 2004.

ZARCO-TEJADA, P. J.; MILLER, J. R.; NOLAND, T. L.; MOHAMMED, G. H.; SAMPSON, P. H. Scaling-up and model inversion methods with narrow-band optical indices for chlorophyll content estimation in closed forest canopies with hyperspectral data. **IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing**, v.39, p.1491–1507, 2001.

APÊNDICE A

ILUSTRAÇÕES FOTOGRÁFICAS DE COLETAS DE AMOSTRAS EM CAMPO E DE PROCEDIMENTOS REALIZADOS EM LABORATÓRIO



Figura A.1 – Amostragem de folhas no campo.



Figura A.2 – Amostras de folhas verdes e de folhas secas embaladas separadamente para cada repetição.

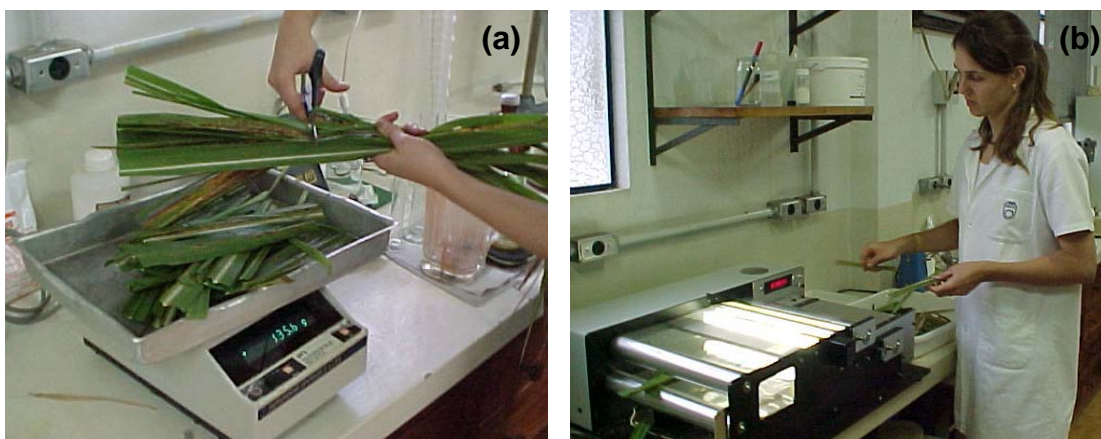


Figura A.3 – Pesagem de folhas (a) e medição da área foliar (b) para possibilitar relações entre peso de matéria verde e área de folha.



Figura A.4 – Determinação de concentração de clorofila (a) e espectrofotômetro utilizado para a medição de absorvância dos extratos (b).

APÊNDICE B

Tabela B.1 – Valores nominais e intervalos dos parâmetros utilizados no modelo PROSAILH para o estudo da DAFV.

ID	Tratamentos	Valores e Intervalos dos Parâmetros de Entrada											
		C_{cl} ($\mu\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$)	C_a ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$)	C_{ms} ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-2}$)	N	$\rho_{senes.}$ (λ) ¹	$\tau_{senes.}$ (λ) ¹	$IAFV$	$IAFS$	$DAFV^2$	$DAFS^2$	$hotspot$	ρ_{solo} (λ)
1	VaC1R1	30,3249	0,0273	0,0123	1,4	-	-	4,41	2,30	1 a 4	1 a 4	0,4	LR
2	VaC1R2	30,0131	0,0305	0,0119	1,4	-	-	3,36	1,68	1 a 4	1 a 4	0,4	LR
3	VaC1R3	32,9017	0,0246	0,0118	1,4	-	-	4,23	1,99	1 a 4	1 a 4	0,4	LR
4	VaC1R4	32,1437	0,0280	0,0126	1,4	-	-	3,99	2,16	1 a 4	1 a 4	0,4	LR
5	VaC1R5	31,9706	0,0265	0,0126	1,4	-	-	3,37	1,98	1 a 4	1 a 4	0,4	LR
6	VaC2R1	29,1021	0,0271	0,0114	1,4	-	-	3,19	1,04	1 a 4	1 a 4	0,4	TE
7	VaC2R2	28,3702	0,0261	0,0120	1,4	-	-	2,92	1,60	1 a 4	1 a 4	0,4	TE
8	VaC2R3	30,3038	0,0254	0,0125	1,4	-	-	2,40	1,16	1 a 4	1 a 4	0,4	TE
9	VaC2R4	26,9321	0,0268	0,0138	1,4	-	-	3,48	3,62	1 a 4	1 a 4	0,4	TE
10	VaC2R5	28,5960	0,0242	0,0125	1,4	-	-	1,77	1,48	1 a 4	1 a 4	0,4	TE
11	VaC3R1	25,4826	0,0253	0,0147	1,4	-	-	2,34	2,33	1 a 4	1 a 4	0,4	LR
12	VaC3R2	24,9765	0,0235	0,0132	1,4	-	-	3,25	3,26	1 a 4	1 a 4	0,4	LR
13	VaC3R3	26,5954	0,0253	0,0138	1,4	-	-	2,11	2,52	1 a 4	1 a 4	0,4	LR
14	VaC3R4	26,6107	0,0264	0,0145	1,4	-	-	4,80	2,35	1 a 4	1 a 4	0,4	LR
15	VaC3R5	24,9995	0,0265	0,0140	1,4	-	-	4,21	3,67	1 a 4	1 a 4	0,4	LR
16	VbC1R1	28,0529	0,0270	0,0126	1,4	-	-	2,88	1,16	1 a 4	1 a 4	0,4	LR
17	VbC1R2	28,1820	0,0269	0,0127	1,4	-	-	2,79	1,20	1 a 4	1 a 4	0,4	LR
18	VbC1R3	28,1508	0,0269	0,0130	1,4	-	-	4,25	1,47	1 a 4	1 a 4	0,4	LR
19	VbC1R4	28,6525	0,0245	0,0132	1,4	-	-	4,37	1,55	1 a 4	1 a 4	0,4	LR
20	VbC1R5	27,0654	0,0265	0,0128	1,4	-	-	4,78	2,04	1 a 4	1 a 4	0,4	LR
21	VbC2R1	24,9805	0,0277	0,0132	1,4	-	-	3,49	1,24	1 a 4	1 a 4	0,4	TE
22	VbC2R2	24,9143	0,0303	0,0133	1,4	-	-	3,11	1,63	1 a 4	1 a 4	0,4	TE
23	VbC2R3	25,0340	0,0281	0,0145	1,4	-	-	5,50	2,13	1 a 4	1 a 4	0,4	TE
24	VbC2R4	28,6773	0,0280	0,0139	1,4	-	-	2,95	1,27	1 a 4	1 a 4	0,4	TE
25	VbC2R5	30,9913	0,0251	0,0160	1,4	-	-	4,27	1,53	1 a 4	1 a 4	0,4	TE
26	VcC1R1	28,9756	0,0263	0,0117	1,4	-	-	3,93	1,77	1 a 4	1 a 4	0,4	TE
27	VcC1R2	26,9102	0,0229	0,0155	1,4	-	-	3,58	1,33	1 a 4	1 a 4	0,4	TE
28	VcC1R3	28,8646	0,0286	0,0126	1,4	-	-	3,71	1,54	1 a 4	1 a 4	0,4	LR
29	VcC1R4	30,8951	0,0278	0,0131	1,4	-	-	3,42	1,40	1 a 4	1 a 4	0,4	LR
30	VcC1R5	27,4467	0,0268	0,0120	1,4	-	-	2,88	1,36	1 a 4	1 a 4	0,4	LR
31	VcC2R1	29,5289	0,0254	0,0113	1,4	-	-	3,31	2,09	1 a 4	1 a 4	0,4	TE
32	VcC2R2	29,2965	0,0289	0,0134	1,4	-	-	3,32	1,65	1 a 4	1 a 4	0,4	TE
33	VcC2R3	28,3289	0,0252	0,0125	1,4	-	-	3,49	2,84	1 a 4	1 a 4	0,4	TE
34	VcC2R4	27,5614	0,0276	0,0123	1,4	-	-	2,23	1,60	1 a 4	1 a 4	0,4	TE
35	VcC2R5	26,2444	0,0251	0,0109	1,4	-	-	3,75	2,52	1 a 4	1 a 4	0,4	LR
36	VcC3R1	25,3803	0,0268	0,0120	1,4	-	-	4,87	2,54	1 a 4	1 a 4	0,4	LE
37	VcC3R2	26,5682	0,0270	0,0120	1,4	-	-	3,71	1,84	1 a 4	1 a 4	0,4	LE
38	VcC3R3	25,2180	0,0251	0,0122	1,4	-	-	3,92	2,43	1 a 4	1 a 4	0,4	LE
39	VcC3R4	24,3778	0,0256	0,0119	1,4	-	-	3,46	1,41	1 a 4	1 a 4	0,4	LE
40	VcC3R5	25,7759	0,0265	0,0105	1,4	-	-	3,93	1,97	1 a 4	1 a 4	0,4	LE
41	VcC4R1	26,6629	0,0249	0,0121	1,4	-	-	2,56	1,52	1 a 4	1 a 4	0,4	LE
42	VcC4R2	26,6692	0,0260	0,0117	1,4	-	-	4,03	3,69	1 a 4	1 a 4	0,4	LE
43	VcC4R3	26,8341	0,0274	0,0118	1,4	-	-	3,63	1,79	1 a 4	1 a 4	0,4	LE
44	VcC4R4	28,2336	0,0290	0,0112	1,4	-	-	2,59	2,12	1 a 4	1 a 4	0,4	LR
45	VcC4R5	25,2939	0,0259	0,0113	1,4	-	-	4,14	3,54	1 a 4	1 a 4	0,4	LE
46	VcC5R1	24,2735	0,0284	0,0114	1,4	-	-	4,51	1,06	1 a 4	1 a 4	0,4	LR
47	VcC5R2	25,1269	0,0277	0,0115	1,4	-	-	3,06	0,89	1 a 4	1 a 4	0,4	LR
48	VcC5R3	25,4216	0,0295	0,0129	1,4	-	-	3,99	0,51	1 a 4	1 a 4	0,4	LR

49	VeC5R4	26,7415	0,0285	0,0115	1,4	-	-	3,75	0,59	1 a 4	1 a 4	0,4	LR
50	VeC5R5	24,4115	0,0277	0,0119	1,4	-	-	3,99	0,82	1 a 4	1 a 4	0,4	LR
51	VdC1R1	25,5769	0,0234	0,0109	1,4	-	-	4,12	1,36	1 a 4	1 a 4	0,4	TE
52	VdC1R2	25,5329	0,0234	0,0102	1,4	-	-	3,93	1,88	1 a 4	1 a 4	0,4	TE
53	VdC1R3	25,7583	0,0252	0,0108	1,4	-	-	2,88	1,35	1 a 4	1 a 4	0,4	TE
54	VdC1R4	25,8996	0,0231	0,0107	1,4	-	-	3,20	2,09	1 a 4	1 a 4	0,4	TE
55	VdC1R5	26,3391	0,0234	0,0110	1,4	-	-	3,46	1,68	1 a 4	1 a 4	0,4	TE
56	VdC2R1	25,6820	0,0248	0,0109	1,4	-	-	3,35	1,16	1 a 4	1 a 4	0,4	LR
57	VdC2R2	27,1262	0,0264	0,0111	1,4	-	-	2,62	0,80	1 a 4	1 a 4	0,4	LR
58	VdC2R3	27,9678	0,0237	0,0102	1,4	-	-	3,59	1,25	1 a 4	1 a 4	0,4	LR
59	VdC2R4	25,5441	0,0258	0,0106	1,4	-	-	2,73	1,06	1 a 4	1 a 4	0,4	LR
60	VdC2R5	25,2610	0,0213	0,0085	1,4	-	-	3,39	0,82	1 a 4	1 a 4	0,4	LR
61	VdC3R1	26,4531	0,0255	0,0097	1,4	-	-	4,22	1,07	1 a 4	1 a 4	0,4	LR
62	VdC3R2	27,5055	0,0292	0,0105	1,4	-	-	5,41	1,01	1 a 4	1 a 4	0,4	LR
63	VdC3R3	26,8382	0,0274	0,0101	1,4	-	-	3,00	0,89	1 a 4	1 a 4	0,4	LR
64	VdC3R4	25,1098	0,0241	0,0102	1,4	-	-	3,02	0,89	1 a 4	1 a 4	0,4	LR
65	VdC3R5	24,3884	0,0239	0,0098	1,4	-	-	2,53	1,01	1 a 4	1 a 4	0,4	LR
66	VeC1R1	26,1329	0,0270	0,0109	1,4	-	-	2,95	1,39	1 a 4	1 a 4	0,4	TE
67	VeC1R2	25,0985	0,0253	0,0094	1,4	-	-	2,45	1,40	1 a 4	1 a 4	0,4	TE
68	VeC1R3	26,5256	0,0252	0,0107	1,4	-	-	2,75	1,63	1 a 4	1 a 4	0,4	LR
69	VeC1R4	17,5279	0,0249	0,0099	1,4	-	-	2,34	1,21	1 a 4	1 a 4	0,4	LR
70	VeC1R5	24,6387	0,0250	0,0089	1,4	-	-	2,30	1,25	1 a 4	1 a 4	0,4	TE
71	VeC2R1	24,3463	0,0220	0,0104	1,4	-	-	3,21	1,05	1 a 4	1 a 4	0,4	TE
72	VeC2R2	23,1114	0,0260	0,0119	1,4	-	-	3,62	1,45	1 a 4	1 a 4	0,4	TE
73	VeC2R3	23,6943	0,0261	0,0097	1,4	-	-	3,65	1,39	1 a 4	1 a 4	0,4	TE
74	VeC2R4	22,0338	0,0238	0,0098	1,4	-	-	3,02	1,09	1 a 4	1 a 4	0,4	TE
75	VeC2R5	26,3526	0,0257	0,0103	1,4	-	-	3,53	1,16	1 a 4	1 a 4	0,4	TE
76	VeC3R1	28,5884	0,0294	0,0122	1,4	-	-	4,48	1,55	1 a 4	1 a 4	0,4	TE
77	VeC3R2	26,4966	0,0284	0,0117	1,4	-	-	2,98	1,81	1 a 4	1 a 4	0,4	TE
78	VeC3R3	25,8576	0,0255	0,0121	1,4	-	-	1,89	1,07	1 a 4	1 a 4	0,4	TE
79	VeC3R4	27,3573	0,0495	0,0221	1,4	-	-	2,81	1,65	1 a 4	1 a 4	0,4	LR
80	VeC3R5	24,9911	0,0246	0,0113	1,4	-	-	2,57	1,39	1 a 4	1 a 4	0,4	LR
81	VeC4R1	28,1806	0,0273	0,0112	1,4	-	-	3,76	1,77	1 a 4	1 a 4	0,4	LR
82	VeC4R2	31,9606	0,0300	0,0096	1,4	-	-	4,22	1,39	1 a 4	1 a 4	0,4	LR
83	VeC4R3	28,3051	0,0302	0,0106	1,4	-	-	5,82	1,76	1 a 4	1 a 4	0,4	LR
84	VeC4R4	11,0839	0,0287	0,0101	1,4	-	-	3,83	1,53	1 a 4	1 a 4	0,4	LR
85	VeC4R5	29,4707	0,0286	0,0095	1,4	-	-	3,90	0,75	1 a 4	1 a 4	0,4	LR

¹ valores não simulados, adquiridos a partir de medições espectrais de folhas senescentes de cana-de-açúcar.

² DAF correspondente: 1 esférica, 2 planófila, 3 plagiófila e 4 erectófila.

Tabela B.2 – Erro médio absoluto (EMA, $\rho.\lambda^{-1}$) obtido entre os espectros simulados com diferentes combinações de DAF verdes e senescidas e a média dos espectros adquiridos pelo *Hyperion*, em algumas das bandas da região que envolve os índices de vegetação para estimação de clorofila.

VnCn	DAFV/DAFS	477,69	508,22	548,92	609,97	650,67	701,55	752,43	803,30	854,18
VaC1	Es./Es.	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	0,01	0,03	0,00	0,00
VaC1	Es./Pn.	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,04	0,01	0,01
VaC1	Es./Pg.	0,01	0,02	0,01	0,03	0,02	0,01	0,03	0,01	0,00
VaC1	Es./Er.	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	0,00	0,03	0,00	0,00
VaC1	Pn./Es.	0,00	0,01	0,00	0,02	0,03	0,02	0,12	0,09	0,08
VaC1	Pn./Pn.	0,00	0,01	0,00	0,02	0,02	0,02	0,12	0,09	0,08
VaC1	Pn./Pg.	0,00	0,01	0,00	0,02	0,02	0,02	0,12	0,09	0,08
VaC1	Pn./Er.	0,00	0,01	0,00	0,02	0,03	0,02	0,11	0,09	0,08
VaC1	Pg./Es.	0,00	0,01	0,01	0,03	0,03	0,01	0,08	0,05	0,04
VaC1	Pg./Pn.	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,08	0,05	0,05
VaC1	Pg./Pg.	0,00	0,01	0,01	0,03	0,03	0,01	0,08	0,05	0,04
VaC1	Pg./Er.	0,00	0,01	0,01	0,03	0,03	0,01	0,07	0,05	0,04
VaC1	Er./Es.	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	0,00	0,01	0,02	0,03
VaC1	Er./Pn.	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01	0,01	0,02
VaC1	Er./Pg.	0,01	0,02	0,02	0,03	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02
VaC1	Er./Er.	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	0,00	0,00	0,02	0,03
VaC2	Es./Es.	0,01	0,01	0,01	0,03	0,02	0,01	0,02	0,00	0,00
VaC2	Es./Pn.	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,01	0,01
VaC2	Es./Pg.	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,03	0,00	0,00
VaC2	Es./Er.	0,01	0,02	0,01	0,03	0,03	0,01	0,02	0,01	0,01
VaC2	Pn./Es.	0,00	0,01	0,00	0,02	0,02	0,03	0,11	0,08	0,08
VaC2	Pn./Pn.	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,11	0,09	0,08
VaC2	Pn./Pg.	0,00	0,01	0,00	0,02	0,02	0,03	0,11	0,08	0,08
VaC2	Pn./Er.	0,00	0,01	0,00	0,02	0,03	0,02	0,10	0,08	0,08
VaC2	Pg./Es.	0,00	0,01	0,00	0,02	0,03	0,02	0,07	0,04	0,04
VaC2	Pg./Pn.	0,00	0,01	0,00	0,02	0,02	0,02	0,07	0,05	0,04
VaC2	Pg./Pg.	0,00	0,01	0,00	0,02	0,02	0,02	0,07	0,04	0,04
VaC2	Pg./Er.	0,00	0,01	0,00	0,02	0,03	0,02	0,06	0,04	0,03
VaC2	Er./Es.	0,01	0,02	0,01	0,03	0,02	0,01	0,00	0,03	0,03
VaC2	Er./Pn.	0,00	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,01	0,01	0,01
VaC2	Er./Pg.	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02
VaC2	Er./Er.	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	0,00	0,00	0,03	0,03
VaC3	Es./Es.	0,01	0,02	0,01	0,03	0,04	0,00	0,03	0,01	0,00
VaC3	Es./Pn.	0,01	0,01	0,01	0,03	0,03	0,01	0,04	0,02	0,01
VaC3	Es./Pg.	0,01	0,02	0,01	0,03	0,03	0,01	0,04	0,01	0,01
VaC3	Es./Er.	0,01	0,02	0,01	0,03	0,04	0,00	0,03	0,00	0,00
VaC3	Pn./Es.	0,00	0,01	0,01	0,03	0,04	0,02	0,11	0,09	0,08
VaC3	Pn./Pn.	0,00	0,01	0,01	0,03	0,03	0,02	0,11	0,09	0,08
VaC3	Pn./Pg.	0,00	0,01	0,01	0,03	0,03	0,02	0,11	0,09	0,08
VaC3	Pn./Er.	0,00	0,01	0,01	0,03	0,04	0,02	0,11	0,09	0,08
VaC3	Pg./Es.	0,01	0,02	0,00	0,03	0,04	0,01	0,07	0,05	0,04
VaC3	Pg./Pn.	0,01	0,01	0,00	0,03	0,03	0,02	0,08	0,05	0,05
VaC3	Pg./Pg.	0,01	0,01	0,00	0,03	0,03	0,01	0,08	0,05	0,05
VaC3	Pg./Er.	0,01	0,02	0,00	0,03	0,04	0,01	0,07	0,05	0,04
VaC3	Er./Es.	0,01	0,02	0,01	0,03	0,04	0,00	0,01	0,02	0,02
VaC3	Er./Pn.	0,01	0,02	0,01	0,03	0,03	0,01	0,02	0,00	0,01
VaC3	Er./Pg.	0,01	0,02	0,01	0,03	0,03	0,00	0,01	0,01	0,01
VaC3	Er./Er.	0,01	0,02	0,02	0,04	0,04	0,00	0,01	0,02	0,02

Continua

Tabela B.2 – Continuação

VbC1	Es./Es.	0,01	0,01	0,00	0,02	0,03	0,01	0,06	0,04	0,03
VbC1	Es./Pn.	0,00	0,01	0,00	0,02	0,02	0,02	0,07	0,05	0,04
VbC1	Es./Pg.	0,01	0,01	0,00	0,02	0,03	0,01	0,07	0,04	0,04
VbC1	Es./Er.	0,01	0,01	0,00	0,02	0,03	0,01	0,06	0,04	0,03
VbC1	Pn./Es.	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,15	0,13	0,12
VbC1	Pn./Pn.	0,00	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,15	0,13	0,12
VbC1	Pn./Pg.	0,00	0,01	0,02	0,02	0,02	0,03	0,15	0,13	0,12
VbC1	Pn./Er.	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,15	0,13	0,12
VbC1	Pg./Es.	0,00	0,01	0,01	0,02	0,03	0,02	0,11	0,09	0,08
VbC1	Pg./Pn.	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,11	0,09	0,08
VbC1	Pg./Pg.	0,00	0,01	0,01	0,02	0,03	0,02	0,11	0,09	0,08
VbC1	Pg./Er.	0,00	0,01	0,01	0,02	0,03	0,02	0,11	0,09	0,08
VbC1	Er./Es.	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,01	0,04	0,02	0,01
VbC1	Er./Pn.	0,01	0,01	0,00	0,02	0,02	0,01	0,05	0,02	0,02
VbC1	Er./Pg.	0,01	0,01	0,00	0,02	0,02	0,01	0,04	0,02	0,01
VbC1	Er./Er.	0,01	0,02	0,01	0,03	0,03	0,00	0,04	0,01	0,00
VbC2	Es./Es.	0,01	0,01	0,00	0,02	0,02	0,02	0,06	0,04	0,03
VbC2	Es./Pn.	0,01	0,01	0,00	0,01	0,02	0,02	0,07	0,04	0,04
VbC2	Es./Pg.	0,01	0,01	0,00	0,02	0,02	0,02	0,06	0,04	0,03
VbC2	Es./Er.	0,01	0,01	0,00	0,02	0,02	0,02	0,06	0,03	0,03
VbC2	Pn./Es.	0,00	0,01	0,02	0,01	0,02	0,04	0,14	0,12	0,11
VbC2	Pn./Pn.	0,00	0,01	0,02	0,01	0,02	0,04	0,15	0,12	0,11
VbC2	Pn./Pg.	0,00	0,01	0,02	0,01	0,02	0,04	0,14	0,12	0,11
VbC2	Pn./Er.	0,00	0,01	0,02	0,01	0,02	0,04	0,14	0,12	0,11
VbC2	Pg./Es.	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,10	0,08	0,07
VbC2	Pg./Pn.	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,11	0,08	0,08
VbC2	Pg./Pg.	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,11	0,08	0,07
VbC2	Pg./Er.	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,10	0,08	0,07
VbC2	Er./Es.	0,01	0,01	0,00	0,02	0,02	0,01	0,04	0,01	0,00
VbC2	Er./Pn.	0,01	0,01	0,00	0,01	0,02	0,02	0,04	0,02	0,01
VbC2	Er./Pg.	0,01	0,01	0,00	0,02	0,02	0,02	0,04	0,02	0,01
VbC2	Er./Er.	0,01	0,01	0,00	0,02	0,02	0,01	0,03	0,01	0,00
VcC1	Es./Es.	0,01	0,02	0,01	0,03	0,03	0,01	0,07	0,04	0,03
VcC1	Es./Pn.	0,01	0,02	0,00	0,02	0,02	0,01	0,07	0,05	0,04
VcC1	Es./Pg.	0,01	0,02	0,01	0,02	0,03	0,01	0,07	0,05	0,04
VcC1	Es./Er.	0,01	0,02	0,01	0,03	0,03	0,01	0,06	0,04	0,03
VcC1	Pn./Es.	0,00	0,01	0,01	0,02	0,03	0,03	0,15	0,13	0,12
VcC1	Pn./Pn.	0,00	0,01	0,01	0,02	0,03	0,03	0,15	0,13	0,12
VcC1	Pn./Pg.	0,00	0,01	0,01	0,02	0,03	0,03	0,15	0,13	0,12
VcC1	Pn./Er.	0,00	0,01	0,01	0,02	0,03	0,02	0,15	0,13	0,12
VcC1	Pg./Es.	0,01	0,02	0,00	0,02	0,03	0,02	0,11	0,09	0,08
VcC1	Pg./Pn.	0,01	0,01	0,00	0,02	0,03	0,02	0,11	0,09	0,08
VcC1	Pg./Pg.	0,01	0,01	0,00	0,02	0,03	0,02	0,11	0,09	0,08
VcC1	Pg./Er.	0,01	0,02	0,00	0,02	0,03	0,02	0,11	0,09	0,08
VcC1	Er./Es.	0,01	0,02	0,01	0,03	0,03	0,00	0,04	0,02	0,01
VcC1	Er./Pn.	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,05	0,03	0,02
VcC1	Er./Pg.	0,01	0,02	0,01	0,02	0,03	0,01	0,05	0,02	0,02
VcC1	Er./Er.	0,01	0,02	0,01	0,03	0,03	0,00	0,04	0,01	0,01
VcC2	Es./Es.	0,01	0,02	0,01	0,02	0,03	0,01	0,07	0,05	0,05
VcC2	Es./Pn.	0,01	0,01	0,00	0,02	0,02	0,02	0,08	0,06	0,06
VcC2	Es./Pg.	0,01	0,02	0,00	0,02	0,02	0,01	0,08	0,06	0,05
VcC2	Es./Er.	0,01	0,02	0,01	0,03	0,03	0,01	0,07	0,05	0,04
VcC2	Pn./Es.	0,00	0,01	0,01	0,02	0,03	0,03	0,16	0,14	0,13
VcC2	Pn./Pn.	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,16	0,14	0,13
VcC2	Pn./Pg.	0,00	0,01	0,01	0,02	0,03	0,03	0,16	0,14	0,13
VcC2	Pn./Er.	0,00	0,01	0,01	0,02	0,03	0,03	0,16	0,14	0,13
VcC2	Pg./Es.	0,01	0,01	0,00	0,02	0,03	0,02	0,12	0,10	0,09
VcC2	Pg./Pn.	0,01	0,01	0,00	0,02	0,02	0,02	0,12	0,10	0,09

Continua

Tabela B.2 – Continuação

VcC2	Pg./Pg.	0,01	0,01	0,00	0,02	0,03	0,02	0,12	0,10	0,09
VcC2	Pg./Er.	0,01	0,02	0,00	0,02	0,03	0,02	0,11	0,09	0,09
VcC2	Er./Es.	0,01	0,02	0,01	0,02	0,03	0,01	0,05	0,03	0,02
VcC2	Er./Pn.	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,06	0,04	0,03
VcC2	Er./Pg.	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,05	0,03	0,03
VcC2	Er./Er.	0,01	0,02	0,01	0,03	0,03	0,00	0,05	0,02	0,02
VcC3	Es./Es.	0,01	0,01	0,00	0,02	0,02	0,02	0,05	0,02	0,01
VcC3	Es./Pn.	0,01	0,01	0,00	0,02	0,02	0,03	0,05	0,02	0,02
VcC3	Es./Pg.	0,01	0,01	0,00	0,02	0,02	0,03	0,05	0,02	0,01
VcC3	Es./Er.	0,01	0,02	0,00	0,02	0,02	0,02	0,04	0,02	0,01
VcC3	Pn./Es.	0,00	0,01	0,02	0,01	0,02	0,04	0,13	0,10	0,10
VcC3	Pn./Pn.	0,00	0,01	0,02	0,01	0,02	0,05	0,13	0,11	0,10
VcC3	Pn./Pg.	0,00	0,01	0,02	0,01	0,02	0,05	0,13	0,11	0,10
VcC3	Pn./Er.	0,00	0,01	0,02	0,01	0,02	0,04	0,13	0,10	0,10
VcC3	Pg./Es.	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,09	0,06	0,06
VcC3	Pg./Pn.	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,04	0,09	0,07	0,06
VcC3	Pg./Pg.	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,04	0,09	0,06	0,06
VcC3	Pg./Er.	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,09	0,06	0,06
VcC3	Er./Es.	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01
VcC3	Er./Pn.	0,01	0,01	0,00	0,02	0,02	0,03	0,03	0,00	0,00
VcC3	Er./Pg.	0,01	0,01	0,00	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01
VcC3	Er./Er.	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02
VcC4	Es./Es.	0,01	0,02	0,00	0,02	0,02	0,02	0,04	0,01	0,01
VcC4	Es./Pn.	0,01	0,01	0,00	0,02	0,02	0,03	0,05	0,02	0,02
VcC4	Es./Pg.	0,01	0,01	0,00	0,02	0,02	0,02	0,05	0,02	0,01
VcC4	Es./Er.	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,04	0,01	0,01
VcC4	Pn./Es.	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,04	0,13	0,10	0,09
VcC4	Pn./Pn.	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,04	0,13	0,10	0,10
VcC4	Pn./Pg.	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,04	0,13	0,10	0,09
VcC4	Pn./Er.	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,04	0,13	0,10	0,09
VcC4	Pg./Es.	0,01	0,01	0,00	0,02	0,02	0,03	0,09	0,06	0,05
VcC4	Pg./Pn.	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,09	0,06	0,06
VcC4	Pg./Pg.	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,09	0,06	0,05
VcC4	Pg./Er.	0,01	0,01	0,00	0,02	0,02	0,03	0,09	0,06	0,05
VcC4	Er./Es.	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,02
VcC4	Er./Pn.	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,02	0,03	0,00	0,00
VcC4	Er./Pg.	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,02	0,02	0,01	0,01
VcC4	Er./Er.	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,01	0,02	0,01	0,02
VcC5	Es./Es.	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,05	0,02	0,01
VcC5	Es./Pn.	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04	0,05	0,02	0,02
VcC5	Es./Pg.	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04	0,05	0,02	0,01
VcC5	Es./Er.	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,05	0,02	0,01
VcC5	Pn./Es.	0,00	0,00	0,03	0,00	0,01	0,06	0,14	0,11	0,10
VcC5	Pn./Pn.	0,00	0,00	0,03	0,00	0,01	0,06	0,14	0,11	0,10
VcC5	Pn./Pg.	0,00	0,00	0,03	0,00	0,01	0,06	0,14	0,11	0,10
VcC5	Pn./Er.	0,00	0,00	0,03	0,00	0,01	0,06	0,14	0,11	0,10
VcC5	Pg./Es.	0,00	0,01	0,02	0,01	0,01	0,05	0,10	0,07	0,06
VcC5	Pg./Pn.	0,00	0,01	0,02	0,01	0,01	0,05	0,10	0,07	0,06
VcC5	Pg./Pg.	0,00	0,01	0,02	0,01	0,01	0,05	0,10	0,07	0,06
VcC5	Pg./Er.	0,00	0,01	0,02	0,01	0,01	0,05	0,10	0,07	0,06
VcC5	Er./Es.	0,01	0,01	0,00	0,01	0,02	0,03	0,02	0,01	0,02
VcC5	Er./Pn.	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,03	0,03	0,00	0,01
VcC5	Er./Pg.	0,01	0,01	0,00	0,01	0,01	0,03	0,02	0,01	0,01
VcC5	Er./Er.	0,01	0,01	0,00	0,01	0,02	0,03	0,02	0,01	0,02
VdC1	Es./Es.	0,01	0,02	0,01	0,03	0,03	0,01	0,06	0,03	0,03
VdC1	Es./Pn.	0,01	0,02	0,01	0,03	0,03	0,01	0,06	0,04	0,03
VdC1	Es./Pg.	0,01	0,02	0,01	0,03	0,03	0,01	0,06	0,04	0,03
VdC1	Es./Er.	0,01	0,02	0,01	0,03	0,03	0,01	0,06	0,03	0,02

Continua

Tabela B.2 – Continuação

VdC1	Pn./Es.	0,00	0,01	0,01	0,02	0,03	0,03	0,15	0,12	0,11
VdC1	Pn./Pn.	0,00	0,01	0,01	0,02	0,03	0,03	0,15	0,13	0,12
VdC1	Pn./Pg.	0,00	0,01	0,01	0,02	0,03	0,03	0,15	0,12	0,11
VdC1	Pn./Er.	0,00	0,01	0,01	0,02	0,03	0,03	0,14	0,12	0,11
VdC1	Pg./Es.	0,01	0,02	0,00	0,03	0,03	0,02	0,10	0,08	0,07
VdC1	Pg./Pn.	0,01	0,01	0,00	0,02	0,03	0,02	0,11	0,08	0,08
VdC1	Pg./Pg.	0,01	0,01	0,00	0,03	0,03	0,02	0,11	0,08	0,07
VdC1	Pg./Er.	0,01	0,02	0,00	0,03	0,03	0,02	0,10	0,08	0,07
VdC1	Er./Es.	0,01	0,02	0,01	0,03	0,03	0,00	0,03	0,01	0,00
VdC1	Er./Pn.	0,01	0,02	0,01	0,03	0,03	0,01	0,04	0,02	0,01
VdC1	Er./Pg.	0,01	0,02	0,01	0,03	0,03	0,01	0,04	0,01	0,01
VdC1	Er./Er.	0,01	0,02	0,01	0,03	0,03	0,00	0,03	0,00	0,00
VdC2	Es./Es.	0,01	0,02	0,00	0,02	0,03	0,01	0,08	0,06	0,05
VdC2	Es./Pn.	0,01	0,01	0,00	0,02	0,02	0,02	0,08	0,06	0,06
VdC2	Es./Pg.	0,01	0,01	0,00	0,02	0,02	0,02	0,08	0,06	0,06
VdC2	Es./Er.	0,01	0,02	0,01	0,03	0,03	0,01	0,07	0,05	0,05
VdC2	Pn./Es.	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,17	0,15	0,14
VdC2	Pn./Pn.	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,17	0,15	0,15
VdC2	Pn./Pg.	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,17	0,15	0,14
VdC2	Pn./Er.	0,00	0,01	0,01	0,02	0,03	0,03	0,16	0,15	0,14
VdC2	Pg./Es.	0,01	0,01	0,00	0,02	0,03	0,02	0,12	0,11	0,10
VdC2	Pg./Pn.	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,13	0,11	0,10
VdC2	Pg./Pg.	0,00	0,01	0,01	0,02	0,03	0,02	0,12	0,11	0,10
VdC2	Pg./Er.	0,01	0,01	0,00	0,02	0,03	0,02	0,12	0,10	0,10
VdC2	Er./Es.	0,01	0,02	0,01	0,03	0,03	0,01	0,05	0,03	0,03
VdC2	Er./Pn.	0,01	0,01	0,00	0,02	0,02	0,02	0,06	0,04	0,04
VdC2	Er./Pg.	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,01	0,05	0,03	0,03
VdC2	Er./Er.	0,01	0,02	0,01	0,03	0,03	0,01	0,05	0,03	0,02
VdC3	Es./Es.	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,04	0,01	0,02	0,03
VdC3	Es./Pn.	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,04	0,00	0,02	0,02
VdC3	Es./Pg.	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,04	0,00	0,02	0,02
VdC3	Es./Er.	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,01	0,02	0,03
VdC3	Pn./Es.	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,06	0,08	0,07	0,06
VdC3	Pn./Pn.	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,06	0,09	0,07	0,07
VdC3	Pn./Pg.	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,06	0,09	0,07	0,06
VdC3	Pn./Er.	0,00	0,01	0,01	0,02	0,02	0,06	0,08	0,07	0,06
VdC3	Pg./Es.	0,01	0,01	0,00	0,02	0,02	0,05	0,04	0,03	0,02
VdC3	Pg./Pn.	0,00	0,01	0,00	0,02	0,02	0,05	0,05	0,03	0,02
VdC3	Pg./Pg.	0,00	0,01	0,00	0,02	0,02	0,05	0,04	0,03	0,02
VdC3	Pg./Er.	0,01	0,01	0,00	0,02	0,02	0,05	0,04	0,03	0,02
VdC3	Er./Es.	0,01	0,02	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	0,05	0,05
VdC3	Er./Pn.	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,04	0,02	0,04	0,04
VdC3	Er./Pg.	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,03	0,05	0,05
VdC3	Er./Er.	0,01	0,02	0,02	0,03	0,02	0,03	0,03	0,05	0,06
VeC1	Es./Es.	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,04	0,09	0,08	0,07
VeC1	Es./Pn.	0,00	0,00	0,02	0,00	0,01	0,05	0,10	0,09	0,09
VeC1	Es./Pg.	0,00	0,01	0,02	0,00	0,01	0,05	0,10	0,08	0,08
VeC1	Es./Er.	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,04	0,09	0,08	0,07
VeC1	Pn./Es.	0,00	0,00	0,04	0,00	0,01	0,06	0,18	0,17	0,16
VeC1	Pn./Pn.	0,00	0,00	0,04	0,00	0,01	0,06	0,18	0,17	0,17
VeC1	Pn./Pg.	0,00	0,00	0,04	0,00	0,01	0,06	0,18	0,17	0,16
VeC1	Pn./Er.	0,00	0,00	0,03	0,00	0,01	0,06	0,18	0,17	0,16
VeC1	Pg./Es.	0,00	0,00	0,03	0,00	0,01	0,05	0,14	0,12	0,12
VeC1	Pg./Pn.	0,00	0,00	0,03	0,00	0,01	0,06	0,14	0,13	0,13
VeC1	Pg./Pg.	0,00	0,00	0,03	0,00	0,01	0,05	0,14	0,13	0,12

Continua

Tabela B.2 – Conclusão

VeC1	Pg./Er.	0,00	0,01	0,03	0,00	0,02	0,05	0,14	0,12	0,12
VeC1	Er./Es.	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04	0,07	0,05	0,05
VeC1	Er./Pn.	0,00	0,00	0,02	0,00	0,00	0,05	0,08	0,07	0,07
VeC1	Er./Pg.	0,00	0,01	0,01	0,00	0,01	0,04	0,07	0,06	0,06
VeC1	Er./Er.	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,07	0,05	0,04
VeC2	Es./Es.	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,08	0,05	0,04
VeC2	Es./Pn.	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,08	0,06	0,05
VeC2	Es./Pg.	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,08	0,05	0,04
VeC2	Es./Er.	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,03	0,07	0,05	0,04
VeC2	Pn./Es.	0,00	0,00	0,03	0,01	0,02	0,05	0,16	0,14	0,13
VeC2	Pn./Pn.	0,00	0,00	0,03	0,01	0,02	0,05	0,17	0,14	0,13
VeC2	Pn./Pg.	0,00	0,00	0,03	0,01	0,02	0,05	0,16	0,14	0,13
VeC2	Pn./Er.	0,00	0,00	0,03	0,01	0,02	0,05	0,16	0,14	0,13
VeC2	Pg./Es.	0,00	0,01	0,02	0,01	0,02	0,04	0,12	0,10	0,09
VeC2	Pg./Pn.	0,00	0,01	0,02	0,01	0,02	0,04	0,13	0,10	0,09
VeC2	Pg./Pg.	0,00	0,01	0,02	0,01	0,02	0,04	0,12	0,10	0,09
VeC2	Pg./Er.	0,00	0,01	0,02	0,01	0,02	0,04	0,12	0,10	0,09
VeC2	Er./Es.	0,01	0,01	0,00	0,02	0,02	0,02	0,05	0,02	0,01
VeC2	Er./Pn.	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,06	0,03	0,03
VeC2	Er./Pg.	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,05	0,03	0,02
VeC2	Er./Er.	0,01	0,01	0,00	0,02	0,02	0,02	0,05	0,02	0,01
VeC3	Es./Es.	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,03	0,09	0,07	0,06
VeC3	Es./Pn.	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,09	0,08	0,07
VeC3	Es./Pg.	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,09	0,07	0,07
VeC3	Es./Er.	0,00	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,08	0,06	0,06
VeC3	Pn./Es.	0,00	0,00	0,03	0,01	0,02	0,04	0,17	0,15	0,14
VeC3	Pn./Pn.	0,00	0,00	0,03	0,00	0,01	0,05	0,17	0,15	0,14
VeC3	Pn./Pg.	0,00	0,00	0,03	0,01	0,01	0,05	0,17	0,15	0,14
VeC3	Pn./Er.	0,00	0,00	0,03	0,01	0,02	0,04	0,17	0,15	0,14
VeC3	Pg./Es.	0,00	0,01	0,02	0,01	0,02	0,04	0,13	0,11	0,10
VeC3	Pg./Pn.	0,00	0,00	0,02	0,01	0,01	0,04	0,13	0,12	0,11
VeC3	Pg./Pg.	0,00	0,01	0,02	0,01	0,02	0,04	0,13	0,11	0,10
VeC3	Pg./Er.	0,00	0,01	0,02	0,01	0,02	0,03	0,13	0,11	0,10
VeC3	Er./Es.	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,02	0,06	0,04	0,04
VeC3	Er./Pn.	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,07	0,06	0,05
VeC3	Er./Pg.	0,00	0,01	0,01	0,01	0,01	0,03	0,07	0,05	0,04
VeC3	Er./Er.	0,01	0,01	0,00	0,01	0,02	0,02	0,06	0,04	0,03
VeC4	Es./Es.	0,00	0,01	0,02	0,00	0,01	0,04	0,13	0,11	0,11
VeC4	Es./Pn.	0,00	0,00	0,02	0,00	0,01	0,05	0,13	0,12	0,11
VeC4	Es./Pg.	0,00	0,00	0,02	0,00	0,01	0,05	0,13	0,12	0,11
VeC4	Es./Er.	0,01	0,01	0,02	0,01	0,02	0,04	0,13	0,11	0,10
VeC4	Pn./Es.	0,00	0,00	0,04	0,01	0,01	0,07	0,22	0,21	0,20
VeC4	Pn./Pn.	0,00	0,00	0,04	0,01	0,01	0,07	0,22	0,21	0,20
VeC4	Pn./Pg.	0,00	0,00	0,04	0,01	0,01	0,07	0,22	0,21	0,20
VeC4	Pn./Er.	0,00	0,00	0,04	0,00	0,01	0,07	0,22	0,21	0,20
VeC4	Pg./Es.	0,00	0,00	0,03	0,00	0,01	0,06	0,18	0,16	0,15
VeC4	Pg./Pn.	0,00	0,00	0,03	0,00	0,01	0,06	0,18	0,17	0,16
VeC4	Pg./Pg.	0,00	0,00	0,03	0,00	0,01	0,06	0,18	0,16	0,15
VeC4	Pg./Er.	0,00	0,00	0,03	0,00	0,01	0,06	0,17	0,16	0,15
VeC4	Er./Es.	0,01	0,01	0,01	0,01	0,01	0,04	0,10	0,09	0,08
VeC4	Er./Pn.	0,00	0,01	0,02	0,00	0,01	0,04	0,11	0,09	0,09
VeC4	Er./Pg.	0,01	0,01	0,02	0,01	0,01	0,04	0,10	0,09	0,08
VeC4	Er./Er.	0,01	0,01	0,01	0,01	0,02	0,04	0,10	0,08	0,08

Tabela B.3 – Média, variância, desvio padrão (D.P.) e coeficiente de variação (C.V., %) dos índices estudados, calculados a partir dos espectros simulados pelo modelo PROSAILH variando-se os valores de IAF e de DAF.

	PROSAILH			
	Média	Variância	D.P.	C.V.
Average	0,388	0,003	0,051	13,248
PSSRa	14,827	13,049	3,612	24,362
PSSRb	11,823	4,595	2,144	18,131
SR550	6,012	0,245	0,495	8,241
SR680	14,827	13,049	3,612	24,362
SR705	4,093	0,211	0,460	11,232
SR710	2,281	0,026	0,160	7,010
ND660	0,863	0,002	0,040	4,646
ND680	0,865	0,002	0,040	4,600
ND705	0,604	0,002	0,040	6,556
ND677	0,861	0,002	0,041	4,817
mND705	0,660	0,002	0,039	5,917
PRI1	-0,045	0,000	0,007	-16,323
PRI2	0,113	0,000	0,004	3,371
PRI3	-0,036	0,000	0,011	-29,248
PRI4	0,038	0,000	0,018	48,270
SIPI1	1,026	0,001	0,023	2,198
SIPI2	1,027	0,000	0,020	1,960
PSRI	0,020	0,000	0,017	84,879
SRPI	0,671	0,020	0,140	20,836
NPCI	0,205	0,011	0,104	50,825
G	2,406	0,185	0,431	17,895
Licht1	0,479	0,007	0,083	17,427
SR677	14,343	12,380	3,518	24,532
Licht2	0,865	0,002	0,040	4,600
Volg1	1,467	0,003	0,054	3,668
Volg2	-0,112	0,000	0,016	-14,545
GM1	4,093	0,211	0,460	11,232
GM2	5,579	0,207	0,455	8,160
Carter	0,109	0,001	0,028	25,751
MCARI	0,213	0,003	0,053	24,646
TCARI	0,639	0,025	0,158	24,646
OSAVI	0,732	0,003	0,051	6,973
TCARI/OSAVI	0,862	0,027	0,163	18,890
CI	1,334	0,005	0,069	5,154
TVI	21,955	12,099	3,478	15,843
Red-edge_FPI	0,348	0,002	0,045	12,828
REP_FPI	758,899	179,365	13,393	1,765
RWP_FPI	744,569	100,926	10,046	1,349
Red-edge_linear	0,243	0,001	0,028	11,524
REP_linear	420,909	1.453,091	38,119	9,056