

SECRETARIA DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-5386-TDI/475

PROCESSOS E ERROS NA DETERMINAÇÃO DO FATOR DE REFLECTÂNCIA
BIDIRECIONAL E DE OUTRAS GRANDEZAS RADIOMÉTRICAS

Pedro Neves da Silva Filho

Dissertação de Mestrado em Sensoriamento Remoto, orientada pelo Dr.
José Carlos Neves Epiphânio e pelo Dr. João Vianei Soares, aprovada em
Fevereiro de 1992.

INPE
São José dos Campos
Abril de 1992

528.711.7

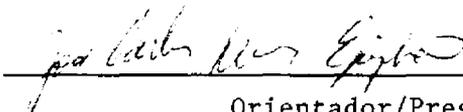
SILVA FILHO, P.N. da

Processos e erros na determinação do fator de reflectância bidirecional e de outras grandezas radiométricas. / P.N. da Silva Filho. -- São José dos Campos: INPE, 1992. 166p. -- (INPE-5386-TDI/475)

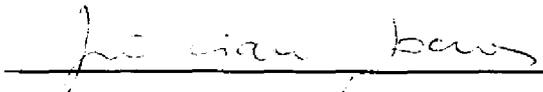
1. Radiometria. 2. Calibração. 3. Comportamento espectral. I. Título

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

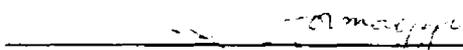
Dr. José Carlos Neves Epiphânio


Orientador/Presidente

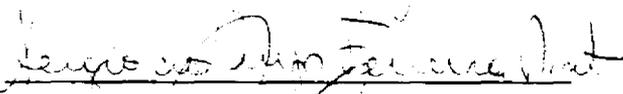
Dr. João Vianeí Soares


Orientador

Dr. Antonio Roberto Formaggio


Membro da Banca

Dr. Sérgio dos Anjos Ferreira Pinto


Membro da Banca

Dr. Renato Herz


Membro da Banca
- Convidado -

Candidato: Pedro Neves da Silva Filho

São José dos Campos, 25 de fevereiro de 1992

ÀQUELE

Que é eterno,
Autoexistente,
Criador dos Céus e da Terra e
Que hoje ainda fala:

" EU SOU O QUE SOU "

Bíblia Sagrada
Êxodo, Capítulo 3, versículo 14.

A JANNES, esposa e amiga,
pelo inestimável apoio,
pela paciência, pelo
carinho ao longo destes
anos, dedico este trabalho.

AGRADECIMENTOS

 Ao doutor José Carlos Neves Epiphânio pela orientação, pelos ensinamentos, pelo interesse, e pela amizade demonstrada no transcorrer destes anos.

 Ao doutor João Vianeí Soares pela orientação, pela experiência transmitida, pelos ensinamentos e por acreditar na realização deste trabalho.

 Ao doutor Antônio Roberto Formaggio pelo constante incentivo, pela disposição em ajudar, pela confiança transmitida em ocasiões difíceis e pela amizade ao longo destes anos.

 Ao doutor Sérgio dos Anjos Ferreira Pinto pelo interesse e pela disponibilidade em contribuir neste trabalho.

 Ao doutor Renato Herz pelos ensinamentos e por ter aceito com entusiasmo participar deste trabalho.

 Ao pesquisador Vicente Alonso Perdiz pela contribuição, pelos ensinamentos, pelo apoio logístico, pela lição de perseverança, pela atuação constante na área de Radiometria e pela amizade.

 Ao pesquisador Carlos Alberto Steffen pelo incentivo, pelos primeiros ensinamentos, pelo companheirismo e pela incansável luta pela Radiometria no país.

 Aos amigos da Divisão de Ciências Atmosféricas por terem acreditado neste trabalho, pelo auxílio na elaboração dos programas de redução de dados, pelo apoio durante as medições, pela contribuição por ocasião da revisão dos textos desta dissertação e pela amizade ao longo destes anos.

 Ao Ministério da Aeronáutica pela oportunidade concedida e pelo apoio constante, fundamentais na execução deste trabalho.

 A todos aqueles que acreditaram e contribuíram para a consecução deste trabalho.

RESUMO

Para várias aplicações do Sensoriamento Remoto é necessário determinar através de medidas de irradiância e/ou radiância o Fator de Reflectância dos alvos de interesse. Em outras aplicações é suficiente medir grandezas radiométricas absolutas. No procedimento de medição muitos erros podem ser introduzidos por falhas nas técnicas empregadas. Através da medição de radiância, de cálculos do Fator de Reflectância Bidirecional (FRB) e do Fator de Reflectância Refspec (FRR), os erros que alguns fatores podem introduzir nos valores das grandezas radiométricas medidas foram estudados e analisados. Os resultados encontrados mostram a necessidade de se adotar procedimentos de medição corretos como a calibração de placas de referência e de radiômetros; a intercalibração de radiômetros; cuidados com variações de irradiância devidas às mudanças atmosféricas; atenções à presença de alvos vizinhos; e a modificações da geometria de radiação durante as medições.

PROCEDURES AND ERRORS IN THE DETERMINATION OF THE BI-DIRECTIONAL
REFLECTANCE FACTOR AND OTHER RADIOMETRIC QUANTITIES

ABSTRACT

For many applications of remote sensing it is necessary to determine the reflectance factor of important targets through irradiance and/or radiance measurements. In other applications it is enough to measure absolute radiometric quantities. In the measurement procedures, many errors can be introduced. Through radiance measurements, computations of bi-directional reflectance factor and diffuse directional reflectance factor, the errors which some parameters can introduce in the measured values of the radiometric quantities were studied and analyzed. The obtained results have shown the necessity of using correct measurement procedures such as: calibration of reference plates and radiometers; inter-calibration of radiometers; attention to irradiance variations due to atmospheric changes or the presence of neighbor targets; and geometric modifications of radiation during the measurement.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
LISTA DE FIGURAS	xviii
LISTA DE TABELAS	xxi
LISTA DE SÍMBOLOS	xxiii
LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS	xxv
<u>CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO</u>	1
<u>CAPÍTULO 2 - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA</u>	5
2.1 - Radiação eletromagnética	5
2.2 - Grandezas radiométricas	6
2.3 - Fator de Reflectância Bidirecional (FRB)	9
<u>CAPÍTULO 3 - FATORES QUE AFETAM O FRB</u>	17
3.1 - Influência do comportamento do sistema de medição	17
3.2 - Influência da calibração	18
3.2.1 - Calibração de padrões de reflectância	19
3.2.2 - Calibração de radiômetros	23
3.2.3 - Intercalibração de radiômetros	24
3.3 - Influência da variação de irradiância no FRB	26
3.3.1 - Método seqüencial	26
3.3.2 - Método simultâneo	28
3.4 - Influência da geometria de radiação	29
3.5 - Influência da vizinhança do alvo	31
<u>CAPÍTULO 4 - MATERIAL E MÉTODOS</u>	33
4.1 - Comportamento dos sistemas de medição	33
4.1.1 - Análise de erros	34
4.1.2 - Espectrorradiômetro SPECTRON SE590	35
4.1.2.1 - Descrição	35
4.1.2.2 - Teste de confiabilidade	37
4.1.3 - Espectrorradiômetro REFSPEC IIA	38
4.1.3.1 - Descrição	38
4.1.3.2 - Teste de confiabilidade	41
4.1.4 - Sistema de medição de irradiância total	42
4.1.4.1 - Descrição	42
4.1.4.2 - Teste de confiabilidade	44
4.1.5 - Sistema de medição de radiação óptica	45
4.1.5.1 - Descrição	45
4.1.5.2 - Teste de confiabilidade	46
4.2 - Influência da calibração	47
4.2.1 - Calibração de padrões de reflectância	48
4.2.1.1 - Montagem do experimento	48
4.2.1.2 - Cálculo da reflectância absoluta da esfera	49
4.2.1.3 - Cálculo da reflectância absoluta de uma amostra	52
4.2.2 - Calibração de placas de referência	54
4.2.3 - Calibração de radiômetros	57

4.2.3.1 - Experimento de calibração do OPTRONIC 740A	57
4.2.3.2 - Experimento de calibração do REFSPEC IIA	59
4.2.3.3 - Aferição do REFSPEC IIA no laboratório	61
4.2.4 - Intercalibração de radiômetros	63
4.2.4.1 - Intercalibração no campo	63
4.2.4.2 - Intercalibração no laboratório	65
4.3 - Influência da variação de irradiância no FRB	65
4.4 - Influência da geometria de radiação no FRB	67
4.5 - Influência da vizinhança no FRB	68
4.5.1 - Experimento com o SPECTRON SE590	69
4.5.2 - Experimento com o REFSPEC IIA	71
<u>CAPÍTULO 5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO</u>	73
5.1 - Comportamento dos sistemas de medição	73
5.1.1 - Espectrorradiômetro SPECTRON SE590	73
5.1.2 - Espectrorradiômetro REFSPEC IIA	74
5.1.3 - Sistema de medição de irradiância	76
5.1.4 - Sistema de medição de radiação óptica	77
5.1.5 - Discussão dos resultados	78
5.2 - Influência da calibração	79
5.2.1 - Calibração de padrões de reflectância	79
5.2.1.1 - Reflectância espectral absoluta da esfera integradora.	79
5.2.1.2 - Reflectância espectral absoluta de amostras de sulfato de bário	80
5.2.1.3 - Discussão dos resultados	86
5.2.2 - Calibração de placas de referência	87
5.2.2.1 - Resultados da calibração de placas de referência	87
5.2.2.2 - Discussão dos resultados	91
5.2.3 - Calibração de radiômetros	92
5.2.3.1 - Calibração do espectrorradiômetro OPTRONIC 740A	92
5.2.3.2 - Calibração do espectrorradiômetro REFSPEC IIA	97
5.2.3.3 - Discussão dos resultados	99
5.2.4 - Intercalibração de radiômetros	100
5.2.4.1 - Intercalibração no campo	100
5.2.4.2 - Intercalibração no laboratório	103
5.2.4.3 - Aplicação errônea do Fator de intercalibração	106
5.2.4.4 - Discussão dos resultados	107
5.3 - Influência da variação de irradiância no FRB	108
5.3.1 - Em condições atmosféricas favoráveis	108
5.3.2 - Em condições atmosféricas desfavoráveis	114
5.3.3 - Discussão dos resultados	118
5.4 - Influência da variação da geometria de radiação no FRB ...	118
5.4.1 - Influência da variação do ângulo zenital na radiância ..	119
5.4.2 - Influência da variação do ângulo zenital no FRB	121
5.4.3 - Correção do FRB	122
5.4.4 - Discussão dos resultados	123
5.5 - Influência da vizinhança no FRB	124
5.5.1 - Espectrorradiômetro SPECTRON SE590	124
5.5.1.1 - Aspectos comuns a todos os painéis	128
5.5.1.2 - Aspectos particulares dos painéis	128
5.5.2 - Espectrorradiômetro REFSPEC IIA	129
5.5.2.1 - Aspectos comuns a todos os painéis	133
5.5.2.2 - Aspectos particulares dos painéis	133

5.5.3 - Discussão dos resultados	134
<u>CAPÍTULO 6 - CONCLUSÕES</u>	135
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	137

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
2.1 - Espectro eletromagnético	6
2.2 - Geometria da interseção do fluxo radiante de uma superfície dA de radiância L	9
2.3 - Geometrias usadas em medições de reflectância	10
2.4 - Geometria elementar dos raios incidente e refletido	11
3.1 - Variação da reflectância do Politetrafluoretileno (PTFE) prensado em função da densidade	19
3.2 - Reflectância absoluta difusa de vários padrões brancos em função do comprimento de onda	20
3.3 - Alteração da reflectância em função do tempo de uma amostra borrifada com MgO, em comparação ao BaSO ₄ prensado	21
3.4 - Método de esfera integradora	22
3.5 - Diagrama de padrões de calibração de radiômetros para condições de laboratório	23
3.6 - Calibração de um radiômetro no campo usando-se padrão de reflectância de sulfato de bário	24
3.7 - Influência do Fator de intercalibração	25
3.8 - Intercalibração de radiômetros utilizando radiâncias	25
3.9 - Intercalibração de radiômetros utilizando medidas de radiância e irradiância	26
3.10 - Método de medição sequencial (procedimento de substituição)	27
3.11 - Irradiância global espectral em função do ângulo solar zenital	27
3.12 - Método de medição simultânea indireta	28
3.13 - Geometria usada para a medição do FRB	29
3.14 - Fator de reflectância direcional/hemisférica do PTFE prensado em função do ângulo de incidência e do comprimento de onda	30
3.15 - FRB em 600 nm do BaSO ₄ em pó prensado	30
3.16 - Efeito da vizinhança nas medidas de reflectância	31
3.17 - Erro percentual simulado devido à vizinhança	32
4.1 - Diagrama das principais fases da pesquisa	33
4.2 - Espectrorradiômetro SPECTRON SE590	36
4.3 - Representação esquemática do experimento para obtenção do C _v do SPECTRON SE590	37
4.4 - Espectrorradiômetro REFSPEC IIA	38
4.5 - Sistema óptico do REFSPEC IIA	39
4.6 - Sistema de obturação do REFSPEC IIA	39
4.7 - Níveis de saída do sinal do REFSPEC IIA	41
4.8 - Representação esquemática do experimento para obtenção do C _v do REFSPEC IIA	41
4.9 - Sistema de medição de irradiância total	42
4.10 - Representação esquemática do experimento para obtenção do C _v do Sistema de medição de irradiância total	44
4.11 - Sistema de medição de radiação óptica OPTRONIC 740A	45
4.12 - Representação esquemática do experimento para obtenção do C _v do OPTRONIC 740A	47

4.13 - Instrumentos utilizados na calibração de padrões de reflectância	49
4.14 - Representação esquemática da incidência do fluxo de radiação sobre a parede da esfera	50
4.15 - Experimento com uma placa (1) com a mesma pintura da esfera	51
4.16 - Experimento com a janela (1) de amostragem aberta	51
4.17 - Experimento de obtenção da reflectância absoluta de uma amostra (1)	52
4.18 - Representação esquemática da incidência do fluxo de radiação sobre a janela de amostragem (1)	54
4.19 - Experimento para calibração de padrões de referência	56
4.20 - Experimento de calibração do OPTRONIC 740A	58
4.21 - Representação esquemática do experimento de calibração do REFSPEC IIA	60
4.22 - Representação esquemática do experimento de aferição do REFSPEC IIA em laboratório	62
4.23 - Curva do espectro de uma placa de referência utilizada para aferição do espectrorradiômetro REFSPEC IIA	62
4.24 - Representação esquemática do experimento para obtenção do FRB do concreto com o método de substituição	64
4.25 - Representação esquemática do experimento para obtenção do FRB do concreto com o método de chaveamento	64
4.26 - Representação esquemática do experimento de influência da variação da geometria de radiação no FRB	68
4.27 - Ilustração do experimento de avaliação da influência da vizinhança	70
4.28 - Geometria do experimento da influência da vizinhança	70
4.29 - Representação esquemática do experimento de avaliação da influência de vizinhos com REFSPEC IIA	71
5.1 - Bandas de absorção da radiação solar pela atmosfera	76
5.2 - Regiões de absorção da água expressas pelo REFSPEC IIA ...	76
5.3 - Reflectância espectral absoluta da esfera integradora ...	80
5.4 - Reflectância espectral absoluta d/d do alvo de referência do REFSPEC IIA	81
5.5 - Reflectância espectral absoluta d/d de placas de BaSO ₄ ..	83
5.6 - Reflectância espectral absoluta 30°/d do alvo de referência do REFSPEC IIA	84
5.7 - Reflectância espectral absoluta de placas de BaSO ₄	86
5.8 - Radiância de cinco placas de referência	87
5.9 - FRBs de uma folha de cartolina obtidos em relação a placas de referências não calibradas	88
5.10 - Reflectância relativa das placas de referência calibradas	90
5.11 - FRBs de uma folha de cartolina utilizando-se placas de referência calibradas	91
5.12 - Irradiância nominal da lâmpada padrão S-709	93
5.13 - Irradiância medida da lâmpada padrão S-709	93
5.14 - Fator de calibração do OPTRONIC 740A	94
5.15 - Irradiância nominal da lâmpada padrão S-575	95
5.16 - Irradiância medida da lâmpada padrão S-575	95
5.17 - Irradiância da lâmpada padrão S-575	97
5.18 - Testes de calibração do REFSPEC IIA no campo	98
5.19 - Calibração do REFSPEC IIA no campo	98
5.20 - Espectro obtido na aferição do REFSPEC IIA em laboratório	99

5.21 - Representação gráfica do FRB do concreto	101
5.22 - Representação gráfica do F_{ic}	102
5.23 - Representação gráfica do FRB do concreto	102
5.24 - Representação gráfica do FRB do papelão	104
5.25 - Representação gráfica do F_{il}	104
5.26 - Representação gráfica do FRB do papelão	105
5.27 - Representação gráfica do FRB do papelão medido em laboratório	106
5.28 - Representação gráfica do FRB do concreto medido no campo.	107
5.29 - Representação gráfica da variação de irradiância no período de 9:30 às 16:00 horas do dia 15/06/1990 em São dos Campos (SP)	108
5.30 - Representação gráfica do FRB do concreto	112
5.31 - Diagrama de direção do vento para o dia 15/06/1990	113
5.32 - Imagem do satélite GOES ilustrando o sistema frontal em dissipação ao Norte de São José dos Campos/SP (1) no dia 15/06/1990	116
5.33 - Diagrama de direção do vento para o dia 26/10/1990	115
5.34 - Imagem do satélite GOES ilustrando os sistemas frontais estacionários ao Norte e ao Sul de São José dos Campos/SP (1) no dia 26/10/1990	116
5.35 - FRB do concreto com variação do intervalo entre a medida do alvo e da referência	117
5.36 - Representação gráfica da radiância normalizada dos alvos de sulfato de bário e papelão	119
5.37 - Representação gráfica da radiância normalizada dos alvos de sulfato de bário e papelão	120
5.38 - Representação gráfica do FRB do papelão	121
5.39 - Correção do FRB do papelão	123
5.40 - Representação gráfica do FRB obtido com o SPECTRON SE590 dos diferentes painéis usados no experimento de avaliação de influência da vizinhança	125
5.41 - Representação gráfica da variação de radiância da placa de referência com a presença dos painéis vizinhos .	127
5.42 - Representação gráfica do FRR obtido com o REFSPEC IIA dos diferentes painéis usados no experimento de avaliação de influência da vizinhança	129
5.43 - Representação gráfica da variação do FRR da placa de referência com a presença dos painéis vizinhos	132

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
4.1 - Características do espectrorradiômetro SPECTRON SE590.. ..	36
4.2 - Características do espectrorradiômetro REFSPEC IIA..	40
4.3 - Características do solarímetro EPPLEY PSP..	43
4.4 - Características do microcomputador 21-X..	43
4.5 - Características do espectrorradiômetro OPTRONIC 740A.. ...	46
4.6 - Intervalo médio entre as medidas do alvo e do padrão	66
5.1 - Comportamento do SPECTRON SE590..	73
5.2 - Comportamento do REFSPEC IIA..	75
5.3 - Comportamento do sistema de medição de irradiância	77
5.4 - Comportamento do sistema de medição de radiação óptica ...	78
5.5 - Comparação da reflectância espectral absoluta d/d de placas de sulfato de bário (Métodos: Perdiz, Taylor, Grum e Luckey e Goebel)	82
5.6 - Comparação da reflectância espectral absoluta de placas de sulfato de bário (Métodos: Perdiz, Taylor e Grum e Wightman)	85
5.7 - FRBs de uma folha de cartolina obtidos em relação a quatro placas de referência	88
5.8 - Reflectância relativa de quatro placas de referência	89
5.9 - FRBs da folha de cartolina utilizando-se placas de referência calibradas	90
5.10 - Fator de calibração do OPTRONIC 740A	94
5.11 - Comparação da irradiância do padrão S-575 (A) com a irradiância corrigida (B) medida com o OPTRONIC 740A. ...	96
5.12 - Comparação do FRB do concreto obtido com os procedi- mentos de substituição e chaveamento com intercalibração dos radiômetros.	103
5.13 - Comparação do FRB do papelão obtido com os procedimentos de substituição e chaveamento com intercalibração dos radiômetros.	105
5.14 - Variação da irradiância solar total entre 9.30 e 16:00 horas do dia 15/06/1990 em intervalos de 10 minutos	109
5.15 - Variação da irradiância solar total entre 9:30 e 16:40:06 horas do dia 15/06/1990 em intervalos de 6 segundos	110
5.16 - FRB do concreto obtido em condições atmosféricas favoráveis	111
5.17 - Observação meteorológica do dia 15/6/1990 (São José dos Campos - SP)	112
5.18 - Observação meteorológica do dia 26/10/1990 (São José dos Campos - SP)	115
5.19 - FRB do concreto obtido em condições atmosféricas desfavoráveis	117
5.20 - Variação do FRB do papelão com alteração dos ângulos zenitais de incidência	122
5.21 - Correção do FRB do papelão obtido com um ângulo de 80° ..	123
5.22 - FRB obtido com o SPECTRON SE590 dos painéis utilizados no experimento para avaliação da influência da vizinhança	125

5.23 - Erros introduzidos na radiância da placa de referência pela presença de vizinhos próximos	126
5.24 - FRR obtido com o REFSPEC IIA dos painéis utilizados no experimento para avaliação de influência da vizinhança em laboratório	130
5.25 - Erros introduzidos no FRR da placa de referência pela presença de vizinhos próximos	131

LISTA DE SÍMBOLOS

A	- Área em m^2
c	- Velocidade da luz ($3,00 \times 10^8$ m/s)
C_v	- Coeficiente de variação
dA	- Elemento de área
d ω	- Elemento de ângulo sólido
d Ω	- Elemento de ângulo sólido projetado
E	- Irradiância em W/m^2
f	- Relação da área restante da esfera (excluindo a área da calota esférica delimitada pela janela de amostragem) e a área da esfera
f_a	- Fração de área plana da janela de amostragem da esfera
f_b	- Relação entre a área plana da janela de amostragem e a área da esfera
f_c	- Relação entre a área da calota esférica delimitada pela janela de amostragem e a área plana
f_e	- Fração de área plana da janela de entrada de radiação em relação à área da esfera
f_s	- Fração de área plana da janela de medição da esfera
F_{ic}	- Fator de intercalibração de radiômetro para campo
F_{il}	- Fator de intercalibração de radiômetro para laboratório
F_{ir}	- Fator de intercalibração de radiômetro
f_r	- Função de Distribuição de Reflectância Bidirecional
h	- Constante de Planck (joule·s)
I	- Intensidade de uma fonte em $W \cdot sr^{-1}$
K	- Razão entre o sinal V e V'
L	- Radiância em $W \cdot sr^{-1} m^{-2}$
M	- Exitância em $W \cdot m^{-2}$
Q	- Energia em joules
R	- Razão entre o sinal V'' e V'
R'	- Razão entre o sinal V'' e V
$R(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r)$	- Fator de reflectância bidirecional considerando os ângulos zenital e azimutal de observação
V	- Medida realizada com uma placa de mesma pintura da parede da esfera colocada na janela de amostragem
V'	- Medida realizada com a janela de amostragem aberta
V''	- Medida realizada com uma amostra de reflectância desconhecida colocada na janela de amostragem
θ	- Ângulo zenital
λ	- Comprimento de onda
ν	- Frequência em Hertz
Φ	- Fluxo radiante
φ	- Ângulo azimutal
ρ	- Reflectância
ρ_p	- Reflectância absoluta da parede da esfera integradora
$\rho_{d/d}$	- Reflectância absoluta difusa/difusa
$\rho_{0^\circ/d}$	- Reflectância absoluta 0° /difusa

$\rho_{30^\circ/d}$	- Reflectância absoluta 30°/difusa
ω	- Ângulo sólido hemisférico
Ω	- Ângulo sólido projetado

ÍNDICES SUPERIORES

o, a	- Objeto, alvo qualquer ou alvo de interesse
R	- Referência

ÍNDICES INFERIORES

a	- Amostra
i	- Incidente
i	- Intercalibração
r	- Refletido
r	- Radiômetro
R	- Referência

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ASTM	- American Society for Testing and Materials
BaSO ₄	- Sulfato de bário
FRB	- Fator de Reflectância Bidirecional
FRR	- Fator de Reflectância Refspec
FOV	- Campo de visada
INPE	- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
IAE	- Instituto de Aeronáutica e Espaço
MgO	- Óxido de magnésio
NBS	- National Bureau of Standards
PTFE	- Politetrafluoretileno

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

O Sensoriamento Remoto tem se tornado um importante meio de monitoramento e gerenciamento dos recursos naturais da Terra. Investigações ambientais, geológicas, agrícolas, florestais e oceanográficas têm no Sensoriamento Remoto um apoio adequado para a tomada de decisão sobre aspectos importantes como uso racional do solo, previsão de safras agrícolas, preservação do meio ambiente, atualização de cartas (náuticas, geológicas e topográficas), controle fito-sanitário e outros.

Todavia, o adequado emprego dos dados de Sensoriamento Remoto só é possível através do entendimento do comportamento radiométrico dos objetos pesquisados. Isto implica na realização de medições radiométricas sob condições controladas e na interpretação correta dos dados obtidos.

Estas medições têm por objetivo obter valores de grandezas radiométricas como a *radiância*, a *irradiância* e a *reflectância espectral* dos alvos de interesse.

As medidas executadas no laboratório ou no campo são comumente utilizadas como suporte em atividades de pesquisa em Sensoriamento Remoto. Como "verdade terrestre", possibilitam a validação, calibração e interpretação dos dados sensorizados e o estudo das relações entre as propriedades físicas específicas de alvos e sua interação com a radiação eletromagnética (Asrar, 1989).

Tais medidas servem também para a calibração de sensores instalados em aeronaves e satélites, para predição das bandas espectrais ótimas nos projetos de sensores e na consecução de tarefas específicas de Sensoriamento Remoto. Elas se constituem numa ferramenta para o desenvolvimento, refinamento e teste de modelos relacionados aos atributos físicos dos dados sensorizados (Milton, 1987).

Entretanto, a validade dos dados obtidos com as medidas subordina-se ao conhecimento de informações sobre as condições em que se deu a coleta dos dados. Estas informações relacionam-se com o alvo, com a vizinhança do alvo, com o equipamento e materiais empregados na medição, com a geometria de radiação e com as condições meteorológicas reinantes. É fundamental, por exemplo, o conhecimento da ocorrência de vento, da existência de objetos próximos do alvo que possam contribuir para um acréscimo ou diminuição de irradiância sobre o alvo, do grau de confiabilidade dos radiômetros e da reflectância dos alvos de referência.

Tais fatores podem introduzir erros significativos na medida, impossibilitando, inclusive, a comparação entre os dados de

diferentes sensores, ou mesmo de sensores iguais obtidos em épocas diferentes.

Para que os resultados obtidos sejam confiáveis, faz-se necessário buscar a excelência nos processos de medição. Esta excelência pode ser conseguida através do conhecimento, correção e controle dos fatores acima mencionados.

O objetivo desta pesquisa é estudar os processos e erros na determinação dos valores de Fator de Reflectância Bidirecional e de outras grandezas radiométricas. Este estudo visa conhecer, aquilatar e principalmente propor correções nos processos ora utilizados a fim de minimizar tais erros.

Assim foram realizados vários experimentos visando demonstrar a necessidade de adotar técnicas e procedimentos que tornem os dados coletados mais confiáveis e, portanto mais úteis.

Cinco fases distintas foram delineadas para a consecução deste objetivo, a saber:

- 1) Comportamento dos sistemas de medição empregados.

Nesta fase avalia-se o comportamento de radiômetros com base nos desvios padrões e coeficientes de variação dos valores medidos. Os sistemas de medição descritos neste trabalho foram utilizados como exemplo.

- 2) Estudo da influência da calibração.

Nesta fase é determinada a *reflectância absoluta* de uma placa de referência, que se constitui num padrão primário de reflectância, o que torna possível a calibração de outras placas de referência.

A calibração de radiômetros é estudada com vistas à minimização dos erros em medidas de *radiância*, de *irradiância* e na obtenção do Fator de Reflectância Refspec (FRR).

A intercalibração de radiômetros é analisada, demonstrando-se a influência da natureza intrínseca de cada equipamento na obtenção do FRB.

- 3) Estudo da influência da variação de irradiância.

Nesta fase, a partir dos métodos de medição adotados, analisa-se como a variação de irradiância afeta o FRB.

- 4) Estudo da influência da geometria de radiação.

Nesta fase são estudadas as mudanças na geometria de radiação, demonstrando-se as variações introduzidas no FRB.

5) Estudo da influência da vizinhança.

Nesta fase são estudados os possíveis erros na obtenção do FRB provocados pela presença de alvos próximos ao de interesse, durante as medições.

CAPÍTULO 2FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Neste Capítulo, alguns conceitos básicos de Radiometria são apresentados e discutidos. Além disto, como o objetivo principal deste trabalho é o estudo dos fatores que afetam o Fator de Reflectância Bidirecional, sua formulação é demonstrada.

2.1 - RADIAÇÃO ELETROMAGNÉTICA

A realização de trabalho, ou a mudança de estado físico, implica na transferência de energia de um corpo para outro, ou de um local do espaço para outro.

Dentre as formas possíveis de energia, a radiante, ou eletromagnética, é de especial importância para o Sensoriamento Remoto. Comportando-se de acordo com a teoria ondulatória, ela é igualmente repetitiva e espaçada no tempo, move-se com a velocidade da luz e tem dois campos, um elétrico e outro magnético, que são ortogonais entre si, quando se considera sua propagação de um ponto a outro. Por este modelo, pode-se atribuir à radiação eletromagnética três grandezas, comprimento de onda (λ), frequência (ν) e velocidade (c), que se relacionam de acordo com a Equação 2.1:

$$c = \lambda \cdot \nu \quad (2.1)$$

Comportando-se de acordo com o modelo da teoria quântica, proposto por Max Planck, em 1900, a energia emitida, absorvida ou propagada não é de modo contínuo, mas sim em pequenas parcelas discretas chamadas quanta ou fótons, quando se trata de processos de absorção ou emissão e para curtos comprimentos de onda (Slater, 1980). Neste caso, a energia, Q , de um quantum, é diretamente proporcional à frequência, ν , da radiação:

$$Q = h \cdot \nu. \quad (2.2)$$

Pela substituição da Equação 2.1 em 2.2 obtém-se:

$$Q = \frac{h \cdot c}{\lambda}, \quad (2.3)$$

onde h é a constante de Planck ($6,625 \times 10^{-34}$ J.s).

A distribuição da energia radiante segundo o comprimento de onda, λ , ou frequência, ν , é chamada de Espectro Eletromagnético. Este não tem limites superiores ou inferiores definidos, apesar de para fins didáticos, ser considerado como abrangendo comprimentos de onda de 10^{-10} m, raios cósmicos, a 10^{10} m, ondas de rádio. Nele, todas as ondas são de mesma natureza, têm a mesma velocidade, c , no vácuo, mas diferem em comprimento de onda, significando que diferentes fontes lhes dão origem e diferentes instrumentos de medidas são apropriados para identificá-las (Halliday e Resnick, 1976). As regiões do Espectro Eletromagnético, indicadas na Figura 2.1, representam intervalos dentro dos quais existe um conjunto comum de técnicas experimentais, sendo de especial interesse do sensoriamento remoto as regiões chamadas: óptica (ultravioleta, visível e infravermelho) e microondas.

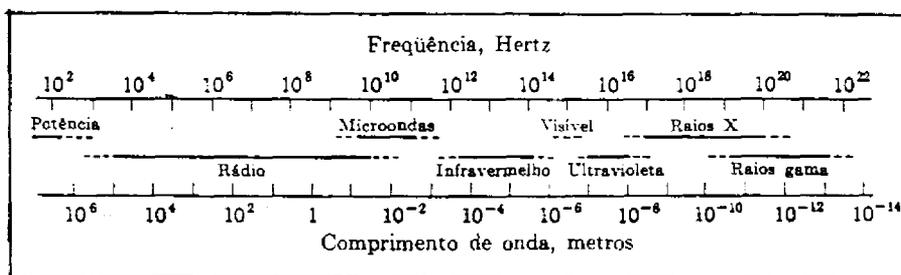


Fig. 2.1 - Espectro Eletromagnético

FONTE: Halliday e Resnick (1976), p. 442.

Medir a energia ou potência da radiação eletromagnética é atividade a que se dedica a Radiometria, sendo importante estabelecer os termos e conceitos radiométricos básicos.

2.2 - GRANDEZAS RADIOMÉTRICAS

Medições radiométricas são efetuadas para diversos propósitos, como determinação da temperatura pela medida da radiação associada; insolação em estudos de crescimento de plantas; medidas de irradiância solar; radiância de alvos, com ou sem imageamento e obtenção de reflectância (Nicodemus, 1967).

Para definição, realização e comparação de tais medidas, faz-se necessário estabelecer as grandezas comumente utilizadas, denominadas radiométricas.

Energia radiante, Q , é a energia eletromagnética capaz de realizar trabalho, aquecer um objeto ou causar uma mudança de estado da matéria (American Society of Photogrammetry, 1983).

Fluxo radiante, Φ , é definido como a quantidade de energia radiante que passa por uma posição na unidade de tempo. Expresso em watt, define-se matematicamente como:

$$\Phi = \frac{dQ}{dt}. \quad (2.4)$$

A densidade de fluxo radiante, E , incidente numa superfície (fluxo por unidade de área da superfície) é denominada Irradiância. Expressa em watt por metro quadrado ($W \cdot m^{-2}$), define-se matematicamente como:

$$E = \frac{d\Phi}{dA}. \quad (2.5)$$

O fluxo irradiado pela unidade de área de uma superfície, é denominado *Exitância*, M . Sua formulação e unidades são semelhantes à da irradiância, contudo o fluxo considerado neste caso é o emergente, não o incidente.

Intensidade radiante, I , é o fluxo irradiado por uma fonte pontual por unidade de ângulo sólido definido numa dada direção. Expressa em watt por esterradiano (W/sr), define-se matematicamente como:

$$I = \frac{d\Phi}{d\omega}. \quad (2.6)$$

Radiância num ponto de uma superfície e numa dada direção é definida como a intensidade radiante de um elemento de superfície, dividida pela área da projeção ortogonal do elemento de superfície sobre um plano perpendicular à direção considerada. Expressa em watt por esterradiano por metro quadrado ($W \cdot sr^{-1} \cdot m^{-2}$), define-se matematicamente como:

$$L = \frac{d^2\Phi}{dA \cdot \cos \Theta \cdot d\omega}. \quad (2.7)$$

Superfícies lambertianas são aquelas superfícies para as quais a radiância L é constante para qualquer ângulo de reflexão, Θ_r , em relação à normal à superfície, ou seja, produzem radiância direcio-

nalmente uniforme. De modo geral, os objetos não são refletores especulares, isto é, não obedecem às leis da óptica geométrica, mas refletem gerando um campo de luz difusa que se aproxima da superfície chamada lambertiana. Assim, é importante determinar as relações entre a *reflectância difusa*, a *irradiância* e a *radiância*.

Se a *radiância* oriunda de P (Figura 2.2) causada pela reflexão da radiação incidente é L , então o fluxo radiante refletido de P, $d^2\Phi$, pode ser expresso como um produto da *radiância* L , da projeção da área normal $dA \cdot \cos \Theta$ e o ângulo sólido $d\omega$, pela equação:

$$d^2\Phi = L \cdot d\omega \cdot dA \cdot \cos \Theta. \quad (2.8)$$

Como o elemento de ângulo sólido é obtido pela razão entre a área da superfície esférica (dS) e o raio da esfera R , tem-se:

$$d\omega = \frac{dS}{R^2} = \frac{R \cdot \sin \Theta \cdot R \cdot d\Theta \cdot d\varphi}{R^2}, \quad (2.9)$$

substituindo a equação 2.9 em 2.8 obtém-se:

$$d^2\Phi = L \cdot \sin \Theta \cdot \cos \Theta \cdot d\Theta \cdot dA \cdot d\varphi. \quad (2.10)$$

Assumindo que a *superfície lambertiana* elementar dA , é irradiada por E e que o fluxo radiante refletido por dA em qualquer direção Θ normal à superfície seja representado pela Equação 2.10, o fluxo total refletido é dado por:

$$d\Phi = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} L \cdot dA \cdot \sin \Theta \cdot \cos \Theta \cdot d\Theta \cdot d\varphi, \quad (2.11)$$

$$d\Phi = \pi \cdot L \cdot dA \cdot \left[\sin^2 \Theta \right]_0^{\pi/2}, \quad (2.12)$$

$$d\Phi = \pi \cdot L \cdot dA. \quad (2.13)$$

Como a *Exitância*, M , é definida pela razão $d\Phi / dA$ tem-se:

$$M = \pi \cdot L. \quad (2.14)$$

A razão do fluxo total refletido pelo fluxo total incidente, $d\Phi_r/d\Phi_i$, define a *reflectância difusa* de uma superfície:

$$\frac{d\Phi_r}{d\Phi_i} = \rho. \quad (2.15)$$

Como $d\Phi_i = E \cdot dA$ e $d\Phi_r = M \cdot dA$, a *reflectância difusa* pode ser expressa matematicamente por:

$$\rho = \frac{\pi \cdot L}{E}. \quad (2.16)$$

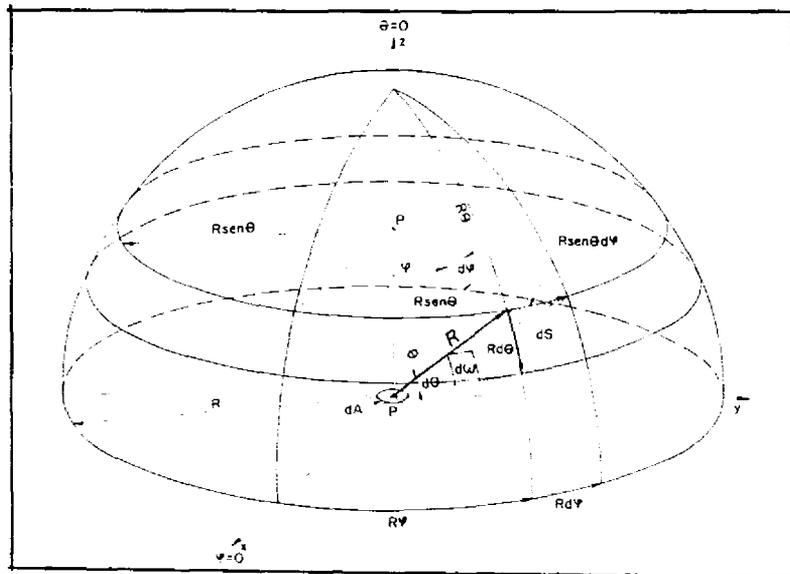


Fig. 2.2 - Geometria da interseção do fluxo radiante de uma superfície dA de radiância L .

Muitos termos são empregados considerando a geometria de radiação envolvida na obtenção da reflectância, sendo que o mais utilizado é o Fator de Reflectância Bidirecional (FRB).

2.3 - FATOR DE REFLECTÂNCIA BIDIRECIONAL

Como a obtenção do FRB é o assunto desta pesquisa, faz-se necessário conceituá-lo de maneira precisa. Para descrever sua natureza angular, os três termos melhor empregados são: *direcional*, *cônica* e *hemisférica*.

Obter a *reflectância direcional* significa medir o fluxo radiante segundo o ângulo numa determinada direção (θ, φ) , segundo um elemento de ângulo sólido, $d\omega$. A *reflectância cônica* refere-se a um ângulo sólido, ω , para qualquer configuração (a mais comum é aquela em que o ângulo sólido, ω , é um cone circular). A *reflectância hemisférica* denota a medição do fluxo radiante segundo o ângulo sólido hemisférico ($\omega = 2\pi$). Estas designações são mostradas na Figura 2.3 (Nicodemus et al., 1977).

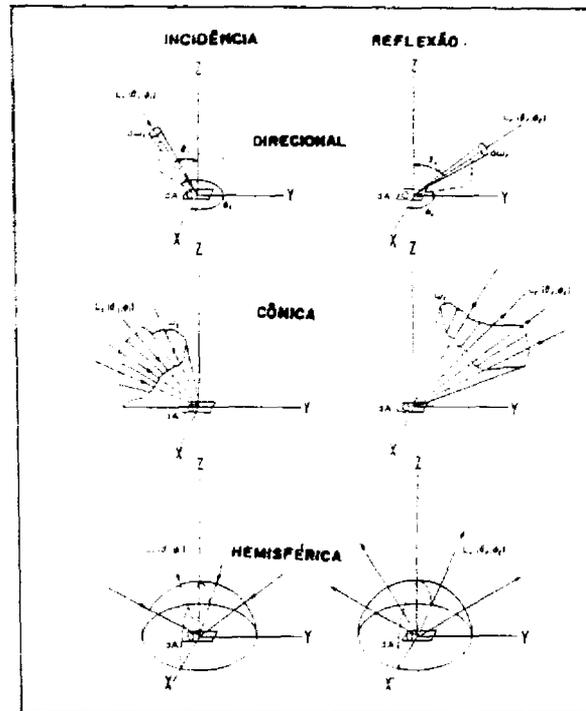


Fig. 2.3 - Geometrias usadas em medições de reflectância.

FONTE: Nicodemus et al.(1977), p. 10.

Na literatura, a maioria das medições de *reflectância espectral* é bidirecional, onde os ângulos de incidência e de coleta são direcionais, como é o caso de medições de radiância realizadas por sensores eletro-ópticos em satélites; ou bi-hemisféricas (usualmente "tomada" hemisférica) onde, os ângulos de incidência e de coleta são hemisféricos para estudos em laboratório. No entanto, a medida ideal para uso em Sensoriamento Remoto é a Função Distribuição de Reflectância Bidirecional (FDRB), que é a *reflectância bidirecional* para todos os ângulos possíveis (Curran, 1985).

Define-se a Função Distribuição de Reflectância Bidirecional, f_r , para uma irradiância uniforme incidindo sobre uma superfície homogênea e isotrópica, como a grandeza que caracteriza (geometricamente) as propriedades de reflexão daquela superfície (Nicodemus et al., 1977).

Considerando a Figura 2.4 como a geometria elementar dos feixes incidente e refletido, a Função Distribuição de Reflectância Bidirecional (Nicodemus et al., 1977) é dada por:

$$f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; E_i)}{dE_i(\theta_i, \varphi_i)} . \quad (2.17)$$

Substituindo em 2.17, $dE_i = L_i \cdot \cos \theta_i \cdot d\omega_i$, tem-se:

$$f_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_r(\theta_i, \varphi_i; \theta_r, \varphi_r; E_i)}{L_i(\theta_i, \varphi_i) \cdot \cos \theta_i \cdot d\omega_i} . \quad (2.18)$$

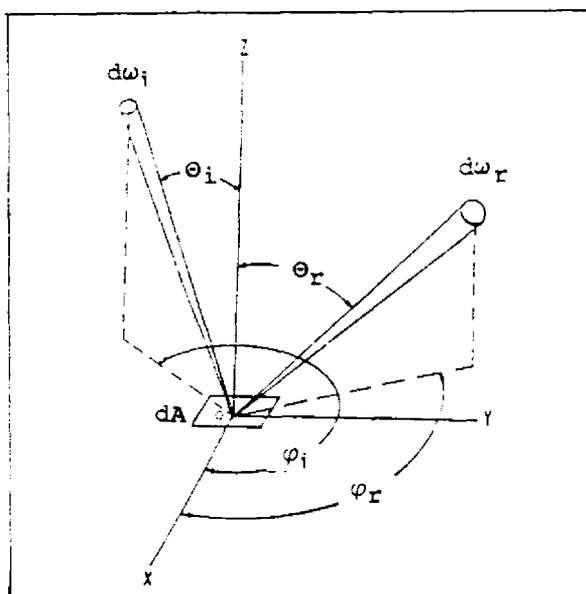


Fig. 2.4 - Geometria elementar dos raios incidente e refletido.
 FONTE: Nicodemus et al. (1977), p. 6.

Considerando $d\Omega$ (elemento de ângulo sólido projetado) como o produto de um elemento de ângulo sólido, $d\omega$, pelo co-seno do ângulo, θ , entre a normal à superfície e a direção associada, tem-se:

$$d\Omega_i = \cos \theta \cdot d\omega_i . \quad (2.19)$$

Logo, a Equação 2.18 pode ser escrita na forma:

$$f_r(\Theta_i, \varphi_i; \Theta_r, \varphi_r) = \frac{dL_r(\Theta_i, \varphi_i; \Theta_r, \varphi_r; E_i)}{L_i(\Theta_i, \varphi_i) \cdot d\Omega_i}. \quad (2.20)$$

de onde vem:

$$dL_r(\Theta_i, \varphi_i; \Theta_r, \varphi_r; E_i) = f_r(\Theta_i, \varphi_i; \Theta_r, \varphi_r) \cdot L_i(\Theta_i, \varphi_i) \cdot d\Omega_i \quad (2.21)$$

Pode-se obter o fluxo incidente em uma superfície dA , segundo o ângulo sólido ω_i através da definição de radiância (Equação 2.7):

$$L_i(\Theta_i, \varphi_i) = \frac{d^2\Phi_i}{dA \cdot \cos \Theta_i \cdot d\omega_i}, \quad (2.22)$$

$$d^2\Phi_i = L_i(\Theta_i, \varphi_i) \cdot d\omega_i \cdot dA \cdot \cos \Theta_i. \quad (2.23)$$

Integrando a Equação 2.23 obtém-se:

$$d\Phi_i = dA \cdot \int_{\omega_i} L_i(\Theta_i, \varphi_i) \cdot \cos \Theta_i \cdot d\omega_i, \quad (2.24)$$

Substituindo a Equação 2.19 em 2.24 tem-se:

$$d\Phi_i = dA \cdot \int_{\omega_i} L_i(\Theta_i, \varphi_i) \cdot d\Omega_i. \quad (2.25)$$

Similarmente o fluxo refletido por uma superfície dA num ângulo sólido ω_r é dado por:

$$d\Phi_r = dA \cdot \int_{\omega_r} L_r(\Theta_r, \varphi_r) \cdot d\Omega_r, \quad (2.26)$$

considerando a Equação 2.21 e a Equação 2.27:

$$L_R(\Theta_R, \varphi_R) = \int_{\omega_i} dL_R(\Theta_i, \varphi_i; \Theta_R, \varphi_R; E_i), \quad (2.27)$$

pode-se escrever:

$$d\Phi_R = dA \cdot \int_{\omega_R} \int_{\omega_i} f_R(\Theta_i, \varphi_i; \Theta_R, \varphi_R) \cdot L_i(\Theta_i, \varphi_i) \cdot d\Omega_i \cdot d\Omega_R. \quad (2.28)$$

O Fator de Reflectância é a razão entre o fluxo refletido por um alvo sob condições específicas de radiância e visada e aquele refletido por um padrão ideal, perfeitamente difuso (lambertiano), sob idênticas condições de irradiância e de visada.

Da Equação 2.28, pode-se relacionar o fluxo, $d\Phi_R^O$, refletido por um elemento de superfície de um alvo, e o fluxo, $d\Phi_R^R$, refletido por um elemento de superfície do alvo de referência.

Considerando o alvo de referência como lambertiano, o fluxo por ele refletido é obtido utilizando-se a definição de f_R , da seguinte forma:

$$f_R^R(\Theta_i, \varphi_i; \Theta_R, \varphi_R) = \frac{dL_R(\Theta_i, \varphi_i; \Theta_R, \varphi_R; E_i)}{dE_i(\Theta_i, \varphi_i)}, \quad (2.29)$$

como a *Exitância* em um alvo lambertiano é igual à irradiância ($M = E$) tem-se:

$$f_R^R(\Theta_i, \varphi_i; \Theta_R, \varphi_R) = \frac{dM/\pi}{dM}, \quad (2.30)$$

$$f_R^R(\Theta_i, \varphi_i; \Theta_R, \varphi_R) = 1/\pi, \quad (2.31)$$

onde R refere-se à referência.

Utilizando o valor obtido na Equação 2.31, a razão (R) da radiância refletida de um alvo qualquer e a radiância refletida por um alvo lambertiano pode ser determinada (Silva, 1978):

$$dL_R^O = f_R^O(\Theta_i, \varphi_i; \Theta_R, \varphi_R) \cdot dE_i(\Theta_i, \varphi_i), \quad (2.32)$$

$$dL_R^R = f_R^R(\Theta_i, \varphi_i; \Theta_r, \varphi_r) \cdot dE_i(\Theta_i, \varphi_i), \quad (2.33)$$

$$R = \frac{dL_R^O}{dL_R^R} = \frac{f_R^O(\Theta_i, \varphi_i; \Theta_r, \varphi_r) \cdot dE_i(\Theta_i, \varphi_i)}{f_R^R(\Theta_i, \varphi_i; \Theta_r, \varphi_r) \cdot dE_i(\Theta_i, \varphi_i)}, \quad (2.34)$$

$$R = \frac{f_R^O}{f_R^R} = \frac{f_R^O}{1/\pi}, \quad (2.35)$$

$$R = \pi \cdot f_R^O. \quad (2.36)$$

Logo a razão R será:

$$R(\Theta_i, \varphi_i; \Theta_r, \varphi_r) = \pi \cdot f_R^O(\Theta_i, \varphi_i; \Theta_r, \varphi_r), \quad (2.37)$$

que é o Fator de Reflectância.

A f_R^O , Função de Distribuição de Reflectância Bidirecional, apesar de útil como um conceito fundamental, é geométrica e matematicamente definida como uma derivada com valor instantâneo que não pode ser medida (Nicodemus et al., 1977).

A integração de f_R^O sobre ângulos sólidos finitos de incidência e reflexão produz o Fator de Reflectância Bidirecional. Robinson e Biehl (1979) definem o FRB "verdadeiro" como sendo:

$$R(\Theta_i, \varphi_i; \Theta_r, \varphi_r) = \frac{L_o(\Theta_i, \varphi_i; \Theta_r, \varphi_r)}{L_R(\Theta_i, \varphi_i; \Theta_r, \varphi_r)} \cdot K_R, \quad (2.38)$$

onde $R(\Theta_i, \varphi_i; \Theta_r, \varphi_r)$ representa o FRB; $L_o(\Theta_i, \varphi_i; \Theta_r, \varphi_r)$ e $L_R(\Theta_i, \varphi_i; \Theta_r, \varphi_r)$ são as radiâncias das superfícies do objeto e da referência; K_R é o fator de reflectância da placa de referência.

Considerando-se apenas a reflexão tem-se:

$$R(\Theta_r, \varphi_r) = \frac{L_o(\Theta_r, \varphi_r)}{L_R(\Theta_r, \varphi_r)} \cdot K_R \quad (2.39)$$

Analisando a Equação 2.39, nota-se que a obtenção do FRB está condicionada às radiâncias do alvo e da placa de referência; à geometria de medição, bem como à correção do resultado pelo fator de reflectância da placa de referência utilizada.

CAPÍTULO 3

FATORES QUE AFETAM O FRB

Medição é o processo pelo qual uma comparação quantitativa é estabelecida entre dois ou mais valores de uma grandeza observada (comprimento, temperatura, radiância espectral, reflectância espectral, entre outras), relacionadas a um padrão de referência. A precisão das medidas depende necessariamente do controle exercido sobre as variáveis que as afetam.

No caso específico do FRB, os resultados obtidos podem ser afetados, principalmente, pelas seguintes variáveis: o vento (Lord et al., 1985); a umidade (Curran, 1985); a deterioração do material utilizado na confecção dos padrões de referência (Grum e Luckey, 1968); as mudanças sazonais (Curran, 1985); a não "lambertianidade" do padrão de referência (Leshkevich, 1988a); a variação de irradiância (Duggin, 1982); a vizinhança (Kimes et al., 1983); a intercalibração de radiômetros (Duggin, 1980); e a geometria de radiação (Asrar, 1989).

Algumas das variáveis citadas no parágrafo anterior não estão inseridas no escopo desta pesquisa. As variáveis que afetam o FRB e que compõem o objetivo desta pesquisa, são estudadas com base na literatura disponível e são abordadas nos seguintes tópicos:

- 1) Influência do comportamento dos sistemas de medição.
- 2) Influência da calibração de padrões de reflectância.
- 3) Influência da intercalibração de radiômetros.
- 4) Influência da variação de irradiância.
- 5) Influência da variação da geometria de radiação.
- 6) Influência dos vizinhos na resposta do alvo de interesse.

A calibração dos radiômetros é abordada nesta pesquisa, apesar de não afetar o FRB, porque às vezes a radiometria utiliza medidas de grandezas absolutas, como a radiância (Milton, 1987). Além disso, em radiômetros como o REFSPEC IIA para a obtenção do Fator de Reflectância Refspec (FRR) esta calibração é exigida.

3.1 - INFLUÊNCIA DO COMPORTAMENTO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

O resultado de um experimento é invariavelmente expresso sob a forma de uma medida. Esta pode representar o valor da magnitude de uma grandeza ou consubstanciar uma conclusão qualitativa. O processo de medição deve seguir regras que tornem os resultados confiáveis de modo a permitir que outros pesquisadores os utilizem. No entanto, tal confiabilidade é limitada por perturbações dos tipos aleatórias e sistemáticas que produzem incertezas (erros) nas medidas.

O erro é definido como a diferença entre o valor *nominal* e o valor *real* ou entre o valor *verdadeiro* e o valor *medido*, resultante de processos aleatórios ou sistemáticos.

Define-se como erro *aleatório* (acidental) numa medida quando várias medições repetidas de uma mesma grandeza produzem valores diferentes. Os erros aleatórios são causados pelo julgamento do experimentador ao realizar a leitura do equipamento de medida; por condições variáveis como temperatura e tensão (vibrações mecânicas) e por pequenos distúrbios que não podem ser controlados (Beers, 1957).

Os erros *sistemáticos* referem-se a perturbações que influenciam igualmente todas as medidas de uma grandeza particular. Os erros sistemáticos são originários de calibração dos instrumentos de medição; técnicas imperfeitas e defeitos em equipamentos (Beers, 1957)

Bunnik e Verhoef (1974) consideram os erros aleatórios e os erros sistemáticos causados pelos instrumentos de medição no resultado final de suas medidas de reflectância direcional espectral. Consideram também que a relação sinal/ruído depende do nível de irradiância e sensibilidade espectral dos sensores, sendo a causa de erros sistemáticos. Quando o nível de irradiância total excede 50 W/m^2 , o erro absoluto é de 1%, aproximadamente.

Mirabo et al. (1982) testaram o comportamento de um radiômetro com relação à precisão com medições repetidas em condições de laboratório e de campo. Os desvios obtidos foram menores que 0,5%. Concluíram ainda que nenhuma medida de reflectância poderia ser obtida dentro da faixa de absorção atmosférica (aproximadamente 1900 nm) onde a relação sinal/ruído era muito baixa.

Epema (1991), em seu estudo de erros nas medições do FRB, recomenda atenção nas medidas de reflectância, a fim de evitar erros causados por fatores de ganho incorretos do instrumento empregado.

3.2 - INFLUÊNCIA DA CALIBRAÇÃO

Se uma grandeza física for medida em épocas diferentes ou com instrumentos diferentes e os resultados forem os mesmos, diz-se que a medida é independente do instrumental adotado, sendo portanto calibrada. Esta assertiva implica em dizer que os atributos inferidos a partir das medições são exclusivamente do alvo e não do instrumental (Wyatt, 1978).

Para obter valores de FRB independentes da radiação incidente, condições atmosféricas e do instrumental empregado, faz-se necessária a calibração de padrões de reflectância (Robinson e Biehl, 1979) e a intercalibração de radiômetros. Para obter valores independentes de radiância, irradiância e FRR, é necessário a calibração de radiômetros.

3.2.1 - CALIBRAÇÃO DE PADRÕES DE REFLECTÂNCIA

O FRB não é obtido como uma medida direta dos fluxos radiantes incidente e refletido, mas como uma medida relativa a um padrão de referência de reflectância, cujas propriedades devem ser conhecidas e invariantes, sobretudo no transcorrer das medições (Budde, 1976). Tal padrão, se for um refletor perfeitamente difuso, deve ter uma reflectância unitária, constante para todos os comprimentos de onda (Kimes e Kirchner, 1982).

Entretanto, um refletor difuso perfeito não é possível de ser produzido, pois a densidade (Weidner e Hsia, 1981) (Figura 3.1), o tipo de material (Frei, 1976) (Figura 3.2), a deterioração (Figura 3.3) do produto utilizado (Grum e Luckey, 1968) e a forma de construção (Jackson et al., 1987), produzem imperfeições na superfície de referência. Além disto as propriedades de reflectância do padrão de referência podem ser modificadas pelo uso freqüente (Jackson et al., 1987) ou pela exposição prolongada à radiação ultravioleta de alta intensidade (Eastmann Kodak Company, 1977)

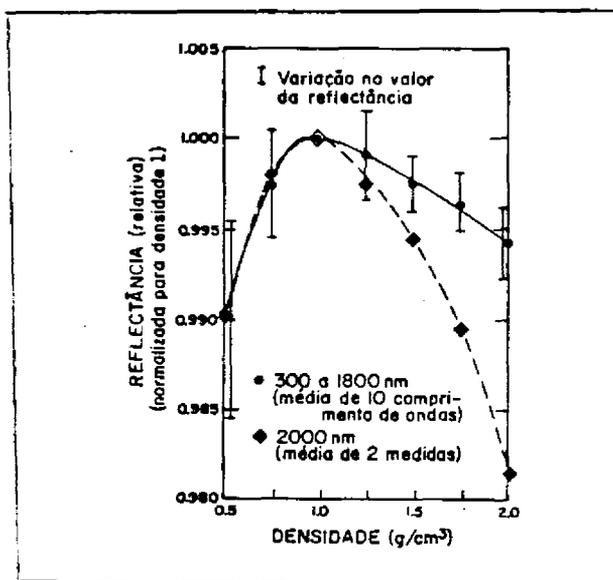


Fig. 3.1 - Variação da reflectância do Politetrafluoretileno (PTFE) prensado em função da densidade.

FONTE: Weidner e Hsia (1981), p. 857.

Os padrões podem ser produzidos com sulfato de bário ($BaSO_4$) ou óxido de Magnésio (MgO). Face à necessidade de se produzir um bom padrão de reflectância, dá-se preferência ao sulfato de bário, por ser mais estável e ter maior reflectância (Grum e Luckey, 1968) que o óxido de magnésio (Figura 3.3).

Como a reflectância dos padrões sofre modificações por vários fatores como os expostos, faz-se necessário calibrá-los a fim de determinar sua reflectância espectral absoluta.

A calibração de tais padrões pode ser efetuada em laboratório ou no campo. De acordo com Budde (1976), essencialmente, há três classes de métodos de calibração utilizados:

- a) Métodos goniofotométricos;
- b) Métodos baseados na teoria de Kubelka-Munk; e
- c) Métodos de esferas integradoras.

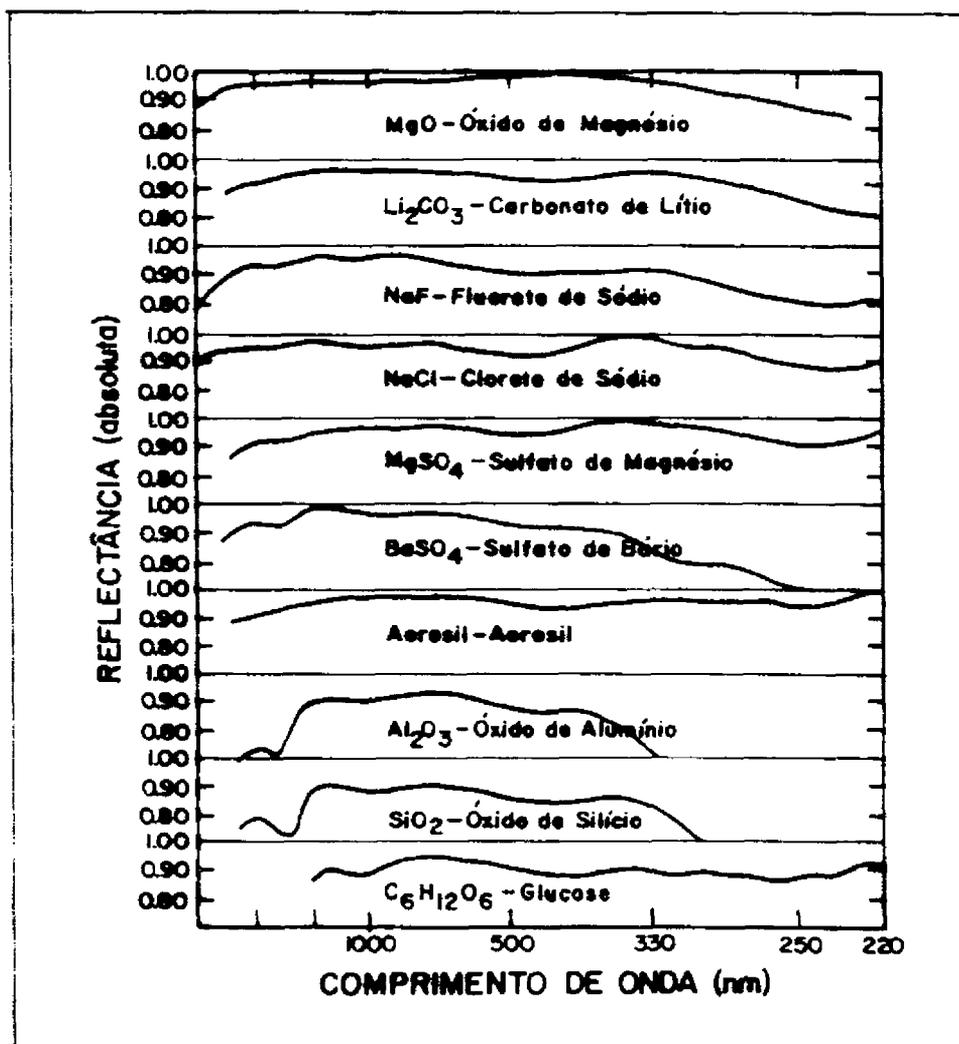


Fig. 3.2 - Reflectância absoluta difusa de vários padrões brancos em função do comprimento de onda.

FONTE: Frei (1976), p. 554.

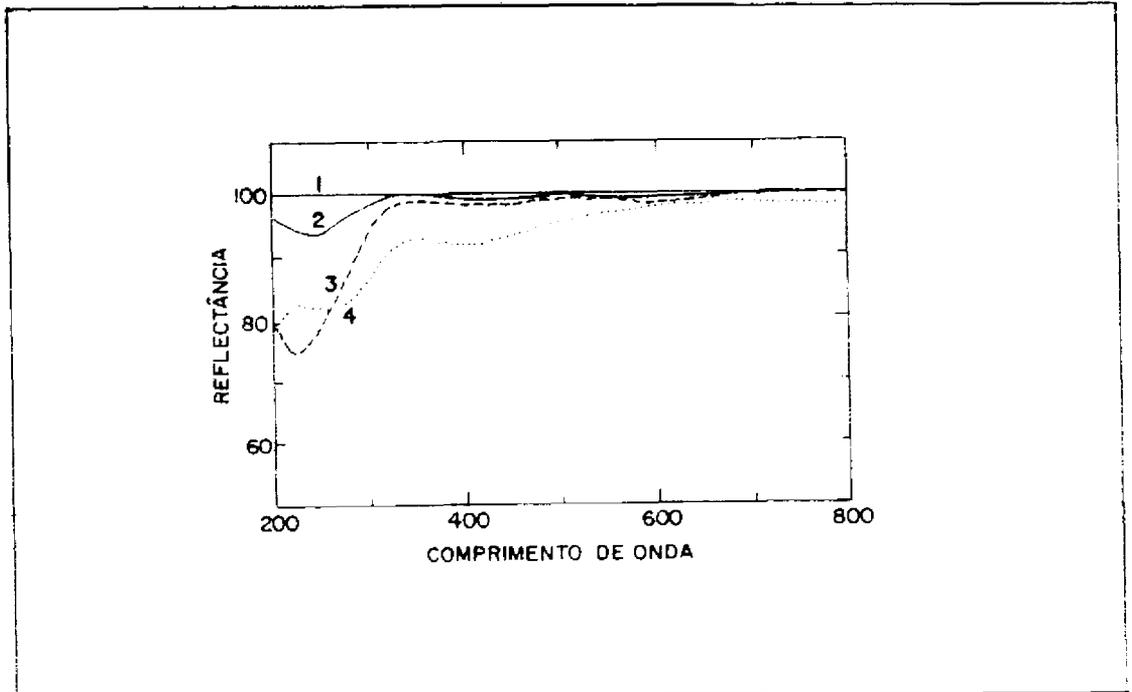


Fig. 3.3 - Alteração da reflectância em função do tempo de uma amostra borrifada com MgO, em comparação ao BaSO₄ prensado: 1- BaSO₄ (—), 2- MgO medido imediatamente após o preparo (—), 3- MgO medido quatro dias após o preparo (---), 4- MgO medido trinta dias após o preparo (••).
FONTE: Grum e Luckey (1968), p. 2293.

O método goniofotométrico, ou da *indicatriz*, ou "ponto a ponto", consiste em medir a radiação refletida num feixe estreito segundo os ângulos zenital e azimutal de observação. A amostra é iluminada na direção ou próximo da normal. O fluxo refletido é determinado pela integração numérica dos valores goniofotométricos da radiância.

Os métodos da *teoria de Kubelka-Munk* são baseados em relações entre valores de reflectância de materiais translúcidos como folha de papel, camadas de tinta sobre vários fundos e parâmetros físicos, como espessura da camada de transmitância, distribuição do pó, etc. Testados e reportados na literatura, suas equações foram consideradas difíceis de aplicar, os resultados imprecisos e os métodos complexos.

O método com *esfera integradora* consiste, basicamente, na utilização de uma esfera (Figura 3.4), que tem uma janela de entrada da radiação (A), uma janela de amostragem (S), que compreenda até 10 % da área total da esfera, e uma janela de visada (V), onde um radiômetro mede as radiâncias.

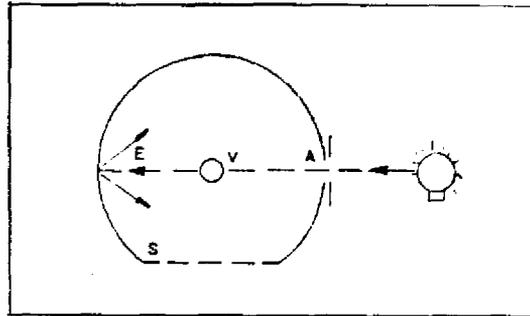


Fig. 3.4 - Método de esfera integradora.
FONTE: Budde (1976), p. 588.

Para determinar a reflectância da parede da esfera integradora, são feitas duas medidas de radiância:

- 1) Com a janela de amostragem aberta, ou coberta por uma amostra não refletora (L_0).
- 2) Com a janela de amostragem coberta com uma amostra pintada com a mesma tinta da esfera (L).

Da razão $K = L/L_0$ e das constantes geométricas da esfera (diâmetro e tamanho da janela de amostragem) é calculada a reflectância difusa da esfera, ρ_d . O equacionamento desta teoria foi primeiramente descrito por Taylor, em 1920. A partir de então, novos desenvolvimentos da teoria da esfera integradora foram apresentados (Jacquez e Kuppemheim, 1955; Goebel, 1967).

Para determinar a reflectância, ρ_a , de uma amostra, ela é colocada na janela de amostragem e mede-se a radiância, L_a , produzida. Da razão $K_a = L_a/L_0$ e, conhecendo-se as constantes geométricas e a reflectância difusa, ρ_d , da esfera, calcula-se a reflectância absoluta da amostra, ρ_a . Baseado no desenvolvimento de Goebel (1967), Perdiz (1990) desenvolveu um equacionamento para o cálculo da reflectância absoluta de uma amostra.

Grum e Wightman (1977) apresentaram os valores obtidos para reflectância absoluta do BaSO_4 com esfera integradora obtidos segundo o método da dupla esfera e o terceiro método de Taylor modificado. Os cálculos foram baseados na formulação de Budde (1976).

Perdiz e Silva Filho (1991), mostraram que uma placa de referência, cuja reflectância absoluta foi obtida em relação a uma esfera integradora, constitui-se num padrão de reflectância, a partir do qual, através de um método de intercalibração, pode-se calibrar outras placas de referência, as quais passam a ser novos padrões de reflectância (ou padrões secundários).

3.2.2 - CALIBRAÇÃO DE RADIÔMETROS

Por vezes é importante, na análise dos dados sensorizados obtidos por um radiômetro, a conversão da unidade de saída do instrumento, tipicamente volts ou ampêres, para unidade de energia, radiância. A relação entre a saída do instrumento e a radiância incidente é chamada de calibração absoluta de radiômetros. Esta calibração é efetuada em laboratório utilizando padrões de radiância e irradiância (Figura 3.5).

Padrão de radiância é aquele em que a radiação produzida é conhecida com precisão, normalmente pela comparação com um padrão primário ou, em alguns casos, através de cálculos aplicados diretamente ao padrão.

Na Figura 3.5a, o padrão de radiância é uma placa de tungstênio por onde flui uma corrente controlada. Sua temperatura é conhecida e a radiância pode ser calculada usando-se a teoria de radiação do corpo negro. Estes padrões são adequados para uso em laboratório porque a área do padrão, embora pequena, é suficiente para preencher o campo de visada dos radiômetros de laboratório.

Outra forma de padrão, é o de irradiância (Figura 3.5b). Consiste de uma lâmpada halógena de tungstênio que é cuidadosamente calibrada em relação a um padrão de laboratório. Difere do padrão de radiância na medida em que, ao invés de se conhecer a radiância produzida pela lâmpada, conhece-se a irradiância a uma certa distância.

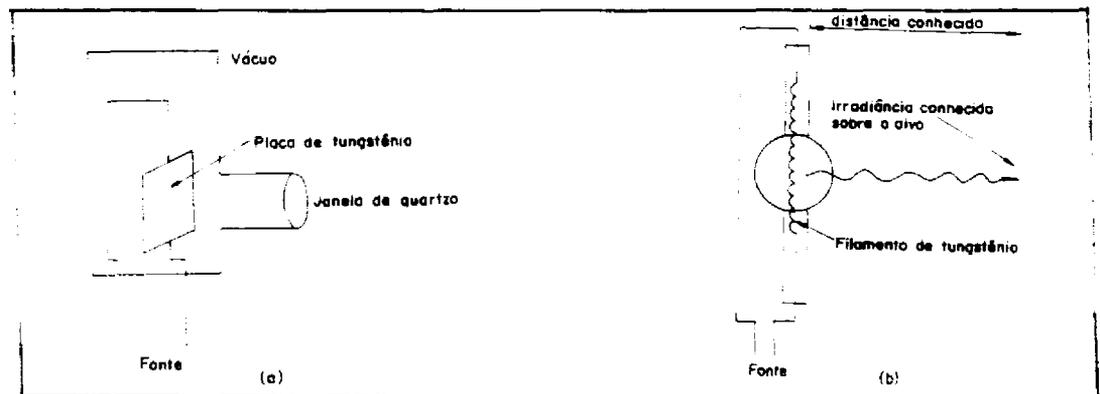


Fig. 3.5 - Diagrama de padrões de calibração de radiômetros para condições de laboratório: a - padrão de radiância e b - padrão de irradiância .

FONTE: Silva (1978), p. 70.

Se o instrumento a ser calibrado é de uso no campo e permite medir a radiância difusa, então um padrão de irradiância pode ser usado. É necessário contudo cuidado para que reflexões

indesejáveis não sejam coletadas pelo radiômetro. Este procedimento deve ser repetido em intervalos de poucos dias de modo a assegurar que a calibração do instrumento está sendo mantida.

Outro procedimento consiste na utilização de um padrão de reflectância de sulfato de bário e um alvo, arranjados conforme a Figura 3.6, assegurando que a geometria de irradiação e de visada para os dois alvos sejam o mais semelhante possível. Além disso, se a irradiância solar é medida ao mesmo tempo em que o instrumento mede o painel de referência, então a radiância absoluta da cena pode ser estabelecida pela combinação da reflectância do painel com a medida de irradiância solar sobre ele incidente. A irradiância solar pode ser medida pelo instrumento se ele for previamente calibrado com um padrão de irradiância (Silva, 1978).

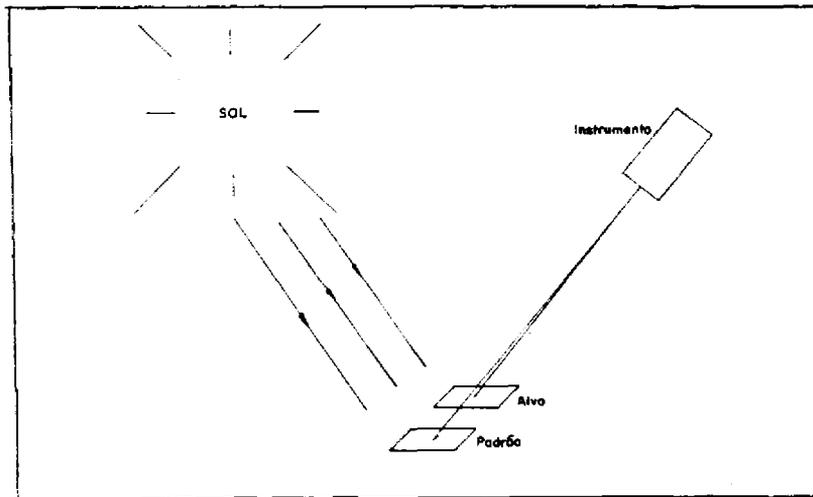


Fig. 3.6 - Calibração de um radiômetro no campo, usando-se padrão de reflectância de sulfato de bário.

FONTE: Silva (1978), p. 73.

Os resultados obtidos por estes métodos são comparados aos padrões fornecidos pelo fabricante do radiômetro. A referenciação dos dados obtidos torna-se mais correta à medida em que se sabe qual deverá ser o fator de correção dos radiômetros para novas medidas.

3.2.3 - INTERCALIBRAÇÃO DE RADIÔMETROS

Além da calibração radiométrica absoluta do sensor, faz-se necessário observar se o FRB foi medido com um único equipamento (ou uma unidade de leitura) ou com dois equipamentos (ou duas unidades de leitura). Caso seja adotado o segundo procedimento é imprescindível conhecer o fator de intercalibração, F_{ir} , dos radiômetros utilizados. O F_{ir} pode ser obtido dividindo-se a radiância do padrão, (L_R^A) ,

medida com uma unidade de leitura (A), pela radiância do mesmo padrão, (L_R^B), medida com outra unidade de leitura (B).

A necessidade de intercalibração dos radiômetros é demonstrada na Figura 3.7. Nela representa-se graficamente o FRB obtido em experimentos preliminares pela razão entre as radiâncias do alvo (grama) e a placa de referência, sem considerar o fator de intercalibração, F_{ir} , na curva 1. A curva 2 representa o FRB da grama nas mesmas condições de medida com o F_{ir} sendo utilizado na sua correção.

Segundo Duggin e Cunia (1983), o valor de F_{ir} pode ser obtido utilizando um mesmo padrão de referência visados por dois radiômetros (Figura 3.8). Uma série de medidas, obtidas sob diferentes condições de iluminação, permitem o cálculo de uma equação de regressão para F_{ir} . Então, da curva de regressão para o valor de radiância correspondente ao instante da medição, é estimado o valor de F_{ir} .

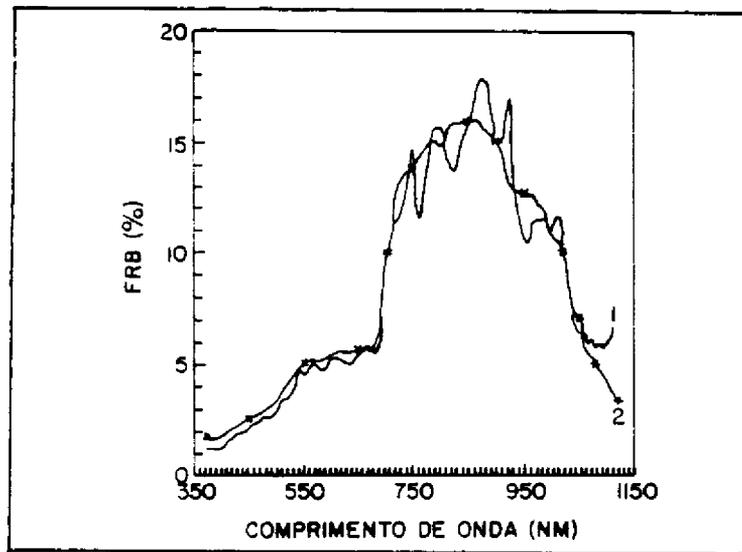


Fig. 3.7 - Influência do fator de intercalibração: 1- sem intercalibração e 2- com intercalibração.

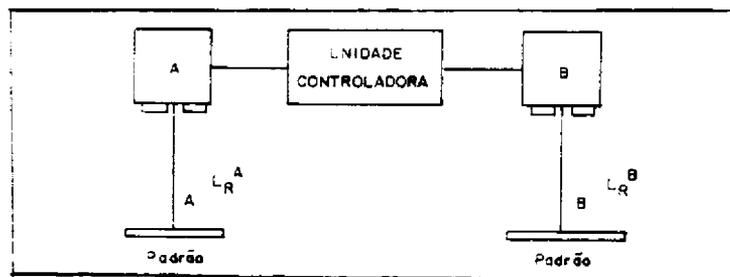


Fig. 3.8 - Intercalibração de radiômetros utilizando radiâncias.
FONTE: Duggin e Cunia (1983), p. 3772 .

Segundo os mesmos autores, um método alternativo é utilizar um radiômetro medindo irradiância, enquanto o outro mede um padrão de reflectância conforme mostrado na Figura 3.9. Neste caso, o fator de intercalibração, F_{ir} , é uma função da irradiância, E_r , medida pelo primeiro radiômetro.

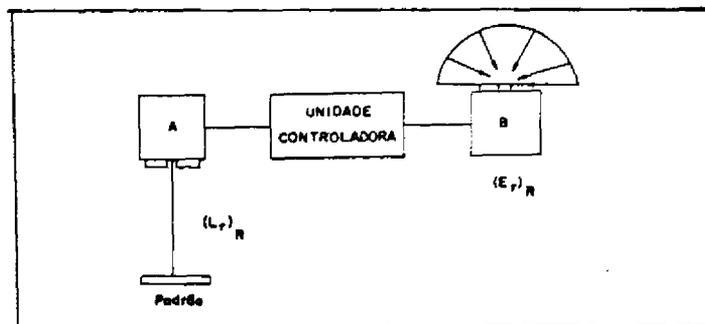


Fig. 3.9 - Intercalibração de radiômetros utilizando medidas de radiância e irradiância.

FONTE: Duggin e Cunia (1983), p. 3772.

3.3 - INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE IRRADIÂNCIA NO FRB

Mudanças na irradiância, devidos a variações atmosféricas, podem ocorrer com diferentes intensidades. Primeiro, correntes de particulados causam pequenas flutuações por curtos períodos (milissegundos), que produzem variações de cerca de 1% na irradiância. Segundo, há períodos maiores (segundos até minutos) em que as mudanças são da ordem de 5%, em média, devidos a nuvens de alta altitude (Cirrus) invisíveis ao olho humano. Terceiro, mudanças bem maiores ocorrem quando nuvens passam em frente do disco solar (Milton, 1987).

Dependendo do método de medição adotado, estas variações de irradiância podem provocar substanciais alterações no FRB. Como a precisão das medidas de reflectância é fundamental para a utilização dos dados, os métodos utilizados buscam satisfazer esta necessidade. Os dois métodos habitualmente utilizados, descritos a seguir, são chamados de *seqüencial* e *simultâneo*.

3.3.1 - MÉTODO SEQÜENCIAL

Este método é bastante utilizado pois, com apenas um radiômetro, é possível a obtenção da reflectância. O procedimento consiste em medir seqüencialmente o alvo de interesse e, posteriormente, uma placa de referência (Figura 3.10).

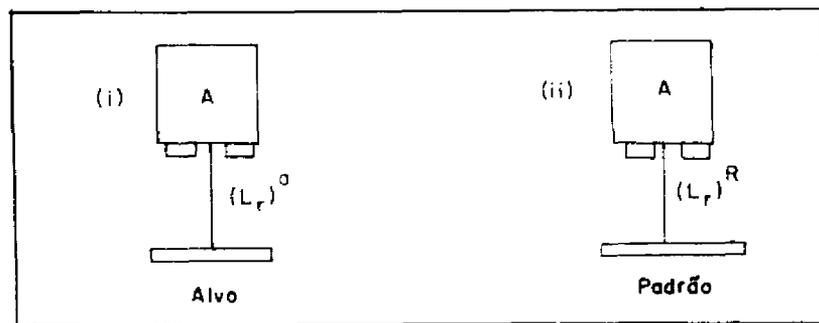


Fig. 3.10 - Método de medição seqüencial (procedimento de substituição).

FONTE: Duggin e Cunia (1983), p. 3773.

Neste método, assume-se que a intensidade e a distribuição espectral da irradiância incidente (Figura 3.11) é invariante durante as leituras do alvo e do padrão de referência. Na realidade, a variação previsível, segundo Duggin (1982), é de 5 a 10%. Para minorar este efeito, as duas medidas devem ser realizadas no menor intervalo de tempo possível.

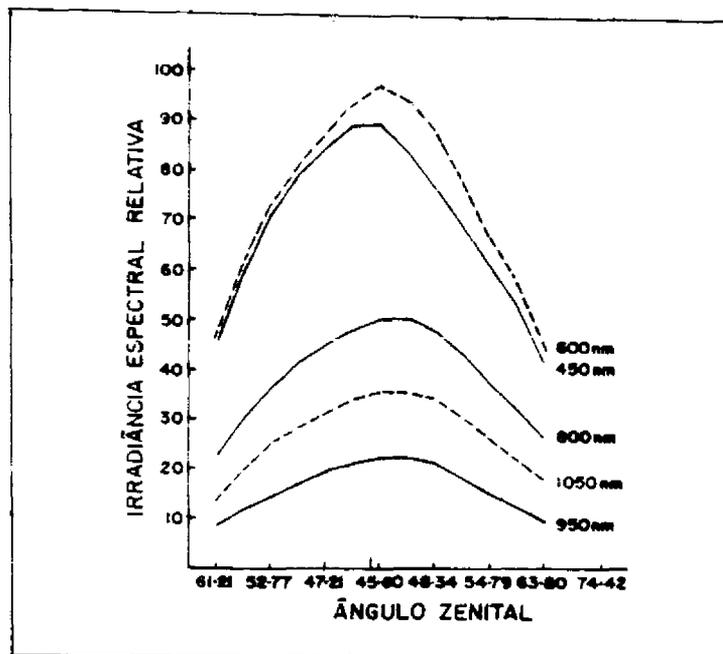


Fig. 3.11 - Irradiância global espectral em função do ângulo solar zenital.

FONTE: Duggin e Philipson (1982), p. 2834.

3.3.2 - MÉTODO SIMULTÂNEO

Proposto por Duggin (1980), este método procura eliminar os erros (de até 10%) no fator de reflectância, devido às variações de irradiância causadas pela atmosfera, durante as medições.

A disposição dos instrumentos para medição é mostrada na Figura 3.12. Os instrumentos são montados verticalmente. O instrumento (B) que mede a irradiância hemisférica do céu é adaptado com um coletor co-seno. O outro instrumento (A) mede a radiância de um alvo refletida num ângulo sólido segundo uma direção determinada. As medidas com os dois radiômetros são realizadas simultaneamente.

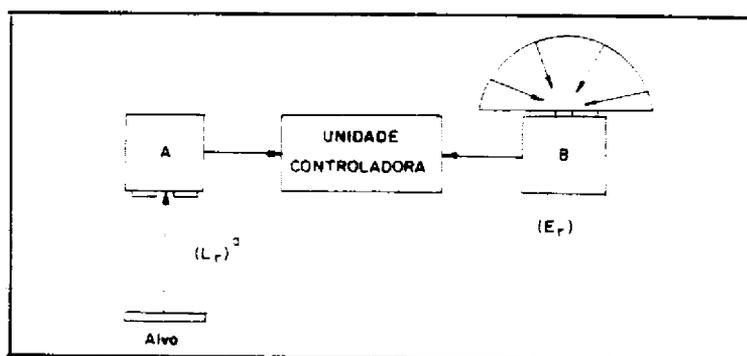


Fig. 3.12 - Método de medição simultânea indireta.
FONTE: Duggin e Cunia (1983), p. 3772.

O fator de reflectância bidirecional (R_r) é obtido, segundo Duggin e Cunia (1983) por:

$$R_r = \frac{L_r^a}{E_r} \cdot K_r \cdot C_r \quad (3.1)$$

onde, L_r^a é a radiância do alvo, E_r a irradiância, K_r o fator de reflectância da referência e C_r o fator de intercalibração dos radiômetros ($C_r = E_r^R / L_r^R$).

É importante observar que nenhum dos dois métodos, seqüencial ou simultâneo, é adequado para períodos em que houver variação da iluminação solar em razão de obstrução por nuvens. Sob condições de céu claro, o método simultâneo reduz erros devido a pequenas mudanças temporais na radiação, entretanto, traz outros problemas como a necessidade de transportar dois radiômetros e intercalibrá-los (Milton, 1987).

Utilizar o melhor método, fazer calibração de placas e intercalibração de radiômetros não asseguram a precisão das medidas para obtenção do FRB. Outros fatores como a geometria de radiação devem ser considerados e, na medida do possível controlados ou os erros introduzidos por eles corrigidos.

3.4 - INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DE RADIAÇÃO

A radiação que chega num determinado alvo é a soma da radiação difusa, da radiação direta e da radiação refletida por vizinhos próximos. Ao interagir com a superfície, uma porção de radiação incidente é refletida na direção do sensor. Os alvos naturais não são refletores perfeitamente difusos e, portanto, a intensidade do fluxo refletido varia com os ângulos nos quais ele deixa a superfície.

O ambiente de radiação compreende dois hemisférios de distribuição de radiação eletromagnética: um chegando e outro saindo, conforme mostra a Figura 3.13. As posições da fonte de radiação e do sensor são definidas por dois ângulos: zenital, θ , com relação à vertical, e azimutal, φ , com relação a uma direção determinada, este, medido no plano horizontal.

Weidner e Hsia (1981) mostram (Figura 3.14) como o FRB de uma placa de politetrafluoretileno (PTFE) varia com o ângulo de incidência. Neste mesmo trabalho, o FRB do sulfato de bário é apresentado (Figura 3.15) para diferentes ângulos de visada e de incidência, no comprimento de onda de 600 nm.

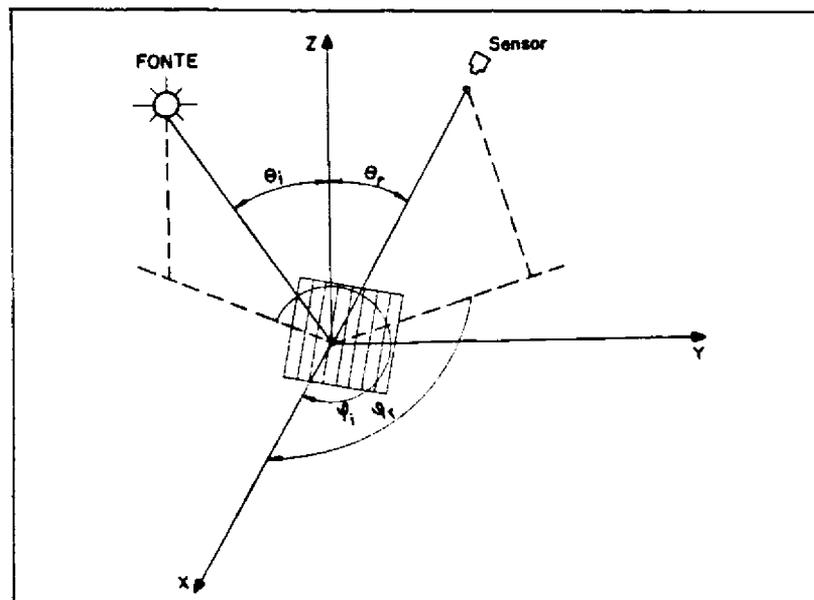


Fig. 3.13 - Geometria usada para a obtenção do FRB.
 FONTE : Nicodemus et al.(1977), p. 6.

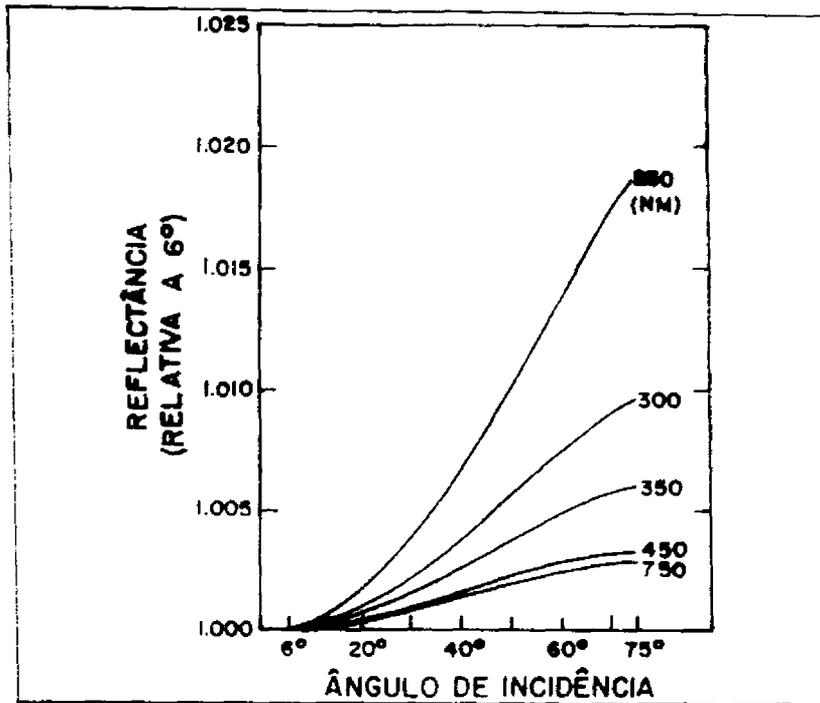


Fig. 3.14 - Fator de reflectância direcional/hemisférica do PTFE prensado em função do ângulo zenital de incidência e do comprimento de onda.
 FONTE: Weidner e Hsia (1981), p. 860.

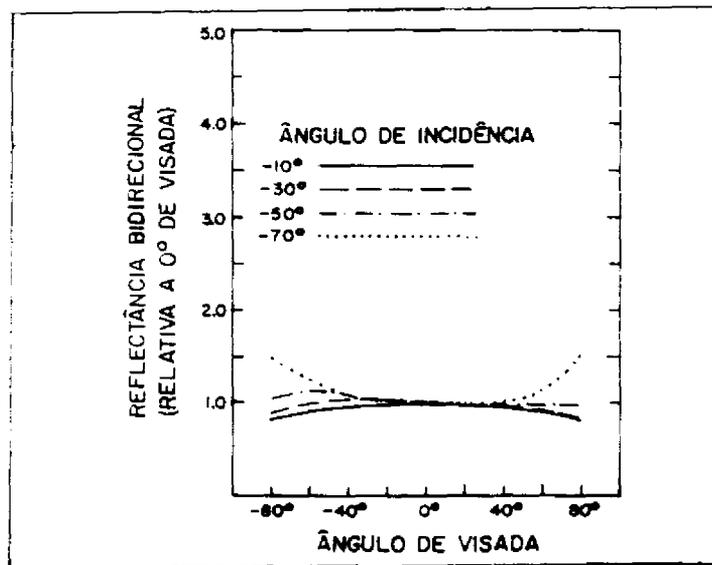


Fig. 3.15 - FRB em 600 nm do BaSO_4 em pó prensado.
 FONTE: Weidner e Hsia (1981), p. 881.

Além dos fatores já citados, também a vizinhança de um alvo de interesse pode produzir erros na determinação do FRB.

3.5 - INFLUÊNCIA DA VIZINHANÇA DO ALVO

Os erros devidos à proximidade de objetos por ocasião das medidas não são frequentemente reconhecidos, ou são considerados insignificantes, pelo desconhecimento de sua magnitude (Kimes et al., 1983).

Na Figura 3.16, a medição radiométrica de um alvo mostra que a presença do operador tem dois efeitos de erro na medida de FRB. Primeiro, seu corpo reflete sobre o alvo a irradiância solar direta (1), a radiância atmosférica (2) e a radiância de um alvo próximo (3). Segundo, seu corpo bloqueia uma porção da radiância atmosférica (4) que chegaria ao alvo. Este fenômeno é causado por quaisquer objetos próximos do alvo ou da referência, seja um caminhão, um edifício, ou um arvoredo.

Se o posicionamento do vizinho em relação ao padrão de referência e ao alvo forem mantidos constantes, a mesma condição de irradiância existe para ambos. Neste caso, os erros devidos à presença de vizinhos nos cálculos do FRB diminuem. Caso contrário, se o posicionamento do vizinho varia em relação ao padrão de referência e ao alvo de interesse, então torna-se ainda mais importante considerar possíveis erros decorrentes da presença dos vizinhos.

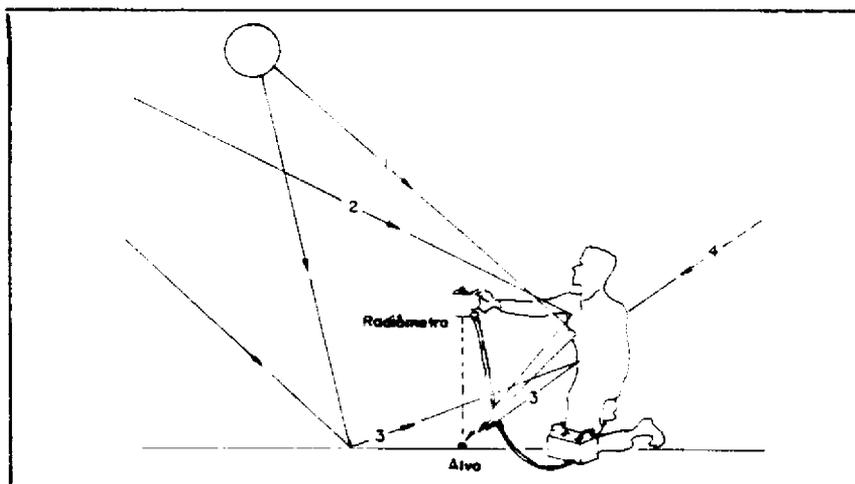


Fig. 3.16 - Efeito de vizinhança nas medidas de reflectância.
FONTE: Kimes et al (1983), p. 8.

A Figura 3.17 expressa a porcentagem de erro simulado na medição da radiância devido à presença de objetos próximos, para as bandas do vermelho e infravermelho e para objetos de cor branca e

preta. Este erro é uma função do ângulo sólido bloqueado pelo objeto, e do ângulo zenital solar.

Uma pessoa ajoelhada a 0,5; 1,0 e 3,0 metros do alvo bloqueia ou projeta sobre este um ângulo sólido de 0,58; 0,14 e 0,10 sr, respectivamente. Um furgão de 3,0 por 3,0 metros, para as mesmas distâncias, bloqueia ou projeta 2,0; 1,3 e 0,14 sr, respectivamente. Quando um indivíduo com roupa preta está a 0,5 m do alvo, ele causa uma porcentagem de erro menor que 2% nas bandas do vermelho e do infravermelho. Contudo, na mesma situação, mas com roupa branca, ele provoca erros de 15% para a banda do vermelho e de 18% para a banda do infravermelho, para um ângulo zenital de 75 graus. Um furgão negro de 3,0 por 3,0 m, a 0,3 m do alvo, causa um erro menor que 1,5% em ambas bandas, para um ângulo de 30°. Para a mesma situação, um furgão branco acarretará 13% de erro na medida para o vermelho e 18% de erro no infravermelho (Kimes et al., 1983).

Estes erros diminuem significativamente à medida que a causa do erro se afasta do alvo de interesse.

A Figura 3.17 mostra a magnitude dos erros de radiância espectral que objetos próximos do alvo de interesse podem provocar. Sendo, portanto, importante considerá-los nas medidas de campo.

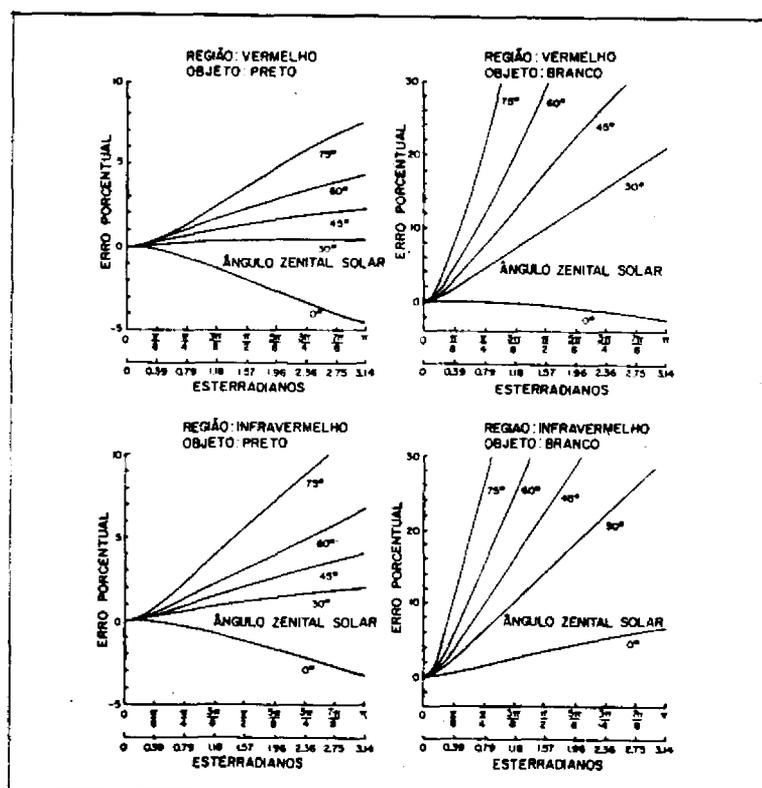


Fig. 3.17 - Erro percentual simulado devido à vizinhança.
 FONTE: Kimes et al. (1983), p. 9.

CAPÍTULO 4

MATERIAL E MÉTODOS

Para que o FRB e outras grandezas radiométricas sejam utilizados, os fatores que influenciam suas medições devem ser considerados. Conforme já foi mencionado, alguns destes fatores são objetos de estudo neste trabalho, cujas fases são expressas na Figura 4.1.

Considerar tais fatores implica em mostrar a necessidade de correção dos valores obtidos, e/ou apresentar em relatório o fator influenciador no momento da medição e seu possível efeito.

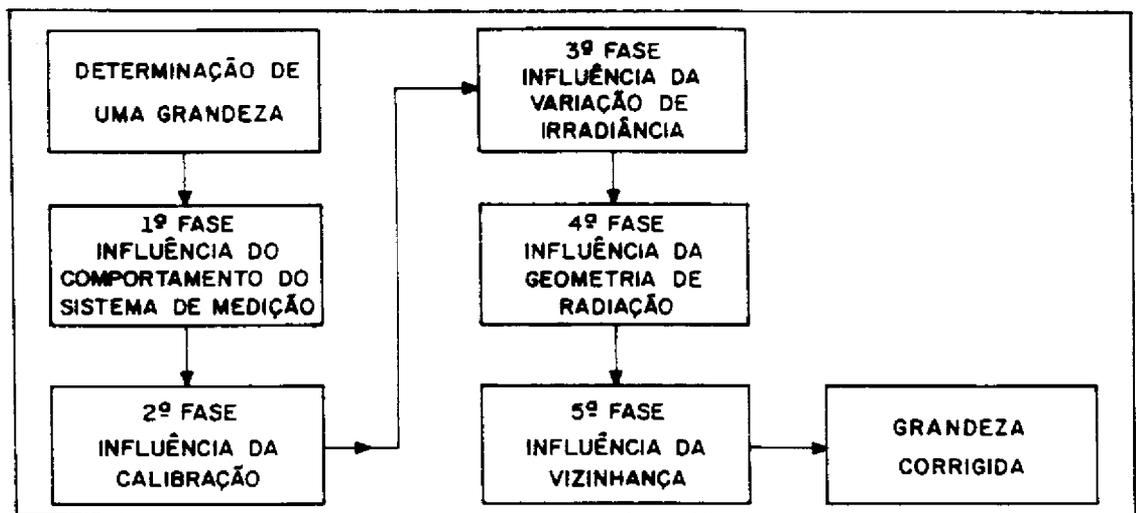


Fig. 4.1 - Diagrama das principais fases da pesquisa.

Na primeira fase, demonstra-se a influência devida aos instrumentos empregados nos experimentos de medição. A segunda fase consiste em estabelecer procedimentos de calibração e intercalibração de padrões e radiômetros. Na terceira fase estuda-se até que ponto a utilização de um método de medição pode afetar o FRB de um alvo, devido à variação de irradiância durante o intervalo entre a medida do alvo de referência e o de interesse. Na quarta fase estuda-se como a variação de geometria pode afetar o FRB. Na quinta fase analisam-se os efeitos causados no FRR e na radiância pela existência de um objeto próximo do alvo de referência ou do alvo de interesse.

4.1 - COMPORTAMENTO DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO

Antes de iniciar um experimento, é importante que o pesquisador avalie a adequabilidade do instrumental a ser utilizado e

estabeleça a confiabilidade (Coeficiente de Variação, C_v) ou grau de incerteza das medidas obtidas pelos equipamentos. Deste modo, garante-se que as discrepâncias observadas nos resultados sejam devidas, exclusivamente, aos atributos do alvo e não a falhas dos equipamentos.

4.1.1 - ANÁLISE DE ERROS

Em experimentos práticos, os valores obtidos nunca são exatos. Então, torna-se necessário estabelecer um critério de avaliação desses valores por ocasião das medidas. Tal avaliação obriga os experimentadores a determinarem, tanto quanto possível, a extensão dos erros associados à medida.

O erro, ou incerteza, está associado à distribuição dos resultados. O melhor valor de uma medida está associado à tendência dos resultados para um valor central (Baird, 1962).

Associada com os desvios das leituras do valor central define-se uma grandeza chamada média. Se um conjunto de n observações x_1, x_2, \dots, x_n têm média \bar{x} , o *desvio médio* é definido como:

$$d = \frac{\sum |x_i - \bar{x}|}{n}, \text{ com } i = (1, 2, \dots, n). \quad (4.1)$$

Contudo, o parâmetro mais usado é a *variância*, definida por:

$$v = \frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1}. \quad (4.2)$$

A raiz quadrada da variância é chamada de *desvio padrão*, expresso por:

$$s = \pm \left[\frac{\sum (x_i - \bar{x})^2}{n - 1} \right]^{1/2}, \text{ com } i = (1, 2, \dots, n). \quad (4.3)$$

onde: s , é o desvio padrão; x_i , os valores medidos; \bar{x} a média dos valores medidos; n , o número de medidas.

Utilizando a definição de desvio padrão e aplicando-a, por exemplo, ao FRB, tem-se:

$$s = \pm \left[\frac{\sum (\text{FRB}_i - \overline{\text{FRB}})^2}{n - 1} \right]^{1/2}, \text{ com } i = (1, 2, \dots, n). \quad (4.4)$$

Outra forma de expressar os erros é em termos do grau de incerteza ou coeficiente de variação, C_v , dado por:

$$C_v = \frac{s}{\bar{x}} \cdot 100. \quad (4.5)$$

Neste caso, o erro da medida corresponde à relação entre o desvio padrão e a média dos valores medidos. Empregando-a em relação ao FRB, tem-se:

$$C_v = \frac{s}{\text{FRB}} \cdot 100. \quad (4.6)$$

Os erros das medidas de FRB, Fator de Reflectância Refspec, radiância, irradiância e reflectância absoluta nesta dissertação são apresentados em termos do coeficiente de variação.

Os espectrorradiômetros REFSPEC IIA, OPTRONIC 740A, SPECTRON SE 590 e o solarímetro EPPLEY PSP, utilizados neste trabalho, serviram de exemplo no estudo do comportamento do sistema de medição (primeira fase desta pesquisa).

4.1.2 - ESPECTRORRADIÔMETRO SPECTRON SE590

4.1.2.1 - DESCRIÇÃO

O SPECTRON SE590 (Figura 4.2) é um espectrorradiômetro portátil de campo de alta performance, para uso em áreas de pesquisas como agricultura, florestas, geologia e em outras aplicações que exijam medidas espectrais da radiação eletromagnética.

Composto de uma unidade detectora e outra de controle (Tabela 4.1), ele é capaz de adquirir simultaneamente um "espectro contínuo" em 256 bandas numa fração de segundo, sendo possível ajustar seus ângulos de visada através de coletores ópticos.

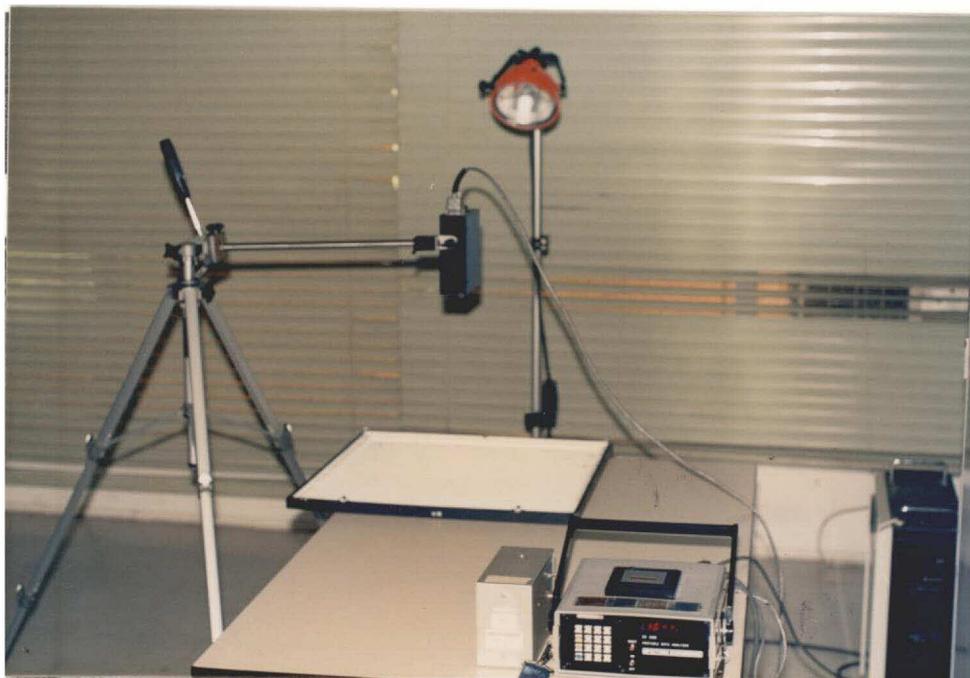


Fig. 4.2 - Espectrorradiômetro SPECTRON SE590

TABELA 4.1 - CARACTERÍSTICAS DO ESPECTRORRADIÔMETRO SPECTRON SE590

Faixa Espectral	368,4 a 1100,4 nm
Detector	Silício
Ângulo de Visada	1, 10, 15 e 180°
Tempo de Varredura	1/64 a 64/60 s
Saída dos dados	Osciloscópio Plotter Impressora Microcomputador
Gravação	Fita minicassete
Composição	Unidade de Leitura Unidade de comando Unidade de tensão
Método de Calibração	Lâmpada Padrão (NBS)

FONTE: Spectron Engineering (s.d.).

O SPECTRON SE590 programa a aquisição dos dados, grava-os, transmite-os e mostra a evolução das medições. Fitas cassetes do tipo miniatura (1,3 por 2,3 polegadas) possibilitam a gravação de até 40 espectros de cada lado. O sistema é alimentado por uma bateria recarregável, ou diretamente na rede elétrica através de um conversor de tensão. Possibilita ainda a transferência de espectros para um microcomputador através de uma porta serial RS-232c. Além disso, para inspeção de espectros, pode-se ligá-lo a um osciloscópio, o que possibilita a visualização gráfica destes espectros. Também permite a ligação de um "plotter" ou de uma impressora para obter os gráficos em papel. Estes recursos são acessados através de um teclado multinível.

Por ser de fácil manuseio e rápido na aquisição dos dados, este espectrorradiômetro é adequado para a radiometria de campo, em nível de superfície ou de aeronave.

4.1.2.2 - TESTE DE CONFIABILIDADE

Para determinar o C_v do SPECTRON SE590, mediu-se a radiação espectral de um alvo confeccionado com sulfato de bário em pó prensado. Vinte e quatro medidas foram executadas com uma mesma unidade de leitura, segundo um campo de visada de 15° a uma distância de 20 cm, utilizando-se uma lâmpada de tungstênio não calibrada, instalada a um metro de distância do alvo (Figura 4.3).

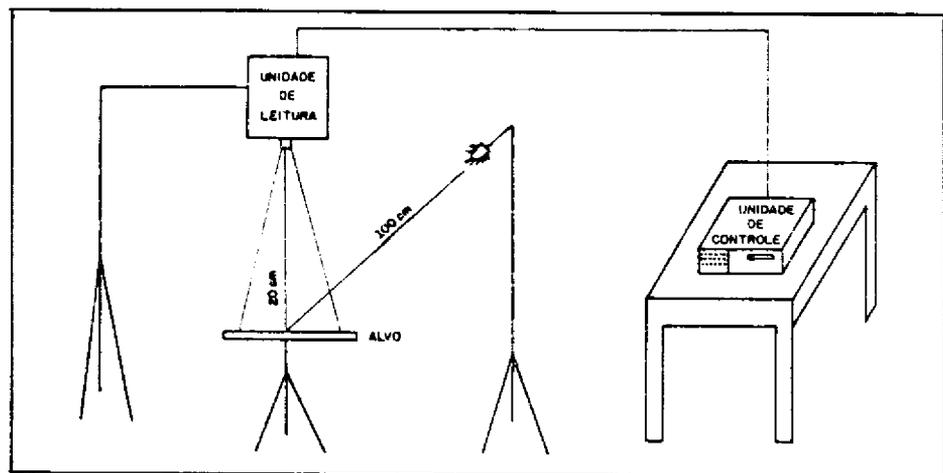


Fig. 4.3 - Representação esquemática do experimento para obtenção do C_v do SPECTRON SE590.

Posteriormente extraiu-se a média, o desvio padrão e o C_v dos valores obtidos, utilizando-se as medidas seqüencialmente (1 a 3, 1 a 5, 1 a 10, 1 a 15, 1 a 21 e 1 a 24).

4.1.3 - ESPECTRORADIÔMETRO REFSPEC IIA

4.1.3.1 - DESCRIÇÃO

O "Reflectance Spectrometer REFSPEC", modelo IIA, é um instrumento eletro-óptico portátil de campo (Figura 4.4), que em conjunto com o sistema de aquisição de dados (DATAPAK 330), forma um sistema integrado de sensoriamento remoto para medidas de alvos, cálculos, armazenamento e impressão de parâmetros espectrais.

O instrumento (Tabela 4.2) consiste de uma cabeça óptica para coletar a radiação refletida por um alvo e compará-la à de uma esfera integradora pintada com tinta à base de sulfato de bário; um obturador; um visor para apontamento preciso; grades de dispersão de energia incidente; filtros espectrais; dois fotodetectores e um sistema de processamento de sinais.

A região espectral (450 a 2450 nm) é coberta com varreduras repetidas de uma grade de dispersão por um espectrômetro Ebert. Um detector de sulfeto de chumbo (PbS) resfriado é utilizado para cobrir a região do espectro entre 1100 e 2450 nm. Entre 450 e 1100 nm utiliza-se um detector de silício (Si).

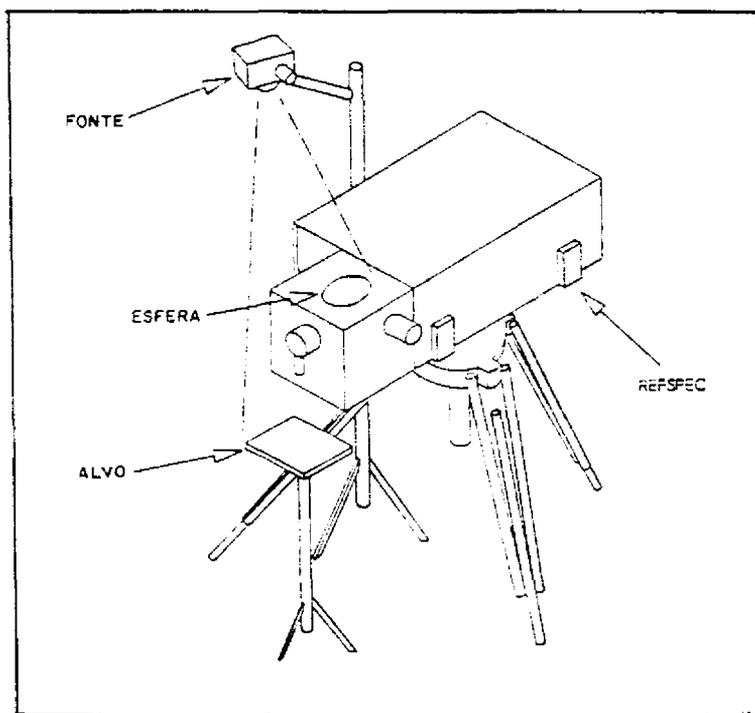


Fig. 4.4 - Espectrorradiômetro REFSPEC IIA.

FONTE: Barringer Research (s.d.), p. 2-10.

A radiação refletida pelo alvo coletada pelo sistema óptico (Figura 4.5) pela objetiva (1) é refletida por um espelho plano (2) até o obturador (3). Após passar por uma lente (4), incide sobre a grade de difusão, passa através de um disco de filtros (5), e incide diretamente sobre o detector de silício (6) ou, via espelho a 45°, sobre o detector de PbS (7). Cada metade do obturador (Figura 4.6), é dividida em três seções iguais, que separam a radiação proveniente do alvo, da proveniente da esfera integradora, e da radiação de fundo.

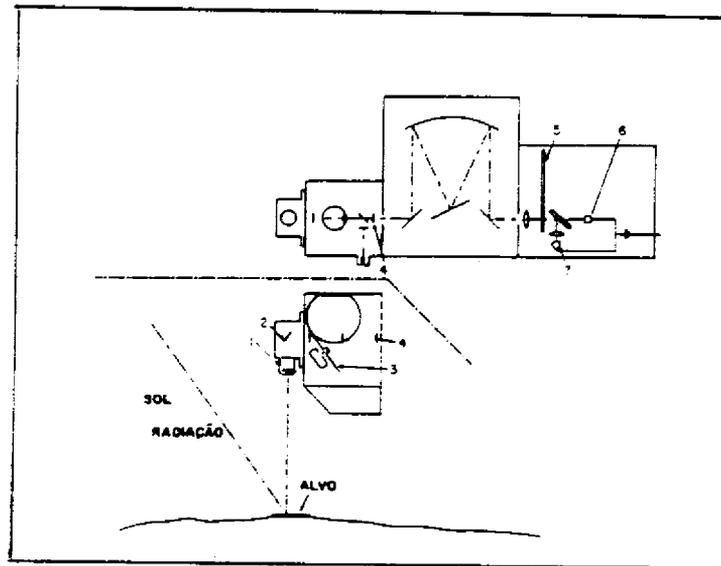


Fig. 4.5 - Sistema óptico do REFSPEC IIA.

FONTE: Barringer Research (s.d.), p. 5-4.

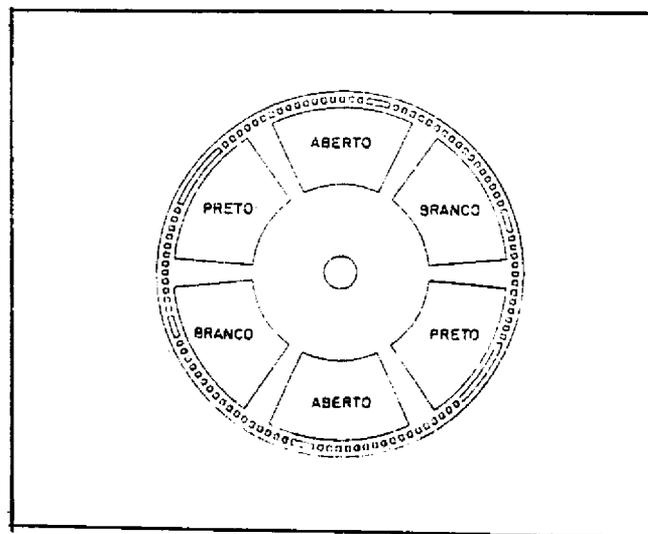


Fig. 4.6 - Sistema de obturação do REFSPEC IIA.

FONTE: Barringer Research (s.d.), p. 5-6.

O Datapak possui um microprocessador que, através de programas gravados em "Erasable Programable Read Only Memory" (EPROM), realiza as funções de controle do sistema, calcula a reflectância, gerencia os dados coletados, armazenando-os em fita cassete e/ou imprimindo-os numa plotadora de papel térmico. Outros programas realizam cálculos com os dados espectrais coletados e transmitem arquivos de dados para outros computadores, via RS-232.

TABELA 4.2 - CARACTERÍSTICAS DO ESPECTRORRADIÔMETRO REFSPEC IIA

Faixa Espectral	450 a 2450 nm
Detector	Silício: 450 a 1100 nm Sulfeto de Chumbo: 1100 a 2450 nm
Ângulo de Visada	12,5° aproximadamente
Tempo de Varredura	1550, 560, 220 e 120 s
Saída dos dados	Gravador Impressora
Gravação	Fita cassete
Composição	Cabeça óptica Unidade de comando Unidade de Controle
Resolução	melhor que 1,5 nm entre 450 e 1000 nm melhor que 3,5 nm entre 1000 e 2450 nm
Temperatura de Operação	0 a 40°C
Energia Exigida	117 VCA, 100 W

FONTE: Barringer Research (s.d.).

O Fator de Reflectância Refspec (FRR) empregado neste trabalho é obtido através da Equação 4.7, a partir da diferença entre o valor do sinal da radiância do alvo (T) e o valor do sinal da radiância de fundo (B), dividido pela diferença entre o valor do sinal da radiância refletida pela esfera integradora de BaSO₄ (S) e o valor do sinal da radiância de fundo (B) (Figura 4.7):

$$FRR = \frac{T - B}{S - B} \quad (4.7)$$

Caso uma placa de sulfato de bário seja utilizada como referência o fator de refletância obtido é o FRB.

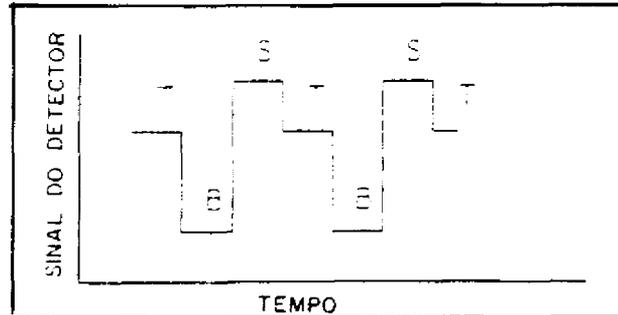


Fig. 4.7 - Níveis de saída do sinal do REFSPEC IIA: T- sinal do alvo, S- sinal da esfera e B- sinal de fundo.
 FONTE: Barringer Research (s.d.), p. 5-3.

4.1.3.2 - TESTE DE CONFIABILIDADE

Com o mesmo objetivo da seção (4.1.2.2), foram realizadas em laboratório dez medidas, com o REFSPEC IIA (campo de visada de $12,5^\circ$), do alvo de sulfato de bário prensado, a partir das quais extraiu-se a média, o desvio padrão e o C_v . Para medir o alvo (Figura 4.8), distante 20 cm da objetiva, utilizou-se uma lâmpada de tungstênio de 1000 W como fonte de radiação.

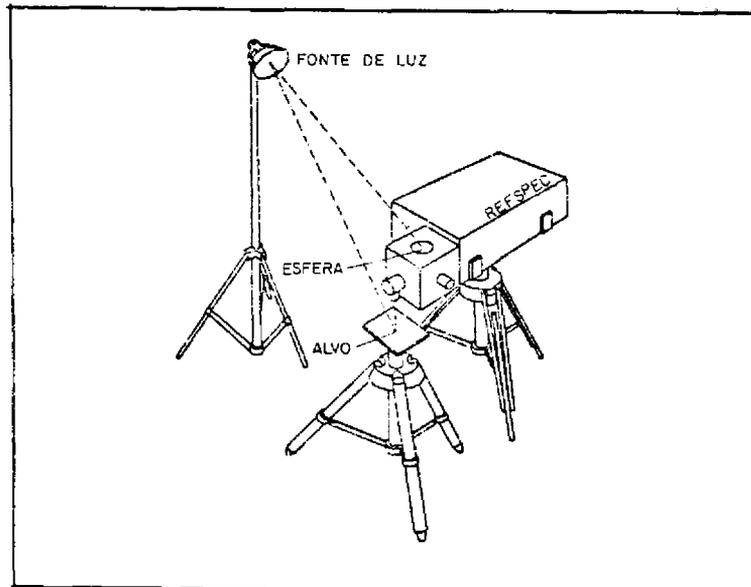


Fig. 4.8 - Representação esquemática do experimento para obtenção do C_v do REFSPEC IIA.

4.1.4 - SISTEMA DE MEDIÇÃO DE IRRADIÂNCIA TOTAL

4.1.4.1 - DESCRIÇÃO

Para avaliar a variação de irradiância durante as medidas de reflectância de campo, utilizou-se um sistema (Figura 4.9) composto de um solarímetro EPPLEY, modelo PSP, e um microcomputador 21-X com conversor analógico/digital.



Fig. 4.9 - Sistema de medição de irradiância total.

O solarímetro Eppley PSP (Tabela 4.3), tem a finalidade de medir a radiação solar global e do céu. Seu detector é uma termopilha feita de uma liga de constantana (liga de cobre e níquel), cuja principal característica é ter resposta proporcional à potência da radiação incidente, independente da temperatura ambiente, além de ser resistente à vibração e ao choque. Seu receptor é pintado com uma tinta que absorve a radiação de modo não seletivo em todos os comprimentos de onda, evitando reflexos indesejáveis. Dois vidros ópticos hemisféricos, concêntricos, polidos e transparentes, concentram a radiação sobre o detector.

Por ocasião das medidas, é conveniente manter o plano do elemento sensor livre de obstruções significativas, pois sombras, reflexos e fontes de radiação podem afetar os resultados.

TABELA 4.3 - CARACTERÍSTICAS DO SOLARÍMETRO EPPLEY PSP

Faixa Espectral	280 a 2800 nm
Detector	Termopilha
Sensitividade	$9 \times 10^{-6} \text{ V}/(\text{W}\cdot\text{m}^{-2})$
Tempo de Resposta	1 s
Temperatura de Operação com 1% de erro	-20 a 40°C
Linearidade	$\pm 0,5\%$ de 0 a 2800 $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$
Sensitividade Direcional	$\pm 1\%$ de 0°-70° (ângulo zenital) $\pm 3\%$ de 70°-80° (ângulo zenital)
Método de Calibração	Esfera Integradora

FONTE: Eppley Laboratory (s.d.).

Podem ser usados diferentes tipos de instrumentos para gravação dos valores medidos com o solarímetro. Utilizou-se um microcomputador 21-X (Tabela 4.4), que combina precisão nas medidas com a capacidade de armazenar e controlar os dados.

TABELA 4.4 - CARACTERÍSTICAS DO MICROCOMPUTADOR 21-X

Número de Canais	8
Memória	16 KB ROM, 40 KB RAM
Exatidão	0,035 % (0,02 a 40°C)
Processador	Hitachi 6303 CMOS 8 Bits
Temperatura de Operação	-25 a 50°C
Resolução	5,000 V - 333 V; 0,500 V - 33,3 V; 0,050 V - 3,33 V; 0,015 V - 1,0 V e 0,005 V - 0,33 V
Alimentação	9,5 a 15 V

FONTE: Campbell Scientific (s.d.).

Dentre as funções básicas do Microcomputador 21-X estão:

- 1) Conversão de sinal analógico de um sensor em sinal digital.
- 2) Processamento das medidas.
- 3) Armazenamento dos resultados processados.

As funções de aquisição e processamento dos dados são controladas pelos usuários, mediante a entrada de instruções codificadas numa tabela de programas específica do equipamento.

Ligado ao solarímetro, o 21-X, através de um programa próprio, proporciona a conversão do valor de irradiância (W/m^2) em medidas de tensão (milivolts), num intervalo de tempo determinado.

4.1.4.2 - TESTE DE CONFIABILIDADE

O experimento para definição da confiabilidade do sistema foi efetuado conforme mostrado na Figura 4.10, onde uma lâmpada de tungstênio de 1000 W, ligada a um estabilizador de tensão, proporcionou a irradiância necessária para as medições. A fonte foi instalada nas distâncias de 40 e 80 cm, com o feixe de radiação incidindo diretamente sobre o solarímetro, em laboratório.

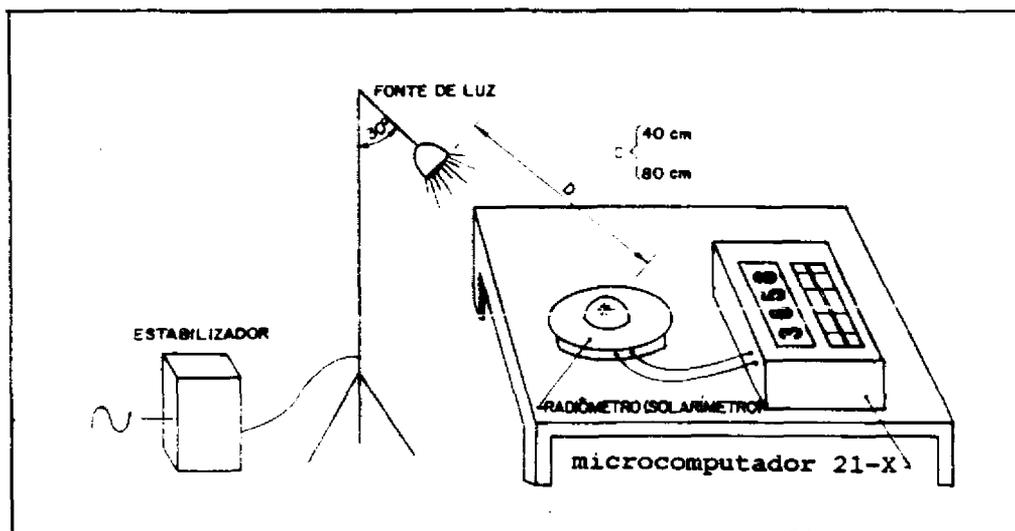


Fig. 4.10 - Representação esquemática do experimento para obtenção do C_v do sistema de medição de irradiância total.

Para cada distância considerada, foram efetuadas dezesseis medidas, extraíndo-se a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação.

4.1.5 - SISTEMA DE MEDIÇÃO DE RADIAÇÃO ÓPTICA

4.1.5.1 - DESCRIÇÃO

Outro equipamento utilizado foi o Sistema de Medida de Radiação Óptica OPTRONIC 740A (Figura 4.11). O OPTRONIC 740A, é um sistema versátil de medição da radiação óptica nas regiões do ultravioleta, do visível e do infravermelho próximo. Este radiômetro de laboratório (Tabela 4.5) pode medir fontes de radiação "contínuas" e "pulsantes", sendo composto de um monocromador e de um radiômetro.



Fig. 4.11 - Sistema de medição de radiação óptica OPTRONIC 740A.

O radiômetro combina numa só unidade quatro modos operacionais: 1- espectrorradiômetro, para medidas espectrais de grandezas radiométricas; 2- radiômetro, para medidas absolutas de grandezas radiométricas; 3- fotômetro, para medidas absolutas de grandezas fotométricas; e 4- resposta espectral do detector, para medidas da responsividade do detector sob a forma de corrente elétrica.

TABELA 4.5 - CARACTERÍSTICAS DO ESPECTRORRADIÔMETRO OPTRONIC 740A

Faixa Espectral	280 a 1100 nm
Detector	Silício
Ângulo de Visada	14° aproximadamente
Tempo de Varredura	7 minutos
Saída dos dados	microcomputador Visor
Exatidão	1 nm
Resolução espectral	0,25 nm - 1 nm 0,50 nm - 2 nm 1,25 nm - 5 nm 2,50 nm - 10 nm 5,00 nm - 20 nm
Composição	Monocromador Radiômetro Unidade de Controle
Calibração	Lâmpada padrão (NBS)
Precisão	± 0,1 nm
Energia exigida	110 V 60 Hz

FONTE: Optronic Laboratories (s.d.).

O monocromador tem como atributos principais uma grande eficiência da grade de dispersão e um baixo espalhamento. Quando a cabeça detectora é montada no monocromador ele passa a operar como um espectrorradiômetro.

4.1.5.2 - TESTE DE CONFIABILIDADE

A Figura 4.12 mostra o experimento destinado à verificação do grau de confiança do sistema OPTRONIC 740A. Foram efetuadas dez medições da radiância de uma esfera integradora produzida por uma lâmpada halógena de 280 W, na faixa do espectro compreendida entre 280 a 1100 nm, para se obter a média, o desvio padrão e o C_v dos valores medidos.

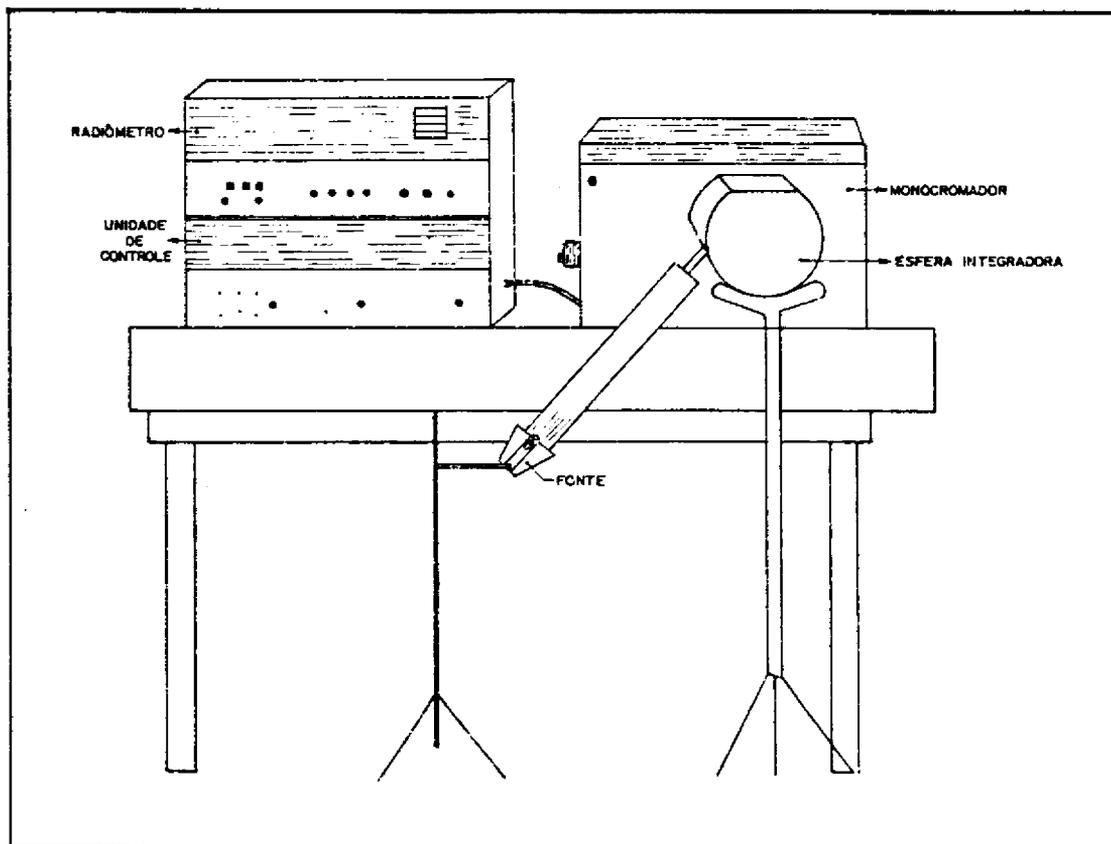


Fig. 4.12 - Representação esquemática do experimento para obtenção do C_V do OPTRONIC 740A

4.2 - INFLUÊNCIA DA CALIBRAÇÃO

Nesta seção são abordados os aspectos relativos à calibração que atuam como geradores de imprecisões no FRB, no FRR e em medidas absolutas (radiâncias):

- 1) Calibração de padrões de referência;
- 2) Calibração de radiômetros; e
- 3) Intercalibração de radiômetros.

O primeiro diz respeito à necessidade de calibração, com relação a um padrão único, de todas as placas de referência utilizadas em laboratório ou campo. O segundo, à calibração de radiômetros com relação a uma fonte de irradiância padrão, ou de acordo com um procedimento recomendado pelo fabricante do equipamento. O terceiro, à intercalibração de radiômetros, quando o FRB é medido pelo método sequencial utilizando dois instrumentos ou pelo método simultâneo.

4.2.1 - CALIBRAÇÃO DE PADRÕES DE REFLECTÂNCIA

Na determinação do fator de reflectância, é prática comum os experimentadores dividirem a radiância do alvo de interesse pela radiância de uma placa de referência - ambas medidas realizadas em iguais geometrias de iluminação e observação (Perdiz e Silva Filho, 1991). Entretanto, face à existência de múltiplas variáveis na confecção dos padrões de referência, não é conveniente que a obtenção do valor do FRB limite-se a tal procedimento, mas que o valor da reflectância absoluta (ρ) das placas de referência seja considerado.

Quando um mesmo alvo é referenciado em relação a placas não calibradas, poderão ser obtidos diferentes valores de FRB, como consequência apenas das diferenças de reflectância entre as placas.

As reflectâncias absolutas de placas de referência podem ser obtidas pela calibração em relação a uma placa de reflectância conhecida (padrão), que pode servir de referência a outras placas. A reflectância absoluta de uma amostra teste, pode ser obtida em laboratório, utilizando-se o método da esfera integradora (Taylor, 1920; Perdiz, 1990).

Não é recomendável a obtenção da reflectância absoluta de todas as placas de referência utilizadas, pelo método da esfera integradora, por ser o método trabalhoso e demorado. Por esta razão, é conveniente calibrar apenas uma placa de referência com a esfera integradora. Esta placa se constituirá num padrão de reflectância que permitirá calibrar as demais placas com um método de intercalibração (Perdiz e Silva Filho, 1991). A metodologia para intercalibração de placas de referência é apresentada nos tópicos seguintes.

4.2.1.1 - MONTAGEM DO EXPERIMENTO

Uma esfera integradora (Figura 4.13) foi projetada e construída a partir de dois cilindros de alumínio, usinados de forma a constituírem dois hemisférios acoplados perfeitamente.

A esfera possui uma área total de $1,28670 \cdot 10^{-2} \text{ m}^2$, incluindo as áreas correspondentes às janelas nela existentes. Tais janelas, em número de três, são distribuídas da seguinte forma: E, de entrada de radiação; S, de saída ou de medição, para medida da radiação refletida e A, de amostragem, onde coloca-se o alvo cuja reflectância absoluta se deseja determinar (Figura 4.13). As duas primeiras têm a mesma área plana de $1,00287 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$ cada e, a terceira, $1,25664 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$, esta aproximadamente 10 % da área total da esfera.

A esfera foi pintada "a revólver" com uma solução de sulfato de bário e álcool isopropílico. Simultaneamente e com a mesma tinta, pintou-se uma placa de alumínio (Figura 4.13), de modo a garantir uma superfície de reflectância igual à da parede da esfera.

Foram aplicadas dez demãos tanto na esfera quanto na placa, obtendo-se uma espessura aproximada de 0,5 mm (Perdiz e Silva Filho, 1991).

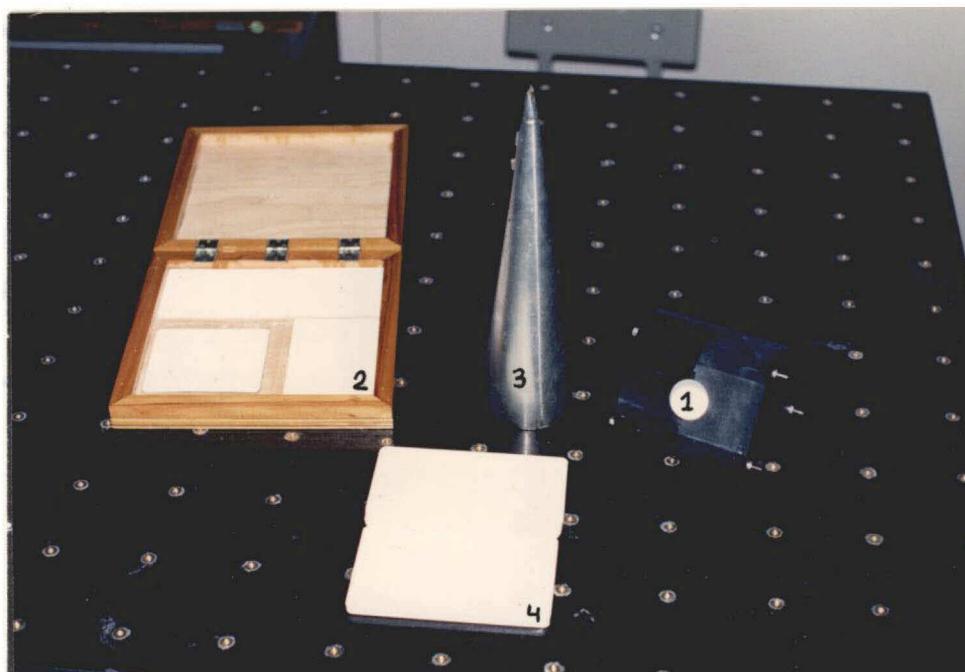


Fig. 4.13 - Instrumentos utilizados na calibração de padrões de reflectância: 1- Esfera integradora, 2- Placas pintadas com a mesma tinta da parede da esfera integradora, 3- Cavidade de baixíssima reflectância e 4- Amostra cuja reflectância absoluta se quer determinar.

Para garantir a incidência adequada de radiação no interior da esfera, de modo a obter um sinal de saída detectável pelo instrumento de medição, adaptou-se um tubo óptico a uma luminária com uma lâmpada de 250 W (Figura 4.14).

Utilizando o OPTRONIC 740A, foram efetuadas dez medidas dos valores de corrente (ampères) necessários para o cálculo da reflectância absoluta da esfera e da amostra de teste.

4.2.1.2 - CÁLCULO DA REFLECTÂNCIA ABSOLUTA DA ESFERA

A reflectância absoluta de uma amostra qualquer de teste é determinada a partir do conhecimento da reflectância absoluta da esfera integradora, sendo portanto necessário iniciar os experimentos com medidas visando à determinação da reflectância da esfera.

Para obter a reflectância absoluta da esfera integradora, lança-se sobre sua parede um feixe de radiação (Figura 4.14). Parte deste fluxo inicial sofre múltiplas reflexões no interior da esfera, incidindo difusamente sobre a janela de amostragem, sendo posteriormente coletado pelo espectrorradiômetro posicionado na janela de medição.

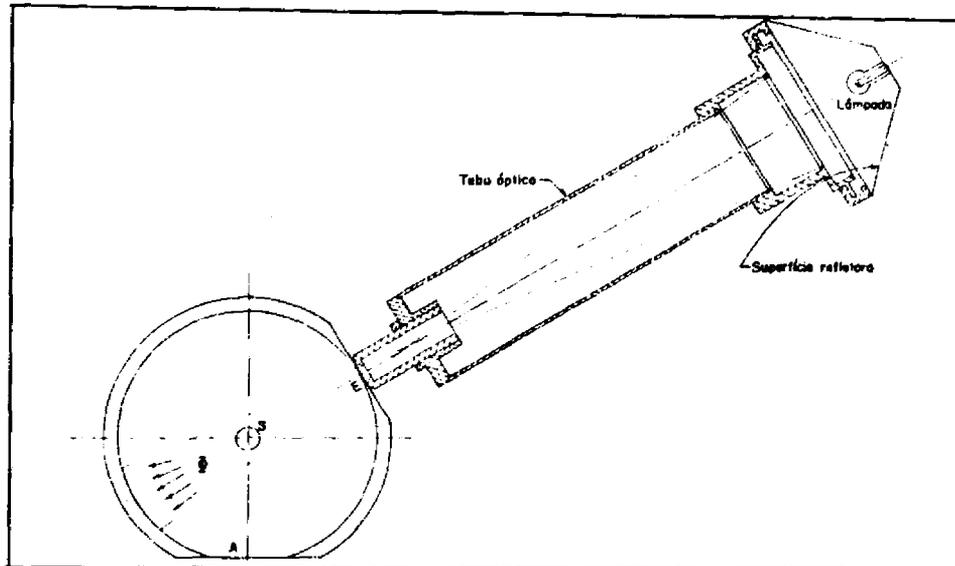


Fig. 4.14 - Representação esquemática da incidência do fluxo de radiação sobre a parede da esfera.

São efetuadas duas medidas: a primeira, indicada por V , é realizada com uma placa com a mesma pintura que a esfera, colocada na janela de amostragem (Figura 4.15) e a segunda, indicada por V' , é realizada com a janela de amostragem aberta (Figura 4.16) ou com uma cavidade de baixíssima reflectância revestida internamente com negro de fumo (Figura 4.13).

Os valores de V e V' , foram medidos espectralmente entre 380 e 1100 nm, em intervalos de 2 nm. Tais valores foram utilizados na equação 4.4 desenvolvida por Perdiz (1990) a partir do trabalho de Goebel (1967), para o cálculo da reflectância absoluta (ρ_p) da esfera integradora:

$$\rho_p = \frac{1}{1 - f_e - f_s + f_a \cdot V' / (V - V')} \quad (4.4)$$

onde: f_e , é a fração de área plana da janela de entrada da radiação em relação à área da esfera; f_s , é fração de área plana da janela de medição e f_a , é a fração de área plana da janela de amostragem.

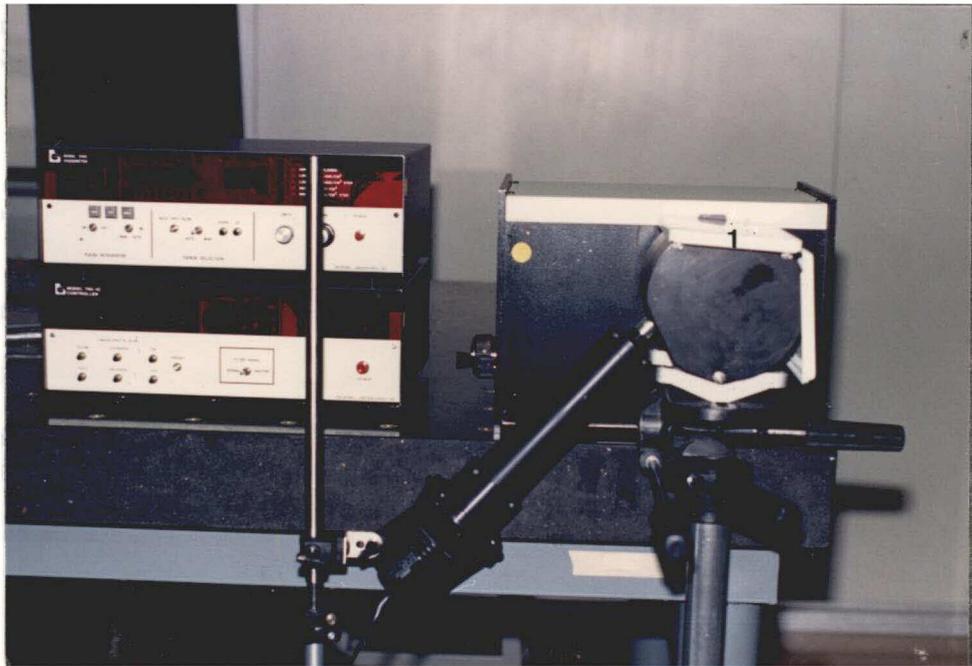


Fig. 4.15 - Experimento com uma placa (1) com a mesma pintura da esfera.

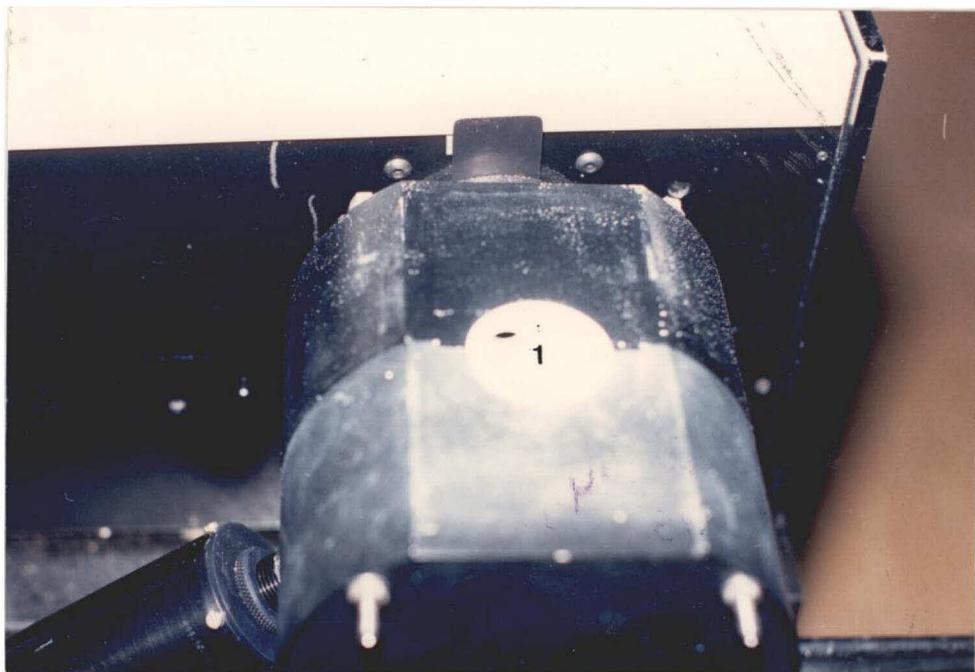


Fig. 4.16 - Experimento com a janela (1) de amostragem aberta.

Visando verificar os resultados obtidos, os mesmos valores foram aplicados à formulação proposta por Taylor (1920) para o cálculo da reflectância absoluta da esfera. A formulação é expressa como:

$$\rho_p^2 \cdot [f_c \cdot (f_b - f) + K \cdot f \cdot f_b] + \rho_p \cdot f \cdot [f_c + (f_b - f) \cdot (1 - K)] + f^2 \cdot (1 - K) = 0, \quad (4.5)$$

onde f_c , representa a relação entre a área da calota esférica delimitada pela janela de amostragem e a área da esfera; f_b , a relação entre a área plana da janela de amostragem e a área da esfera; f , a relação entre a área restante da esfera (excluindo a área da calota esférica delimitada pela janela de amostragem) e a área da esfera; ρ_p , a reflectância difusa da esfera; e K , a razão entre os sinais V e V' medidos.

4.2.1.3 - CÁLCULO DA REFLECTÂNCIA ABSOLUTA DE UMA AMOSTRA

Como a montagem do experimento e as medições são trabalhosas, é conveniente determinar a reflectância absoluta de uma amostra (Figura 4.17), que será considerada padrão de reflectância e, a partir desta, efetuar a calibração de outras placas de referência.

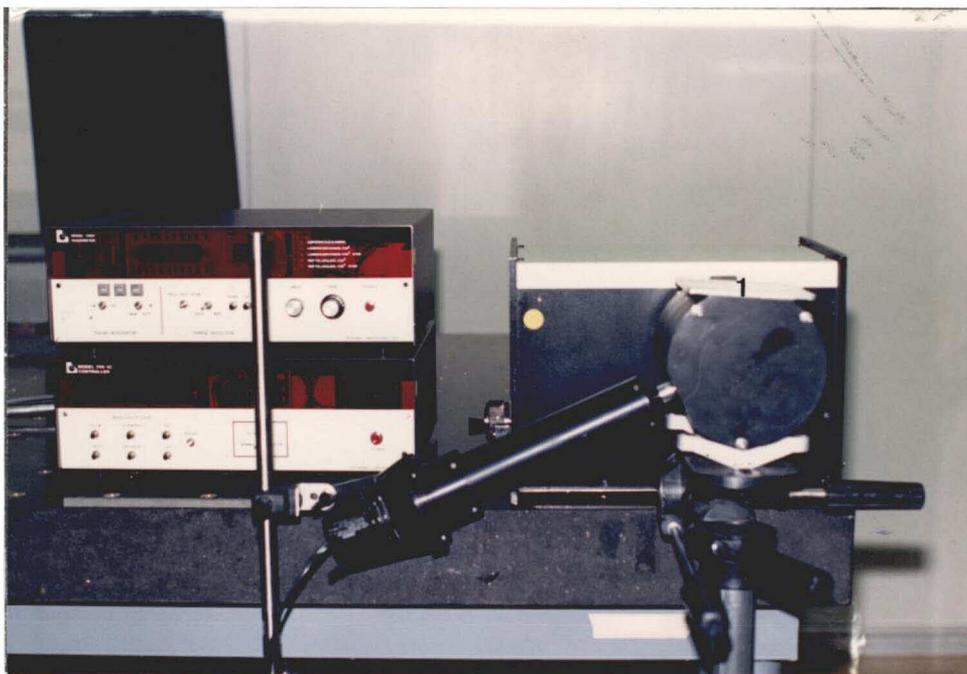


Fig. 4.17 - Experimento de obtenção da reflectância absoluta de uma amostra (1).

Para obter a reflectância de uma amostra, dois métodos são adotados: o primeiro, com a medida da exitância da esfera quando a radiação incidente na amostra é difusa (Figura 4.14); o segundo, quando a radiação incide diretamente na amostra (Figura 4.18). No primeiro caso obtém-se a reflectância difusa/difusa, $\rho_{d/d}$. No segundo, a reflectância normal/difusa, $\rho_{0/d}$.

Nos dois métodos, dois tipos de medidas foram realizadas: 1- janela de amostragem com amostra de reflectância desconhecida (V) e 2- janela de amostragem com amostra de mesma pintura que a esfera (V').

Perdiz (1990) apresenta a formulação matemática para determinar a reflectância absoluta da amostra, tanto para o método difuso/difuso, quanto para o normal/difuso. No primeiro caso a reflectância absoluta é obtida por:

$$\rho_{d/d} = \rho_p + \frac{1 - (1 - f_e - f_s) \cdot \rho_p}{f_a} \cdot \frac{V - V'}{V} \quad (4.6)$$

E no segundo caso, a reflectância é obtida por::

$$\rho_{0/d} = \frac{1 - (1 - f_e - f_s - 2f_a) \cdot \rho_p}{[1 - (1 - f_e - f_s) \cdot \rho_p] \cdot (V'/V) + 2f_a \cdot \rho_p} \cdot \rho_p \quad (4.7)$$

Nas equações 4.6 e 4.7, ρ_p é a reflectância da parede da esfera; f_e , f_s e f_a são, respectivamente, as frações de área das janelas de entrada, de saída (medição) e de amostragem, em relação à área da esfera; e V' , o valor do sinal medido com uma amostra de reflectância desconhecida (amostra de teste) colocada na janela de amostragem. A Equação 4.7 foi usada no cálculo de $\rho_{30^\circ/d}$, porque a esfera utilizada não permite a incidência da radiação na direção normal à amostra, sendo então o fluxo dirigido segundo um ângulo de 30° em relação ao plano da janela (Figura 4.18).

À semelhança do procedimento adotado no cálculo da reflectância absoluta da esfera integradora, os mesmos valores empregados nas equações 4.6 e 4.7 foram utilizados para determinar a reflectância absoluta difusa/difusa segundo a formulação de Taylor (1920), expressa através da equação:

$$\rho_{d/d} = \frac{f \cdot (R - 1) \cdot [f_a \cdot \rho_p + f(1 - \rho_p)]}{f \cdot f_c \cdot (1 - \rho_p) + \rho_p \cdot f_a \cdot (f_c + R \cdot f)} \quad (4.8)$$

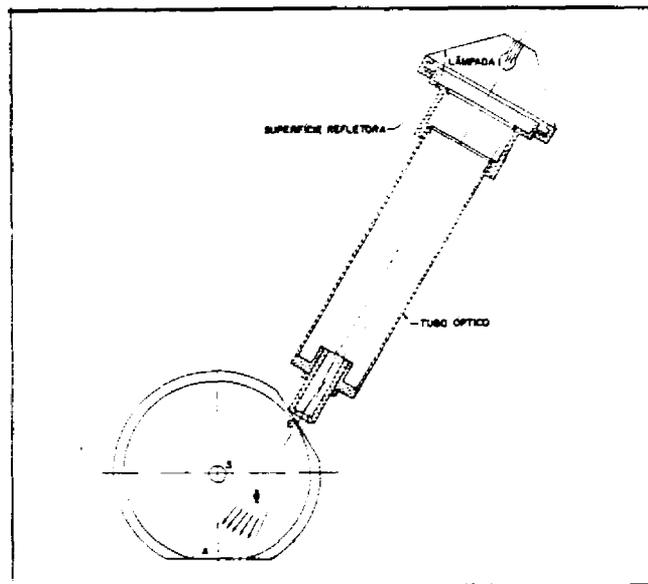


Fig. 4.18 - Representação esquemática da incidência do fluxo de radiação sobre a janela de amostragem.

O mesmo procedimento foi empregado para determinar a ρ_{30}^o/d através da expressão da reflectância normal/difusa de Taylor:

$$\rho_{0/d} = \frac{R' \cdot \rho_p \cdot [f \cdot (1 - \rho_p) + f_a \cdot \rho_p]}{(1 - \rho_p) \cdot (f + \rho_p \cdot f_a) + R' \cdot \rho_p^2 \cdot f_a} \quad (4.9)$$

Nas equações 4.8 e 4.9, f , f_a , f_c , ρ_p representam as mesmas grandezas anteriormente definidas e ρ_{30}^o/d é a reflectância absoluta da amostra. Na equação 4.8, R é a razão entre o sinal V'' , medido com a amostra de teste na janela de amostragem, e o sinal V' , medido com a janela de amostragem descoberta (ou com uma superfície de reflectância próxima de zero). Na equação 4.9, R' é a razão entre o sinal V'' , medido com amostra de teste na janela de amostragem e o sinal V , medido com a amostra de mesma reflectância da esfera, colocada na janela de amostragem.

A amostra cuja reflectância absoluta tenha sido assim determinada, passa a se constituir num padrão de reflectância, podendo ser utilizada para calibrar outras placas de referência.

4.2.2 - CALIBRAÇÃO DE PLACAS DE REFERÊNCIA

Superfícies reais não são perfeitamente lambertianas. Portanto, as placas de referência devem ser adequadamente calibradas,

a fim de estabelecer suas propriedades não lambertianas (Robinson e Biehl, 1979).

Grum e Luckey (1968) afirmam que o ângulo zenital de incidência pode variar até 20° sem que haja uma mudança expressiva na reflectância. Além disso segundo Weidner e Hsia (1981) a reflectância de um alvo confeccionado com sulfato de bário não varia até um ângulo zenital de incidência de 20°.

Portanto, é possível calibrar placas de referência por comparação com um padrão, desde que o ângulo zenital de coleta não ultrapasse os limites citados. Contudo, por ocasião das medidas do padrão e da placa de referência a calibrar, é necessário manter as mesmas geometrias de iluminação e observação, a mesma faixa espectral e usar o mesmo espectrorradiômetro.

Em cada comprimento de onda, a relação entre as medidas da placa a ser calibrada e do padrão, multiplicada pela reflectância absoluta do último, fornece a reflectância relativa da placa que está sendo calibrada, dada pela equação:

$$\rho_a = \frac{V_a}{V_R} \cdot \rho_R \quad (4.10)$$

onde: ρ_a é a reflectância da placa a ser calibrada; V_a é o sinal referente à radiância da placa a ser calibrada; V_R é o sinal referente à radiância da placa padrão; e ρ_R é o fator de reflectância absoluto da placa padrão.

Neste trabalho quatro placas de referência foram calibradas em relação ao padrão: duas placas construídas com pó de sulfato de bário prensado, identificadas pelas siglas PRPE e PRAE; uma placa pintada com tinta à base do mesmo produto, identificada pela sigla PIPE e um padrão com reflectância próxima de 50%, identificado pela sigla SRT-50. O padrão de reflectância utilizado foi uma placa pintada com tinta à base de sulfato de bário e calibrada com a esfera integradora, identificado pela sigla PIAE. As medidas de radiância foram realizadas com o SPECTRON SE590 (Figura 4.19), de acordo com o seguinte:

- 1) A placa a ser calibrada foi posicionada perpendicularmente em relação à objetiva do espectrorradiômetro, a uma distância de 0,20 m.
- 2) Uma lâmpada halógena de 280 W, com refletor, alimentada através de um estabilizador de tensão, foi posicionada a uma distância de 1 m da placa a ser calibrada.
- 3) Foram realizadas dez medidas de cada placa a ser calibrada, a partir das quais foram obtidos os valores médios da radiância espectral.

- 4) O mesmo procedimento foi repetido com a placa pintada com tinta à base de sulfato de bário, cuja reflectância absoluta foi obtida através do método da esfera integradora.
- 5) Utilizando a equação 4.10, para cada comprimento de onda, o valor do sinal relativo à radiância espectral média da placa a ser calibrada foi dividido pelo valor correspondente do padrão. O quociente foi multiplicado pelo valor da reflectância absoluta, ρ_{30}^0/d , da placa padrão pintada com sulfato de bário, obtendo-se a reflectância relativa de cada placa.

A necessidade de calibração das placas de referência em relação a um padrão de reflectância foi demonstrada efetuando o seguinte experimento: 1) obteve-se o FRB de uma folha de cartolina em relação às placas citadas (PIPE, PIAE, PRAE, PRPE e SRT-50), através da medição alternada por 10 vezes da radiância da placa e a radiância da cartolina; e 2) o FRB da cartolina foi corrigido multiplicando-se a reflectância relativa de cada placa de referência, pelo resultado da razão entre as médias das radiâncias da cartolina e da placa de referência, de acordo com o recomendado na Equação 2.39.

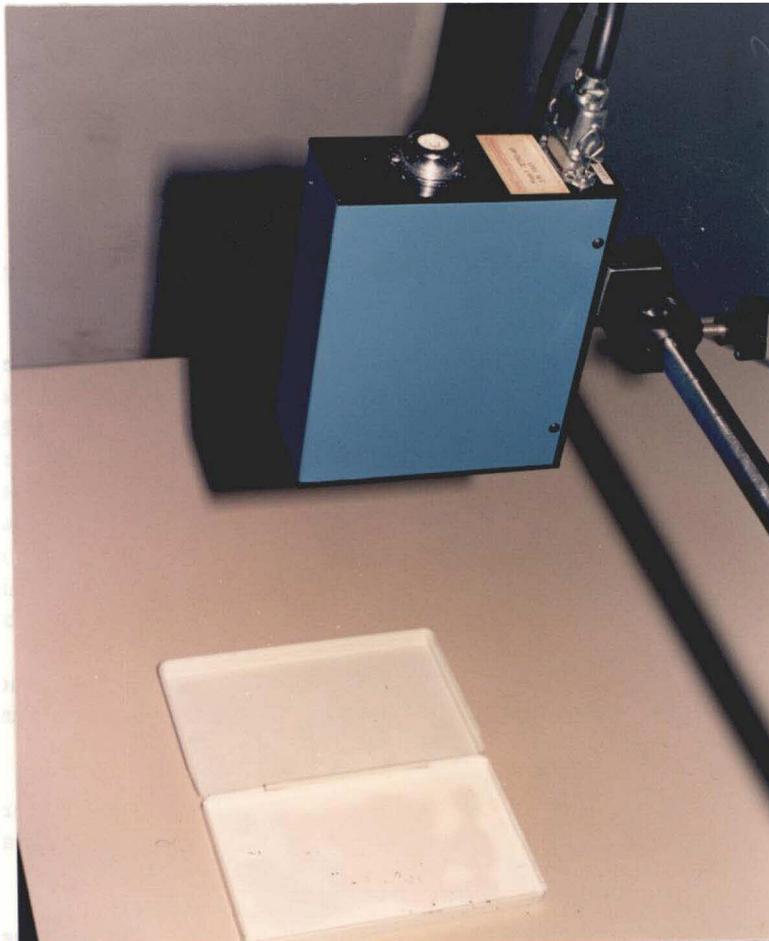


Fig. 4.19 - Experimento para calibração de padrões de referência

4.2.3 - CALIBRAÇÃO DE RADIÔMETROS

O objetivo da calibração do instrumental eletro-óptico é obter uma relação funcional entre a energia incidente e a resposta do instrumento. Tal relação funcional pode ser expressa por uma equação matemática ou por valores tabulados, que dão a magnitude da grandeza radiante de interesse, por exemplo irradiância, E , como uma função da saída do instrumento (Wyatt, 1978), tal que:

$$E = F(S) \quad (4.11)$$

Apesar de os sistemas não serem necessariamente lineares, por projeto ou por natureza, alguns aspectos de calibração de sensores podem ser avaliados por dados linearizados. Neste caso, a equação 4.11 toma a forma de um produto da resposta do instrumento, S , por uma constante, conhecida como fator de calibração, f , de modo que:

$$E = S \cdot f. \quad (4.12)$$

Esta equação é utilizada para converter uma saída instrumental numa grandeza radiante, de modo a atender à meta da calibração de sensores remotos, que é "prover um modo pelo qual uma medida torne-se independente do instrumento" (Wyatt, 1978). Isto significa dizer que, se uma grandeza física for medida em tempos diferentes, lugares diferentes ou com instrumentos diferentes, os resultados devem ser sempre os mesmos.

Para garantir que os atributos inferidos por uma medida de um alvo qualquer sejam exclusivamente dele e não do instrumento, é necessário calibrar os equipamentos de medição.

A calibração do espectrorradiômetro OPTRONIC 740A foi efetuada utilizando-se um padrão de irradiância. O REFSPEC IIA foi calibrado para o campo e aferido para o laboratório de acordo com o procedimento descrito no seu manual (Barringer, s.d.).

4.2.3.1 - EXPERIMENTO DE CALIBRAÇÃO DO OPTRONIC 740A

Neste experimento (Figura 4.20), utiliza-se uma fonte de corrente estabilizada, de 8 ampères, necessária para alimentar uma lâmpada halógena padrão (S-709) de 1000 W, com irradiância espectral conhecida a uma distância de 50 cm do filamento. A tabela de valores espectrais de irradiância da lâmpada padrão, correspondentes a bandas de 5 nm, fornecida pela OPTRONIC INC., possibilita a calibração do espectrorradiômetro. A lâmpada padrão é calibrada pelo "National Bureau of Standards" (NBS), dos Estados Unidos da América, garantida para uma vida útil de 50 h.

Um programa em BASIC, executado num microcomputador Apple II munido de uma "interface" especial, tipo BCD, permite o controle do espectrorradiômetro e do monocromador durante as medidas espectrais. Ao finalizar a varredura de um espectro, os dados armazenados na memória do computador são gravados em disco, na forma de arquivos-texto.



Fig. 4.20 - Experimento de calibração do OPTRONIC 740A.

A lâmpada padrão é posicionada a 50 cm do detector, centrando-se o filamento em relação ao eixo óptico do sistema coletor/detector. Ligada a fonte de corrente elétrica espera-se meia hora até a completa estabilização, após o que, efetuam-se três medidas da corrente (ampères) produzida no detector pela irradiância da lâmpada.

O espectrorradiômetro deve fornecer os mesmos valores de irradiância do padrão NBS em sua medição. Quando isto não acontece a calibração do espectrorradiômetro faz-se necessária, sendo o fator de calibração espectral, $f(\lambda)$, obtido através da Equação:

$$f(\lambda) = \frac{E(\lambda)}{I(\lambda)}, \quad (4.13)$$

onde, $I(\lambda)$, é a corrente do detector e $E(\lambda)$, a irradiância espectral da lâmpada padrão.

Os valores medidos foram utilizados na fórmula 4.13 para calcular o fator de calibração do OPTRONIC 740A.

4.2.3.2 - EXPERIMENTO DE CALIBRAÇÃO DO REFSPEC IIA

De acordo com o Manual de Operação do REFSPEC IIA, o procedimento de calibração de campo deve ser efetuado num dia de céu claro, sem nuvens obstruindo o Sol durante o ciclo de medição. Esta calibração deve ser executada quando houver dúvida quanto ao correto funcionamento do sistema. Neste caso, são realizados ajustes dos potenciômetros de ganho e de "zero" que afetam a escala de reflectância versus comprimento de onda.

O fabricante do equipamento assume que a absorção atmosférica em 2400 nm não atenua a irradiância solar de modo a influir na operação do equipamento e que nesta região ainda há energia suficiente para operação do instrumento. O procedimento de calibração de campo (Figura 4.21) é o seguinte:

- 1) Conforme indicado no Manual de Operação, após instalado, orienta-se o instrumento de modo que a direção do feixe de radiação solar seja perpendicular ao seu eixo longitudinal e não haja sombras ou reflexos sobre a esfera integradora.
- 2) Coloca-se uma das placas de sulfato de bário (que acompanham o equipamento) a 20 cm da objetiva, assegurando que não haja sombras ou reflexos sobre ela. Para diminuir a irradiância refletida pelo operador sobre a placa ou sobre a esfera, este deverá usar roupas escuras e permanecer atrás do instrumento durante a aquisição dos dados.
- 3) Adquire-se um espectro completo da placa. Se os valores do FRR na região de 2400 nm estiverem próximo de 100% o espectrorradiômetro está calibrado e pode ser utilizado.
- 4) Caso contrário, se os valores do FRR em 2400 nm estiverem significativamente acima ou abaixo de 100%, é necessário ajustar os potenciômetros de ganho e de "zero". Para estes ajustes, o espectrorradiômetro deve ser desligado a fim de retirar a tampa de cobertura e para acessar os potenciômetros. Um voltímetro que meça corrente contínua (CC) deve ser conectado à saída analógica do instrumento.
- 5) Após ligar o instrumento, aguardam-se alguns minutos, necessários para alcançar o equilíbrio térmico, e anota-se o valor da tensão indicada pelo voltímetro. Se os valores do FRR em 2400 nm na varredura inicial forem maiores ou menores que 100%, o potenciômetro de "zero" deve ser ajustado: para um valor um pouco mais baixo se o FRR ultrapassou os 100%, ou para um valor mais alto se o FRR estiver abaixo de 100%. O novo valor indicado pelo voltímetro deve ser anotado.

- 6) Bloqueia-se a radiação oriunda da placa na direção da objetiva e ajusta-se o potenciômetro de ganho para uma leitura do voltímetro de 4,5 V.
- 7) Remove-se a cápsula de bloqueio de radiação da objetiva e, se a tensão indicada pelo voltímetro mudou em relação ao passo 6, ajusta-se o potenciômetro de "zero". Repete-se os passos 7 e 8 até que a leitura seja igual à indicada no passo 6. Recoloca-se a tampa na cabeça detetora do espectrorradiômetro e inicia-se uma nova aquisição do espectro da placa de sulfato de bário, como no passo 3.
- 8) Adquirido o novo espectro, analisa-se o gráfico do FRR obtido. Se o espectro está na escala determinada, ou seja, a reflectância está próxima de 100% em 2400 nm, grava-se a leitura do voltímetro para futuras referências. Caso contrário, repetem-se os passos 6 a 10.

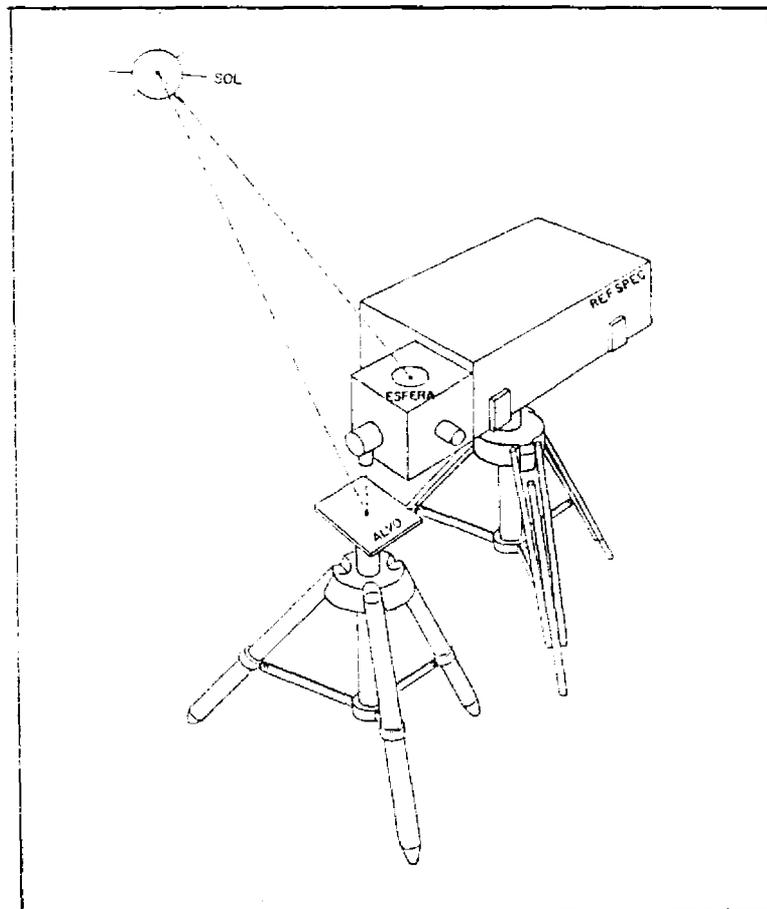


Fig. 4.21 - Representação esquemática do experimento de calibração do REFSPEC IIA

4.2.3.3 - AFERIÇÃO DO REFSPEC IIA NO LABORATÓRIO

Para a operação do REFSPEC IIA em laboratório, o fabricante recomenda a utilização de uma lâmpada halógena de 650 W, montada num refletor de alumínio. A irradiância produzida com esta lâmpada é suficiente para medidas de reflectância na região do espectro compreendida entre 450 e 2450 nm. A lâmpada utilizada neste trabalho, enviada pelo fabricante, é de 1000 W.

O procedimento de aferição para utilizar o REFSPEC IIA no laboratório é o seguinte:

- 1) Num dia claro e sem nuvens, coleta-se um espectro completo de uma das placas de sulfato de bário que acompanham o equipamento (ao finalizar a varredura do espectro completo o monocromador é posicionado em 450 nm). Conecta-se um voltímetro CC à saída analógica do espectrorradiômetro e verifica-se se a tensão está entre 2,5 e 3,0 V. Caso negativo, realiza-se o procedimento de calibração do REFSPEC IIA no campo. Caso positivo, prossegue-se o procedimento de aferição em laboratório.
- 2) A lâmpada halógena de 1000 W é instalada a um metro da janela de entrada de radiação da esfera integradora do espectrorradiômetro, conforme a geometria indicada na Figura 4.22.
- 3) A amostra de sulfato de bário é colocada a 15 cm abaixo da objetiva.
- 4) Através das opções disponíveis no DATAPAK, selecionam-se as funções para varrer um espectro entre 2350 e 2450 nm na velocidade de varredura de 120 segundos (ao finalizar a varredura do espectro o monocromador é posicionado em 2350 nm).
- 5) Conecta-se o voltímetro CC à saída analógica do REFSPEC IIA e ajusta-se o ângulo de incidência da fonte de iluminação até obter uma leitura entre 0,4 e 0,5 V. A fonte de iluminação deve ser posicionada de forma a produzir a mesma irradiância no alvo e na esfera integradora. Esta condição é satisfeita quando o voltímetro indicar a voltagem acima.
- 6) Repete-se a aquisição do espectro com velocidade de varredura normal. O gráfico resultante desta medida deve indicar um FRR próximo de 100% em 2450 nm.
- 7) Se o espectro obtido indicar um FRR inferior a 100%, ajusta-se a lâmpada de forma a produzir maior irradiância sobre o alvo (a leitura no voltímetro deverá diminuir). Se o espectro indicar uma FRR superior a 100%, ajusta-se a lâmpada de forma a produzir menor irradiância sobre o alvo.

- 8) Os passos 6 e 7 devem ser repetidos de forma a obter-se um FRR de 100%, o que corresponde a obter-se um espectro semelhante ao gráfico fornecido pelo fabricante (Figura 4.23).

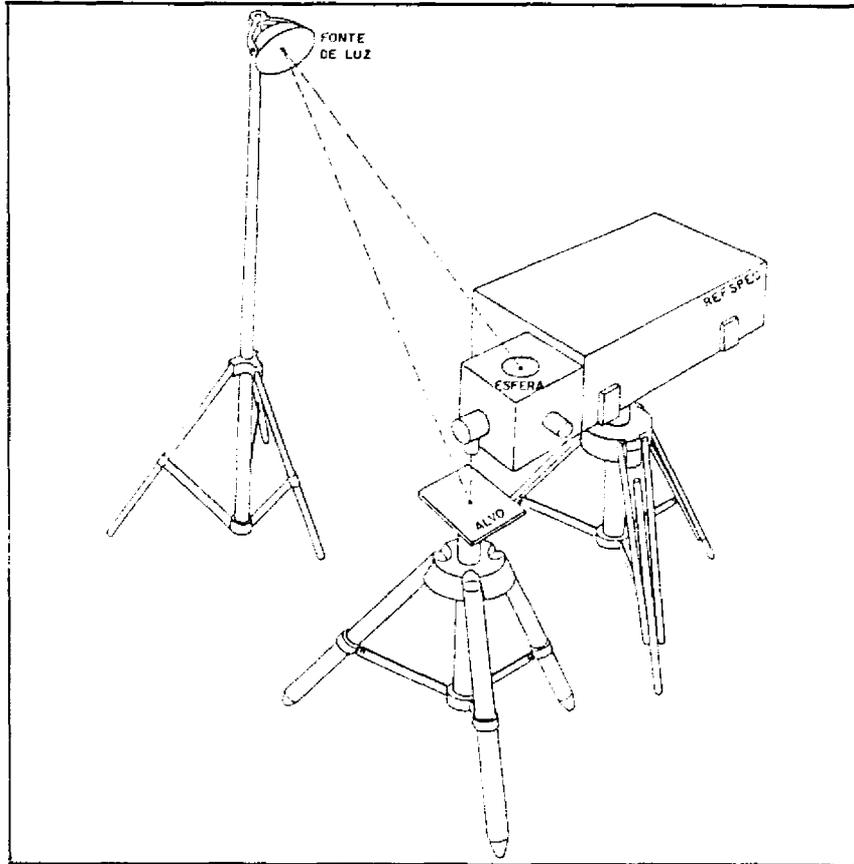


Fig. 4.22 - Representação esquemática do experimento de aferição do REFSPEC IIA em laboratório
 FONTE: Barringer Research (s.d.), p. 2 - 10.

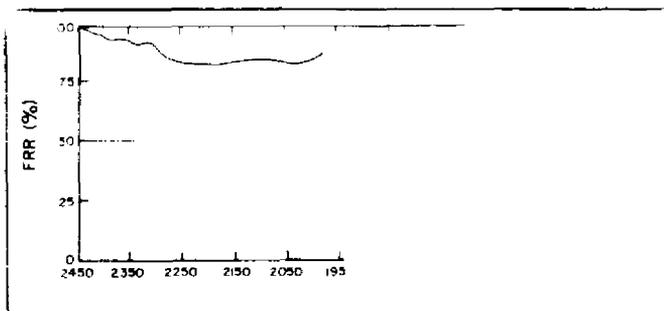


Fig. 4.23 - Curva do espectro de uma placa de referência utilizada para a aferição do espectrorradiômetro REFSPEC IIA.
 FONTE: Barringer Research (s.d.), p 2 - 11.

4.2.4 - INTERCALIBRAÇÃO DE RADIÔMETROS

Quando a obtenção do FRB se dá com dois instrumentos, faz-se necessário conhecer o fator de intercalibração dos espectrorradiômetros envolvidos, sejam as medidas executadas com o método *seqüencial* ou *simultâneo*. A necessidade do fator de intercalibração foi comprovada em experimentos preliminares de obtenção do FRB (Figura 3.7) com o SPECTRON SE590, utilizando o procedimento de chaveamento (*seqüencial*). Nestes experimentos, encontrou-se um fator de intercalibração não unitário, o que implicava em diferentes valores do FRB.

Além da necessidade de utilizar o fator de intercalibração na obtenção do FRB quando se utilizam dois instrumentos, os experimentos mostraram a necessidade de obter um fator de calibração para o campo e outro para laboratório.

4.2.4.1 - INTERCALIBRAÇÃO NO CAMPO

Nesta seção exploram-se duas variantes do método *seqüencial*, por "substituição" e "chaveamento", nos estudos para obtenção do fator de intercalibração, usando-se o espectrorradiômetro SPECTRON SE590.

Os resultados gerados pelo método de substituição são usados apenas como parâmetros de comparação com os obtidos com o de chaveamento, pois este emprega duas unidades de leitura nas medições. Tais unidades de leitura têm sistemas ópticos, eletrônicos e rede de detectores diferentes. Conseqüentemente, os valores de radiância da placa de interesse e os da placa padrão utilizados no cálculo do FRB contêm influências devidas às características específicas de cada unidade. Logo, a não intercalibração das unidades de leitura pode introduzir erros na reflectância obtida.

Para comprovação da necessidade da intercalibração das unidades de leitura o seguinte experimento foi efetuado:

- 1) O espectrorradiômetro SPECTRON SE590, composto da unidade de comando número 02-00 e as unidades de leitura números 02-02 e 02-03 com um campo de visada (FOV) de 15°, foi instalado num local onde a influência da vizinhança na medição pode ser considerada desprezível, pois o vizinho mais próximo estava a uma distância de 50 metros.
- 2) Utilizando o método de substituição (Figura 4.24), mediram-se 5 vezes as radiâncias oriundas da placa pintada com sulfato de bário nº 90-14 e de uma placa de concreto de 30 x 30 cm, ambas a um metro de distância da unidade de leitura 02-02. Posteriormente repetiram-se as medidas com a unidade de leitura 02-03.

- 3) Utilizando o método de chaveamento (Figura 4.25), mediram-se, alternadamente, cinco vezes a placa de sulfato de bário com a unidade de leitura 02-02, e o concreto com a unidade de leitura 02-03.
- 4) Em seguida calculou-se o valor médio espectral do FRB do concreto para os itens 2 e 3, o desvio padrão e o coeficiente de variação, comparando-se os resultados obtidos.

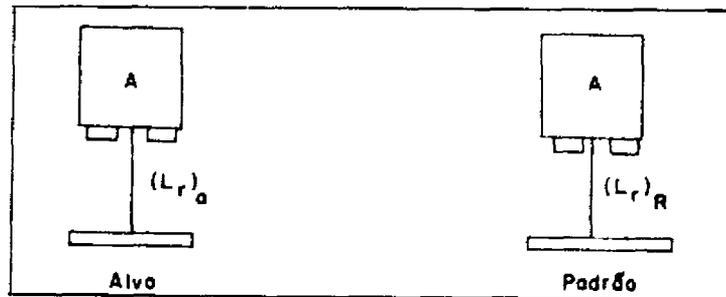


Fig. 4.24 - Representação esquemática do experimento para obtenção do FRB do concreto com o método de substituição.

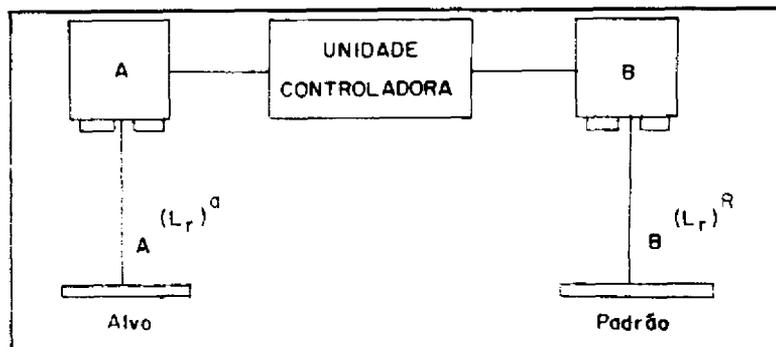


Fig. 4.25 - Representação esquemática do experimento para obtenção do FRB do concreto com o método de chaveamento.

Comprovada a necessidade de intercalibração conforme apresentado no item 5.2.3, executou-se o procedimento descrito a seguir:

- 1) O espectrorradiômetro SPECTRON SE590 composto da unidade de comando número 02-00 e as unidades de leitura números 02-02 e 02-03 com FOV de 15°, foi instalado num local onde a influência da vizinhança na medição pode ser considerada desprezível, pois o vizinho mais próximo estava a uma distância de 50 metros.

- 2) A placa de sulfato de bário foi medida 10 vezes, alternando-se as unidades de leitura 02-02 e 02-03, de modo a diminuir os erros devidos às variações de irradiância o máximo possível.
- 3) Extraíu-se a média, o desvio padrão e o coeficiente de variação dos resultados das medidas da placa de sulfato de bário com a unidade de leitura 02-02 e, posteriormente, com a unidade de leitura 02-03.
- 4) O fator de intercalibração, gerado pela divisão dos valores médios das radiâncias da placa de sulfato de bário coletadas pelas unidades de leitura, foi aplicado ao FRB do concreto, obtido pelo método de chaveamento.
- 5) A seguir foram comparados os FRBs do concreto, obtidos com e sem a aplicação do fator de intercalibração.

4.2.4.2 - INTERCALIBRAÇÃO NO LABORATÓRIO

O procedimento de intercalibração em laboratório foi efetuado do seguinte modo:

- 1) A fonte de radiação utilizada foi uma lâmpada halógena de tungstênio de 1000 W, instalada a um metro de distância da amostra de sulfato de bário.
- 2) Empregaram-se nas medições as unidades de leitura 02-03 e 02-04 mantendo-se o FOV de 15°.
- 3) Com a unidade de leitura 02-04, através de cinco medidas pelo método de substituição, obteve-se o FRB de uma amostra de papelão.
- 4) Com as unidades de leitura 02-03 e 02-04, efetuaram-se três medidas alternadas do papelão e do sulfato de bário.
- 5) Posteriormente, para obter o fator de intercalibração, a placa de sulfato de bário foi medida cinco vezes, alternadamente com a unidade de leitura 02-03 e, depois, com a unidade de leitura 02-04.
- 6) Dos valores medidos, para comparação dos resultados, foram extraídos a média, o desvio padrão e o C_v .

4.3 - INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE IRRADIÂNCIA NO FRB

Como já foi citado, quando as medições de radiância da placa e do padrão de referência são feitas seqüencialmente, é

importante que o intervalo de tempo entre as duas medidas seja tão curto quanto possível, pois as variações de irradiância podem provocar modificações nos valores de FRB obtidos.

Neste trabalho avaliou-se a influência da variação de irradiância utilizando-se o método seqüencial, pois, sob as mesmas condições, ele deve introduzir mudanças mais significativas no FRB que o método simultâneo, devido ao maior intervalo de tempo entre as medidas do alvo de interesse e da placa de referência.

Didaticamente dividiu-se o método seqüencial em três procedimentos: substituição, chaveamento (com o SPECTRON SE590) e Esfera Integradora (com o REFSPEC IIA). Estes procedimentos foram testados quanto ao intervalo de tempo entre as medidas do alvo e da referência.

No caso dos procedimentos de substituição e chaveamento, os intervalos médios (Tabela 4.6) foram obtidos levantando-se as diferenças entre os horários das medidas do alvo e do padrão para cada espectro gravado pelo SPECTRON SE590.

O intervalo médio, relativo ao procedimento de medição com esfera integradora (REFSPEC IIA), foi obtido utilizando-se o tempo de varredura mínimo, de 120 segundos, para um espectro completo, dividido pelo número de medidas efetuadas (1001). O resultado foi dividido por três (medidas das radiancias do alvo, do fundo e da esfera), que é a seqüência de medição indicada no manual do equipamento (Tabela 4.6).

TABELA 4.6 - INTERVALO MÉDIO ENTRE AS MEDIDAS DO ALVO E DO PADRÃO

MÉTODO SEQÜENCIAL		
SPECTRON SE590		REFSPEC IIA
Substituição	Chaveamento	Esfera Integradora
13,6 segundos	6,9 segundos	0,04 segundos

Com o sistema de medição de irradiância total (Figura 4.9) efetuou-se a verificação da variação de irradiância solar em intervalos de 1 segundo e de 5 segundos, em vários horários do dia. Além disso, por ocasião das medidas, fez-se um acompanhamento horário das condições atmosféricas, para a detecção de eventuais mudanças .

A verificação da irradiância demonstrou que havia uma pequena variação na irradiância solar para medidas tomadas de um em um segundo, chegando a 1 W/m^2 para um intervalo de tempo de 20 segundos. Com base neste dado, optou-se por executar o experimento de avaliação

da influência da variação de irradiância no FRB, com o procedimento de substituição (13,6 segundos), do seguinte modo:

- 1) Para eliminar dúvidas se os resultados sofreram outras influências além da variação de irradiância, as medidas foram executadas num local onde os vizinhos mais próximos estavam a 50 metros de distância. Escolheu-se o horário de 11 às 13 horas, no qual a variação de irradiância devida à variação do ângulo zenital solar é menor, fazendo-se um constante acompanhamento da variação de irradiância com um solarímetro.
- 2) A placa número 90-14 pintada com sulfato de bário foi utilizada como referência. Como alvo foi utilizada uma placa de concreto, de 30 x 30 cm, de superfície uniforme.
- 3) As medidas foram efetuadas com o espectrorradiômetro SPECTRON SE590 número 02-02 e a unidade de leitura 02-02 com uma objetiva de 15°, instalada a um metro de distância dos alvos de referência e de concreto.
- 4) Com o procedimento de substituição (Figura 4.24), mediram-se as radiâncias do concreto e do padrão de referência alternadamente, por 4 vezes, com intervalos de 13,6; 16; 18; 20; 30; 40; 55; 120 e 180 segundos.
- 5) Os dados foram processados, obtendo-se o FRB do concreto, bem como a variação de irradiância obtida com o solarímetro. Os resultados gerados possibilitaram avaliar, quantitativamente, a influência da variação de irradiância no FRB, devida ao intervalo de tempo entre as medidas do alvo e da referência.

4.4 - INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DE RADIAÇÃO NO FRB

Kimes e Kirchner (1982) afirmaram que uma placa perfeitamente lambertiana tem uma reflectância constante e igual a um, para qualquer geometria de radiação. Entretanto, como foi citado anteriormente, vários fatores produzem modificações na reflectância de uma placa referência, tornando-a menor que 1.

Neste experimento estudou-se a variação introduzida no FRB pela modificação do ângulo zenital da radiação incidente sobre o alvo. Os ângulos de observação e azimutal de incidência da radiação foram mantidos fixos.

O experimento foi efetuado com o SPECTRON SE590 utilizando-se um painel de papelão como alvo e uma placa de sulfato de bário como referência, de acordo com o seguinte procedimento:

- 1) Foram realizadas três medidas alternadas do alvo e da placa de referência em cada uma das posições definidas pelos seguintes pares de valores dos ângulos de zênite e azimute da

fonte (Figura 4.26): $(0^\circ, 0^\circ)$, $(5^\circ, 0^\circ)$, $(10^\circ, 0^\circ)$, $(20^\circ, 0^\circ)$, $(30^\circ, 0^\circ)$, $(40^\circ, 0^\circ)$, $(50^\circ, 0^\circ)$, $(60^\circ, 0^\circ)$, $(70^\circ, 0^\circ)$, $(80^\circ, 0^\circ)$.

- 2) O FRB do papelão, obtido pelo processamento dos dados para cada posição considerada, foi utilizado para a análise da influência da variação de geometria.
- 3) Os valores de radiância do alvo de sulfato de bário e do papelão foram normalizados em relação ao maior valor de radiância. O valor normalizado foi denominado de *radiância normalizada*.
- 4) Foi obtido um fator de correção da relação entre as radiâncias normalizadas do sulfato de bário e do papelão para ser aplicado na correção do FRB do papelão.
- 5) Posteriormente aplicou-se ao FRB do papelão, obtido com medidas de radiância com um ângulo de 80° , o fator de correção e o resultado foi comparado ao FRB obtido com um ângulo de 0° .

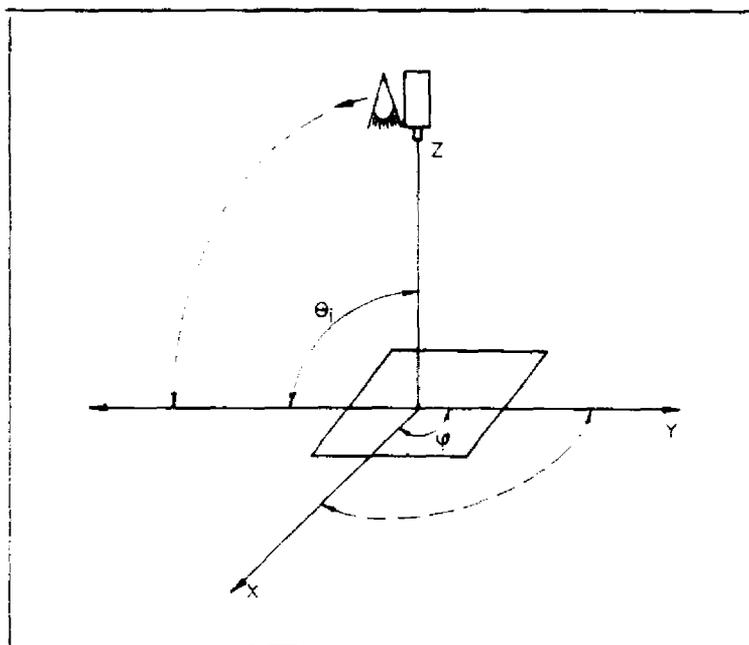


Fig. 4.26 - Representação esquemática do experimento de influência da variação da geometria de radiação no FRB.

4.5 - INFLUÊNCIA DA VIZINHANÇA NO FRB

Considerando a simulação proposta por Kimes et al. (1983), recobriu-se um painel de madeira, de 60 x 60 cm, com feltros

de várias cores (azul, verde, vermelho e preto) e uma cartolina branca, de maneira que se pudesse testar a influência da vizinhança sobre o FRR e a radiância.

O experimento foi conduzido em laboratório, face à impossibilidade de controlar no campo outras variáveis que pudessem afetar o FRR e a radiância. Composto de duas etapas, utilizou-se, na primeira, um espectrorradiômetro SPECTRON SE590 (380 a 1100 nm) e na segunda, um espectrorradiômetro REFSPEC IIA (450 a 2450 nm).

4.5.1 - EXPERIMENTO COM O SPECTRON SE590

Neste experimento estudou-se o erro introduzido nos valores de radiância refletida por uma placa de referência pintada à base de sulfato de bário, pela proximidade de painéis empregados como vizinhos (quatro painéis recobertos com filtros de diferentes cores e um recoberto com cartolina branca). Os painéis foram posicionados em diferentes distâncias da placa, segundo os ângulos 90°, 135° e 180° formados em relação à fonte de radiação (Figura 4.28). Os ângulos de observação foram mantidos fixos.

O experimento foi efetuado com o SPECTRON SE590 com uma objetiva de 15°, instalado a 30 cm de altura da placa para medição de radiância espectral a nadir. Como fonte luminosa utilizou-se uma lâmpada halógena de 1000 W, posicionada a 45° (ângulo zenital).

O experimento foi realizado de acordo com o seguinte procedimento (Figura 4.27):

- 1) Inicialmente mediu-se a radiância da placa de referência sem a presença dos vizinhos, a fim de obter um padrão para comparação. Este padrão foi empregado por ocasião dos experimentos na verificação da influência ou não dos painéis empregados como vizinhos.
- 2) Posteriormente mediu-se a radiância dos vizinhos, a fim de verificar suas possíveis influências nos valores de radiância da placa de referência.
- 3) Em cada uma das posições abaixo foram realizadas quatro medidas da placa de referência, com a presença dos painéis utilizados como vizinhos: a) 90°, 30 cm; 90°, 50 cm; 90°, 100 cm; b) 135°, 30 cm; 135°, 50 cm; 135°, 100 cm; e c) 180°, 30 cm; 180°, 50 cm; 180°, 100 cm.
- 4) Os dados foram processados obtendo-se as radiâncias espectrais da placa com as influências dos vizinhos nos diversos ângulos e distâncias considerados.

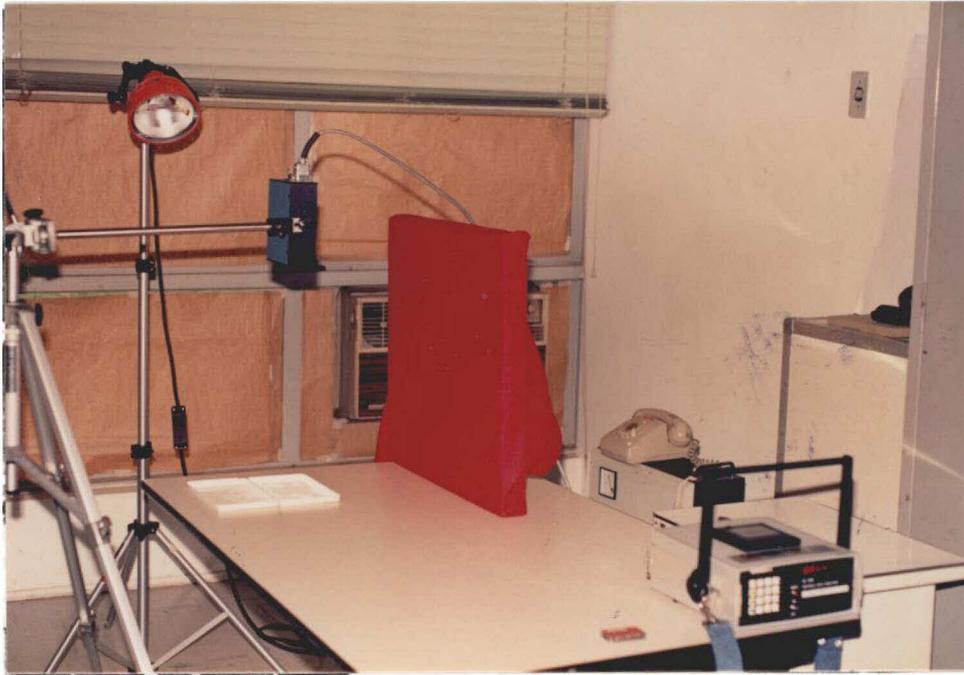


Fig. 4.27 - Ilustração do experimento da influência da vizinhança.

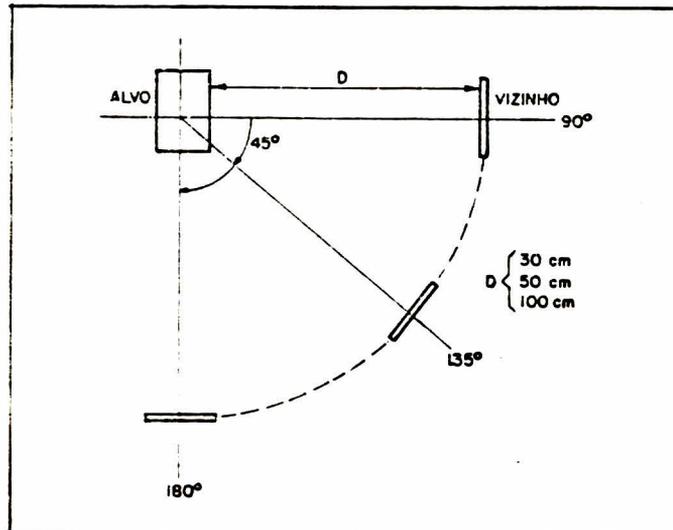


Fig. 4.28 - Geometria do experimento da influência da vizinhança.

4.5.2 - EXPERIMENTO COM O REFSPEC IIA

O experimento foi efetuado com o espectrorradiômetro REFSPEC IIA utilizando-se a mesma placa, os mesmos painéis vizinhos e a mesma fonte de radiação empregados na realização do experimento descrito no item 4.5.1. A placa foi colocada a uma distância vertical de 20 cm da óptica de entrada, e a fonte de radiação posicionada a 45° (Figura 4.29).

O experimento foi realizado de acordo com o seguinte procedimento:

- 1) Inicialmente obteve-se o FRR da placa de sulfato de bário e dos cinco painéis utilizados como vizinhos.
- 2) Em cada uma das posições abaixo indicadas, definidas pelo ângulo do painel em relação à fonte luminosa e pela distância do painel ao centro do alvo (Figura 4.28), foram realizadas quatro medidas: a) 90° , 20 cm; 90° , 40 cm; 90° , 100 cm; b) 135° , 20 cm; 135° , 40 cm; 135° , 100 cm; e c) 180° , 20 cm; 180° , 40 cm; 180° , 100 cm.
- 3) Os dados foram processados obtendo-se o FRR do alvo, com as influências dos vizinhos nos diversos ângulos e distâncias considerados.

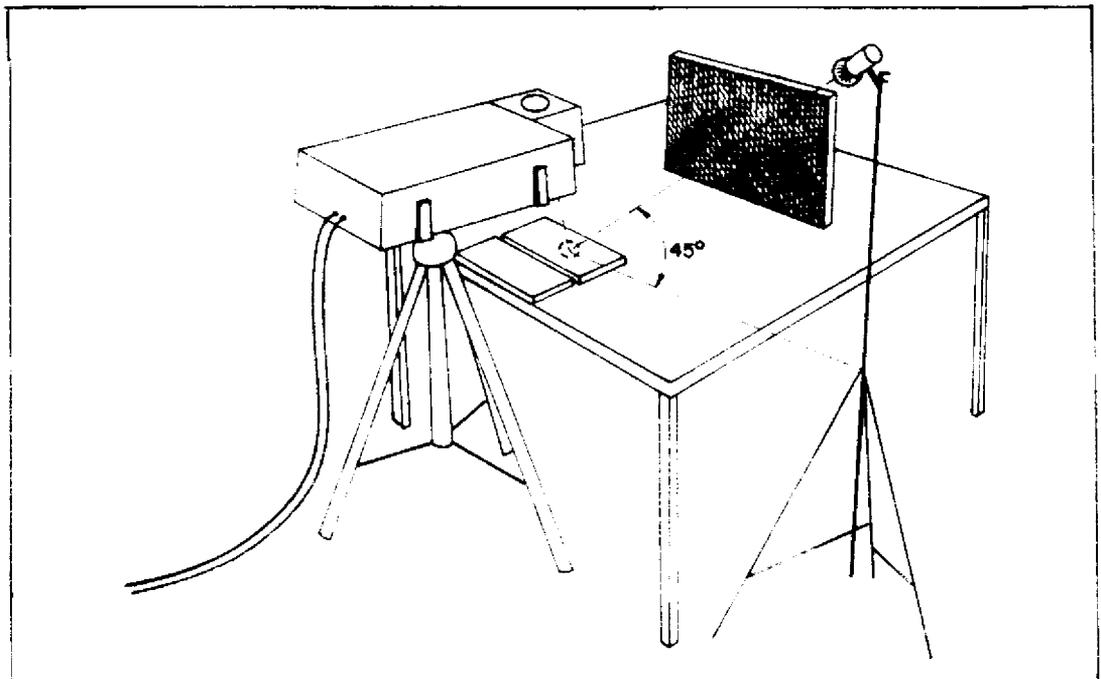


Fig. 4.29 - Representação esquemática do experimento de avaliação da influência de vizinhos com REFSPEC IIA.

CAPÍTULO 5

RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 - COMPORTEAMENTO DOS SISTEMAS DE MEDIÇÃO

As tabelas e gráficos apresentados neste tópico mostram os resultados relativos ao comportamento dos equipamentos antes de iniciar os experimentos.

5.1.1 - ESPECTRORRADIÔMETRO SPECTRON SE590

A Tabela 5.1 apresenta o comportamento do espectrorradiômetro SPECTRON SE590 utilizando-se 24 medidas de uma mesma placa pintada com tinta à base de sulfato de bário. Os resultados são expressos sob a forma de média, desvio padrão e C_V .

Analisando a Tabela 5.1 observa-se que o erro máximo das medidas, na maioria dos comprimentos de onda, é da ordem de 0,6%, sendo perfeitamente compatível com o estabelecido pelo NBS para as medidas radiométricas, que é de 1% (Wyatt, 1978). Nos comprimentos de onda de 363,4; 1098,0 e 1113,7 os erros ultrapassam o valor de 1%, sendo inconveniente utilizá-los, baseado na recomendação do NBS. São suficientes três observações para obter-se um valor médio adequado, ou seja, com uma incerteza dentro do padrão recomendado pelo NBS.

TABELA 5.1 - COMPORTEAMENTO DO SPECTRON SE590

λ (nm)	AMPLITUDE RELATIVA						DESVIO PADRÃO						C_V (%)					
	NÚMERO DE MEDIDAS						NÚMERO DE MEDIDAS						NÚMERO DE MEDIDAS					
	24	21	15	10	5	3	24	21	15	10	5	3	24	21	15	10	5	3
363.4	92.8	92.8	92.9	92.8	92.8	92.6	2.0	2.1	2.4	2.4	2.9	4.0	2.2	2.3	2.6	2.6	3.2	4.4
399.5	263.5	263.5	263.5	263.1	263.2	263.3	1.5	1.5	1.6	1.1	1.1	1.5	0.6	0.6	0.6	0.4	0.4	0.6
449.8	719.5	719.4	718.9	718.7	717.8	716.3	3.3	3.5	3.3	2.6	3.3	3.2	0.5	0.5	0.5	0.4	0.5	0.4
500.0	1341.0	1341.0	1340.0	1339.0	1337.0	1333.60	5.8	6.1	5.6	4.1	4.8	4.4	0.4	0.5	0.4	0.3	0.4	0.3
550.4	1858.0	1858.0	1857.0	1856.0	1854.0	1852.0	6.7	8.7	7.1	4.9	5.7	4.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3	0.2
599.7	2467.0	2467.0	2467.0	2464.0	2463.0	2460.0	8.0	8.5	8.4	6.4	7.3	6.7	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3
649.6	2651.0	2651.0	2649.0	2647.0	2645.0	2642.0	8.1	8.5	8.5	6.2	7.5	7.4	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.3
699.6	3196.0	3195.0	3193.0	3192.0	3190.0	3187.0	8.8	9.5	9.5	7.1	8.5	8.9	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.3
750.1	3157.0	3157.0	3153.0	3152.0	3157.0	3146.0	9.2	9.7	9.7	6.8	7.5	6.7	0.3	0.3	0.3	0.2	0.2	0.2
798.3	2639.0	2638.0	2634.0	2630.0	2631.0	2629.0	7.8	8.1	8.0	5.8	6.7	6.8	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.3
848.8	2135.0	2135.0	2131.0	2130.0	2128.0	2126.0	6.4	6.7	6.6	5.0	5.5	5.5	0.3	0.3	0.3	0.2	0.3	0.3
899.6	1502.0	1501.0	1498.0	1498.0	1494.0	1494.0	4.7	4.8	4.8	3.8	4.5	3.5	0.3	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2
950.1	876.3	876.2	875.6	875.9	873.8	873.7	2.2	2.2	2.1	1.8	1.8	2.5	0.2	0.3	0.2	0.2	0.2	0.3
1000.4	497.4	492.2	491.7	491.0	490.0	489.3	2.1	1.8	2.1	1.8	1.4	1.5	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3	0.3
1050.8	175.8	175.7	175.8	175.5	175.2	175.0	0.9	0.9	1.1	0.8	0.8	1.0	0.5	0.5	0.6	0.5	0.5	0.6
1098.0	83.4	83.4	83.4	83.0	82.6	82.3	1.0	0.9	0.9	0.8	0.9	0.6	1.2	1.1	1.1	1.0	1.1	0.7
1113.7	61.0	60.9	61.1	61.2	61.4	61.3	1.1	1.1	1.0	0.4	0.5	0.6	1.8	1.8	1.8	0.7	0.9	0.9

5.1.2 - ESPECTRORRADIÔMETRO REFSPEC IIA

A Tabela 5.2 mostra os resultados do comportamento do REFSPEC IIA, expresso sob a forma de média, desvio padrão e coeficiente de variação percentual, referente à medida do mesmo alvo utilizado na Seção 5.1.1. Ela apresenta os resultados das medidas de 44 pontos selecionados dos 1001 pontos de medição possíveis com o REFSPEC IIA.

Analisando a Tabela 5.2 observa-se que:

- 1) O número de medidas para obter uma média adequada com este espectrorradiômetro é três. Esta assertiva baseia-se no fato de que a Barringer (fabricante do espectrorradiômetro) prevê um erro de até 1% do valor da reflectância. Este valor só é ultrapassado em algumas regiões.
- 2) Na região do espectro entre 1880 e 1930 nm há um aumento do erro nas medidas. Possivelmente tais variações ocorrem devido à umidade existente no interior da esfera, que absorve a radiação de energia de modo não uniforme.
- 3) Na região de 2420 a 2450 nm o erro é maior que o estabelecido pelo fabricante (1%). Os dados obtidos nesta região não devem ser utilizados, face à incerteza dos valores medidos. Esta incerteza possivelmente é devida à diminuição da relação sinal/ruído, causada por um declínio na detectividade do sistema de detecção.
- 4) O espectrorradiômetro proporciona medidas confiáveis na região entre 450 e 2418 nm. No entanto os pesquisadores, ao fazerem medidas no campo, devem observar que as regiões entre 1350 e 1450 e 1850 e 2000 nm são faixas de absorção da radiação (Figura 5.1) pela água (Lintz e Simonet, 1976). Neste espectrorradiômetro estas regiões são bem definidas quando se executa uma medida de campo (Figura 5.2).

TABELA 5.2 - COMPORTAMENTO DO REFSPEC IIA

λ (nm)	REFLECTÂNCIA MÉDIA				DESVIO PADRÃO				C_V (%)			
	NÚMERO DE MEDIDAS				NÚMERO DE MEDIDAS				NÚMERO DE MEDIDAS			
	10	7	5	3	10	7	5	3	10	7	5	3
450	44,7	44,7	44,7	44,7	0,2	0,2	0,2	0,1	0,4	0,4	0,4	0,2
550	45,5	45,6	45,6	45,6	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2
650	44,5	44,6	44,6	44,6	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2
750	43,2	43,2	44,3	43,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2
850	42,1	42,2	42,2	42,2	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2
950	49,2	49,3	49,3	49,3	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2
1050	50,8	50,9	50,9	50,9	0,2	0,1	0,1	0,1	0,4	0,2	0,2	0,2
1150	52,7	52,7	52,8	52,8	0,2	0,2	0,1	0,1	0,4	0,4	0,2	0,2
1250	54,5	54,6	54,7	54,6	0,2	0,2	0,2	0,1	0,4	0,4	0,2	0,2
1350	55,6	55,6	55,7	55,7	0,2	0,2	0,2	0,2	0,4	0,4	0,4	0,4
1450	60,2	60,3	60,3	60,3	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3
1550	60,6	60,7	60,7	60,8	0,2	0,2	0,1	0,1	0,3	0,3	0,2	0,2
1650	59,9	60,0	60,0	60,0	0,2	0,1	0,1	0,1	0,3	0,3	0,2	0,2
1750	61,8	61,8	61,8	61,8	0,1	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2
1850	62,3	62,3	62,4	62,3	0,2	0,2	0,1	0,1	0,3	0,3	0,2	0,2
1870	62,6	62,5	62,5	62,6	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2
1880	63,4	63,4	62,4	63,4	0,3	0,3	0,3	0,2	0,5	0,3	0,2	0,5
1890	65,4	65,4	65,5	65,4	0,3	0,3	0,3	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6
1900	68,4	68,4	68,5	68,4	0,4	0,4	0,1	0,4	0,6	0,6	0,6	0,6
1910	71,4	71,5	71,6	71,6	0,4	0,4	0,4	0,4	0,6	0,6	0,4	0,6
1920	73,6	73,7	73,8	73,7	0,4	0,3	0,3	0,3	0,5	0,4	0,3	0,4
1930	74,6	74,6	74,7	74,7	0,2	0,3	0,2	0,3	0,3	0,4	0,4	0,4
1940	74,8	74,8	74,8	74,8	0,1	0,2	0,3	0,2	0,1	0,3	0,1	0,3
1950	74,5	74,5	74,5	74,5	0,1	0,1	0,1	0,2	0,1	0,1	0,1	0,3
2050	73,3	73,3	73,4	73,4	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3	0,3
2150	74,4	74,4	74,4	74,5	0,2	0,1	0,2	0,1	0,3	0,1	0,3	0,1
2250	74,8	74,8	74,8	74,9	0,3	0,2	0,3	0,4	0,4	0,3	0,4	0,5
2350	83,4	83,3	83,4	83,5	0,3	0,3	0,2	0,1	0,4	0,4	0,2	0,1
2418	84,4	84,4	84,5	84,6	0,9	0,9	0,4	0,4	0,8	1,0	0,5	0,5
2420	84,4	84,4	84,6	84,7	1,1	1,1	0,3	0,3	1,0	1,0	0,4	0,4
2422	83,4	84,3	84,6	84,8	1,4	1,4	0,2	0,2	1,1	2,0	0,2	0,2
2426	83,7	83,8	84,8	85,1	2,5	2,6	0,7	0,1	2,0	3,0	0,8	0,1
2428	83,2	83,3	84,6	84,9	2,8	2,9	0,8	0,2	3,0	3,0	0,9	0,2
2430	82,6	82,9	84,1	84,5	3,0	2,9	0,9	0,4	3,0	3,0	1,0	0,5
2432	82,2	82,6	83,8	84,3	2,9	2,7	0,9	0,7	3,0	3,0	1,0	0,8
2434	82,2	82,6	83,2	83,5	1,5	1,4	1,0	1,1	3,0	1,1	1,0	1,0
2436	82,5	82,6	82,9	83,1	1,0	1,1	1,2	1,4	1,0	1,0	1,0	1,0
2438	82,5	82,4	82,3	82,7	1,7	1,6	1,6	1,9	1,0	1,0	1,0	2,0
2440	81,9	81,6	81,5	82,0	2,2	2,0	2,1	2,4	2,0	2,0	2,0	2,0
2442	80,5	80,5	80,9	81,5	1,9	1,9	2,3	2,7	2,0	2,0	2,0	3,0
2444	80,5	80,9	81,4	81,7	1,7	1,6	1,8	2,2	2,0	2,0	2,0	2,0
2446	82,7	83,1	83,2	83,0	1,3	1,1	1,4	1,8	1,0	1,0	1,0	2,0
2448	85,7	85,9	85,5	84,7	1,6	1,7	2,0	2,3	1,0	2,0	2,0	2,0
2450	87,9	87,9	87,1	85,9	2,4	2,6	3,0	3,9	2,0	3,0	3,0	4,0

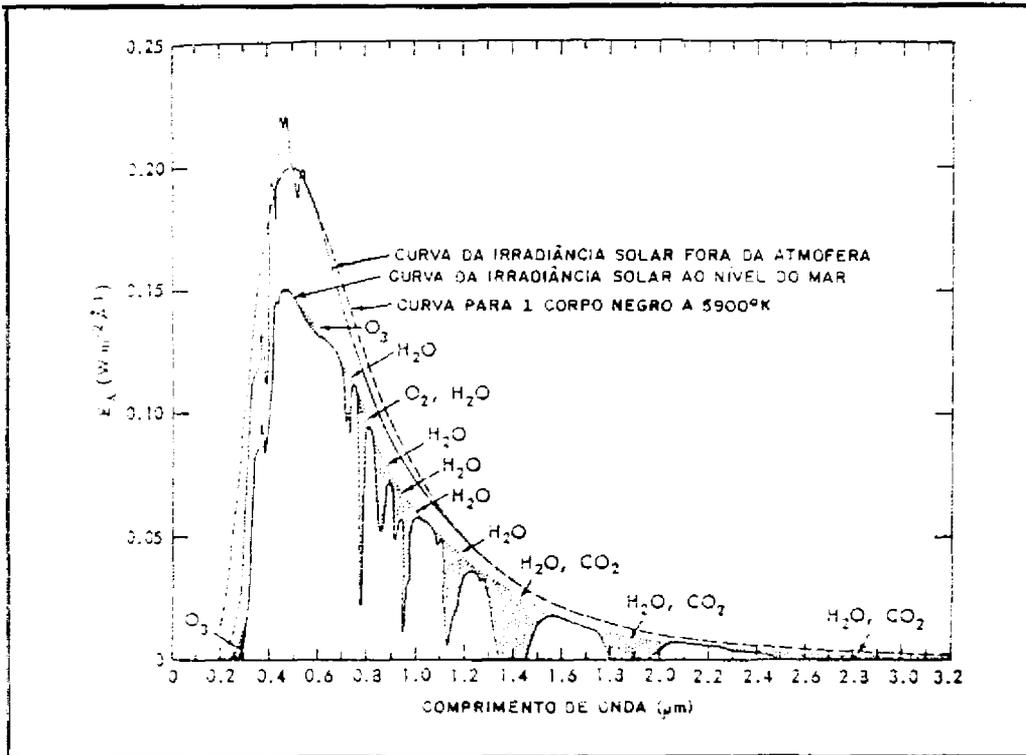


Fig. 5.1 - Bandas de absorção da radiação solar pela atmosfera.
 FONTE: Lintz e Simonet (1976), p. 36.

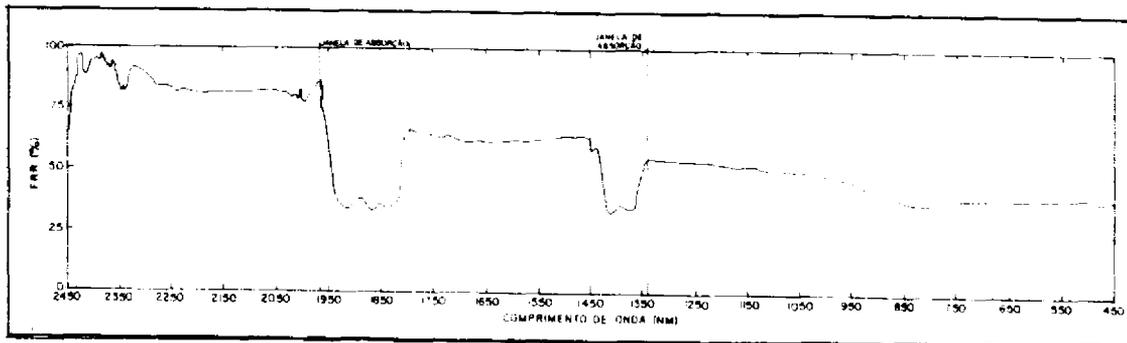


Fig. 5.2 - Regiões de absorção da água expressas pelo REFSPEC IIA.

5.1.3 - SISTEMA DE MEDIÇÃO DE IRRADIÂNCIA

A Tabela 5.3 mostra os resultados relativos ao comportamento do Sistema de Medição de Irradiância (Solarímetro Eppley PSP e microcomputador 21-X). As medidas foram tomadas a cada seis segundos.

TABELA 5.3 - COMPORTAMENTO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DE IRRADIÂNCIA

Nº DA MEDIDA	TENSÃO (40 cm) (10 ⁻³ v)	TENSÃO (80 cm) (10 ⁻³ v)
1	1.607	7.30
2	1.619	7.30
3	1.623	7.30
4	1.625	7.30
5	1.625	7.30
6	1.625	7.31
7	1.625	7.31
8	1.624	7.32
9	1.623	7.32
10	1.622	7.32
11	1.621	7.33
12	1.621	7.33
13	1.619	7.33
14	1.619	7.34
15	1.617	7.34
16	1.617	7.34
Média	1.621	7.32
s	0.0045	0.020
C _v	0.277%	0.273%

Analisando os resultados observa-se que o erro do sistema é aceitável, segundo o fabricante, já que ele é menor que 1%.

5.1.4 - SISTEMA DE MEDIÇÃO DE RADIAÇÃO ÓPTICA

A Tabela 5.4 mostra os resultados do comportamento do espectrorradiômetro OPTRONIC 740A através da medida do sinal da esfera integradora em ampères .

A análise dos resultados obtidos permite observar que:

- 1) Em 606 nm o erro da medida é bem expressivo. Este erro sistemático é devido a problemas mecânicos na mudança de filtros do monocromador.
- 2) Para que a média esteja dentro da faixa de erro de 1% indicada pelo fabricante é suficiente fazer três medidas.

TABELA 5.4 - COMPORTAMENTO DO SISTEMA DE MEDIÇÃO DA RADIAÇÃO ÓPTICA

λ (nm)	CORRENTE MÉDIA (10^{-12} ampères)				DESVIO PADRÃO (10^{-12})				CV (%)			
	NÚMERO DE MEDIDAS				NÚMERO DE MEDIDAS				NÚMERO DE MEDIDAS			
	10	7	5	3	10	7	5	3	10	7	5	3
380	8,2	8,2	8,2	8,2	0,1	0,1	0,2	0,2	1,0	1,0	2,0	2,0
400	21,3	21,4	21,3	21,4	0,2	0,2	0,2	0,1	0,9	0,9	0,9	0,5
450	110,3	110,4	110,4	110,4	0,2	0,2	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,1
500	307,2	307,6	307,7	306,9	2,0	1,0	0,1	0,1	0,3	0,3	0,3	0,3
550	505,2	505,2	505,3	505,2	0,5	0,4	0,5	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1
600	561,1	561,2	561,3	560,9	0,4	0,5	0,6	0,2	0,1	0,1	0,1	0,0
606	554,1	555,2	563,5	567,2	20,0	20,0	20,0	30,0	4,0	4,0	4,0	5,0
650	808,6	808,6	808,7	808,2	0,7	0,7	0,8	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1
700	877,8	877,9	878,1	877,5	1,0	1,0	1,0	1,0	0,1	0,1	0,1	0,1
750	881,8	882,2	882,3	882,2	0,7	0,4	0,5	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1
800	773,1	773,5	773,9	773,9	0,9	0,9	0,1	0,2	0,1	0,1	0,0	0,0
850	736,3	736,6	736,7	736,5	0,7	0,5	0,4	0,6	0,1	0,1	0,1	0,1
900	845,7	845,9	845,9	845,2	0,8	0,9	1,0	0,7	0,1	0,1	0,1	0,1
950	904,9	905,3	905,5	905,2	1,0	0,8	0,5	0,4	0,1	0,1	0,1	0,0
1000	774,0	775,2	775,9	775,9	3,0	0,1	0,1	0,2	0,4	0,1	0,0	0,0
1050	380,0	381,9	383,1	383,5	4,0	0,2	0,8	0,5	1,0	0,5	0,2	0,1
1100	118,9	119,6	120,1	120,2	1,0	0,8	0,3	0,3	0,8	0,7	0,2	0,2

5.1.5 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados dos experimentos deste tópico mostram a necessidade de se conhecer os erros intrínsecos dos sistemas de medição. Os erros são apresentados sob a forma de coeficiente de variação (Philipson et al., 1989), de acordo com a prática padronizada da American Society for Testing and Material (ASTM) para conduzir programas interlaboratoriais de teste, a fim de determinar a precisão dos métodos de ensaio (ASTM, 1986c).

Segundo Wyatt (1978), quando se caracteriza um alvo com base na razão entre duas grandezas radiométricas, exige-se somente que as medidas sejam precisas. Como o FRB insere-se neste contexto, abordou-se o comportamento dos sistemas de medição com base no estudo da repetibilidade (precisão) das medidas (Meiners et al., 1969 e Milton, 1989).

A propriedade deste estudo é evidenciada pelo estabelecimento de regiões onde os sistemas de medição devem ser utilizados com restrição devido ao seu grau de incerteza ser maior que o valor de 1%, recomendado pelo NBS (Wyatt, 1978). Outros resultados importantes foram a definição da quantidade suficiente de medidas para obter um bom resultado (Jackson et al., 1980) e a definição da existência de um erro sistemático nas medidas obtidas com o Optronic 740A.

5.2 INFLUÊNCIA DA CALIBRAÇÃO

Nesta seção são analisados os resultados relativos à calibração de placas de referência, calibração de espectrorradiômetros e intercalibração de espectrorradiômetros.

5.2.1 - CALIBRAÇÃO DE PADRÕES DE REFLECTÂNCIA

Um dos objetivos deste trabalho é mostrar como obter o mesmo FRB de um alvo, medido com diferentes placas de referência (e, portanto, com diferentes reflectâncias), através da calibração das referências. Esta calibração exige o uso de uma esfera integradora para determinar a reflectância absoluta de uma placa de referência, que se constituirá num padrão de reflectância, a partir do qual outras placas de referência poderão ser calibradas (Ver 4.2.1).

5.2.1.1 - REFLECTÂNCIA ESPECTRAL ABSOLUTA DA ESFERA INTEGRADORA

A reflectância absoluta espectral média da esfera integradora, obtida com o método de Goebel (Perdiz, 1990), tem a máxima incerteza no comprimento de onda de 606 nm, quando o monocromador troca os filtros, e o erro devido ao instrumento é da ordem de 4% (dez medidas). Nas demais regiões entre 380 a 1100 nm a incerteza varia entre 0 e 0,5%.

Os valores de reflectância espectral absoluta da esfera integradora variam apenas 1,8% entre o valor mínimo, de 93,8%, e o máximo, de 95,6%.

Comparando os valores da reflectância espectral da esfera integradora obtidos com o método de Goebel (1967), com os obtidos com o método de Taylor (1920) (Figura 5.3), verifica-se que:

- 1) Os valores de reflectância, obtidos através dos dois métodos, têm a mesma ordem de grandeza, com uma diferença média de 0,6%.
- 2) Nos dois métodos, a diferença entre a reflectância máxima e a mínima é de mesma ordem (1,8%).
- 3) Os valores máximos, de 95,6% no método de Goebel e de 95,1% no método de Taylor, ocorrem no mesmo comprimento de onda de 488 nm.

No trabalho de Taylor (1920), o valor encontrado para a reflectância absoluta de uma amostra pintada com carbonato de magnésio foi de 99,1%, maior que o valor médio obtido neste trabalho para o

sulfato de bário, utilizando-se as mesmas formulações. Com relação a esta discrepância é necessário destacar que as tintas são diferentes, por serem produzidas com materiais diferentes. Além disso, há diferenças no acabamento da pintura, que certamente causam sensíveis mudanças nos valores das reflectâncias das superfícies.

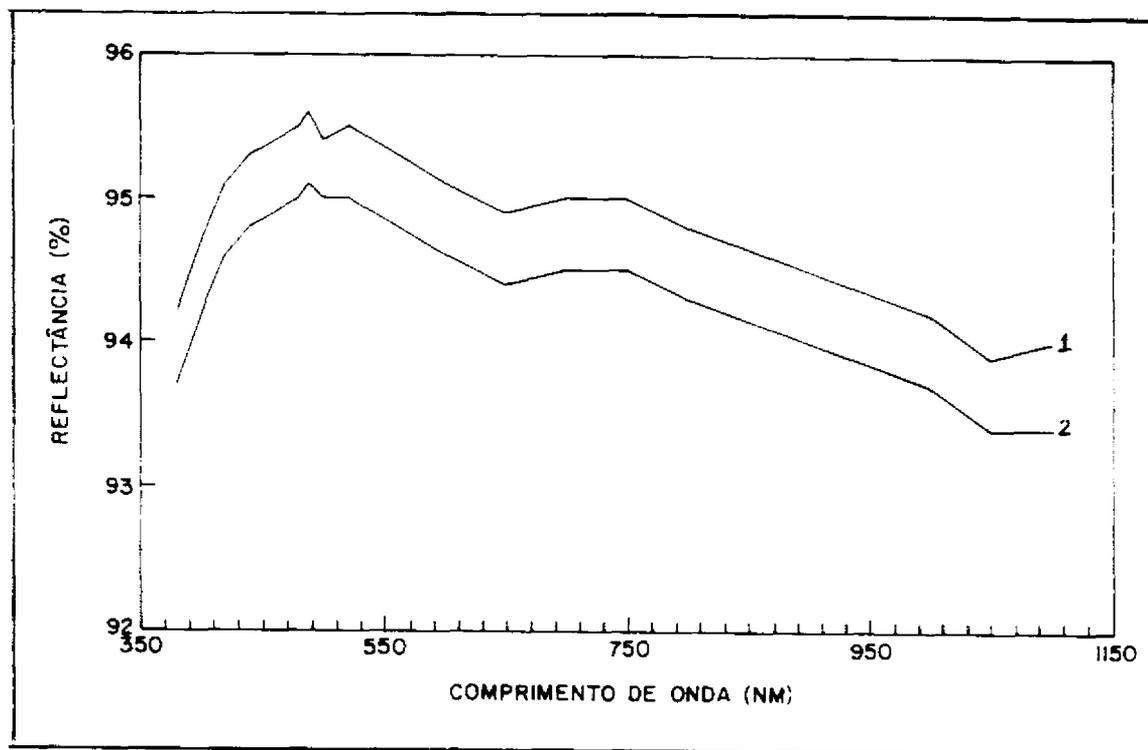


Fig. 5.3 - Reflectância espectral absoluta da esfera integradora:
1- método de Goebel (1967) e 2- método de Taylor (1920).

5.2.1.2 - REFLECTÂNCIA ESPECTRAL ABSOLUTA DE AMOSTRAS DE SULFATO DE BÁRIO

A reflectância espectral absoluta de uma amostra de teste pintada com sulfato de bário (alvo de referência do REFSPEC IIA) foi obtida utilizando-se uma esfera integradora. Estes valores foram calculados a partir das formulações de Perdiz (1990) e de Taylor (1920) utilizando-se as geometrias difusa/difusa (d/d) e 30°/difusa (30°/d).

a) Reflectância espectral absoluta d/d de amostras de BaSO₄

Os valores de reflectância espectral absoluta d/d do alvo de referência do REFSPEC IIA, obtidos com os métodos de Perdiz (1990) e de Taylor (1920) são representados graficamente na Figura 5.4. Analisando estes valores observa-se:

- 1) Os valores obtidos com a formulação de Perdiz(1990) são mais elevados que os obtidos com a formulação de Taylor (1920).
- 2) A diferença entre os valores distribuídos ao longo espectro compreendido entre 380 e 1100 nm é de 9,1% com o método de Perdiz (1990) e de 8,9% com o método de Taylor (1920).

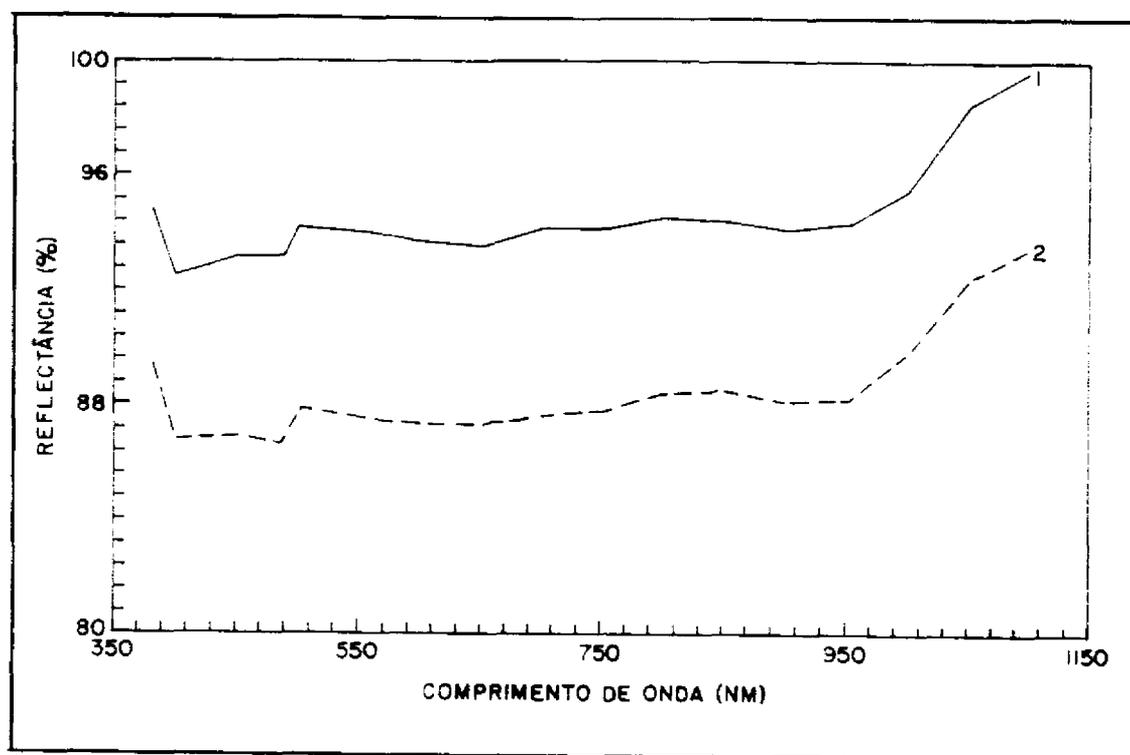


Fig. 5.4 - Reflectância espectral absoluta d/d do alvo de referência do REFSPEC IIA: 1- método de Perdiz (1990) e 2- método de Taylor (1920).

Comparando-se (Tabela 5.5 e Figura 5.5) os valores da reflectância espectral absoluta d/d de uma amostra de pó de sulfato de bário prensado, obtidos por Grum e Luckey (1968), com os valores da amostra medida neste trabalho obtidos com os métodos de Perdiz (1990) e Taylor (1920), verifica-se que:

- 1) Na região entre 380 a 1100 nm, os valores obtidos por Grum e Luckey (1968) são mais estáveis que os deste trabalho.
- 2) Os valores obtidos por Grum e Luckey (1968) aumentam a partir de 380 nm até chegar a um valor máximo em 540 nm, diminuindo a partir deste ponto até 1100 nm. Os valores obtidos neste trabalho aumentam continuamente, desde 380 nm até 1100 nm.

3) Os valores obtidos por Grum e Luckey (1968) são aproximadamente 5 a 6% maiores que os valores do alvo de referência do REFSPEC IIA obtidos com o método de Perdiz (1990). Com relação aos valores obtidos com o método de Taylor, os obtidos por Grum e Luckey (1968) chegam a ser 12% maiores.

A Tabela 5.5 e a Figura 5.5 permitem ainda comparar os valores da reflectância espectral absoluta d/d do alvo de referência do REFSPEC IIA, obtidos com os métodos de Perdiz (1990) e Taylor (1920), com os valores obtidos por Goebel (1966). Este utilizou o método de "esfera dupla - NBS", referente à média de quatro placas (de diferentes fornecedores) preparadas com pó de sulfato de bário prensado. Analisando os resultados, observa-se que os valores obtidos neste trabalho, com o método de Perdiz (1990), são 5 a 6% menores; e os valores obtidos com o método de Taylor (1920) são 12 a 13% menores.

TABELA 5.5 - COMPARAÇÃO DA REFLECTÂNCIA ESPECTRAL ABSOLUTA D/D DE PLACAS DE SULFATO DE BÁRIO (MÉTODOS: PERDIZ, TAYLOR, GRUM E LUCKEY E GOEBEL)

Comprimento de onda (nm)	ρ d/d %			
	Perdiz	Taylor	Grum e Luckey	Goebel
380	94,8	89,4	98,2	...
400	92,5	86,8	98,6	98,3
450	93,2	86,9	99,1	...
488	93,2	86,6	99,3	...
500	94,2	87,9	99,2	98,9
540	94,0	87,6	99,3	...
550	94,0	87,5	99,3	99,1
600	93,7	87,3	99,2	99,0
650	93,5	87,3	99,2	...
700	94,1	87,6	99,2	99,1
750	94,1	87,8	99,2	...
800	94,5	88,4	99,2	...
850	94,4	88,5	99,1	...
900	94,1	88,1	98,9	...
950	94,3	88,2	98,6	...
1000	95,5	89,9	98,3	...
1050	98,5	92,5	98,2	...
1100	99,7	93,5	98,2	...

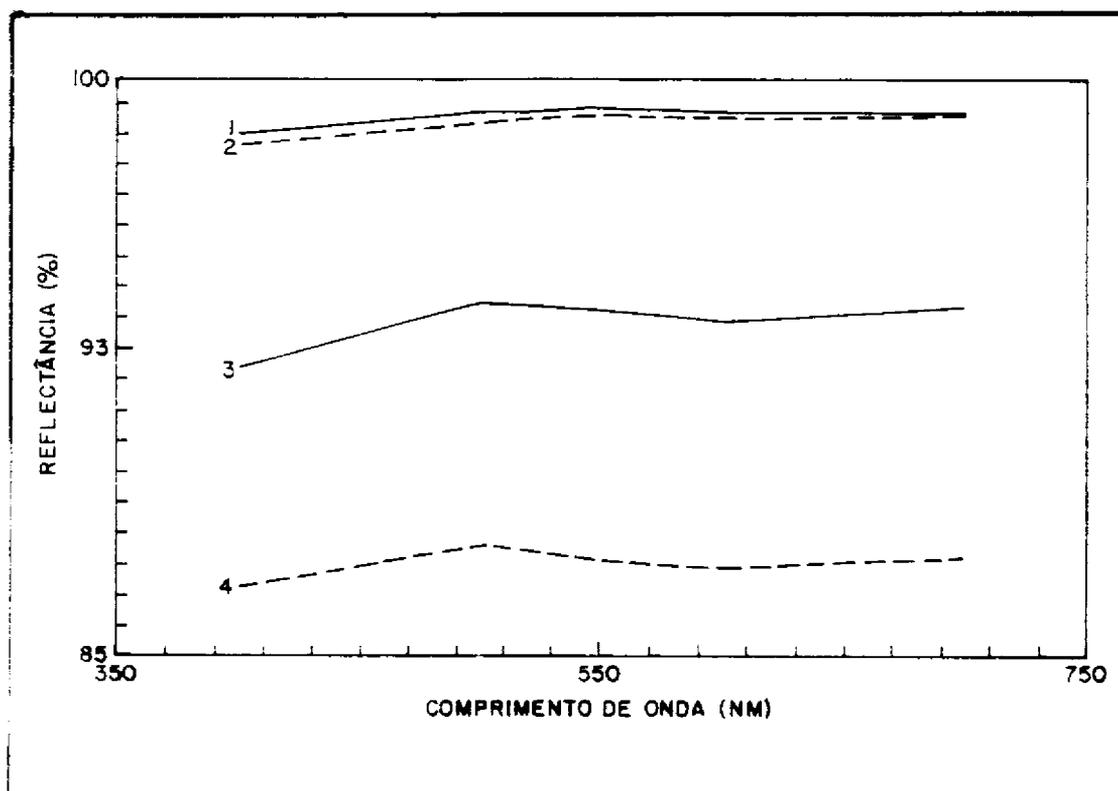


Fig. 5.5 - Reflectância espectral absoluta d/d de placas de $BaSO_4$: 1-calculada por Grum e Luckey (1968), $BaSO_4$ prensado; 2- calculada com o Método de Goebel (1967), $BaSO_4$ pintado; 3- calculada com o Método de Perdiz (1990), $BaSO_4$ pintado; e 4- calculada com o Método de Taylor (1920), $BaSO_4$ pintado.

Os resultados apresentados mostram que os valores da reflectância d/d de uma amostra de sulfato de bário obtidos com os métodos de Taylor (1920) e Perdiz (1990) neste trabalho são menores que os obtidos por Goebel (1966) e por Grum e Luckey (1968).

Provavelmente os menores valores obtidos da reflectância, sejam devidos à pintura da esfera e da placa de mesma pintura da esfera utilizadas neste trabalho e/ou ao método empregado (uma esfera) enquanto Goebel (1966) e por Grum e Luckey (1968) utilizaram o método de dupla esfera. Budde (1976) cita o método da dupla esfera como sendo o que proporciona maiores valores de reflectância absoluta. Além disso a ASTM (1986b) afirma, em seu método para calibração de padrões de reflectância, que pinturas podem variar e não serem adequadas para produzir a máxima reflectância.

b) Reflectância absoluta 30°/d de amostras de BaSO₄

Os valores de reflectância espectral absoluta 30°/d do alvo de referência do REFSPEC IIA, obtidos com o método de Perdiz (1990) e com o método de Taylor (1920), são representados graficamente na Figura 5.6. Analisando estes resultados observa-se:

- 1) Os valores obtidos são bem próximos.
- 2) Nos valores obtidos por ambos os métodos existem variações de cerca de 2,1% para o método de Perdiz (1990) e de cerca de 2,6% para o método de Taylor (1920), entre o maior e o menor valor de reflectância absoluta calculados.
- 3) A reflectância absoluta média obtida pela formulação de Taylor (1920) é maior que a obtida com a formulação de Perdiz (1990).

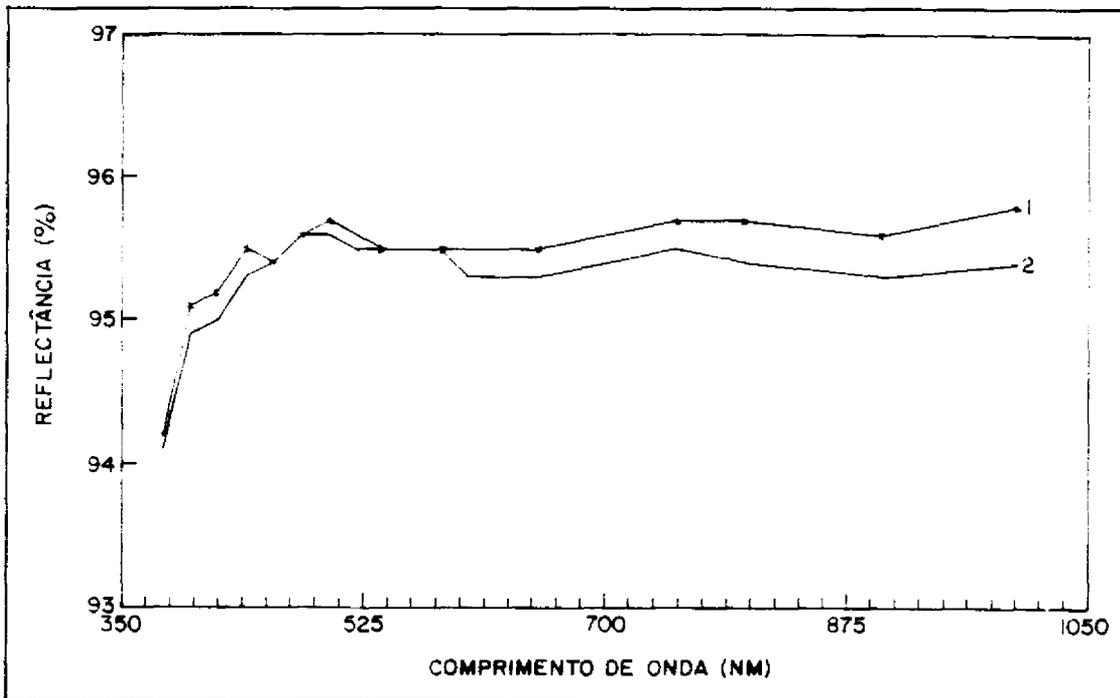


Fig. 5.6 - Reflectância espectral absoluta 30°/d do alvo de referência do REFSPEC IIA: 1- método de Taylor (1920) e 2- método de Perdiz (1990).

A Tabela 5.6 e a Figura 5.7 permitem comparar os valores da reflectância espectral absoluta do alvo de referência do REFSPEC IIA, obtidos com os métodos de Perdiz (1990) e Taylor (1920) neste trabalho, e os valores obtidos por Grum e Wigthmann (1977), referentes a materiais "Eastman White Reflectance Standards" da

Eastman Kodak Company Research Laboratories. Analisando os resultados observa-se:

- 1) Os valores obtidos por Grum e Wightman (1977), são maiores que os obtidos neste trabalho.
- 2) Os valores obtidos neste trabalho são quase tão estáveis quanto os de Grum e Wightmann (1977).

TABELA 5.6 - COMPARAÇÃO DA REFLECTÂNCIA ESPECTRAL ABSOLUTA DE PLACAS DE SULFATO DE BÁRIO (MÉTODOS: PERDIZ, TAYLOR E GRUM E WIGHTMAN)

Comprimento de onda (nm)	$\rho_{30^\circ/d}$ (%) da amostra		$\rho_{0^\circ/d}$
	Perdiz	Taylor	Grum e Wightman
380	94,1	94,2	98,4
400	94,9	95,1	98,7
420	95,0	95,2	98,9
440	95,3	95,5	99,0
460	95,4	95,4	99,1
480	95,6	95,6	99,1
500	95,6	95,7	99,1
520	95,5	95,6	99,1
540	95,5	95,5	99,1
560	95,5	95,5	99,2
580	95,5	95,5	99,2
600	95,3	95,5	99,2
650	95,3	95,5	99,2
700	95,4	95,6	99,2
750	95,5	95,7	99,2
800	95,4	95,7	99,2
900	95,3	95,6	99,0
1000	95,4	95,8	98,6

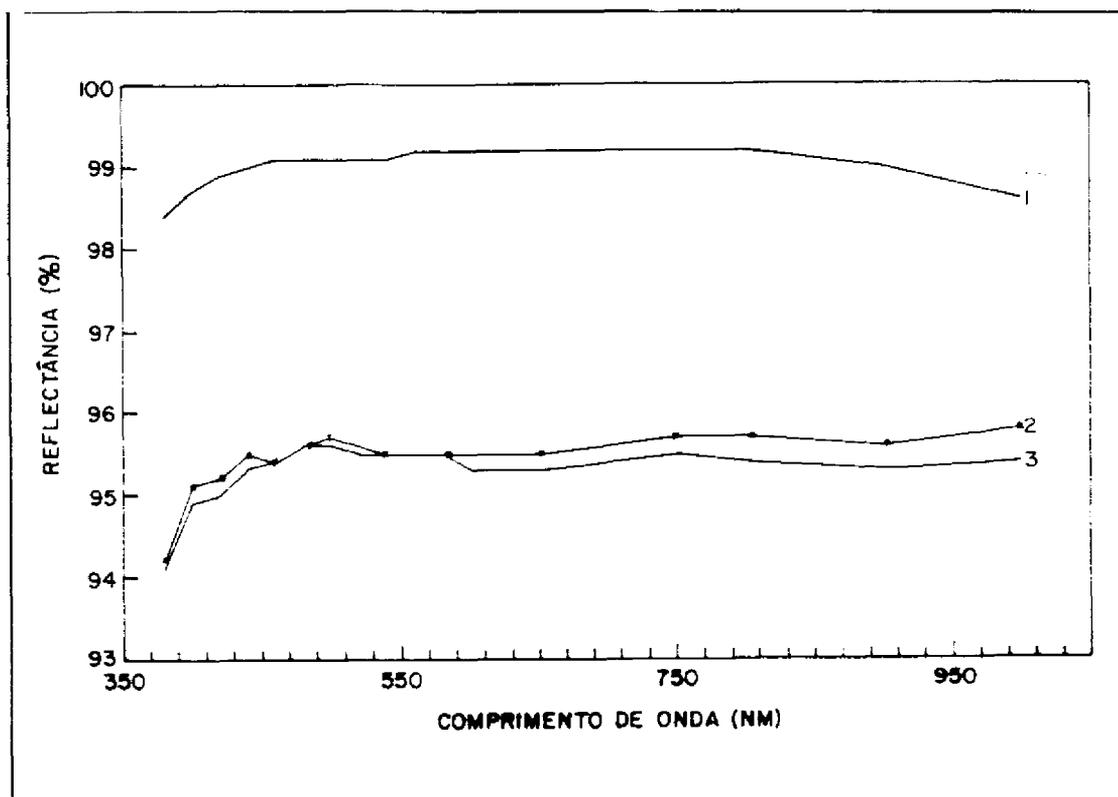


Fig. 5.7 - Reflectância espectral absoluta de placas de BaSO_4 :
 1- calculada ($0^\circ/d$) por Grum e Wightman (1977),
 2- calculada ($30^\circ/d$) com o Método de Taylor (1920) e
 3- calculada ($30^\circ/d$) com o Método de Perdiz (1990).

5.2.1.3 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Analisando os resultados obtidos neste trabalho nas duas geometrias, d/d e $30^\circ/d$, é importante ressaltar que os valores da reflectância $30^\circ/d$ são mais estáveis que os da reflectância d/d , sendo, portanto, esta a geometria mais adequada para ser utilizada na calibração de padrões de referência.

As discrepâncias entre os valores de reflectância obtidos e aqueles expressos por outros autores, utilizados como comparação se devem a outros fatores como: a diferença na preparação da tinta utilizada e forma de pintura (ASTM, 1986a); o grau de pureza do sulfato de bário; o acabamento (mais ou menos áspero) da esfera e da amostra; o tamanho dos grãos do pó de sulfato de bário (Grum e Luckey, 1968); e a utilização de métodos que possibilitam uma melhor relação sinal/ruído, como o usado pelo NBS (dupla esfera).

5.2.2 - CALIBRAÇÃO DE PLACAS DE REFERÊNCIA

5.2.2.1 - RESULTADOS DA CALIBRAÇÃO DE PLACAS DE REFERÊNCIA

Como foi exposto as placas de referência podem ter diferentes valores de reflectância. Isto foi verificado através da medição da radiância de cinco placas de referência (Figura 5.8) com o espectrorradiômetro SPECTRON SE590. Estas placas são comumente utilizadas pelos laboratórios de radiometria do INPE e do IAE.

As placas utilizadas foram:

- 1) Placa SRT-50-050 do Labsphere, Inc (SRT-50).
- 2) Placa pintada confeccionada pelo INPE (PIPE).
- 3) Placa prensada confeccionada pelo IAE (PRAE).
- 4) Placa prensada confeccionada pelo INPE (PRPE).
- 5) Placa pintada pela Barringer, que acompanha o REFSPEC IIA (PIAE).

As placas PRPE, PRAE, PIPE e SRT-50 foram calibradas em relação ao alvo de referência do REFSPEC IIA (PIAE), cuja reflectância espectral absoluta foi obtida com o método da esfera integradora. O FRB de uma folha de cartolina foi obtido em relação a estas placas (Tabela 5.7 e Figura 5.9) comprovando-se a necessidade de calibrá-las.

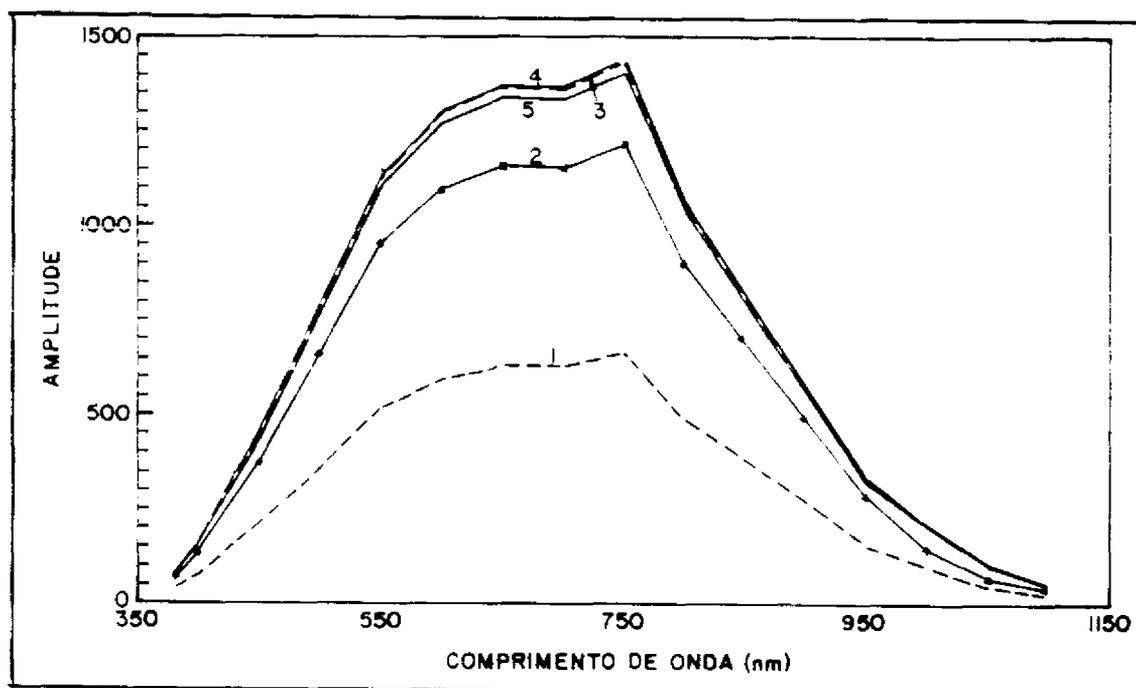


Fig. 5.8 - Radiância de cinco placas de referência: 1- SRT-050, 2- PIPE, 3- PRAE, 4- PRPE e 5- PIAE.

TABELA 5.7 - FRBs DE UMA FOLHA DE CARTOLINA OBTIDOS EM RELAÇÃO A QUATRO DIFERENTES PLACAS DE REFERÊNCIA

Comprimento de onda (nm)	FRB (%)			
	PIPE	PRAE	PRPE	SRT-50
381,4	10,3	7,9	7,5	17,5
399,5	8,3	6,5	6,9	14,1
449,8	13,7	11,2	11,1	24,5
500,0	31,0	25,2	25,3	55,0
550,4	14,0	11,5	11,5	25,0
599,7	6,2	5,2	5,2	11,2
649,6	6,5	5,4	5,5	11,8
699,6	7,9	6,5	6,6	14,2
750,1	20,7	16,9	17,0	36,2
798,3	39,7	32,4	32,6	69,3
848,3	65,7	53,9	53,8	114,0
899,6	75,8	61,9	61,7	132,0
950,1	77,5	62,8	63,3	133,0
1000,4	73,0	58,2	59,8	125,0
1050,8	53,0	42,7	42,8	89,7
1098,0	33,3	26,4	26,9	62,5

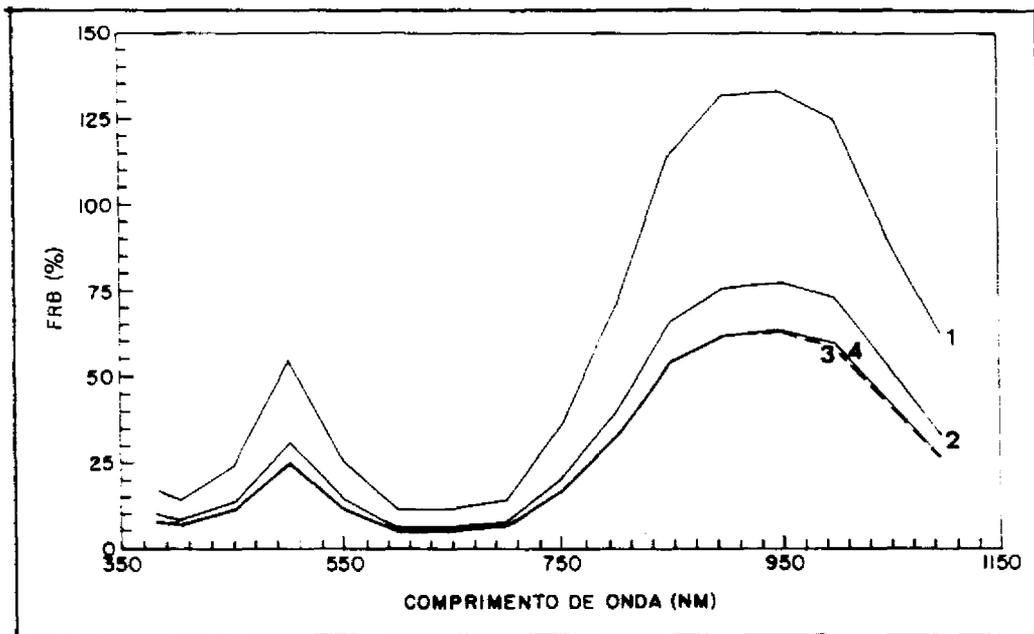


Fig. 5.9 - FRBs de uma folha de cartolina obtidos em relação a placas de referência não calibradas: 1- SRT-050, 2- PIPE, 3- PRAE e 4- PRPE.

A Tabela 5.8 e a Figura 5.10 apresentam a reflectância relativa, obtida com o método de calibração em relação ao padrão pintado do REFSPEC IIA (PIAE), das placas de referência acima citadas que devem ser empregados para a correção do FRB da cartolina.

TABELA 5.8 - REFLECTÂNCIA RELATIVA DE QUATRO PLACAS DE REFERÊNCIA

Comprimento de onda (nm)	REFLECTÂNCIAS RELATIVAS (%)			
	PIPE	PRAE	PRPE	SRT-50
381,4	81,6	99,0	99,0	45,3
399,5	81,1	98,2	98,4	45,2
449,8	81,7	98,5	98,5	44,9
500,0	82,1	97,9	98,3	44,7
550,4	82,4	97,5	97,9	44,6
599,7	82,4	97,2	97,7	44,6
649,6	82,4	97,3	97,7	44,7
699,6	82,4	97,2	97,8	44,9
750,1	82,6	97,4	98,1	45,2
798,3	82,5	97,5	98,2	45,2
848,3	82,4	97,4	98,0	45,3
899,6	82,4	97,4	98,0	45,6
950,1	82,3	97,7	98,0	46,6
1000,4	81,9	97,2	98,2	45,7
1050,8	81,6	98,2	98,4	45,0
1098,0	80,0	96,9	97,0	44,2

O FRB da folha de cartolina foi recalculado considerando não apenas a relação entre os valores de radiância do alvo e o da referência, mas também a reflectância relativa da placa de referência utilizada (Tabela 5.9 e Figura 5.11).

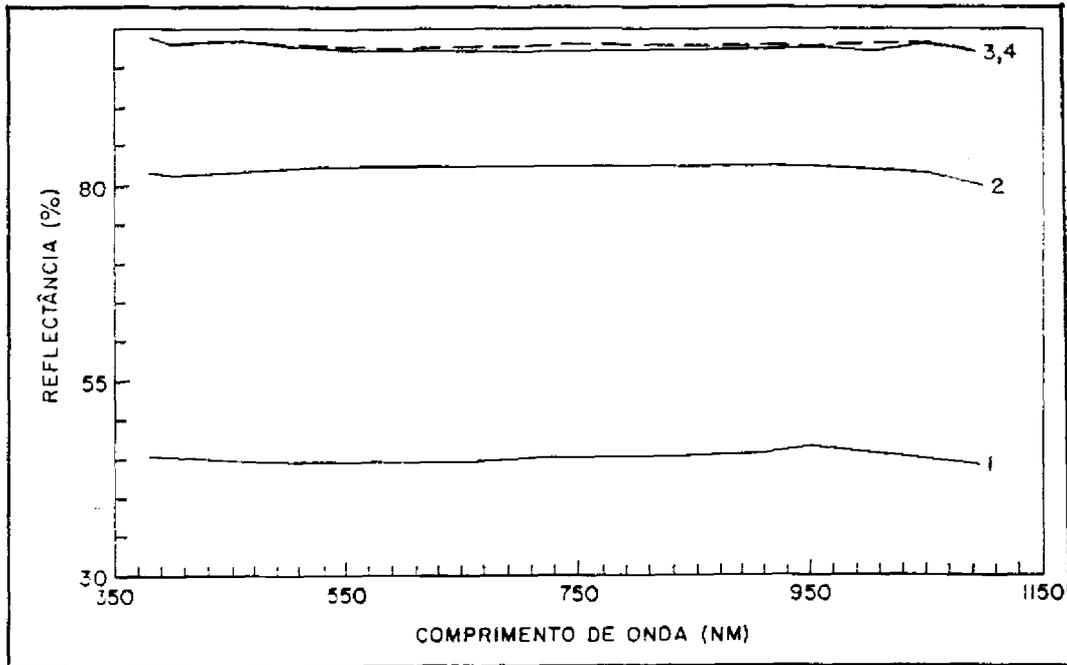


Fig. 5.10 - Reflectância relativa das placas de referência calibradas:
1- SRT-050, 2- PIPE, 3- PRAE e 4- PRPE.

TABELA 5.9 - FRBs DA FOLHA DE CARTOLINA UTILIZANDO-SE PLACAS DE REFERÊNCIA CALIBRADAS

Comprimento de onda (nm)	FRB (%)			
	PIPE	PRAE	PRPE	SRT-50
381,4	8,4	7,8	7,4	7,9
399,5	6,7	6,4	6,8	6,4
449,8	11,2	11,0	10,9	11,0
500,0	25,4	24,7	24,9	24,6
550,4	11,5	11,2	11,3	11,2
599,7	5,10	5,10	5,10	5,00
649,6	5,40	5,30	5,40	5,30
699,6	6,50	6,30	6,40	6,40
750,1	17,1	16,5	16,7	16,4
798,3	32,8	31,6	32,0	31,3
848,3	54,1	52,5	52,7	51,7
899,6	62,5	60,3	60,5	60,2
950,1	63,8	61,4	62,0	62,1
1000,4	59,9	56,6	58,7	57,3
1050,8	43,2	41,9	42,1	40,4
1098,0	27,0	25,6	26,1	27,6

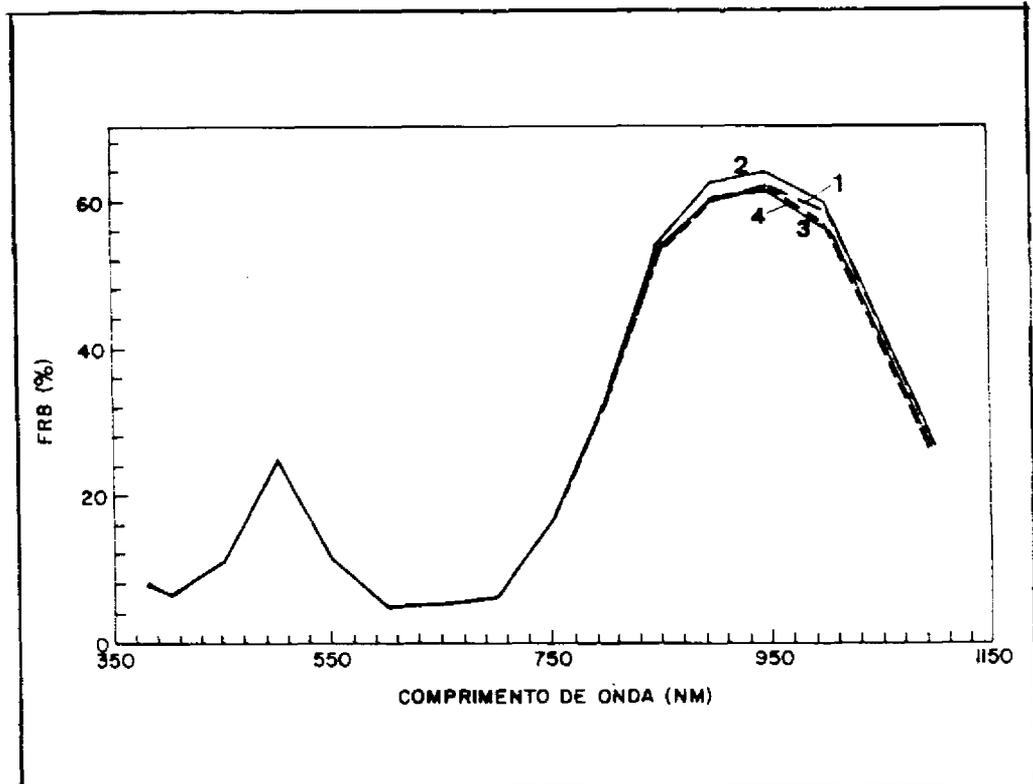


Fig. 5.11 - FRBs de uma folha de cartolina utilizando-se placas de referência calibradas: 1- SRT-050, 2- PIPE, 3- PRAE e 4- PRPE.

5.2.2.2 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Para várias aplicações em sensoriamento remoto é necessário conhecer o FRB dos alvos de interesse. O FRB é determinado pela referenciação a um padrão de reflectância calibrado. Usualmente utiliza-se como padrão uma placa pintada ou prensada com sulfato de bário. Para determinar o FRB exato de um alvo o padrão deve ser calibrado em relação a um padrão de reflectância primário.

Um padrão de reflectância "primário" é um refletor lambertiano que reflete toda radiação incidente ($\rho = 1$) de modo perfeitamente difuso, ou seja, sua radiância é constante em todas as direções. Este conceito teórico provavelmente nunca será realizado materialmente, mas as técnicas para medição de reflectância absoluta fornecem a calibração dos padrões relativos tornando-os padrões primários (Budde, 1976).

Os métodos de Perdiz (1990) e Taylor (1920) com uma esfera integradora foram empregados neste trabalho para a obtenção de um padrão de reflectância primário. Tal padrão foi utilizado para a

calibração de outros padrões, de acordo com os procedimentos de calibração descritos por Robinson e Biehl (1979) para medidas de fator de reflectância.

Do mesmo modo, Bunnik (1978) calibrou vários padrões de referência para serem usados no campo, com um padrão primário de reflectância conhecida. De igual maneira, Milton (1989) em sua nota técnica sobre a conveniência de utilizar cartões de teste neutros da Kodak, calibrou os cartões contra um padrão primário no United Kingdom National Physical Laboratory.

Os erros introduzidos nos resultados do FRB da folha de cartolina são eliminados entre 350 e 850 nm, através da utilização de placas calibradas como alvos de referência. Entre 900 e 1100 nm os resultados são ligeiramente diferentes devido a imprecisões do espectrorradiômetro SPECTRON SE590 nesta faixa espectral, o qual foi usado para obter o FRB da cartolina.

Os resultados obtidos permitem concluir que a calibração das placas de referência em relação a um padrão primário é necessária e proporciona uma diminuição substancial do erro introduzido no FRB, conforme demonstrado pela comparação das Figuras 5.9 e 5.11.

5.2.3 - CALIBRAÇÃO DE RADIÔMETROS

5.2.3.1 - CALIBRAÇÃO DO ESPECTRORRADIÔMETRO OPTRONIC 740A

A Figura 5.12 apresenta os valores nominais de uma lâmpada padrão (S-709) fornecida ao INPE pelo "Optronic Laboratories" para calibração do OPTRONIC 740A.

Medindo a irradiância do padrão com o espectrorradiômetro Optronic 740A, obtiveram-se os valores de corrente (A) mostrados na Figura 5.13.

O Fator de Calibração do OPTRONIC 740A é obtido da razão entre os valores de irradiância da lâmpada padrão e os valores de corrente medida pelo espectrorradiômetro (Tabela 5.10 e Figura 5.14).

Embora se dispusesse da lâmpada S-575, deixou-se de utilizá-la como padrão de calibração de espectrorradiômetro por ter ultrapassado 50 horas de utilização. Entretanto como sua irradiância (Figura 5.15) fosse conhecida, foi utilizada como exemplo de emprego do Fator de Calibração obtido para o OPTRONIC 740A.

Os valores medidos com o OPTRONIC 740A da irradiância do padrão S-575, são apresentados na Figura 5.16.

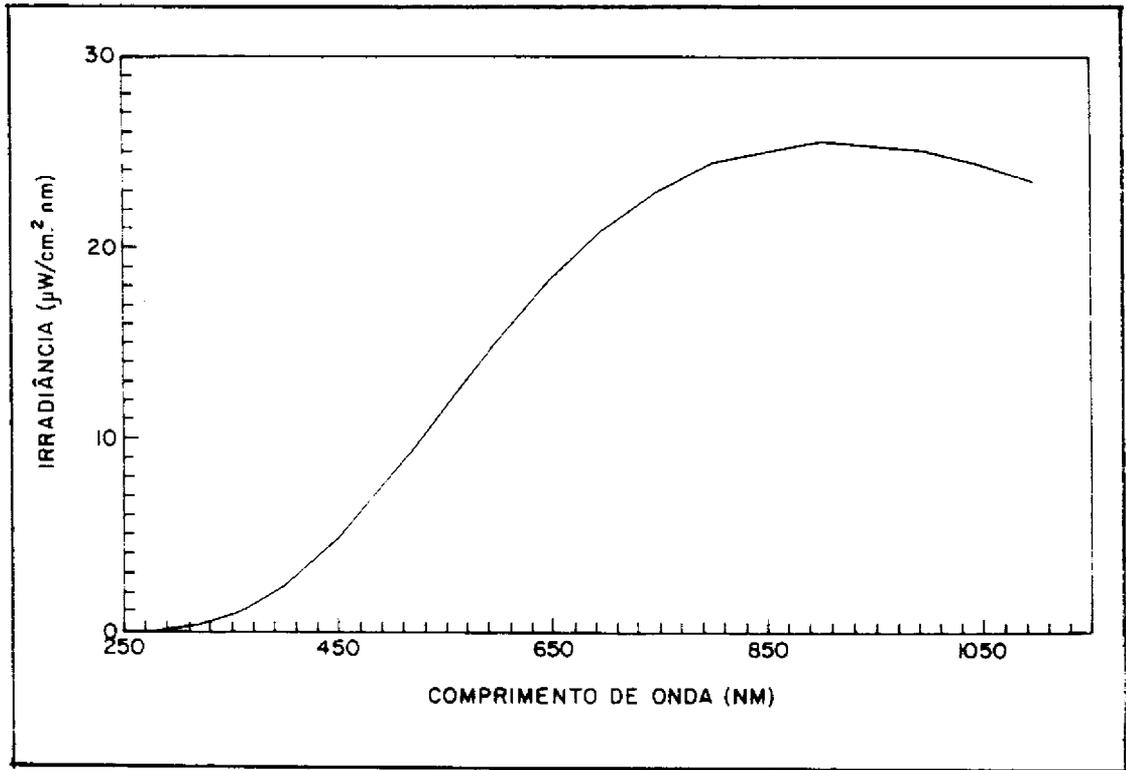


Fig. 5.12 - Irradiância nominal da lâmpada padrão S-709.

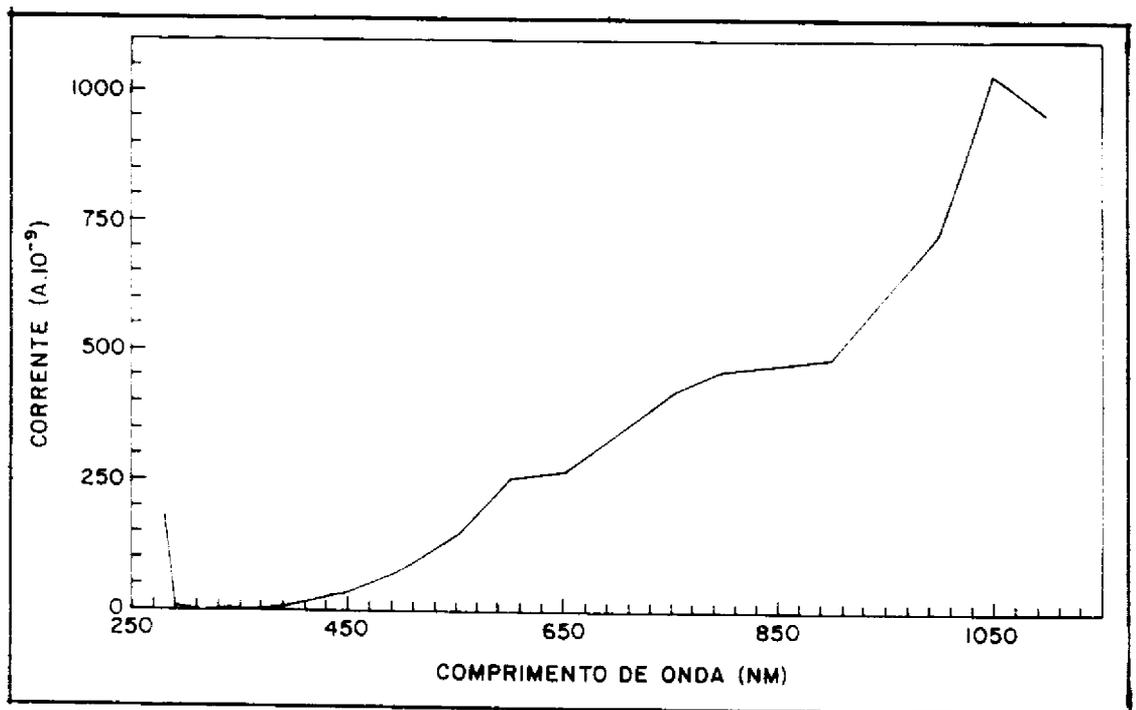


Fig. 5.13 - Irradiância medida da lâmpada padrão S-709.

TABELA 5.10 - FATOR DE CALIBRAÇÃO DO OPTRONIC 740A

Comprimento de onda (nm)	Fator de Calibração (W/cm ² nmA)	Comprimento de onda (nm)	Fator de Calibração (W/cm ² nmA)
280	0,50	550	80,58
290	19,47	555	77,29
300	53,43	600	60,20
310	122,47	650	69,17
320	158,66	700	61,38
330	151,37	750	55,42
340	113,15	800	53,12
350	407,77	900	52,73
370	311,23	1000	34,41
400	216,35	1050	23,53
450	142,01	1100	24,52
500	102,17	----	----

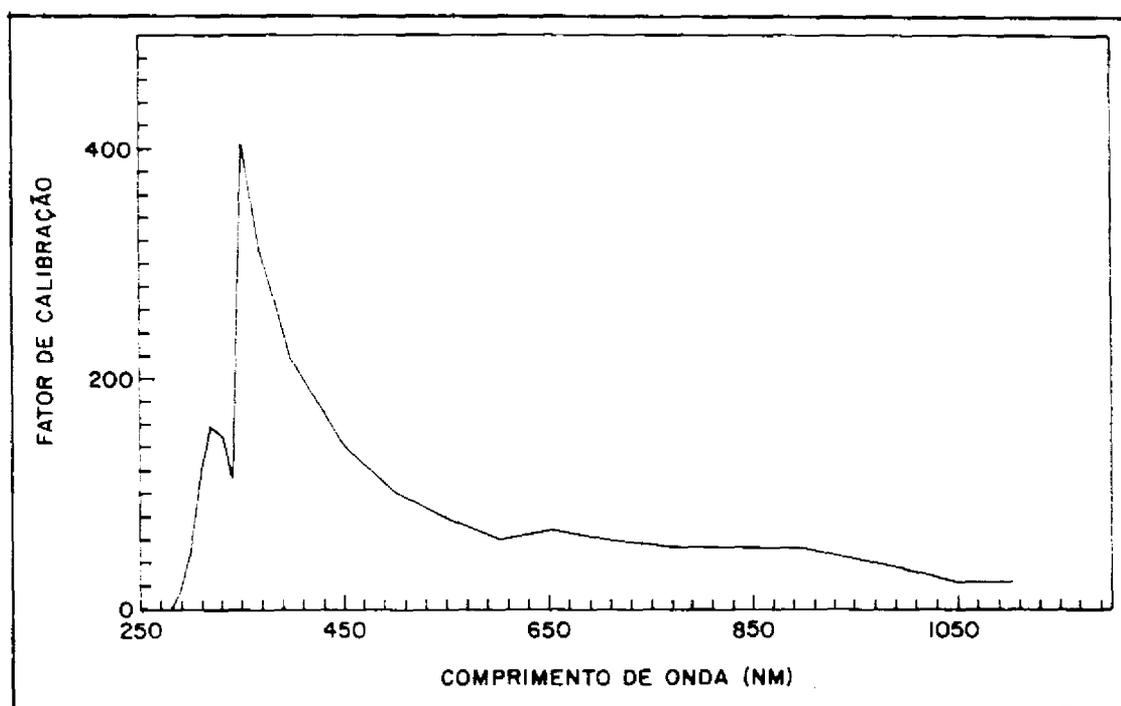


Fig. 5.14 - Fator de Calibração do OPTRONIC 740A.

Utilizando o Fator de Calibração do OPTRONIC 740A para corrigir as medidas da lâmpada padrão S-575, obtém-se um resultado bem próximo do fornecido pelo fabricante, conforme mostrado na Figura 5.17 e na Tabela 5.11. O resultado não é melhor devido ao desgaste da lâmpada pelo uso prolongado.

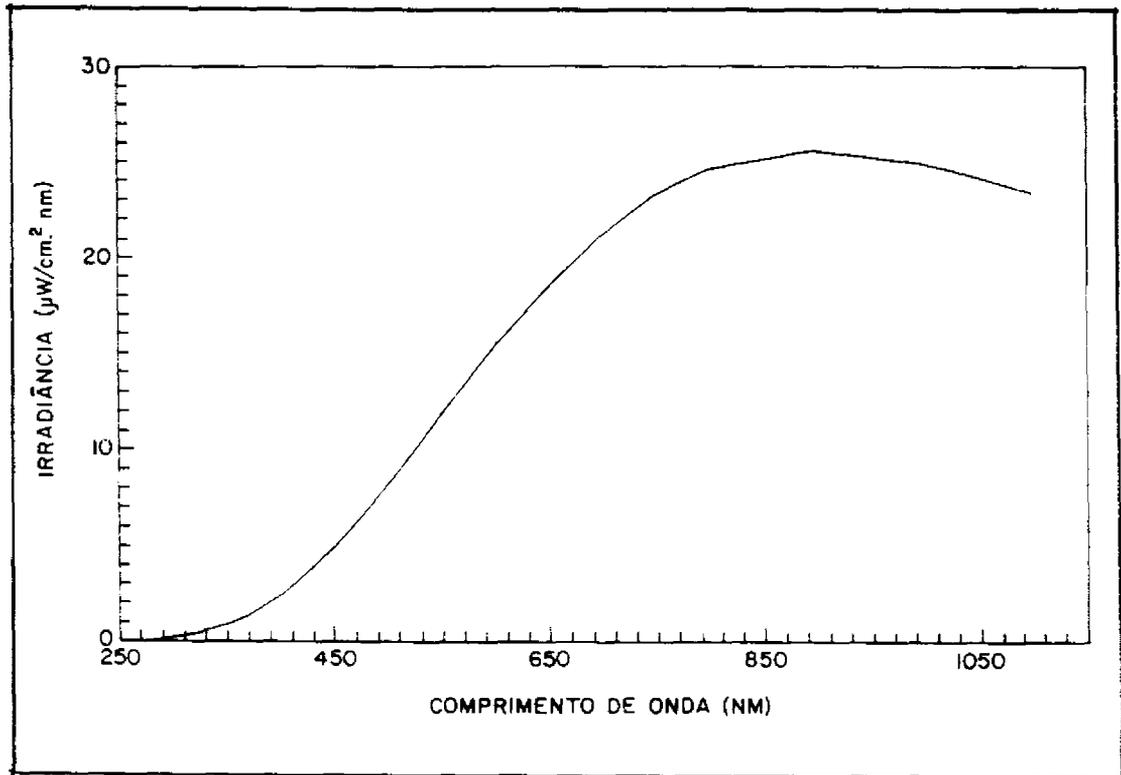


Fig. 5.15 - Irradiância nominal da lâmpada padrão S-575.

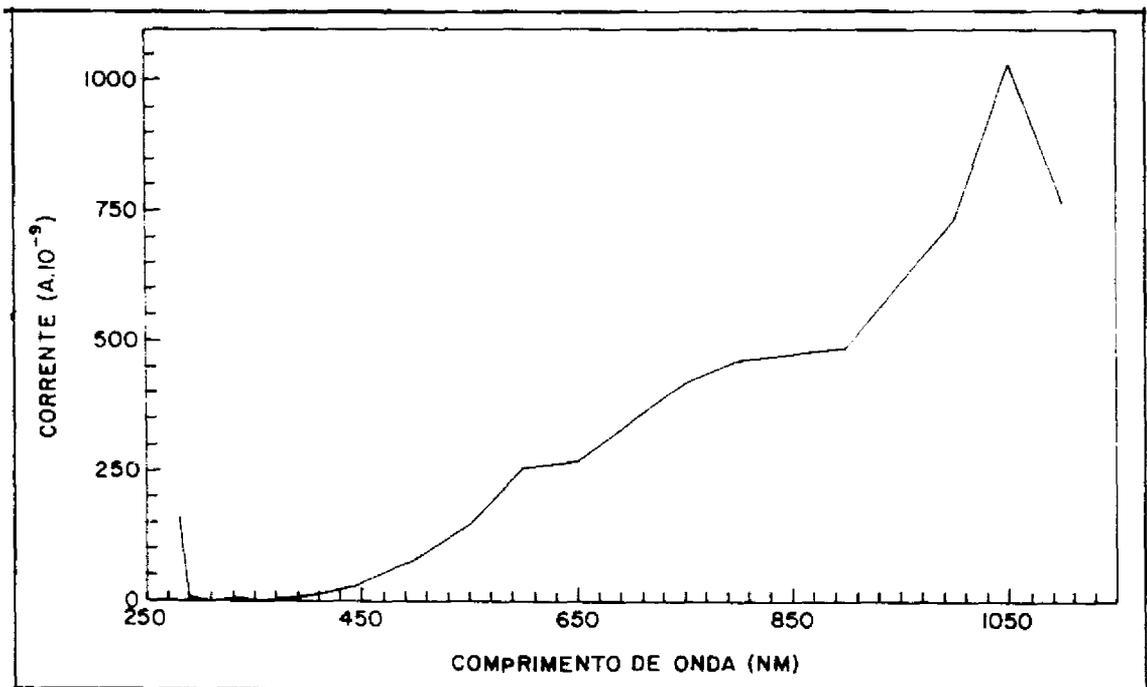


Fig. 5.16 - Irradiância medida da lâmpada padrão S-575.

TABELA 5.11 - COMPARAÇÃO DA IRRADIÂNCIA DO PADRÃO S-575 (A) COM A IRRADIÂNCIA CORRIGIDA (B) MEDIDA COM O OPTRONIC 740A

Comprimento de onda (nm)	Irradiância (A) ($\mu\text{W}/\text{cm}^2\text{nm}$)	Comprimento de onda (nm)	Irradiância (B) ($\mu\text{W}/\text{cm}^2\text{nm}$)	Erro (%)
280	0,0713	280	0,0790	9,7000
290	0,1420	290	0,1430	0,6000
300	0,2060	300	0,2050	0,5000
310	0,3000	310	0,2870	4,3000
320	0,4010	320	0,3910	2,5000
330	0,5500	330	0,5200	5,4000
340	0,7000	340	0,6700	4,3000
350	0,9000	350	0,8680	3,6000
370	1,3800	370	1,3840	0,3000
400	2,4400	400	2,4120	1,1000
450	4,9500	450	4,9100	0,8000
500	8,2100	500	8,1700	0,5000
550	11,8000	550	11,7400	0,5000
555	12,3000	555	12,0730	1,8000
600	15,4000	600	15,3500	0,3000
650	18,5000	650	18,5400	0,2000
700	21,2000	700	21,2370	0,2000
750	23,3000	750	23,1700	0,6000
800	24,6000	800	24,4800	0,5000
900	25,6000	900	25,6500	0,2000
1000	24,9000	950	25,1880	1,1000
1050	24,2000	1000	24,4000	0,8000
1100	23,4000	1100	23,7000	1,3000

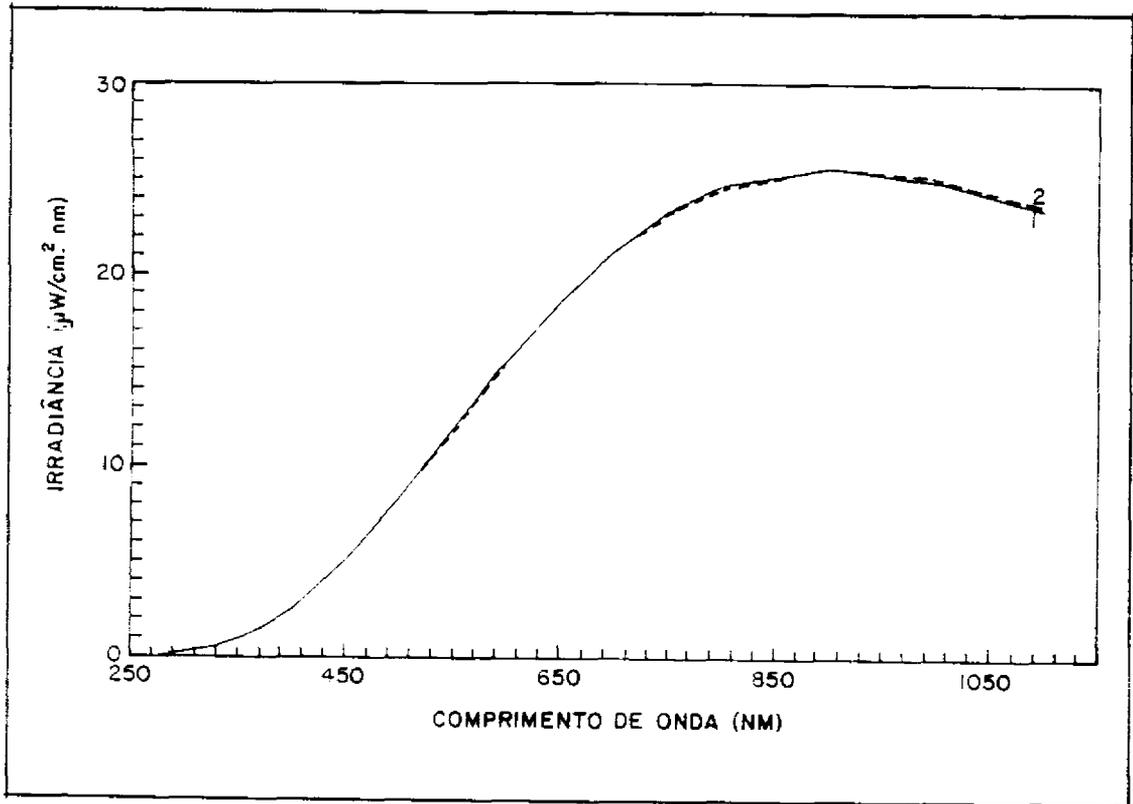


Fig. 5.17 - Irradiância da lâmpada padrão S-575: 1- nominal e 2- corrigida.

5.2.3.2 - CALIBRAÇÃO DO ESPECTRORRADIÔMETRO REFSPEC IIA

A Figura 5.18 apresenta os testes de calibração executados no campo. Observa-se que na região entre 2350 e 2450 nm os valores do FRR de um padrão de referência foram sendo corrigidos até atingir 100%. A partir daí (Figura 5.19) o radiômetro ficou calibrado, podendo ser utilizado na obtenção do FRR e FRB.

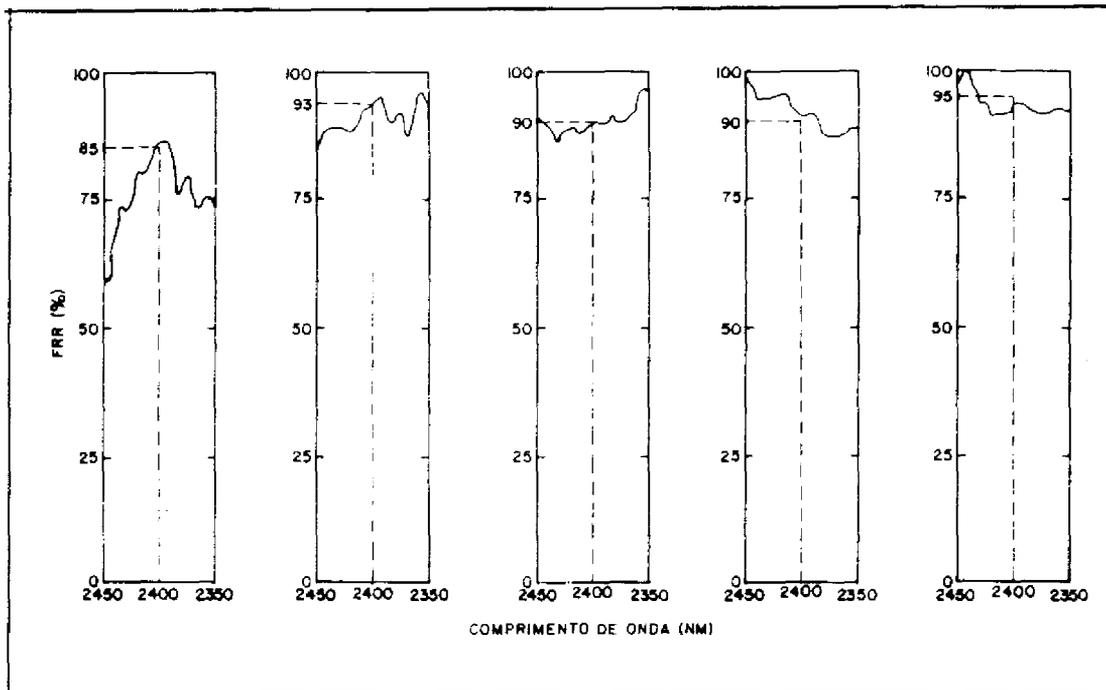


Fig. 5.18 - Testes de calibração do REFSPEC IIA no campo.

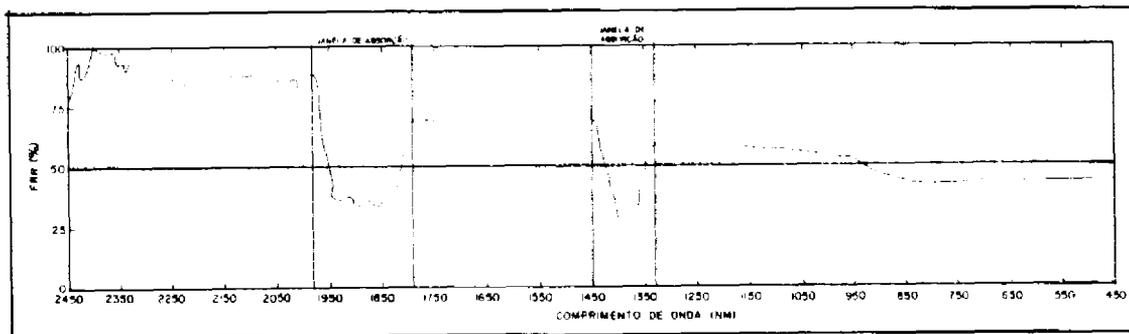


Fig. 5.19 - Calibração do REFSPEC IIA no campo.

A aferição foi efetuada em relação à curva do padrão de sulfato de bário pintado fornecido pelo fabricante (Figura 4.23). Do mesmo modo que para a calibração com vários testes são executados para a obtenção do FRR no valor de 100%, na região compreendida entre 2350 e 2450 nm do mesmo. A Figura 5.20 comprova que o processo de aferição foi satisfeito conforme recomendação do fabricante.

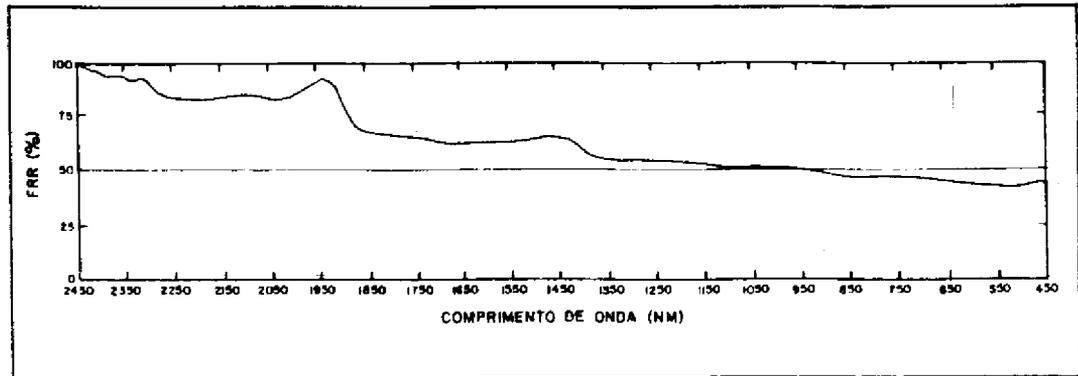


Fig. 5.20 - Espectro obtido na aferição do REFSPEC IIA em laboratório.

5.2.3.3 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Radiômetros são normalmente utilizados para obter dados espectrais para uso em sensoriamento remoto em diversas áreas de pesquisas. Na maioria das vezes estes radiômetros são empregados na obtenção do FRB ou do FRR (REFSPEC IIA).

Contudo, para alguns propósitos é necessário utilizar medidas absolutas como a irradiância e a radiância refletida pelos alvos e não o FRB dos alvos. Por exemplo, o cálculo da quantidade líquida de radiação absorvida pelo dossel de uma planta pode ser efetuado se a irradiância e a radiância refletida pelo dossel forem conhecidas. Outro exemplo de medida de uma grandeza absoluta são as coletadas pelos radiômetros imageadores. Guenther (1987) descreve a calibração do "Advance Solid-State Array Spectrometer" e Slater (1984), a calibração absoluta dos sensores "High Resolution Visible" (HRV) e Thematic Mapper (TM). Para empregar os radiômetros deste modo, o fator de calibração absoluto do radiômetro deve ser conhecido (Jackson e Slater, 1986).

a) Calibração para medidas de grandezas absolutas

A calibração dos radiômetros pode ser efetuada do modo expresso neste trabalho com uma lâmpada padrão em laboratório (Milton, 1987) utilizando-se medidas de irradiância conforme o procedimento descrito por Jackson et al. (1988) e com esfera integradora de acordo com o procedimento adotado por Chrien et al. (1990).

Como resultado importante, este trabalho apresenta o fator de calibração do OPTRONIC 740A que deve ser usado nas medições de grandezas absolutas. Sua comprovação é demonstrada na correção das medidas efetuadas com o espectrorradiômetro OPTRONIC 740A de uma lâmpada padrão com irradiância conhecida.

Além de buscar a exatidão das medidas de grandezas absolutas, o procedimento aqui demonstrado permite calibrar outras lâmpadas que não tenham certificado de calibração. Este procedimento é impreciso para comprimentos de onda inferiores a 400 nm, chegando a ter incertezas da ordem de 10% (Guenther, 1987), conforme demonstrado na Tabela 5.11 para 280 nm.

É importante ainda saber que as lâmpadas halógenas de quartzo calibradas pelo NBS têm incertezas de 1,5 a 5,0%, enquanto as lâmpadas com filamento de tungstênio têm incertezas em torno de 4% (Wyatt, 1978). Por esta razão, a calibração dos espectrorradiômetros não é melhor que 5 a 6%, ocorrendo, segundo Guenther (1987) casos de até 10% de incerteza.

b) Calibração para medidas do FRR

A obtenção de um FRR correto condiciona-se à calibração do espectrorradiômetro REFSPEC IIA conforme demonstrado pela Figura 5.18. Neste caso observa-se que para a mesma placa de referência e mesmo comprimento de onda (2400 nm), os valores de FRR obtidos em quatro dos cinco testes realizados são diferentes: 85%, 93%, 90%, 90% e 95%. O mesmo ocorre para a utilização do REFSPEC IIA em laboratório.

Por isto é necessário efetuar a calibração e a aferição do REFSPEC IIA, pois os erros introduzidos no FRR serão bem menores. Além disso, é importante lembrar que a cada campanha de medição se faz necessária uma nova calibração ou aferição.

5.2.4 - INTERCALIBRAÇÃO DE RADIÔMETROS

Neste tópico demonstra-se através dos resultados expressos em gráficos e tabelas, a necessidade da intercalibração dos radiômetros por ocasião das medidas no laboratório e no campo.

5.2.4.1 - INTERCALIBRAÇÃO NO CAMPO

A necessidade de intercalibrar radiômetros para medidas de campo do FRB é demonstrada através de um alvo de concreto. O procedimento de Substituição (uma unidade de leitura), por ser mais confiável (não exige intercalibração), serviu de base na verificação dos resultados obtidos com o procedimento de chaveamento (duas unidades de leitura). No FRB obtido inicialmente com o procedimento de Chaveamento (Figura 5.21), não foi empregado o Fator de intercalibração de radiômetros para o campo (F_{iC}). Após o cálculo do F_{iC} corrigiu-se o FRB.

Analisando a Figura 5.21 observa-se:

- 1) Os valores obtidos utilizando-se o método de chaveamento, sem a aplicação do Fator de Intercalibração para campo (F_{ic}), são mais instáveis que os obtidos com o método de Substituição.
- 2) Como o alvo medido é o mesmo, os resultados esperados do FRB deveriam ser semelhantes para os dois procedimentos. Isto não ocorre devido à não utilização do Fator de intercalibração na correção do FRB.
- 3) Considerando o FRB do concreto obtido pelo procedimento de substituição como correto, a não utilização do Fator de intercalibração no procedimento de chaveamento no campo provoca erros da ordem de até 13% (750 nm).

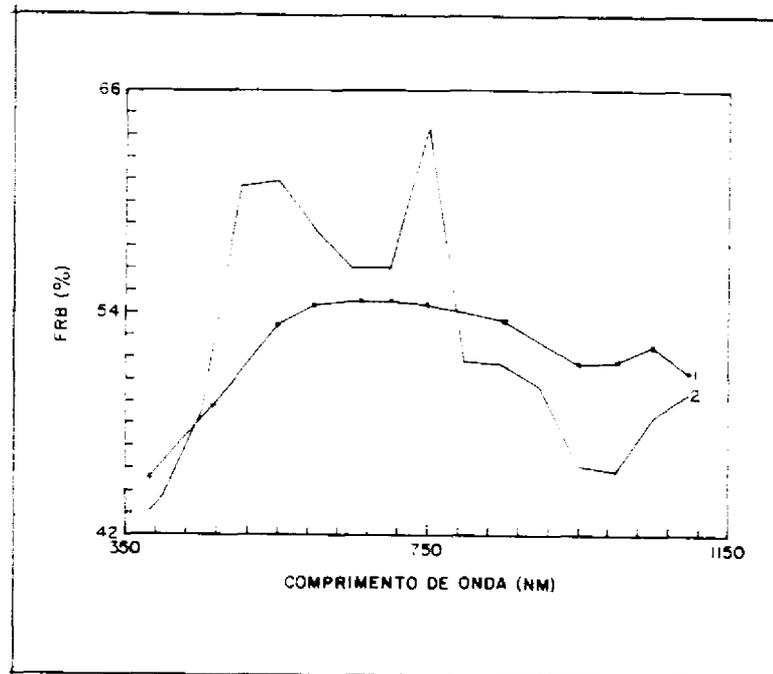


Fig. 5.21 - Representação gráfica do FRB do concreto: 1- procedimento de substituição e 2- procedimento de chaveamento sem intercalibração.

Para corrigir o erro introduzido no FRB do concreto pela não intercalibração dos radiômetros, calcula-se o F_{ic} (Figura 5.22). O F_{ic} é aplicado ao FRB do concreto obtido através do procedimento de chaveamento.

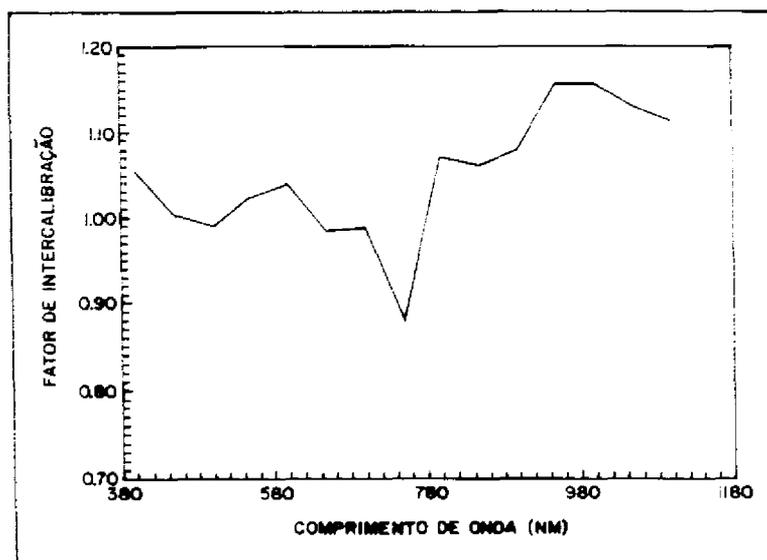


Fig. 5.22 - Representação gráfica do F_{ic} .

A importância deste processo é mostrada na Figura 5.23. Observa-se que o FRB do concreto obtido com o procedimento de chaveamento, após sua correção (Tabela 5.12), melhorou sensivelmente. O erro máximo observado entre os valores é da ordem de 1,9%, quando comparado ao FRB obtido com procedimento de substituição.

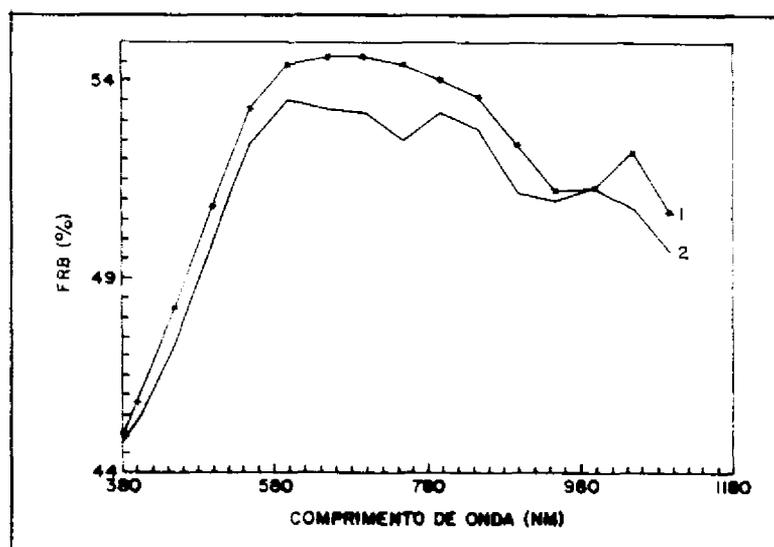


Fig 5.23 - Representação gráfica do FRB do concreto: 1- procedimento de substituição e 2- procedimento de chaveamento corrigido com o F_{ic} .

TABELA 5.12 - COMPARAÇÃO DO FRB DO CONCRETO OBTIDO COM OS PROCEDIMENTOS DE SUBSTITUIÇÃO E CHAVEAMENTO COM INTERCALIBRAÇÃO DOS RADIÔMETROS.

Comprimento de onda (nm)	FRB (%)	
	SUBSTITUIÇÃO	CHAVEAMENTO
381,4	45,8	44,8
399,5	45,8	45,3
449,8	48,2	47,3
500,0	50,8	49,9
550,4	53,3	52,4
599,7	54,4	53,5
649,6	54,6	53,3
699,6	54,6	53,2
750,1	54,4	52,5
798,3	54,0	53,2
848,3	53,6	52,8
899,6	52,4	51,2
950,1	51,2	51,0
1000,4	51,3	51,3
1050,8	52,2	50,8
1098,0	50,7	49,7

5.2.4.2 - INTERCALIBRAÇÃO NO LABORATÓRIO

O FRB de um alvo de papelão foi utilizado para comprovação da necessidade de intercalibração de radiômetros em medidas de laboratório. O procedimento de substituição (uma unidade de leitura) também serviu de base para a comparação dos resultados obtidos com o procedimento de chaveamento (duas unidades de leitura).

Observa-se nas curvas representadas na Figura 5.24 que os valores obtidos com o método de chaveamento, sem a aplicação do Fator de intercalibração para laboratório (F_{il}), são mais elevados que os obtidos com o método de substituição. Como o alvo medido é o mesmo, os resultados do FRB deveriam ser semelhantes. Isto ocorre devido à não utilização do Fator de intercalibração na correção do FRB. Considerando o FRB do papelão obtido pelo procedimento de substituição como correto, a não utilização do Fator de intercalibração no procedimento de chaveamento provoca erros da ordem de até 22,4% no comprimento de onda de 1000,4 nm. O erro introduzido na maioria dos comprimentos de onda está em torno de 10%.

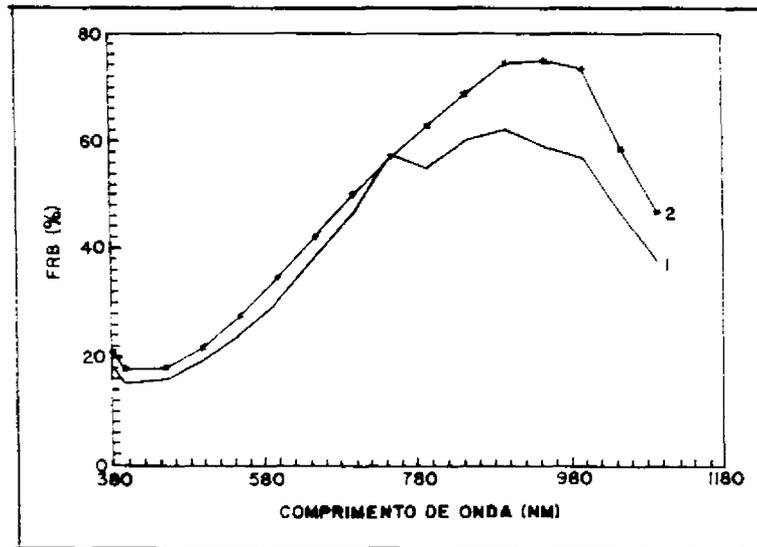


Fig. 5.24 - Representação gráfica do FRB do papelão: 1- procedimento de substituição e 2- procedimento de chaveamento sem intercalibração.

Para corrigir o erro introduzido no FRB do papelão pela não intercalibração dos radiômetros, calcula-se o F_{il} (Figura 5.25).

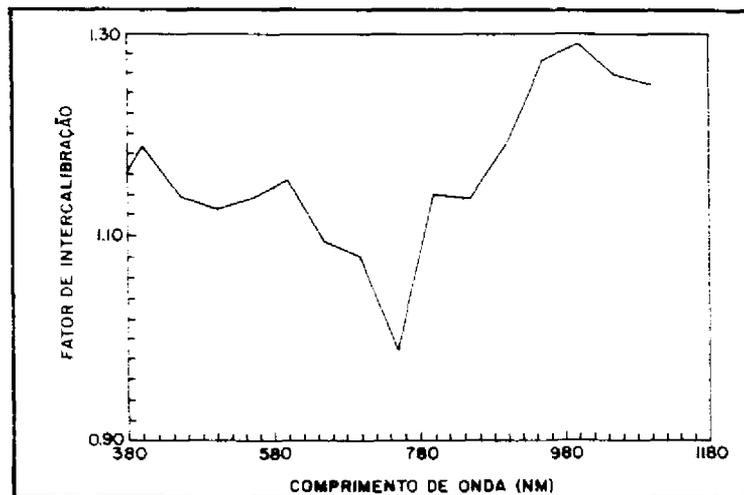


Fig. 5.25 - Representação gráfica do F_{il} .

O F_{il} é aplicado ao FRB do papelão obtido através do procedimento de chaveamento. A importância deste processo é apresentada na Figura 5.26. Observa-se que o FRB do papelão, obtido com o procedimento de chaveamento depois de corrigido (Tabela 5.13),

não apresenta diferença quando comparado ao FRB obtido com procedimento de Substituição.

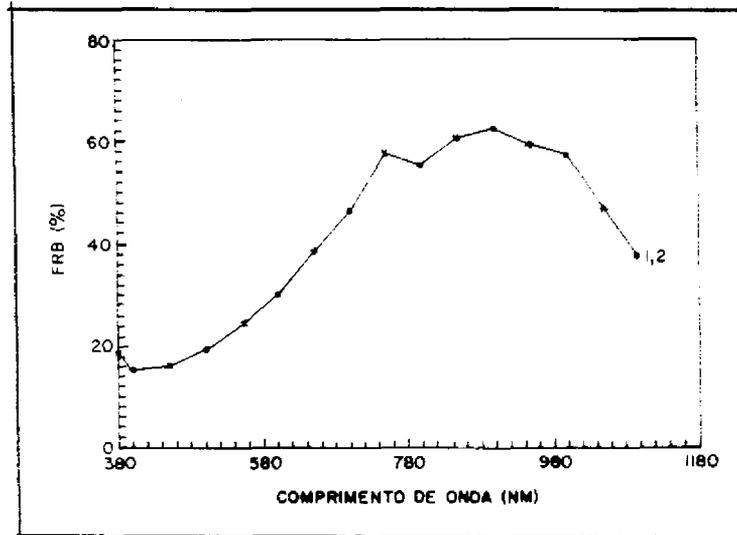


Fig. 5.26 - Representação gráfica do FRB do papelão: 1- procedimento de Substituição e 2- procedimento de chaveamento corrigido com o F_{il} .

TABELA 5.13 - COMPARAÇÃO DO FRB DO PAPELÃO OBTIDO COM OS PROCEDIMENTOS DE SUBSTITUIÇÃO E CHAVEAMENTO COM INTERCALIBRAÇÃO DOS RADIÔMETROS.

Comprimento de onda	FRB (%)	
	SUBSTITUIÇÃO	CHAVEAMENTO
381,4	18,6	18,6
399,5	15,3	15,2
449,8	16,1	16,1
500,0	19,5	19,5
550,4	24,4	24,5
599,7	30,0	30,0
649,6	38,5	38,5
699,6	46,3	46,3
750,1	57,5	57,5
798,3	55,1	55,1
848,3	60,3	60,4
899,6	62,3	62,4
950,1	59,0	58,9
1000,4	57,0	57,0
1050,8	46,5	46,5
1098,0	37,7	37,7

5.2.3.3 - APLICAÇÃO ERRÔNEA DO FATOR DE INTERCALIBRAÇÃO

O FRB de um alvo de papelão obtido em laboratório com o procedimento de chaveamento foi corrigido com o F_{ic} (Figura 5.27). Observou-se que a não utilização do Fator de intercalibração adequado introduz erros de até 16,8% no FRB no comprimento de onda de 1000,4 nm. O menor erro introduzido, cerca de 6,13%, ocorreu em 798,3 nm e nos demais comprimentos de onda o erro foi em torno de 10%.

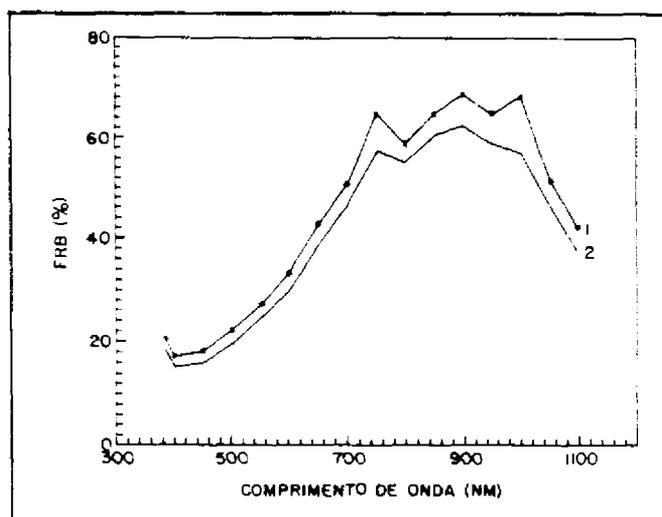


Fig 5.27 - Representação gráfica do FRB do papelão medido em laboratório: 1- corrigido com o F_{ic} e 2- corrigido com o F_{il} .

O FRB de um alvo de concreto obtido no campo com o procedimento de Chaveamento foi corrigido com o F_{il} (Figura 5.28). Observou-se que a não utilização do Fator de intercalibração adequado introduz erros de até 14,6% no FRB no comprimento de onda de 1050 nm. O menor erro introduzido é da ordem de 4,4% em 798,3 nm e nos demais comprimentos de onda a maioria dos erros está em torno de 10%.

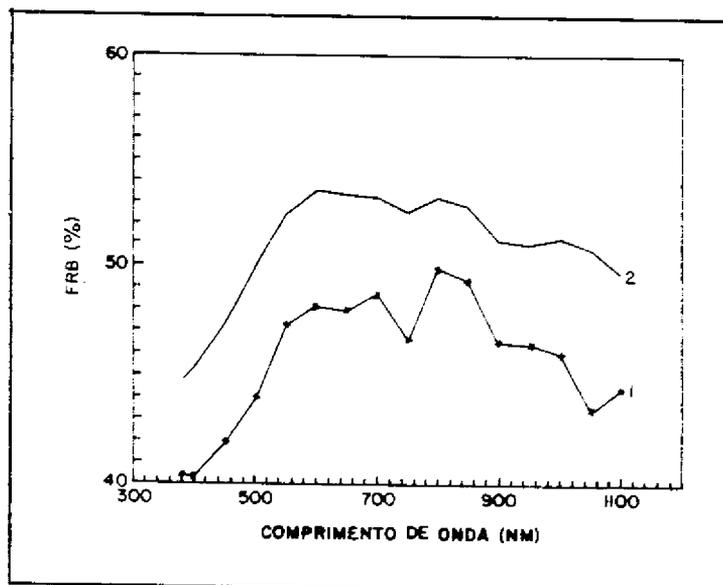


Fig.5.28 - Representação gráfica do FRB do concreto medido no campo:
1- corrigido com o F_{il} e 2- corrigido com o F_{ic} .

5.2.4.3 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos neste trabalho foram adequados se comparados aos obtidos por Duggin e Philipson (1982). Na intercalibração executada por eles erros menores que 4% na região do visível e 8% na região do infravermelho ainda foram mantidos considerados aceitáveis.

O emprego do fator de intercalibração adequado na correção do FRB minimiza os erros, ao ponto de praticamente não haver diferença entre o FRB obtido em laboratório, com um ou dois radiômetros (Tabela 5.12). No campo o erro máximo introduzido é de 1,9% (Tabela 5.13). No entanto a aplicação da correção inadequada introduz erros bem maiores (Figura 5.26 e 5.27).

Os resultados apresentados neste tópico permitem concluir que é necessário intercalibrar os espectrorradiômetros e que não é conveniente utilizar o fator de intercalibração de campo para correção do FRB obtido em laboratório ou vice-versa. Provavelmente esta situação está relacionada com a sensibilidade do detetor, pois, em laboratório a fonte de radiação (lâmpada) tem uma irradiância muito menor que a fonte do campo (Sol), o que diminuiria a relação sinal/ruído, estabelecendo tal diferença.

5.3 - INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DE IRRADIÂNCIA NO FRB

5.3.1 - EM CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS FAVORÁVEIS

A Figura 5.29 apresenta a variação da irradiância durante o período compreendido entre 9:30 e 16:00 horas do dia 15/06/1990, em São José dos Campos (SP), medida com o sistema de Medição de Irradiância Total. A Tabela 5.14 expressa os valores da irradiância total para o mesmo período. Observa-se que os valores da irradiância modificam-se com o horário, devido à variação do ângulo solar zenital. Tais variações de irradiância, apesar de inevitáveis são corrigíveis, utilizando-se o co-seno do ângulo zenital.

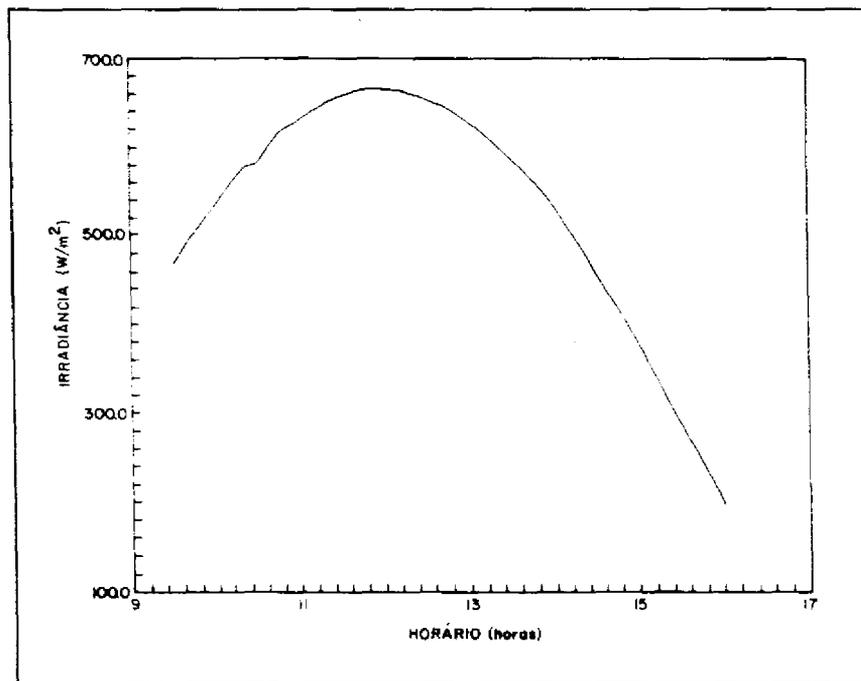


Fig. 5.29 - Representação gráfica da variação de irradiância no período de 9:30 às 16:00 horas do dia 15/06/1990, em São José dos Campos (SP).

TABELA 5.14 - VARIAÇÃO DA IRRADIÂNCIA SOLAR TOTAL ENTRE 9:30 E 16:00 HORAS DO DIA 15/06/1990 EM INTERVALOS DE 10 MINUTOS.

HORÁRIO	IRRADIÂNCIA TOTAL (W/M ²)	HORÁRIO	IRRADIÂNCIA TOTAL (W/M ²)
9:30	469	12:40	651
9:40	490	12:50	639
9:50	516	13:00	629
10:00	536	13:10	615
10:10	557	13:20	604
10:20	577	13:30	586
10:30	581	13:40	570
10:40	606	13:50	552
10:50	622	14:00	534
11:00	629	14:10	508
11:10	641	14:20	481
11:20	651	14:30	457
11:30	658	14:40	435
11:40	663	14:50	403
11:50	664	15:00	378
11:58	669	15:10	345
11:59	670	15:20	320
12:00	669	15:30	283
12:10	663	15:40	260
12:20	661	15:50	257
12:30	655	16:00	256

A variação de irradiância medida com um solarímetro em vários horários do dia, observada de 6 em 6 segundos até um minuto, não é expressiva, conseqüentemente não deve provocar modificações no FRB (Tabela 5.15), quando medido por instrumentos que permitam obter leituras dentro de intervalos compatíveis com esta ordem de grandeza.

TABELA 5.15 - VARIACÃO DA IRRADIÂNCIA SOLAR TOTAL ENTRE 9:30 E 16:40:06 HORAS DO DIA 15/06/1990 EM INTERVALOS DE 6 SEGUNDOS.

HORÁRIO	IRRAD.(E) (W/M ²)	HORÁRIO	IRRAD.(E) (W/M ²)	HORÁRIO	IRRAD.(E) (W/M ²)
9:40:00	490	11:40:24	662	13:40:48	569
9:40:06	490	11:40:30	663	13:40:54	569
9:40:12	491	11:40:36	663	14:40:00	435
9:40:18	490	11:40:42	663	14:40:06	435
9:40:24	492	11:40:48	663	14:40:12	435
9:40:30	493	11:40:54	663	14:40:18	434
9:40:36	493	12:40:00	651	14:40:24	433
9:40:42	493	12:40:06	651	14:40:30	433
9:40:48	489	12:40:12	651	14:40:36	431
9:40:54	489	12:40:18	651	14:40:42	430
10:40:00	606	12:40:24	650	14:40:48	428
10:40:06	606	12:40:30	649	14:40:54	427
10:40:12	606	12:40:36	649	15:40:00	260
10:40:18	606	12:40:42	649	15:40:06	259
10:40:24	609	12:40:48	649	15:40:12	259
10:40:30	606	12:40:54	649	15:40:18	259
10:40:36	607	13:40:00	570	15:40:24	259
10:40:42	607	13:40:06	570	15:40:30	258
10:40:48	607	13:40:12	571	15:40:36	258
10:40:54	607	13:40:18	571	15:40:42	258
11:40:00	663	13:40:24	570	15:40:48	257
11:40:06	663	13:40:30	570	15:40:54	257
11:40:12	662	13:40:36	570	16:40:00	256
11:40:18	662	13:40:42	570	16:40:06	255

Os valores do FRB de um alvo de concreto, obtidos com o procedimento de substituição no estudo da influência da variação de irradiância, são apresentados na Tabela 5.16. Nesta tabela são comparados os valores de FRB obtidos com o método de substituição variando-se os intervalos entre as medidas da radiância do alvo e da placa de referência. Observa-se que as diferenças entre os valores de FRB máximo e mínimo nos comprimentos de onda de 381,4 a 950,1 nm são menores que 1%. Isto significa dizer que o erro é da ordem de 2%, para qualquer intervalo de tempo.

Este resultado demonstra que não houve grandes variações de irradiância num período de até 180 segundos, que introduzissem erros expressivos no FRB. Os erros em 1000,4 nm e acima são devidos à instabilidade inerente ao espectrorradiômetro SPECTRON SE590.

Considerando ainda a Tabela 5.16 observa-se que o desvio padrão máximo (s) da irradiância medida ($E_{med.}$) com o solarímetro para o intervalo de 180 segundo é da ordem de 4 W/m^2 . Tal medida foi efetuada concomitantemente com as quatro medições executadas para a obtenção do FRB.

Este desvio padrão máximo, 4 W/m^2 , representa uma incerteza de 0,6%, que não deve ser detectável pelo SPECTRON SE590, pois seu erro intrínseco é de 0,6%, na região em que suas medidas são confiáveis.

TABELA 5.16 - FRB DO CONCRETO OBTIDO EM CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS FAVORÁVEIS.

λ (nm)	FRB (%)									
	INTERVALO DE TEMPO ENTRE AS MEDIDAS									
	13.6 (s)	16 (s)	18 (s)	20 (s)	30 (s)	40 (s)	55 (s)	120 (s)	180 (s)	
381,4	46,3	46,2	46,7	46,7	46,6	46,4	46,4	46,3	46,5	
399,5	47,1	46,8	47,4	47,3	47,3	46,7	47,2	47,0	47,5	
449,8	48,9	48,6	49,3	49,3	49,2	48,6	49,3	49,0	49,2	
500,0	51,4	51,0	51,8	51,8	51,6	51,1	51,8	51,3	51,7	
550,4	53,6	53,2	53,8	54,1	53,9	53,3	53,8	53,6	53,9	
599,7	54,7	54,3	54,8	55,2	54,9	54,5	54,8	54,7	54,9	
649,6	54,9	54,3	55,1	55,4	55,2	54,6	55,1	54,9	55,1	
699,6	54,7	54,2	54,9	55,1	54,8	54,4	54,8	54,5	54,8	
750,1	54,4	54,1	54,3	55,0	54,7	54,1	54,3	54,4	54,6	
798,3	54,2	53,8	54,4	54,7	54,4	54,1	54,2	54,0	54,3	
848,3	54,1	53,8	53,9	54,6	54,2	54,0	54,2	54,0	54,2	
899,6	52,7	53,2	53,0	53,6	53,0	53,2	53,0	53,0	53,3	
950,1	52,5	52,3	52,9	53,1	54,5	51,5	52,2	52,2	52,2	
1000,4	53,2	51,7	54,4	52,9	54,1	52,0	54,0	52,8	53,5	
1050,8	53,2	53,2	55,6	53,7	53,2	53,2	55,0	53,6	55,0	
1098,0	53,8	51,6	50,8	55,7	54,9	53,3	54,1	54,0	54,9	
s	0,2	0,5	0,9	1,0	1,0	1,8	1,7	3,6	4,0	
E med	667	665	664	663	666	666	663	666	662	
C_v (%)	0,02	0,08	0,13	0,15	0,15	0,27	0,26	0,5	0,6	

A Figura 5.30 mostra o FRB do concreto obtido para 5 dos 10 intervalos de tempo entre as medidas do alvo de interesse e a referência.

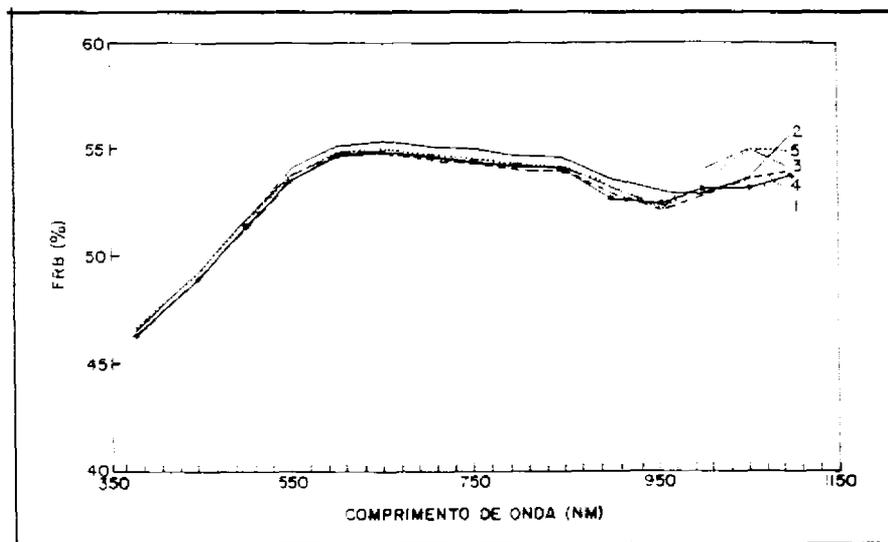


Fig. 5.30 - Representação gráfica do FRB do concreto: 1 - 13,6 segundos, 2 - 20 segundos, 3 - 55 segundos, 4 - 120 segundos e 5 - 180 segundos.

No mesmo período em que o FRB do concreto foi obtido fez-se uma observação meteorológica (Tabela 5.17). Nela observa-se que o tempo estava propício para a execução de medidas, com visibilidade excelente (acima de 10 km).

TABELA 5.17 - OBSERVAÇÃO METEOROLÓGICA DO DIA 15/06/1990 (SÃO JOSÉ DO CAMPOS - SP)

HORÁRIO	DDD/VN °/kt	VIS	FORMAÇÃO	TT/TD °C/°C	PRESSÃO (hPa)
9:00:00	210/04	3000	108R	16/16	1019
10:00:00	300/07	9999	05HZ/1SC20	20/15	1018
11:00:00	300/06	9999	1SC20	21/13	1018
12:00:00	250/12	9999	1SC20	23/13	1018
13:00:00	270/12	9999	1SC20	23/12	1017
14:00:00	300/12	9999	1SC20	24/12	1016
15:00:00	300/08	9999	1SC20	24/11	1016
16:00:00	240/10	9999	1SC20	23/11	1017

Além disso, pela observação visual no momento da medição, observou-se que o posicionamento da cobertura de nuvens existentes não afetaria as medidas.

As abreviaturas constantes das observações meteorológicas significam:

- 1) DDD/VN - Direção (graus) e velocidade do vento (nós).
- 2) Vis - Visibilidade.
- 3) Formação - Tipo de nuvens existentes no momento da observação meteorológica.
- 4) TT/TD - Temperatura do ar e do ponto de orvalho em °C.
- 5) Pressão - pressão atmosférica em hectopascal.
- 6) 10BR - Névoa úmida.
- 7) 05HZ - Névoa seca.
- 8) 1SC20 - 1/8 do céu coberto por estrato-cúmulo (600 m).
- 9) 1Cu20 - 1/8 do céu coberto por cúmulo (600 m).
- 10) 2Cu20 - 2/8 do céu coberto por cúmulo (600 m).
- 11) 3Cu20 - 3/8 do céu coberto por cúmulo (600 m).
- 12) AC100 - Alto-cúmulo (3000 m).
- 13) 9999 - Visibilidade igual ou maior que 10 km.

A Figura 5.31, extraída da observação meteorológica e a Figura 5.32 indicam que havia um sistema frontal em dissipação em direção ao norte de São José dos Campos. Neste caso a cobertura de nuvens do tipo Cirros ou a presença de cristais de gelo em altitude, não visíveis, tendem a diminuir ao longo do dia. A ausência de cristais de gelo e a diminuição da quantidade de nuvens contribuiu para uma menor variação de irradiância no período considerado, não provocando modificações no FRB.

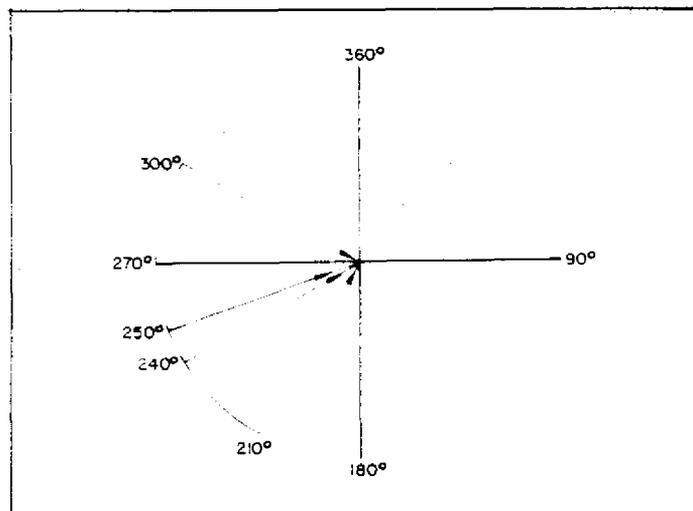


Fig. 5.31 - Diagrama de direção do vento para o dia 15/06/1990.

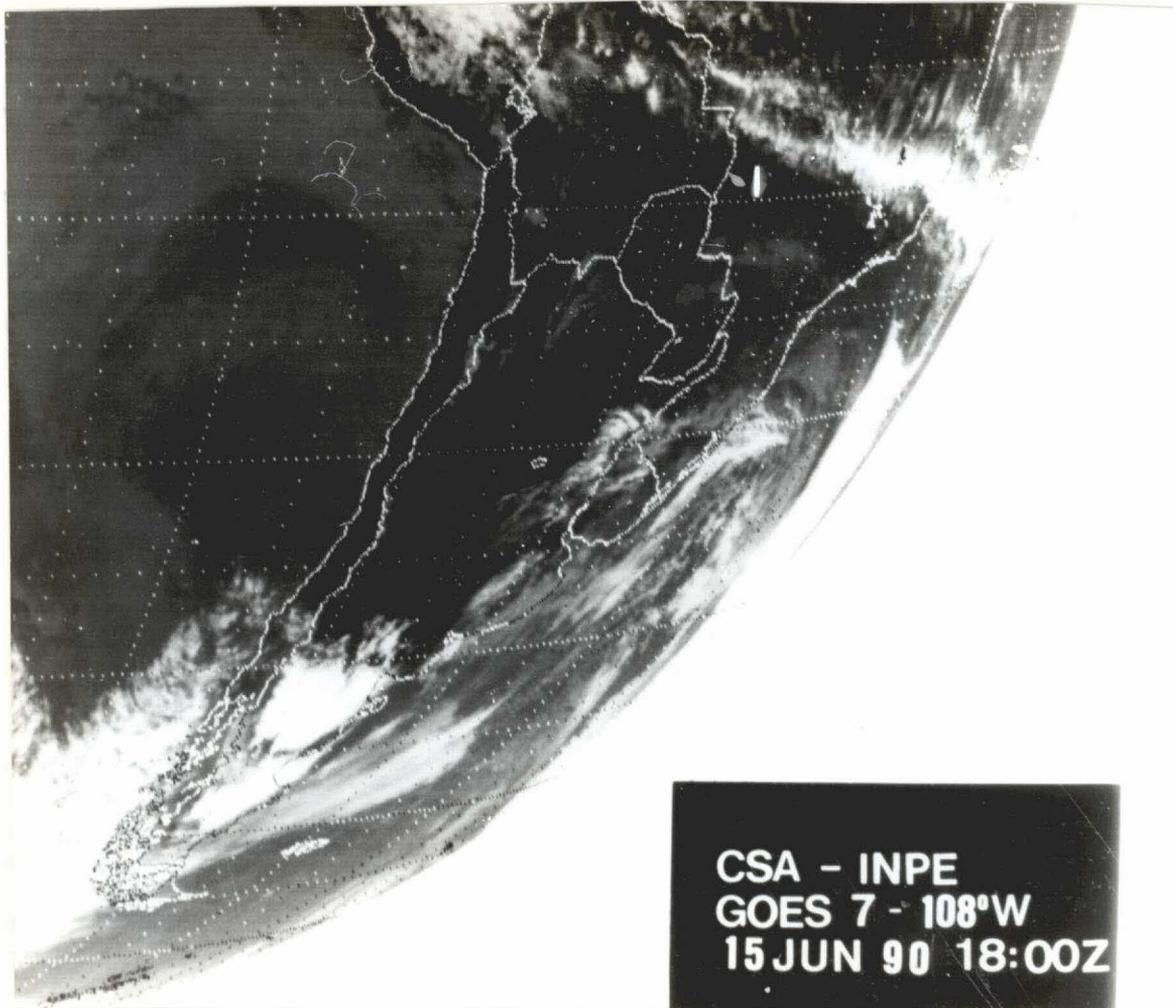


Fig. 5.32 - Imagem do satélite GOES ilustrando o sistema frontal em dissipação em direção ao Norte de São José dos Campos/SP (1) no dia 15/06/1990.

5.3.2 - EM CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS DESFAVORÁVEIS

Outras medidas de FRB do concreto foram efetuadas em 26/10/1990 quando as condições atmosféricas não eram muito propícias. Apesar da boa visibilidade (Tabela 5.18), havia uma maior quantidade de nuvens que no caso anterior, que foi aumentando no transcorrer da medição.

A inadequabilidade das condições meteorológicas é ilustrada pela interpretação das Figuras 5.33 e 5.34. Nelas a situação sinótica indica que havia um sistema frontal em atividade ao norte de São José dos Campos e um sistema frontal ao sul. Neste caso, a cobertura de nuvens do tipo Cirros ou a presença de cristais de gelo em altitude, não visíveis, tendem a aumentar ao longo do dia, contribuindo para uma maior variação de irradiância no período considerado e provocando modificações no FRB.

TABELA 5.18 - OBSERVAÇÃO METEOROLÓGICA DO DIA 26/10/1990 (SÃO JOSÉ DO CAMPOS - SP).

HORÁRIO	DDD/VN °/kt	VIS	FORMAÇÃO	TT/TD °C/°C	PRESSÃO (hPa)
9:00:00	090/04	3000	10BR/AC100	15/6/15	1020
10:00:00	090/03	9999	1SC25	18/15	1021
11:00:00	060/10	9999	1CU25	20/14	1021
12:00:00	040/10	9999	1CU20	21/13	1021
13:00:00	040/12	9999	2CU20	23/14	1021
14:00:00	040/11	9999	3CU25	24/14	1019
15:00:00	030/10	9999	3CU25	25/15	1019
16:00:00	040/08	9999	3CU25	26/15	1018

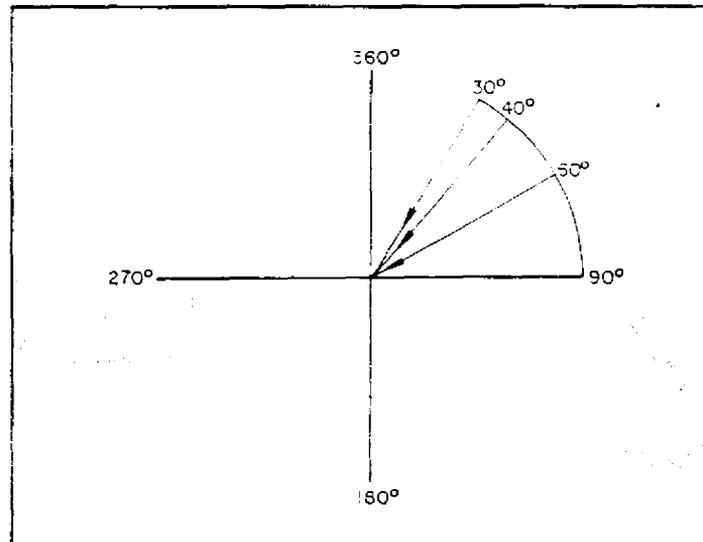


Fig. 5.33 - Diagrama de direção do vento para o dia 26/10/1990.

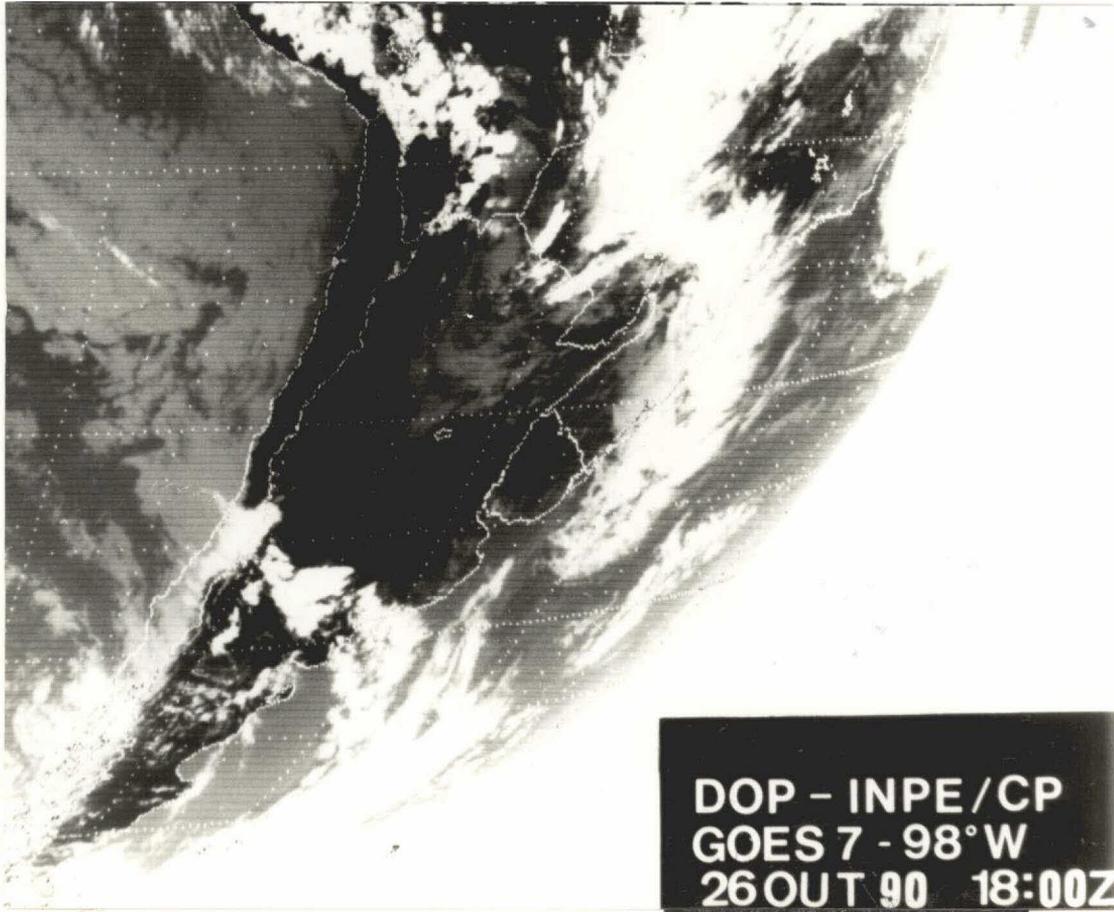


Fig. 5.34 - Imagem do satélite GOES ilustrando sistemas frontais estacionários ao Norte e ao Sul de São José dos Campos/SP (1) no dia 26/10/1990.

Os valores do FRB expressos na Tabela 5.19 foram obtidos com o método de substituição, variando-se o intervalo entre as medidas do alvo de interesse e a placa de referência, para uma condição atmosférica inadequada para medição.

Considerando os maiores e menores valores do FRB (Tabela 5.19 e Figura 5.35), em cada comprimento de onda e intervalo de tempo, observa-se que o erro máximo é 14,3% no comprimento de onda de 950 nm e o mínimo de 3,7% em 500 nm. Estes erros introduzidos no FRB são devidos à variação de irradiância no intervalo de tempo entre as medidas.

TABELA 5.19 - FRB DO CONCRETO OBTIDO EM CONDIÇÕES ATMOSFÉRICAS DESFAVORÁVEIS.

λ (nm)	FRB (%)			
	INTERVALO DE TEMPO ENTRE AS MEDIDAS			
	15 (s)	20 (s)	30 (s)	40 (s)
381,4	43,9	39,8	41,2	40,6
399,5	44,7	41,0	42,3	42,2
449,8	44,1	43,3	45,1	44,9
500,0	46,8	46,4	48,6	48,2
550,4	51,1	49,1	51,5	50,8
599,7	53,2	50,3	52,7	51,9
649,6	50,5	50,7	53,1	52,1
699,6	50,4	50,7	53,2	52,2
750,1	44,5	50,4	53,2	51,9
798,3	54,5	50,3	53,1	51,7
848,3	53,4	49,9	52,9	51,1
899,6	53,2	49,1	51,7	50,0
950,1	56,5	48,4	51,4	49,1
1000,4	56,1	48,4	52,1	49,0
1050,8	54,9	49,6	52,2	48,5
1098,0	53,6	49,4	52,7	48,5

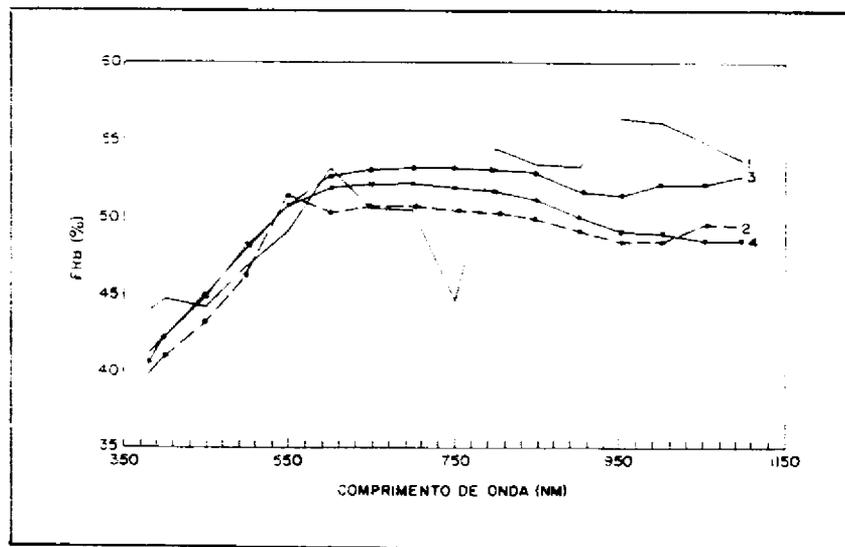


Fig. 5.35 - FRB do concreto com variação do intervalo entre a medida do alvo e da referência: 1- 15 s; 2- 20 s; 3- 30 s; e 4- 40 s.

5.3.3 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Pelo exposto, a obtenção do FRB pode ser perfeitamente executada utilizando-se o método de substituição (Milton, 1981 e 1982) ao invés do método de chaveamento, pois o erro máximo introduzido é da ordem de 2%. Este erro é muito próximo daquele introduzido pela intercalibração dos radiômetros (1,9%), quando o método seqüencial de chaveamento (2 unidades de leitura) é empregado.

Além disto, a utilização do método de substituição dispensa o uso de dois espectrorradiômetros diminuindo o custo da aquisição, elimina a necessidade do porte de mais um equipamento pela equipe de medição e exclui o procedimento de intercalibração para dois espectrorradiômetros e incertezas associadas (Milton, 1987).

Por outro lado, para a correção dos erros introduzidos no FRB, recomenda-se acompanhar as possíveis variações de irradiância com um solarímetro espectral ou um espectrorradiômetro adaptado com um coletor co-seno. O acompanhamento com o solarímetro não espectral carece de precisão, pois os valores medidos obtidos são de irradiância total e não permitem correções espectrais. Outra recomendação importante é diminuir ao máximo o intervalo de tempo entre as medidas do alvo de interesse e a placa de referência (Milton, 1987).

É necessário, ainda, por ocasião das medições, observar se as condições atmosféricas são adequadas não somente visualmente, mas através de uma previsão meteorológica antecipada. Desta forma, verifica-se uma possível ocorrência de nuvens que podem provocar variações de irradiância suficientemente expressivas para afetar os valores do FRB medido. Com este acompanhamento o método de substituição ser usado com um intervalo entre as medidas relativamente longo.

5.4 - INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DA GEOMETRIA DE RADIAÇÃO NO FRB

Neste tópico, as influências da variação do ângulo zenital no FRB são analisadas. Os ângulos de observação e o ângulo azimutal de incidência da radiação foram mantidos fixos em 0°.

Os resultados apresentados neste item compreendem o estudo da influência da variação do ângulo zenital através da radiância de um alvo de sulfato de bário, da radiância de um alvo de papelão e da razão entre essas radiâncias (FRB do papelão).

5.4.1 - INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DO ÂNGULO ZENITAL NA RADIÂNCIA

As radiâncias do alvo de sulfato de bário e do alvo de papelão foram obtidas com o espectrorradiômetro SPECTRON SE590, variando-se o ângulo zenital de incidência ($\theta_i = 0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70$ e 80°). Tais valores foram normalizados (*radiância normalizada*) em relação ao maior valor obtido em cada comprimento de onda e ângulo de medição (Figuras 5.36 e 5.37).

Na Figura 5.36 o *radiância normalizada* é expressa em função do comprimento de onda, para todos os ângulos zenitais de incidência. Na Figura 5.37 ela é expressa em função da variação do ângulo zenital de incidência para quatro comprimentos de onda tomados como exemplo.

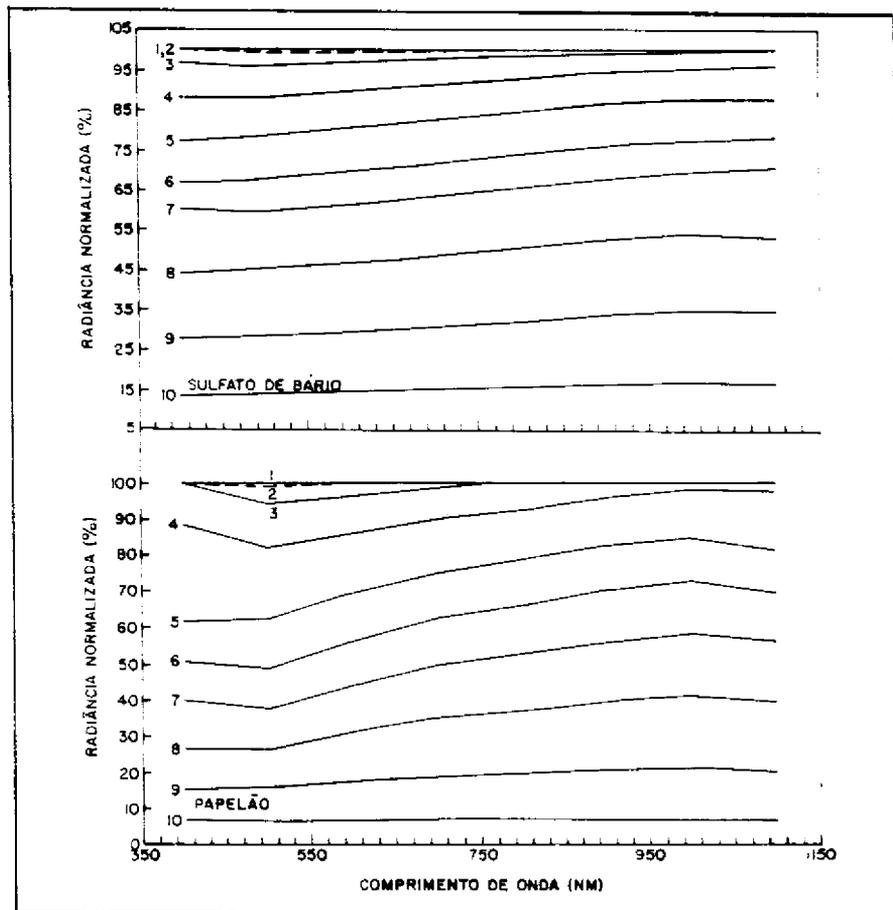


Fig. 5.36 - Representação gráfica da *radiância normalizada* dos alvos de sulfato de bário e papelão: 1- $\theta_i = 0^\circ$, 2- $\theta_i = 5^\circ$, 3- $\theta_i = 10^\circ$, 4- $\theta_i = 20^\circ$, 5- $\theta_i = 30^\circ$, 6- $\theta_i = 40^\circ$, 7- $\theta_i = 50^\circ$, 8- $\theta_i = 60^\circ$, 9- $\theta_i = 70^\circ$ e 10- $\theta_i = 80^\circ$.

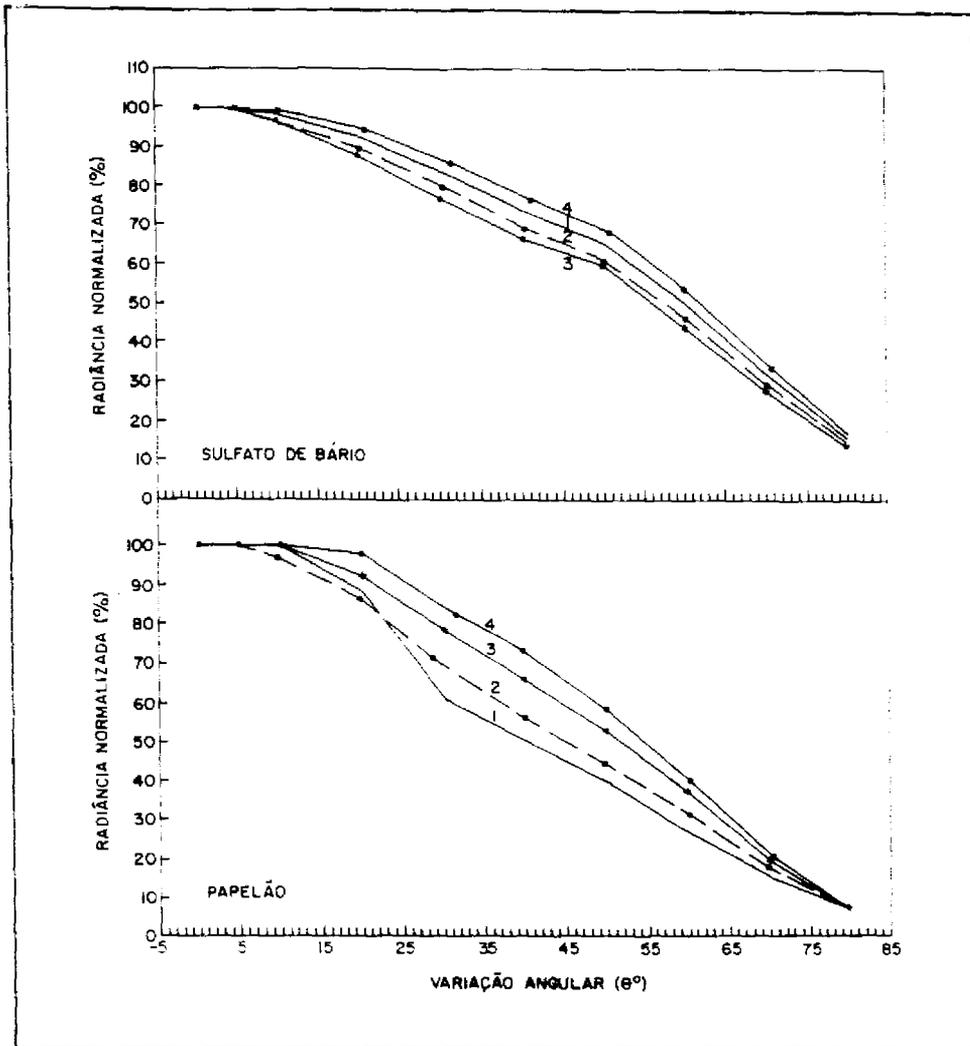


Fig. 5.37 - Representação gráfica da radiância normalizada dos alvos de sulfato de bário e papelão: 1- $\lambda=399,5$ nm; 2- $\lambda=599,7$ nm; 3- $\lambda=798,3$ nm; e 4- $\lambda=1000,4$ nm.

Considerando as Figuras 5.36 e 5.37 observa-se que com o aumento do ângulo há uma diminuição na resposta em radiância dos alvos. Por exemplo, em 550 nm ela é de 100% para 0° e 65% para 40° para o sulfato de bário. Para o papelão, no mesmo comprimento de onda e ângulos, é de 100% e 50% respectivamente. A variação de radiância da placa de sulfato de bário não ocorre na mesma proporção que a variação da radiância do papelão, apesar da aparente homogeneidade de ambos. Há uma pequena variação nos valores da radiância dos alvos quando os ângulos zenitais considerados são de 0° e 5° (Figura 5.36, curvas 1 e 2). Esta variação é menor que o erro do instrumento de medida (1%).

5.4.2 - INFLUÊNCIA DA VARIAÇÃO DO ÂNGULO ZENITAL NO FRB

Os valores obtidos, representados graficamente na Figura 5.38 e indicados na Tabela 5.20, foram calculados a partir das medidas de radiância do papelão e da referência de BaSO_4 , variando-se o ângulo zenital ($\theta_i = 0, 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60, 70$ e 80°).

Analisando a Tabela 5.20 e a Figura 5.39 observa-se que:

- 1) O FRB do papelão diminui à medida que o ângulo zenital aumenta.
- 2) Há uma pequena variação nos valores do FRB do papelão para os ângulos zenitais de 0° e 5° . Esta variação é menor que o erro do instrumento de medida (1%). Deste modo, o valor do FRB não é influenciado pela variação do ângulo zenital entre 0° e 5° .
- 3) A variação introduzida no FRB pela alteração angular é de 0 a 55%, dependendo do ângulo zenital de incidência em que o FRB é obtido.

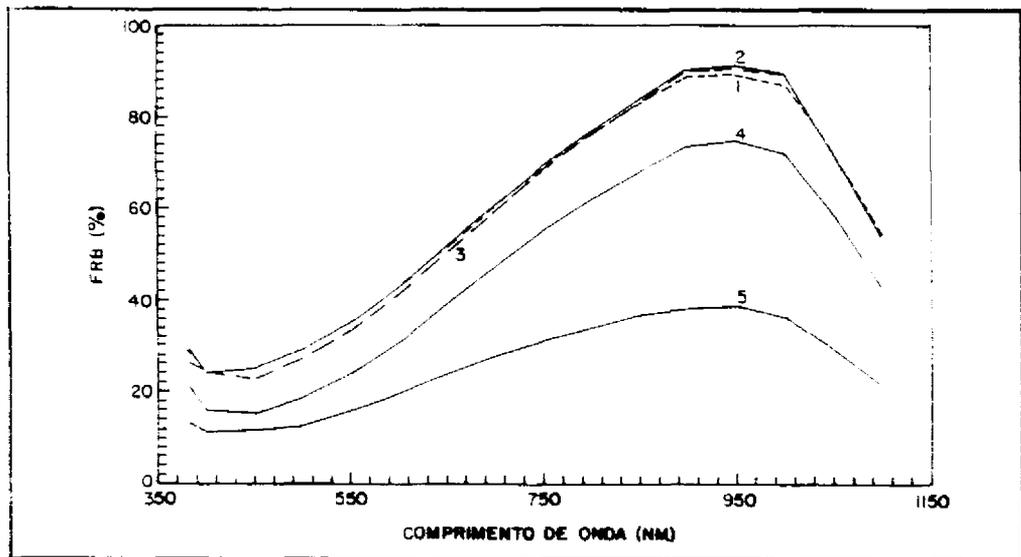


Fig. 5.38 - Representação gráfica do FRB do papelão: 1- $\theta_i = 0^\circ$; 2- $\theta_i = 5^\circ$; 3- $\theta_i = 20^\circ$; 4- $\theta_i = 50^\circ$; e 5- $\theta_i = 80^\circ$

TABELA 5.20 - VARIACÃO DO FRB DO PAPELÃO COM A ALTERAÇÃO DOS ÂNGULOS ZENITAIS DE INCIDÊNCIA

Comp. onda (nm)	FRB (%)									
	0°	5°	10°	20°	30°	40°	50°	60°	70°	80°
381,4	29,40	28,60	26,90	26,40	23,50	22,20	21,30	18,20	16,40	13,30
399,5	24,00	24,30	24,80	24,17	19,27	18,37	15,90	14,60	13,10	11,40
449,8	25,30	25,10	24,80	22,70	19,00	17,40	15,20	14,20	13,40	11,70
500,0	29,30	29,20	28,80	27,30	23,20	21,10	18,70	17,10	16,30	12,60
550,4	35,30	35,40	35,10	33,30	29,20	27,10	24,00	22,20	20,50	16,00
599,7	42,80	43,00	42,80	41,00	36,80	34,50	30,80	28,60	25,50	19,70
649,6	51,30	51,70	51,60	50,00	45,70	43,20	38,90	36,00	31,30	23,70
699,6	60,30	60,80	61,00	59,10	54,80	52,40	47,10	43,50	37,20	27,70
750,1	69,00	69,40	70,00	68,10	63,60	61,00	55,10	50,50	42,30	31,10
798,3	76,30	76,80	77,70	75,90	71,20	68,30	61,60	56,30	46,60	33,90
848,3	82,70	83,70	84,60	82,70	78,20	75,50	67,70	61,80	50,70	36,70
899,6	88,70	90,40	91,60	89,90	84,90	82,00	73,70	67,30	54,30	38,30
950,1	89,30	91,40	92,70	90,60	86,30	83,80	75,00	68,10	54,80	38,80
1000,4	87,00	89,40	90,90	89,40	84,00	82,30	72,30	66,30	53,30	36,50
1050,8	72,70	72,50	73,40	71,80	68,40	65,00	58,60	53,00	42,20	29,30
1098,0	54,80	54,30	58,10	55,40	50,60	48,80	43,40	40,80	32,00	21,80

5.4.3 - CORREÇÃO DO FRB

A solução para a correção do efeito da variação angular no FRB está na caracterização da radiância normalizada de cada alvo (Figuras 5.36 e 5.37 e Tabela 5.21) nos ângulos considerados. Posteriormente aplica-se o fator de correção (razão entre a radiância normalizada do alvo de interesse e a radiância normalizada da placa de referência) ao FRB obtido (Figura 5.39).

Na Tabela 5.21 o FRB do papelão obtido num ângulo de 80°, é corrigido para o ângulo de 0° e comparado ao resultado medido em 0°. Pelos resultados (Figura 5.39) observa-se que a solução apresentada é adequada para a correção da influência da variação angular no FRB.

TABELA 5.21 - CORREÇÃO DO FRB DO PAPELÃO OBTIDO COM UM ÂNGULO DE 80°

Comp. onda (nm)	Rad. Norm.		Fator de Correção	FRB		
	BaSO ₄	Pap.		80°	0°Med	0°Cor
399,5	0,137	0,068	0,496	11,4	22,3	24,0
500,0	0,142	0,061	0,430	12,6	29,3	29,3
599,7	0,147	0,068	0,463	19,7	42,5	42,8
699,6	0,154	0,071	0,461	27,7	60,1	60,3
798,3	0,160	0,071	0,444	33,9	76,3	76,3
899,6	0,167	0,072	0,431	38,3	88,8	88,7
1000,4	0,173	0,072	0,416	36,5	87,7	87,0
1098,0	0,171	0,068	0,398	21,8	54,8	54,8

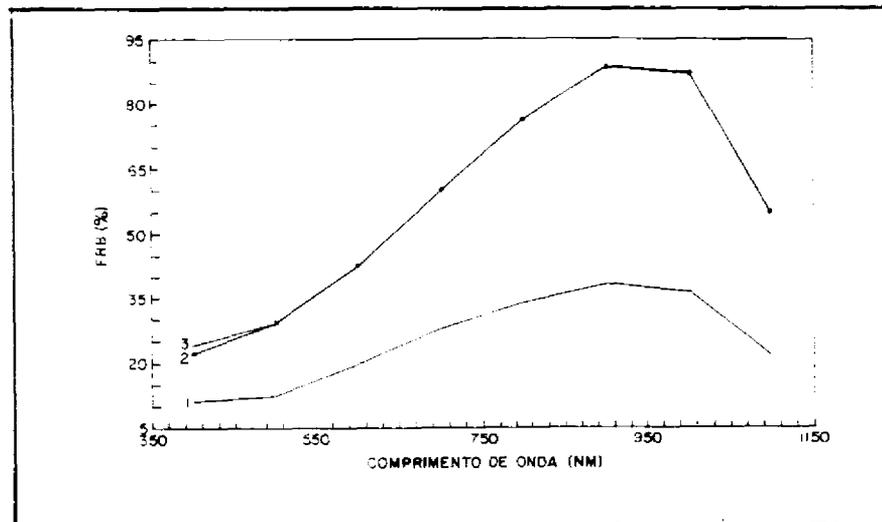


Fig. 5.39 - Correção do FRB do papelão: 1- obtido a 80°, 2- obtido a 0° e 3- obtido a 80° e corrigido para 0°.

5.4.4 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os estudos em sensoriamento remoto exigem que o FRB utilizado seja medido espectralmente e segundo vários ângulos zenitais. Os resultados aqui apresentados demonstram a influência da variação da geometria no FRB, devido às características não lambertianas dos alvos de interesse e de referência.

Os resultados de Biggar et al. (1988) demonstram que a alteração dos ângulos de incidência de 10 a 80° chegam a introduzir variações de até 35% (450 nm e 80°) no Fator de Reflectância Bidirecional das placas de referência.

Leshkevich (1988b) mostra que a variação para uma alteração angular de 0° a 80° é da ordem de 0 a 52%, na região do visível, e de 0 a 30% na região do infravermelho próximo, de uma placa de sulfato de bário.

Os resultados obtidos por Epema (1991) mostram que a variação da reflectância da placa de referência, obtido das medidas efetuadas na região de 458 nm a 525 nm (Banda 1) com o "Barnes Modular Multiband Radiometer" (MMR) para uma alteração angular de 0° a 80° , é maior que 40%.

Neste trabalho a radiância normalizada obtida para a alteração angular de 0° a 80° , considerando a região de 399,5 a 1098,0 nm, é da ordem de 0 a 90%.

A diferença de resultados em relação aos obtidos por Biggar et al. (1988), Leshkevich (1988b) e Epema (1990) não invalida o experimento efetuado, pois, ele atende ao seu objetivo, que é demonstrar que a alteração de geometria de radiação produz variações expressivas nos valores de FRB.

Como os alvos reais não são lambertianos, baseado nos resultados obtidos neste trabalho e na literatura citada, recomenda-se que os valores de FRB sejam obtidos sempre segundo a mesma geometria, bem como os valores de FRB obtidos com geometrias diferentes não sejam comparados; ou, em caso de comparação por ocasião das medições, caracterize-se a radiância normalizada de cada alvo e corrija-se o FRB obtido para os ângulos medidos.

5.5 - INFLUÊNCIA DA VIZINHANÇA NO FRB

Os resultados dos experimentos de influência da vizinhança são apresentados para o nível de laboratório, utilizando os espectrorradiômetros SPECTRON SE590 e REFSPEC IIA.

O estudo em laboratório, realizado com o SPECTRON SE590, foi efetuado tendo por base a variação de radiância de uma placa de referência (BaSO_4) na presença de vizinhos próximos. Com o REFSPEC IIA o estudo foi baseado nos valores da relação denominada de FRR.

5.5.1 - ESPECTRORRADIÔMETRO SPECTRON SE590

Os valores do FRB dos painéis de 60 x 60 cm utilizados para a verificação da influência da vizinhança na radiância são representados graficamente na Figura 5.40 e expressos na Tabela 5.22.

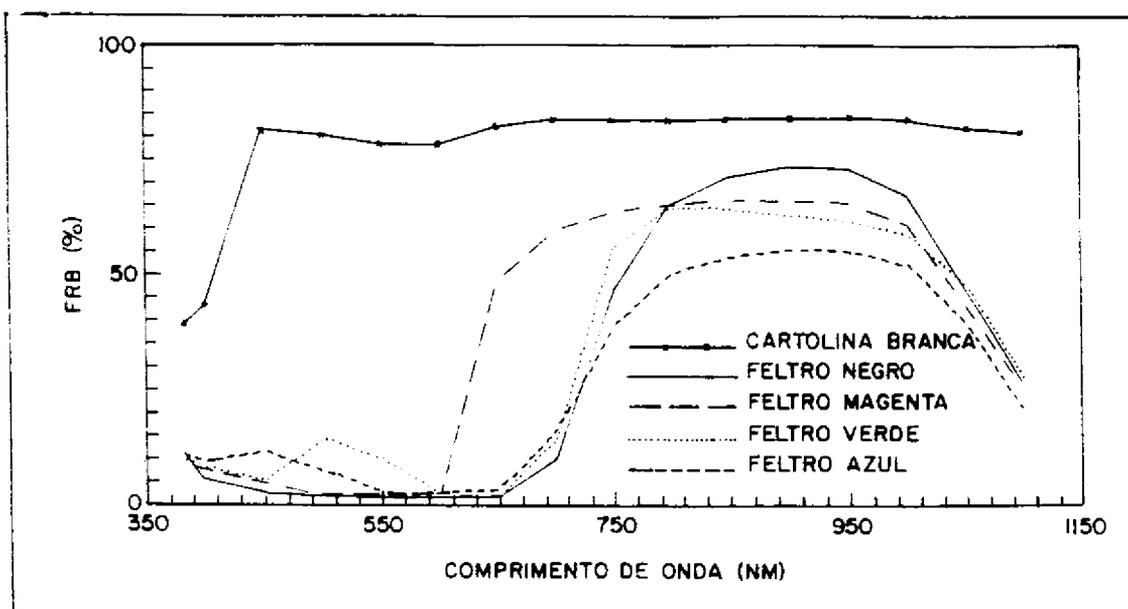


Fig. 5.40 - Representação gráfica do FRB obtido com o SPECTRON SE590 dos diferentes painéis usados no experimento de avaliação da influência de vizinhança.

TABELA 5.22 - FRB OBTIDO COM O SPECTRON SE590 DOS PAINÉIS UTILIZADOS NO EXPERIMENTO PARA AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA VIZINHANÇA

Comp. onda (nm)	FRB(%)				
	Branco	Negro	Magenta	Verde	Azul
381,4	39,0	11,0	9,8	9,8	11,0
399,5	43,5	5,4	7,5	8,2	9,5
449,8	81,5	2,8	4,6	5,3	11,6
500,0	80,4	2,2	2,5	14,4	7,6
550,4	78,7	2,2	2,4	9,9	3,0
599,7	78,5	1,8	3,1	2,6	2,4
649,6	82,1	2,0	49,1	2,0	3,4
699,6	83,6	10,3	59,4	14,5	16,3
750,1	83,7	46,7	63,8	56,1	38,9
798,3	83,8	65,3	65,5	64,5	50,2
848,3	84,2	71,6	66,4	64,7	54,0
899,6	84,4	73,6	66,4	62,9	55,5
950,1	84,5	73,1	65,7	61,6	55,3
1000,4	84,0	67,2	60,8	58,7	51,9
1050,8	82,2	46,6	43,2	47,5	39,3
1098,0	81,2	27,1	25,9	28,2	21,2

Os erros introduzidos nos valores de radiância da placa de referência medida pelo SPECTRON SE590 com os cinco painéis (vizinhos) posicionados a 30, 50 e 100 cm formando ângulos de 90, 135 e 180° com a fonte de radiação (0°), são representados na Tabela 5.23. A fonte de radiação foi posicionada segundo um ângulo zenital de 45°.

Tais erros foram considerados em relação às faixas do espectro eletromagnético compreendidas entre 400 e 700 nm, visível (VIS) e entre 700 e 1100 nm, infravermelho próximo (IVP).

A comparação entre a radiância da placa de referência (BaSO_4) sem os painéis próximos e a radiância da mesma placa de referência com os painéis a 30 cm para os ângulos de 90°, 135° e 180° está representada graficamente na Figura 5.41. Os ângulos e distâncias apresentados na figura foram os que mais significativamente afetaram a radiância da placa de referência.

TABELA 5.23 - ERROS INTRODUZIDOS NA RADIÂNCIA DA PLACA DE REFERÊNCIA MEDIDA EM LABORATÓRIO PELA PRESENÇA DE VIZINHOS PRÓXIMOS

Painel (Cor)	Ângulo (ϕ)	30 cm		50 cm		100 cm	
		VIS.	IVP	VIS	IVP	VIS	IVP
BRANCO	90°	B	B	A	A	N	N
NEGRO		A	N	B	N	N	N
MAGENTA		N	A	N	N	N	N
VERDE		N	N	N	N	N	N
AZUL		N	N	N	N	N	N
BRANCO	135°	C	C	B	B	N	N
NEGRO		A	B	C	N	N	N
MAGENTA		A	B	N	A	N	N
VERDE		N	B	N	A	N	N
AZUL		N	B	N	A	N	N
BRANCO	180°	D	D	B	B	N	N
NEGRO		B	C	D	N	N	N
MAGENTA		B	D	A	A	N	N
VERDE		N	B	N	A	N	N
AZUL		N	B	N	A	N	N
Obs:	N \leq 1% < A \leq 3% < B \leq 6% < C \leq 9% < D						

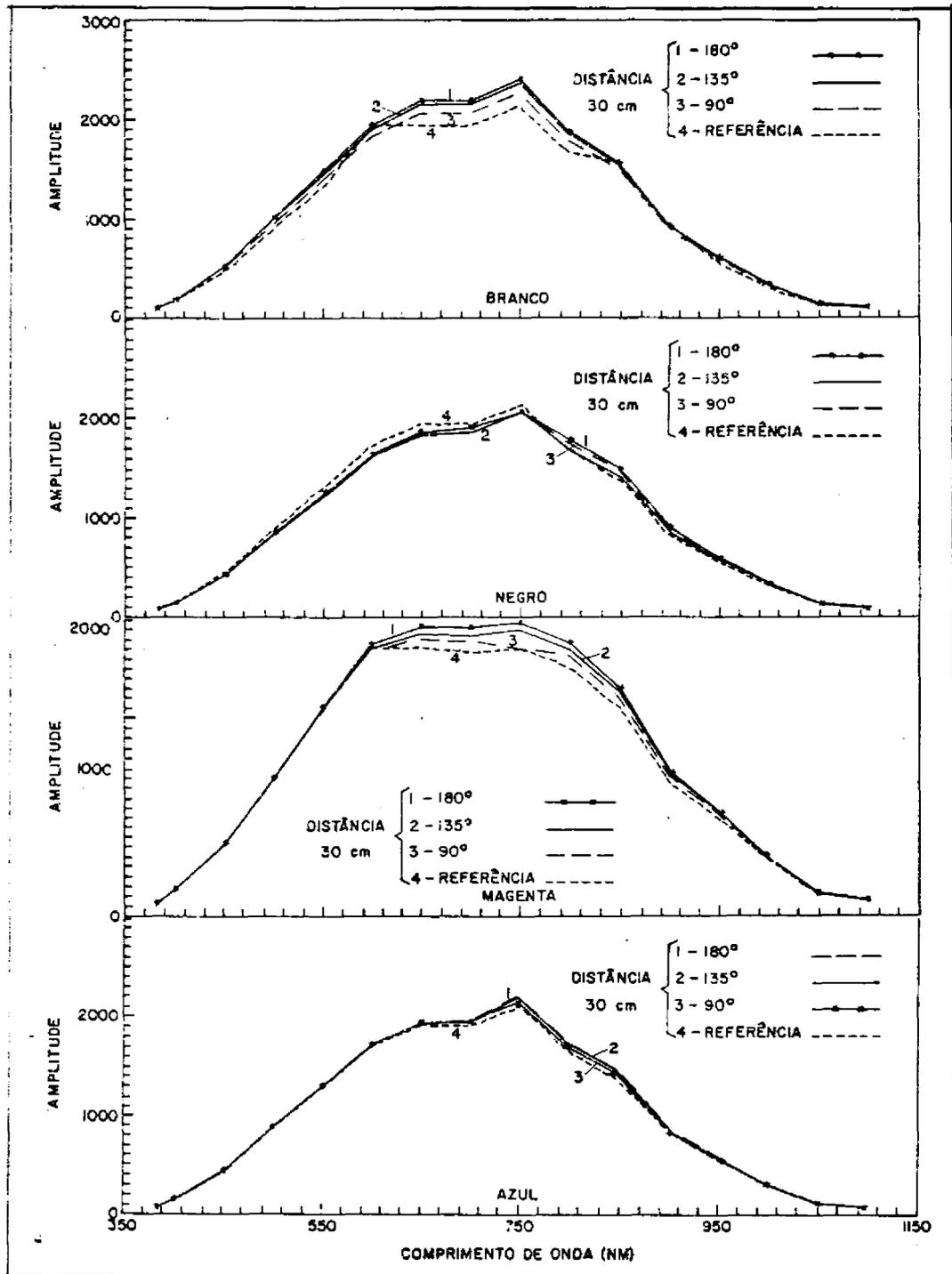


Fig. 5.41 - Representação gráfica da variação de radiância da placa de referência com a presença dos painéis vizinhos: 1- 30 cm a 180°, 2- 30 cm a 135°, 3- 30 cm a 90° e 4- Placa de referência.

5.5.1.1 ASPECTOS COMUNS A TODOS OS PAINÉIS

Analisando a Figura 5.41 e a Tabela 5.23 observa-se que:

- a) À medida em que os painéis são afastados da placa de referência, os erros introduzidos na radiância devidos à presença dos vizinhos diminui para todos os ângulos e distâncias considerados.
- b) Com os painéis posicionados a 100 cm de distância e em quaisquer dos ângulos (90, 135 e 180°), não há influência dos vizinhos na radiância da placa de referência.
- c) A maior influência dos painéis na radiância da placa de referência ocorre para o ângulo de 180° e distâncias de 30 e 50 cm.
- d) Para 30 cm com 135° e 180° os painéis influenciam mais a radiância da placa de referência na região do infravermelho do que no visível, exceto o painel branco.

5.5.1.2 ASPECTOS PARTICULARES DOS PAINÉIS

Analisando a Figura 5.41 e a Tabela 5.23 observa-se que:

a) Painel branco

- 1) A influência deste painel na radiância da placa de referência é maior que a dos demais painéis.
- 2) Este painel afeta a radiância da placa igualmente em toda região medida (381,4 a 1098,0 nm), para todos ângulos e distâncias.
- 3) O erro máximo introduzido na radiância da placa para o ângulo de 90° é da ordem de 3 a 6%; para o ângulo de 135° é da ordem de 6 a 9% e para o ângulo de 180° é maior que 9%.

b) Painel negro

- 1) Há uma diminuição no valor da radiância na região do visível (400 a 700 nm).
- 2) Na região do Infravermelho próximo (700 a 1098,8) há um aumento na radiância provavelmente devido ao acrílico presente na composição do feltro negro.
- 3) Em 700 nm (Figura 5.41) há uma inversão de influência deste vizinho conforme citado nos itens 1 e 2.

- 4) O erro máximo introduzido na radiância da placa para o ângulo de 90° é da ordem de 1 a 3%, para o ângulo de 135° é da ordem de 3 a 6% e para o ângulo de 180° é da ordem de 6 a 9%.

c) Pannel magenta

- 1) O erro máximo introduzido na radiância da placa para o ângulo de 90° é da ordem de 1 a 3%; para o ângulo de 135° é da ordem de 3 a 6% e para o ângulo de 180° é maior que 9%.

d) Pannel verde e pannel azul

- 1) O erro máximo introduzido na radiância da placa para o ângulo de 180° é da ordem de 3 a 6%.

5.5.2 - ESPECTRORRADIÔMETRO REFSPEC IIA

Os valores do FRR dos painéis de 60 x 60 cm utilizados para a verificação da influência da vizinhança na radiância, são indicados na Tabela 5.24 e apresentados graficamente na Figura 5.42.

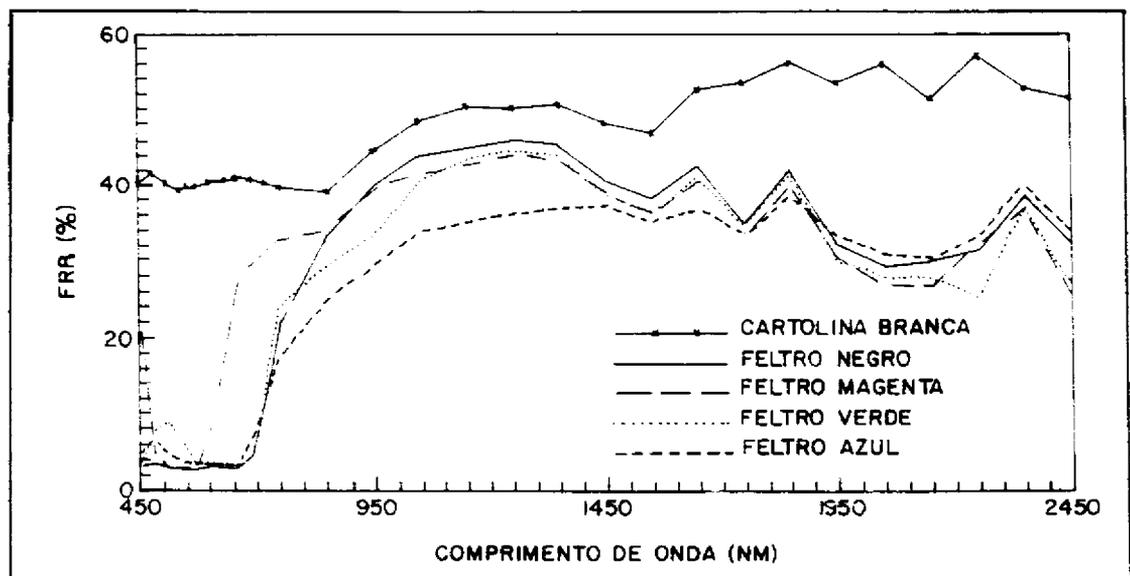


Fig. 5.42 - Representação gráfica do FRR obtido com o REFSPEC IIA dos diferentes painéis usados no experimento de avaliação da influência de vizinhança.

TABELA 5.24 - FRR OBTIDO COM O REFSPEC IIA DOS PAINÉIS UTILIZADOS NO EXPERIMENTO PARA AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DA VIZINHANÇA EM LABORATÓRIO

Comp. onda (nm)	FRR(%)				
	Branco	Negro	Magenta	Verde	Azul
450,0	40,4	3,0	25,4	3,0	4,9
480,0	41,6	3,5	5,3	7,9	6,8
510,0	40,4	3,0	3,1	9,2	4,7
540,0	39,4	2,9	2,9	6,5	3,7
550,0	39,9	2,8	2,9	5,2	3,6
570,0	39,8	2,8	2,9	3,6	3,4
600,0	40,4	3,1	7,5	3,6	3,0
630,0	40,7	3,0	18,4	3,5	3,0
650,0	40,7	2,9	24,2	3,1	3,4
660,0	41,0	3,0	26,5	3,2	3,5
690,0	40,9	4,3	29,8	5,0	6,8
720,0	40,3	11,6	31,1	14,9	12,4
750,0	39,8	21,5	32,8	24,1	17,8
850,0	39,2	33,2	34,0	29,4	24,9
950,0	44,5	40,1	39,6	33,6	29,8
1050,0	48,5	43,9	41,6	40,6	33,8
1150,0	50,4	44,8	42,8	43,4	35,4
1250,0	50,3	45,9	43,9	44,7	36,4
1350,0	50,8	45,4	43,3	43,9	37,0
1450,0	48,3	40,9	39,2	38,8	37,3
1550,0	47,1	38,4	36,4	36,6	35,4
1650,0	52,8	42,8	40,5	41,1	37,0
1750,0	53,7	35,3	33,1	34,9	33,7
1850,0	56,4	42,3	40,0	41,6	38,9
1950,0	53,7	32,4	30,6	30,1	33,4
2050,0	56,2	29,6	26,9	28,1	31,0
2150,0	51,5	30,2	26,9	28,0	30,5
2250,0	57,2	31,6	32,3	25,4	33,5
2350,0	53,1	38,8	37,1	37,3	40,2
2450,0	51,6	32,4	25,6	26,8	34,0

Os erros introduzidos nos valores de FRR de uma placa de referência medida pelo REFSPEC IIA com cada um dos cinco painéis posicionados a 20, 40 e 100 cm, formando ângulos de 90°, 135° e 180° com a fonte de radiação (0°), são representados na Tabela 5.25. A fonte de radiação foi posicionada segundo um ângulo zenital de 45°.

Tais erros foram considerados em relação às faixas do espectro eletromagnético compreendidas entre 400 e 700 nm, visível (VIS), entre 700 e 1100 nm, infravermelho próximo (IVP) e entre 1100 e 2450 nm, infravermelho médio (IVM).

A comparação entre o FRR da placa de referência sem os painéis próximos e o FRR da mesma placa de referência com os painéis a 30 cm para os ângulos de 90, 135 e 180° está representada graficamente na Figura 5.43. Os ângulos e distâncias apresentados na figura foram os que mais significativamente afetaram a radiância da referência.

TABELA 5.25 - ERROS INTRODUZIDOS NO FRR DA PLACA DE REFERÊNCIA PELA PRESENÇA DE VIZINHOS PRÓXIMOS

Painel (Cor)	Ângulo (ϕ)	20 cm			40 cm			100 cm		
		VIS.	IVP	IVM	VIS	IVP	IVM	VIS	IVP	IVM
BRANCO	90°	A	A	A	N	N	N	N	N	N
NEGRO		N	A	A	N	N	N	N	N	N
MAGENTA		A	A	A	N	N	N	N	N	N
VERDE		N	N	A	N	N	N	N	N	N
AZUL		N	N	A	N	N	N	N	N	N
BRANCO	135°	A	A	A	N	N	N	N	N	N
NEGRO		N	B	B	N	N	N	N	N	N
MAGENTA		A	A	A	N	N	N	N	N	N
VERDE		N	N	A	N	N	N	N	N	N
AZUL		N	N	A	N	N	N	N	N	N
BRANCO	180°	B	B	B	N	N	N	N	N	N
NEGRO		N	B	B	N	N	N	N	N	N
MAGENTA		A	A	A	N	N	N	N	N	N
VERDE		N	N	A	N	N	N	N	N	N
AZUL		N	N	A	N	N	N	N	N	N
Obs:	N \leq 1% < A \leq 3% < B \leq 6%									

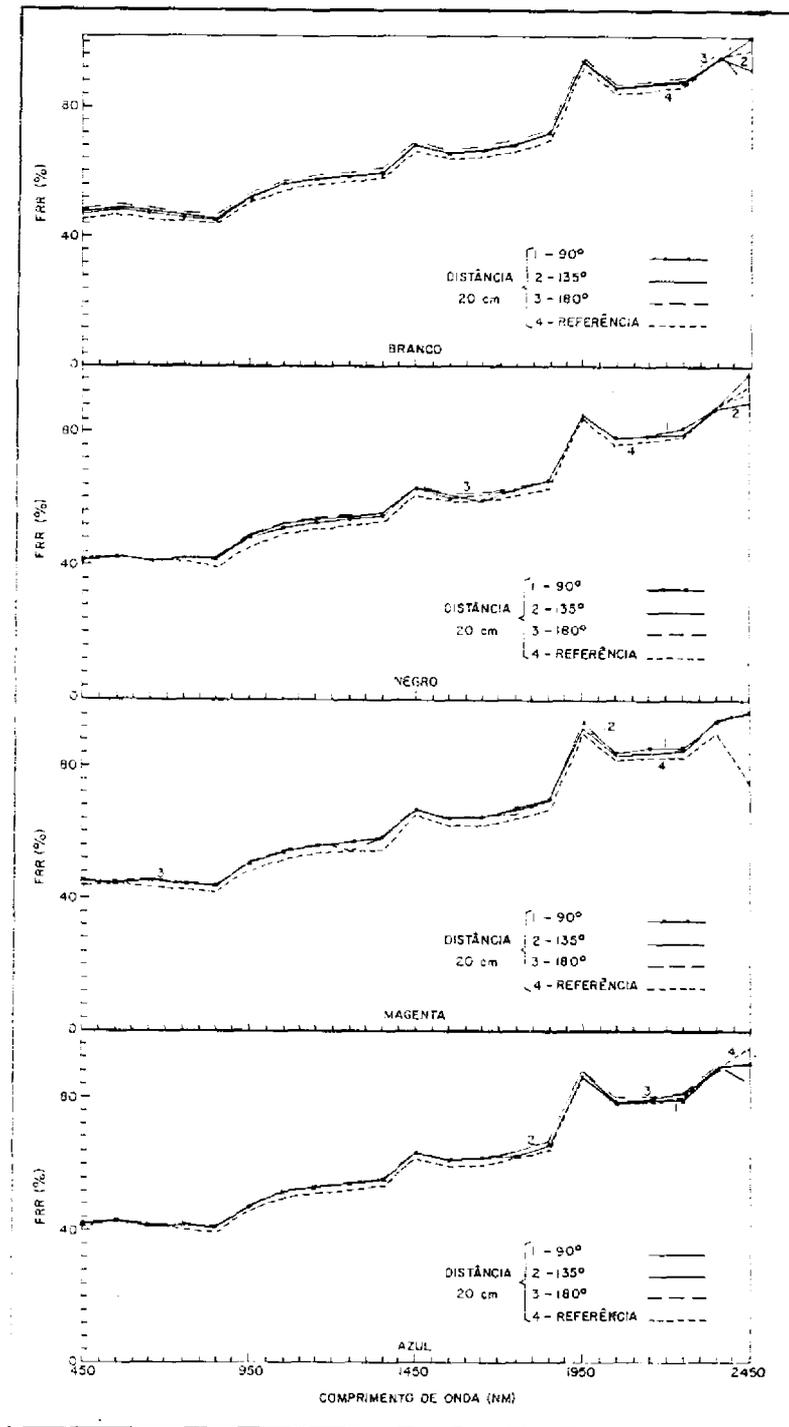


Fig. 5.43 - Representação gráfica da variação do FRR da placa de referência com a presença dos painéis vizinhos: 1- 20 cm a 90°, 2- 20 cm a 135°, 3- 20 cm a 180° e 4- Referência.

5.5.2.1 ASPECTOS COMUNS A TODOS OS PAINÉIS

Analisando a Figura 5.43 e Tabela 5.25 observa-se que:

- a) Para qualquer ângulo o FRR da placa não é afetado considerando as distâncias de 40 e 100 cm.
- b) O FRR da placa de referência é influenciado mais expressivamente na região do Infravermelho, exceto para o painel branco.

5.5.2.2 ASPECTOS PARTICULARES DOS PAINÉIS

Analisando a Figura 5.43 e a Tabela 5.25 observa-se que:

a) **Painel Branco**

- 1) Este painel influencia o FRR em toda região medida (450 a 2450 nm) igualmente.
- 2) Para o ângulo de 90 e 135° e distância de 20 cm há um acréscimo no FRR menor que 3%, no visível (VIS), infravermelho próximo (IVP) e infravermelho médio (IVM).
- 3) Para o ângulo de 180° com 20 cm de distância a influência é da ordem de 3 a 6%.

b) **Painel Negro**

- 1) Para qualquer ângulo e distância do vizinho, não há influência do vizinho negro no FRR no visível (450 a 700 nm).
- 2) No infravermelho há um aumento do FRR da ordem de 1 a 3% para o painel vizinho posicionado segundo um ângulo de 90° à distância de 20 cm.
- 3) Para o painel posicionado a 135 e 180° à distância de 20 cm há um acréscimo de 3% em média no FRR.

c) **Painel Magenta**

- 1) Para os três ângulos com o painel vizinho posicionado a uma distância de 20 cm, os valores do FRR aumentam em média de 1 a 3%.

d) **Painel Verde e painel Azul**

- 1) A partir de 1150 nm é introduzido um erro de 1 a 3% nos valores do FRR para todos os ângulos a 20 cm de distância.

5.5.3 - DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

O estudo da influência da vizinhança no FRB foi abordado com base na variação de radiância e FRR de uma placa de referência (BaSO_4) devido à proximidade ou não dos painéis.

Dentre os resultados apresentados é importante salientar que:

- 1) À medida em que os painéis se afastam da placa de referência os erros introduzidos nos valores de radiância e FRR diminuem como esperado, devido à diminuição de irradiância (lei do quadrado da distância).
- 2) Para 180° há um acréscimo na radiância e no FRR da placa de referência porque o painel funciona como um refletor agindo como uma segunda fonte de radiação.
- 3) Como era esperado, o painel branco influencia mais a radiância e o FRR da placa de referência que os demais painéis, devido a sua maior reflectância (Figuras 5.40 e 5.42).
- 4) O estudo com base na radiância apresentou maior influência na resposta da placa de referência que o estudo com base no FRR. Isto é devido principalmente ao fato de que no primeiro caso o dado obtido (radiância) é uma medida absoluta, enquanto no outro caso, o dado (FRR) é relativo. Como não houve modificação da geometria de medição do experimento, utilizando-se o FRR houve uma minimização dos erros.

Há concordância entre os resultados obtidos neste trabalho nos experimentos de vizinhança com os simulados por Kimes et al. (1983). Nos dois trabalhos os erros diminuem à medida em que os vizinhos se afastam do alvo de interesse e a influência do vizinho de cor branca é maior que o vizinho de cor negra.

Em suma, os resultados demonstram a necessidade de considerar os erros devidos à vizinhança nos cálculos de obtenção do FRB, FRR e em medidas de grandezas radiométricas absolutas. Para diminuir tais erros é importante fazer as medidas sempre segundo a mesma geometria de medição, a fim de que a posição dos vizinhos não mude, permitindo, assim, a minimização do efeito sobre os resultados.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Ao medir o Fator de Reflectância Bidirecional ou outra grandeza radiométrica para emprego em estudos de caracterização da vegetação, do solo, das rochas, da água e de outros alvos, é importante conhecer os fatores que os afetam. Tais fatores introduzem erros nos valores de FRB e das grandezas radiométricas que podem torná-los não confiáveis, causando desperdícios de recursos humanos e materiais, invalidando resultados de trabalhos de magnitude muitas vezes expressiva.

Os resultados apresentados neste trabalho permitem evidenciar erros significativos e erros toleráveis introduzidos na determinação do FRB e em outras grandezas radiométricas por cada fator estudado. As conclusões expressas no Capítulo 5 são aqui resumidas:

- 1) Os equipamentos empregados na obtenção do FRB devem ter seu comportamento definido através de uma análise estatística que permita determinar os erros intrínsecos de cada equipamento. Por exemplo, erros sistemáticos (5%) como o ocorrido com o Sistema de Medição de Radiação Óptica em 606 nm só serão percebidos se o comportamento do equipamento for estudado.
- 2) Não se deve assumir que uma placa de referência de sulfato de bário tem reflectância igual a 100%, pois isto implica em introduzir grandes erros (até 18%) no FRB. Por isto, se faz necessária a calibração de um padrão de reflectância primário, através de esfera integradora, e a calibração de placas de referência, em relação ao padrão de reflectância primário.
- 3) A calibração de radiômetros contribui em muito para melhorar a exatidão das medidas de grandezas absolutas e o FRR, apesar dos erros próprios do processo de calibração (5 a 6%).
- 4) Utilizar dois radiômetros ou duas unidades de leitura, para obter o FRB de um alvo, produz grandes erros (13% no campo e 22,4% no laboratório) se a intercalibração entre eles não for efetuada. E ainda, a aplicação indevida do fator de intercalibração, obtido no campo em alvos medidos em laboratório, ou vice-versa, também introduz grandes imprecisões.
- 5) Não é correto considerar impróprio o método de substituição para medições do FRB, devido a variações de irradiância em dias em que as condições atmosféricas estejam favoráveis. Os resultados deste trabalho comprovam a possibilidade de medir o alvo de interesse e, depois, a placa de referência, com um

intervalo de até 180 segundos e com erros toleráveis menores que 2%.

- 6) Ignorar as variações introduzidas no FRB (0 a 55%) provocadas pela alteração da geometria de radiação (ângulo zenital), pode levar a resultados 50% inferiores a seu valor real. Tais variações obrigam a identificar a geometria de radiação em que foi obtido o FRB pois, com diferenças desta monta, não é possível efetuar qualquer comparação, exceto se as correções aqui descritas (item 5.4.3) forem efetuadas.
- 7) A presença de vizinhos próximos ao alvo, ou à referência, por ocasião das medidas, introduz erros significativos (painel branco a 180° e 30 cm erro maior que 9%). Estes erros podem ser minimizados pela manutenção constante da geometria de radiação para a medida do alvo de interesse e da placa de referência.

Assim ficou demonstrado que é imprescindível conhecer os fatores que influenciam as medições de grandezas radiométricas, principalmente o fator de reflectância (FRB e FRR), bem como efetuar as correções possíveis para minimizar os erros introduzidos por falhas nas técnicas de medição a fim de que os resultados sejam verdadeiramente confiáveis.

Por fim, espera-se que os resultados aqui obtidos sirvam de embasamento para outras pesquisas, tais como: a construção de placas de referência com a verificação da reflectância das tintas empregadas; a estabilidade ou não dos métodos que utilizam dupla esfera na obtenção da reflectância absoluta de amostras; o uso de uma esfera que permita obter a reflectância absoluta $0^\circ/d$ e a influência da vizinhança sobre o FRB no campo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- American Society of Photogrammetry. *Manual of remote sensing*. Falls Church, VA, 1983. v. 1.
- American Society for Testing and Materials (ASTM). Standard recommended practice for preparation of reference white reflectance standards. In: _____ *Annual book of ASTM standards*. Easton, MD, 1986a. Section 14, v. 14.02, p. 210-212. (E 259-66).
- American Society for Testing and Materials (ASTM). Standard method for absolute calibration of reflectance standards. In: _____ *Annual book of ASTM standards*. Easton, MD, 1986b. Section 14, v. 14.02, p. 207-241. (E 306-71).
- American Society for Testing and Materials (ASTM). Standard practice for conducting an interlaboratory test program to determine the precision of tests methods. In: _____ *Annual book of ASTM standards*. Easton, MD, 1986c. Section 14, v. 14.02, p. 579-612. (E 691-79).
- Asrar, G. *Theory and applications of remote sensing*. New York, NY, John Wiley, 1989. v. 1.
- Barringer Research. *REFSPEC IIA: portable reflectance spectrometer operating manual*. Rexdale, Ontario, s.d..
- Beers, Y. *Introduction to the theory of errors*. Reading, Ma, Addison-Wesley, 1957.
- Baird, D.C. *An introduction to measurement theory and experiment design*. New Jersey, Prentice Hall, 1962.
- Biggar, S.F. et al. Laboratory calibration of field reflectance panels. In: Slater, P. N., ed. *Recent advances in sensors, radiometry and data processing for remote sensing*. Bellingham, WA, SPIE, 1988. p. 232-240. (SPIE - V.924). *Proceedings of International Society for Optical Engineering*, Orlando, Fl, Apr. 6-8, 1988.
- Bunnik, N.J.J.; Verhoef, W. The spectral reflectance of agricultural crops. Delft, Netherlands, NIWARS, 1974. (publ. n° 23).
- Budde, W. Calibration of reflectance standards. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 80A (4): 585-595, July-Aug. 1976.
- Campbell Scientific. *21x operator's manual*. Logan, UT, s.d.

- Chrien, T.G.; Green, R.O.; Eastwood, M.L. Accuracy of spectral and radiometry laboratory calibration. In: Vane, G., ed. *Imaging spectroscopy of the terrestrial environment*. Bellingham, WA, SPIE, 1990. p. 37-49. (SPIE - V.1298). *Proceedings of International Society for Optical Engineering*, Orlando, Fl, Apr. 16-17, 1990.
- Curran, P.J. *Principles of remote sensing*. Longman, New York, NY, 1985.
- Duggin, M.J. The field measurement of reflectance factors. *Photogrammetry Engineering and Remote Sensing*, 46(5):643-647, May 1980.
- _____ The need to use two radiometers simultaneously to make reflectance measurements in field conditions. *Photogrammetry Engineering and Remote Sensing*, 48(1):142-145, Jan. 1982.
- Duggin, M.J.; Philipson, W.R. Field measurement of reflectance: some major considerations. *Applied Optics*, 21(15):2833-2840, Aug. 1982.
- Duggin, M.J.; Cunia, T. Ground reflectance measurement techniques: a comparison. *Applied Optics*, 22(23):3771-3777, Dec. 1983.
- Eastman Kodak Company. *Eastman white reflectance standard*. Rochester, NY, 1977.
- Epema, G.F. Studies of errors in field measurements of the bidirectional reflectance factor. *Remote Sensing of Environment*, 35(1):37-49, Jan. 1991.
- Eppley Laboratory. *Eppley precision pyranometer*. Newport, RI, s.d.
- Frei, R.W. Diffuse reflectance spectroscopy: applications, standards and calibration with special reference to chromatography. *Journal of Research of the National Bureau of Standards*, 80A(4):551-565, May 1976.
- Goebel, D.G. Generalized integrating-sphere. *Applied Optics*, 6(1):125-128, 1967.
- Grum, F.; Luckey, G. W. Optical sphere paint and a working standard of reflectance. *Applied Optics*, 7(11):2289-2294, Nov. 1968.
- Grum, F. ; Wightman, T.E. Absolute reflectance of Eastman white reflectance standard. *Applied Optics*, 16(11):2775-2776, Nov. 1977.
- Guenther, B. Practical aspects of achieving accurate radiometric field measurements. *Remote Sensing of Environment*, 22(1):131-143, Jan. 1987
- Halliday, D. ; Resnick, R. *Física*. Rio de Janeiro, Livros Técnicos e Científicos, 1976. v. 2-2.

- Jackson, R.D. ; Pinter Jr, P.J.; Reginato, R.J.; Idso, S.B. Hand-held radiometry. *Agriculture reviews and manuals*, W-19, Oakland, U.S. Department of Agriculture, Feb. 1980.
- Jackson, R.D.; Slater, P.N. Absolute calibration of field reflectance radiometers. *Photogrammetry Engineering and Remote Sensing*, 52(2):189-196, Feb. 1986.
- Jackson, R.D.; Slater, P.N.; Moran, M.S. Accounting for diffuse irradiance on reference reflectance panels. *Remote Sensing of Environment*, 22(1):145-158, Jan. 1987.
- Jackson, R.D.; Moran, M.S.; Slater, P.N.; Biggar, S.F. Field calibration of reference reflectance panels. In: Slater, P. N., ed. Recent advances in sensors, radiometry and data processing for remote sensing. Bellingham, WA, SPIE, 1988. p. 241-248. (SPIE - V.924) . *Proceedings of International Society for Optical Engineering*, Orlando, Fl, Apr. 6-8, 1988.
- Jacquez, J.A.; Kuppenhein, H.K. Theory of integrating sphere. *Journal of the Optical Society of America*, 45(6):460-470, June 1955.
- Kimes, D.S.; Kirchner, J.A. Irradiance measurement errors due to the assumption of a lambertian reference panel. *Remote Sensing of Environment*, 22(12):141-149, May 1982.
- Kimes, D.S.; Kirchner, J.A.; Newcomb, W.W. Spectral radiance errors in remote sensing ground studies due to nearby objects. *Applied Optics*, 22(1):8-9, Jan. 1983.
- Leshkevich, G.A. Non-lambertian reference panel effect on spectral reflectance measurements of freshwater ice. *International Journal of Remote Sensing*, 9(4):825-832, Apr 1988a.
- Leshkevich, G.A. Measurements of a spray-painted barium sulfate reference panel. *Remote Sensing of Environment*, 24: 285-296, 1988b.
- Lintz Jr, J. ; Simonet, D.S. *Remote sensing of environment*. Reading, MA, Addison-Wesley, 1976.
- Lord, D.; Desjardins, D.L.; Dubé, P.A. Influence of wind on crop canopy reflectance measurements. *Remote Sensing of Environment*, 18(2):113-123, Oct. 1985.
- Meiners, H.F.; Eppenstein, W.; Moore, K.H. *Laboratory physics*. New York, NY, John Wiley, 1969.
- Milton, E.J. Does the use of two radiometers correct for irradiance changes during measurements? *Photogrammetry of Engineering and Remote Sensing*, 47(8):1223-1225, Aug. 1981.

Milton, E.J. Field measurement of reflectance factors: a further note. *Photogrammetry of Engineering and Remote Sensing*, 48(9):1474-1476, Sep. 1982.

_____. Principles of field spectroscopy. *International Journal of Remote Sensing*, 8(12):1807-1827, Dec. 1987.

_____. On the suitability of Kodak neutral test cards as reflectance standards. *International Journal of Remote Sensing*, 10(6):1041-1047, June 1989.

Mirabo, H.K.; Lillesaeter, O.; Hoimyr, T. Portable field spectrometer for reflectance measurements 340-2500 nm. *Applied Optics*, 21(15):2855-2858, Aug. 1982.

Nicodemus, F. E. Radiometry. In: Rudolf Kingslake. *Applied optics and optical engineering*. New York, NY, Academic, 1967. v.4, cap. 8, p. 263-307.

Nicodemus, F.E.; Richmond, J.C.; Ginsber, I.W.; Limperis, T. *Geometrical considerations and nomenclature for reflectance*. Washington, U.S. Department of Commerce, 1977. p. 1-52. (NBS Monograph 160).

Optronics Laboratory. *Model 740A optical radiation measurement system*. Orlando, FL, s.d.

Perdiz, V.A. Reflectância: teoria geral e uso da esfera integradora. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, Manaus, 24-29 Julho 1990. *Anais*. São José dos Campos, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 1990. v.2, p. 476-484.

Perdiz, V.A. ; Silva Filho, P.N. Reflectance: calibration of reference plates. In: Congresso Latinoamericano de Percepção Remota, 5., Cuzco, 28 oct. - 1 nov. 1991. SELPER - Capitulo Peruano, 1991, p. 496-517.

Philipson, W.R. et al. Field reflectance calibration with grey standard reflectors. *International Journal of Remote Sensing*, 10(6):1035-1039, June 1989.

Robinson, B.F.; Siehl, L.L. et al. Calibration procedures for measurement of reflectance factor in remote sensing field research. In: Measurements of optical radiations. Bellingham, WA, SPIE, 1979. p. 16-26. (SPIE - V.196). *Proceedings of International Society for Optical Engineering*, Orlando, Fl, 1979.

Silva, L.R. Radiation and instrumentation in remote sensing. In: SWAIN, P.H.; DAVIS, S.M. *remote sensing: the quantitative approach*. New York, NY, McGraw Hill, 1978. cap. 2: 21-135.

Slater, P.N. *Remote sensing: optics and optical systems*. Reading, MA, Addison-Wesley, 1980.

- Slater, P.N. The importance and attainment of accurate absolute radiometric calibration. In: Slater, P. N., ed. Remote sensing. Bellingham, WA, SPIE, 1984. p. 34-40 (SPIE - V.475). *Proceedings of the SPIE Critical Reviews of Technology Series, 6.*, Arlington, VA, May 1-2, 1984.
- Spectron Engineering. *SE590 Field-portable data-logging spectroradiometer: operating manual*. Denver, CL, s.d.
- Taylor, A.H. The measurement of diffuse reflection factor and the new absolute reflectometer. *Journal of the Optical Society of America*, 4(1):9-23, 1920.
- Weidner, V.R. ; Hsia, J.J. Reflection properties of pressed polytetrafluorethylene powder. *Journal of the Optical Society of America*, 71(7):856-861, July 1981.
- Wyatt, C.L. *Radiometric calibration: theory and methods*. New York, NY, Academic, 1978.