



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-12562-TDI/1003

**DESENVOLVIMENTO DE UM SISTEMA DE MAPEAMENTO
AUTOMÁTICO DA FRAÇÃO DE COBERTURA DE NUVENS**

Mariza Pereira de Souza Echer

Tese de Doutorado do Curso de Pós-Graduação em Geofísica Espacial, orientada pelo
Dr. Enio Bueno Pereira, aprovada em 19 de maio de 2004.

523.4-8 : 551.521.14

ECHER, M. P. S.


Desenvolvimento de um sistema de mapeamento
automático da fração de cobertura de nuvens / M. P. S.
Echer. – São José dos Campos: INPE, 2004.

147p. – (INPE-12562-TDI/1003).

1.Nuvens. 2.Radiação solar. 3.Instrumentação.
4.Charge Coupled Device (CCD). 5.Processamento digital
de imagens. 6.Algoritmo. I.Título.

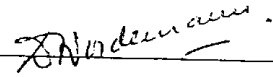
Aprovado pela Banca Examinadora em cumprimento ao requisito exigido para a obtenção do Título de **Doutora em Geofísica Espacial.**

Dr. Enio Bueno Pereira




Presidente-Orientador/INPE, SJCampos-SP

Dr. Daniel Jean Roger Nordemann



Membro da Banca/INPE, SJCampos-SP

Dr. Nelson Jesus Ferreira

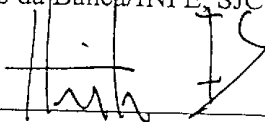


Membro da Banca/INPE, SJCampos-SP

Dr. Diógenes Salas Alves

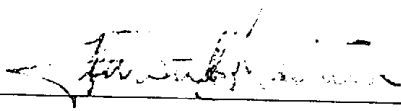
Membro da Banca/INPE, SJCampos-SP

Dr. Heitor Evangelista da Silva



Convidado/UERJ-Universidade Estadual do Rio de Janeiro

Dr. Fernando Ramos Martins



Convidado/CUNISC-Centro Univ. São Camilo-SP

Aluna: Mariza Pereira de Souza Echer

São José dos Campos, 19 de maio de 2004.

*As pessoas mais felizes não têm as melhores coisas.
Elas sabem fazer o melhor das oportunidades que aparecem em seus
caminhos.
Clarice Lispector.*

*Ao meu companheiro
Ezequiel Echer*

AGRADECIMENTOS

Agradeço a todas as pessoas que me ajudaram a vencer mais esta etapa da vida.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela bolsa de estudo processo de número 140373/2000-4. Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais pela oportunidade de desenvolver em suas instalações o trabalho de tese.

Ao Laboratório de Energia Solar da Universidade Federal de Santa Catarina (LABSOLAR/UFSC) na pessoa do Dr. Sérgio Colle pela utilização das instalações da estação solarimétrica. Ao MSc. Sylvio Mantelli e ao Dr. Samuel Luna pela ajuda no decorrer do trabalho no LABSOLAR. Ao Laboratório de Conforto Térmico (LABCON/UFSC) na pessoa do Dr. Fernando Oscar Ruttkay Pereira e Roberta Vieira Gonçalves de Souza (Universidade Federal de Minas Gerais/Arquitetura) pela logística do protótipo do sistema imageador de nuvens.

Aos companheiros da informática da USFC: Tiago Pereira, pela ajuda na parte técnica e operacional do trabalho; Guilherme, Cristiano, Atsunori e Otávio, pela ajuda com a transmissão dos dados utilizados no trabalho; sem tal ajuda o trabalho não poderia ser realizado.

Ao meu orientador Dr. Enio Bueno Pereira, pela orientação e dedicação durante o desenvolvimento do trabalho.

Aos professores do curso de Geofísica Espacial e aos coordenadores acadêmicos: Drs. Maria Virginia Alves, Delano Gobbi e Plínio Alvalá pela ajuda e esclarecimentos acadêmicos durante o curso de doutorado.

Ao Dr. Francisco José Jablonski e ao tecnologista Rene Laporte (DAS/INPE) pelos esclarecimentos técnicos durante a realização do trabalho

Às bibliotecárias Silvia e Yolanda (SID), às secretárias Filomena de Fátima Xavier e Cláudia Regina Alves Duarte (DGE), ao Sr. Laércio (Mecânica do INPE) pela dedicação e apoio técnico durante o trabalho.

Aos amigos da Geofísica Espacial (DGE) e aos amigos do grupo de trabalho pela presença sempre amiga. Ao Rafael pela ajuda indispensável ao desenvolvimento do trabalho. À Cristina Sayuri pela amizade e companheirismo.

Ao Dr. Fernando Ramos Martins (FSC-SP) pela atenção e pelo apoio científico.

A meus pais, Dezomar e Izabel e a meus irmãos. Ao meu companheiro Ezequiel Echer, pela dedicação em todo o tempo.

RESUMO

Este trabalho descreve o desenvolvimento do protótipo de um sistema de mapeamento automático da fração de cobertura de nuvens e os primeiros resultados obtidos. O sistema é composto por uma câmara digital marca Pixera, modelo PCS20232, operando na faixa de radiação do visível. A câmara foi montada apontando para o zênite, através de uma plataforma dotada de um sistema de sombreamento da radiação solar direta através de um rastreador automático do Sol. Foi adaptada à câmara uma lente grande angular FCE8 de fabricação da *Nikon* com uma abertura nominal de 178°. O sistema forneceu imagens no formato *Joint Photographic Expert Group (JPEG)*, com resolução de 600X600 píxeis. As imagens foram obtidas no sistema de cores RGB (*Red, Green, Blue*) e convertidas para o espaço atributos de cores do sistema IHS (*Intensity, Hue, Saturation*). A análise pelo sistema automático de classificação foi realizada utilizando uma interface gráfica feita para o ambiente *Windows*. O processo de decisão do sistema classificador utilizou a saturação (*S*) como parâmetro para a classificação de píxeis contaminados por nuvens. A validação dos dados gerados pelo sistema foi realizada na cidade de Florianópolis (27° 28'S, 048° 29'W) – SC, na estação *Baseline Surface Radiation Network (BSRN-WMO)* instalada no laboratório de Energia Solar – LABSOLAR da Universidade Federal de Santa Catarina. O período de dados utilizado no trabalho foi de março de 2002 a fevereiro de 2003 e a aquisição das imagens teve início às 8:45 (UT) finalizando às 21:00 (UT), com imagens coletadas a cada 15 minutos. O total de imagens coletadas foi de 4074. Os resultados mostram que a distribuição dos valores de cobertura de nuvens apresenta uma característica bi-modal. O outono foi à estação do ano de 2002 que apresentou maior condição de dias claros. O inverno apresentou uma maior variação na nebulosidade que o outono, mas com valores sempre acima de 5% para fração de cobertura de nuvens. A primavera de 2002 foi marcada pela presença acentuada de nuvens, com frações de cobertura bem mais distribuídas que nas demais estações do ano. O verão de 2002 e 2003, apresentou um aumento na fração de cobertura de nuvens, em torno de 25%. A avaliação das informações sobre a fração de cobertura de nuvens geradas pela nova metodologia empregou o índice K_t , que descreve a transmitância atmosférica. Para isso, foram empregados os dados coletados pelo piranômetro e pelo pyrliômetro da estação *BSRN* de Florianópolis. A correlação entre o índice K_t e a cobertura de nuvens foi positiva. Para valores próximos 100% de fração de cobertura de nuvens, os valores do K_t variaram entre 0,0 e 0,4. Também foi empregado nessa análise o índice K_d , que descreve a razão entre a radiação solar difusa e global. Verificou-se um crescimento esperado do índice K_d com o aumento da fração de cobertura de nuvens. Porém, para baixos valores de cobertura de nuvens o índice K_d variou entre 0,1 e 0,4. Para um cenário com 100% de cobertura de nuvens, o índice K_d assumiu valores entre 0,6 a 1,0. Foi realizado um estudo comparativo, utilizando o modelo físico BRASIL-SR, que estima a radiação solar em superfície. Foram empregados, comparativamente, como entrada do modelo, as frações de nuvens geradas pelo novo sistema imageador e dados obtidos pelo satélite GOES-8. Os resultados mostraram diferenças importantes que foram atribuídas ao fato de que os dados obtidos pelo imageador não contêm informação sobre a profundidade ótica das nuvens.

DEVELOPMENT OF THE AUTOMATIC SYSTEM TO ASSESSMENT CLOUD COVER FRACTION

ABSTRACT

This work describes the development of a new method and the prototype of a system for mapping automatic of the fraction of the sky covered by clouds. The first results obtained are also reported and discussed. A Pixera model PCS20232, digital camera operating in the visible range of the solar spectra composes the system. The camera was mounted aiming at the zenith on a platform equipped with a shadow disk controlled by a motorized solar tracking system. A wide angle lens (Nikon, FCE8) with a nominal opening of 178° was adapted to the objective aperture. The system supplied images with resolution of 600×600 pixels in the JPEG format (*Joint Photographic Expert Group*). The images were obtained in the RGB (*Red, Green, Blue*) color system and then converted to the IHS (*Intensity, Hue, Saturation*) system before processing. The analysis employed the saturation (S) to infer the level contamination of pixels by clouds and thus the cloud fractions. The classification was carried out utilizing a user-friendly graphic interface developed for *Windows*. The validation of the new method was carried out at the Baseline Surface Radiation Network (*BSRN-WMO*) station installed in the Laboratory for Solar Energy – LABSOLAR - Federal University of Santa Catarina, Florianópolis ($27^\circ 28' S$, $048^\circ 29' W$). Data acquisition period was from March 2002 to February 2003 from 8:45 (UT) to 21:00 (UT), with images collected daily every 15 minutes. A total of 4074 images were collected during this period. The results show that cloud cover fractions presented a typical bi-modal distribution of values. During the fall of 2002 clear sky condition was the most common characteristic. The winter presented a bigger variation of cloud states, but with values always above of 5% of cloud cover. Spring of 2002 was marked by the overall presence of clouds. Summer of 2002 and 2003 presented an increase in cloud cover, around 25%. An evaluation of the new method was conducted employing the index K_t , that describes the atmospheric transmittance. K_t was obtained by using data from the pyranometer and by the pyrhelimeter of the station BSRN of Florianópolis. The correlation between the index K_t and the cloud fractions was positive. Nevertheless K_t varied widely between 0.0 and 0.4 when cloud fractions reached near 100%. Also used in this analysis was the index K_d , which describes the reason between the diffuse and the global solar radiation. The expected growth of the index K_d with the increase of cloud fraction was observed. For low values of cloud fraction the index K_d varied widely between 0.1 and 0.4. For a 100% scenario of cloud cover, the index K_d assumed values between 0.6 to 1.0. A comparative study was carried out making use of the radiation model BRASIL-SR. Parallel model inputs of cloud fraction data from the new method and data from the satellite GOES-8 provided distinct model outputs. The discrepancy was attributed to the fact that cloud fraction data do not contain information about cloud optical depths.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SIMBOLOS

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CAPÍTULO 1 INTRODUÇÃO	25
CAPÍTULO 2 CONCEITOS BÁSICOS	33
2.1 O Sol – Fonte de Energia para Terra.....	33
2.2 – Radiação Solar no Topo da Atmosfera.....	34
2.3 – Espalhamento Atmosférico da Radiação.....	37
2.3.1 – Espalhamento Rayleigh e Mie.....	37
2.4 – Absorção Atmosférica da Radiação Solar.....	38
2.5 – As Nuvens como Moduladores da Radiação Solar.....	40
2.5.1– A Importância das Nuvens.....	42
2.6 – Determinação da Fração de Cobertura de Nuvens através da Observação Visual.....	44
2.7 – Técnica para Determinar a Fração de Cobertura de Nuvens Através do Emprego de Imagens de Satélite.....	44
CAPÍTULO 3 – SÍTIO DE OBSERVAÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO	49
3.1 – Sítio de Observação.....	49
3.2 – Instrumentação Disponível no LABSOLAR.....	50
3.2 1– Instrumentação para Medidas de Radiação Solar.....	51
3.2 1.1– Pirheliômetro Eppley NIP.....	51
3.2 1.2 – Piranômetro Kipp&Zonnen CM11.....	51
3.3 – O Imageador.....	51
3.4 – Automatização do Sistema de Captura de Imagens.....	69
CAPÍTULO 4 – METODOLOGIA DE AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DE IMAGENS	73
4.– Introdução.....	73
4.1 – Imagens Digitais.....	73
4.2 – Aquisição de Imagens.....	73
4.3 – Classificação de Imagens.....	75
4.3.1 – Classificação Paralelepípedo.....	77
4.4 – Processamento de Imagens.....	82
4.4.1 – Pré-processamento.....	82
4.4.2 – Primeira Etapa do Processamento de Imagens.....	83
4.4.3 – Segunda-Etapa do Processamento de Imagens.....	85
4.4.4 – Terceira Etapa do Processamento de Imagens.....	88
4.5 – Avaliação das Imagens Coletadas com Aberturas Diferentes.....	93

4.6 - Estudo Comparativo dos Dados de Radiação Solar (global e difusa e direta) e de Cobertura de Nuvens.....	98
4.7 Processamento dos Dados de Radiação Solar.....	104
CAPÍTULO 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	107
5.1 – Distribuição de Frequência de Dados.....	108
5.2 – Dados de Radiação Solar e Nuvens.....	119
5.3 – Comparação entre os Dados do Imageador e os Dados de Satélite.....	131
5.4 – Conclusões.....	137
5.4.1– Contribuições Relevantes do Trabalho.....	139
5.4.2 – Limitações do trabalho.....	141
5.5 – Trabalhos futuros.....	141
REFERÊNCIAS BILIOGRÁFICAS.....	143
REFERÊNCIAS CONSULTADAS.....	147
APÊNDICE A – REPORTAGEM.....	149
APÊNDICE B – NUVENS E ALGORITMOS.....	151
APÊNDICE C – INSTRUMENTAÇÃO E CALIBRAÇÃO.....	159
APÊNDICE D1 – TRANSFORMAÇÃO RGB PARA IHS.....	165
APÊNDICE D2 – PROCESSAMENTO DE IMAGEM.....	175
APÊNDICE E – SÈRIE DE DADOS DE RADIAÇÃO SOLAR E NUVENS.....	185

LISTA DE FIGURAS

2.1	Espectro Eletromagnético de Radiação	34
2.2	Balanço da Radiação solar	36
2.3	Irradiação Solar .no Topo da Atmosfera ; ao nível do mar e do Corpo Negro	39
2.4	Variação da radiação difusa K_d em função da transparência atmosférica K_t	43
3.1	Mapa do Brasil com a Localização de Florianópolis	49
3.2	BSRN Florianópolis	50
3.3	Sistema Imageador de todo o céu	53
3.4	Croqui ilustrativo do sistema imageador	54
3.5.	(A) Câmara Pixera e (B) Câmara Pixera Lente unidas dentro do compartimento de PVC	55
3.6	(A) Papel com marcas igualmente espaçadas de 10° a 80° . Onde a reta no centro do gabarito é uma linha auxiliar para a aquisição de pontos na imagem; (B) Estrutura de suporte do cilindro translúcido criado para auxiliar na descrição da lente FCE8 da <i>Nikon</i> .	57
3.7.	Conjunto para aquisição das imagens com as marcas em círculos concêntricos	58
3.8	Imagem obtida com o conjunto para aquisição das imagens com as marcas em círculos concêntricos distribuídos em intervalos de 10° variando até 80°	59
3.9.	Marcas externas ao compartimento de PVC	60
3.10.	Posicionamento da lente em relação ao compartimento de PVC (em preto); junção do gabarito de papel (em vermelho)	61
3.11.	Imagem da Figura 3.6 com a máscara para captura de pontos representados pela intersecção da máscara em verde e os círculos	63
3.12	Valores obtidos através das digitalizações	66
3.13.	Ajuste polinomial para Lente e para o Gabarito	67
3.14	Representação do círculo externo utilizado para avaliar a influência da irregularidade causada pela distorção da lente na borda da imagem	68
3.15	Média da saturação no círculo mais externo da imagem genérica	69
3.16	Interface gráfica para aquisição das imagens.	70
4.1.	Em <i>RGB</i> a imagem original coletada em 04/02/02 14h: 27min hora local (esquerda) e a resposta fornecida pelo algoritmo para a imagem no espaço <i>IHS</i> (direita)	76
4.2	Classificação Paralelepípedo exibindo a região de transição	78
4.3	Árvore com 9 variáveis representando a distância Euclidiana entre as classes presentes nas imagens	79
4.4	Exemplo da degradação na qualidade das imagens coletadas com o sistema imageador empregado neste trabalho	83
4.5	Visão do horizonte obstruído no Campus da UFSC	84
4.6	Imagem com os obstáculos de borda minimizados: 08/01/2002	84
4.7	Caixa de diálogo para seleção do mês e dia	86
4.8	Seleção do dia 01/02 /2003 para processamento	87
4.9	Tela principal do programa que realiza a classificação de nuvens Seleção do dia 01/02 /2003 para processamento	90
4.10	Caixa de diálogo para o processamento das imagens	91
4.11	Caixa de diálogo para acesso a informação relacionada a uma imagem 27/10/02	92

4.12 Imagem 178° (anel 0), 148° (anel 1), 118° (anel 2), 88°(anel 3), 58° (anel 4) e 28° (anel 5)	94
4.13 Anéis para dia claro as 14:45	95
4.14 Saturação relativa dos anéis para o início e final do dia, em dias de céu claro	96
4.15 Anéis para dias encoberto e parcialmente encoberto 4.16	97
4.16 Curvas para radiação global, radiação difusa e radiação direta em W/m ² Imagens exibindo o estado de nebulosidade para o dia 3/10/2002	99
4.17 Curvas para radiação global, radiação difusa e radiação direta em W/m ² . Imagens exibindo o caráter de nebulosidade variável para o dia 22/10/2002	101
4.18 Curvas para radiação global, radiação difusa e radiação direta em W/m ² . Imagens exibindo as condições de cobertura de céu para o dia 04/02/2003	103
5.1 Distribuição dos dados de fração de cobertura de nuvens para o período de março de 2002 a fevereiro de 2003	109
5.2 Distribuição dos dados de fração de cobertura de nuvens para as estações outono, inverno, primavera de 2002 e verão de 2002 e 2003.	111
5.3 Distribuição dos dados de céu claro para o período de março de 2002 a fevereiro de 2003	112
5.4 Distribuição dos dados de céu claro para as estações outono, inverno, primavera de 2002 e verão 2002 e 2003	113
5.5 Distribuição dos dados de céu indeterminado para o período de março de 2002 a fevereiro de 2003	114
5.6 Distribuição dos dados de céu indeterminado para as estações outono, inverno, primavera de 2002 e verão de 2002 e 2003	115
5.7 Cobertura de nuvens média mensal para a região de Florianópolis (em azul); cobertura de nuvens para região de Florianópolis (curva em vermelho período 1931-1961; curva em verde 1961-1990).	117
5.8 Imagens do mês de julho de 2002	118
5.9 Representação gráfica do ângulo solar de zênite para Florianópolis (latitude 27° 28'S, longitude 48° 29'W). Imagens do mês de julho de 2002	119
5.10 (A) Gráficos do K_t contra a fração de cobertura de nuvens para ASZ < 70°; (B) para ASZ entre 40° e 50° para o período de março de 2002 a fevereiro de 2003	122
5.11 Gráficos do K_t versus a fração de cobertura nuvens para ASZ < 70° para estações do ano de 2002 e 2003	123
5.12 Gráficos do K_t versus a fração de cobertura de nuvens para ASZ entre 40° e 50° para estações do ano 2002/2003	124
5.13 (A) Razões entre radiação difusa e radiação global versus a fração de nuvens para ASZ < 70°; (B) para ASZ entre 40° e 50° para o período de março de 2002 a fevereiro de 2003	126
5.14 Razões entre radiação difusa e radiação global versus a fração de cobertura de nuvens para ASZ < 70° para estações do ano 2002 e 2003	127
5.15 Razões entre radiação difusa e radiação global versus a fração de cobertura de nuvens para ASZ entre 40° e 50° para estações do ano de 2002 e 2003	128
5.16 Gráfico superior apresenta a radiação global, difusa e direta para os dias 4, 5 e 6 de Outubro de 2002. Gráfico inferior apresenta fração da cobertura de nuvens para o mesmo período	129

5.17 (A) Erro quadrático médio (RMSE); (B) Desvio médio (MBE) das estimativas do modelo BRASIL-SR usando os valores de C_{eff} de cada um dos algoritmos 5.18 Razões entre radiação difusa e radiação global versus a fração de cobertura de nuvens para ASZ entre 40° e 50° para estações do ano de 2002 e 2003	132
5.18 (A) Análise comparativa entre a radiação solar estimada e medida obtida utilizando a fração de nuvens proveniente do imageador em superfície; (B) utilizando dados provenientes das imagens de satélite	134
5.19 (A) Relação entre as razões da radiação difusa e radiação global e a fração de nuvens proveniente do imageador de superfície; (B) mesma relação do gráfico anterior empregando o C_{eff} proveniente de satélite	136
B.1 (A) Nuvens altas; (B) Nuvens médias; (C) Nuvens baixas; (D) Rastro de condensação	151
C.1 (A) Câmera pixera e interface de comunicação; (B) lente FC-E8 da <i>Nikkon</i>	159
C.2 Perspectiva 1 do protótipo	160
C.3 Perspectiva 2 do protótipo	160
C.4 Perspectiva 3 do protótipo	161
C.5 Estrutura montada para captura das imagens com círculos concêntricos	162
C.6 Imagem utilizada para exemplificar a variação da saturação na parte externa da imagem. (FIGURA 3.15 do Capítulo 3)	164
D1.1 Cubo de cores <i>RGB</i> exibindo os tons de cinza ao longo da diagonal pontilhada	167
D1.2 (A) <i>IHS</i> Triângulo de cores; (B) <i>IHS</i> sólido de cores	169
D1.3 Detalhes do triângulo de cores <i>IHS</i> necessários para se obter as expressões de matiz e saturação	171
D2.1 Fluxo do Sistema de captura e processamento de imagens	175
D2.2 Estrutura do banco utilizada durante o trabalho	177
D2.3 Exemplo do banco utilizada durante o trabalho	177
D2.4 Imagens e círculos	181
D2.5 Exemplo de interface para seleção de áreas na imagem	183

LISTA DE TABELAS

2.1 Alturas Aproximadas das camadas superior, média inferior	42
3.1 Características do equipamento	52
3.2 Procedimento de digitalização por imagem	64
4.1 Para imagens da Figura 4.15	99
4.2 Para imagens da Figura 4.16	101
4.3 Para imagens da Figura 4.17	103
5.1 Número de imagens por mês	117
5.2 Respostas da classificação para as imagens da Figura 5.9	118
5.3 Comparação entre três dias para o mês de outubro de 2002	130
3.3 Apêndice C do Capítulo 3	163

LISTA DE SIMBOLOS

E_{∞}	Constante Solar
H	Radiação global medida em superfície
H_0	Radiação solar no topo da atmosfera
H_d	Radiação difusa medida em superfície
k	Coefficiente de espalhamento
K_d	Razão entre as integrais diária radiação difusa medida em superfície e da radiação global medidas em superfície
K_t	Razão entre as integrais diária da radiação global medida em superfície e da radiação solar no topo da atmosfera
α	Coefficiente de atenuação da radiação solar
Δl	Comprimento óptico percorrido na atmosfera
λ	Comprimento de onda
σ	Coefficiente de absorção

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

<i>ASZ</i>	Ângulo Solar de Zênite
<i>BSRN</i>	Baseline Surface Radiation Network
<i>CCD</i>	Charge Coupled Device
<i>C_{eff}</i>	Coefficiente efetivo de nuvens
<i>cl_d</i>	Índice para Céu Encoberto
<i>cl_r</i>	Índice para Céu Claro
<i>DN</i>	Digital Number
<i>FCE8</i>	Fisheye Convert
<i>F_{CLA}</i>	Fração de Céu Claro
<i>F_{IND}</i>	Fração de Céu Indeterminado
<i>F_{NUV}</i>	Fração de Nuvens
<i>IHS</i>	Intensity, Hue, Saturation
<i>ISCCP</i>	International Satellite Cloud Climatology Project
LABCON	Laboratório de Conforto Térmico
LABSOLAR	Laboratório de Energia Solar
<i>LW</i>	Long Wave/ Onda Longa
MBE	Mean Bias Error
MBERS	Modulação em Baixa Escala da Radiação Solar
MLERS	Modulação em Larga Escala da Radiação Solar
<i>PAR</i>	Photosynthetically Available Radiation
<i>RGB</i>	Red, Green, Blue
RMSE	Root Mean Square Error
<i>SW</i>	Short Wave/ Onda curta
<i>TSI</i>	Total Sky Image
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
<i>WCRP</i>	World Climate Research Programme
<i>WMO</i>	World Meteorological Organization
<i>WRMC</i>	World Radiation Monitoring Center

CAPITULO 1

INTRODUÇÃO

Em junho de 2000, o jornal Folha de São Paulo (16 de junho de 2000, página 18) publicou em seu caderno de ciências uma matéria bastante curiosa, que trazia como título: “Cientistas tentam resolver enigma das nuvens que absorvem radiação”, artigo da *NewScient*. O artigo faz uma abordagem sobre a questão da absorção da radiação solar pelas nuvens e suas possíveis implicações sobre o clima (Apêndice A).

A reportagem mostra a relevância das investigações sobre as nuvens e o papel que elas desempenham no clima e conseqüentemente na vida que se desenvolve na Terra. Sendo a radiação solar o principal fator que define o clima em nosso planeta, qualquer alteração no caminho óptico da atmosfera influenciará a intensidade da radiação final, recebida na superfície terrestre. Monitorar o caminho óptico que segue a radiação na atmosfera é uma das formas de compreender as possíveis mudanças em nosso clima, o qual é resultante das interações físicas e químicas entre os oceanos, os continentes, a biosfera, a criosfera e a atmosfera. Essas interações raramente obedecem a leis lineares, portanto, até mesmo pequenas perturbações podem acarretar resultados surpreendentes e imprevisíveis, através de mecanismos de retroalimentação.

A radiação solar ao atravessar a atmosfera em direção à superfície terrestre pode ser absorvida e espalhada pela atmosfera. A absorção da radiação ocorre devido à presença de moléculas ou átomos com fortes bandas ou linhas em uma dada faixa de comprimentos de onda. Por exemplo, o O₂ e o O₃ apresentam fortes bandas de absorção na região ultravioleta (0,001-0,39 μm) do espectro eletromagnético, e outras espécies como H₂O e CO₂ absorvem fortemente na região do infravermelho (0,7 - 1000 μm). A região do visível apresenta-se como uma janela atmosférica, pois não há fortes bandas de absorção neste intervalo espectral. Por esta razão, todo o sistema biótico adaptou-se para o aproveitamento da energia situada exatamente nessa faixa do espectro da radiação.

Nessa faixa do espectro solar, a energia atinge a superfície terrestre com pouca atenuação, quando há poucas ou ausência de nuvens. A presença de espécies químicas absorvedoras de radiação ocorre em toda a atmosfera terrestre, mas a densidade da atmosfera decai exponencialmente com a altura e, como consequência, as interações entre a radiação solar e os componentes da atmosfera variam com a altitude. Além disso, a composição da atmosfera também varia com a altitude de tal forma que os comprimentos de onda mais curtos do ultravioleta são absorvidos na mesosfera (acima de 60 km), os intermediários na estratosfera (entre 20-30 km, pelo ozônio) e a radiação infravermelha na baixa estratosfera e troposfera (Echer et al., 2001; Brasseur e Solomon, 1986).

Dentre os “obstáculos” encontrados pela radiação solar em sua trajetória em direção à superfície terrestre encontram-se as nuvens, cuja constituição básica são os cristais de gelo e gotículas de água. A radiação solar na região visível do espectro (*Short Wave - SW*) ao interagir com uma nuvem, penetra em seu interior. Parte da radiação atravessa a nuvem e parte colide sucessivamente com os cristais e gotículas. Cada colisão entre a radiação e os componentes da nuvem muda não apenas a direção da trajetória, mas a própria radiação, podendo ocorrer a extinção da radiação devido às múltiplas colisões e múltiplos espalhamentos dentro da nuvem. Parte dessa radiação é redirecionada à superfície terrestre, podendo ser percebida em dias nublados. A superfície da Terra absorve a radiação solar que atravessa as nuvens e re-emite a radiação recebida, assim as nuvens funcionam como agentes que aprisionam essa radiação que é emitida pela superfície e pela atmosfera na faixa do infravermelho (*Long Wave - LW*). Ao conjunto retenção-reflexão da radiação solar pelas nuvens dá-se o nome de *cloud-forcing* (Pereira e Colle, 1997).

Dentre os componentes da atmosfera, as nuvens representam um caso a parte pela sua importância nos processos de absorção e espalhamento da luz solar. Devido a isso, informações contínuas sobre a cobertura de nuvens, ajudam na compreensão de várias questões ainda em aberto nas diversas áreas das ciências e meio ambiente.

Para se ter idéia da importância da informação sobre cobertura de nuvens, alguns estudos em oceanografia sugerem que a atenuação da radiação fotossinteticamente ativa

– PAR, na região visível do espectro de radiação, causada pela presença de nuvens tem implicações sobre a produção de fitoplânctons marinhos. O fitoplâncton constitui a base da cadeia alimentar marinha. A longo prazo, alterações na cobertura de nuvens podem ter efeitos sobre a síntese de nutrientes em regiões oceânicas (Madruga et al., 2003). Alterações nessa biota tem implicações diretas na produção pesqueira, percebe-se portanto a importância desses estudos não somente no contexto científico mas também sócio-econômico.

Alguns estudos sobre uma possível influência da atividade solar sobre o clima e aspectos meteorológicos da Terra, mostram resultados ainda controversos (Svensmark and Friis-Christensen, 1997; Herman and Goldber, 1978). Um dos mecanismos propostos para explicar essa influência é a modulação da cobertura de nuvens por íons atmosféricos, produzidos por raios cósmicos. Os estudos dos registros naturais em anéis de árvores têm apresentado importantes informações sobre as mudanças climáticas. Nestes estudos foi possível constatar uma influência da atividade solar no crescimento dos anéis de árvores na região Sul do Brasil, através da correlação com o número de manchas solares. No entanto, acredita-se que exista também uma influência importante relacionada a variabilidade de origem atmosférica da radiação solar incidente sobre o crescimento dos anéis de árvores. Isso poderia ser comprovado pelo cruzamento entre séries temporais de cobertura de nuvens com as dos anéis de árvores. Este tipo de informação ajudaria a compreender melhor como varia a espessura dos anéis de árvores em tempos de maior e de menor cobertura de nuvens no céu (Rigozo et al., 2002).

Trabalhos realizados com profissionais na área de física e medicina tem mostrado que a exposição exagerada à radiação ultravioleta B (0,28– 0,32 μ m), pode trazer malefícios à saúde humana. Malefícios que vão desde o eritema ao câncer de pele (Kirchhoff, 1995; Kirchhoff e Nasser, 1996; Kirchhoff et al., 1997). Compreendendo a importância de adotar uma medida de proteção contra os efeitos da exposição ao UV-B, Silva (2001) propõe em seu trabalho um algoritmo de previsão para o índice de UV-B em todo território brasileiro, com 24 horas de antecedência, sendo assim possível o conhecimento prévio de quanta radiação haverá em um determinado ambiente. Um dos

parâmetros de entrada utilizado por esse modelo é a informação sobre cobertura de nuvens.

Instrumentos que realizam medidas de radiação solar como espectrofotômetros, fotômetros são utilizados para estudos da física e química da atmosfera. Entretanto, em dias em que há presença de nuvens ocorre um ruído inserido nesses dados devido a essa presença. A informação sobre a cobertura de nuvens nos sítios de coletas de dados desses instrumentos é de extrema relevância para a garantia da confiabilidade dos dados oriundos desses instrumentos (Crowford et al., 2003).

Os modelos climáticos que geram informações sobre o clima e o tempo, utilizam para as previsões valores de variáveis atmosféricas como pressão, temperatura, umidade, vento dentre outros. Um dos parâmetros de saída é a cobertura de nuvens. Entretanto não existe como avaliar os resultados desses modelos de previsão climática quanto à resposta para a cobertura de nuvens em superfície. A informação sobre a cobertura de nuvens obtida em superfície é de extrema relevância para avaliação da resposta de saída dos modelos climáticos quanto a cobertura de nuvens.

Em termos econômicos, o uso da energia solar como fonte alternativa à energia convencional (elétrica) implica em conhecer a sua disponibilidade em todo território nacional, para isso é necessário o conhecimento prévio da distribuição da cobertura de nuvens. Martins (2001) apresenta técnicas para a determinação da fração de cobertura de nuvens a partir de imagens do satélite GOES-8, utilizando os canais infravermelho e visível para composição de imagens de céu claro e céu nublado utilizadas na determinação da cobertura de nuvens. As técnicas desenvolvidas e propostas na literatura para cálculo da cobertura de nuvens apresentam problemas semelhantes: dificuldade na solução da ocorrência de cobertura parcial de nuvens em um pixel da imagem; a presença de nuvens com emissividades variáveis e a dependência que apresentam em relação às propriedades da superfície. Um estudo realizado pelo *International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP)* concluiu que a avaliação dos algoritmos de nuvens está limitado por dois fatores: a) as características dos dados de satélite disponíveis, tais como resolução espacial e espectral; b) a falta de um banco de

dados de “verdade terrestre” que permita a comparação entre os resultados dos diversos algoritmos e a avaliação do desempenho de cada um deles (Martins, 2001).

Na arquitetura, o conhecimento da dinâmica da luz natural, auxilia no desenvolvimento de projetos que visam o conforto térmico de ambientes. As condições de luminosidade variam de acordo com as condições de céu e da cobertura de nuvens, criando assim diferentes efeitos no ambiente projetado (Amaral, 1999).

Trabalhos desenvolvidos por Santos (1957), Holle e MacKay (1975) entre outros, mostram a persistência na busca de obter informações através de imagens de todo o céu, adquiridas com câmeras e lente grande angular do tipo “olho de peixe” e chapas fotográficas. Após a revelação das chapas fotográficas a fração da cobertura de nuvem era realizada com o auxílio de uma grade para planificação das imagens e posterior mapeamento das nuvens. Shields et al.(1998), Feister et al. (2000) propõem metodologia para determinação da cobertura de nuvens utilizando câmera digital e algoritmos que utilizam a razão entre o vermelho e o azul do sistema RGB de cores. Pelos esforços empregados por diversos grupos de pesquisas para obtenção da fração de cobertura de nuvens em superfície, percebe-se a importância desse tipo de informação para a comunidade científica internacional.

Em termos de instrumentação para fornecer a cobertura de nuvens em superfície, existe um equipamento fabricado pela companhia *Yankee Environmental System*, chamado *Total Sky Imager (TSI)* em duas versões 440 e 880. O sistema possui uma calota convexa polida sobre uma base aquecida que evita a condensação de água. Junto à base existe um braço que sustenta uma câmera apontando para o centro da calota que reflete em sua parte convexa todo hemisfério visível. A câmera, que está apoiada sobre o braço fixo à base, captura as imagens. O sistema do *TSI-880* permite o armazenamento de imagens, o *TSI-440* necessita da transferência das imagens capturadas para outro dispositivo. O custo desse tipo de equipamento é bastante elevado para que entre em rotinas nas estações de superfície. Em termos de processamento de imagens, o sistema que acompanha o *TSI* utiliza imagens em *RGB* para análises da fração de cobertura de nuvens, o que pode comprometer os resultados pois o céu claro se caracteriza por tons

azuis, com matizes que vão do verde ao vermelho. As nuvens por sua vez possuem cor branca com matizes de cores que vão do azul ao vermelho. Logo utilizar a informação de cromaticidade não parece ser uma boa opção quando dois objetos distintos podem apresentar a mesma coloração, como é o caso do céu claro durante o alvorecer com a contribuição pronunciada dos particulados presentes na atmosfera e dias com cobertura de nuvens, onde os tons avermelhados podem sugerir problemas na hora da classificação do céu.

Como objetivo primário, o atual trabalho descreve uma metodologia para obtenção de dados de fração de cobertura de nuvens por satélite com emprego de um imageador automático em superfície. Essa metodologia deverá permitir a formação de uma base de dados operacional e consistente sobre a cobertura de nuvens sob o ponto de vista da observação em superfície, com ampla gama de emprego no estudo do balanço radiativo da atmosfera. A metodologia abrange: projeto e construção de um protótipo simples e de baixo custo para coleta de imagens do céu em superfície e desenvolvimento de técnica de análise de imagens com o objetivo de extrair informações sobre a cobertura de nuvens a partir deste protótipo. A validação da metodologia foi realizada na região de Florianópolis (latitude $27^{\circ} 28'S$, longitude $48^{\circ} 29'W$, altitude 15m) – SC, através dos dados de radiação solar medidos na estação *Baseline Surface Radiation Network (BSRN)* da *World Meteorological Organization (WMO)*.

Como objetivo secundário, apresenta-se um estudo comparativo entre os resultados obtidos pelo novo método com aquele obtido através do uso de imagens do sistema GOES (Martins, 2001) para a região de Florianópolis para fins de avaliar o seu potencial como base de "verdade terrestre" nos modelos que empregam dados de satélite para estimar a radiação solar na superfície. A metodologia proposta abrange o desenvolvimento de um protótipo de um sistema de mapeamento automático da fração de cobertura de nuvens baseado na aquisição de imagens com câmera do tipo charge coupled device (*CCD*¹) na faixa visível do espectro de radiação solar e algoritmos para

¹ *Charge Coupled Device (CCD)* – uma tradução para língua portuguesa poderia ser dispositivos de coleta de cargas. As *CCDs* funcionam pela captação de imagens por produção de cargas devido ao efeito fotoelétrico sobre um material semiconductor.

análise das imagens coletadas, baseados na transformação do espaço *Red, Green, Blue(*RGB) de cores para o espaço da Intensidade, Matiz e Saturação (*Intensity, Hue and Saturation*), utilizando a saturação para determinação da fração da cobertura de nuvens.

O principal benefício esperado ao final do trabalho é o desenvolvimento da metodologia e do protótipo de um experimento capaz de fornecer uma série de dados com alta resolução espaço-temporal de imagens para auxiliar estudos sobre transferência radiativa na atmosfera e ciências afim. As características principais esperadas para o protótipo são: automação, consistência dos dados, simplicidade de operação e baixo custo. Essa última característica visa possibilitar sua entrada em rotinas de operação em estações meteorológicas e experimentos científicos que requeiram esse tipo de informação e como auxílio em outras áreas como: agrometeorologia, engenharia civil e ao controle de tráfego aéreo.

A apresentação do presente trabalho consiste de 5 capítulos. O Capítulo 1 é um breve comentário sobre a relevância de informações sobre cobertura de nuvens e os objetivos do trabalho. O Capítulo 2 trata de conceitos básicos relacionados à importância das nuvens no balanço radiativo, apresentam-se também as atuais técnicas de monitoramento da cobertura de nuvens, abordam-se a questão das estações de superfície e as dificuldades na validação dos algoritmos que utilizam imagens de cobertura de nuvens oriundas de satélites. O Capítulo 3 descreve o sítio utilizado para aquisição de imagens, o sistema de aquisição de imagens, a rotina de trabalho e as dificuldades apresentadas na implementação do sistema. O Capítulo 4 apresenta a metodologia proposta para o desenvolvimento do trabalho de tese e a montagem do protótipo do sistema de monitoramento automático de nuvens. No Capítulo 5 são apresentados os resultados obtidos para o período de março de 2002 a fevereiro de 2003, gerados através do emprego do sistema e analisa-se a relação entre o índice de limpidez atmosférica fornecido pela razão entre integral diária da radiação global medida em superfície (H) obtida através dos radiômetros da *BSRN* e radiação solar no topo da atmosfera (H_0), índice Kt . No Capítulo 5 discute-se os resultados de estimativa de radiação solar com base no uso de modelo BRASIL-SR utilizando o coeficiente efetivo de nuvens obtidos

a partir do uso de satélites e a fração de cobertura de nuvens determinada através do presente trabalho.

CAPÍTULO 2

CONCEITOS BÁSICOS

2.1 O Sol - Fonte de Energia para a Terra

O Sol é a fonte de praticamente toda energia que entra no planeta Terra. A quantidade de energia recebida da Lua, planetas, estrelas e do interior do globo terrestre, são desprezíveis em comparação com a recebida através do Sol. A evidência desse fato está no aumento da temperatura, durante o dia, e na queda da temperatura, durante a noite. A radiação solar constitui a força motriz para processos térmicos, dinâmicos e químicos em nosso planeta. A importância do conhecimento sobre essa fonte de energia para a atmosfera terrestre, estimula a investigação sobre a interação da radiação solar com a atmosfera e sobre seus agentes moduladores. Tais agentes são, principalmente, a matéria presente em suspensão na atmosfera tais como: moléculas de gases, aerossóis e nuvens. As nuvens são os agentes moduladores de primeira ordem da radiação solar que chega a superfície.

O espectro de radiação solar, apresenta um comportamento contínuo sobreposto com bandas de absorção, conhecido como espectro eletromagnético. A Figura 2.1 apresenta a disposição do espectro eletromagnético. Da esquerda para a direita, encontram-se as ondas curtas, conhecidas como raios Gama, raios X, raios cósmicos ($<0,001 \mu\text{m}$); a seguir, na ordem crescente de comprimentos de onda, vêm os raios ultravioleta ($0,001$ a $0,39 \mu\text{m}$), a luz visível ($0,39$ a $0,77 \mu\text{m}$), e infravermelha ($0,77$ a $1000 \mu\text{m}$) e as usadas em RADAR, TV e Rádio ($> 1000 \mu\text{m}$) (Iqbal,1983).

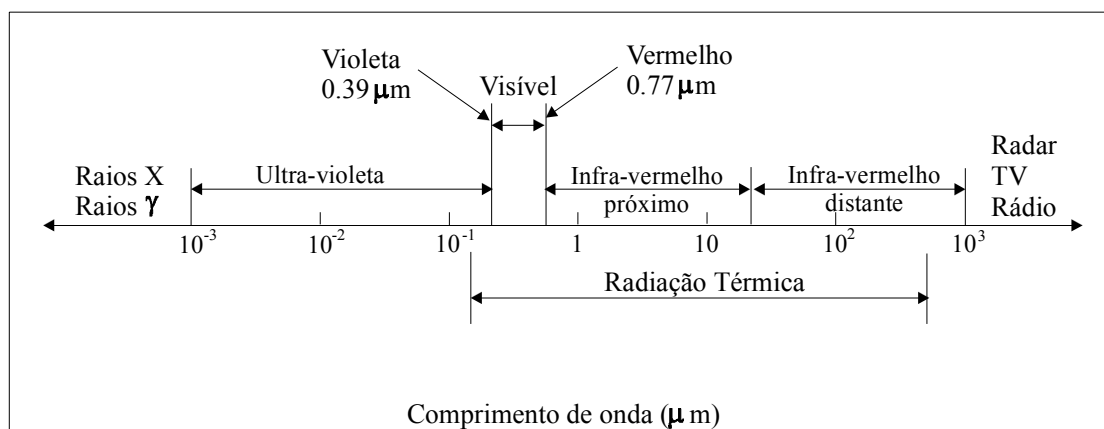


FIGURA 2.1 - Espectro eletromagnético de radiação.

FONTE : Modificada de Iqbal (1983).

2.2 Radiação Solar no Topo da Atmosfera

A densidade de fluxo de energia solar (ou irradiância solar), E , que chega ao topo da atmosfera terrestre é expressa nas unidades de Wm^{-2} (potência por unidade da área), A Constante Solar¹, (E_{∞}) representa o fluxo máximo de radiação solar que atinge o topo da atmosfera terrestre. Seu valor corresponde a aproximadamente 1.367 Wm^{-2} (Vianello e Alves, 1991). A radiação que chega ao topo da atmosfera sofre dois tipos de modulação, uma é a modulação em larga escala da radiação solar (MLERS), e a outra é a modulação em baixa escala da radiação solar (MBERS).

A MLERS ocorre devido aos movimentos de rotação, translação e precessão realizados pela Terra. As mudanças que ocorrem no posicionamento da Terra em relação ao Sol são as causas das variações diárias e sazonais do clima na Terra (Hoyt e Schatten, 1997). A MBERS pode ocorrer por variações extraterrestres. Os fatores extraterrestres ocorrem devido ao Sol não ser uma fonte de energia uniforme. Os fatores que compõem a MBERS apresentam periodicidades variáveis de acordo com sua natureza. Essa

¹ Essa “constante” representa a quantidade de energia radiante em todos os comprimentos de onda recebida por unidade de tempo e de área no topo da atmosfera terrestre, corrigida para a distância média Terra-Sol, e equivalendo a aproximadamente $1365 - 1370 \text{ Wm}^{-2}$. Sua variação está associada com a atividade solar, especialmente com o ciclo de 11 anos, sendo observado uma variação de 0,1% na sua intensidade entre o mínimo e o máximo de atividade solar (Frohlich et al., 1998).

periodicidades podem ser mensais acompanhando o período de rotação do Sol de 27 dias e ainda o ciclo solar, de 11 anos (Frolich e Lean, 1998).

Os fenômenos atmosféricos que atuam como moduladores da radiação solar entre o topo da atmosfera e a superfície, podem ser divididos em grupos:

- grandes moduladores – as nuvens em seus diversos tipos e formas;
- pequenos moduladores – vapor d'água, partículas de aerossóis² e gases atmosféricos;
- moduladores antropogênicos – são inseridos na atmosfera através da queima de biomassa e dos combustíveis fósseis.

O equilíbrio térmico da Terra é mantido pelo balanço entre a radiação solar incidente e a enviada de volta ao espaço. Cerca de 30% desta radiação, principalmente na faixa de comprimentos de ondas longos (do infravermelho ao termal), é refletida pelas nuvens, pela superfície e pela própria atmosfera. Os restantes 70% são absorvidos por gases atmosféricos em especial o ozônio (O₃), o gás carbônico (CO₂) e o vapor d'água (H₂O), pelas nuvens, pelas partículas em suspensão no ar e pela superfície do planeta (Pereira e Colle, 1997).

² Aerossóis são constituídos por partículas pequenas, sólidas ou líquidas, maiores que as moléculas, encontradas em suspensão na atmosfera. Seinfeld, J.H. Atmospheric Chemistry and Physics of Air Pollution, 1986.

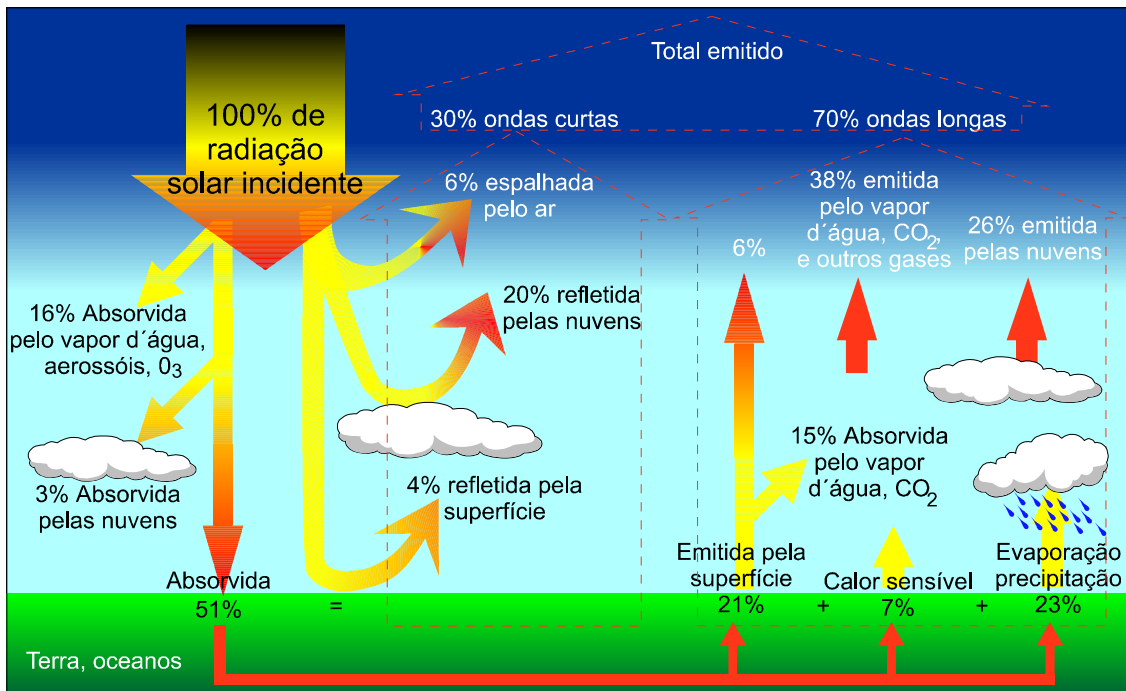


FIGURA 2.2 - Balanço da radiação solar na Terra.

FONTE: Modificada do Atlas of Satellite Observations
Related to Global Change, (1995, p. 20).

A transmitância da radiação solar na atmosfera é um processo complexo e de difícil descrição, devido ao grande número de interações físicas e químicas que ocorrem entre a radiação solar e os componentes da atmosfera, a maioria não lineares. A transmitância da radiação monocromática através da atmosfera pode ser determinada por $\exp(-\alpha \Delta l)$, onde α é o coeficiente de atenuação da radiação e Δl é o comprimento óptico percorrido na atmosfera. O coeficiente de atenuação é determinado a partir dos processos de espalhamento e absorção da radiação, ou seja, $\alpha = \sigma + k$, onde σ e k são os coeficientes de absorção e espalhamento da radiação. Os coeficientes de absorção e espalhamento dependem dos gases e dos aerossóis presentes na atmosfera (Brasseur e Solomon, 1986; Salby, 1995; Echer et al., 2001; Martins et al. 2003).

2.3 Espalhamento Atmosférico da Radiação Solar

As partículas de aerossóis e as moléculas presentes na atmosfera podem absorver e espalhar a radiação eletromagnética. O espalhamento é um processo físico, pelo qual uma molécula ou partícula no caminho de uma onda eletromagnética absorve energia da onda incidente e a re-irradia em todas as direções. As partículas de aerossóis cujas dimensões são menores que o comprimento de onda da radiação incidente ($\lambda > d$), espalham a radiação de forma similar ao espalhamento produzido pelas moléculas. Este espalhamento é descrito pela teoria conhecida como Espalhamento Rayleigh. Quando as dimensões das partículas são da mesma ordem de grandeza ou superiores ao comprimento de onda da radiação, o espalhamento apresenta propriedades mais complexas e a teoria que descreve esse tipo de espalhamento é conhecida como teoria do espalhamento Mie (McCartney, 1976; Lenoble, 1993).

2.3.1 Espalhamentos Rayleigh e Mie

No Espalhamento Rayleigh, a intensidade da luz espalhada depende fortemente da razão do tamanho da partícula d ao comprimento de onda λ da radiação incidente (McCartney, 1976; Lenoble, 1993). A teoria de Rayleigh para o espalhamento da radiação solar considera que os elementos espalhadores sejam partículas esféricas, isotrópicas, bem menores que o comprimento de onda, da luz e mais densas que o meio vizinho. O espalhamento varia inversamente com a quarta potência do comprimento de onda da radiação.

Com base no Espalhamento Rayleigh, o azul do céu durante a maior parte do dia pode ser explicado, pois o espalhamento da luz é maior nas ondas mais curtas, como por exemplo para o azul ($\lambda \approx 0,4\mu\text{m}$) do que para o vermelho ($\lambda \approx 0,8\mu\text{m}$). Entretanto, no crepúsculo o caminho ótico que o feixe de radiação atravessa é mais longo e devido a isso ocorre uma maior interação entre o feixe de radiação e a atmosfera. Como consequência da interação, parte da radiação de onda curta (como por exemplo o azul) será removida do feixe de radiação com maior eficiência, acontecendo a predominância do vermelho no espalhamento. Devido a isso, a luz que é refletida pela nuvens ou espalhada pela atmosfera tem característica avermelhada durante o nascer ou pôr do Sol.

A explicação física para o espalhamento é que uma molécula sujeita a um campo elétrico-magnético terá um momento de dipolo induzido. A molécula está polarizada sobre a influência do campo; esta polarização é a base de todo espalhamento e refração. Quando o campo varia periodicamente, como em uma onda eletromagnética, o valor do momento de dipolo oscila sincronicamente com o campo. Como a molécula é isotrópica, o eixo do momento de dipolo sempre se alinha com o vetor campo elétrico da onda passante. E como a molécula é muito pequena comparada aos comprimentos de onda típicos da radiação, a fase instantânea da onda é uniforme sobre a molécula. O dipolo induzido da molécula irá emitir radiação de mesma frequência da onda incidente e em todas direções. (McCartney, 1976).

Quando o diâmetro da partícula é maior que um décimo do comprimento de onda ($d > \lambda/10$), a teoria de Rayleigh não é adequada para explicar o fenômeno e é necessário utilizar a teoria de Mie. Não é suficiente considerar apenas um dipolo na interação entre a partícula e radiação eletromagnética. Uma distribuição de cargas tridimensional é originada na partícula espalhadora que necessita de momentos de mais altas ordens, como o quadripolo e octopolo para ser descrita adequadamente e dessa forma o processo de espalhamento torna-se mais complexo.

2.4 Absorção Atmosférica da Radiação Solar

A absorção da radiação solar é seletiva, sendo o vapor d'água, o ozônio e o gás carbônico os principais agentes absorvedores. Dentre eles, o ozônio atua principalmente na região do ultravioleta e os dois outros gases atuam na faixa do infravermelho do espectro, como pode ser visto na Figura 2.3 .

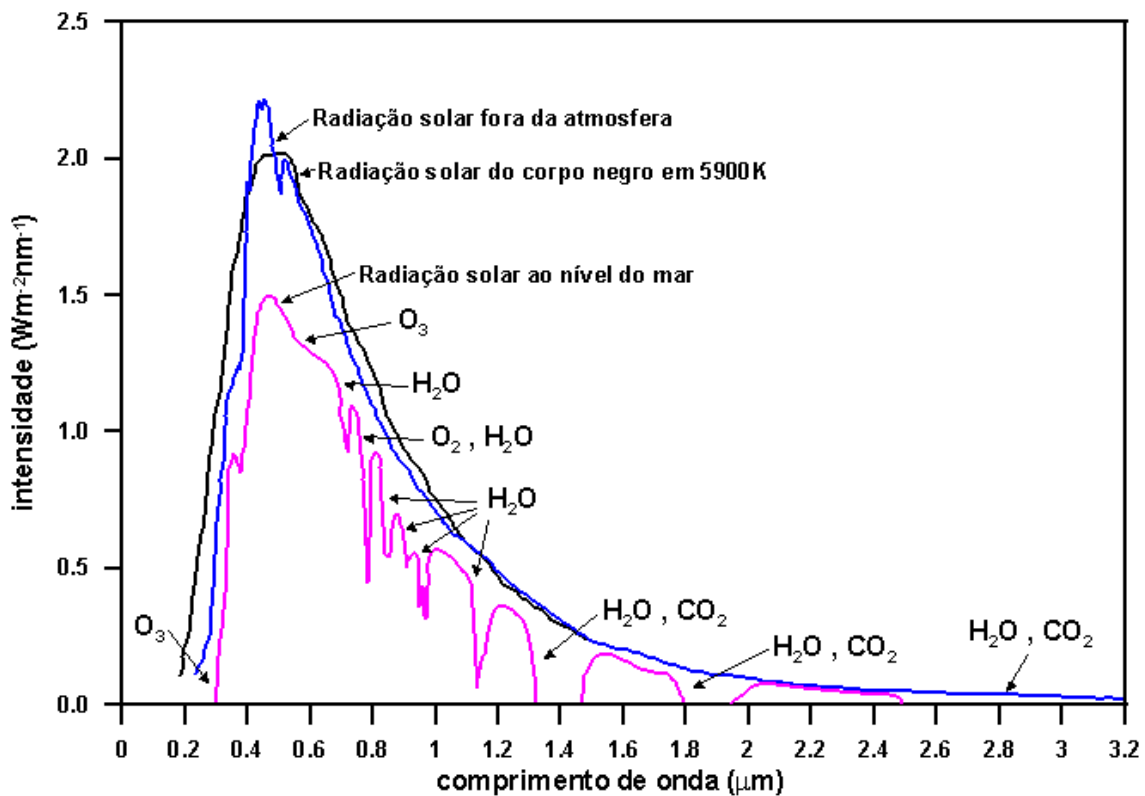


FIGURA 2.3 - Irradiação Solar no Topo da Atmosfera (curva azul); Irradiação Solar ao nível do mar (curva rosa); Espectro de emissão do Corpo Negro a 5.900 K (curva em preto). (As áreas vazadas em contorno rosa mostram as bandas de absorção dos diferentes gases).

FONTE: Zamorano Banda (2003).

A atmosfera é praticamente transparente à radiação solar na faixa de 0,3 a 0,8 μm . Observa-se que nessa faixa encontra-se a radiação visível. Entre 8 e 12 μm (radiação infravermelha), a absorção atmosférica é também mínima (exceto na região próxima a 9,6 μm , em que o ozônio absorve intensamente). Essa região do espectro é conhecida como Janela Atmosférica, porque em condições de céu claro, parte da radiação emitida pela Terra nesta faixa atravessa a atmosfera, perdendo-se no espaço.

As nuvens, por outro lado, exercem um papel importantíssimo no balanço de radiação do planeta. Elas refletem intensamente a radiação solar que incide sobre elas, e

absorvem a radiação emitida pela Terra, particularmente na faixa do infravermelho. Desta forma a presença de nuvens impede a ocorrência de grande aquecimento diurno, assim como grande resfriamento noturno (Vianello e Alves, 1991; Pereira e Colle, 1997; Iribarne e Cho, 1980).

2.5 As Nuvens Como Moduladores da Radiação Solar

As nuvens são observadas continuamente, por desempenharem um papel de grande importância dentro do caráter global atmosférico, atuando como agente modulador da radiação solar (Iribarne e Cho, 1980; Climate Change, 1992; Hobbs, 1993; Gurney et al., 1995; Pereira e Colle, 1997; Ceballos e Bottino, 2000; Martins et al., 2003). Elas apresentam um elevado índice de refletividade que varia com a espessura das mesmas e com a quantidade de água nelas existentes.

A característica visual principal da Terra, quando observada do espaço, é sua cobertura de nuvens (Apêndice B). As nuvens são volumes com alta concentração de gotículas de água e/ou cristais de gelo em suspensão na atmosfera, podendo ocorrer em qualquer região da Terra entre a superfície e a tropopausa (Schaefer e Day, 1981). Existem ainda nuvens estratosféricas mas essas não serão estudadas neste trabalho.

Na formação de nuvens, a condensação do vapor d'água em gotículas exige a presença de vapor d'água na atmosfera e de núcleos de condensação em quantidade suficiente. Núcleos de condensação são partículas em torno das quais o vapor d'água se condensa. A partir desse ponto, a condensação continua formando a gotícula de nuvem inicial. Tais núcleos são constituídos, geralmente, de substâncias higroscópicas (material ou substância que tem afinidade pelo vapor d'água sendo capazes de retirá-lo de uma atmosfera ou eliminá-lo de uma mistura gasosa), como por exemplo os sulfatos de origem marinha ou antrópica. O processo de condensação ocorre quando o ar se esfria pela ascensão adiabática. A umidade relativa aumenta, mas antes de atingir 100%, inicia-se o processo de condensação em torno dos núcleos de condensação mais ativos para a formação das nuvens. A gotícula cresce até atingir valores máximos dentro da nuvem, quando a umidade atinge 100% (Vianello e Alves, 1991). Na ausência de

núcleos de condensação, a atmosfera pode atingir um estado de supersaturação e as nuvens não são formadas.

A fração da radiação solar que é refletida diretamente pelas nuvens e pelos particulados em suspensão na atmosfera é chamada de albedo planetário. A maior parte do albedo (cerca de 23%) é devido às nuvens (Paltridge e Platt, 1976; Wallace e Hobbs, 1977; Wiscomber, 1980; Wielicki e Parker, 1988; Arking, 1990; Hobbs, 1993). As nuvens refletem a radiação solar incidente em ondas curtas e possuem a capacidade de reter a radiação de ondas longas emitida pela superfície da Terra, um efeito semelhante ao efeito estufa. O efeito combinado da reflexão de ondas curtas (*SW*)-absorção de ondas longa (*LW*) da radiação é conhecido como “forçante das nuvens” -*cloud forcing*, (Clima Change, 1992)

A resposta das nuvens para absorção e espalhamento da radiação solar, apresenta uma variação, pois as respostas são baseadas no tipo de cobertura de nuvem, que estão diretamente relacionadas a constituição física da nuvem, bem como a fração de cobertura disponível (Santos 1957; Blair, 1964; Souza, 1999; Martins, 2001). Por isso é de grande importância conhecer tanto a microfísica das nuvens quanto a fração do céu por elas ocupada. Contudo, pelo fato das nuvens possuírem grande variabilidade espacial, torna-se complexo o trabalho de determinação de sua classificação e a determinação de sua fração de cobertura (Hartmann, 1993; Martins, 2001; Martins et al. 2003).

A classificação internacional de nuvens foi publicada em 1896 e tem sido, desde então, revisada periodicamente. A última revisão define e descreve dez tipos de nuvens: *Cirrus*, *Cirrocumulus* e *Cirrostratus* (nuvens altas), *Altostratus*, *Altostratus*, *Nimbostratus* nuvens (médias), *Stratus*, *Stratocumulus*, *Cumulus*, *Cumulonimbus* (nuvens baixas) (Blair 1964, OMM, 1972). A Tabela 2.1 apresenta as alturas aproximadas dos limites entre as camadas de nuvens (Apêndice B), apresentadas pela classificação internacional de nuvens da Organização Mundial de Meteorologia (OMM).

TABELA 2.1 Alturas Aproximadas das camadas superior, média inferior (ATLAS INTERNACIONAL DAS NUVENS – OMM, 1972).

Camadas	Regiões polares	Regiões temperadas	Regiões tropicais
Superior	de 3 a 8 km	de 5 a 13 km	de 6 a 18 km
Média	de 2 a 4 km	de 2 a 7 km	de 2 a 18 km
Inferior	superfície a 2 km	superfície a 2 km	superfície a 2 km

Os modelos de transferência radiativa na atmosfera recebem dados sobre a cobertura de nuvens como principal parâmetro de entrada para estimar a radiação solar em superfície. Essa cobertura é estimada através da análise de imagens de satélites geostacionários, modelos atmosféricos, ou através da observação visual. As observações visuais fazem parte da operação de rotina nos aeroportos e estações meteorológicas da rede meteorológica nacional. Contudo, ainda não existe um método consistente para a validação dessas estimativas através da “verdade terrestre” (Santos, 1957; Souza, 1999; Martins, 2001).

2.5.1 A Importância das Nuvens

A importância das nuvens sobre o sistema climático de nosso planeta e sobre o tempo em geral é notória, pois o equilíbrio térmico é mantido pelo balanço entre a radiação solar incidente e a enviada de volta ao espaço. Como foi dito anteriormente, o grande agente modulador do fluxo de radiação que incide na atmosfera são as nuvens, devido às suas características e sua variabilidade espacial e temporal (Jones, 1992).

A Figura 2.4 apresenta a variação da radiação solar difusa como função do índice de transparência atmosférica ou limpidez (Iqbal, 1983). Observam-se três intervalos de condições de céu. No primeiro intervalo ocorre cobertura uniforme no céu e um crescimento praticamente linear entre as razões K_d e K_t . K_t é a razão entre as integrais diárias da radiação global medida em superfície (H) e da radiação solar no topo da atmosfera (H_0). K_d é a razão entre as integrais diárias radiação difusa medida em superfície (H_d) e da radiação global medidas em superfície (H).

No segundo cenário, em presença da cobertura parcial das nuvens, o comportamento é mais complexo e a transmissão ocorre na faixa de K_d variando entre 20 e 30%, aproximadamente. O terceiro cenário representa o céu claro e o espalhamento molecular que permite uma transmissão em torno de 20%, que corresponde ao efeito da transmissão da luz solar através da atmosfera sem nuvens, descrito pela teoria de Rayleigh.

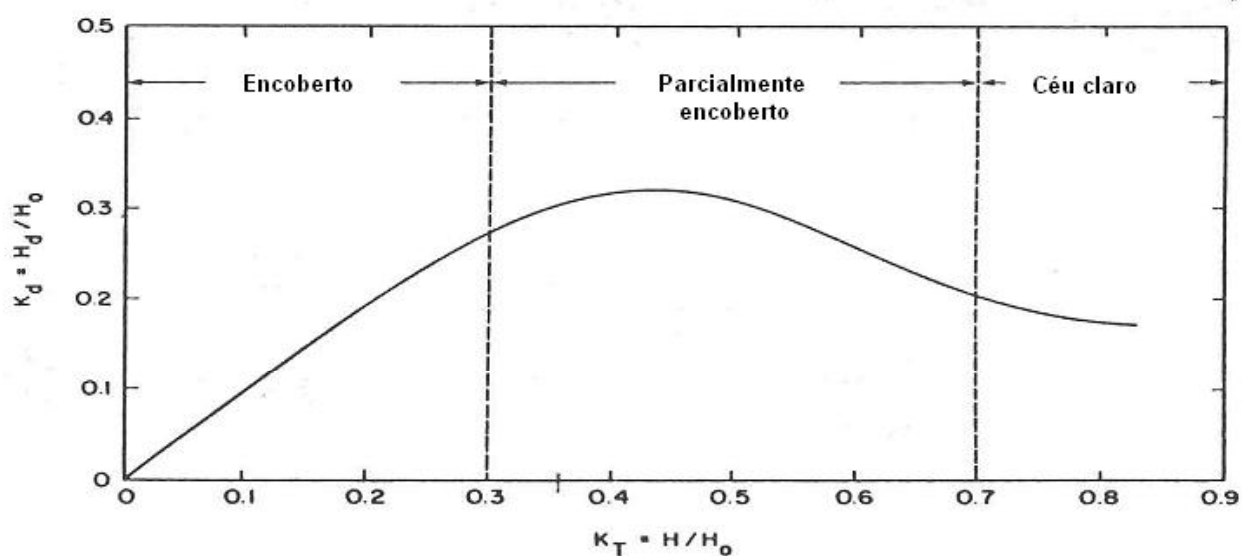


FIGURA 2.4 - Variação da radiação difusa K_d em função da transparência atmosférica K_t .
 FONTE: Modificada de Iqbal (1983, p.253).

Existem duas formas básicas para o trabalho de observação do céu, com o objetivo de determinar a fração de cobertura de nuvens (nebulosidade): através da inspeção visual realizada por observadores na superfície terrestre e através do uso de satélites.

2.6 Determinação da Fração de Cobertura de Nuvens através da Observação Visual

A observação da cobertura de nuvens em superfície ocorre através da inspeção do céu por técnicos treinados que trabalham em estações meteorológicas, conforme padrões definidos pela Organização Mundial Meteorológica (OMM). No procedimento usado durante a observação, o observador deverá colocar-se num ponto que ofereça o máximo de desobstrução do céu em todas as orientações. A estimativa deverá ser feita, supondo-se que a nebulosidade existente esteja distribuída em uma só camada contínua. A observação poderá ainda ser facilitada, dividindo-se a abóbada celeste em metades ou quadrantes. A seguir, soma-se o total das metades ou dos quadrantes (Blair, 1964). A quantidade parcial ou total de nuvens é expressa por uma fração proporcional à área encoberta e com aproximações em oitavos ou décimos. Quando a quantidade de nuvens for grande, será mais fácil estimar a área descoberta e, por diferença, obter a área encoberta. Na observação visual é recomendado ignorar a parte do céu próxima ao horizonte, pois nesta região as nuvens aparentam estar mais agrupadas, em função do efeito da perspectiva, parecendo o total de nuvens ser maior do que o real. Se existir mais de uma camada na hora da observação, somente a porção visível de cada uma deve ser considerada, a fim de se obter um total máximo de 8/8. Nas ocasiões de nevoeiros densos, o estado do céu deve ser retratado como completamente nublado. Na presença de nevoeiro, se o Sol ou as estrelas puderem ser vistas através do nevoeiro e não há nenhuma evidência de nuvem acima dele, o estado de céu deve ser relatado como claro (Vianello e Alves, 1991). Pelo método aplicado, percebe-se que a observação visual realizada por técnicos em superfície, embora amplamente aceita, possui um caráter bastante subjetivo.

2.7 Técnica para Determinar a Fração de Cobertura de Nuvens Através do Emprego de Imagens de Satélite

Diversas técnicas foram publicadas ao longo dos anos para a determinação dos valores da irradiância visível para determinação de céu claro e céu encoberto. O objetivo no desenvolvimento dessas técnicas é estudar as propriedades ópticas das nuvens e sua

influência no balanço radiativo da Terra. As técnicas desenvolvidas podem ser agrupadas da seguinte forma: (a) técnicas que estabelecem valores limiares para a detecção de nuvens e avaliam pixel a pixel da imagem de um ou mais canais espectrais fornecidos pelo satélite; (b) técnicas que analisam propriedades estatísticas das irradiância visível e/ou infravermelha em grupos de píxeis³ ou em parte de imagens.

Wielick e Parker (1988) analisaram seis técnicas para a determinação de cobertura de nuvens com uso de satélites: Limiar da Reflectância, Limiar de Temperatura, Técnica Bi-espectral do *International Satellite Cloud Climatology Project (ISCCP)*, Técnica do Limite Biespectral Híbrido (*Hybrid Bispectral Threshold Method - HBTM*), Coerência Espacial e Contagem Funcional de Caixas (*Functional Box Counting*). As duas primeiras são técnicas de bandas monoespectrais que verificam pixel a pixel se a reflectância (espectro visível) ou temperatura (espectro infravermelho) atingem o limiar que define o pixel como sendo de céu claro ou nublado. As duas técnicas seguintes são bi-espectrais, ou seja, utilizam imagens de bandas no espectro visível e infravermelho para caracterizar o pixel como claro ou nublado. As duas últimas técnicas baseiam-se na variabilidade espacial dentro de um campo de nuvens para determinar a cobertura de nuvens. A técnica da coerência espacial assume que o campo de nuvens é formado por uma única camada e que as nuvens apresentam uma espessura ótica na faixa do infravermelho. A técnica *Functional Box Counting* utiliza a variabilidade espacial apresentada pelo limiar de reflectância para determinar a cobertura de nuvens numa resolução menor do que a observada pelo satélite. Os autores concluíram que a precisão dos resultados obtidos apresenta uma forte dependência em relação à resolução espacial das imagens de satélite.

Martins (2001) desenvolveu um algoritmo que utiliza a razão entre as radiâncias medidas pelo satélite GOES-8 nos canais infravermelho e visível para composição de

³ Definição de pixel – Elemento de imagem. O "vocabulário ortográfico da língua portuguesa" não registra o verbete "pixel". O Dicionário Michaelis (1998) o registra como uma palavra inglesa, assim como o dicionário Houaiss o registra e o seu plural em inglês como "pixels". A palavra não existe oficialmente na língua portuguesa, entretanto devido à dificuldade de encontrarmos um termo equivalente em português tornou-se inevitável seu uso no presente trabalho. Neste caso, usaremos o verbete pixel e seu plural como seguiria a regra geral de paroxítonas terminadas em "el": pixel → píxeis

imagens de céu claro e céu nublado utilizadas na determinação da cobertura de nuvens c que pode ser visto no Apêndice B. A composição da imagem de céu claro é realizada através da identificação dos maiores valores de razão entre a radiância infravermelha (*IR*) e a radiância visível (*VIS*). Para apresentar um alto valor para a razão *IR/VIS*, o pixel deverá apresentar uma temperatura elevada e um albedo planetário reduzido, características associadas à superfície da Terra. Por outro lado, as nuvens apresentam características inversas, baixas temperaturas e elevado albedo quando comparado com a cobertura do solo, na ausência de neve ou gelo.

Todas as técnicas desenvolvidas e propostas na literatura apresentam problemas semelhantes: dificuldade na solução da ocorrência de contaminação por nuvens em um pixel da imagem; a presença de nuvens com diferente emissividade e a dependência que apresentam em relação as propriedades da superfície. Um estudo realizado pelo *ISCCP* concluiu que a avaliação dos algoritmos de nuvens está limitada por dois fatores: (a) as características dos dados de satélite disponíveis, tais como resolução espacial e espectral; (b) a falta de um banco de dados de “verdade terrestre” que permita a comparação entre os resultados dos diversos algoritmos e a avaliação do desempenho de cada um deles (Martins, 2001).

As dificuldades apresentadas para validação das técnicas propostas na literatura através do emprego de imagens de satélites, deixa clara a grande necessidade de resultados de dados contínuos de verdade terrestre sobre cobertura de nuvens. Contudo, como visto no item anterior, a base de dados de verdade terrestre, neste caso, é produto de observações visuais realizadas pelos operadores de estações meteorológicas e aeroportos. Os valores catalogados resultantes da aquisição dos dados em superfície por observadores, podem estar sujeitos a variações que dependem da área coberta pelo observador, da visibilidade no momento da observação e ainda do efeito de perspectiva entre a posição relativa do observador e as nuvens. Além das imprecisões mencionadas, existem fatores que estão relacionados aos diferentes campos de visão do observador na superfície e através do imageador do satélite, a imprecisão no processo de navegação das imagens de satélite, e, finalmente, a diferença de escalas do tempo de observação e

do horário da observação da cobertura de nuvens realizadas visualmente e por varredura do satélite. Até o presente momento, não existe uma maneira simples de comparar os resultados dos algoritmos que utilizam imagens de satélites e valores medidos em superfície, tão pouco existe uma padronização automática para o processo de captura de imagem em superfície e análise das imagens através de programas específicos.

CAPÍTULO 3

SÍTIO DE OBSERVAÇÃO E INSTRUMENTAÇÃO

3.1 Sítio de Observação

A região de Florianópolis foi escolhida para execução do trabalho proposto, devido a existência da estação radiométrica *Baseline Surface Radiation Network (BSRN)*. A estação da *BSRN* é mantida pela Organização Mundial de Meteorologia - *World Meteorological Organization (WMO)*, no âmbito de Programa Mundial de Pesquisa do Clima (*WCRP*) e está a cargo do Centro Mundial de Monitoração da Radiação (*WRMC*) em Zurique na Suíça. O trabalho foi realizado com o amparo do convênio mantido entre o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE, São José dos Campos) e a Universidade Federal de Santa Catarina, através do Laboratório de Energia Solar – LABSOLAR/UFSC que administra e opera a estação. A Figura 3.1 apresenta a localização da *BSRN* do LABSOLAR.



FIGURA 3.1 - Mapa do Brasil com a localização de Florianópolis.

Escolheu-se a plataforma de equipamentos solarimétricos da estação *BSRN* para a instalação do sistema de mapeamento automático de nuvens com o objetivo de produzir

uma base de dados de nebulosidade que pudesse ser utilizada em estudos de transferência radiativa atmosférica.

3.2 Instrumentação Disponível no LABSOLAR

A estação solarimétrica *BSRN* do LABSOLAR é dotada dos seguintes equipamentos: piranômetros para radiação global, piranômetros com anel de sombreamento para radiação difusa, pirheliômetros de campo e absoluto para radiação direta, sistema de aquisição de dados e sistema de coleta de dados meteorológicos suplementares (temperatura do ar e do solo, pressão atmosférica, vento e precipitação). Os dados são coletados, qualificados e arquivados na base de tempo de um minuto.

A Figura 3.2 apresenta uma fotografia da bancada de instrumentos da estação *BSRN* do LABSOLAR, sendo mostrados em primeiro plano o pirheliômetro de cavidade absoluta e o piranômetro com anel de sombreamento.



FIGURA 3.2 - BSRN Florianópolis – SC Bancada de instrumentos de medição solar visto na da foto: (A) Pirheliômetro de cavidade absoluta, visto a direita da foto; (B) Piranômetro com anel de sombreamento logo após o Pirheliômetro.

3.2.1 Instrumentação para Medidas de Radiação Solar

3.2.1.1 Pirheliômetros Eppley NIP

O pirheliômetro é um instrumento para medir a componente direta da radiação solar em incidência normal. O pirheliômetro da Eppley – NIP é um instrumento referência, de operação contínua e automática. O seu elemento sensor básico é um termopar usado como um medidor de fluxo térmico montado em um coletor de calor e com a superfície exposta à radiação incidente pintada de preto (WCRP 1986).

3.2.1.2 Piranômetro Kipp&Zonnen CM11

Os piranômetros são empregados para a medida da radiação total incidente em uma superfície de todo o hemisfério acima do plano de medida. Geralmente estes instrumentos são usados com o sensor de radiação localizado horizontalmente, como no presente trabalho, de tal forma que a radiação incidente é aquela vinda do sol e do céu sobre todo o intervalo de elevação de horizonte a horizonte e sobre um intervalo de azimute de 360° sobre o vetor de zênite – radiação global (WCRP 1986).

Esse tipo de piranômetro possui como elemento sensor uma termo-pilha de centenas de termopares impressos em um substrato de cerâmica. Os domos são feitos de vidro tipo Schott K5, o qual tem um corte para ondas curtas em cerca de $0,31 \mu\text{m}$ (WCRP, 1986).

3.3 O Imageador

O imageador é composto basicamente por uma câmera digital marca Pixera, modelo PCS20232, com sensor do tipo *Charge Coupled Device (CCD)* especificada para a faixa visível do espectro de radiação solar ($0,39$ a $0,77 \mu\text{m}$), fabricada pela empresa americana PIXERA (adquirida pelo INPE em 1998), uma lente grande angular – (*fisheye*) com (183°) de abertura fabricada pela *Nikon*, cedida pelo Laboratório de Conforto Térmico – LABCON, através dos professores Dr. Fernando Oscar Ruttkay Pereira (LABCON/UFSC) e Roberta Vieira Gonçalves de Souza (Universidade Federal de Minas Gerais/Arquitetura).

A Tabela 3.1 apresenta as características da câmera Pixera. Esse tipo de câmera tem seu mercado de aplicação apontado para laboratórios que trabalham com microscopia eletrônica, álbuns fotográficos e filmagens.

TABELA 3.1 Características do equipamento.

Características da câmera Pixera PCS20232	
Sensor de imagem	1/3" CCD
Resolução do sensor	516(H) X 492(V) píxeis
Peso	50g
Volume	100mm X 110mm X 33mm
Consumo	1,2 W(5V , 230mA)
Resposta espectral	Visível (0,39 a 0,77 μm)
Tempo de aquisição	1/10,000 a 1/20 segundos
Imagens	24 Bits RGB

Acessórios

Interface digital (placa)

Cabo de interface de 9m

Bibliotecas de comunicação com a câmera

Lente Fisheye Convert E8 (Nikon)

Essa câmera não foi desenvolvida primordialmente para o fim de observação em ambientes externos com grande variabilidade de temperatura e luminosidade, porém ela atendeu com boa qualidade sua função de captura de imagens externas.

A Figura 3.3 apresenta a configuração do protótipo do sistema automático de captura de imagens, no LABSOLAR junto aos demais equipamentos de medidas da radiação solar no terraço do prédio da engenharia mecânica no Campus da Trindade.



FIGURA 3.3 - Sistema imageador de todo céu.

A Figura 3.4 apresenta um croqui do sistema de coleta automática e uma breve descrição sobre as partes do sistema imageador.

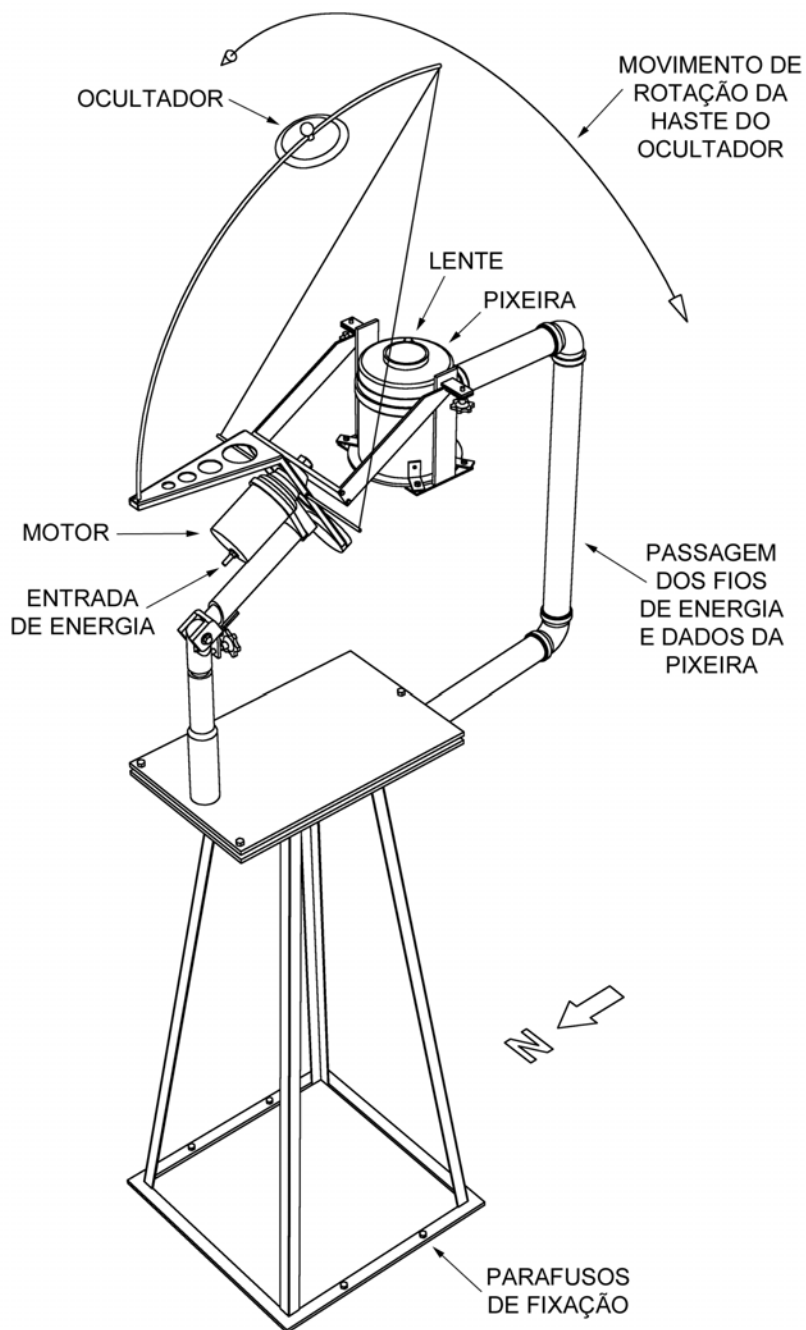


FIGURA 3.4 - Croqui ilustrativo do sistema imageador.

Para sustentar o sistema foi feita uma base em ferro (Figura 3.4), fixada à parte de metal do piso da plataforma (visto ao fundo da Figura 3.5 (B)). O sistema está à altura da plataforma dos radiômetros da estação solarimétrica. Foi adaptado um sombreador com um ocultador solar automático para impedir a incidência da radiação solar sobre o sensor. Para que o ocultador acompanhasse a trajetória do Sol ao longo do dia foi adaptado um motor para fazer a haste caminhar seguindo o deslocamento do Sol. O ajuste do sombreador quanto ao azimute é feito manualmente toda semana.

A Figura 3.5 (A) apresenta a câmera Pixera, (B) o conjunto câmera Pixera e lente grande angular adaptada dentro do compartimento de proteção confeccionado em cloreto de polivinilo (PVC). A lente original que acompanhava a câmera foi retirada e em seu lugar foi adaptada a lente FCE8 da *Nikon*. A adaptação foi possível, pois a câmera possui ajuste de distância focal que pode ser regulado no bocal da objetiva. A adaptação foi feita utilizando-se um anel destinado a compatibilizar o diâmetro interno do bocal da objetiva da câmara com o diâmetro externo da lente da *Nikon*. Como não havia rosca e não se desejava provocar danos em ambas unidades durante a usinagem, o anel foi fixado com cola de silicone. Após a adaptação, o conjunto lente e câmera foram inseridos em um compartimento cilíndrico de proteção confeccionado em PVC, com 155 mm de diâmetro.

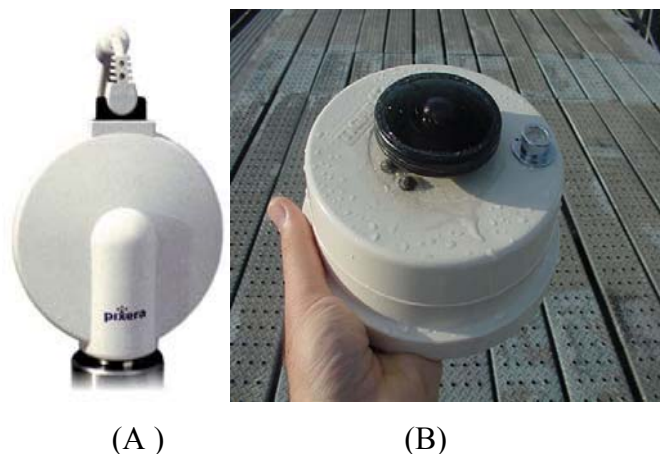


FIGURA 3.5 - (A) Câmera Pixera; (B) Câmera e lente unidas dentro do compartimento de PVC.

A lente adaptada à câmera possui um ângulo de abertura de 183° , esse tipo de lente produz uma aberração nas bordas da imagem. Entretanto, essa aberração não é conhecida, porque o fabricante da lente não forneceu as características específicas do produto. Para conhecer essa aberração e conseqüentemente avaliar sua importância no processo de análise das imagens e a necessidade de possíveis correções das imagens, foi elaborado um experimento destinado a avaliar essa deformação. O experimento foi realizado através da confecção e emprego de uma estrutura translúcida feita com 5 anéis em *Lexan*¹, de 6 mm de espessura sustentado por 4 tirantes de ferro zincado. No interior dessa estrutura foi introduzido um tubo plástico do tipo cristal transparente com 0.40mm de espessura a fim de garantir a firmeza da estrutura. No interior do tubo plástico foi inserido um gabarito em papel com as marcas específicas.

O gabarito de papel foi feito utilizando as medidas do compartimento de PVC externo que envolve o conjunto câmera e lente. No gabarito de papel foram impressos círculos concêntricos, igualmente espaçados variando de 10° a 80° . Esse procedimento pode ser visto na Figura 3.6 (A). O experimento montado pode ser observado na Figura 3.7 . A Figura 3.8 apresenta o resultado do experimento: a imagem coletada com círculos concêntricos obtidos através do experimento do cilindro translúcido.

¹ Lexan é um tipo de “plástico” transparente com alta resistência a grandes impactos e a altas temperaturas (**policarboneto de Lexan**).

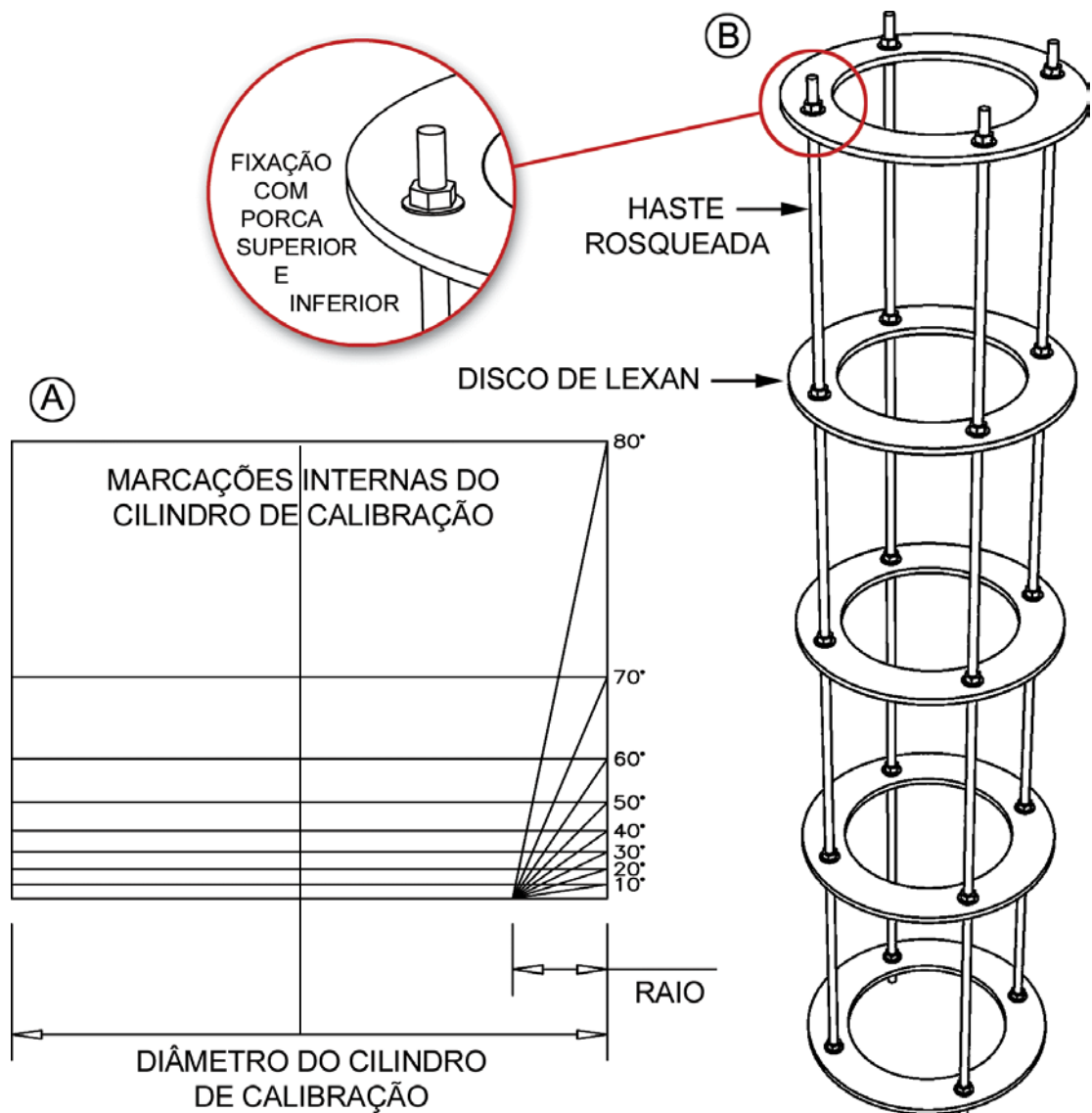


FIGURA 3.6 - (A) Papel com marcas igualmente espaçadas de 10° a 80° . Onde a reta no centro do gabarito é uma linha auxiliar para a aquisição de pontos na imagem; (B) Estrutura de suporte do cilindro translúcido criado para auxiliar na descrição da lente FCE8 da *Nikon*.

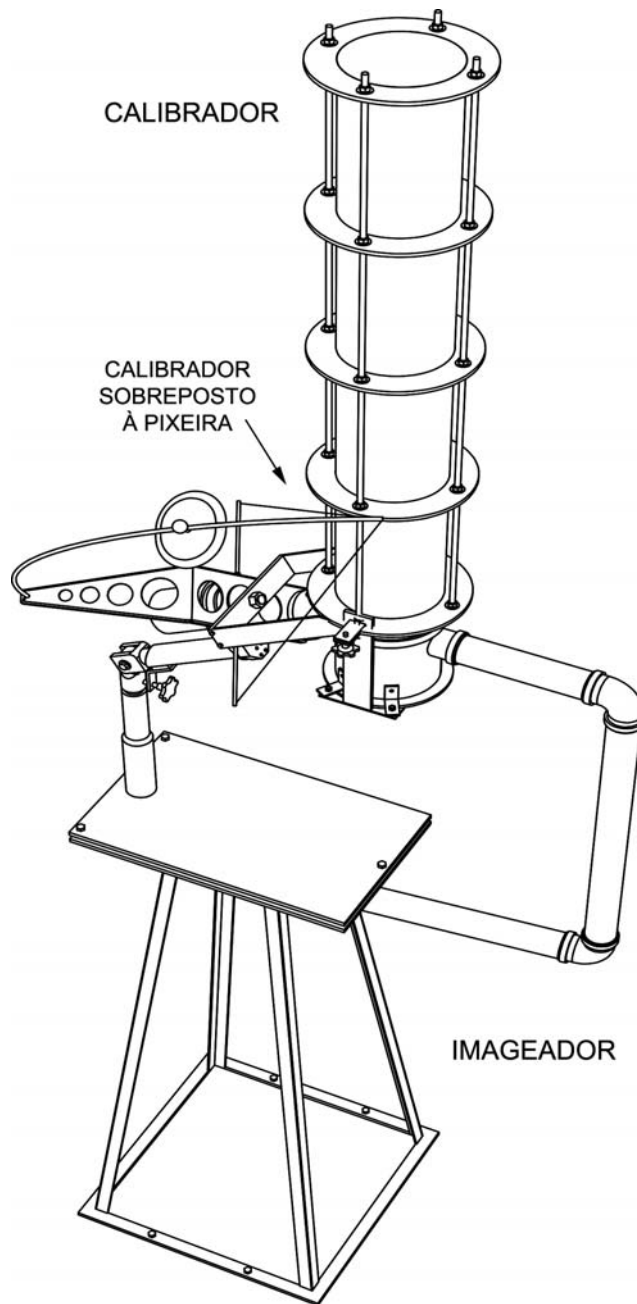


FIGURA 3.7 - Conjunto para aquisição das imagens com as marcas em círculos concêntricos.

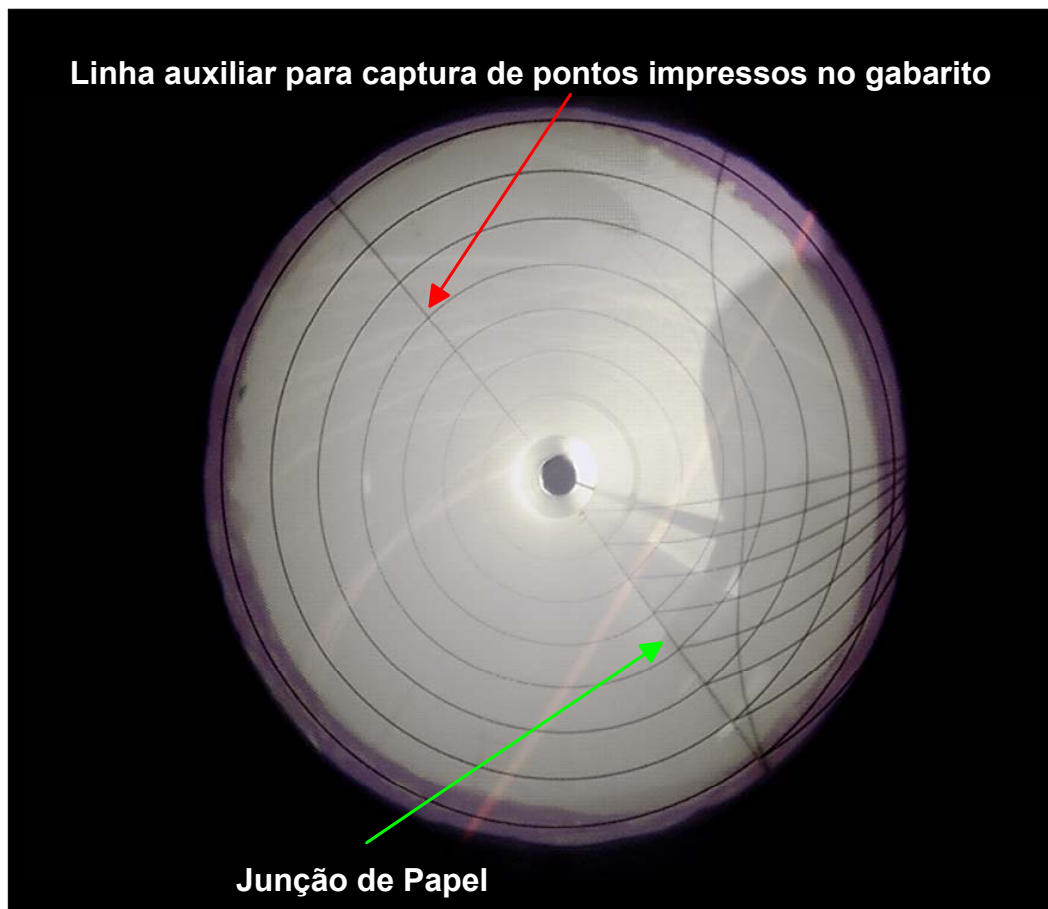


FIGURA 3.8 - Imagem obtida com o conjunto para aquisição das imagens com as marcas em círculos concêntricos distribuídos em intervalos de 10° variando até 80° .

Para avaliar as irregularidades inseridas no experimento de avaliação da aberração da lente, através do gabarito de papel inserido no cilindro translúcido, seguiu-se a um procedimento de marcar o compartimento da câmera com ângulos de 0° , 90° , 180° , 270° , como pode ser visto na Figura 3.9.



FIGURA 3.9 - Marcas externa ao compartimento de PVC.

Com o cilindro também marcado (parte externa dos discos “plásticos”), coincidente com as marcas do compartimento de PVC, foram feitas aquisições de imagens fazendo girar todo o cilindro com o gabarito de papel em seu interior, seguindo o sentido anti-horário de 0° a 360° . Várias imagens foram capturadas com o gabarito movendo-se sobre a lente, acompanhando as marcas do compartimento de PVC. A Figura 3.6 (A) mostra o papel utilizado dentro da estrutura translúcida. Ao unir as extremidades para formar um cilindro de papel que irá produzir nas imagens as marcar concêntricas, aparece uma linha na junção das extremidades do papel (indicada pela seta em verde); aparece também a linha auxiliar para digitalização (seta em vermelho) que pode ser visualizada na Figura 3.8.

A Figura 3.10 mostra o posicionamento da lente no centro do compartimento de PVC (contorno em preto) e as marcas da junção (vermelho) do gabarito de papel inserido no cilindro translúcido. Observa-se que as marcas da junção do papel ficam defasadas de 45° da posição 0° da lente marcada no compartimento de PVC.

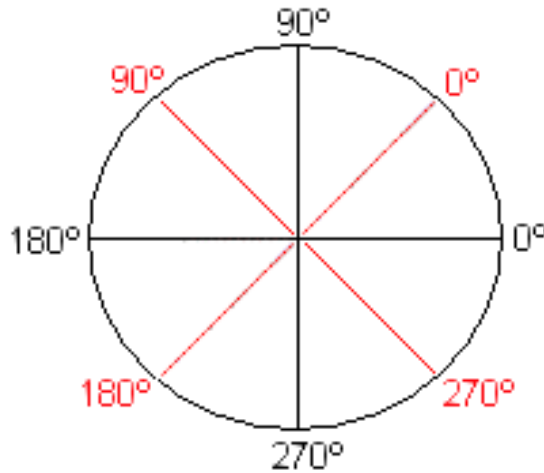


FIGURA 3.10 - Posicionamento da lente em relação ao compartimento de PVC (em preto); junção do gabarito de papel (em vermelho).

A Figura 3.11 apresenta a montagem da Figura 3.8 sobreposta à máscara quadrada (em verde) com pontos contendo os ângulos alinhados às marcas do compartimento de PVC.

É possível observar que a primeira aquisição de imagem com o cilindro, com ponto fixo para a lente coincidente com o zero (0°) do compartimento de PVC, que a junção do gabarito estará posicionada na imagem no ponto referente ao 45°. Quando o gabarito é rotacionado novamente acompanhando as marcas do compartimento de PVC, a junção do gabarito desloca-se para 135°, também pode ser visualizada na Figura 3.11. É possível perceber através da Figura 3.10 (marcas em vermelho) e Figura 3.11 que a junção estará na máscara (em verde) nos seguimentos, 45°, 135°, 225° e 315°, quando o gabarito efetuar uma rotação completa ao longo de todo compartimento em PVC no sentido anti-horário. Esse procedimento foi utilizado para que fossem removidas as irregularidades inseridas pela junção do papel durante o processamento dos pontos. Essas irregularidades causadas pela junção do papel poderiam aumentar as irregularidades na distorção causadas pela própria lente. Foram feitas as aquisições de imagens considerando como ponto fixo para a lente em 90°, 180° e 270°, segundo o

procedimento utilizado para 0° do compartimento de PVC, ou seja rotacionando o gabarito sobre o compartimento.

Após a captura das imagens, iniciou-se o procedimento de digitalização das imagens. O procedimento de digitalização consiste em capturar pontos representativos das distorções da lente através das imagens. Como os círculos no gabarito de papel são igualmente espaçados através das imagens, é possível verificar a nova distribuição dos círculos observados do centro para as extremidades das imagens.

Para iniciar a digitalização foi adotado o seguinte critério, seguindo o caminho seguindo as linhas da máscara em verde vista na Figura 3.11

- 0° a 180° e 180° a 0°
- 45° a 225° e 225° a 45°
- 90° a 270° e 270° a 90°
- 135° a 315° e 315° a 135°

O mesmo procedimento foi feito para as imagens coletadas nas posições em 90° , 180° , 270° (do compartimento de PVC). Com isso tem-se a fixação de um ponto em torno da rotação do gabarito.

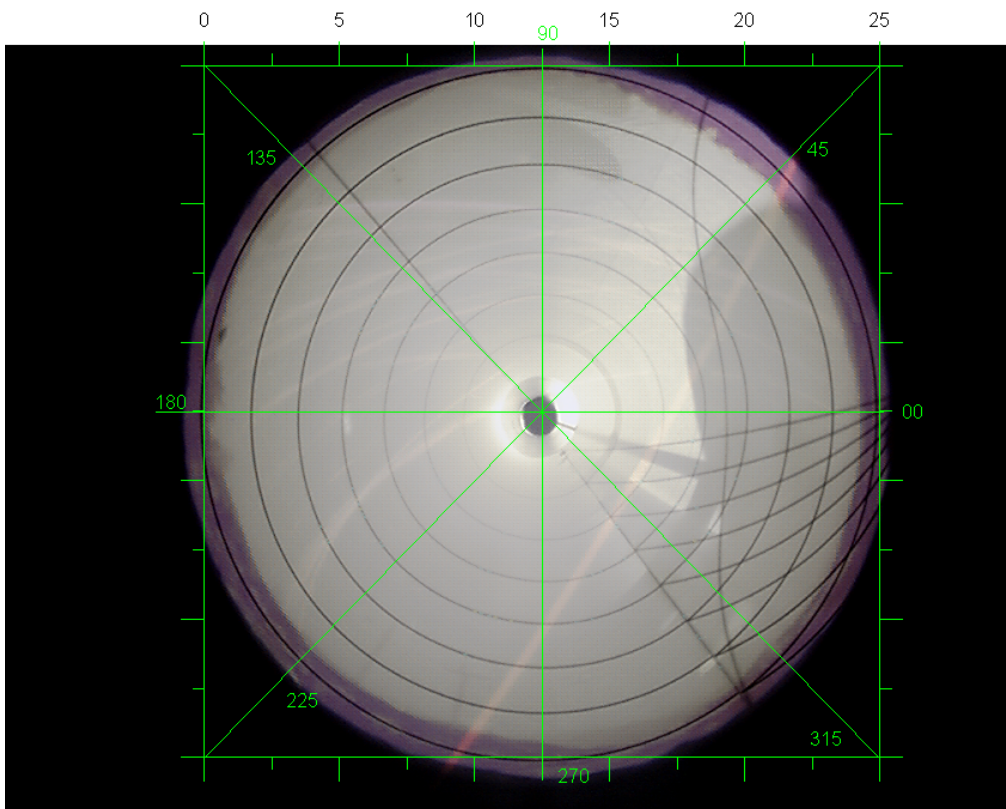


FIGURA 3.11 - Imagem da Figura 3.6 com a máscara para captura de pontos representados pela intersecção da máscara em verde e os círculos.

A digitalização de pontos foi realizada três vezes. Com esse procedimento espera-se aumentar a confiança de que os pontos capturados sejam representativos da intersecção entre as linhas da máscara e os círculos concêntricos. Esses pontos capturados foram inseridos em uma planilha para posterior comparações. O exemplo do procedimento utilizado para organização dos pontos capturados através da digitalização dos seguimentos pode ser visualizado na Tabela 3.2.

TABELA 3.2 Procedimento de digitalização por imagem

	A	B	C	D	E	F	G	H
Digitalizações	0-180	180-0	45- 225	225-45	90-270	270-90	135-315	315-135
1	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos
2	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos
3	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos

14 pontos correspondem aos pontos de intersecção entre os círculos presentes nas imagens e a grade na máscara sobreposta a imagem em verde

A Tabela 3.3 apresenta a seqüência da digitalização para todas as marcas no compartimento de PVC considerando cada ângulo marcado no compartimento como referência para o ponto fixo na lente (Apêndice C – item 4).

Para cada seguimento visto nas colunas A, B, C, D, E, F, G e H, foram criadas as razões

- $0^{\circ}-180^{\circ} / 180^{\circ}-0^{\circ}$
- $45^{\circ}-225^{\circ} / 225^{\circ}-45^{\circ}$
- $90^{\circ}-270^{\circ} / 270^{\circ}-90^{\circ}$
- $135^{\circ}-315^{\circ} / 315^{\circ}-135^{\circ}$

Este procedimento foi repetido usando como referência todos os pontos fixos no compartimento de PVC como pode ser visualizado na Tabela 3.2.

As razões entre os segmentos capturados através da máscara (em verde), representam a relação existente entre os valores reais e distorcidos pela lente, observando do centro para a borda da imagem capturada.

A Figura 3.12 apresenta duas colunas, cada coluna contendo 4 gráficos, que são os resultados do trabalho das três digitalizações. A primeira coluna, com o título LENTE, apresenta a variação da média das razões por segmento, fixando um ponto da lente e rotacionando o gabarito. A segunda coluna, GABARITO, apresenta as variações da linha que se forma devido à junção das extremidades do papel.

Observam-se 14 pontos que foram capturados através da intersecção dos círculos com a máscara sobreposta às imagens (em verde) que foi o roteiro para a digitalização (visto na Figura 3.11). Observa-se pelo exemplo da lente em 0° (no compartimento de PVC) e o gabarito em seu 0° (visto na Figura 3.10), que a digitalização sobre a máscara (em verde) não sofrerá a interferência da junção do papel, pois o mesmo estará em 45° da lente. Quando o gabarito é girado pela segunda vez, a junção estará coincidente com a máscara em verde posicionada de 90° , o que pode ser visualizado no gráfico 90° - 270° apresentando a maior variação em todos os pontos do seguimento de 1 a 14. Para os demais gráficos as maiores ocorrências acontecem nos pontos 12, 13 e 14 correspondentes a borda da lente.

Quanto ao gabarito, observa-se uma aberração mais pronunciada na região de junção do gabarito, quando o mesmo é fixado em 0° e a lente está sendo rotacionada (processo inverso quando é simulado o deslocamento da lente e a fixação do gabarito em pontos fixos), ou seja, na digitalização pela máscara correspondente a 45° - 225° . Todavia, tanto para a lente como para o gabarito as irregularidades não chegam a 1,3 %.

Através do experimento realizado para avaliação da lente, foi possível concluir que para as três digitalizações houve concordância nas medidas sobre a lente, mostrando que as variações apresentadas pela lente FCE8 são pequenas, não justificando um tratamento corretivo das imagens.

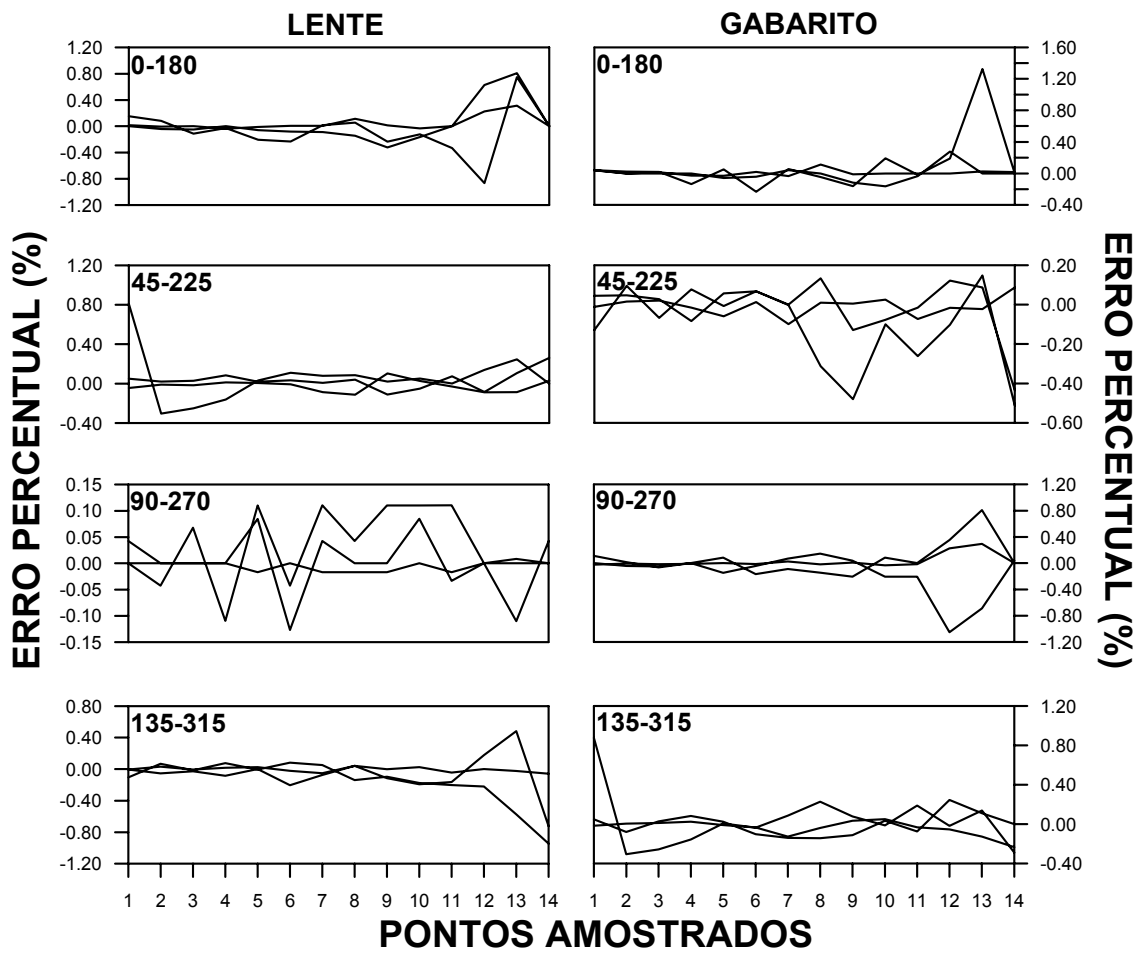


FIGURA 3.12 - Valores obtidos através da digitalização.

A Figura 3.13 mostra o ajuste polinomial para a lente e para o gabarito para cada uma das opções de digitalização.

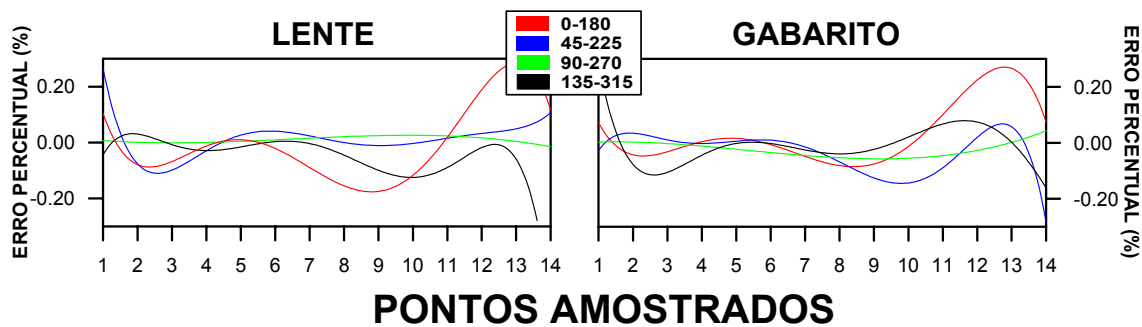


FIGURA 3.13 - Ajuste polinomial para Lente e para o Gabarito

Com o objetivo de avaliar a interferência das irregularidades da lente sobre os píxeis da imagem, foi selecionado o círculo mais externo de uma imagem genérica, a simulação da separação dos círculos podendo ser visualizada na Figura 3.14 junto à borda da imagem. Esse círculo foi dividido em 14 partes, para cada uma das partes foram calculadas as médias da saturação dos píxeis.

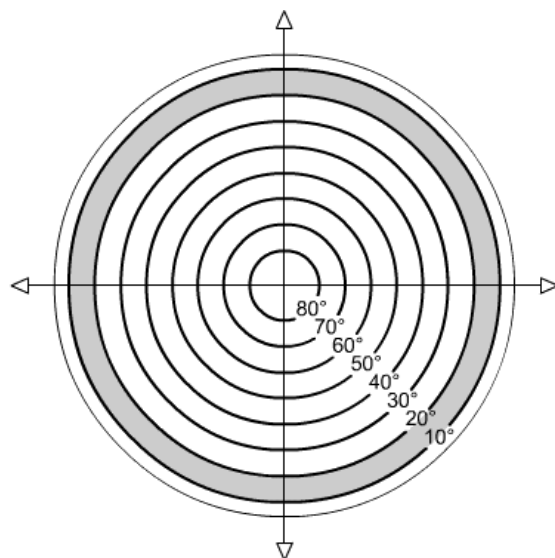


FIGURA 3.14 - Representação do círculo externo utilizado para avaliar a influência da irregularidade causada pela distorção da lente na borda da imagem.

O maior valor de irregularidade de 1,3% foi multiplicado pelo valor da média da saturação dos pixels das 14 partes do círculo mais externo da imagem genérica. O resultado pode ser visualizado na Figura 3.15.

A Figura 3.15 apresenta no eixo x 14 pontos amostrais, em y à esquerda as médias da saturação dos pixels para as 14 partes do círculo mais externo da imagem genérica, observada como a linha cheia em preto. Em y a direita é possível visualizar através da linha tracejada vermelha, a interferência da irregularidade causada pela lente nas médias da saturação dos pixels do círculo mais externo da imagem genérica, observando-se a ocorrência de variação entre 0,5 a 0,7 para valor de saturação existente para o círculo mais externo. Para a região mais crítica da imagem onde os valores de irregularidades vistos através da distorção da lente são mais pronunciados, o valor absoluto de saturação será em torno de 0,5 a 0,7 de saturação, não chegando a uma unidade de saturação.

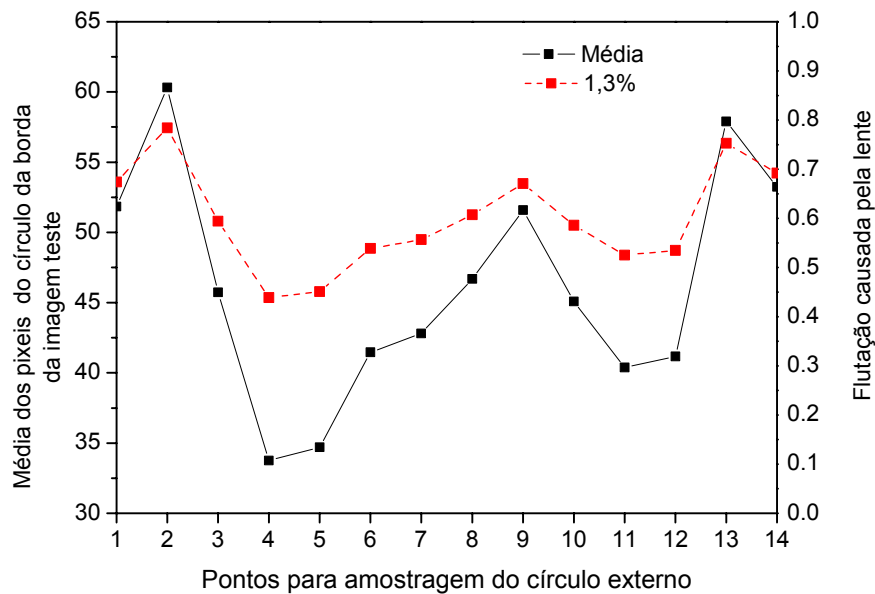


FIGURA 3.15 - Média da saturação no círculo mais externo da imagem genérica

3.4 Automatização do Sistema de Captura das Imagens

A câmera Pixera foi adquirida com um pacote de programas fechado para manipulação e transferência das imagens. Entretanto, o acionamento da câmera era feito manualmente. Para automatizar a captura, o primeiro passo foi estabelecer a comunicação com a câmera através da interface e fazê-la reconhecer a ordem enviada pelo computador para captura automática da imagem. O sistema é acionado através do programa desenvolvido neste trabalho, a partir das bibliotecas de controle da câmera enviadas pelo fabricante. O programa utiliza uma interface gráfica, básica e simples, para facilitar a sua operação.

A Figura 3.16 apresenta a interface desenvolvida para captura das imagens, mostrando as opções de entrada da hora inicial e hora final. Os campos são utilizados para instruir ao programa o intervalo de operação da câmera. Para que a imagem seja capturada, é necessário que a opção **Ativar** seja selecionada. Essa opção foi criada para desabilitar

temporariamente a câmera, se necessário, sem que seja obrigatório o fechamento do programa. Com esse procedimento a câmera pode ser acionada manualmente, quando necessário, pelo *software* original da Pixera.

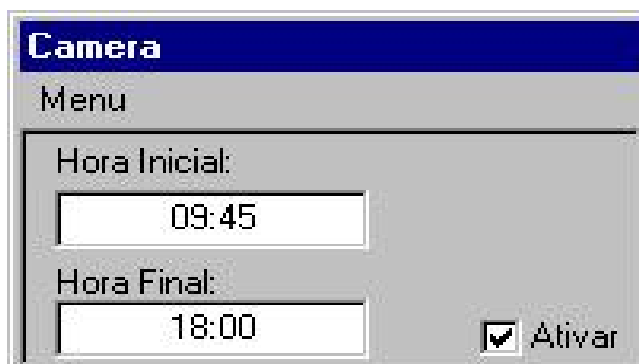


FIGURA 3.16 - Interface gráfica para aquisição das imagens.

Foi utilizada uma função da linguagem C++ que captura a hora atual do relógio do sistema operacional. A hora é obtida já de forma separada, hora na variável hora e minuto na variável minuto. Com os dados hora e minuto, é feita a comparação da hora atual para saber se está no intervalo determinado pelo operador. Se o resultado do teste for verdadeiro então o programa testa os minutos para saber se coincide com um dos intervalos: 00, 15, 30 ou 45 minutos. Caso esse segundo teste seja verdadeiro, é acionado um procedimento que irá inicializar a captura da imagem. A atualização das variáveis hora e minuto e as comparações são feitas durante todos os minutos do intervalo determinado pelo operador como hora inicial e hora final.

Uma vez chamado o procedimento para inicializar a aquisição de imagens, são também atualizadas as variáveis dia, mês e ano. Essas variáveis serão utilizadas quando a imagem for gravada. O nome das imagens tem o seguinte padrão: “mesdiahoraminano.jpeg”. Com esse procedimento, as imagens são automaticamente ordenadas.

Todas as propriedades de *default* da câmera foram mantidas funcionando de maneira semelhante à do *software* original.

Algumas variáveis da biblioteca de comunicação com a câmera fornecidas pelo fabricante foram alteradas para um maior controle sobre as características das imagens, como por exemplo, foi selecionado o tamanho da imagem. Porém algumas das suas variáveis foram mantidas no padrão do *software* original (*default*), como por exemplo, a função “auto brilho”, que fixa o brilho e o contraste adequado para cada ambiente automaticamente. O ideal seria trabalhar com as imagens capturadas com o brilho e contraste fixos. Entretanto, os fornecedores da câmera não cederam as informações técnicas específicas sobre o algoritmo utilizado para ajustar a captura de imagens em função da luz disponível na hora da aquisição. Isso acabou por interferir no processamento das imagens, tornando necessária a criação de vários limiares de corte para avaliação das imagens coletadas ao longo do dia. A descrição dos limiares será apresentado no Capítulo 4.

CAPITULO 4

METODOLOGIA DE AQUISIÇÃO E PROCESSAMENTO DAS IMAGENS

4. Introdução

4.1 Imagens Digitais

As imagens digitais possuem uma natureza discreta contida em um arranjo de elementos em forma de malha. Cada ponto dessa malha tem sua localização definida em um sistema de coordenadas do tipo “linha e coluna”, representado por X e Y . O nome dado ao conteúdo de cada ponto da malha é pixel. Cada ponto possui um valor numérico que indica o nível de cinza, que varia do preto ao branco; esse nível de cinza é conhecido como número digital do Inglês *digital number (DN)*. O DN de um pixel corresponde à média da energia radiante refletida pelos diferentes materiais presente nesse pixel. A informação contida em cada pixel através de seu DN é utilizada para o reconhecimento dos materiais nele presentes. Ao processo de reconhecimento dos materiais ou objetos em uma imagem dá-se o nome de reconhecimento de padrões, utilizado para a classificação e descrição de imagens (Richard, 1995).

4.2 Aquisição de Imagens

A aquisição de imagens é feita no sistema de cores vermelho, verde e azul (RGB), sendo as imagens posteriormente transformadas para o espaço de atributos Intensidade (*Intensity*), Matiz(*Hue*), Saturação(*Saturation*), (Apêndice D). A principal característica desta metodologia está baseada na diferença existente entre os níveis de saturação do céu claro e das nuvens, que podem ser observados na Figura 4.1 através da árvore de distância entre as classes presentes nas imagens.

As nuvens apresentam alta reflectância e tons pastéis, o que revela a mistura de vários comprimentos de onda da luz visível. Por outro lado, o céu apresenta uma alta saturação na região visível do espectro, revelando um padrão menos variado de comprimento de onda na sua composição – uma cor “mais pura”.

O algoritmo para a análise das imagens utiliza a informação de saturação para analisar os píxeis que apresentam contaminação por nuvem segundo a metodologia proposta por Souza(1999). A metodologia apresentada para o desenvolvimento do sistema automático de cobertura de nuvens no presente trabalho propõe:

- Projeto de montagem e teste do protótipo do sistema de cobertura de nuvens em laboratório.
- O *software* para automatização da aquisição de imagens.
- Análise das imagens coletadas com o sistema automático, através da nova versão do programa classificador: implementação de um banco de imagens, filtros e gráficos diários da cobertura de nuvens.
- Comparação entre os dados de radiação solar medidos em superfície e valores de fração de nuvens presentes nas imagens.

A Figura 4.1 apresenta uma imagem original coletada utilizando-se o sistema automático no referencial *RGB* no formato *Joint Photographic Expert Group (JPEG)*, com resolução de 600X600 píxeis e o mapa de cores, gerado através da resposta do algoritmo. No mapa de cores gerado através da classificação, observa-se, em azul, a representação para céu claro. Em cinza, os píxeis contaminados por nuvens, em amarelo as regiões na imagem classificadas pelo algoritmo como indeterminação (região de transição). Observa-se ainda que, na região central da imagem em *RGB*, próximo ao disco de sombreamento, as nuvens apresentam um alto brilho. Esse efeito é perceptível no mapa de cores gerado através do algoritmo, quando se percebem no centro do mapa regiões escuras devido aos baixos valores de saturação da ordem de 0, comparável apenas às bordas da imagem.

4.3 Classificação das Imagens

A classificação é o processo de extração de informação em imagens para reconhecimento de padrões e objetos. Essa distinção e identificação tornam-se possíveis

devido ao fato dos materiais superficiais (objetos) terem comportamentos específicos ao longo do espectro eletromagnético, comportamentos esses que podem, ser usados para identificá-los.

A área de reconhecimento de padrões não está restrita à classificação e descrição de imagens, mas a maior parte do trabalho desenvolvido tem-se voltado para aplicações pictóricas. Assim sendo, tem havido tentativas de automatizar as tarefas de leitura de caracteres alfanuméricos e de análise de imagens aeroespaciais, biomédicas, meteorológicas, entre outras. Destacam-se também aplicações não-pictóricas como reconhecimento de voz, análise de sinais de SONAR, eletrocardiograma, eletroencefalograma e em sismologia, assim como dados obtidos em antropologia ou zoologia (Mascaranhas e Velasco,1984).

O reconhecimento de padrões tem-se desenvolvido, em geral, em torno de duas linhas de abordagem:

- a) classificação de padrões, onde o objetivo é atribuir um objeto a uma das possíveis classes em imagens, como por exemplo identificar nuvens em imagens. A ferramenta básica é a teoria da decisão estatística;

- b) reconhecimento sintático (ou estrutural) de padrões, onde se procura uma descrição de objetos em termos de relações entre suas partes, utilizando principalmente a teoria de linguagens formais.

O princípio da classificação de padrões implica primeiramente na determinação do espaço de atributos que define a base do trabalho a ser realizado. A seguir devem ser geradas instruções que permitam a um operador ou a um algoritmo computacional identificar essas classes em novas cenas apresentadas segundo seus atributos espectrais².

² O termo atributo espectral é a denominação empregada para o conjunto de características espectrais de um pixel. Dispondo-se inicialmente de um conjunto de medidas que são as amostras coletadas pelo sistema de aquisição, os dados obtidos são representados por um vetor de medidas no espaço com uma determinada dimensão, denominado espaços de atributos.

Para a realização da classificação podem ser empregados programas que realizam a classificação de imagens utilizando a análise “pixel a pixel” ou classificadores por regiões (automáticos) e ainda a tradicional inspeção visual em imagens.

Para a realização do presente trabalho será utilizada a análise pixel a pixel das imagens, tomando a informação da saturação de cada pixel para encontrar regiões semelhantes. A técnica de análise pixel a pixel será utilizada dentro do classificador paralelepípedo, com treinamento supervisionado utilizando a média das classes para criação dos limiares que representem as classes presentes nas imagens.

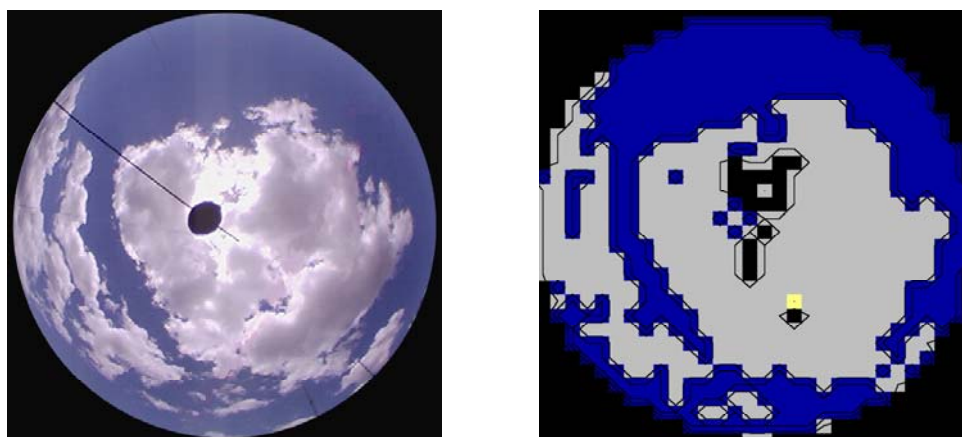


FIGURA 4.1 - Em *RGB* a imagem original coletada em 04/02/02 14h: 27min hora local (esquerda) e a resposta fornecida pelo algoritmo para a imagem no espaço *IHS* (direita). Em azul região de céu claro, em cinza região coberta por nuvens, em amarela região onde o algoritmo reconhece como indeterminada.

Em paralelo à aquisição de imagens, ocorre a coleta de dados de radiação solar global, difusa e direta em intervalos de integração de 1 minuto. As informações sobre a radiação solar são usadas para a obtenção dos parâmetros de nebulosidade K_t (razão entre o total diário da radiação global incidente na superfície e o total diário da radiação global no topo da atmosfera) e K_d (razão entre o total diário da radiação difusa incidente na superfície e o total de radiação global no topo da atmosfera) com o emprego de piranômetros CM11(SCI-TEC) para radiação global e difusa (descritos no Capítulo 2).

4.3.1 Classificador Paralelepípedo

O classificador paralelepípedo é uma generalização para o espaço n-dimensional do classificador por limiarização (*Thresholding*). Neste classificador supervisionado, cada classe é representada por um conjunto de limiares, um inferior e um superior, para cada atributo a ser usado na classificação. Assim, no caso de um espaço de atributos unidimensional, a partição do espaço de atributos associada a uma classe será um segmento de reta. No espaço bidimensional, a partição será um retângulo e no espaço tridimensional a partição será um paralelepípedo. Desta forma, um pixel é classificado como pertencente à uma determinada classe se os valores de seus atributos estiverem dentro de intervalos definidos pelos limiares inferior e superior de cada classe (Richard, 1995, Souza, 1999).

A Figura 4.2 mostra o exemplo de classificação usando o método supervisionado conhecido como paralelepípedo. Pode-se observar a separação de duas classes através das elipses representantes das classes de píxeis do tipo 1 e 2 dentro do espaço de atributos. Observam-se ainda regiões em formato de retângulos pontilhados delimitando as elipses, criando uma região que engloba tanto os píxeis que se encontram dentro das elipses bem como em sua vizinhança. Como consequência, uma área de intercessão entre as figuras retangulares acaba por surgir, a qual recebe o nome de região de transição.

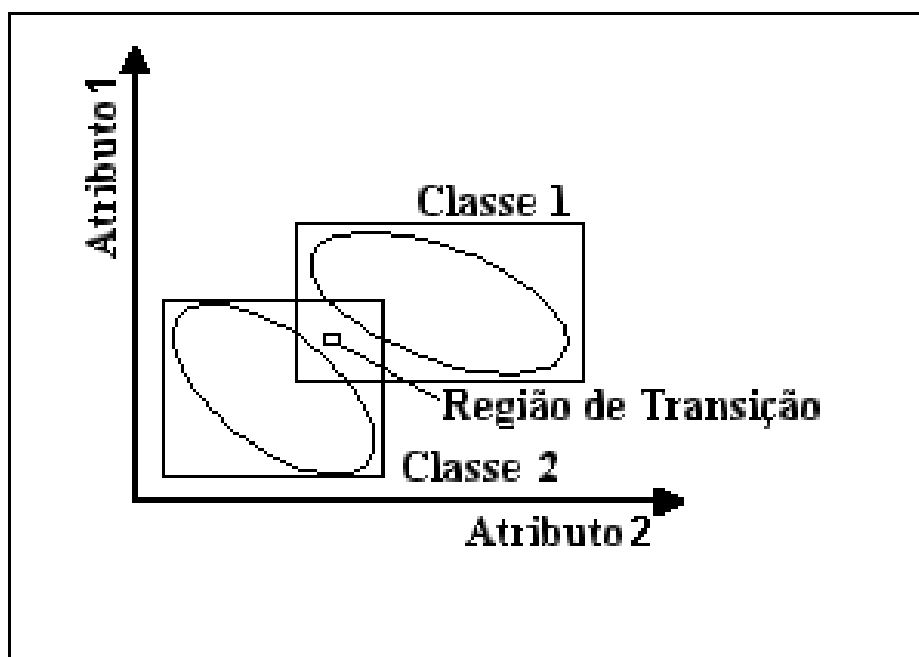


FIGURA 4.2 - Classificação Paralelepípedo exibindo a região de transição

FONTE: Modificada de Richards (1995).

A região de transição é caracterizada por uma interface entre duas possíveis classes, os *DNs* podendo estar associados a uma das classes presentes nas imagens. Quando isso ocorre, uma possível solução é avaliar a distância mínima entre os píxeis cujos *DNs* representem a transição e a média representante para cada classe. Os píxeis da transição serão associados à classe que tiver a menor distância entre os píxeis de uma das classes presentes na cena de observação. Souza Echer et al. (2004) apresenta uma avaliação realizada com base em 29 imagens coletadas com uma *CCD* com lente de 38° de abertura, que passaram pela inspeção visual de 2 observadores, um do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais em São José dos Campos (observador - O1) e outro do Instituto Nacional de Meteorologia em Brasília (observador - O2). As mesmas imagens foram analisadas pelo programa desenvolvido pelos autores para classificação de nuvens – (P). A Figura 4.3 apresenta uma árvore com o resultado do agrupamento utilizando a distância Euclidiana entre as classes: região representante de céu claro (primeiro grupo da direita para a esquerda), região de céu indeterminado (segundo grupo junto ao ramo de céu claro) e o último agrupamento é representante de céu encoberto por nuvens.

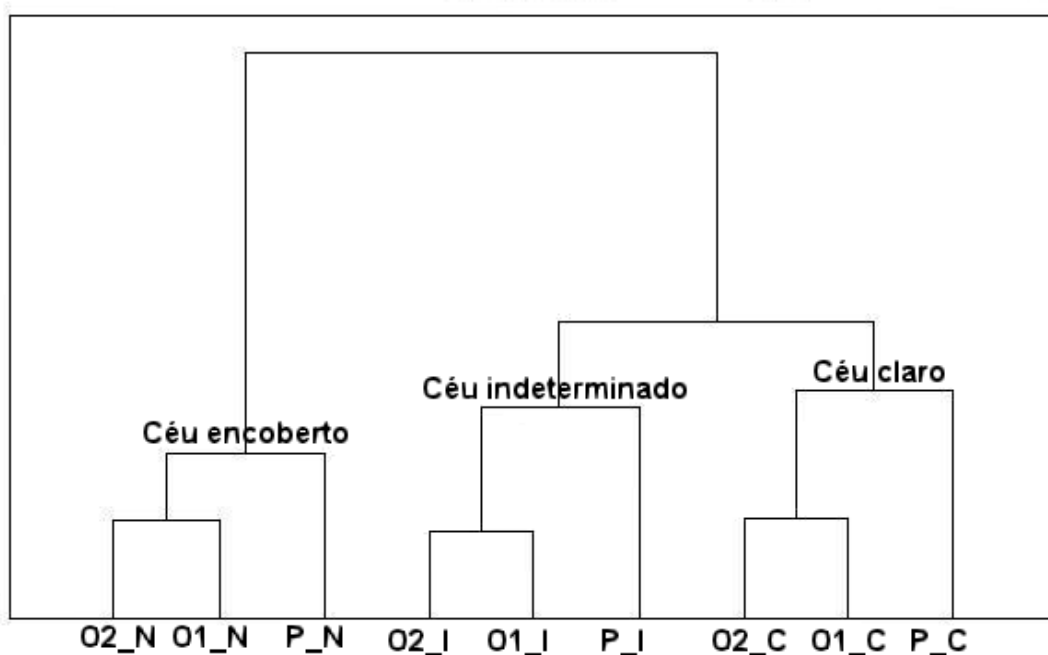


FIGURA 4.3 - Árvore com 9 variáveis representando a distância Euclidiana entre as classes presentes nas imagens.

As nove variáveis apresentadas na Figura 4.2 da esquerda para a direita são respectivamente : O1_N, O2_N e P_N , resposta do observador 1, 2 e do programa para agrupamentos de classe de nuvens nas 29 imagens. Em seguida observam-se O1_I, O2_I e P_I, resultados de céu indeterminado encontrado por todos os avaliadores e por último, observa-se a resposta para o céu claro, dada por O1_C, O2_C e P_C. Através da árvore fica visível a separação dos conjuntos de céu claro e céu contaminado por nuvens, estando ambos em dois agrupamentos distintos no processo de identificação. É possível ainda perceber que a resposta para o céu indeterminado está mais próxima da classe chamada céu claro do que da classe de céu encoberto.

A informação sobre a proximidade das classes de céu indeterminado e de céu claro torna-se importante quando for necessário descrever o treinamento das classes através do programa classificador.

Na fase de treinamento do classificador por paralelepípedo, o usuário usa a estatística das áreas de treinamento para definir o limiar superior e inferior de cada atributo para cada classe. Isto pode ser feito de duas formas:

- a) Tomando-se os valores de mínimo e máximo de cada atributo lido na área de treinamento, ou seja, para um determinado atributo:

Limite inferior = $x_1 / x_1 \leq y$, $\forall y \in$ área de treinamento, $x_1 \in$ área de treinamento.

Limite superior = $x_2 / x_2 \geq y$, $\forall y \in$ área de treinamento, $x_2 \in$ área de treinamento.

- b) Usando a média e variância dos valores do atributo da área de treinamento.

Limite inferior = $\mu_i - n\sigma_i$

Limite superior = $\mu_i + n\sigma_i$

Onde μ_i representa a média do grupo, σ_i o desvio padrão para o grupo e n um múltiplo para o desvio padrão

Para o presente trabalho foi utilizado o valor de média de saturação (μ_i)¹ das imagens, para caracterização dos limiares de interesse representantes de céu claro e de céu contaminado por nuvens. Para o cálculo das médias de saturação das imagens foram utilizadas 10 imagens, para cada um dos três intervalos do dia 9:00 as 12:00; 12:00 as 15:00 e das 17:00 as 18:00, para cada mês do período de imagens utilizadas, ou seja de março de 2002 a fevereiro de 2003.

Para a instrução do programa que classificará as imagens foram usados os valores de mínimo e máximo para o valor da média mensal da saturação que representassem o cenário de céu encoberto e o mínimo da média de saturação para céu claro. Sendo assim os limiares foram definidos como:

¹ O valor de média de saturação (μ_i) foi descrito para cada grupo utilizando imagens de todo o céu (178°).

- Limite inferior para ser classificado como nuvens = valor da saturação do pixel $\geq \mu_{mínima}$ para a classe ser nuvens, pixel \in ao grupo denominado nuvens²
- Limite superior para ser classificado como nuvens = valor da saturação do pixel $\leq \mu_{máxima}$ para ser classe de nuvens, pixel \in ao grupo denominado nuvens
- Limite para ser classificado como céu indeterminado = valor da saturação do pixel $> \mu_{máxima}$ para ser classe de nuvens e valor da saturação do pixel $< \mu_{mínima}$ para a classe de céu claro
- Limite inferior para ser classificado como céu claro = valor da saturação do pixel $\geq \mu_{mínima}$ para a classe de céu claro, pixel \in ao grupo denominado céu claro.

Para a realização da classificação, o primeiro passo é o treinamento do programa que irá realizar a classificação, ou seja, o reconhecimento pelo programa classificador do tipo de cobertura de céu presentes na imagem, utilizando para isso os limiares descritos para a classificação.

As técnicas de classificação utilizam algoritmos de agrupamento de dados aplicados sobre a imagem que, por sua vez, são caracterizados por seus atributos estatísticos como, por exemplo, a média. Existem essencialmente duas formas de treinamento do programa que fará a classificação, o treinamento supervisionado e o treinamento não-supervisionado.

No treinamento supervisionado o usuário seleciona áreas representativas de cada classe na imagem e os parâmetros do classificador são calculados: média, desvio padrão, máximos e mínimos. Para o presente trabalho foram utilizadas imagens de todo o céu como representantes das classes céu e nuvens. Todas as imagens de treinamento para uma determinada classe constituem o chamado conjunto de treinamento para aquela classe. Os *DNs* dos píxeis do conjunto de treinamento em cada classe, são comparados

² Surge o valor mínimo para média de saturação de nuvens pois na imagem de todo o céu ocorre à borda que pode variar de zeros a valores de píxeis menores que 10.

com os *DNs* de cada pixel da imagem a ser classificada, para decidir à qual classe estes pertencem.

4.4 Processamento das Imagens

4.4.1 Pré-processamento

Chama-se pré-processamento a etapa de separação das imagens, após a triagem feita através da inspeção visual. Durante a etapa do pré-processamento, foi realizada uma separação das imagens representantes das classes de céu claro e céu encoberto, por intervalos de horas do dia e meses do ano. Esse procedimento foi utilizado tendo em vista não ser suficiente separar um único grupo de imagens para treinamento do programa classificador, pois seria impossível encontrar um único grupo que representasse valores de saturação que correspondessem ao período de um ano inteiro. Isso ocorre devido às variações na órbita da Terra ao longo do ano, alterando a intensidade da radiação solar recebida pelo planeta. Conseqüentemente, a luz solar dispersa da atmosfera será alterada e também os valores capturados na imagem. Com isso fez-se necessária à criação de padrões de céu acompanhando a sazonalidade. Um fato bastante interessante de se observar é a presença dos particulados em suspensão, principalmente em períodos de estiagem, quando sua contribuição para espalhamento da luz solar é bastante pronunciada. A alteração do padrão no céu, se não for bem definida nesta época do ano, pode causar dúvidas durante o processo de classificação realizado pelo programa classificador.

Um outro fator que deve ser levado em consideração é de que o sensor da *CCD* está exposto às condições ambientais e com o passar do tempo pode ocorrer uma variação na qualidade da imagem, devido à degradação do próprio material foto-sensor (*CCD*).

A Figura 4.4 apresenta duas imagens coletadas com o mesmo sistema; a primeira imagem (A) foi coletada no dia 8 de janeiro de 2002 e a segunda (B) e no dia 15 de janeiro de 2003. A câmera *CCD* utilizada no protótipo do sistema automático foi adquirida em 1998, entrando em uso no início de 1999. Devido à degradação do sensor da *CCD*, as imagens também sofreram alterações. Isso pode ser visto através nas imagens da Figura 4.4 (A) e (B). A Figura 4.4 (B) apresenta além da alteração na cor da

imagem, um risco de cor rosa causado pela exposição do sensor à radiação solar direta durante alguns testes para captura de imagens e adaptação do sombreador no final de janeiro de 2002. Em um dado momento, em virtude do agravamento da degradação do sistema óptico, será necessário substituir a câmera.

O sistema observado na Figura 4.4 requer amostragens periódicas, para redefinição dos valores de saturação para céu claro e regiões contaminadas por nuvens. Uma forma de atenuar a degradação física do sensor é utilizar filtros que diminuam a quantidade de luz que incide sobre o sensor.

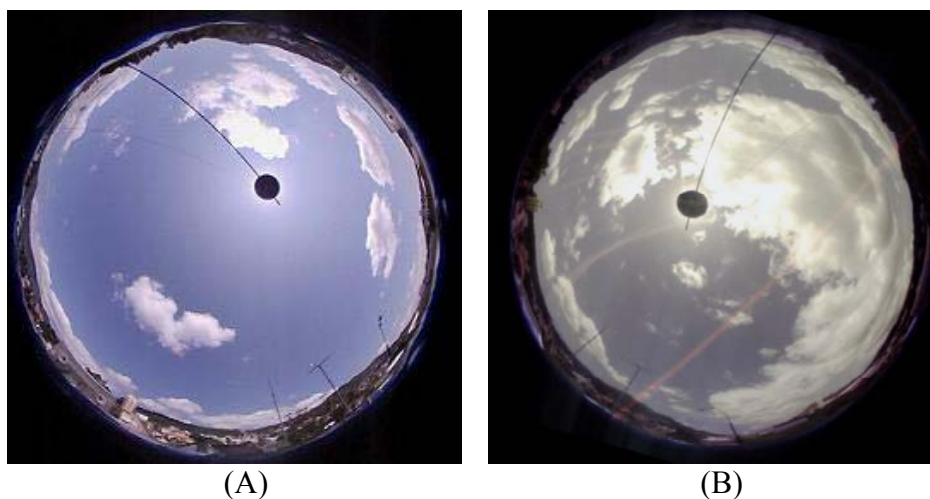


FIGURA 4.4 - Exemplo da degradação na qualidade das imagens coletadas com o sistema imageador empregado neste trabalho.

4.4.2 Primeira etapa do Processamento das Imagens

A lente utilizada no protótipo do sistema automático possui a abertura de 183°. Observa-se na Figura 4.4 a presença da obstrução do campus da UFSC, com base em um levantamento feito pelo Laboratório de Conforto Térmico da UFSC-LABCON (contato pessoal, Roberta Gonçalves). A região da imagem influenciada pelos obstáculos seria da ordem de 5° de elevação que pode ser visualizado na Figura 4.5 demarcado como a linha em amarelo na imagem.

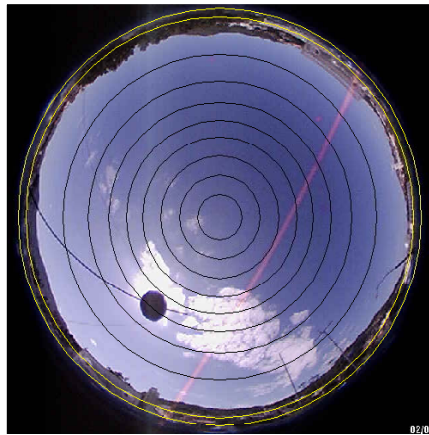


FIGURA 4.5 - Visão do horizonte obstruído no Campus da UFSC.

As imagens originais receberam uma máscara (de zeros, observada em preto na Figura 4.6 cujo objetivo foi eliminar a contaminação dos obstáculos). Esse procedimento foi utilizado para que a imagem tivesse o mínimo de objetos indesejados para iniciar o reconhecimento na imagem. A máscara foi aplicada sobre as imagens através de um programa também desenvolvido durante o presente trabalho. A Figura 4.6 apresenta uma imagem submetida ao processo de minimização dos obstáculos de borda.



FIGURA 4.6 - Imagem com os obstáculos de borda minimizados: 08/01/2002.

Após a aplicação da máscara sobre as imagens, foi executada a rotina para a transformação de espaço de *RGB* para *IHS* (Apêndice D). O algoritmo de transformação de *RGB* para *IHS* descrito por Souza (1999) foi reescrito para otimização do tempo de execução do programa. As imagens transformadas são guardadas como arquivos ASCII. Os arquivos gerados após a transformação são matrizes de mesmo tamanho que as imagens originais (640x640) contendo os valores da saturação, matiz de cor e intensidade. Para cada imagem transformada do *RGB* para o *IHS*, são gerados três arquivos da imagem, um contendo os valores de saturação, um contendo os valores de intensidade e outro contendo os valores do matiz de cor.

4.4.3 Segunda Etapa do Processamento das Imagens

Após a execução da primeira etapa do processamento de todas as imagens do período de março de 2002 a fevereiro de 2003, uma segunda etapa é iniciada para calcular a média da saturação para cada arquivo (imagem) existente no diretório.

A Figura 4.7 apresenta a caixa de diálogo para manipulação dos arquivos ASCII e a Figura 4.8 a seleção dos arquivos ASCII contendo a saturação das imagens para o cálculo das médias. A interface para cálculo das médias apresenta a opção **Arquivo**. Nesta opção pode ser selecionado o mês, seguido a seleção dia para auxiliar ao usuário na escolha dos arquivos ASCII que serão usados para a descrição dos valores de limiares. Pode-se observar, na Figura 4.7, os campos linha e colunas. Esses dois campos servem para conferir se a imagem lida do arquivo confere em dimensão com a descrição feita durante a geração das médias de saturação das imagens através de seus arquivos ASCII. A interface proposta, pode ser utilizada independente do programa classificador. Durante essa fase do trabalho ela foi utilizada isoladamente, entretanto no corpo geral do programa classificador de imagens essa opção foi incluída no campo **Ferramentas**.

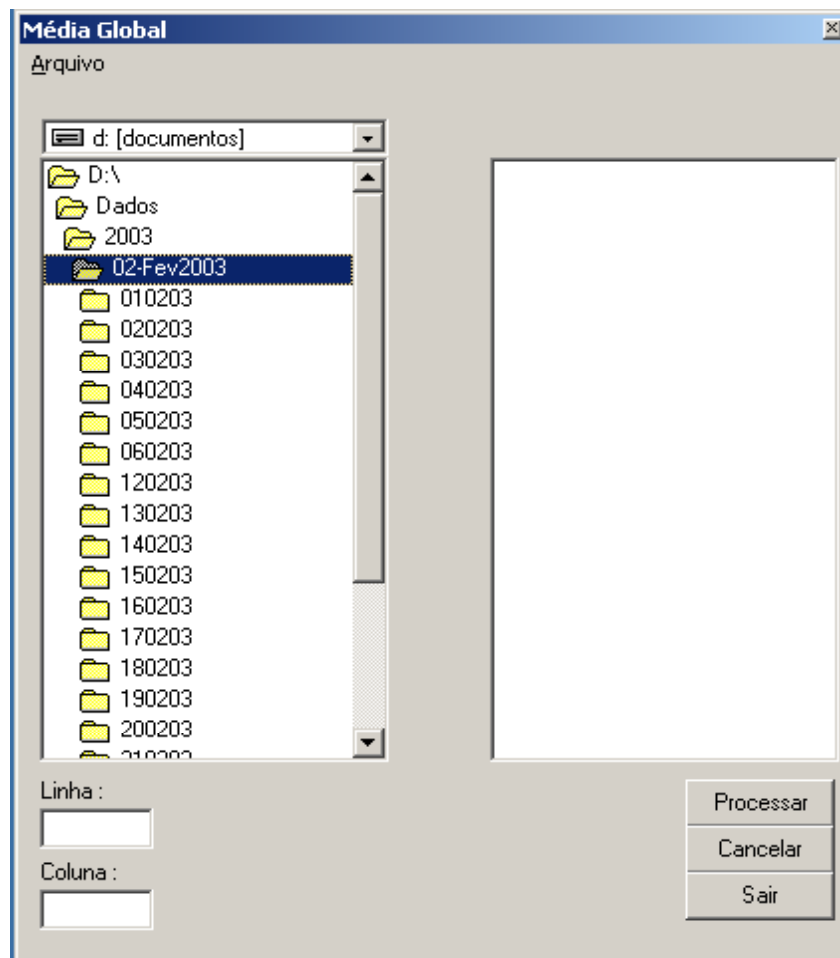


FIGURA 4.7 - Caixa de diálogo para seleção do mês e dia.

Observa-se na Figura 4.8 a janela com os arquivos ASCII de saturação selecionados para a geração do arquivo com as médias calculadas para cada imagem do dia 1 de fevereiro de 2003, no final do diretório pode-se visualizar o arquivo médiaOriginal.dat .

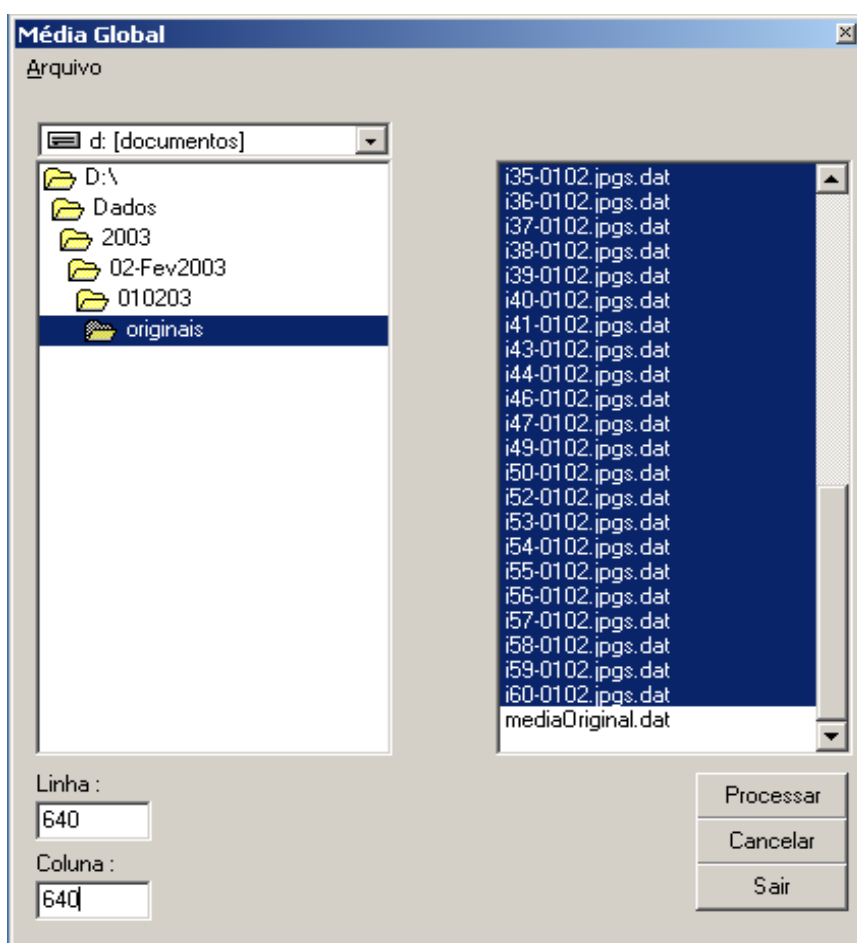


FIGURA 4.8 - Seleção do dia 01/02 /2003 para processamento.

Através do processamento das imagens, constrói-se dentro do diretório referente ao dia processado, um arquivo contendo informações com o nome da imagem, resolução, total de área de píxeis válidos e média por imagem. Através da inspeção visual e resposta da média da saturação na imagem, é possível saber se o dia estava claro ou encoberto.

Através das imagens em *RGB* e dos arquivos de média de saturação das imagens, foi possível selecionar as imagens que compuseram o grupo a para determinação dos limiares de céu claro e céu encoberto. O procedimento realizado para a descrição dos limiares foi o uso do valor da média para cada grupo de imagem representante das classes céu claro e céu encoberto da seguinte forma:

Pixel é considerado contaminado por nuvem se : a saturação do pixel $x \geq \mu_{mínima}$ para a classe ser nuvens e a saturação do pixel $x \leq \mu_{máxima}$ para ser classe de nuvens

Pixel é considerado indeterminado se : valor da saturação do pixel $> \mu_{máxima}$ para ser classe de nuvens e valor da saturação do pixel $< \mu_{mínima}$ para a classe de céu claro

Pixel é considerado de céu claro se : $x \geq \mu_{mínima}$ para a classe de céu claro

Os valores referentes aos critérios acima mencionados foram inseridos no código do programa para a realização dos testes de classificação das demais imagens, cada mês sendo processado separadamente.

4.4.4 Terceira Etapa do Processamento das Imagens

A terceira etapa corresponde a classificação; após a determinação dos limiares representantes de céu claro e céu encoberto por nuvens. O programa seleciona a imagem original, varre os diretórios procurando o arquivo ASCII contendo as saturações das imagens selecionadas e executa a classificação pixel a pixel do arquivo.

O programa avalia o valor de saturação do pixel lido e compara com os limiares definidos. Toda vez que encontra um valor dentro do intervalo representante de céu claro, ele adiciona a contagem de céu claro, o mesmo procedimento acontece com os valores que determinam a contaminação por nuvens e para píxeis que não são definidos como céu claro ou céu contaminado por nuvens.

Ao mesmo tempo em que faz a leitura e verificação dos píxeis no arquivo de saturação, o programa gera um outro arquivo classificado com os valores 0, representantes de borda (borda preta), 1 para céu claro, 2 para região de céu indeterminado e 3 para céu encoberto, também com a mesma resolução da matriz de entrada. Ao final da varredura por arquivo de saturação de imagem, o programa apresenta a estatística da fração reconhecida na imagem através do total de píxeis lidos, total de píxeis válidos (diferentes de zero) e os totais representantes de céu claro e contaminado por nuvens. O programa gera um arquivo de saída para a imagem analisada pelo programa, contendo

os valores 0, 1, 2 e 3, com o mesmo nome de entrada da imagem original, porém com a extensão .clf (classificado). Esse arquivo pode ser útil caso seja necessária a geração de mapas de cores para a verificação e a comparação entre a imagem em *RGB* (original) e o arquivo processado e classificado. Um exemplo do arquivo.clf pode ser visualizado na Figura 4.1. Ao lado da imagem original em *RGB*, observa-se um mapa de falsa cor, onde o azul representa céu claro (valores de 1), o preto, a borda da imagem (0), o cinza, as nuvens (3) e o amarelo, os valores de céu indeterminado (2). Observa-se ainda que no centro do mapa de falsa cor ocorrem valores baixos de saturação da ordem de zero, devido a grande refletância da radiação solar nas nuvens próximo do meio dia local.

As informações sobre as imagens processadas são posteriormente guardadas em um banco para geração de uma série histórica contendo nome da imagem, data e hora de aquisição, resolução, fração para cada classe de céu. A interface permite ainda a visualização da imagem e a evolução da saturação ao longo do dia através do gráfico gerado durante o processamento.

A Figura 4.9 apresenta a interface para classificação de imagens. Observa-se na tela principal na parte superior o menu, com as seguintes opções de entrada:

- **Arquivo** - permite a seleção para processamento das imagens armazenadas nos arquivos separados por dia;
- **Editar** - permite alterações dentro dos arquivos trazendo o conteúdo do arquivo para alterações se necessário;
- **Ferramentas** - é a opção que permite calcular a média, utilizar filtros e rotacionar imagens.
- **Ajudar** - traz um arquivo sobre o sistema e seu objetivo de gerar a fração de cobertura de nuvens.

Observa-se ainda, na Figura 4.9 a imagem do dia 27/10/2002, ao lado da imagem um gráfico com a fração de cobertura de nuvens para o o mesmo dia em diversos horários do dia. Abaixo do gráfico observam-se os valores gerados pelo programa classificador para a imagem que aparece na tela.

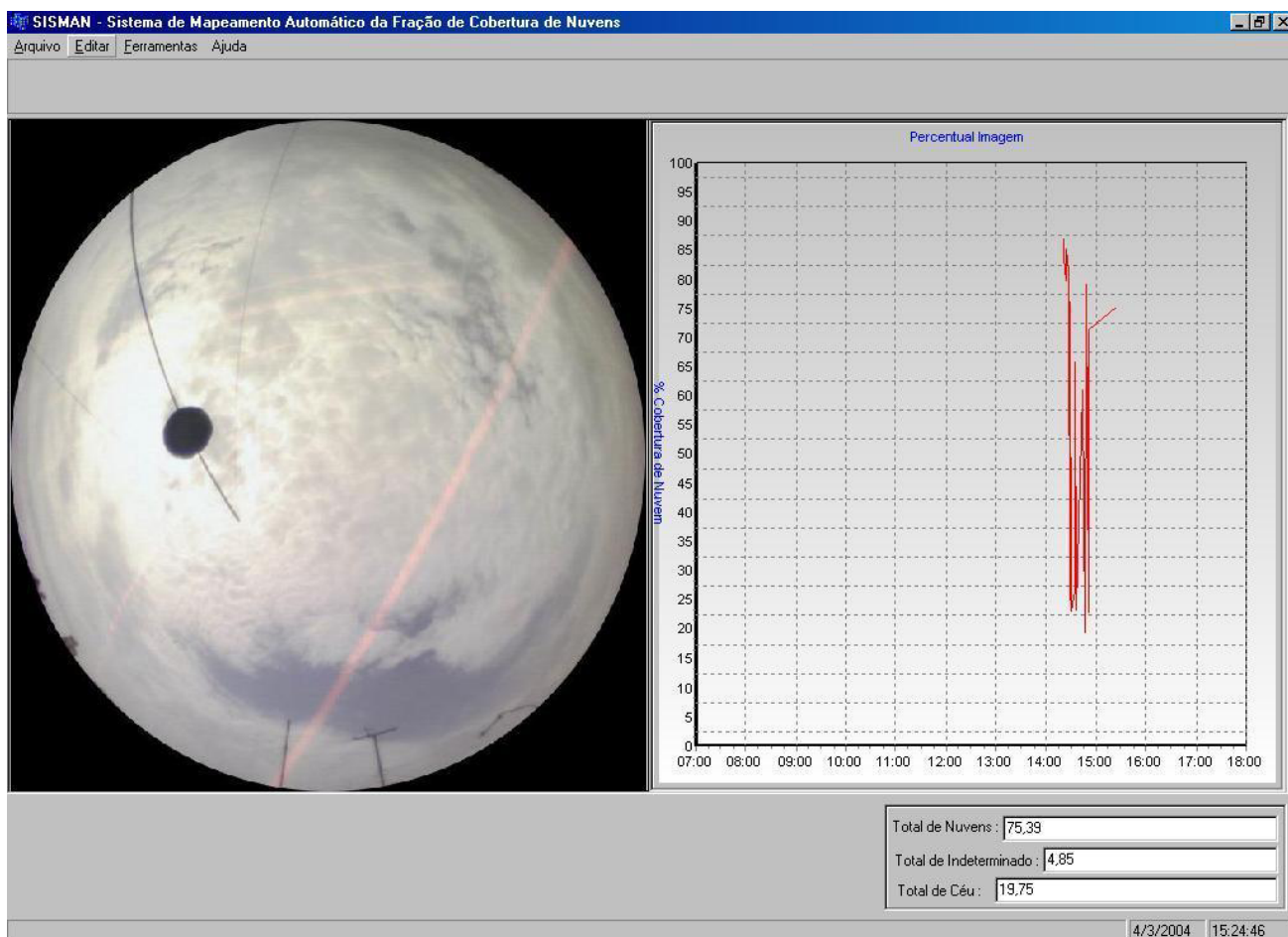


FIGURA 4.9 - Tela principal do programa que realiza a classificação de nuvens.

A Figura 4.10 apresenta a caixa de diálogo contendo o caminho onde a imagem a ser processada será lida, o caminho onde a imagem será processada e arquivada, a opção de saída com a extensão “.dat” e opção de saída no banco de imagens. Observam-se ainda os limiares criados utilizando os valores das médias, representantes das classes: céu claro e céu encoberto.

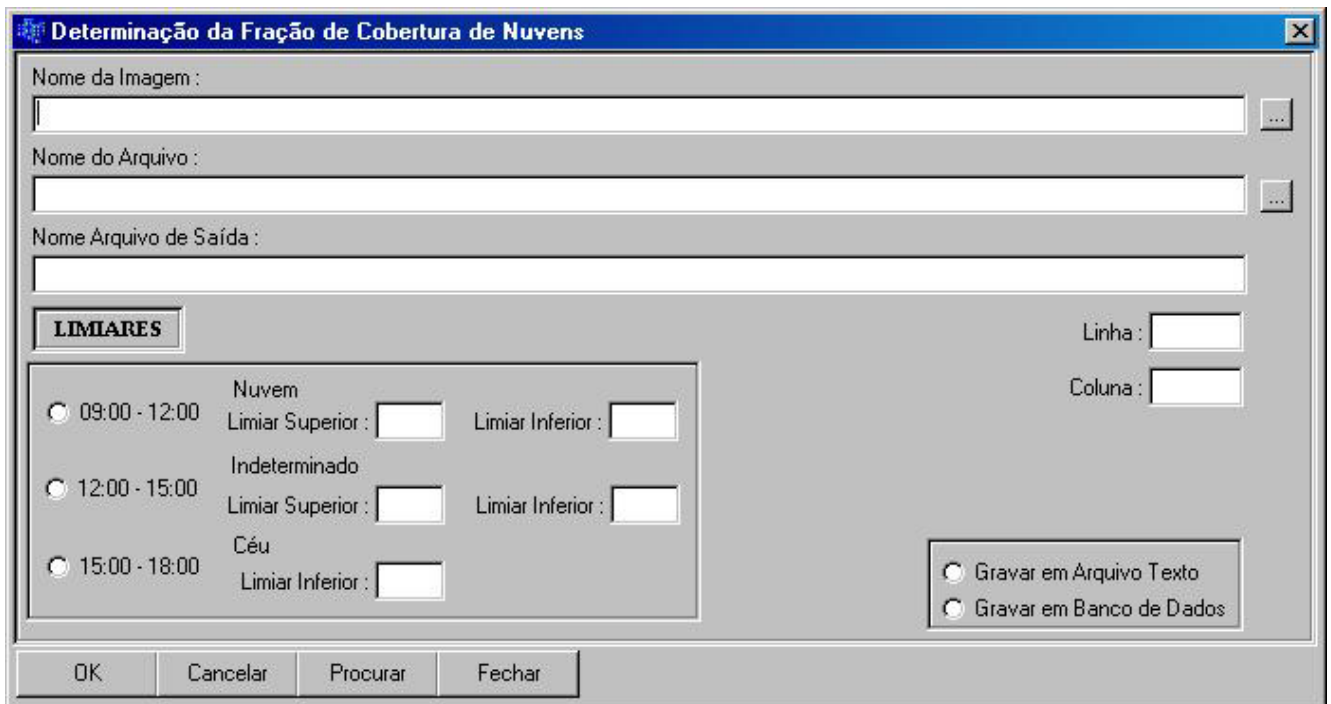


FIGURA 4.10 - Caixa de diálogo para o processamento das imagens.

A Figura 4.11 apresenta a opção de consulta ao banco de imagens onde é possível acessar as imagens já processadas. O formato do banco de imagem pode ser visualizado no Apêndice D com a descrição dos campos e seus respectivos tamanhos.

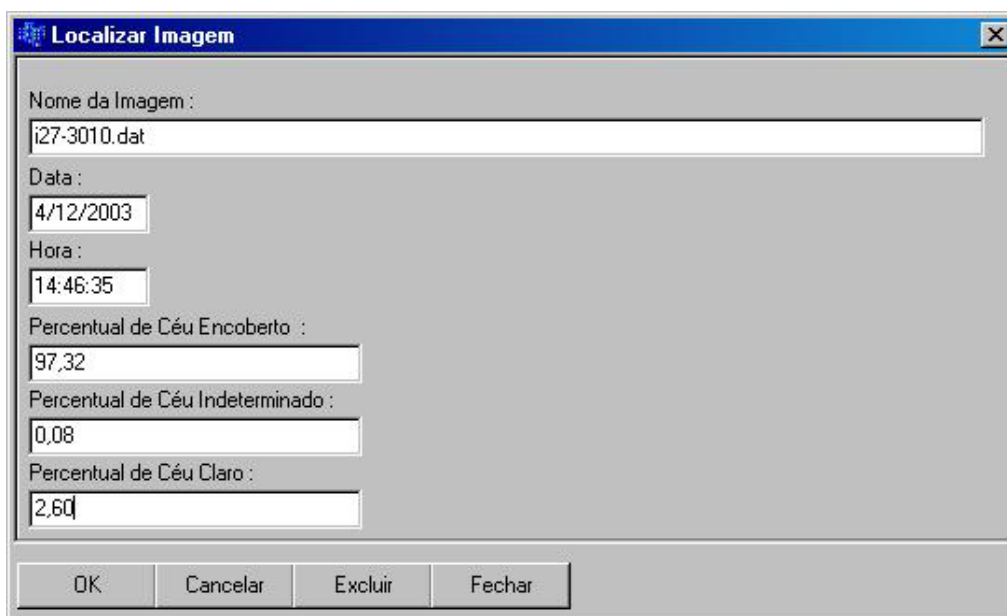


FIGURA 4.11 - Caixa de diálogo para acesso a informação relacionada a uma imagem
27/10/02.

Souza (1999), propõe em seu trabalho um algoritmo preliminar ao apresentado neste trabalho, entretanto o ângulo de abertura da lente utilizado foi de 38° . Devido a essa abertura as imagens coletadas apresentavam um padrão de distribuição de luminosidade mais uniforme nos intervalos de coleta, quando comparado ao novo sistema de aquisição. Isso tornava mais simples o trabalho de caracterização do estado do céu.

No presente trabalho, utilizam-se imagens com 178° de abertura da lente o que atende a especificação de observação visual do céu (Santos, 1957). Entretanto devido ao campo de visada ser maior, o trabalho de classificação torna-se mais complexo.

A atmosfera muda dia a dia, tanto em dias de céu claros como em dias de céu encoberto. Mesmo quando não há ocorrência de cobertura de nuvens, pode-se observar no céu uma variação devido ao espalhamento molecular pelo processo Rayleigh. Segundo a posição do Sol ao longo do dia, forma-se um suave degrade de cores que muda com o tempo

acompanhando o movimento Sol. Essa variação, observada em todo hemisfério celeste, torna a tarefa de classificação dos píxeis mais complexa.

4.5 Avaliação das Imagens Coletadas com Aberturas Diferentes

A observação de superfície implica necessariamente em abranger todo o hemisfério no campo de visada do observador. Nesta sessão foi realizada uma avaliação do efeito da variação da saturação do céu, para diversos ângulos de abertura. Isso foi feito dividindo-se o hemisfério de observação em anéis definidos por diversos ângulos de visada.

O ângulo de 178° corresponde, a imagem total (chamada aqui no trabalho de anel 0). O recorte de imagem entre 178° e 148° será chamado de anel 1, o recorte entre 148° e 118° será chamado de anel 2, o recorte entre 118° e 88° será chamado de anel 3, o recorte seguinte entre 88° e 58° será o anel 4 e a região referente ao centro da imagem com 28° será chamada de anel 5.

Da mesma forma que a atmosfera apresenta variação na luz espalhada em todo hemisfério, os valores de saturação também irão refletir essa variação. Isso pode ser visto na Figura 4.12 com a imagem coletada em 07/01/2002 as 14:45, a imagem bruta fornecida pelo sistema imageador possui 183° de abertura. O corte inicial de 5° , para remoção dos efeitos de borda (topografia e obstruções do horizonte) conduz a uma imagem com ângulo de visada de 178° . O processo foi realizado para 12 imagens distribuídas ao longo do ano e por horários: 09:00; 14:45 e 20:45 (GMT). O objetivo dessa etapa foi de avaliar nas imagens de céu claro, céu encoberto e céu parcialmente encoberto, a variação da saturação em função da distância angular do ponto do céu ao zênite. As demais imagens utilizadas neste processo encontram-se no Apêndice D.

Imagem das 14:45 dia 7 de Janeiro de 2002 (dia claro)

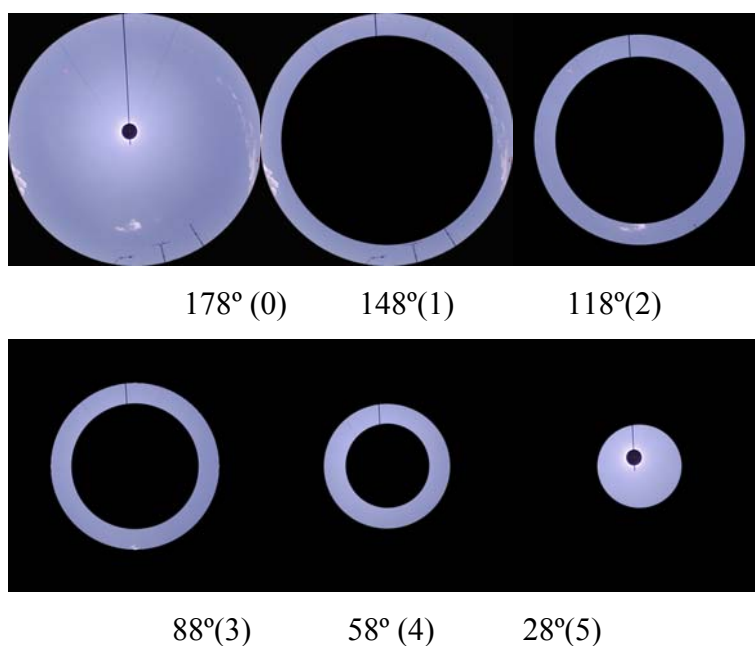


FIGURA 4.12 - Imagem 178° (anel 0), 148° (anel 1), 118° (anel 2), 88°(anel 3), 58° (anel 4) e 28° (anel 5).

Como o objetivo desse teste foi o de avaliar a variação espacial relativa dos níveis de saturação nas imagens, optou-se pela normalização dos valores de saturação medidos pela saturação obtida na imagem bruta fornecida pelo imageador (ângulo de visada de 178°).

A Figura 4.13 apresenta o comportamento da saturação normalizada para dias de céu claro, as 14:45 em janeiro e julho de 2002. Entretanto é bom ressaltar que, durante o ano ocorre variação na coloração do céu em função da sazonalidade. É possível observar um ligeiro incremento da saturação nas imagens nos anéis de 1 a 3. A partir do 3º anel (88°) abertura ocorre a estabilização da saturação.

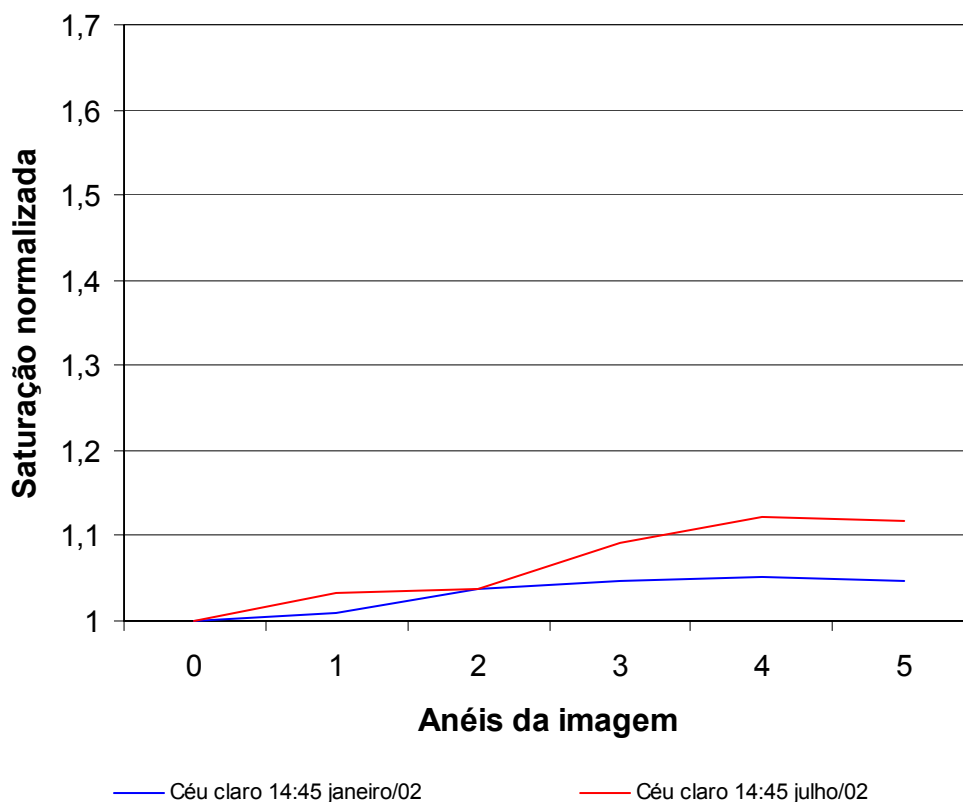


FIGURA 4.13 - Anéis para dia claro as 14:45.

O mesmo comportamento não é observado em imagens coletadas no início e final do dia. A Figura 4.14 apresenta um aumento muito maior dos níveis de saturação, não sendo possível observar-se a estabilização desses níveis, exceto para o mês de setembro, talvez, como consequência do aumento da carga de aerossóis na atmosfera nessa época do ano. Nesse caso é aconselhável o processamento da metodologia de classificação por anéis, a fim de minimizar os erros sistemáticos de classificação dos píxeis.

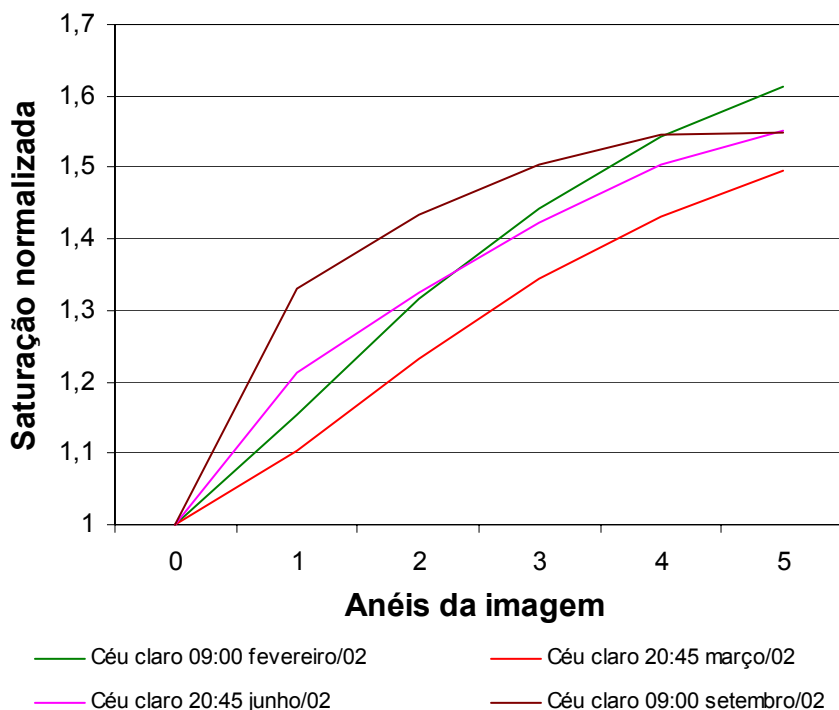


FIGURA 4.14 – Saturação relativa dos anéis para o início e final do dia, em dias de céu claro.

A Figura 4.15 apresenta cenários para céu encoberto. É possível observar que o padrão de crescimento da saturação é praticamente idêntico ao observado para dias de céu parcialmente encoberto (com nuvens do tipo Stratus) ou totalmente encoberto, em todos os horários do dia. Em todos os casos, a saturação parece atingir um patamar de estabilização a partir do 4º anel das imagens.

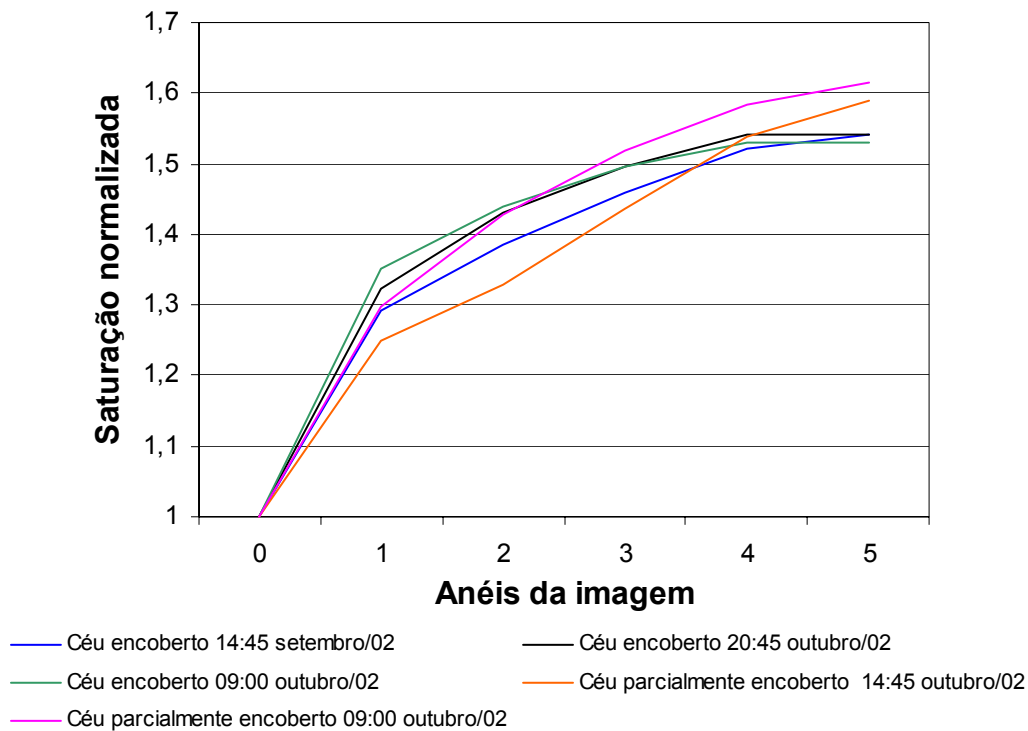


FIGURA 4.15 - Anéis para dias encobertos e parcialmente encoberto.

Através das Figuras 4.13, 4.14 e 4.15 foi possível fazer uma observação da variação da saturação do céu em diferentes cenários. Isso pode auxiliar ao usuário a descrever que tipo de análise ele deseja aplicar as imagens. Caso a decisão seja estabelecer limiares de corte para ensinar o classificador a reconhecer nuvens no céu, ele poderá fazer uso do processamento por anéis. Outra sugestão aplicada a investigação acima é a possibilidade de avaliar o emprego de um sistema de captura automática com um menor campo de visada, visto que a partir de 88°(anel 3) é possível perceber uma tendência de estabilização do crescimento da saturação para todas as condições de céu em horários e épocas do ano distintas.

4.6 Estudo Comparativo dos Dados de Radiação Solar (global e difusa e direta) e de Cobertura de Nuvens

A Figura 4.16 apresenta o comportamento da radiação solar global (curva laranja), direta¹ (curva azul) e difusa (vermelho) em intervalos de 15 minutos ao longo do dia 3 de outubro de 2002. A presença de nuvens ocasiona uma diminuição da componente direta da radiação solar, e em consequência, ocorre um crescimento da componente difusa. O valor da média diária da saturação presente nas imagens foi de 18,8. Espera-se que valores abaixo de 19 sejam representantes de céu encoberto e valores acima de 21 representem regiões de céu claro para o mês de outubro, esses valores foram obtidos através do processamento das imagens para o mês de outubro. Logo abaixo da Figura 4.16, é possível observar a resposta do programa classificador para as imagens do exemplo da Figura 4.16 na Tabela 4.1. Para dias em que a cobertura de nuvens é uniforme e constante ao longo do dia, a resposta do programa que realiza a classificação apresenta uma concordância significativa. A variação dos píxeis contaminados por nuvens está entre 92,9 e 96,6%. A resposta para píxeis representantes de céu claro varia entre 2,9 e 7,3%. Os valores de céu indeterminado encontra-se entre 0,2 e 1,1%.

¹ Os dados de radiação solar direta(em azul) foram corrigidos pelo COS do Ângulo Solar Zenital(ASZ)

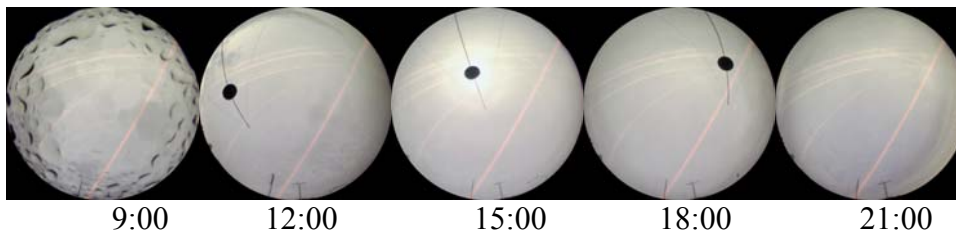
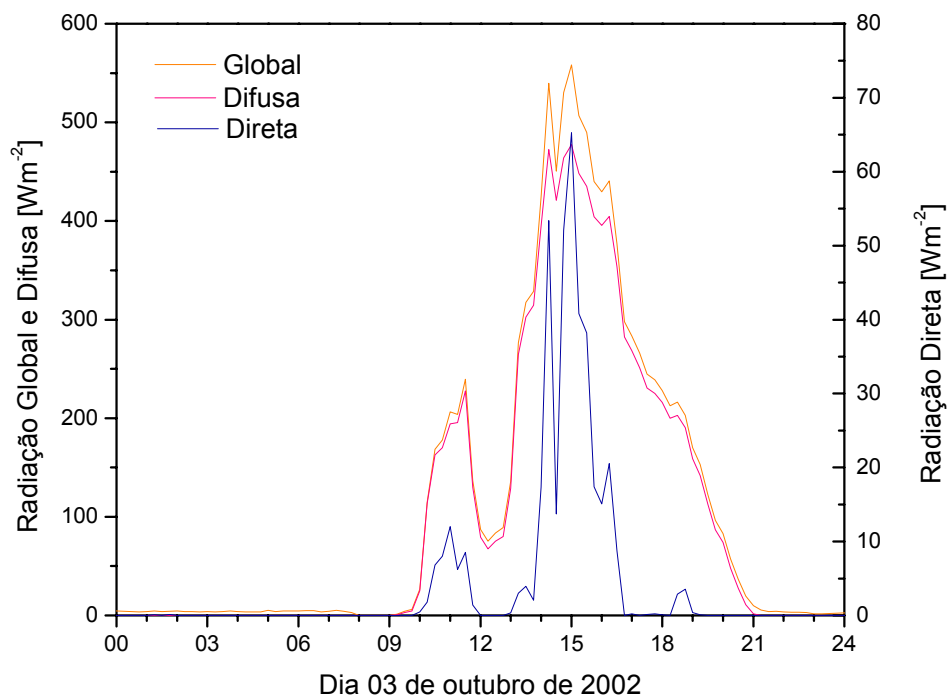


FIGURA 4.16 - Curvas para radiação global, radiação difusa e radiação direta em W/m^2

Imagens exibindo o estado de nebulosidade para o dia 3/10/2002

TABELA 4.1 para imagens da Figura 4.16

Hora	Céu encoberto%	Céu claro%	Céu indeterminado%
09:00	92,9	6,1	1,1
12:00	92,4	7,3	0,3
15:00	96,9	2,9	0,2
18:00	96,6	3,1	0,3
21:00	95,9	3,3	0,8

A Figura 4.17 apresenta as curvas com a variação da radiação solar global, difusa e direta para o dia 22 de outubro de 2002. Observa-se que há uma flutuação dentro da radiação global com o aumento da componente direta após as 15:00, em presença de céu claro. Através das imagens e do gráfico é possível visualizar os efeitos da cobertura de nuvens ao longo do dia, tanto sobre os dados do imageador como dos radiômetros. Observa-se que no horário das 9:00 a imagem apresenta uma cobertura mais uniforme e o gráfico mostra o crescimento da componente difusa. Na imagem das 12:00 observa-se o efeito do espalhamento da luz pelas nuvens e a porção de céu começa a ficar evidente, em concordância com o gráfico. Além da variabilidade da cobertura de nuvens, observa-se ainda o comportamento da radiação próximo das 15:00 (GMT), onde o cenário de nuvens é próximo ao horário anterior. Entretanto, o ângulo de zênite solar é menor. Isso pode ser visualizado no crescimento da componente direta. Observa-se, através das imagens nos diversos horários, uma nebulosidade aleatória com predominância de céu encoberto na parte da manhã e céu claro no final da tarde. O valor da média diária da saturação presente nas imagens foi de 20.

A Figura 4.17 sugere a necessidade do estabelecimento de alguns limiares distintos para análise das imagens ao longo do dia. A média diária da saturação para o dia 3/10/2002, totalmente encoberto, foi de 18,8.

A Tabela 4.2 apresenta os valores para píxeis contaminados por nuvens com a variação diária entre 17,2 e 72,5%. A variação para os píxeis representantes de céu claro ficou entre 20,9 e 82,3% para céu indeterminado 0 e 6,5%

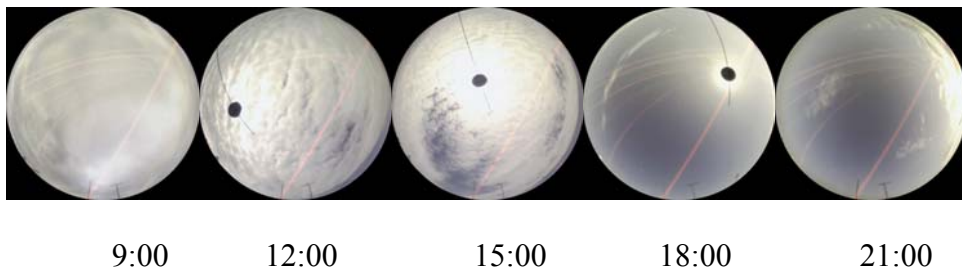
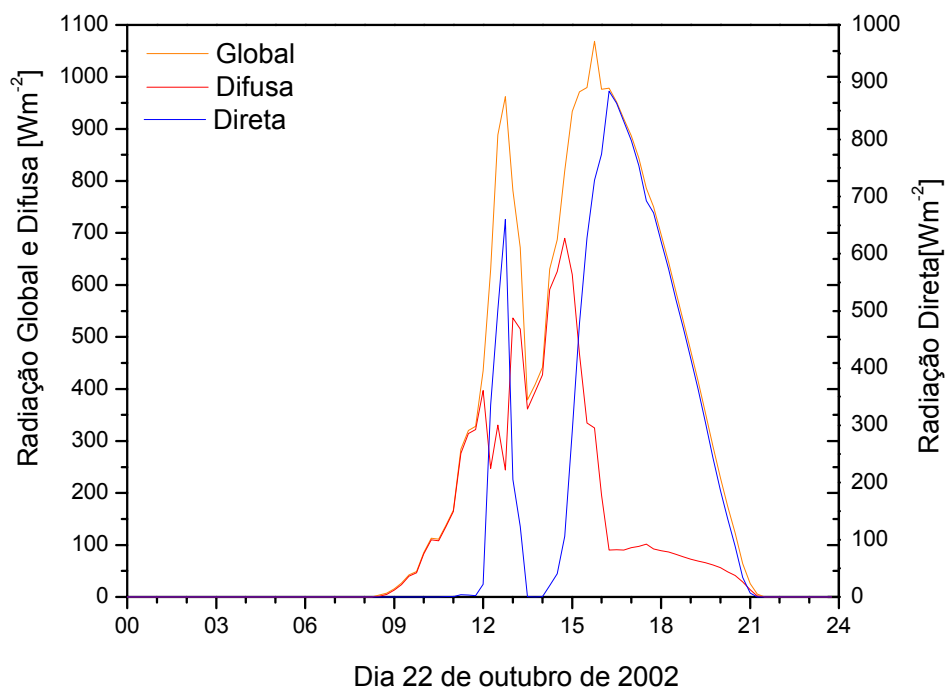


FIGURA 4.17 - Curvas para radiação global, radiação difusa e radiação direta em W/m^2 . Imagens exibindo o caráter de nebulosidade variável para o dia 22/10/2002.

TABELA 4.2 para imagens da Figura 4.17.

Hora	Céu encoberto%	Céu claro%	Céu indeterminado%
09:00	72,5	20,9	6,5
12:00	36,9	63,1	0
15:00	24,1	75,9	0
18:00	17,6	82,3	0,1
21:00	25,9	74,1	0

A Figura 4.18 apresenta as curvas da radiação solar global, direta e difusa para o dia 4/2/2003, dia de céu claro, onde a média da saturação ao longo do dia foi de aproximadamente 21. As imagens durante esse período já estão bastante prejudicadas devido a degradação do *CCD* pelo longo tempo de uso contínuo (5 anos). Entretanto ainda é possível a classificação do tipo de condição de céu através das imagens, mesmo no início e no final do dia, quando o ângulo solar de zênite é elevado e a iluminação é fraca comparada com o horário das 15:00 (GMT).

A Tabela 4.3 apresenta os valores da variação para píxeis reconhecidos como contaminados por nuvens entre 20,5 e 24,3%. Embora o dia seja claro, o programa reconhece cerca de 20% dos píxeis como contaminados por nuvens. A presença de céu claro é marcante com níveis variando entre 75,7 e 79,9%. Os níveis de céu indeterminado variam entre 0 e 0,5%.

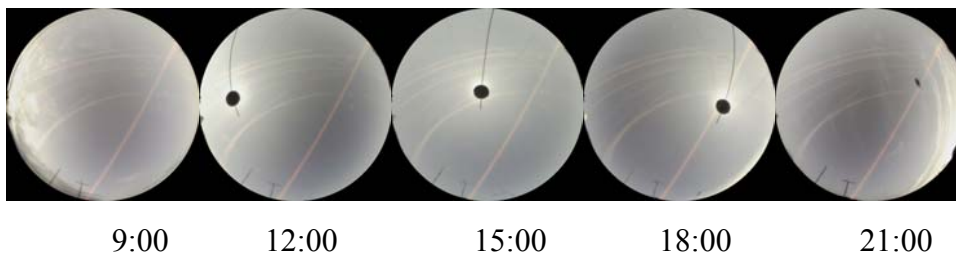
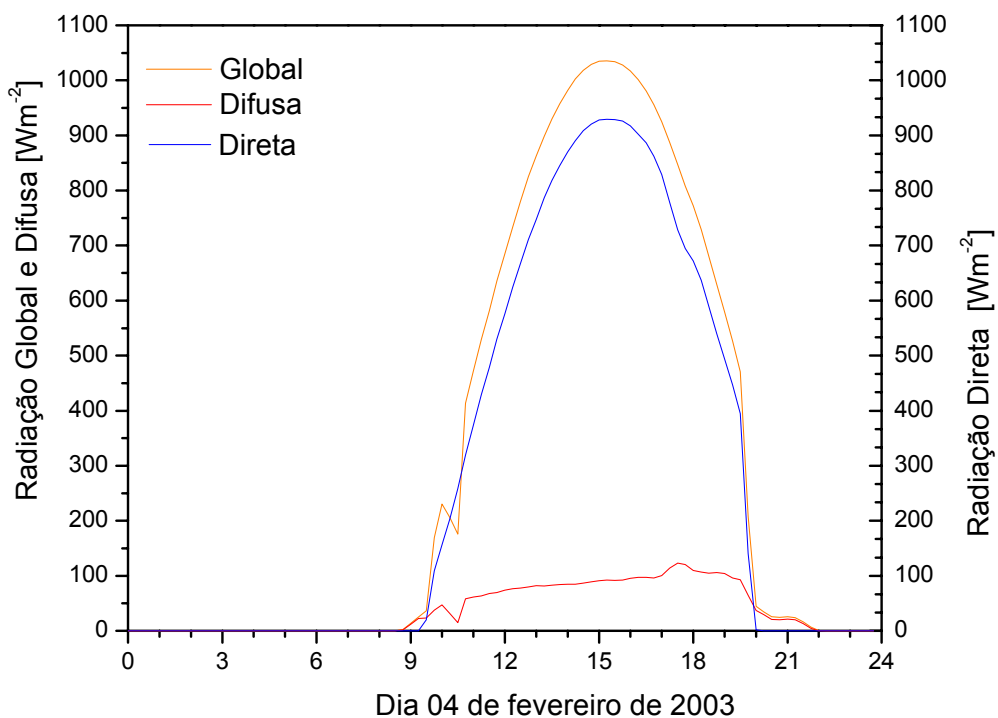


FIGURA 4.18 - Curvas para radiação global, radiação difusa e radiação direta em W/m^2 . Imagens exibindo as condições de cobertura de céu para o dia 04/02/2003.

TABELA 4.3 para imagens da Figura 4.18.

Hora	Céu encoberto%	Céu claro%	Céu indeterminado%
09:00	22,5	77,0	0,5
12:00	24,3	75,7	0
15:00	22,0	80,0	0
18:00	20,5	79,5	0
21:00	22,0	78,0	0

4.7 Processamento dos Dados de Radiação Solar

Os dados de radiação solar utilizados no trabalho são provenientes da estação solarimétrica *BSRN* do Laboratório de Energia Solar – LABSOLAR .

O período de dados utilizados foi de março de 2002 a fevereiro de 2003, com resolução temporal de 1 minuto. Para a utilização dos dados em intervalos de tempo concordantes com as imagens, foram criados programas para a integração da base solarimétrica em intervalos de 15 minutos. A integração inicia no minuto 00:00 do dia e termina 23:45 (GMT). Após o processamento dos dados solarimétricos originais, eles assumem a seguinte forma:

Dia	Minuto	³ ASZ	Global	Difusa	Direta
.
1.34375	815	99.3329	4.13333	0	0.66667
1.35417	830	96.0358	7.2	0	0.6
1.36458	845	92.7268	7.86667	0	1.06667
1.375	900	89.409	10	1.13333	0.06667
1.38542	915	86.0857	11.86667	4.33333	0
1.39583	930	82.7599	25.26667	16.26667	0.86667
1.40625	945	79.4345	46.26667	37.53333	1
1.41667	1000	76.1128	108.4	99.86667	0.86667
1.42708	1015	72.7979	138.2	130.26667	0.8
1.4375	1030	69.4934	180.26667	172.93333	1.26667
1.44792	1045	66.2032	193.86667	185.06667	0.8
1.45833	1100	62.9318	266.06667	257.2	1.86667
1.46875	1115	59.6841	398.13333	393.13333	3.26667
1.47917	1130	56.4662	417.33333	409.73333	3.93333
1.48958	1145	53.2853	588.13333	567.53333	9.53333
1.5	1200	50.1499	688.13333	665	9.46667
.

Foi gerado um arquivo chamado RAD-TOP (Apêndice D) contendo a radiação extraterrestre para a região de Florianópolis. O arquivo desenvolvido foi utilizado para auxiliar a geração do índice K_t diário para visualização do estado atmosférico do dia

³ ASZ Ângulo Solar Zenital

segundo a transmitância atmosférica. O cálculo da radiação no topo da atmosfera foi realizado empregando o trabalho de Martins (2001). A Figura 2.5 no Capítulo 2 apresenta o comportamento proposto por Iqbal (1983) para o cenário de céu com várias condições de nebulosidade. Assim o processo de validação do algoritmo deverá empregar os dados de radiação solar como parâmetro adicional de caracterização do estado de cobertura global do céu.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÕES

Este trabalho é um passo inicial em direção ao desenvolvimento de uma metodologia de fácil acesso, para fornecer aos usuários dados de alta qualidade sobre a fração de cobertura de nuvens no céu.

O sistema fornece a fração de nuvens, informação relevante para climatologia e também para a meteorologia observacional, usualmente gerada em grande parte através da observação visual.

O trabalho apresenta a série temporal da fração de cobertura de nuvens derivada com o protótipo do sistema, para o período de março de 2002 a fevereiro de 2003, em Florianópolis. A apresentação é feita por estação do ano: outono, inverno, primavera e verão. São apresentadas observações comparativas da transmitância da atmosfera, utilizando o índice Kt e a fração de cobertura de nuvens e estudada a relação entre ambos. O trabalho aborda também a observação entre as razões radiação difusa e a radiação global (medidas em superfície) e a fração de nuvens para o mesmo período.

A última parte da apresentação dos resultados consiste em um trabalho comparativo entre a estimativa da radiação solar em superfície utilizando o modelo de transferência radiativa BRASIL-SR, tendo como entrada imagens do satélite GOES-8 e imagens do sistema automático de captura de imagens de todo o céu.

5.1 Distribuições de Frequência dos Dados

Nesta seção são analisadas as distribuições da fração do céu encoberto por nuvens (F_{NUV}), fração céu claro (F_{CLA}) e fração do céu cuja cobertura é indeterminada (F_{IND}) para todo o período e por estações do ano. As séries temporais de F_{NUV} , F_{CLA} e F_{IND} são apresentadas no Apêndice E. O gráfico de barras da Figura 5.1 apresenta no eixo x as frações de nuvens geradas para o período de março de 2002 a fevereiro de 2003, em bandas de 10% e no eixo y a percentagem dos dados que foram observados para cada banda. Durante essa primeira etapa dos resultados não foi realizado nenhum tipo de estudo para avaliar qual a melhor distribuição para representar a fração de nuvens gerada nesse primeiro ano de coleta de dados. Entretanto é possível observar que a distribuição apresenta dois picos sugerindo assim a bimodalidade da distribuição. O primeiro pico (chamado aqui de moda local) encontra-se na banda centrada em 25% de cobertura de nuvens e o segundo na banda centrada em 75% de fração de nuvens. O total de imagens utilizadas durante o presente trabalho foi de 4074 valores de 15 minutos de integração, coletadas ao longo do período de obtenção dos dados. O mesmo número de dados foi empregado para radiação global e difusa. Para facilitar a descrição dos gráficos ao longo do presente capítulo será utilizado o termo “número de pontos”, ou seja, ficará implícito que os pontos são imagens correspondentes às frações de céu encoberto, céu claro e céu indeterminado, provenientes de imagens coletadas com o protótipo do imageador de superfície. Quando o gráfico apresentar valores de radiação solar, global ou difusa, cada ponto do gráfico deve ser compreendido como uma integração de 15 minutos.

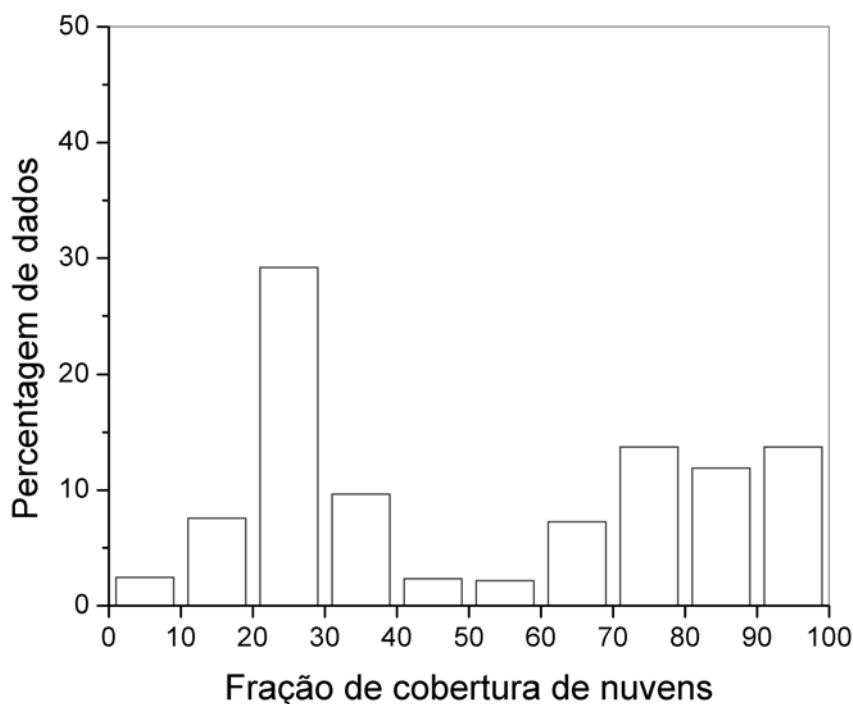


FIGURA 5.1 - Distribuição dos dados de fração de cobertura de nuvens para o período de março de 2002 a fevereiro de 2003.

A Figura 5.2 é composta por quatro gráficos separados por estações do ano, contendo a distribuição da fração de cobertura de nuvens para o mesmo período da Figura 5.1. É possível visualizar na Figura 5.3, para todas as estações, a presença de duas modas locais, que para o outono de 2002 são vistas nas bandas centradas em 5% para fração de cobertura de nuvens com ocorrência em 55% dos dados e o outro pico em 95% para fração de cobertura de nuvens com ocorrência em 15% dos dados. Isso significa que durante o outono a condição de céu claro é predominante. O pico da moda a 95% pode ser explicado pelas passagens de frentes frias sobre o oceano que acabam por modificar o cenário da região tornando o céu totalmente encoberto.

Para o inverno de 2002, é possível observar duas modas locais para a fração cobertura de nuvens, a primeira centrada em 25%, com ocorrência em 25% dos dados e a outra em 95% para fração de cobertura de nuvens com ocorrência em 45% dos dados. O Inverno

apresenta cenário diferente do outono de 2002. Quase não são perceptíveis dias com nebulosidade abaixo de 5%. Além disso predomina a moda centrada em 95%. Isso acontece devido às condições atmosféricas serem mais dinâmicas nesse período sobre a região, com várias incursões de frentes frias. As chuvas que acontecem nesse período são do tipo leves e contínuas (Nimer, 1977).

Na primavera a presença da primeira moda local encontra-se entre 25% para fração de cobertura de nuvens com ocorrência em 20% dos dados e em 95% para fração de cobertura de nuvens com ocorrência em 15% dos dados. Na primavera praticamente não existem dias totalmente claro, e podem ocorrer com igual probabilidade frações de cobertura de nuvens acima de 10%.

O verão apresenta o primeiro valor de moda local em 25% para fração de cobertura de nuvens com ocorrência em 45% dos dados e 85% para fração de cobertura de nuvens com ocorrência em 15% dos dados. Ocorre um aumento significativo em termos de fração de cobertura de nuvens entre 20 e 30%. No verão ocorre maior insolação na região, a evaporação é elevada, devido a presença do oceano, o que aumenta a nebulosidade e, por consequência, as chuvas. Normalmente existem poucas nuvens no período da manhã, aumentando a partir da tarde.

O número de imagens para o outono foi de 195, para o inverno 515, durante esse período foram feitos testes com o sistema de aquisição que iniciou a coleta contínua partir do mês de julho de 2002. Para a primavera o número de imagens foi de 1895 e para o verão de 2002 e 2003 de 1474 imagens. O sistema ficou desligado durante a segunda quinzena do mês de dezembro de 2002 e a primeira quinzena de janeiro de 2003. O computador, onde o programa de captura de imagens foi instalado, passou por manutenção, por isso observa-se uma diminuição no número de pontos referentes às imagens da primavera de 2002 para o verão de 2002 e 2003.

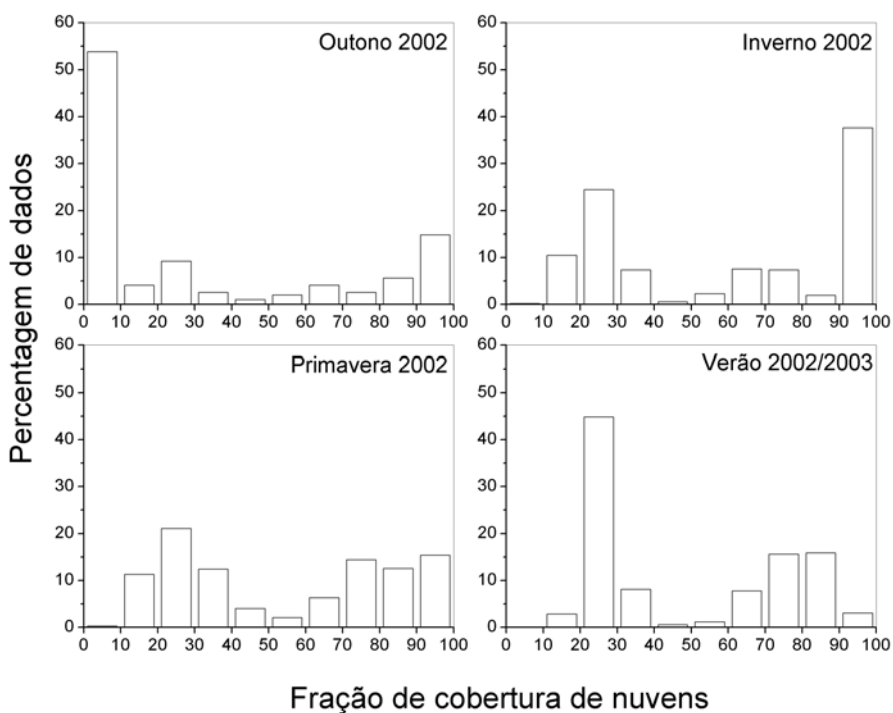


FIGURA 5.2 - Distribuição dos dados de fração de cobertura de nuvens para as estações outono, inverno, primavera de 2002 e verão de 2002 e 2003.

A Figura 5.3 apresenta no eixo x as frações de céu claro geradas para o período de março de 2002 a fevereiro de 2003, em bandas de 10% e no eixo y a percentagem dos dados que foram observados para cada banda. Nota-se que o comportamento da fração

de céu claro é o oposto ao da fração de nuvens, entretanto, a distribuição também apresenta dois picos, o primeiro centrado em 5% e o segundo centrado em 75%.

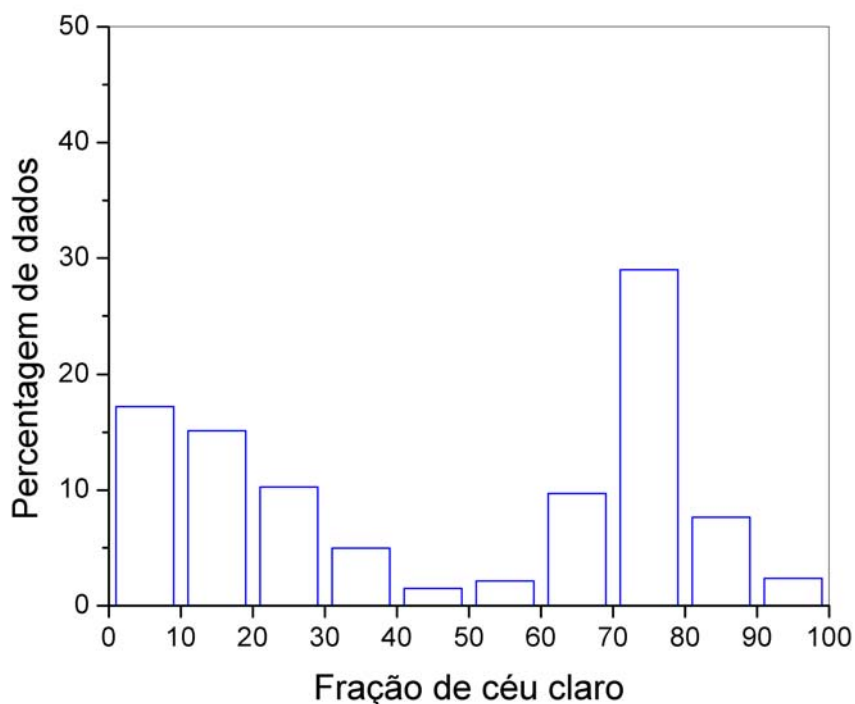


FIGURA 5.3 - Distribuição dos dados de céu claro para o período de março de 2002 a fevereiro de 2003.

A Figura 5.4 apresenta a distribuição de céu claro para as quatro estações do ano. É possível visualizar para o outono, dois picos centrados em 5% de fração para céu claro com ocorrência de 20% nos dados e 95% de fração de céu claro com ocorrência de 55% nos dados da estação, caracterizando o domínio de tempo bom. Para o inverno também se observam dois picos, o primeiro centrado em 5% de fração de céu claro com ocorrência de 35% e o segundo pico centrado em 75% para fração de céu claro com ocorrência em torno de 25%. Para a primavera os valores para a fração de céu claro estão centrados em 10% com ocorrência de 20% dos dados e em 75% com ocorrência de 20% dos dados. Para o verão os valores de pico estão centrados em 15% para fração de céu claro com ocorrência de 15% e o segundo pico bem marcante centrado em 75% para fração de céu claro com ocorrência em torno de 45% dos dados.

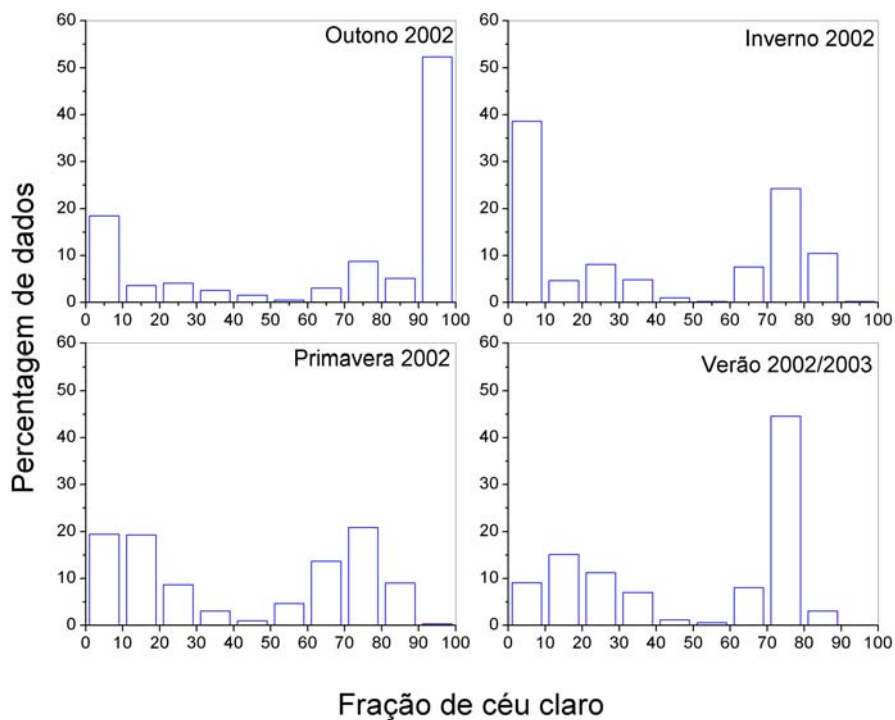


FIGURA 5.4 - Distribuição dos dados de céu claro para as estações outono, inverno, primavera de 2002 e verão 2002 e 2003.

A Figura 5.5 apresenta a distribuição de céu indeterminado para todo o período. A distribuição é bem diferente daquelas observadas nos casos anteriores, para céu encoberto e céu claro. Sua forma é aparentemente log-normal e a maioria (75%) dos dias apresenta as frações de céu indeterminado menores que 3%.

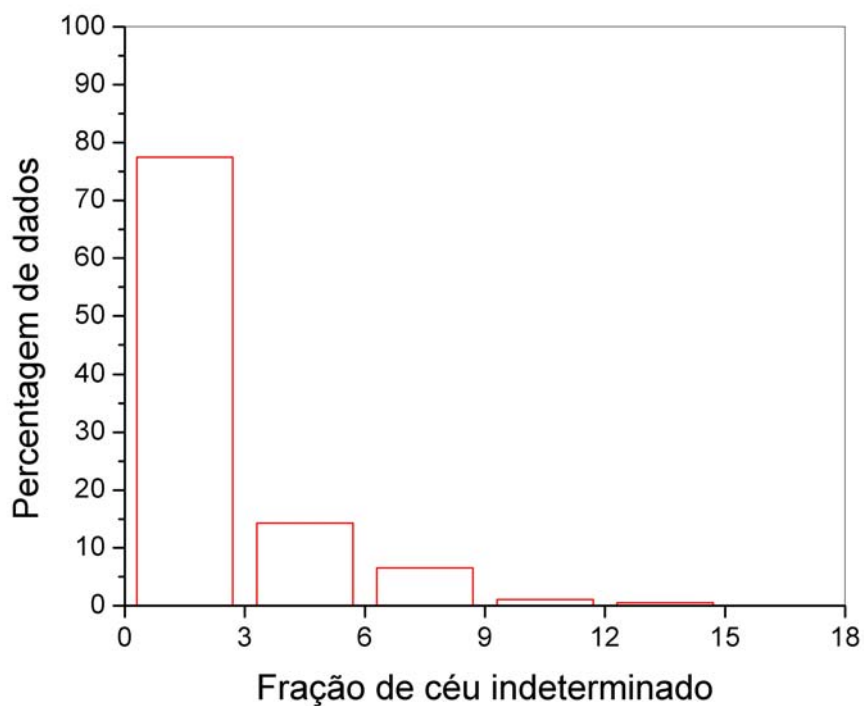


FIGURA 5.5 - Distribuição dos dados de céu indeterminado para o período de março de 2002 a fevereiro de 2003.

A Figura 5.6 apresenta os dados da fração de céu indeterminado por estação do ano. Observa-se o mesmo comportamento para todas as estações, com fração de céu indeterminado menores que 3% entre 70% e 80%. Este resultado ilustra a incerteza na identificação e classificação da cobertura do céu, indicando um máximo de indeterminação inferior a 18% e que, em 70% dos casos, esta incerteza é menor do que 3%. Em mais de 90% dos casos a indeterminação é menor do que 10%, o que indica que o classificador consegue separar adequadamente em céu claro e nuvens na maior parte dos dados.

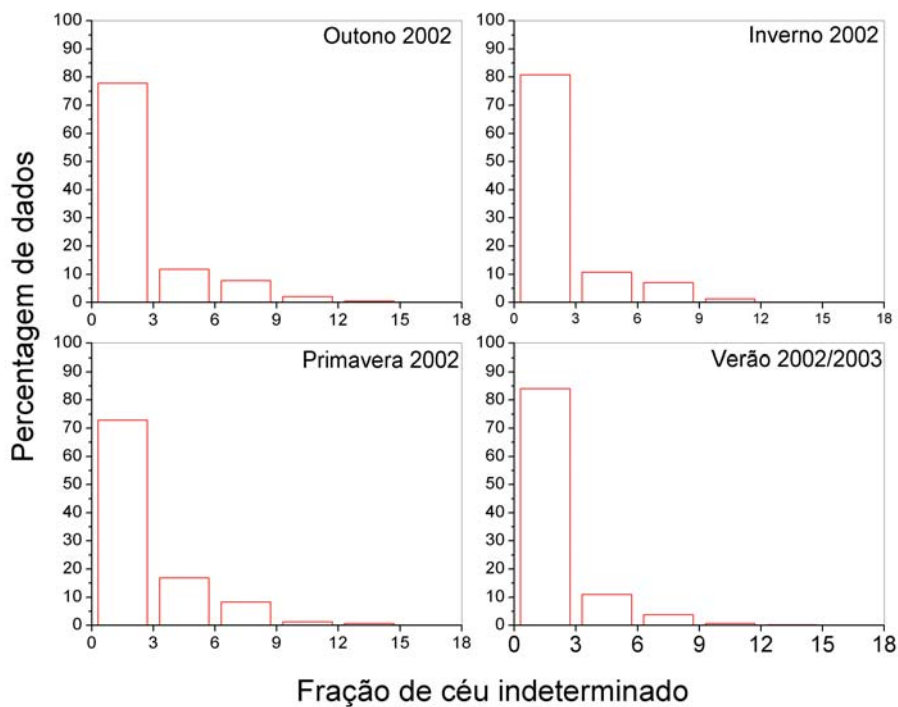


FIGURA 5.6 - Distribuição dos dados de céu indeterminado para as estações outono, inverno, primavera de 2002 e verão de 2002 e 2003.

A Figura 5.7 apresenta um gráfico contendo informações sobre a fração da cobertura de nuvens para a região de Florianópolis, obtidos com a metodologia proposta comparada com os dados do INMET para a média climatológica da fração de cobertura de nuvens de 1931-1960 (curva em vermelho) e de 1961-1990 (curva em verde). Os dados visualizados em azul no gráfico são referentes ao período de março de 2002 a fevereiro de 2003.

Observa-se que os dados deste trabalho apresentam a mesma variação sazonal observada na média climatológica, mas mostram uma grande variabilidade mensal. É possível perceber que os dados do presente trabalho apresentam uma variação mais acentuada para o mês de junho, onde o ar frio da época é trazido pela aproximação de anticiclones (altas pressões) que se deslocam em direção ao sul do Brasil e ocasionam tempo estável, com predomínio de céu claro, com temperaturas baixas, favorecendo a formação de nevoeiros, geralmente pela madrugada e dissipando-se durante o dia. Esses

nevoeiros podem estar sendo compreendidos como nuvens pelo sistema; talvez isso explique a variação brusca observada pelo sistema.

A série apresentada no presente trabalho é curta, sendo esperado que durante um único ano a cobertura de nuvens seja mais variável e menos suave do que numa curva média climatológica de 30 anos. Portanto ainda não é possível concluir o que poderia estar ocorrendo no mês de junho/julho e quanto à concordância para os demais meses. Vale lembrar que os períodos de outono e inverno possuem menor número de pontos que o verão e primavera, sendo menos confiáveis estatisticamente. O número de pontos utilizados por mês pode ser visualizado na Tabela 5.1

TABELA 5.1 Número de imagens por mês.

Mês	Número de imagens
Março de 2002	118
Abril de 2002	39
Maio de 2002	38
Junho de 2002	160
Julho de 2002	234
Agosto de 2002	121
Setembro de 200	308
Outubro de 2002	838
Novembro de 2002	749
Dezembro de 2002	353
Janeiro de 2003	415
Fevereiro de 2003	701

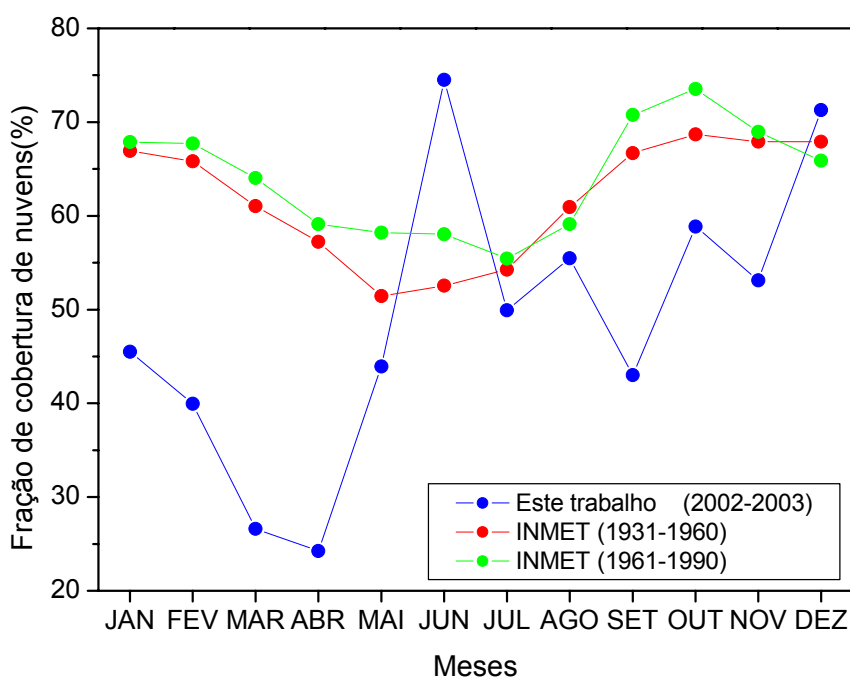


FIGURA 5.7 - Média mensal de cobertura de nuvens para a região de Florianópolis (em azul); cobertura de nuvens para região de Florianópolis (curva em vermelho período 1931-1961; curva em verde 1961-1990).

FONTE: INMET (2005).

A Figura. 5.8 apresenta exemplos (dias 11, 12, 13, 19 e 30/07 de 2002) de imagens obtidas com o sistema imageador para diferentes condições de cobertura de nuvens. A resposta do método de classificação para cada diferente condição do céu é apresentada na Tabela 5.2. Nota-se que os cenários variam quanto a quantidade total de nebulosidade (de 30% a 70%) e também quanto ao tipo de nuvens e da sua configuração espacial, isto é, cobertura homogênea ou fragmentada de nuvens.

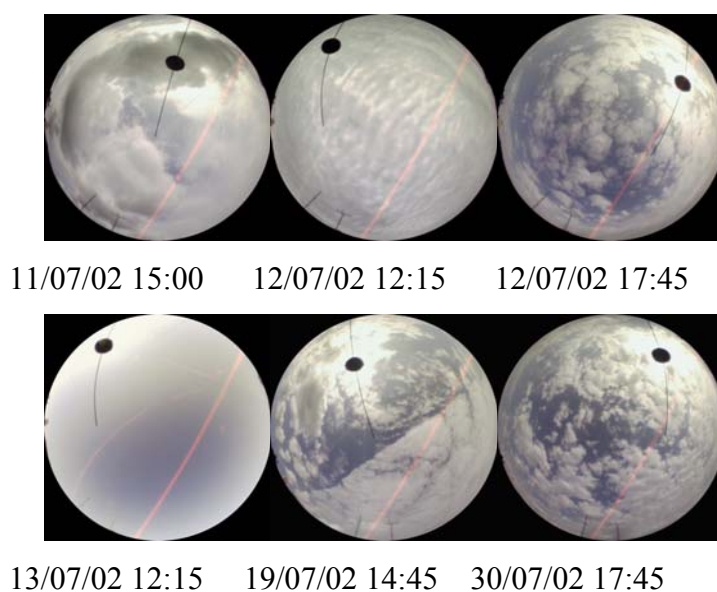


FIGURA 5.8 - Imagens do mês de julho de 2002

TABELA 5.2 Respostas da classificação para as imagens da Figura 5.8.

Imagens	Nuvens(%)	Indeter.(%)	Céu claro(%)
11/07/02 15:00	69,6	0,0	30,4
12/07/02 12:15	71,2	10,1	18,7
12/07/02 17:45	50,3	5,3	44,4
13/07/02 12:15	30,2	0,2	69,6
19/07/02 14:45	61,5	5,2	33,3
30/07/02 17:45	66,3	4,9	28,8

5.2 Dados de Radiação Solar e Nuvens

Os dados da fração de cobertura de nuvens obtida neste trabalho foram confrontados com os dados de radiação solar incidente medidos em superfície e o índice de transmitância atmosférica K_t , calculados pela razão entre a radiação global medidas em superfície e a radiação no topo da atmosfera (Iqbal, 1983).

Foi calculada, para Florianópolis, a curva da variação do ângulo zenital para o ano de 2002, que pode ser visualizado na Figura 5.9. A partir da Figura 5.9 escolheu-se o ângulo solar zenital (ASZ) de $45^\circ \pm 5^\circ$ que compreende uma região entre 40° e 50° para a utilização dos dados de radiação solar medidos em superfície para todo o período de dados. Esse ângulo foi escolhido, pois é menor ângulo solar de zênite que inclui todos os pontos ao longo do ano. Será apresentado, além do gráfico de $45^\circ \pm 5^\circ$, o gráfico com todos os valores de radiação solar para ASZ menores que 70° .

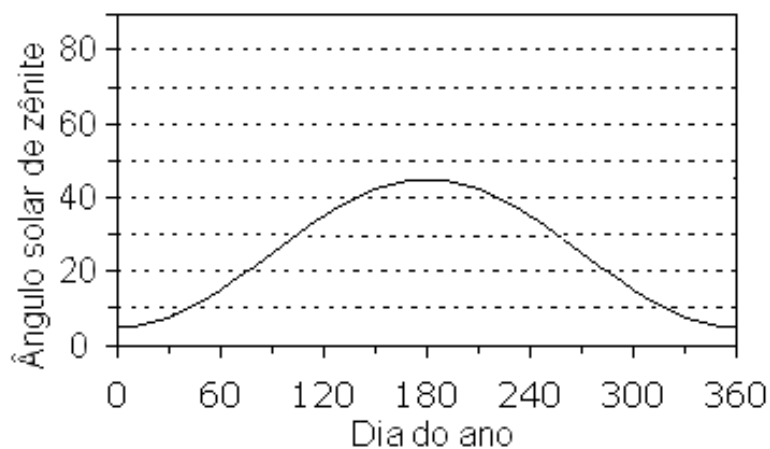


FIGURA 5.9 - Representação gráfica do ângulo solar de zênite para Florianópolis (latitude $27^\circ 28'S$, longitude $48^\circ 29'W$).

A Figura 5.10 apresenta dois gráficos, o primeiro contendo todos os dados de março de 2002 a fevereiro de 2003, para o ASZ inferiores a 70° e o segundo contendo uma amostra menor dos dados com ASZ entre 40° e 50° . Para ambos, o eixo y representa o índice K_t . No eixo x encontra-se a fração de cobertura de nuvens gerada através do sistema imageador. Observa-se, através da Figura 5.10 que a fração de cobertura de

nuvens aumenta com a com a redução da transmitância atmosférica, o que era esperado. É possível perceber a distribuição segmentada em dois grupamentos principais, em alta e baixa nebulosidade. Isso pode estar ocorrendo devido ao método não ter sensibilidade à profundidade óptica das nuvens. Esse fato será discutido adiante quando for apresentado o resultado do trabalho proposto por Martins et al. (2003) no final do capítulo 5. Essa tendência também pode ser visualizada para todo o grupo de dados de março de 2002 a fevereiro de 2003 através de uma janela menor de dados limitada entre 40° e 50° (Figura 5.11).

Outra suposição para a ocorrência dos dois blocos de dados pode ser que o sistema está interpretando o espalhamento atmosférico e aerossóis como nuvens tênues, como pode ser visto no exemplo da Figura 5.8, dia 13/07/02 onde o dia é claro, mas a ocorrência de particulados faz com que o programa classifique 30,2% dos píxeis como sendo contaminados por nuvens, originando assim os dois blocos de dados vistos nas Figuras das 5.10 os menores valores de fração de cobertura nuvens podem estar associados ao espalhamento atmosférico, aerossóis e nuvens tênues. Para o segundo grupo podem estar às nuvens mais pesadas com os menores valores de saturação. Em Florianópolis ocorre a formação de névoa durante os meses com pouca chuva, esse fenômeno é mais persistente e de maior intensidade no outono e no verão, entre a segunda quinzena de novembro e primeira quinzena de dezembro (Simões, 2003).

Ainda pode existir uma outra possível explicação para a ocorrência dos aglomerados de dados sobre a fração de cobertura de nuvens pode estar relacionada à fração de vários tipos de nuvens, como as vistas nas imagens da Figura 5.8. Em alguns casos como do dia 12/07 e 30/07 o céu apresenta vários tipos de nuvens, entretanto o estado de nebulosidade é parcial.

A solução para a investigação da ocorrência da segmentação dos dois blocos de dados está em coletar um período maior de imagens e investigar os possíveis caminhos para a determinação de uma metodologia que consiga classificar de modo mais detalhado os tipos de nuvens e tentar discriminar, os tipos de nuvens baixas mais comuns. A tarefa

de confrontar resultados de superfície com outras técnicas como as que utilizam imagens de satélite não é trivial . Guedes e Machado. (2000), abordam a questão das respostas pelo método de observação visual em superfície e por sensoriamento por satélite e indicam que a observação de nuvens baixas obtidas por um observador é mais precisa que a obtida por satélite; já para as nuvens altas, a obtida por satélite é mais precisa.

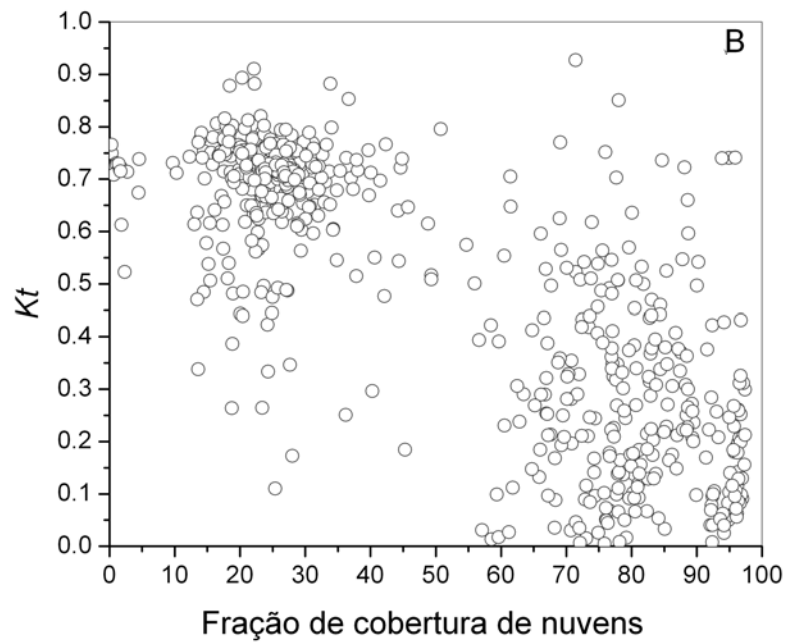
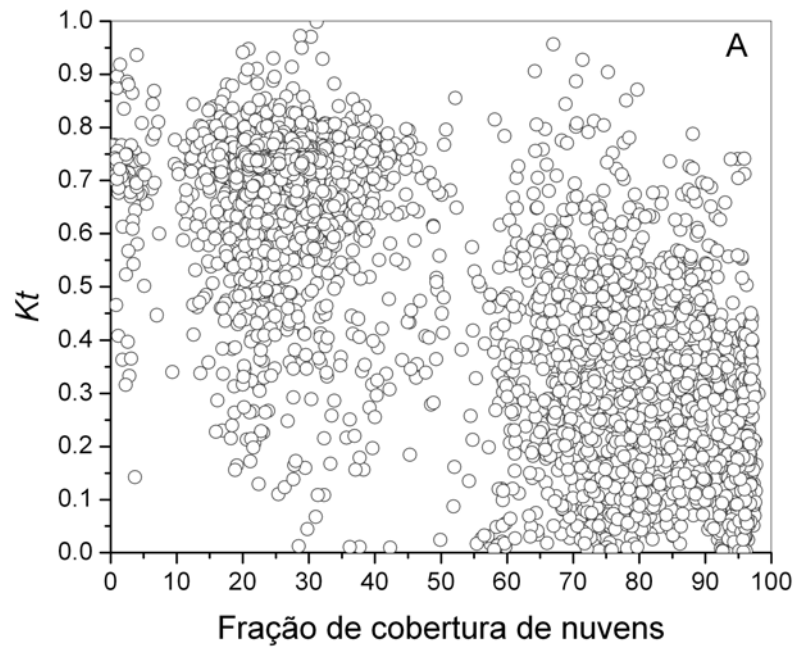


FIGURA 5.10 - (A) Gráficos do K_t contra a fração de cobertura de nuvens para ASZ < 70°; (B) para ASZ entre 40° e 50° para o período de março de 2002 a fevereiro de 2003.

A Figura 5.11 apresenta o gráfico do índice K_t versus a fração de cobertura de nuvens para todas as estações do ano com o ASZ $<70^\circ$. Com esse tipo de gráfico fica mais evidente o problema relacionado à influência da ausência de informação sobre a espessura óptica das nuvens nos dados do imageador. Por exemplo em todas as estações do ano é possível observar que, ao se aproximar de 100% para fração de nuvens, os valores do K_t variam entre 0,0 e 0,7, que seriam correspondentes a cenários de céu totalmente encoberto a céu parcialmente encoberto, com regiões de céu claro. Contudo, a tendência de redução da transmissão atmosférica, com o aumento da nebulosidade vista pela metodologia aplicada, se mantém. O mesmo efeito de dispersão pode ser visualizado na Figura 5.12, que apresenta K_t versus a fração de cobertura de nuvens para todas as estações do ano com o ASZ entre 40° e 50° .

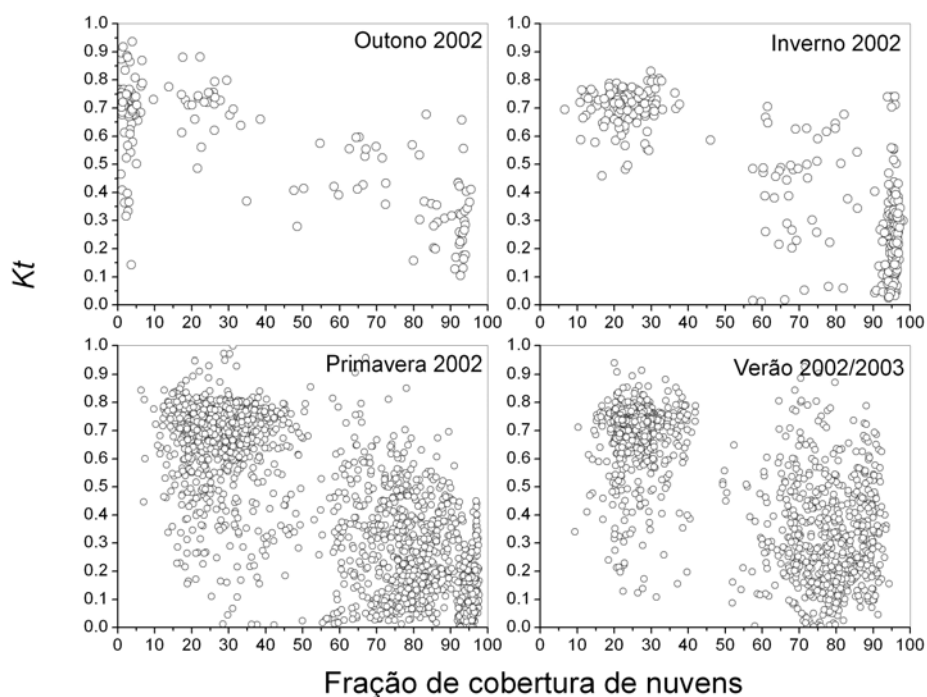


FIGURA 5.11 - Gráficos do K_t versus a fração de cobertura nuvens para ASZ $<70^\circ$ para estações do ano de 2002 e 2003.

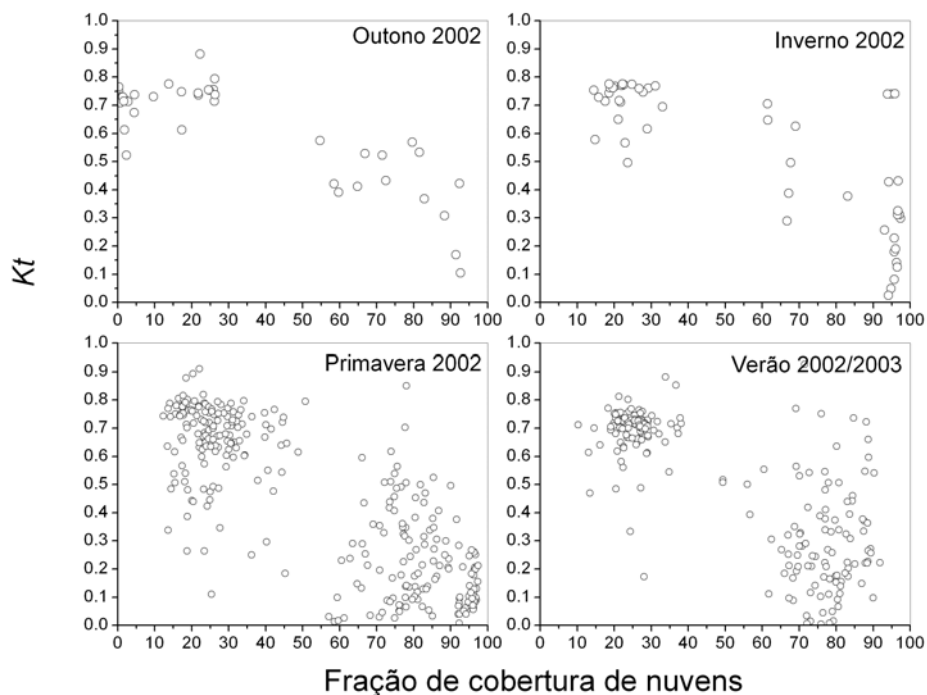


FIGURA 5.12 - Gráficos do K_t versus a fração de cobertura de nuvens para ASZ entre 40° e 50° para estações do ano 2002/2003.

Para auxiliar a avaliação das informações sobre a cobertura de nuvens, também foram empregadas as razões entre as radiações difusa e global medidas em superfície. À medida que ocorre o aumento da fração de cobertura de nuvens, ocorre o aumento da componente da radiação difusa. Descrever exatamente como acontece essa relação da radiação com as nuvens presentes na atmosfera é uma tarefa bastante complexa, isso devido aos mecanismos de interação entre cada tipo de nuvem, sua microfísica específica e sua fração cobrindo o céu observado (Apêndice A).

As Figuras 5.13, 5.14 e 5.15 apresentam o diagrama da razão de radiação difusa/global versus fração de cobertura de nuvens para todo o período em ângulos menores que 70° e entre 40° - 50° , para as quatro estações do ano e ângulos zenitais menores que 70° e para as quatro estações do ano e ângulos solares zenitais entre 40° - 50° , respectivamente.

É possível verificar na Figura 5.14 no gráfico referente ao outono de 2002 que entre 0% e 5% de fração de nuvens em x , há uma variação correspondente na razão de radiação difusa/global entre 0,1 e 0,4. Ou seja, mesmo com um cenário praticamente de céu claro ocorre um espalhamento que pode estar associado ao espalhamento atmosférico ou a aerossóis e não as nuvens. Entretanto isso é observado apenas para os meses de março, abril e maio de 2002.

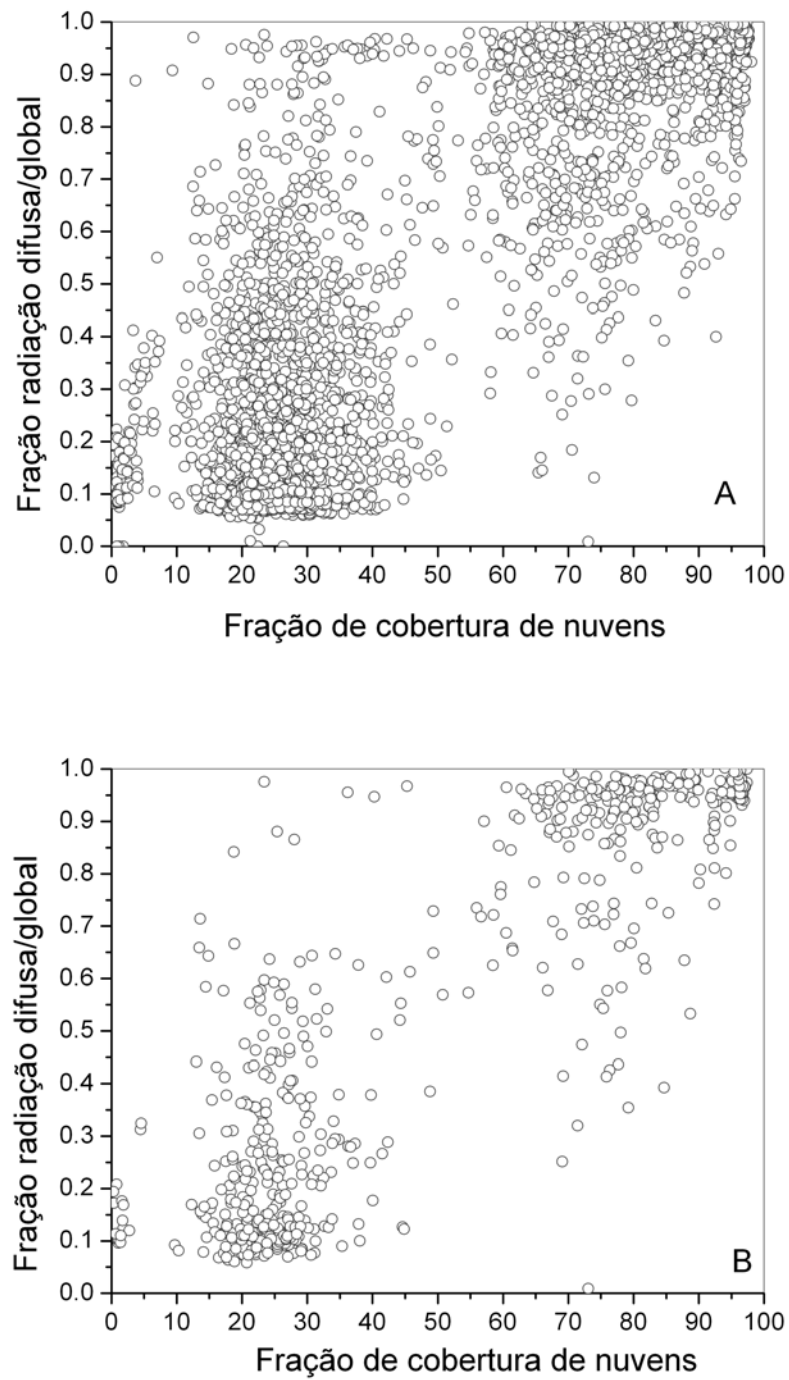


FIGURA 5.13 – (A) Razões entre radiação difusa e radiação global versus a fração de nuvens para ASZ < 70°; (B) para ASZ entre 40° e 50° para o período de março de 2002 a fevereiro de 2003.

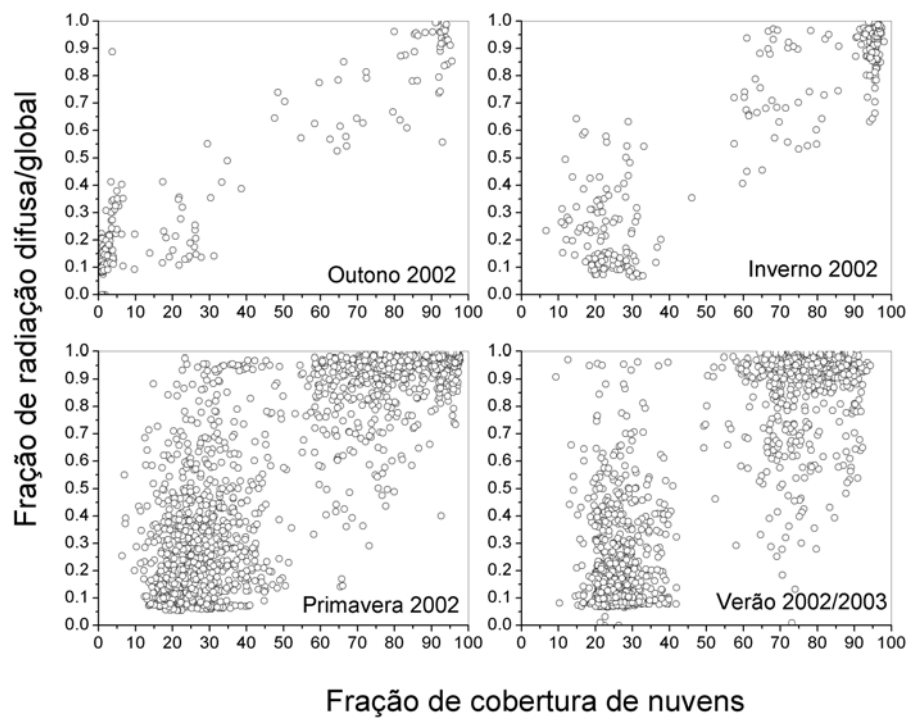


FIGURA 5.14 - Razões entre radiação difusa e radiação global versus a fração de cobertura de nuvens para $ASZ < 70^\circ$ para estações do ano 2002 e 2003.

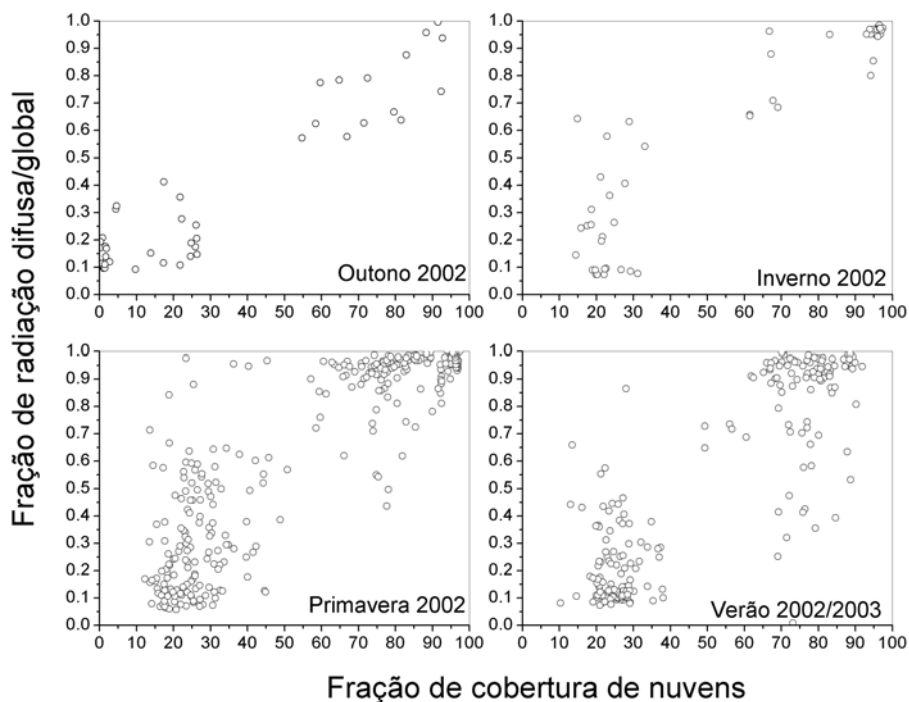


FIGURA 5.15 - Razões entre radiação difusa e radiação global versus a fração de cobertura de nuvens para ASZ entre 40° e 50° para estações do ano de 2002 e 2003.

A Figura 5.16 apresenta dois gráficos para os dias 4, 5 e 6 de outubro de 2002. O primeiro gráfico mostra as curvas da radiação solar global, difusa e direta horizontal¹. O segundo gráfico apresenta a fração de cobertura de nuvens para os mesmos dias. É possível visualizar três cenários típicos de condições de céu: céu claro, céu totalmente encoberto e céu parcialmente encoberto. O dia 4 de outubro um dia típico de céu claro. O dia 5 de outubro representa um cenário com o céu totalmente encoberto por nuvens. O dia 6 de outubro representa um cenário de céu parcialmente encoberto. Neste último caso a evolução da radiação solar pode ser acompanhada para o período do dia em que

¹ A radiação direta medida, é obtida numa superfície normal ao feixe solar e deve ser corrigida pelo cosseno do ângulo solar zenital para determinar-se a radiação direta sobre uma superfície horizontal. Desta forma radiação global = (radiação difusa+ radiação direta horizontal)

o céu esteve encoberto e para a segunda metade do dia em que a nebulosidade cede espaço ao céu claro. A feição da diminuição da nebulosidade dando lugar a céu claro fica bastante evidente no exemplo para fração de nuvens do dia 6 de outubro de 2002 .

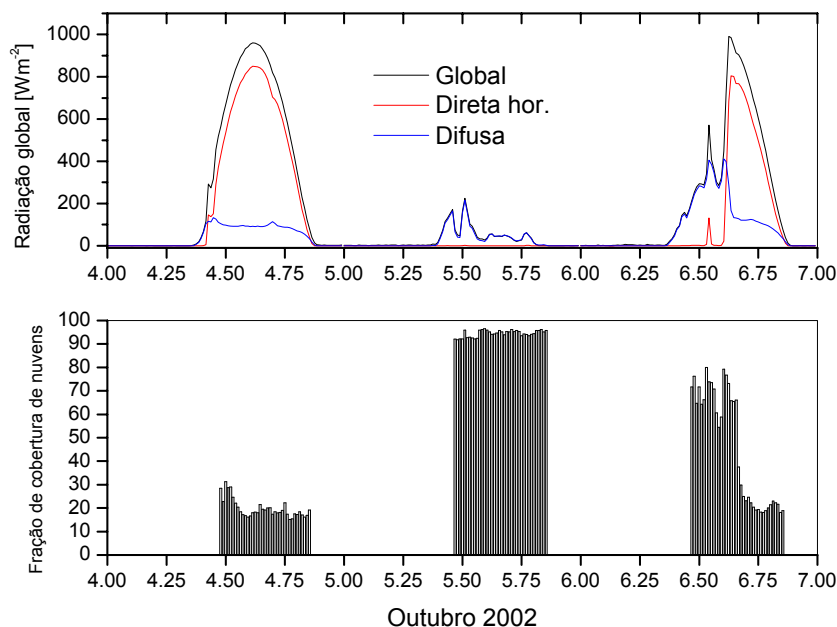


FIGURA 5.16 - Gráfico superior apresenta a radiação global, difusa e direta para os dias 4, 5 e 6 de Outubro de 2002. Gráfico inferior apresenta fração da cobertura de nuvens para o mesmo período.

A Tabela 5.3, composta por quatro colunas e cinco linhas, apresenta na primeira coluna as informações sobre os parâmetros utilizados para comparação dos dias: fração de nuvens e as integrais diárias de radiação solar global, difusa e direta, as demais colunas contêm as informações relacionadas aos parâmetros da primeira coluna para os dias 4, 5 e 6 de outubro de 2002.

O dia 4 de outubro, um dia claro com nebulosidade de $19,7 \pm 4,0 \%$, a integral diária da radiação global foi de $27,7 \text{ kW/m}^2$. O dia 5 apresenta um cenário com nebulosidade de $94,5 \pm 1,4\%$, a integral diária da radiação global foi de $2,8 \text{ kW/m}^2$. Em termos de diferença da nebulosidade entre o dia 4 e 5, tem-se variações diárias de nebulosidade

entre $94,5 \pm 1,4\%$ e $19,7 \pm 4,0\%$, com a variação da radiação solar global do dia 4 para o dia 5 de $24,9 \text{ kW/m}^2$.

O dia 6 apresenta nebulosidade de $45,7 \pm 24,5\%$, o que varia entre céu claro e céu parcialmente encoberto, quando comparado à diferença de nebulosidade entre os dias 4 (claro) e 5 (encoberto). Contudo, a diferença entre as integrais diárias da radiação global entre o dia 4 e 6 foi de $7,4 \text{ kW/m}^2$, entre o dia 5 e 6 foi de $17,5 \text{ kW/m}^2$.

TABELA 5.3 Comparação entre três dias para o mês de outubro de 2002.

Parâmetro/Dia	04 out 2002	05 out 2002	06 out 2002
Fração de nuvens	$19,7 \pm 4,0\%$	$94,5 \pm 1,4\%$	$45,7 \pm 24,5\%$
∫ diária global	$27,7 \text{ kW/m}^2$	$2,8 \text{ kW/m}^2$	$20,3 \text{ kW/m}^2$
∫ diária difusa	$4,1 \text{ kW/m}^2$	$2,5 \text{ kW/m}^2$	$8,1 \text{ kW/m}^2$
∫ diária direta horizontal	$23,0 \text{ kWm}^2$	$8,8 \cdot 10^{-3} \text{ kW/m}^2$	$11,8 \text{ kW/m}^2$

Através desses valores percebe-se que em condições de céu claro (dia 4 de outubro) e céu parcialmente encoberto (6 de outubro) a radiação solar pode ser bastante variada. A integral diária da radiação difusa praticamente dobra do dia 4 para o dia 6. A integral diária da radiação direta reduz-se a metade, isso para a condição de nebulosidade de $19,7 \pm 4,0\%$, visto na Figura 5.16 como céu claro, para céu parcialmente encoberto com nebulosidade de 21.2% - 70,2%.

5.3 Comparação entre os Dados do Imageador e os Dados de Satélite

Foi realizado um estudo comparativo entre o uso do coeficiente de cobertura efetiva de nuvens (C_{eff}) oriundo das imagens do satélite GOES-8 e a fração de cobertura de nuvens obtida pelo uso do sistema imageador. O C_{eff} fornecido pelas imagens de satélite e a fração de cobertura de nuvens fornecido pelo sistema de superfície foram inseridos no modelo físico BRASIL-SR para estimar a radiação solar global incidente na superfície para o período de janeiro a março de 2002, para o sítio de Florianópolis-SC. O cálculo do C_{eff} foi feito através de três algoritmos: (a) o algoritmo “extremo de radiação”, (b) o algoritmo “Média de mínimos” e (c) o algoritmo “razão IR/VIS”, desenvolvidos por Martins (2001).

O modelo BRASIL-SR é um modelo físico para obtenção de estimativas da radiação solar incidente na superfície que combina a utilização da aproximação de “Dois-Fluxos” na solução da equação de transferência radiativa com o uso de parâmetros determinados de forma estatística a partir de imagens de satélite (Martins, 2001). O modelo foi desenvolvido através de uma colaboração entre o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, a Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC e o Instituto de Física da Atmosfera GKSS da Alemanha (Martins, 2001) – Apêndice B no capítulo 2

O modelo BRASIL-SR apresentou um comportamento semelhante para a estimativa da radiação solar em superfície usando os três algoritmos desenvolvidos por Martins (2003). O erro quadrático médio (RMSE) e o desvio médio (MBE) das estimativas são apresentadas na Figura 5.18. A região de Florianópolis é uma região considerada boa em termos atmosféricos para a realização de trabalho dessa natureza, uma vez que não apresenta céu totalmente encoberto permanentemente ou o céu totalmente claro.

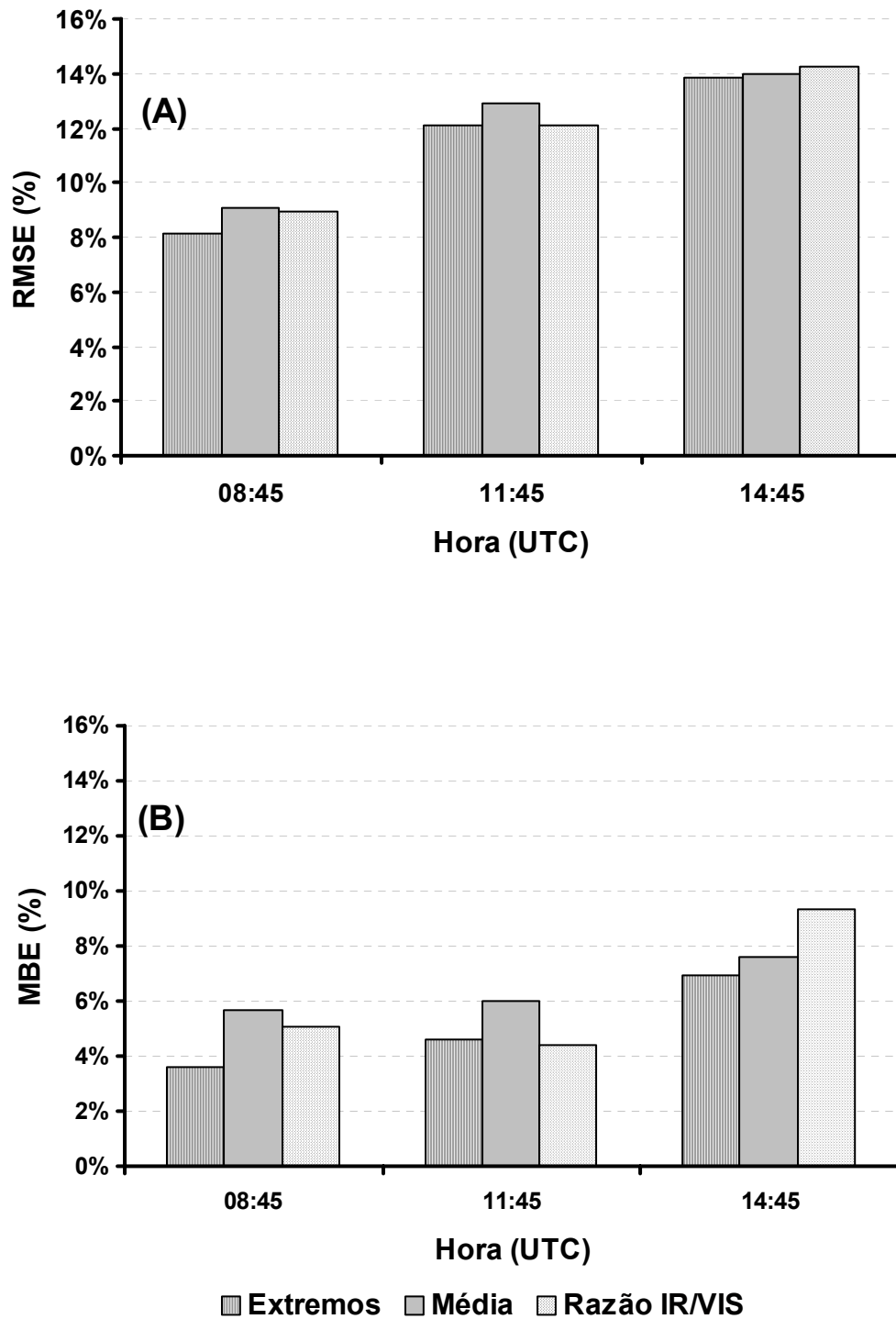


FIGURA 5.17 - (A) Erro quadrático médio (RMSE); (B) Desvio médio (MBE) das estimativas do modelo BRASIL-SR usando os valores de C_{eff} de cada um dos algoritmos.

A Figura 5.18 apresenta a estimativa da radiação solar versus medidas da radiação solar em superfície em dois casos: com a fração de nuvens obtida através do sistema de superfície (A) e utilizando o C_{eff} fornecido através das imagens de satélite (B). Observa-se no gráfico que para a informação sobre a fração de nuvens ocorre uma sub-estimativa da radiação solar em superfície. Por outro lado, a estimativa utilizando as imagens de satélite apresenta uma boa concordância (0,98) com as medidas de superfície. Os três algoritmos propostos por Martins (2003), apresentam resultados semelhantes, mas para apresentação na Figura 5.19 foi utilizado somente o método “extremo de radiância”.

A sub-estimativa realizada pelo modelo quando utiliza os dados da fração de cobertura de nuvens do imageador, pode ser também compreendida pelo estudo da razão entre a radiação difusa pela radiação global medidos no mesmo sítio de observação.

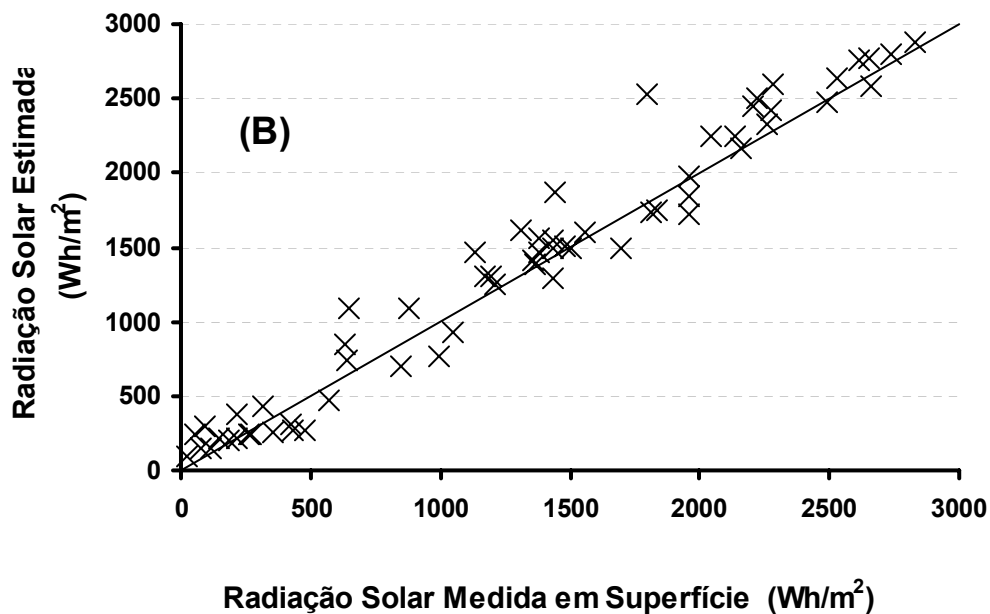
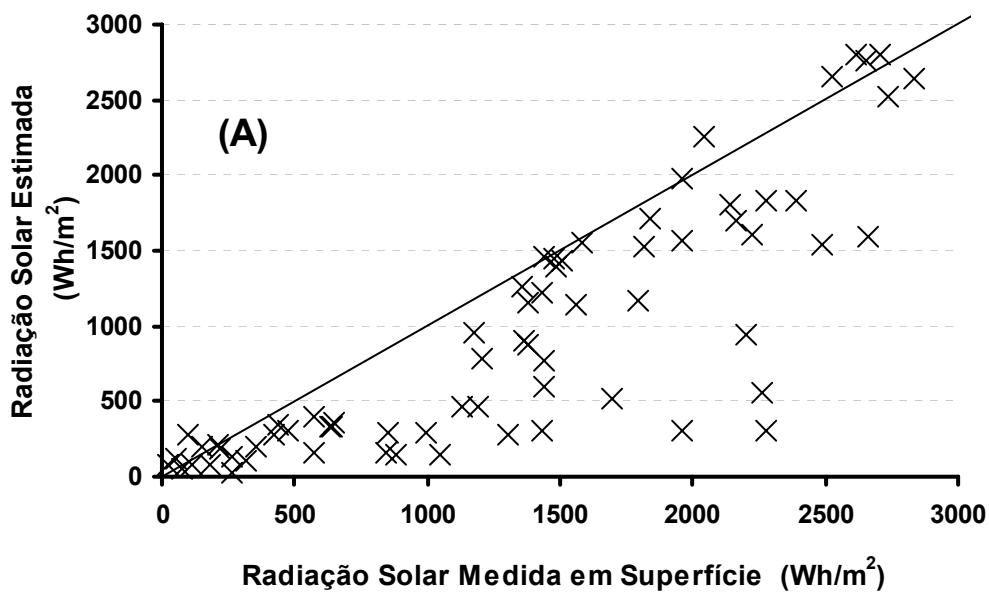


FIGURA 5.18 - (A) Análise comparativa entre a radiação solar estimada e medida obtida utilizando a fração de nuvens proveniente do imageador em superfície; (B) utilizando dados provenientes das imagens de satélite.

A Figura 5.19 apresenta dois gráficos, ambos contendo no eixo x a razão entre radiação difusa e a radiação global e no eixo y a fração de cobertura de nuvens obtidas pelo sistema imageador de superfície (A) e o C_{eff} oriundo de satélite em (B). Observa-se no gráfico (A), que para o valor de cobertura de nuvens correspondente a 1 ou seja (100% de cobertura de nuvens) visto no eixo y , ocorre em x uma variação na razão entre as razões da radiação difusa e global em intervalo de 0,6 a 1,0. É possível perceber a ausência da informação sobre a espessura ótica das nuvens, a cobertura de 100% do céu pode ser descrita por vários tipos de nuvens com profundidade ótica, por isso ocorre uma variação na razão da radiação solar vista no eixo x . O gráfico (B) para os dados de satélite são consistentes com os valores das razões de para dados extremos de C_{eff} em dias totalmente encoberto e dias totalmente claro.

Esses resultados mostram que a informação sobre a fração de cobertura de nuvens obtida pelo imageador não fornece a informação sobre a espessura ótica das nuvens.

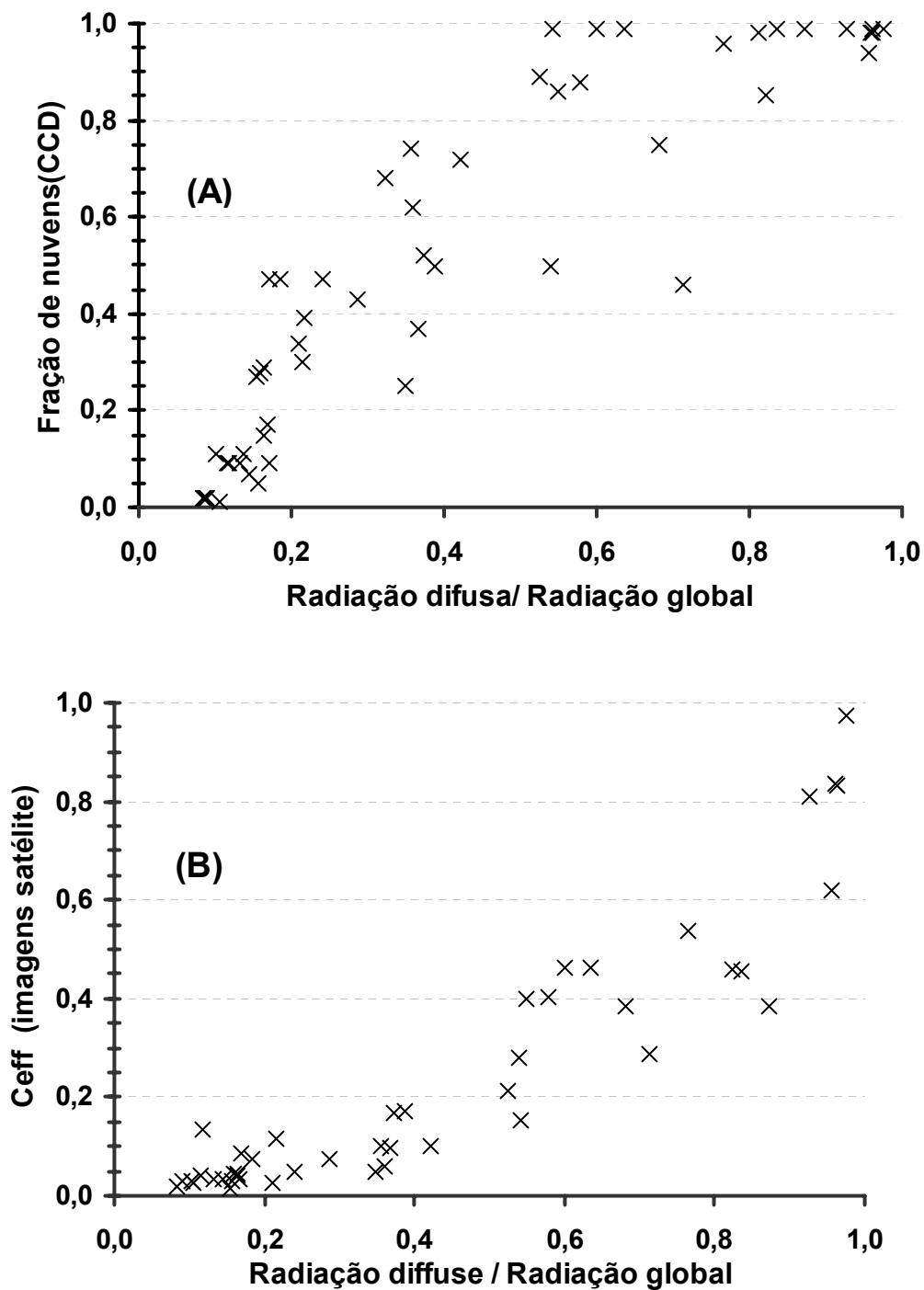


FIGURA 5.19 - (A) Relação entre as razões da radiação difusa e radiação global e a fração de nuvens proveniente do imageador de superfície; (B) mesma relação do gráfico anterior empregando o *Ceff* proveniente de satélite.

5.4 Conclusões

O objetivo principal do trabalho de doutorado foi desenvolver uma metodologia automática de campo para determinar a fração de cobertura de nuvens e validá-la para a região de Florianópolis. O objetivo foi alcançado e foi montada a primeira versão do protótipo do imageador que opera desde janeiro de 2002 e de modo automático e contínuo a partir de julho de 2002.

Durante essa primeira fase do trabalho, as imagens coletadas em Florianópolis foram trazidas a São José dos Campos para serem processadas e classificadas através do programa classificador de imagens. O programa foi reestruturado através da incorporação de módulos de processamento para auxiliar a extração de informações das imagens. Foi desenvolvida uma interface gráfica para *Windows*. Através desta interface, a interação entre o usuário e o programa classificador de imagens tornou-se mais simples, bem como o acesso aos arquivos de imagens em *RGB* e seus correspondentes em *IHS*.

Para avaliar os primeiros resultados sobre a cobertura de nuvens gerada pelo programa classificador, foram utilizados dados de radiação solar global, direta e difusa bem como o índice *Kt* para o mesmo sítio onde se encontra o sistema de captura de imagens. Essa etapa foi um passo de grande importância em termos de análise desta nova metodologia de análise de dados sobre fração de cobertura de nuvens. Estes dados adicionais foram empregados durante a fase de seleção de imagens que corresponderiam a imagens de treinamento das classes de céu claro e céu encoberto, visto no Capítulo 4. A escolha foi feita através da inspeção visual das imagens e através dos gráficos diários para as radiações: global, difusa e direta.

Através dos primeiros resultados sobre a fração de cobertura de nuvens em superfície, geradas pelo sistema de mapeamento automático de nuvens, foi possível observar que o outono foi à estação do ano de 2002 que apresentou maior condição de dias claros. O inverno apresenta uma maior variação na nebulosidade que o outono, entretanto, não apresenta ocorrência de baixa nebulosidade da ordem de 5% para fração de cobertura de

nuvens. A primavera de 2002 foi marcada pela presença de nuvens de modo mais acentuado, com fração de cobertura de nuvens bem mais distribuída que as demais estações do ano. O verão de 2002 e 2003, apresenta um aumento na fração de cobertura de nuvens em torno de 25%, esse valor aparece em torno de 45% dos dados.

Os dados de radiação solar foram utilizados para a geração do índice K_t , que representa a transmitância atmosférica. Foi possível perceber que há uma tendência de redução da transmitância atmosférica quando o céu torna-se mais encoberto por nuvens.

Foi confirmada através do trabalho a influência do aumento da fração de cobertura nuvens no crescimento da componente de radiação difusa. Com essa etapa o objetivo principal do trabalho proposto foi alcançado com êxito.

Durante o estudo realizado para os meses de janeiro, fevereiro e março de 2002, foi possível concluir que embora a informação sobre a fração de nuvens seja fornecida como passo inicial do trabalho proposto, seu uso ainda é limitado pelo fato de não incluir informação sobre a profundidade óptica das nuvens. Através das informações obtidas com esse estudo foi reforçada a idéia sobre importância do tipo de informação sobre cobertura de nuvens e seu devido uso.

A fração de cobertura de nuvens é um dado valioso para estimativa da radiação solar incidente em superfície, quando acompanhada de suas respectivas descrições sobre o tipo de cobertura de nuvens, pois assim estima-se a informação sobre a espessura óptica das mesmas. Entretanto, alguns trabalhos como o proposto por Crawford et al.(2003) mostram que a informação sobre a fração de cobertura de nuvens é algo bastante relevante quando utilizado junto a dados de radiação solar, como para estudo do comportamento da radiação UVB.

A fração de cobertura de nuvens é um dado que tem ampla aplicação em estudos de conforto térmico de ambientes. Projetos são desenvolvidos para aproveitamento da luz natural, a medida em que se torna conhecida a fração de cobertura de nuvens da região e sua sazonalidade, pois essa fração irá modificar o ambiente interno das construções.

Conhecer a disponibilidade da fração de cobertura de nuvens é algo fundamental para execução de projetos de aproveitamento da energia solar, como parte de programas de fornecimento e transmissão de energia.

5.4.1 Contribuições Relevantes do Trabalho

O trabalho apresenta algumas contribuições relevantes sob alguns pontos:

Operacional – através do desenvolvimento de um protótipo utilizado em campo para capturar imagens de todo o céu e o desenvolvimento de metodologia para a classificação das imagens. As características do trabalho são: aquisição automática, simplicidade de operação e baixo custo. Essas características permitem sua entrada em rotinas de operação em estações meteorológicas e experimentos de campo para auxiliar trabalhos científicos que requeiram esse tipo de informação e como auxílio em outras áreas como: agrometeorologia, engenharia civil, informações sobre cobertura de nuvens são ainda indispensáveis ao controle tráfego aéreo.

Científico – durante o trabalho foi gerada uma nova série de dados geofísicos sobre a fração da cobertura de nuvens (Apêndice E). Esses dados podem ser utilizados em conjunto com os dados de radiação solar e outros instrumentos para ajudar na solução de algumas questões científicas ainda em aberto, como por exemplo, auxiliar a avaliação e validação de dados oriundos de fotômetros, espectrofotômetros e sensores diversos que medem radiação solar.

Como resultado dos dados coletados durante o período de janeiro de 2002 a fevereiro de 2003, foi possível a publicações dos trabalhos:

SOUZA, M. P.; PEREIRA, E. B.; ANDRADE, M. A. R.; MATELLI NETO, S. L.
Sistema de Mapeamento Automático da Fração de Cobertura de Nuvens em Superfície In. XII CONGRESSO BRASILEIRO DE METEOROLOGIA, 2002, Foz do Iguaçu, Sociedade Brasileira de Meteorologia, 2002

MARTINS, F.R., SOUZA, M. P.; PEREIRA, E.B. Comparative study of Satellite and Ground Techniques for cloud cover determination. *Adv. Space Res.* Vol 32, n11 – pp 2275-2280, 2003

SOUZA, M.P.; MARTINS, F.R.;PEREIRA, E.B. Algoritmo para reconhecimento de nuvem em imagem digital, baseado na transformação do modelo RGB para IHS. *Cadernos, Centro Universitário São Camilo.* Vol 9,n4 – 82-88, 2003.

Trabalho Submetido:

Souza-ECHER, M.P., PEREIRA, E.B, BINS, L.S, ANDRADE, M.A .R. Assessment of the cloud cover state by a Ground Set Digital Camera (submetido *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* – AMS)

5.4.2 Limitações Técnicas do Trabalho

Uma limitação da primeira versão do sistema imageador e do programa de classificação das imagens, consiste no fato de não haver uma interação automática entre a entrega da imagem e o início do processamento. Atualmente o programa que captura as imagens não está associado de modo automático ao programa que realiza a classificação. Após a captura da imagem o programa classificador é ativado pelo usuário para iniciar o processamento das imagens capturadas pelo sistema imageador.

Uma das dificuldades encontradas durante o processamento das imagens está relacionada à degradação da qualidade das imagens com o tempo. Com o passar dos anos a câmera Pixera já não fornecia imagens com a mesma qualidade quando comparada às imagens do ano de 1998. Entretanto esse problema pode ser solucionado através da calibração periódica da câmera e através do uso de filtros que podem reduzir a incidência da radiação solar sobre o sensor.

5.5 Trabalhos Futuros

O trabalho sugere a necessidade da continuidade a fim de realizar um estudo mais detalhado nas imagens de outros anos para verificar a existência de algum fenômeno que possa estar sendo visto através das imagens gerando a separação dos dados em dois blocos mais acentuados, como visto. Com esse estudo será possível avaliar se o desempenho do atual programa e a necessidade de inovações em termos de processamento de imagens.

Um outro trabalho é o estabelecimento de comunicação direta entre o programa de captura e de processamento de imagens, que estão sendo operados separadamente. A captura acontece em Florianópolis e o processamento é realizado em São José dos Campos.

Deve-se estudar a variabilidade da cobertura de nuvens em função da sazonalidade e possível influência da cobertura de nuvens no microclima do sitio de observação/aquisição de imagens.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Amaral, M. G. V. **Iluminação Natural: Revisão da Legislação construtiva de Florianópolis. Florianópolis.** 1999. 135 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis. 1999.

Arking, A. The radiative effects of clouds and their impact on climate. **Bulletin of the American Meteorological Society**, v. 72, n. 6, p. 795-813, 1990.

Blair, T. A. **Meteorologia.** Rio de Janeiro: Centro de Publicações Técnico de Aliança, 1964. 374p.

Brasseur, G.; Solomon, S. **Aeronomy of the middle atmosphere.** Dordrecht: D. Reidel Publishing, 1986. 452p.

Ceballos, J. C.; Bottino, M. J. Improved solar radiation assessment by satellite using cloud classification. In: Smith, W. L. ; Timofeyev, Y. M. (eds.) . **Currents problems in atmospheric radiation.** [S. I.]: A. Deepak Publising, p .60-63, 2001

Climate Change – a threat to global development: acting now to safeguard the future. Bonn: Economica Verl; Karlsruhe: Muller. 1992.

Crowford, J.; Shetter, R.E.; Lefer, B.; Cantrell, B.; Junkermann, W.; Madronich, S. ; Calvert, J. Cloud impacts on UV spectral actinic flux observed during the intercomparison (IPMMI). **Journal of Geophysical Research**, v. 108, n. D16, p. 8545-8555, 2003.

Desbois, M.; Seze, G.; Szejwach, G. Automatic classification of clouds on METEOSAT imagery: application to high level clouds. **Journal of Applied Meteorology**, v. 21, p. 401-412, 1982.

Echer, E.; Souza, M. P.; Schuch, N. J. A Lei de Beer aplicada na atmosfera terrestre. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 23, n. 3, p. 276-283, 2001.

Feister, U.; Shields, J.; Karr, M.; Johnson, R.; Dehne, K.; Woldt, M. Ground-Based Cloud Images and Sky Radiances in the Visible and Near Infrared Region from Whole Sky Imager Measurements. In: Climate Monitoring – Satellite Application Facility Training Workshop, 2000, Dresden. **Proceedings...** Dresden: DWD/ EUMETSAT/WMO, 2000. Disponível em: <http://www.mpl.ucsd.edu/people/jshields/publications/publications.htm> Acesso em: 13 jul 2005.

Frölich, C.; Lean, J. The Sun's total irradiance: cycles, trends and related climate change uncertainties since 1976, **Geophysical Research. Letter**, v. 25, n. 23, p. 4377-4380, 1998.

Gonzalez, R.C. ; Woods, R.E. **Digital image processing.** Massachusetts: Addison-Wesley, 1992. 509p.

Guedes, R.L.; Machado, L. A. T Cobertura de Nuvens e Temperatura à Superfície e Obtidas por Satélite: uma comparação de 1984 a 1990. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v 15, n.1, p. 15-25, 2000.

Gurney,R.J.; Foster; J.L.; Parkinson; C.L. **Atlas of satellite observations related to global change**. New York: Cambridge University Press, 1995. 457p.

Hartmann, D. L. Radiative effects of clouds on Earth's climate. In: Hobbs, P. V. (ed.) **Aerosol-cloud-climate interactions** . San Diego: Academic Press, 1993. cap. 6, p. 151-173.

Herman, J. R. ; Goldberg, R. A. **Sun, weather, and climate**, Washington, D.C: NASA, 1978. 360 p.

Hobbs, P. V. ; **Aerosol - Cloud- climate Interactions**. San Diego: Academic Press, 1993. 235 p.

Holle, R. L. ; MacKay, S. Tropical Cloudiness from All-Sky Cameras on Brabados and Adjacent Atltic Ocean. **Journal of Applied Meteorology**. v.14 , p. 1437-1450, 1975.

Hoyt, D. V.; Schatten, K. H. **The role of the sun in climate change**. New York: Oxford University Press, 1997. 288 p.

Iqbal, M. **Introduction to Solar radiation**. London: Academic,1983. 381p.

Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). **Normais Climatológicas**. [S.1], 2005. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br>. Acesso em: 15 jun. 2005.

Iribarne, J. V.; Cho, H. R. **Atmospheric Physics**. Dordrecht, Holanda: Reidel Publishing, 1980. 212p.

Jones, P.A. Cloud-Cover distributions and correlations. **Journal of Applied Meteorology**. v. 31, p. 732-741, 1992.

Kirchhoff, V. W. J. H. **Ozônio e radiação UV-B**. São José dos Campos: Transtec, 1995. 73p.

Kirchhoff, V. W. J. H.; Nasser, N. A radiação UV-B e seus efeitos na pele humana. In: Seminário de Interações Geomédicas, 2., 1996, Campina Grande. **Anais...** Campina Grande: Universidade Federal da Paraíba, 1996.

Kirchhoff, V. W. J. H.; Casiccia, C. A. R.; Zamorano, F. The ozone hole over Punta Arenas, Chile. **Journal of Geophysical Research**, v. 102, n. D7, p. 8945-8953, 1997.

Lenoble, J. **Atmospheric Radiative Transfer**. Hampton: A. DEEPAK Publishing, 1993. 532p.

Long, C. N., T. P. Ackerman, J. J. DeLuisi, and J. Augustine Estimation of Fractional Sky Cover from Broadband SW Radiometer Measurements. In: Conference on Atmosphere and Radiation, 10., 1999, Madison:Wisconsin. **Proceedings...** Madison Wisconsin: [S.n],1999. Disponível em: http://science.arm.gov/~clong/SkyCov_art/1999radC.htm Acesso em: 13 jun 2005.

Madruga, J.L.; Souza, M. P.; Pereira, E.B. Avaliação da influência da cobertura efetiva de nuvens na concentração de biomassa no Oceano Atlântico Sul utilizando dados de satélite. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11., 2003, Belo Horizonte. **Anais**. São José dos Campos:INPE 2003. p. 1587- 1590.

Martins, F. R. **Influência do processo de determinação da cobertura de nuvens e dos aerossóis de queimada no modelo físico de radiação BRASIL-SR**. 2001. 300p Tese (Doutorado em Geofísica Espacial) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos.

Martins, F. R.; Souza, M. P.; Pereira, E. B. Comparative study of satellite and ground techniques for cloud cover determination . **Advances in Space Research**. v. 32. n.11, p. 2275-2280, 2003.

Mascarenhas, N. D. A .; Velasco, F. R.D. **Processamento digital de imagens**.,São Paulo: IME-USP,1984. 235p. Quarta Escola de Computação.

McCartney, J. H. **Optics of the atmosphere** – scattering by molecules and particles. New York: John Wiley and Sons. 1976. 426p.

Nimer, E. **Clima** – geografia do Brasil – Região Sul. Rio de Janeiro: SERGRAF- IBGE v. 5, p. 35-79.1977.

Pereira, E.B.; Colle, S. A energia que vem do sol. **Ciência Hoje**, v.22, n 130, p. 24-35. 1997.

Paltridge, G.W.; Platt; C.M.R. **Radiative processes in meteorology and climatology**. Amsterdam: Elsevier Scientific, 1976. 318p.

Richard, J. A. **Remote sensing analysis: an introduction**. Australia : Springer- Verlag 1995. 363p.

Rigozo, N. R.; Nordemann, D. J. R.; Echer, E.; Zanandrea, A. ; Gonzalez, W. D. Solar variability effects studied by tree-ring data wavelet analysis. **Advances in Space Research**, v.29, n.12, p. 1985-1988, 2002.

Rossow, W. B.; Garder, L. C.; Lacis, A. L. Global, seasonal cloud variations from satellite radiance measurements. Part I: Sensitivity of Analysis. **Journal of Climate**, v.2, n.5, p. 419-457, 1989.

Salby, M. L. **Fundamentals of atmospheric physics**. New York: Academic, 1995. 624p.

Santos, J. M. **Contribuição aos estudos de albedo**. 1957. 47p. Tese (Doutorado em Agrometeorologia)- Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba. 1957.

Schaefer, V.J.; Day, A.J. **A field guide to the atmosphere**. Boston: Printed in United States of America, 1981, 359p.

Seinfeld, J.H. **Atmospheric chemistry and physics of air pollution**. New York: John Wiley & Sons, 1986. 730p

Shields, J.E.; Karr, M.E.; Tooman, T.P.; Sowle, D.H.; Moore, T.S. **The whole sky image-** a year of progress, 1988. disponível em:

http://www.arm.gov/docs/documents/technical/conf_9803/shields-98.pdf

Souza, M. P. **Desenvolvimento de uma nova metodologia para determinação de cobertura efetiva de nuvens**. São José dos Campos. 1999. 107p. (INPE-8144-TDI/753). Dissertação (Mestrado em Geofísica Espacial) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2001.

Souza-Echer, M.P.; Pereira, E.B.; Bins, L.S. ; Andrade, M.A .R. Assessment of the cloud cover state by a Ground Set Digital Camera. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, 2004. submetido

Svensmark, H. ; Friis-Christensen, E. Variation of Cosmic Ray Flux and Global Cloud Coverage – A Missing Link in Solar-climate Relationships. **Journal Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics**. V.59, n. 11, p. 1225–1232, 1997.

Silva, A. A. **A espessura óptica de aerossóis na banda do UV-B**. São José dos Campos 129p.(INPE). Tese (Doutorado em Geofísica espacial INPE-8754-TDI/797). Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais , São José dos Campos, 2001

Simões, M. C **Formulação de um repositório hidroeletrólítico para o trabalho físico ostensivo de policiais militares, adaptados às variações climáticas de Florianópolis**. 2003. 271p. Tese (Engenharia de Produção) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2003.

Vianello, R.L.; Alves, A.R. **Meteorologia básica e aplicações**. Belo Horizonte: Imprensa Universitária,1991. 449p.

Wallace, J. M.; Hobbs, P. V. **Atmospheric Science: an introduction survey**. Orlando: Academic Press, 1977. 467p.

Wielicki, B. A.; Parker, L. Cloud properties observed using Landsat Satellite Data. In: International Radiation Symposium, 1988, Hampton. **Proceedings...** Hampton: A. Deepak Publishing, 1988. p. 161-165.

Wiscombe, W. J. Improved Mie scattering algorithms. **Applied Optics**, v.19, n. 9, p.1505-1509, 1980.

World Climate Research Programme (WCRP) **WMO /ICSU Joint Scientific Committee Revised Instructions Manual on Radiation Instruments and Measurements**. WCRP Publications series n.7 WMO/TD – n 149 (1986)

Zamorano Banda, F. C **Determinação do governo UV-B utilizando o radiômetro multicanal GUV: aplicação a medidas realizadas em Punta Arenas**. 2003. 300p. Tese (Doutorado em Geofísica Espacial - INPE) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais , São José dos Campos.

BIBLIOGRAFIA CONSULTADA

Balsamo, E.P.; Candidi, M.; Consolini, G.; Morici, L. The Italian all-sky camera for auroral Observations at Terra Nova Bay (Antarctica). **Cosmics Physics in the year 2000**, v. 58, p.101-104, 1997.

Davis, G.B.; Griggs, D.J.; Sullivan, G.D. Automatic estimation of cloud amount using computer vision, **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v.9, p. 81-85.

Hay, J. E.; Hanson, K. J. A satellite-based methodology for determining solar irradiance at the ocean surface during GATE. **Bulletin American Meteorological Society**, 59, n. 11, p. 1549, 1978.

Harley, R. M.; Arthur, R. W. **The pocket handbook of image processing algorithms in C**. Washington: Prentice-Hall, 1993. 303p

Moriarty, W.W. Cloud Cover as derived from surface observations, sunshine duration, and satellite observations. **Solar Energy**, v 47, n.. 3, p. 219-222, 1991.

Mather, P.M. **Computer processing of remote-sensed images**. London: British Library, 1993.

Myler, R. H.; Weeks, R.A. **The pocket handbook of image processing algorithms in C**. New Jersey: Prentice Hall ,1993.

Sabburg, J.; Wong, J. Evaluation of a Ground-Based Sky Camera System for use in Surface Irradiance Measurement. **Journal of Atmospheric and Oceanic Technology**, v.16, n. 6, p.752-759, 1999.

Shields, J. E.; Johnson, R.W.; Karr, M.E. ; Wertz, J.L. Automated Day/Night Whole Sky Imagers for Field Assessment of Cloud cover Distribution and Radiances Distributions. In: Symposium on Meteorological Observation and Instrumentation, 10., 1998, Hartsough **Proceedings...** Hartsough: American. Meteorology. Society, 1998. Disponível em: <http://www.mpl.ucsd.edu/people/jshields/publications/publications.htm> Acesso em: 13 jun 2005.

Slater. P. N. **Remote sensing** – optics and optical systems. Tucson: Addison-Wesley Publishing, 1980.:575p.

APÊNDICE A

REPORTAGEM

1. ARTIGO DA FOLHA DE SÃO PAULO – CADERNO DE CIÊNCIAS - PÁGINA A 18, DOMINGO, 16 DE JUNHO DE 2000.

CIENTISTAS TENTAM RESOLVER ENIGMA DAS NUVENS QUE ABSORVEM RADIAÇÃO.

Meio-dia. Para o bando de cientistas que baixou no norte do Estado de Oklahoma (EUA), é a hora crucial do dia. O avião carregado de instrumentos está no ar e a antena na pista segue cada um de seus movimentos. Nas telas dos computadores, cientistas analisaram a torrente de dados. Todos com suas tarefas enquanto o Sol está alto no céu, mas antes têm de aguardar por sua presa. Por hoje nada feito. Nuvens têm dessas coisas.

O Departamento de Energia dos EUA enviou essa equipe para o espaço aéreo rural de Oklahoma, em fevereiro passado, para resolver um debate que vem pegando fogo há pelo menos seis anos. Em 1995, três grupos haviam detectado algo impossível no céu: nuvens que absorvem muito mais radiação solar do que seria permitido pelas leis físicas.

O time de Oklahoma pode, no entanto, estar em condições de oferecer uma resposta ao mistério. O grupo de 70 cientistas tem tanto céticos quanto defensores da absorção exagerada. Eles estarão usando o estado-da-arte da tecnologia para medir o destino dos raios solares quando incidem sobre uma camada de nuvens.

Os modelos de simulação da mudança climática nem tentam computar a interação real entre nuvens e a luz solar. Na atmosfera simulada, um fóton (partícula de luz), ao atingir a nuvem ricocheteia entre as gotículas e cristais de gelo, como bolinhas numa máquina de fliperama, e raramente sai num ponto logo abaixo de onde entrou.

“Muitos concordariam que há uma anomalia”, diz Graeme Stephens, da Universidade do Estado do Colorado. No geral, contudo, os climatologistas achavam que ela fosse insignificante.

Tempo “Bom”

A questão explodiu em 1995, quando os três estudos relataram, na revista SCIECE, 50% mais absorção no céu nublado do que no céu sem nuvens. O artigo tinha sido escrito pelo veterano Robert Cess, da Universidade do Estado de Nova York. Ele tinha usado dados de satélite sobre radiação solar no topo da atmosfera e medidas de superfície para comparar a absorção pela atmosfera na presença e ausência de nuvens. Francisco Valero, da Universidade da Califórnia, Peter Pilewskie da NASA, adotaram abordagens mais diretas.

Com dois aviões voando em formação abaixo e acima das nuvens, mediram a radiação solar entrando e saindo da atmosfera entre aeronaves. Obtiveram valores ainda maiores.

Agora, os caçadores de nuvens de Oklahoma estão nervosos. Após quase três semanas, só capturaram a presa uma vez. Quatro dias de observação são o mínimo para um experimento bem-sucedido, e o tempo está acabando.

Finalmente o tempo “melhora”. Fotos de satélite mostraram o Estado coberto por espessas nuvens. O avião decola no fim da manhã e coleta dados por 90 minutos.

Ao término do experimento, no final de abril terão sido mais três dias de observações, dando ao grupo exatamente a quantidade mínima de dias nublados.

Os cientistas da força tarefa planejam uma reunião, em alguns meses, para discutir os dados. Esperam aplinar dúvidas sobre calibragem dos instrumentos e critérios de análise. Será a vez de especialistas em atmosfera se debruçarem sobre os resultados.

Espera-se que a partir daí, o calor comesse a se dissipar, permitindo que a luz se faça.

APÊNDICE B
NUVENS E ALGORITMOS

1. Tipos de nuvens – Gêneros




<p><i>Cirrus</i></p> 	<p>São nuvens em forma de filamentos, de maior altitude, formam-se entre os 5 e os 11 Km de altitude e são inteiramente constituídas por cristais de gelo. Elas podem apresentar forma de pequenos fragmentos brancos e sedosos ou então serem repuxados pelo vento e tomarem a forma de finos filamentos com as extremidades enroladas.</p>
<p><i>Cirrocumulus</i></p> 	<p>Os <i>cirrocumulos</i> do "céu encarneirado" são nuvens altas formadas entre os 5 e os 11 Km. São constituídas por cristais de gelo e desenvolvem uma configuração regular em bandas e filas de pequeníssimos tufo branco.</p>
<p><i>Cirrostratus</i></p> 	<p>São nuvens de cristais de gelo, com o aspecto de um véu nebuloso transparente, formadas entre 5 e 11Km. É freqüente seguirem os <i>cirrus</i> na aproximação de uma frente quente, mas difícil distingui-las da bruma ou da neblina. Contudo, ao contrário da bruma, que é constituída por gotículas de água, os minúsculos cristais de gelo dos quais o véu de <i>Cirrostratus</i> é composto refratam a luz, produzindo os característicos halos à roda do sol e da lua.</p>

FIGURA B.1 (A) Nuvens altas.

FONTE: <http://www.eps-cunha-rivara.rcts.pt/meteorologia/nuvens.htm>

Nuvens Médias

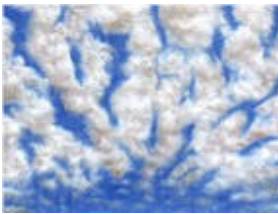


<p style="text-align: center;"><i>Altostratus</i></p> 	<p>São nuvens brancas ou acinzentadas das camadas médias da tropopausa, com a base entre os 2Km e 6Km, formam-se acima dos <i>Stratocumulus</i>. Podem ter origem em extensões mais altas de <i>stratocumulus</i> ou em <i>Cumulus</i> de grandes dimensões; Podem ainda aparecer num céu sem nuvens quando, pela aproximação de uma frente, o ar quente é obrigado a subir. Os <i>Altostratus</i> são basicamente constituídos por gotículas de água mas podem conter cristais de gelo nas camadas superiores. De acordo com o movimento do ar podem tomar variadas formas, incluindo as bandas paralelas e configurações em célula.</p>
<p style="text-align: center;"><i>Altostratus</i></p> 	<p>São camadas uniformes acinzentadas ou azuladas de nuvens, cobrindo o céu totalmente ou parcialmente, com base entre os 2Km e os 6Km de altitude. Esta camada é por vezes suficientemente tênue para deixar perceber a posição do sol através dela, mas sem o deixar ver claramente. Consistem principalmente de gotículas de água mas estas podem congelar ao serem capturadas por cristais de gelo que caem de nuvens mais altas. Tornam-se mais espessas e abaixam a sua base no seio de massa de ar frio e úmido, podem transformar-se em <i>nimbostratus</i>, as nuvens causadoras de chuva.</p>
<p style="text-align: center;"><i>Nimbostratus</i></p> 	<p><i>Nimbostratus</i> é uma camada nebulosa espessa, cinzenta, muitas vezes sombria, com base entre os 900 metros e os 3 km. Dá lugar a chuva ou neve, de acordo com a temperatura do ar abaixo dela . O <i>nimbostratus</i> produz um céu pesado cinzento e úmido, freqüentemente com chuva contínua e apresentando farrapos soltos de nuvens cinzentas que correm muito depressa abaixo da base da nuvem principal. Os <i>Nimbostratus</i> formam-se quando uma camada de ar quente é forçada a elevar-se por cima do ar frio .</p>

FIGURA B.1 (B) Nuvens médias

Nuvens Baixas





<p style="text-align: center;"><i>Stratocumulus</i></p> 	<p>Os <i>stratocumulus</i> são nuvens baixas e muitas vezes formam-se quando o vento provoca turbulência no ar úmido junto ao solo, misturando verticalmente o ar e transportando ar úmido da superfície para cima. O <i>stratocumulus</i> não é uma camada acinzentada uniforme como os <i>stratus</i> (por isso a adição da palavra "cúmulos"). São compostos por amontoados de nuvens esbranquiçadas, quase sempre com porções escuras, constituídas por massas globulares ou em rolos, separadas por vezes por porções de céu descoberto. Quando estas nuvens são espessas, o contraste entre as partes claras e escuras é grande. A sua base situa-se entre os 400m e os 2km.</p>
<p style="text-align: center;"><i>Stratus</i></p> 	<p>A camada nebulosa, baixa e cinzenta, designada por <i>stratus</i>, tem a base a cerca de 400m, ou ainda mais abaixo. Formam-se em condições de atmosfera estável, mas onde o vento à superfície mantém, abaixo da base da nuvem, uma camada de ar bem misturado e demasiado quente para que se possa ocorrer condensação. O nevoeiro é um <i>stratus</i> que se forma ao nível do solo na ausência da turbulência., e inversamente, os <i>stratus</i> podem resultar da subida do nevoeiro.</p>
<p style="text-align: center;"><i>Cumulus</i></p> 	<p>Formam-se muitas vezes agrupamentos destas nuvens, todas com a base ao mesmo nível (Alinhamento de nuvens). O aquecimento local do sol provoca corrente ascendente de ar quente (Térmicas), cada uma das quais produz uma nuvem em forma de couve flor. Os cúmulos têm contornos bem marcados devido continua produção de gotículas dentro da nuvem, alimentada pelas correntes ascendentes de ar quente, e à sua rápida evaporação no ar mais são circundante. Os cúmulos pequenos duram apenas entre 15 e 20 minutos, dissipando a medida que se afastam da fonte de ar quente que alimenta a sua formação.</p>
<p style="text-align: center;"><i>Cumulus de tempo bom</i></p> 	<p>Em terrenos abertos e planos os cúmulos alinham-se freqüentemente em filas. Estas formações são por vezes o resultado de uma sucessão de nuvens geradas no ar úmido transportado para cima por correntes térmicas, e logo empurradas pelo vento. Num dia de sol, sobre uma superfície plana e uniforme, formam-se bandas paralelas regulares de nuvens, que se estendem até perder de vista. Isto resulta de uma sucessão de correntes ascendentes e descendentes, criadas pelo aquecimento do solo e pela direção da brisa. Nas imagens de satélite é freqüente observar-se grandes extensões destes alinhamentos de nuvens sobre os oceanos.</p>

FIGURA B.1 (C) – Nuvens Baixas (continua)




<p><i>Cumulus congestus</i></p> 	<p>Os pequenos <i>cumulos</i> de "bom tempo" podem evoluir e desenvolver cúmulos maiores- conhecidos por cúmulos congestus- que são uma das nuvens mais espetaculares pois as correntes ascendentes contínuas no interior da nuvem, produzem bolhas e tufos em variação constante na superfície superior da nuvem. Desenvolvem-se quando o ar no interior da nuvem se mantém mais quente que o ar à sua volta e assim a nuvem permanece mais leve do que a sua vizinhança, continuando a desenvolver-se para cima, alimentada pelas fortes correntes ascendentes no interior da nuvem, subindo o ar a velocidades que chegam a atingir os 20 m por segundo. Os topos dos <i>cumulus</i> congestus podem atingir os 13 km.</p>
<p><i>Cumulonimbus</i></p> 	<p>Em condições atmosféricas extremamente instáveis formam-se enormes e densos <i>cumulus</i>, brancos nas bordas e escuros na base e que se elevam como torres gigantescas até ao limite superior da troposfera. Crescem a partir de cúmulos grandes, têm a base entre os 500m e os 2Km e o topo situa-se entre os 3 e 6 Km. Em condições instáveis, o ar no interior destas nuvens é mais quente do que o ar na vizinhança e assim as nuvens continuam a crescer, devido às fortes correntes ascendentes convectivas no seu interior. O calor resultante da condensação de enormes quantidades de vapor de água realimenta as correntes ascendentes de ar quente. O topo destas nuvens congela em cristais de gelo, que crescem constantemente à medida que as gotículas de água são arrastadas para cima.. A cúpula borbulhante, característica dos <i>cumulus</i> em desenvolvimento, torna-se achatada assim que congela frequentemente em forma de penacho (a "bigorna"), por ação dos ventos dominantes a grande altitude.</p>
	<p>Quando se observa o desenvolvimento dos grandes <i>cumulos</i> congestus, pode ter-se a sorte de avistar os sinais da evasiva nuvem <i>pileus</i>, uma nuvem pequena com uma cúpula superior arredondada, formada transitoriamente acima de um <i>cumulo</i> em desenvolvimento. Quando os <i>cumulus</i> se elevam até uma camada superior de ar, que tem movimento horizontal, o ar ascendente que os precedem abre uma pequena brecha nesta camada, antes de penetrar completamente nela. Se o ar for suficientemente úmido forma-se uma pequena nuvem no momento em que o ar atinge o pico desta brecha, mas rapidamente o topo do cúmulo chega aí e a nuvem <i>pileus</i> desaparece na massa de nuvem que se eleva.</p>

FIGURA B.1 (C) Conclusão.


<p><i>Rastos de condensação e de dissipação</i></p> 	<p>Os rastros de condensação são Inhas retilíneas de nuvens que se formam no rasto dos aviões, como resultado da condensação do vapor de água emitido pelos motores. Numa atmosfera seca dispersam-se rapidamente, numa atmosfera úmida permanecem durante muito tempo, atenuando-se gradualmente e tornando-se cada vez menos nítidos. Os traços de dissipação são bandas de céu limpo, resultante da evaporação numa nuvem provocada pelo ar quente dos motores, à medida que o avião atravessa a nuvem.</p>
---	--

FIGURA B.1 (D) Rastros de condensação

2. Estudo Comparativo de Três Algoritmos para Obtenção do Coeficiente de Cobertura Efetiva de Nuvens a partir de Imagens de Satélite GOES-8.

Por: Martins e Pereira

(XI Sociedade brasileira de sensoriamento remoto 2003)

2.1 Modelo de transferência radiativa BRASIL-SR

O modelo BRASIL-SR é um modelo físico para obtenção de estimativas da radiação solar incidente na superfície que combina a utilização da aproximação de “Dois-Fluxos” na solução da equação de transferência radiativa com o uso de parâmetros determinados de forma estatística a partir de imagens de satélite (Martins, 2001). A irradiação solar incidente na superfície, F_g , é obtida a partir de duas componentes independentes conforme descrito em (1). A primeira componente corresponde à condição de céu claro e a segunda refere-se à condição de céu encoberto. As duas componentes podem ser estimadas a partir de parametrização dos processos físicos bem conhecidos que ocorrem na atmosfera utilizando dados climatológicos para a solução numérica da equação de transferência radiativa. A irradiação solar no topo da atmosfera é representado por F_0 .

$$F_g = F_0 \left[(1 - C_{eff}) t_{clear} + C_{eff} t_{cloud} \right] \quad \text{onde} \quad C_{eff} = \frac{[L - L_{clr}]}{[L_{cld} - L_{clr}]} \quad (B1)$$

A natureza aleatória do fluxo de radiação solar em qualquer condição de nebulosidade é incluída no modelo através do coeficiente de cobertura efetiva de nuvens, C_{eff} . O valor de C_{eff} é determinado a partir dos valores de radiância visível, L , medido pelo satélite GOES-8. Os índices “*clr*” e “*cld*” referem-se à condição de céu claro e céu encoberto, respectivamente. Os valores C_{eff} descrevem dois efeitos causados pela presença de nuvens: distribuição espacial e profundidade ótica da cobertura de nuvens.

2.2 Determinação da cobertura efetiva de nuvens

A determinação do coeficiente de cobertura de nuvens foi realizada utilizando 3 algoritmos diferentes: a) o algoritmo “Extremos de radiância”, b) o algoritmo “Média de mínimos” e c) o algoritmo “Razão IR/VIS”. A diferença entre os três algoritmos reside

na determinação da radiância de céu claro e céu encoberto. O primeiro algoritmo é bastante simples e baseia-se no fato que o albedo de superfície é muito menor do que o albedo de nuvens para um dado ângulo zenital. Dessa forma, os valores mínimo e máximo da radiância visível medido pelo satélite no intervalo de um mês são utilizados para a condição de céu claro e de céu encoberto, respectivamente. No entanto, diversos fatores reduzem a confiabilidade do coeficiente de cobertura de nuvens obtido por este algoritmo. Dentre eles podem-se citar a não identificação de nuvens cirrus utilizando apenas a região espectral do visível, a ocorrência de nebulosidade permanente, ou a não ocorrência de nebulosidade durante o mês em estudo. Estes dois últimos eventos podem ocorrer, por exemplo, na região amazônica que apresenta grande nebulosidade na estação chuvosa, ou na região do sertão nordestino onde é pequena a ocorrência de nebulosidade na maior parte do ano.

Os demais algoritmos foram desenvolvidos a fim de aumentar a confiabilidade do coeficiente de cobertura de nuvens. O algoritmo “Média de mínimos” baseia-se em estudos desenvolvidos por Rossow et al. (1989) que demonstram que a variabilidade da radiância visível medida pelo satélite é maior na presença de nuvens. Assim, se não há contaminação de nuvens nos 5 menores valores de radiância visível, o desvio padrão da média destes valores será menor do que quando ocorrer a presença de nuvens. Neste algoritmo, a radiância de céu claro será a média dos menores valores de radiância visível desde que o desvio padrão da média seja inferior a um limite pré-estabelecido. Se o limite é superado, o maior dos valores de radiância é descartado e repete-se o procedimento. A radiância de céu encoberto utiliza o valor máximo de radiância no período em estudo desde que seja superior ao valor utilizado na condição de céu claro mais três vezes o seu desvio padrão.

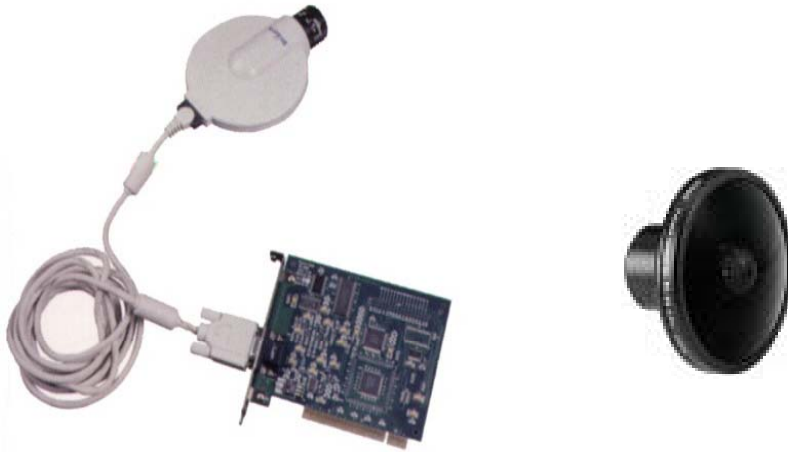
O algoritmo “Razão IR/VIS” utiliza a razão entre as radiâncias medidas pelo satélite nos canais infravermelho e visível para determinação das condições de céu claro e céu encoberto. O valor de céu claro é obtido através da identificação dos maiores valores de razão entre a radiância infravermelha (IR) e a radiância visível (VIS) que correspondem a características associadas à superfície do planeta (na ausência de cobertura de neve): temperatura elevada e albedo reduzido. A utilização de dois canais espectrais permite a

identificação de nuvens com maior facilidade conforme observado por Desbois et al.(1982). Na situação em que estes dois algoritmos não conseguem definir as radiâncias de céu claro e encoberto, esses valores são determinados a partir de médias espaciais dos valores obtidos para píxeis circunvizinhos .

APÊNDICE C

INSTRUMENTAÇÃO E CALIBRAÇÃO

1. Câmera Pixera Modelo PCS20232



(A)

(B)

FIGURA C.1 – (A) Câmera pixera e interface de comunicação; (B) lente FC-E8 da *Nikon*

2. Perspectivas do Sistema Imageador

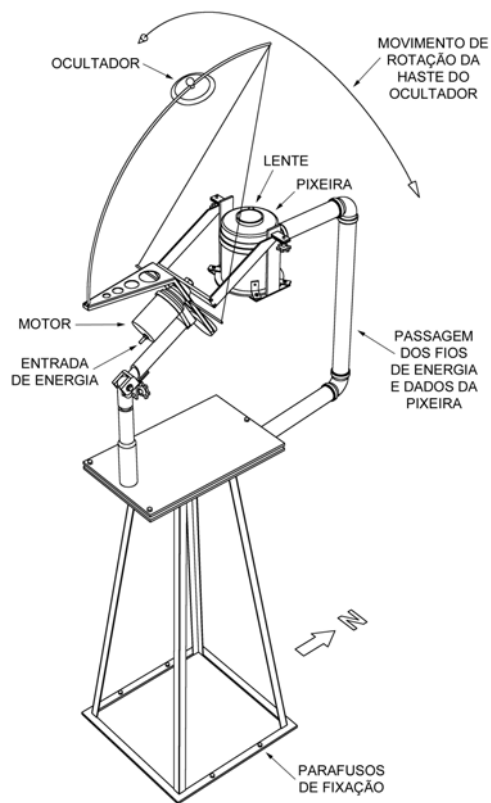


FIGURA C.2 – Perspectiva 1 do protótipo

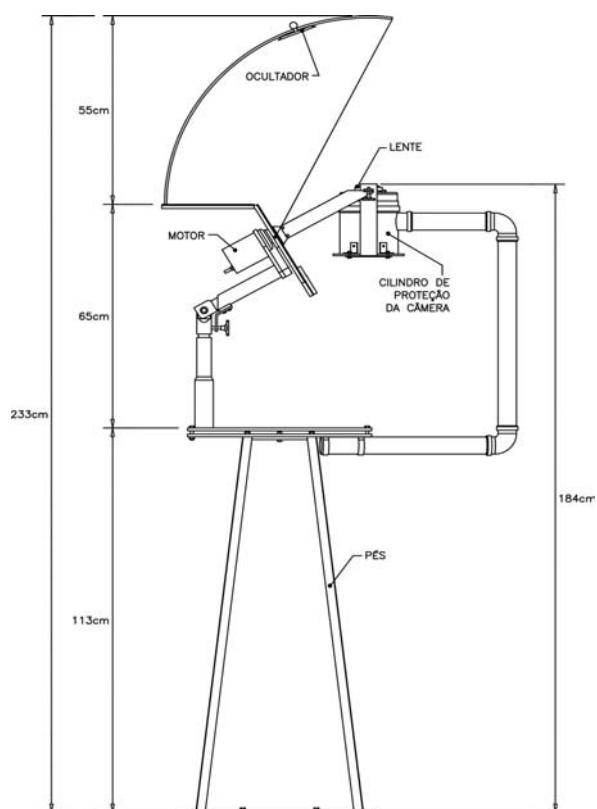


FIGURA C.3 – Perspectiva 2 do protótipo

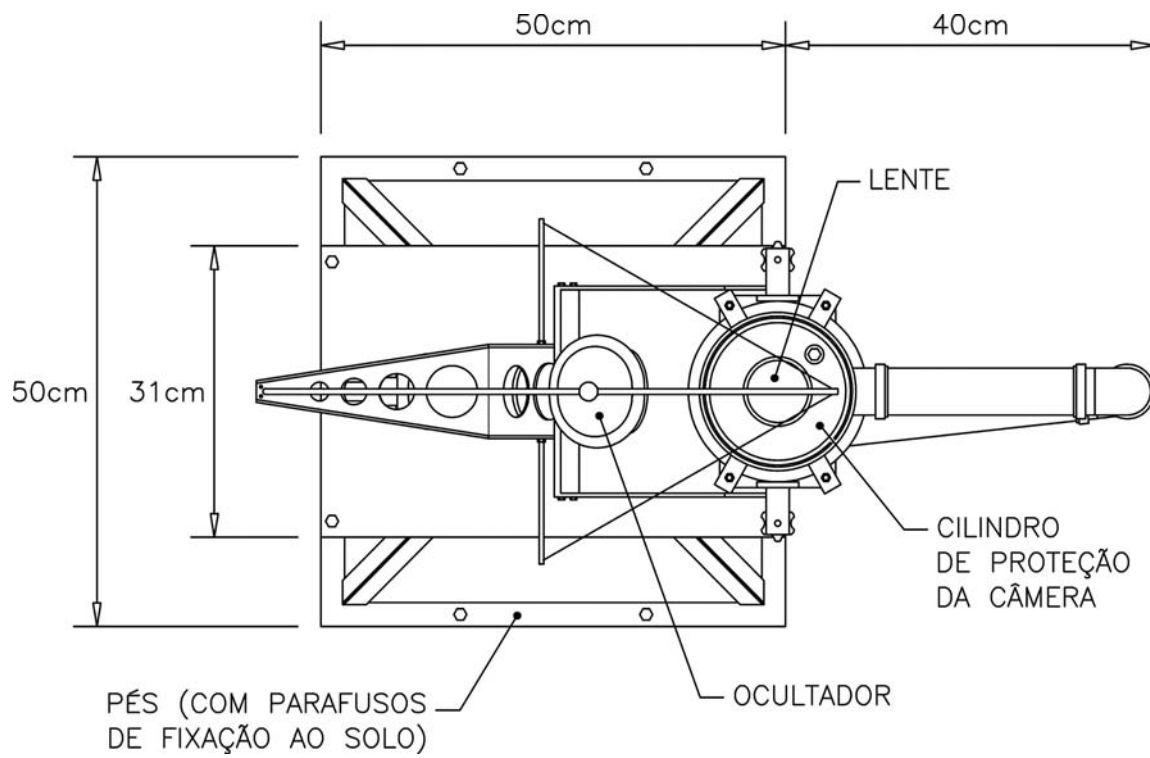


FIGURA C.4 – Perspectiva 3 do protótipo

3. Material Usado para Avaliação da Distorção da Lente

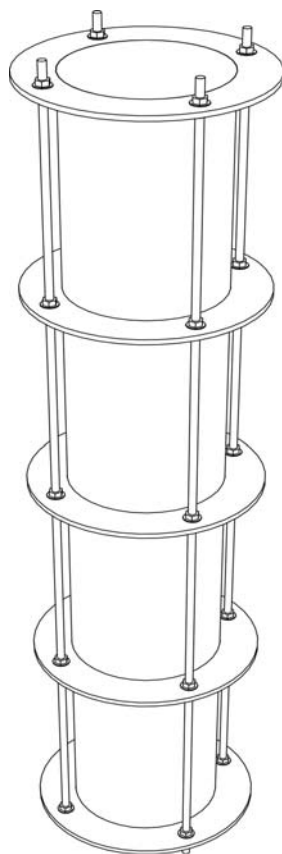


FIGURA C.5 – Estrutura montada para captura das imagens com círculos concêntricos

4. Tabela 3.3

TABELA 3.2 Ilustrativa da montagem dos valores coletados por cada digitalizador simulando a lente fixa nos ângulos 0°, 90°, 180° e 270°.

0° Lente	A	B	C	D	E	F	G	H
Digitalizadores	0-180	180-0	45- 225	225-45	90-270	270-90	135-315	315-135
1	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos
2	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos
3	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos
90° Lente	A	B	C	D	E	F	G	H
Digitalizadores	45- 225	225-45	90-270	270-90	135-315	315-135	0-180	180-0
1	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos
2	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos
3	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos
180° Lente	A	B	C	D	E	F	G	H
Digitalizadores	90-270	270-90	135-315	315-135	0-180	180-0	45- 225	225-45
1	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos
2	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos
3	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos
270° Lente	A	B	C	D	E	F	G	H
Digitalizadores	135-315	315-135	0-180	180-0	45- 225	225-45	135-315	315-135
1	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos
2	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos
3	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos	14 pontos

5. Verificação da Região Externa da Imagem



FIGURA C.6 – Imagem utilizada para exemplificar a variação da saturação na parte externa da imagem. (Figura 3.15 do Capítulo 3).

APÊNDICE D 1 TRANSFORMAÇÃO RGB PARA IHS

1. Imagens coloridas

Por Gonzalez e Woods (1992)

Processamento de imagens coloridas: O uso de cores em processamento de imagens é motivado por dois fatores principais: primeiramente, em análise automatizada de imagens, a cor é um descritor poderoso que freqüentemente simplifica a identificação do objeto e a extração de uma cena. Em segundo lugar, em análise de imagens realizadas por seres humanos, a motivação para o uso de cores é que o olho humano pode discernir milhares de tons e intensidades de cores, comparado a cerca de apenas duas dúzias de tons de cinza.

Basicamente, as cores que os seres humanos percebem num objeto são determinadas pela natureza da luz refletida do objeto. Um corpo que reflete a luz balanceada em todos os comprimentos de onda visíveis, aparece branco para o observador. Entretanto, um corpo que favoreça a reflectância em uma variação limitada do espectro visível exhibe alguns tons de cores.

A caracterização da luz é essencial para a ciência das cores. Se a luz for acromática (sem cores) seu único atributo será sua intensidade. A luz acromática é aquela que se vê num aparelho de televisão branco e preto; o nível de cinza refere-se a uma medida escalar de intensidade que varia do preto ao cinza e finalmente ao branco.

A luz cromática abarca o espectro de energia eletromagnética desde aproximadamente 400 até 700 nm. Três valores básicos são usados para descrever a qualidade de uma fonte de luz cromática: radiância, luminância e brilho. *Radiância* é a quantidade total de energia que flui de uma fonte de luz, sendo usualmente medida em watt (W). *Luminância*, medida em lúmem (Lm) dá uma medida da quantidade de energia que um observador percebe de uma fonte de luz. Por exemplo, a luz emitida de uma fonte operando no infravermelho distante poderia ter energia significativa (radiância), mas um observador dificilmente a perceberia; sua luminância seria quase zero. Finalmente, o *Brilho* é um descritor subjetivo, que é praticamente impossível de ser medido. Ele

incorpora a noção acromática de intensidade, sendo um dos fatores chave na descrição da sensação de cores.

Devido à estrutura do olho humano, todas as cores são vistas como combinações variáveis das três cores, chamadas primárias: vermelho (R), verde (G) e azul (B). A Comissão Internacional sobre Iluminação (CIE – *Commission Internationale de l'Eclairage*) determinou, em 1931, os seguintes valores de comprimentos de onda específicos das cores primárias: azul = 435,8 nm; verde = 546,1 nm; vermelho = 700 nm.

2. Modelo RGB

Usando as cores primárias ou secundárias, é possível representar quantitativamente qualquer cor como um grupo de três números, ou coeficientes. Os três conjuntos de cores podem ser plotados em um conjunto de eixos tridimensionais, onde cada eixo representa uma cor no sistema RGB . Os coeficientes vão definir quanto de cada cor é necessária para produzir qualquer tonalidade. Matematicamente, uma cor qualquer C é dada por $C = rR + gG + bB$ onde R, G, B são as cores primárias e r, g, b são os coeficientes de mistura.

A Figura D1.1 representa o cubo de cores no sistema RGB . As linhas das cores primárias puras aumentam em intensidade com a distância da origem. Note-se que por essa explicação, a cor preta representa a origem comum, estando o valor máximo desse sistema (representado pelo branco) situado no extremo da diagonal. Se quantidades iguais das cores primárias são misturadas ($r=g=b$), diferentes tonalidades de cinza serão produzidas, do preto ao branco. Portanto a diagonal pontilhada no cubo representa o chamado eixo cinza também chamado eixo acromático, que é a linha onde os valores de r, g, b são proporcionalmente iguais.

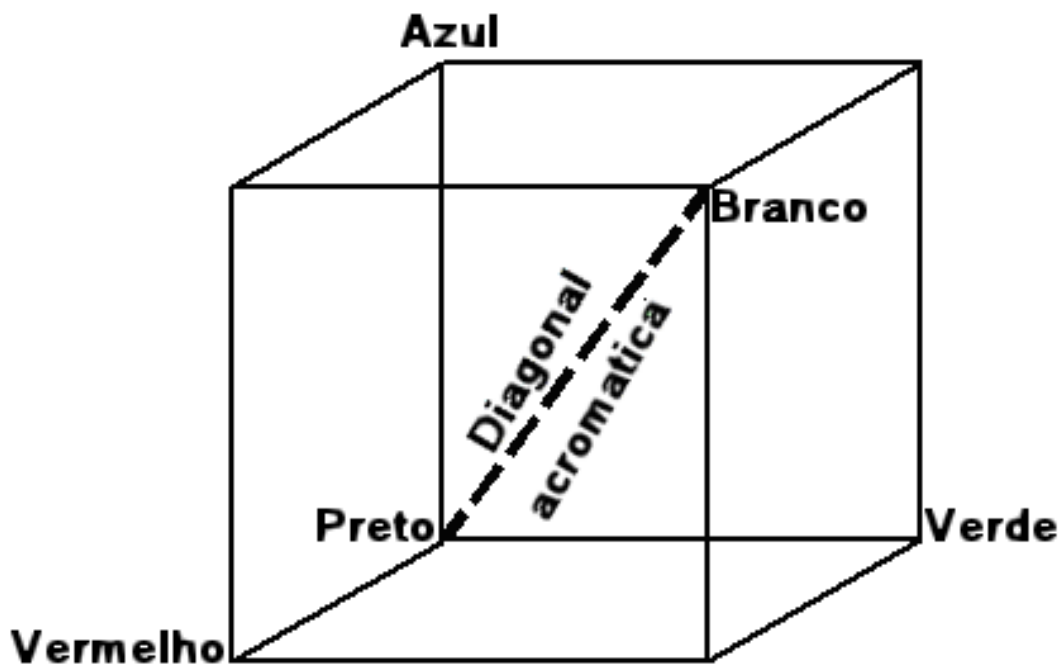


FIGURA D1.1 - Cubo de cores *RGB* exibindo os tons de cinza ao longo da diagonal pontilhada.

FONTE: Modificada de Crósta (1993, p. 60).

Intensidade, Matiz e Saturação (IHS)

- A Intensidade ou brilho, é a medida de energia total envolvida em todos os comprimentos de onda, sendo portanto responsável pela sensação de brilho dessa energia incidente sobre o olho .
- Matiz, ou cor de um objeto, é a medida do comprimento de onda médio da luz que se reflete ou se emite, definindo, portanto, a cor do objeto.
- A Saturação ou pureza, expressa o intervalo de comprimento de onda ao redor do comprimento de onda médio, no qual a energia é refletida ou transmitida. Um alto valor de saturação resulta em uma cor espectralmente pura, ao passo que um baixo valor indica uma mistura de comprimentos de onda que irá produzir tons pastéis.

2.1 Conversão de RGB para IHS

O modelo *RGB* é definido com respeito a um modelo de um cubo. Contudo, as componentes de cor do modelo *IHS* (matiz e saturação) são definidas com respeito ao triângulo de cores mostrado na Figura D1.2(A) (lembrando-se que num diagrama de cromaticidade três cores dadas ficam num triângulo cujos vértices são definidos por três cores iniciais). Na Figura D1.2(A), nota-se que o matiz (*H*), do ponto *P* é o ângulo do vetor mostrado com relação ao eixo vermelho. Por isso quando $H = 0^\circ$, a cor é vermelha, quando H é 60° a cor é amarela, e assim por diante. A saturação (*S*), do ponto *P* é o grau para o qual a cor não é diluída por branco e é proporcional à distância de *P* ao centro do triângulo. Quanto mais distante *P* é do centro do triângulo, mais saturada é a sua cor.

Intensidade no modelo *IHS* é medida com respeito à linha perpendicular ao triângulo e passando pelo seu centro. As intensidades ao longo desta linha que fica abaixo do triângulo tendem a preto, intensidades que ficam acima tendem de claro ao branco.

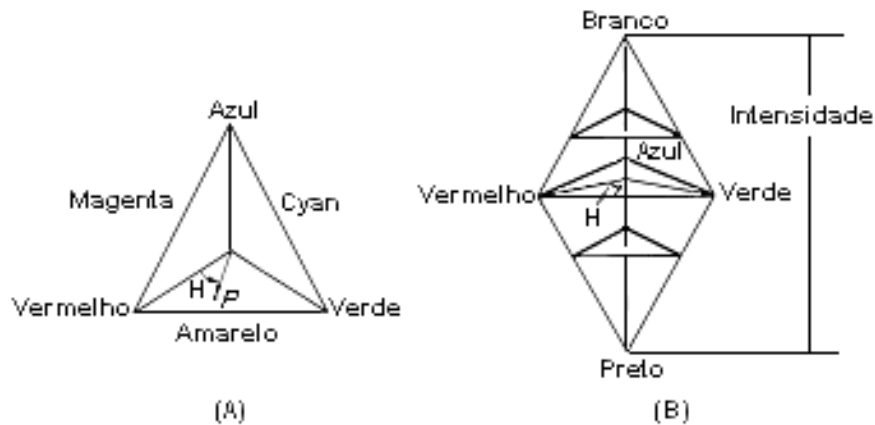


FIGURA D1.2 - (A) *IHS* Triângulo de cores; (B) *IHS* sólido de cores.

FONTE: modificada de Gonzalez e Woods (1992, p.230).

Combinando matiz, saturação e intensidade num espaço de cores tridimensional obtém-se a estrutura piramidal de três lados mostrada na Figura D1.2(B). Qualquer ponto na superfície da estrutura representa uma cor pura saturada. A matiz da cor é determinada pelo ângulo com respeito ao eixo vermelho e sua intensidade é a distância perpendicular do ponto preto, isto é, quanto mais distante do preto maior a intensidade da cor. Comentários similares se aplicam a pontos dentro da estrutura, a única diferença é que as cores se tornam menos saturadas à medida que se aproximam do eixo vertical.

As cores no modelo *IHS* são definidas com respeito aos valores de vermelho, verde e azul normalizados, dados em termos dos RGB primários por:

$$r = R / (R+G+B) \tag{D1.1}$$

$$g = G / (R+G+B) \tag{D1.2}$$

$$b = B / (R+G+B) \tag{D1.3}$$

onde, a afirmativa é de que R , G e B tenham sido normalizados e estejam entre $[0,1]$. As equações (1) e (3) mostram que r , g e b também estão no intervalo $[0,1]$ e que

$$r+g+b=1 \tag{D1.4}$$

Note que mesmo que R , G e B possam ser 1 simultaneamente, as variáveis normalizadas tem que satisfazer a equação (D1.4). De fato, esta é a equação do plano que contém o triângulo IHS .

Para qualquer um dos três componentes de cor R , G e B , cada um com valores na faixa $[0,1]$, a componente de intensidade no modelo IHS é definida como

$$I = (R+G+B)/3 \quad (D1.5)$$

que fornece valores entre $[0,1]$.

O próximo passo é obter H e S . Para obter H é exigida a construção geométrica do triângulo IHS mostrada nas Figuras D1.3 (A), (B) e (C), da qual nota-se o seguinte:

- (a) o ponto W tem as coordenadas $(1/3, 1/3, 1/3)$
- (b) um ponto P de cor arbitrária tem coordenadas (r, g, b)
- (c) o vetor criado da origem até W é denotado por \mathbf{w} . Similarmente, os vetores da origem até P_R e até P são denotados \mathbf{p}_R e \mathbf{p} , respectivamente.
- (d) as linhas $P_iQ_i, i = R, G, B$, intersectam-se em W por construção.
- (e) fazendo $r_0=R/I$, $g_0=G/I$ e $b_0=B/I$, onde I é dado na Equação (D1.5), vemos da Figura D.2(a) que P_RQ_R é o "locus" dos pontos (r_0, g_0, b_0) para os quais $g_0=b_0$. Similarmente, $r_0=g_0$ ao longo de P_BQ_B , e $r_0=b_0$ ao longo de P_GQ_G .
- (f) qualquer ponto na região plana limitada pelo triângulo $P_RQ_RP_G$ tem $g_0 \geq b_0$. Qualquer ponto na região limitada pelo triângulo $P_RQ_RP_B$ tem $b_0 \geq g_0$. Assim, a reta P_RQ_R separa a região $g_0 > b_0$ da região $g_0 < b_0$. Similarmente P_GQ_G separa a região $b_0 > r_0$ da região $b_0 < r_0$, e P_BQ_B separa a região $g_0 > r_0$ da região $g_0 < r_0$.
- (g) para $i=R, G$ ou B , $|WQ_i|/|P_iQ_i| = 1/3$ e $|WP_i|/|P_iQ_i| = 2/3$, onde $|\arg|$ denota o comprimento do argumento.

(h) por definição o setor RG é a região limitada por $WP_R P_G$, o setor GB é a região limitada $WP_G P_B$, e o setor BR é a região limitada por $WP_B P_R$.

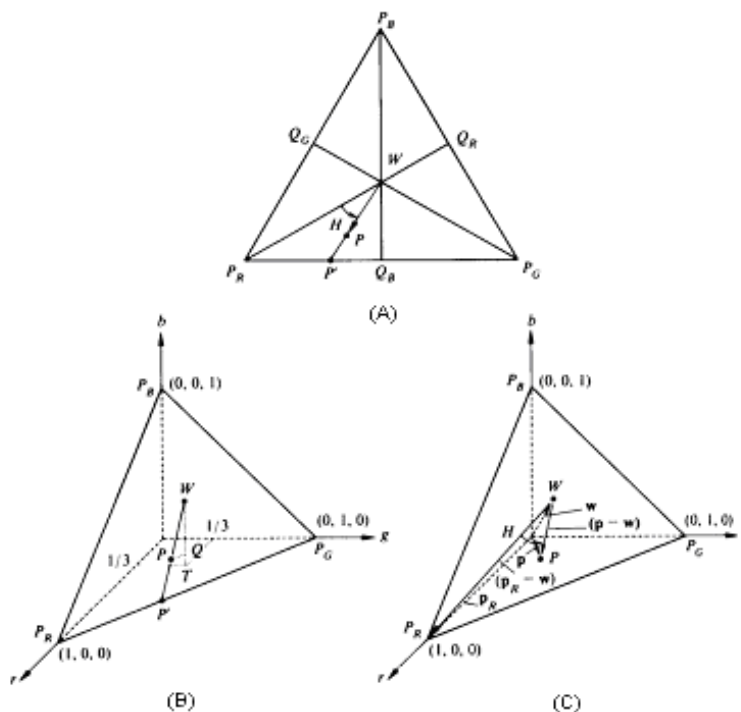


FIGURA D1.3 - Detalhes do triângulo de cores IHS necessários para se obter as expressões de matiz e saturação.

FONTE: modificada de Gonzalez e Woods (1992, p.232)

Com referência a Figura D1.3 (A), a matiz de uma cor arbitrária é definida pelo ângulo entre os segmentos de linha WP_R e WP ou, na forma vetorial Figura D1.3 (C), pelo ângulo entre os vetores $(\mathbf{p}_R - \mathbf{w})$ e $(\mathbf{p} - \mathbf{w})$. Por exemplo, como estabelecido antes, $H = 0^\circ$ corresponde ao vermelho, $H = 120^\circ$ corresponde ao verde, e assim por diante. Se bem que o ângulo H poderia ser medido com respeito a qualquer linha passando por W , medindo matiz com respeito ao vermelho é convenção. Em geral, a seguinte equação é válida para $0^\circ \leq H \leq 180^\circ$:

$$(\mathbf{p}-\mathbf{w}) \cdot (\mathbf{p}_R-\mathbf{w}) = \|\mathbf{p}-\mathbf{w}\| \|\mathbf{p}_R-\mathbf{w}\| \cos H \quad (D1.6)$$

onde $(\mathbf{x}) \cdot (\mathbf{y}) = \mathbf{x}^T \mathbf{y} = \|\mathbf{x}\| \|\mathbf{y}\| \cos H$ denota o produto interno de dois vetores, e a barra dupla denota a norma do argumento do vetor. O problema agora é expressar o resultado em termos de um conjunto de *RGB* primários.

Das condições (a) e (b) temos,

$$\|\mathbf{p} - \mathbf{w}\| = \left[\left(r - \frac{1}{3} \right)^2 + \left(g - \frac{1}{3} \right)^2 + \left(b - \frac{1}{3} \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{D1.7})$$

Como o comprimento de um vetor \mathbf{a} com componentes a_1, a_2 e a_3 é $\|\mathbf{a}\| = [a_1^2 + a_2^2 + a_3^2]^{1/2}$, substituindo nas equações (D1.1) - (D1.3) para r, g e b em (D1.7) e simplificando teremos:

$$\|\mathbf{p} - \mathbf{w}\| = \left[\frac{9(R^2 + G + B) - 3(R + G + B)^2}{9(R + G + B)^2} \right]^{1/2} \quad (\text{D1.8})$$

Os vetores \mathbf{p}_R e \mathbf{w} estendem-se da origem para os pontos (1,0,0) e (1/3,1/3,1/3) respectivamente.

$$\|\mathbf{p}_R - \mathbf{w}\| = \left(\frac{2}{3} \right)^{1/2} \quad (\text{D1.9})$$

Tendo em vista que para dois vetores \mathbf{a} e \mathbf{b} , $\mathbf{a} \cdot \mathbf{b} = \mathbf{a}^T \cdot \mathbf{b} = a_1 b_1 + a_2 b_2 + a_3 b_3$

$$(\mathbf{p} - \mathbf{w})(\mathbf{p}_R - \mathbf{w}) = \frac{2}{3} \left(r - \frac{1}{3} \right) - \frac{1}{3} \left(g - \frac{1}{3} \right) + \frac{1}{3} \left(b - \frac{1}{3} \right) = \frac{2R - G - B}{3(R + G + B)} \quad (\text{D1.10})$$

Da equação (D.6), temos:

$$H = \cos^{-1} \left[\frac{(\mathbf{p} - \mathbf{w})(\mathbf{p}_R - \mathbf{w})}{\|\mathbf{p} - \mathbf{w}\| \|\mathbf{p}_R - \mathbf{w}\|} \right] \quad (\text{D1.11})$$

Substituindo as equações (D1.8)-(D1.10) na equação (D1.11) e simplificando, teremos a dedução da expressão para H em termos de R, G, B

$$H = \cos^{-1} \left\{ \frac{\frac{1}{2}[(R-G) + (R-B)]}{\left[(R-G)^2 + (R-B)(G-B) \right]^{1/2}} \right\} \quad (D1.12)$$

A equação (D1.12) tem os valores de H para o intervalo $0^0 \leq H \leq 180^0$. Se $b_0 > g_0$, então H pode ser maior que 180^0 . Sempre que $b_0 > g_0$, nós faremos $H = 360^0 - H$. As vezes a expressão para matiz é expressa em termos da tangente, para isso usamos a identidade trigonométrica $\cos^{-1}(x) = 90^0 - \tan^{-1}(x/\sqrt{1-x^2})$.

O próximo passo é buscarmos uma expressão para S , em termos dos valores de RGB . Para isso voltamos a Figura D1.2 (A) e (B), porque a saturação de uma cor é o grau dessa cor a ser diluída pelo branco. Da Figura D1.2(A), a saturação S , do ponto de cor P é dada pela razão entre $|WP|/|WP'|$, onde P' é obtido estendendo linha WP até a interceptar o lado mais próximo do triângulo.

Com referência a Figura D1.2(B) seja T a projeção de W sobre o plano rg , paralelo b e seja Q a projeção de P sobre WT , paralelo ao plano rg .

$$S = \frac{|WP|}{|WP'|} = \frac{|WQ|}{|WT|} = \frac{|WT| - |QT|}{|WT|} \quad (D1.13)$$

O segundo passo resulta da semelhança entre os triângulos, desde que $|WT| = 1/3$ e $|QT| = b$ em setor exibido:

$$S = 3 \left(\frac{1}{3} - b \right) = 1 - 3b = 1 - b_0 \quad (D1.14)$$

O último passo resulta da equação (D1.4) e da condição (e). Também percebemos que $b_0 = \min(r_0, g_0, b_0)$ no setor do RGB , na verdade um argumento semelhante para mostrar uma única relação

$$\begin{aligned} S &= 1 - \min(r_0, g_0, b_0) \\ &= 1 - \frac{3}{(R + G + B)} [\min(R, G, B)] \end{aligned} \quad (D1.15)$$

É verdadeira a generalização para qualquer ponto situado dentro do triângulo IHS .

Os resultados para obtermos o IHS nos valores limites $[0,1]$ vindo do RGB valem nos limites exatamente.

$$I = \frac{1}{3}(R + G + B) \quad (D1.16)$$

$$S = 1 - \frac{3}{(R + G + B)} [\min(R, G, B)] \quad (D1.17)$$

$$H = \cos^{-1} \left\{ \frac{1/2[(R - G) + (R - B)]}{[(R - G)^2 + (R - G)(G - B)]^{1/2}} \right\} \quad (D1.18)$$

APÊNDICE D 2

PROCESSAMENTO DIGITAL DE IMAGEM

1. Fluxograma de Operação do Sistema

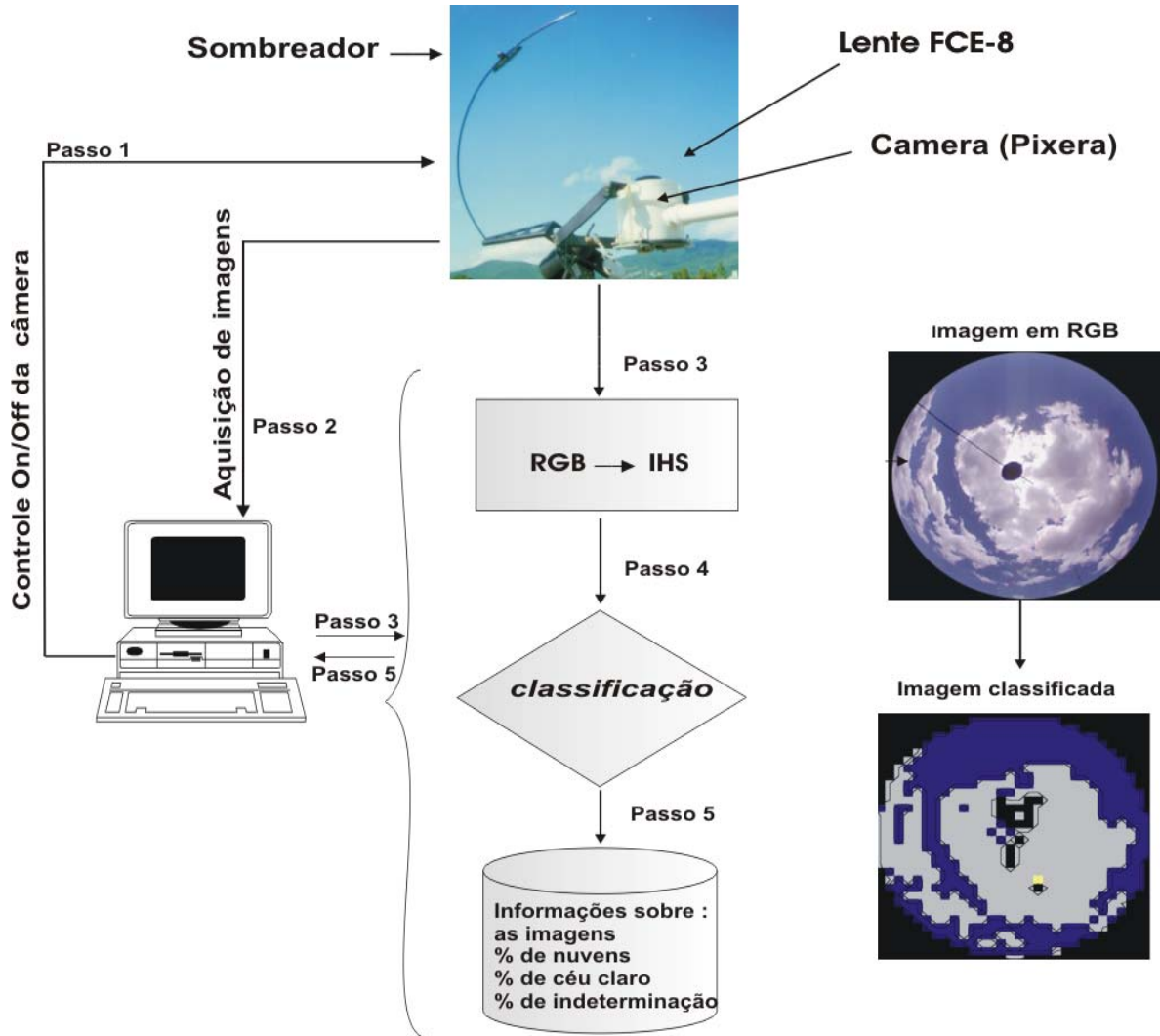


FIGURA D2.1 – Fluxo do Sistema de captura e processamento de imagens.

2. Planilha com a Organização das Imagens Durante o Procedimento de Aquisição.

Data	Hora	Nome	Resolução
16/11/2002	08:00:00	i01-161102	640X640
16/11/2002	08:15:00	i02-161102	640X640
16/11/2002	08:30:00	i03-161102	640X640
16/11/2002	08:45:00	i04-161102	640X640
16/11/2002	09:00:00	i05-161102	640X640
16/11/2002	09:15:00	i06-161102	640X640
16/11/2002	09:30:00	i07-161102	640X640
16/11/2002	09:45:00	i08-161102	640X640
16/11/2002	10:00:00	i09-161102	640X640
16/11/2002	10:15:00	i10-161102	640X640
16/11/2002	10:30:00	i11-161102	640X640
16/11/2002	10:45:00	i12-161102	640X640
16/11/2002	11:00:00	i13-161102	640X640
16/11/2002	11:15:00	i14-161102	640X640
16/11/2002	11:30:00	i15-161102	640X640
16/11/2002	11:45:00	i16-161102	640X640
16/11/2002	12:00:00	i17-161102	640X640
16/11/2002	12:15:00	i18-161102	640X640
16/11/2002	12:30:00	i19-161102	640X640
.	.	.	.
.	.	.	.
.	.	.	.
16/11/2002	19:45:00	i48-161102	640X640
16/11/2002	20:00:00	i49-161102	640X640
16/11/2002	20:15:00	i50-161102	640X640
16/11/2002	20:30:00	i51-161102	640X640
16/11/2002	20:45:00	i52-161102	640X640
16/11/2002	21:00:00	i53-161102	640X640
16/11/2002	21:15:00	i54-161102	640X640
16/11/2002	21:30:00	i55-161102	640X640
16/11/2002	21:45:00	i56-161102	640X640

3. Estrutura do Banco das Imagens

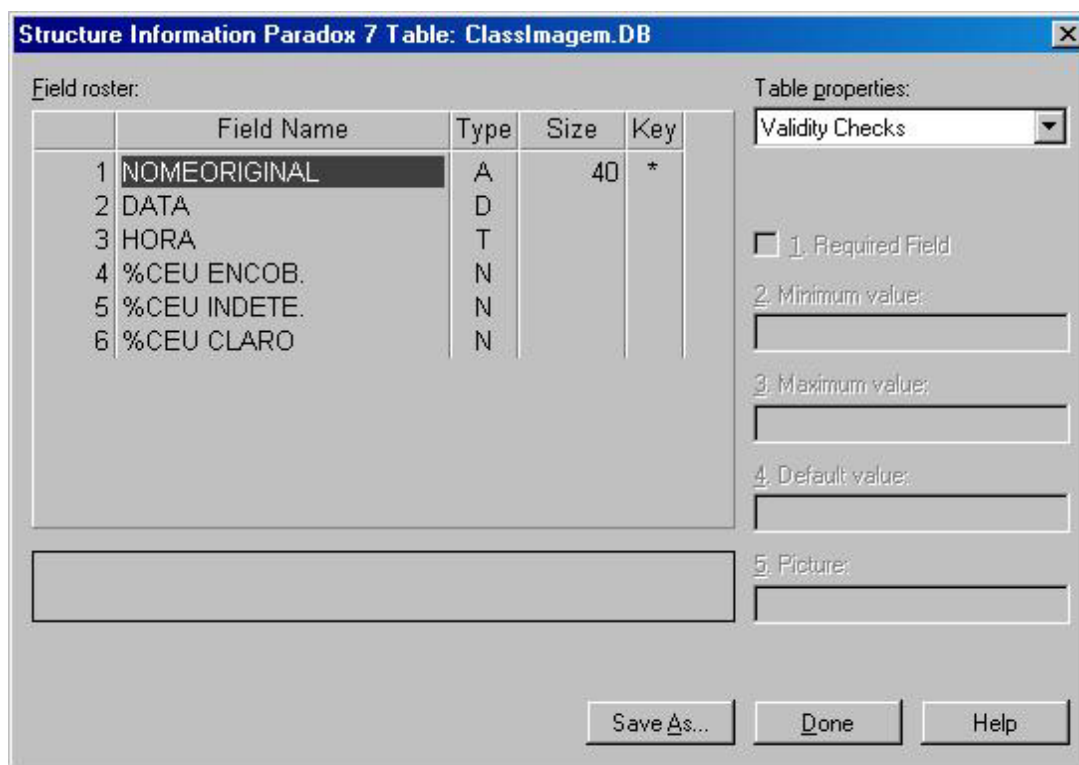


FIGURA D2.2 – Estrutura do banco utilizada durante o trabalho

ClassImagem	NOMEORIGINAL	DATA	HORA	%CEU ENCOB.	%CEU INDETE.	%CEU CLARO
1	i09-0510. dat	3/3/2004	14:20:19	86,97	3,34	9,69
2	i09-0610. dat	3/3/2004	14:27:06	81,35	4,46	14,19
3	i09-0710. dat	3/3/2004	14:33:36	26,54	0,00	73,46
4	i10-0510. dat	3/3/2004	14:21:18	83,84	3,38	12,78
5	i10-0610. dat	3/3/2004	14:27:59	24,95	0,00	75,05
6	i10-0710. dat	3/3/2004	14:34:32	65,77	6,51	27,72
7	i11-0510. dat	3/3/2004	14:23:33	80,00	4,76	15,24
8	i11-0610. dat	3/3/2004	14:28:53	76,19	5,07	18,74
9	i11-0710. dat	3/3/2004	14:35:29	23,31	0,00	76,69
10	i12-0510. dat	3/3/2004	14:24:30	85,35	3,29	11,36
11	i12-0610. dat	3/3/2004	14:29:57	23,24	0,00	76,76
12	i12-0710. dat	4/3/2004	14:44:19	61,12	10,33	28,54
13	i21-0610. dat	4/3/2004	14:47:29	19,46	0,00	80,54
14	i21-1610. dat	4/3/2004	14:50:44	22,97	0,00	77,03
15	i23-0610. dat	4/3/2004	14:48:21	79,23	3,67	17,10
16	i23-1610. dat	4/3/2004	14:52:00	71,36	6,71	21,93
17	i33-2010. dat	4/3/2004	15:24:34	75,39	4,85	19,75

FIGURA D2.3 – Exemplo do banco utilizada durante o trabalho

4 . Radiação Solar no Topo da Atmosfera

DIA	Minuto	RADIAÇÃO	ANG ZENITAL
1	8.43	.041	89.901
1	8.44	.122	89.702
1	8.46	.203	89.502
1	8.48	.285	89.303
1	8.49	.366	89.103
1	8.51	.447	88.904
1	8.53	.529	88.704
1	8.54	.611	88.504
1	8.56	.693	88.303
1	8.58	.774	88.103
1	8.59	.856	87.902
1	8.61	.938	87.701
1	8.63	1.020	87.500
1	8.64	1.102	87.299
1	8.66	1.184	87.098
1	8.68	1.267	86.896
1	8.69	1.349	86.694
1	8.71	1.431	86.492
1	8.73	1.513	86.290
1	8.74	1.596	86.088
1	8.76	1.678	85.885
1	8.78	1.761	85.683
1	8.79	1.843	85.480
1	8.81	1.926	85.277
1	8.83	2.009	85.074
1	8.84	2.091	84.870
1	8.86	2.174	84.667
1	8.88	2.257	84.463
1	8.89	2.340	84.259
1	8.91	2.422	84.055
1	8.93	2.505	83.851
1	8.94	2.588	83.647
1	8.96	2.671	83.443
1	8.98	2.754	83.238
1	8.99	2.837	83.033
1	9.01	2.920	82.828
1	9.03	3.003	82.623
1	9.04	3.086	82.418
1	9.06	3.169	82.213

5. Avaliação dos Anéis nas Imagens das Figuras 4.13, 4.14 e 4.15 do Capítulo 4

Imagem das 14:45 dia 7 de Janeiro de 2002 (dia claro)



Imagem das 14:45 dia 9 de Julho de 2002 (Parcialmente encoberto)



Imagem das 14:45 dia 13 de Julho de 2002 (dia claro)



Imagem das 14:45 dia 28 de Outubro de 2002 (dia encoberto)

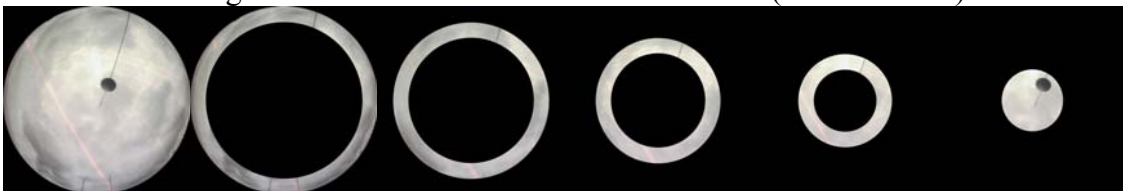


Imagem das 14:45 dia 28 de Outubro de 2002 (dia encoberto)



178°

148°

118°

88°

58°

28°

Imagem das 20:45 dia 11 de Março de 2002 (dia claro)



Imagem das 20:45 dia 25 de Junho de 2002 (dia claro)



Imagem das 20:45 dia 19 de Setembro de 2002 (encoberto)

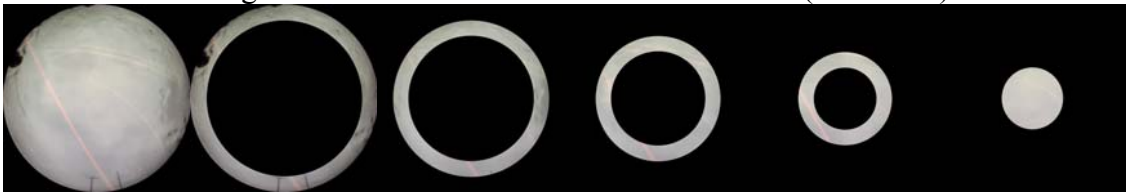
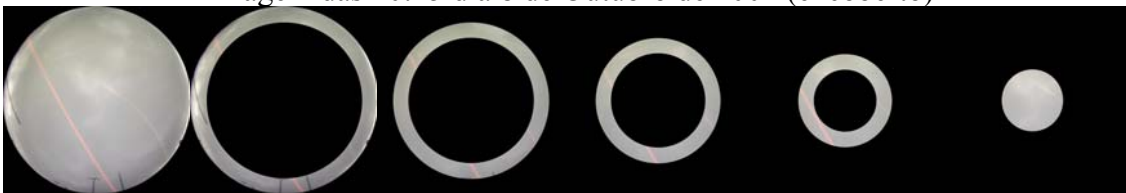


Imagem das 20:45 dia 8 de Outubro de 2002 (encoberto)



178°

148°

118°

88°

58°

28°

Imagem das 9:00 dia 25 de Fevereiro de 2002 (dia claro)



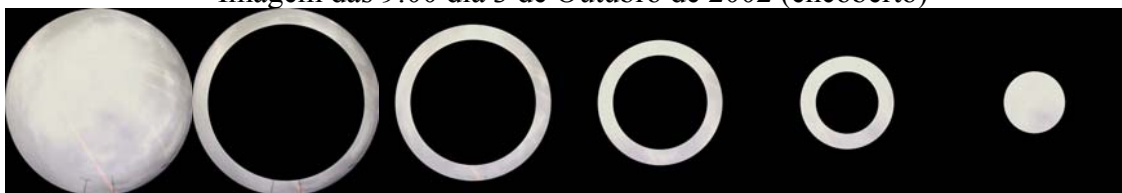
Imagem das 9:00 dia 22 de Setembro de 2002 (dia claro)



Imagem das 9:00 dia 3 de Outubro de 2002 (encoberto)



Imagem das 9:00 dia 3 de Outubro de 2002 (encoberto)



178°

148°

118°

88°

58°

28°

FIGURA D2.4 Imagens e círculos

6 Tabela para Avaliação da Saturação nos Anéis da Imagem (178°, 148°, 118°, 88°, 58° e 28°)

Imagens	Resolução	Borda			Media	Desvio	Mês/Ano
I6-070102.JPGs.dat	525 X 525	48417	15577257	227208	68.56	32.68	
I6-070102at1.JPGs.dat	525 X 525	238384	21673506	312866	69.27	38.75	jan/2002
I6-070102at2.JPGs.dat	525 X 525	445394	27135238	381481	71.13	43.93	
I6-070102at3.JPGs.dat	525 X 525	669172	31099618	433328	71.77	47.24	
I6-070102at4.JPGs.dat	525 X 525	906866	33992804	471259	72.13	49.52	
I6-070102at5.JPGs.dat	525 X 525	1155929	35708974	497821	71.73	50.61	
I7-090702.JPGs.dat	640 X 640	82055	8648653	327545	26.40	15.11	julho/2002
I7-090702at1.JPGs.dat	640 X 640	379275	11951959	439925	27.17	18.02	
I7-090702at2.JPGs.dat	640 X 640	698019	15012782	530781	28.28	20.61	
I7-090702at3.JPGs.dat	640 X 640	1036727	17533145	601673	29.14	22.60	
I7-090702at4.JPGs.dat	640 X 640	1396258	19267204	651742	29.56	23.87	
I7-090702at5.JPGs.dat	640 X 640	1768504	20292553	689096	29.45	24.45	
I7-130702.JPGs.dat	640 X 640	83182	6031542	326418	18.48	10.56	julho/2002
I7-130702at1.JPGs.dat	640 X 640	385684	8280842	433516	19.10	12.58	
I7-130702at2.JPGs.dat	640 X 640	706872	10017797	521928	19.19	13.87	
I7-130702at3.JPGs.dat	640 X 640	1046180	11943166	592220	20.17	15.52	
I7-130702at4.JPGs.dat	640 X 640	1405636	13308658	642364	20.72	16.61	
I7-130702at5.JPGs.dat	640 X 640	1777990	14024268	679610	20.64	17.01	
							outubro/2002
I28-241002.JPGs.dat	640 X 640	83321	4815625	326279	14.76	8.43	
I28-241002at1.JPGs.dat	640 X 640	383454	6954341	435746	15.96	10.54	
I28-241002at2.JPGs.dat	640 X 640	707710	8074280	521090	15.49	11.19	
I28-241002at3.JPGs.dat	640 X 640	1049118	9291773	589282	15.77	12.10	
I28-241002at4.JPGs.dat	640 X 640	1408725	10380270	639275	16.24	12.98	
I28-241002at5.JPGs.dat	640 X 640	1781085	11030969	676515	16.31	13.41	

7 Interface para recorte das imagens exemplificado apenas a abertura mais externa

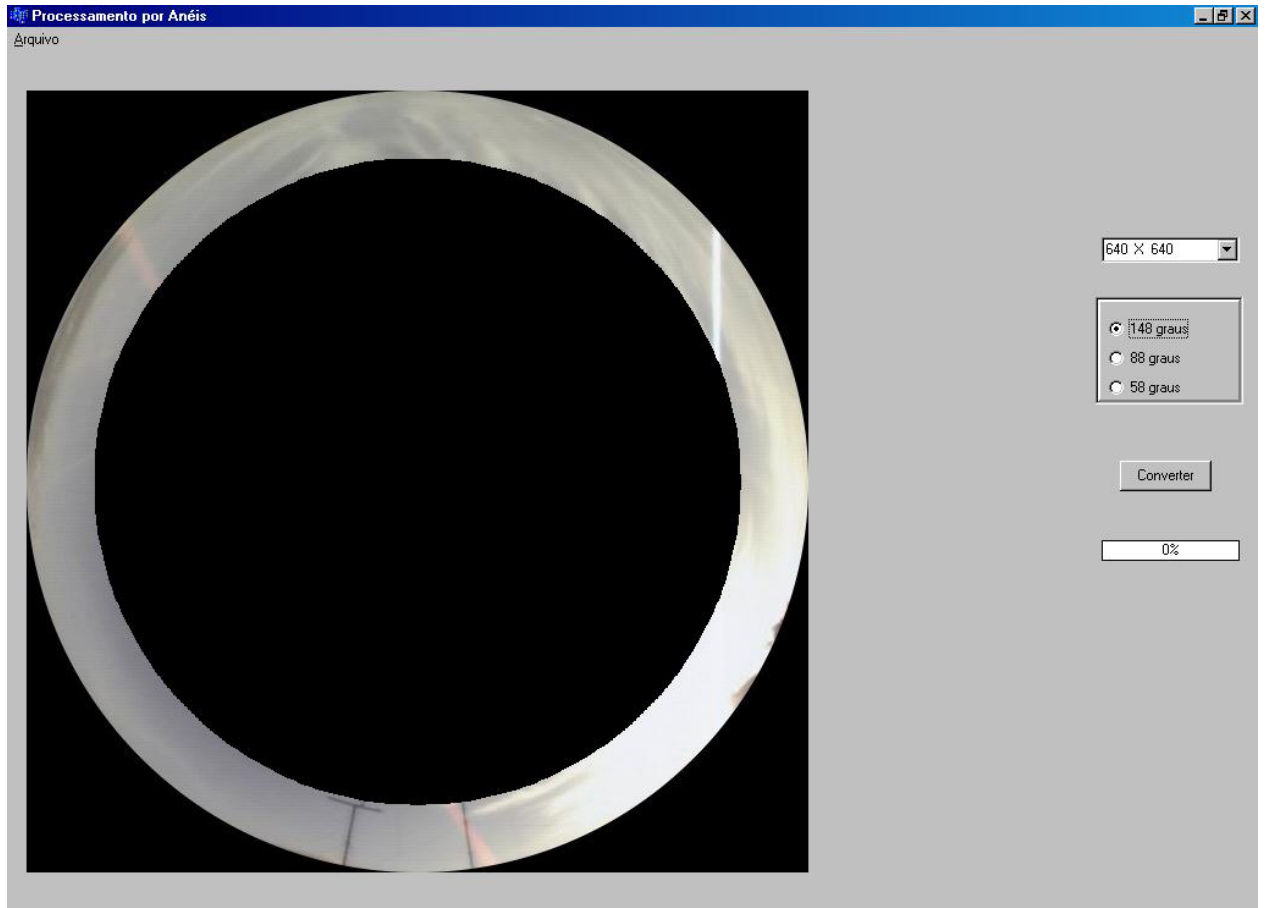
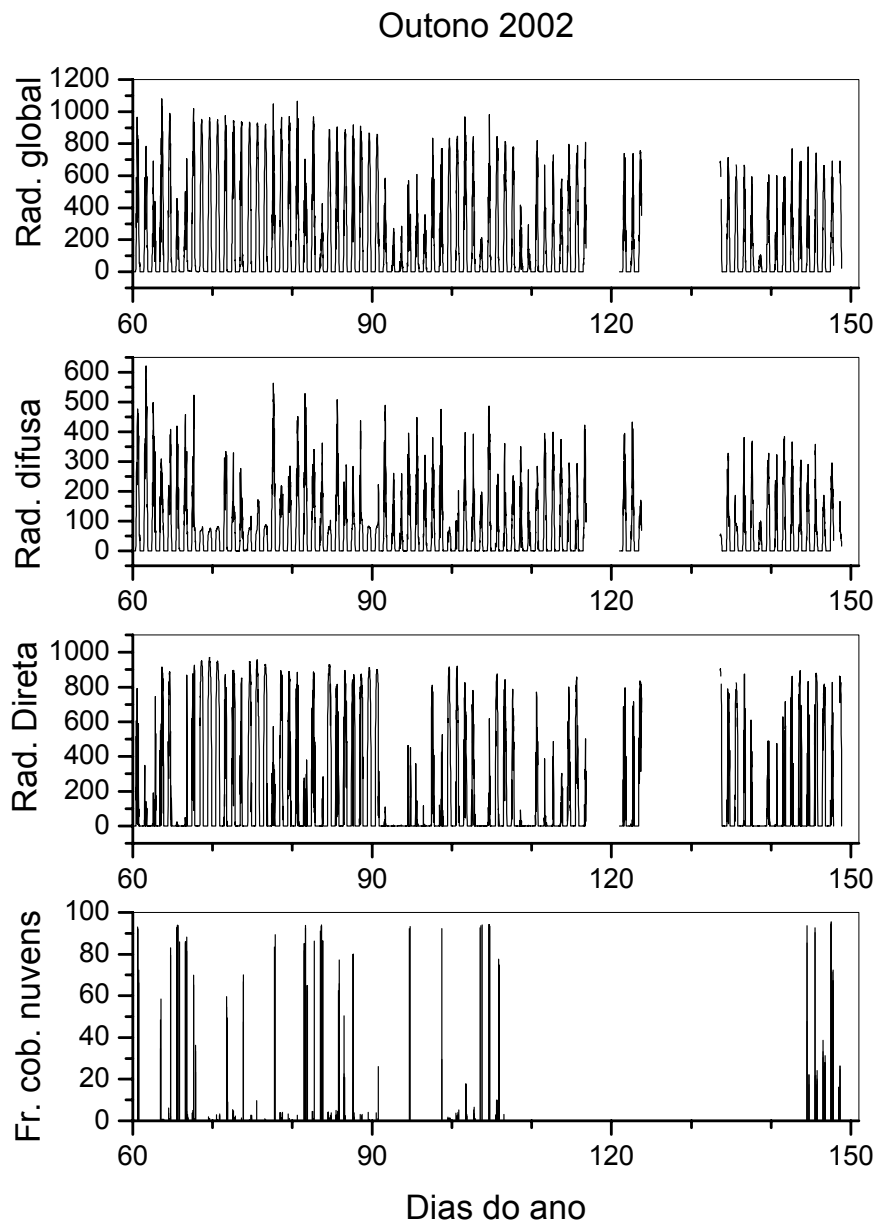


FIGURA D2.5 – Exemplo de interface para seleção de áreas na imagem

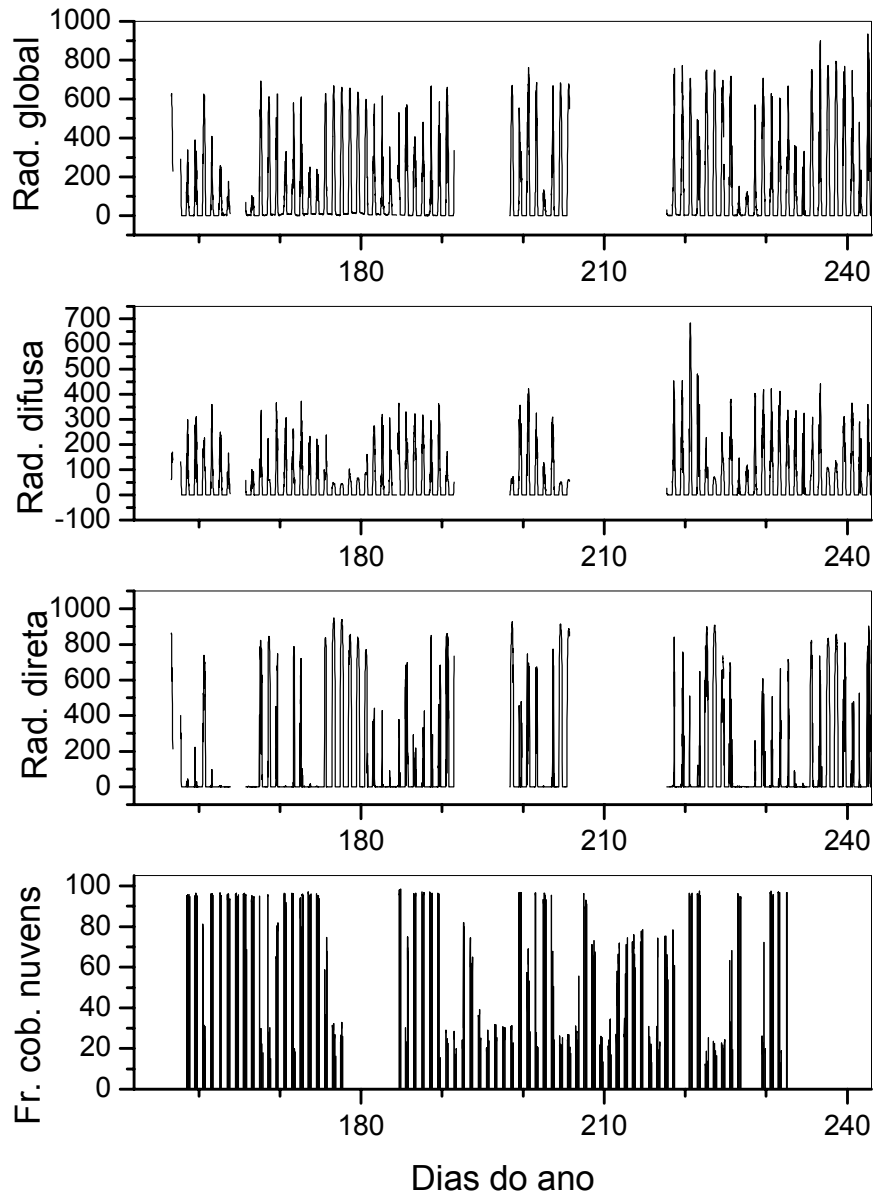
APÊNDICE E

SÉRIES DE DADOS DE RADIAÇÃO SOLAR E NUVENS

1. Série de dados gerados sobre fração de cobertura de nuvens e dados de radiação solar global, difusa e direta medidos em superfície



Inverno 2002



Verão 2002/2003

