N O T I C E

THIS DOCUMENT HAS BEEN REPRODUCED FROM MICROFICHE. ALTHOUGH IT IS RECOGNIZED THAT CERTAIN PORTIONS ARE ILLEGIBLE, IT IS BEING RELEASED IN THE INTEREST OF MAKING AVAILABLE AS MUCH INFORMATION AS POSSIBLE

"Made available under NASA sponsorship in the interest of early and wide dissemination of Earth Resources Survey Program information and without liability for any use made thereof."

80-10259
CR-163366

(E80-10259) STUDY OF THE ATMOSPHERIC EFFECTS ON THE RADIATION DETECTED BY THE SENSOR ABOARD ORBITING PLATFORMS (ERTS/LANDSAT) M.S. Thesis - October 1978 (Instituto de Pesquisas Espaciais, Sao Jose) 65/43 N80-30842 Unclas 00259

RECEIVED BY
NASA STI FACILITY
DATE: 6-25-80
DCAF NO. 002949
PROCESSED BY
☒ NASA STI FACILITY
☐ ESA - SDS ☐ AIAA

CONSELHO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO CIENTIFICO E TECNOLOGICO
INSTITUTO DE PESQUISAS ESPACIAIS

1. Classificação *INPE-COM.1/TDL* *C.D.U.: 5515:621.38SR*	2. Período	4. Distribuição interna [ ] externa [X]
3. Palavras Chaves (selecionadas pelo autor) *EFEITOS ATMOSFÉRICOS* *RADIAÇÃO* *COPREÇÃO DE IMAGENS*		
5. Relatório nº *INPE-1689-TDL/021*	6. Data *Março, 1980*	7. Revisado por *Luiz C. B. Molion*
8. Título e Sub-Título *ESTUDO DOS EFEITOS ATMOSFÉRICOS SOBRE AS RADIAÇÕES PERCEBIDAS PELOS SENSORES A BORDO DE PLATAFORMAS ORBITAIS (ERTS/LANDSAT)*		9. Autorizado por *Nelson de Jesus Parada* *Diretor*
10. Setor *DME* Código		11. Nº de cópias *19*
12. Autoria *Tsutomu Morimoto*		14. Nº de páginas *109*
13. Assinatura Responsável		15. Preço

16. Sumário/Notas

A radiação proveniente de alvos terrestres interage com a atmosfera antes de ser detetada pelos sensores a bordo de satélites. O principal tipo de interação na região espectral do visível é o espalhamento, molecular e de aerosóis, que além de atenuar a radiação, acrescenta ainda a radiação difusa que mascara as informações dos alvos em estudo. O presente método é uma aplicação da equação de transferência radiativa, onde os parâmetros transmitância atmosférica, transmitância molecular e transmitância de aerosóis são calculadas pelo programa de computador denominado LOWTRAN-3, versão que utiliza perfil vertical atmosférico local obtido por radiossondagem, e a radiação difusa a nível dos sensores, calculada pela solução analítica da equação de transferência radiativa. Nos resultados preliminares do experimento realizado na região canavieira de Ribeirão Preto, observa-se um aspecto visual sensivelmente melhor, em relação à imagem, e um aumento quantitativo no reconhecimento de alvos, pois se conseguiu um acréscimo aproximado de 10% na área classificada como cana de açúcar. Sugerem-se, também, algumas modificações que teoricamente devem melhorar o método de correção de imagens utilizado neste trabalho.

17. Observações *Tese de Mestrado em Meteorologia, aprovada em 20 de Outubro de 1978.*

Aprovada pela Banca Examinadora
em cumprimento dos requisitos exigidos
para a obtenção do Título de Mestre em
Meteorologia

Dr.Antonio Divino Moura — Presidente da Banca

Dr.Luiz Carlos Baldicero Molion — Orientador

Dr.Ravindra Kumar — Co-Orientador

Dr.Renato Herz — Membro da Banca -IOUSP-

Dr.Y.Viswanadham — Membro da Banca

Original photography may be purchased from
EROS Data Center
Sioux Falls, SD 57198

Tsutomu Morimoto — Candidato

São José dos Campos, 20 de outubro de 1978

ÍNDICE

ABSTRACT ..... *iv*

LISTA DE SÍMBOLOS ..... *v*

LISTA DE FIGURAS ..... *x*

LISTA DE TABELAS ..... *xi*

CAPÍTULO I - INTRODUÇÃO 1

CAPÍTULO II - FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DO MODELO 9

2.1 - Equação de Transferência Radiativa 9
2.2 - Transmitância Atmosférica 22

CAPÍTULO III - ELIMINAÇÃO DO EFEITO ATMOSFÉRICO 35

3.1 - Algorítmo de Correção 35
3.2 - Método de Correção de Dados 38

CAPÍTULO IV - RESULTADOS EXPERIMENTAIS 51

CAPÍTULO V - CONCLUSÕES 61

AGRADECIMENTOS 63

BIBLIOGRAFIA 65

APÊNDICE A - FUNÇÃO FASE DE ESPALHAMENTO

APÊNDICE B - PROGRAMA LOWTRAN

APÊNDICE C - PROGRAMA ATA

ABSTRACT

The solar radiation reflected by targets on the erath's surface interacts with the atmosphere before being detected by the satellite sensors. In the visible wavelenght region, scattering by molecules and aerosols predominates on the interaction of the radiation with the atmosphere. In addition to attenuation, this interaction also contributes with diffuse radiation, thus changing the quality and quantity of radiation arriving at the satellite sensor. The purpose of this work is to correct the multispectral scanner (MSS) data of LANDSAT satellite for atmospheric interference, using LOWTRAN-3 program and the analytical solution of the radiative transfer equation. LOWTRAN-3 is based on a semi-empirical model and calculates the transmittance for a given atmospheric path for six model atmospheres or utilizes a local vertical atmospheric profile given by radiosound and two aerosol models. This method was used to correct the LANDSAT MSS data of Brasilia. It improved the contrast between different natural targets. In addition, the corrected images of two different dates were more similar than the original ones. This method was also applied to correct the LANDSAT MSS data of Ribeirão Preto. The corrected image gave a classification accuracy of sugar cane about 10% higher as compared to the original images. Some suggestions for improving this method for correcting LANDSAT MSS data are given.

LISTA DE SÍMBOLOS

a - constante real positiva

a_ℓ - coeficiente de Mie

b - constante real positiva

b_ℓ - coeficiente de Mie

$B(\tau)$ - função de Plank em profundidade ótica τ

c - constante inteira positiva

C_1 - constante de integração

C_2 - constante de integração

C_ν - coeficiente de absorção en função do comprimento de onda

d - constante real positiva

dA - elemento de área (cm^2)

$d\ell$ - elemento da trajetória percorrida pela radiação (km)

dz - elemento da trajetória vertical (km)

$d\Omega$ - elemento de ângulo sólido (Sr)

D - densidade das partículas (partículas cm^{-3})

e - número neperiano

E_o - irradiância direta no topo da atmosfera (mw cm^{-2})

E_λ - irradiância espectral (mw cm^{-2} μm^{-1})

$E\uparrow'$ - irradiância espectral difusa ascendente para $\rho=0$ (mw cm^{-2} μm^{-1})

$E\downarrow'$ - irradiância espectral difusa descendente para $\rho=0$ (mw cm^{-2} μm^{-1})

$E\uparrow''$ - irradiância espectral difusa ascendente para $\rho\neq0$ (mw cm^{-2} μm^{-1})

$E\downarrow''$ - irradiância espectral difusa descendente para $\rho\neq0$ (mw cm^{-2} μm^{-1})

$E\downarrow(0)$ - irradiância espectral difusa descendente no topo da atmosfera (mw cm^{-2} μm^{-1})

$E\downarrow(\tau)$ - irradiância espectral difusa descendente em τ ($mw\ cm^{-2}\ \mu m^{-1}$)

$E\downarrow(\tau_o)$ - irradiância espectral difusa descendente na superfície ($mw\ cm^{-2}\ \mu m^{-1}$)

$E\uparrow(\tau_o)$ - irradiância espectral difusa ascendente da superfície ($mw\ cm^{-2}\ \mu m^{-1}$)

$E\uparrow(\tau)$ - irradiância espectral difusa ascendente em τ ($mw\ cm^{-2}\ \mu m^{-1}$)

$E_T\downarrow(\tau)$ - irradiância espectral difusa total descendente em τ ($mw\ cm^{-2}\ \mu m^{-1}$)

$E_s(\tau)$ - irradiância espectral solar em τ ($mw\ cm^{-2}\ \mu m^{-1}$)

F_1 - função radiância

F_2 - função radiância

$F\uparrow$ - metade da soma das irradiâncias difusas

$F\downarrow$ - metade da subtração das irradiâncias difusas

G - função radiância

h - altitude (km)

H - função irradiância

I - função irradiância

I_λ - intensidade radiante espectral monocromática ($mw\ Sr^{-1}\ \mu m^{-1}$)

$I_{\lambda o}$ - intensidade radiante espectral monocromática inicial ($mw\ Sr^{-1}\ \mu m^{-1}$)

κ - coeficiente de espalhamento (km^{-1})

k_a - coeficiente de espalhamento do aerosol (km^{-1})

k_m - coeficiente de espalhamento molecular (km^{-1})

ℓ - índice de somatória

L_λ - radiância espectral ($mw\ cm^{-2}\ Sr^{-1}\ \mu m^{-1}$)

L_s - radiância espectral direta na superfície (mw cm^{-2} Sr^{-1} μm^{-1})

L_T - radiância espectral total nos sensores (mw cm^{-2} Sr^{-1} μm^{-1})

L_{T_1} - radiância espectral máxima que atinge o satélite (mw cm^{-2} Sr^{-1} μm^{-1})

L_{T_2} - radiância espectral mínima que atinge o satélite (mw cm^{-2} Sr^{-1} μm^{-1})

L_{Ti} - radiância espectral total correspondente ao pixel i (mw cm^{-2} Sr^{-1} μm^{-1})

L_{DS} - radiância espectral difusa na superfície (mw cm^{-2} Sr^{-1} μm^{-1})

L_{TR} - radiância espectral transmitida (mw cm^{-2} Sr^{-1} μm^{-1})

$L(\tau,\mu,\phi)$ - radiância espectral total em (mw cm^{-2} Sr^{-1} μm^{-1})

$L(o,-\mu,\phi)$- radiância espectral difusa solar no topo da atmosfera (mw cm^{-2} Sr^{-1} μm^{-1})

$L_I(\tau_o,\mu,\phi)$- radiância espectral intrínseca da superfície (mw cm^{-2} Sr^{-1} μm^{-1})

$L_{DT}(o,\mu,\phi)$- radiância espectral difusa no topo da atmosfera (mw cm^{-2} Sr^{-1} μm^{-1})

m - índice de refração

n - expoente

n(r) - função distribuição de aerosol

p - função fase de espalhamento

P - pressão atmosférica (mb)

P_ℓ - polinômio de Legendre

P_o - pressão atmosférica padrão ao nível do mar (mb)

$Q_s(m,x)$ - fator de eficiência do espalhamento

r - raio do aerosol (μm)

$|S_1|^2$ - amplitude de espalhamento

$|S_2|^2$ - amplitude de espalhamento

T - temperatura do ar (^oC)

T_o - temperatura padrão (^oK)

x - parâmetro do tamanho

α - coeficiente de absorção (km^{-1})

α_a - coeficiente de absorção do aerosol (km^{-1})

α_m - coeficiente de absorção molecular (km^{-1})

γ - coeficiente volumétrico de atenuação (km^{-1})

$\bar{\gamma}$ - coeficiente volumétrico de atenuação média (km^{-1})

δ - função delta

θ_o - função zenital do sol (grau)

θ - ângulo nadir de visão (grau)

θ' - ângulo inicial de espalhamento (grau)

λ - comprimento de onda (μm)

μ - $\cos\theta$

μ_o - $\cos\theta_o$

μ' - $\cos\theta'$

ν - frequência (sec^{-1})

ρ - albedo de superfície

ρ_a - refletância difusa efetiva do alvo

ρ' - refletância bidirecional

$\bar{\rho}$ - albedo médio da superfície

η - fração da energia espalhada na direção posterior ao centro de interação

τ - profundidade ótica

τ_a	- profundidade ótica de aerosol
τ_o	- profundidade ótica total
τ_r	- profundidade ótica de Rayleigh
T	- transmitância monocromática
$\overline{T}$	- transmitância média
$T_{\Delta\nu}(\nu)$	- transmitância média sobre um intervalo espectral
$\overline{T}_{\Delta\nu}(H_2O)$	- transmitância de vapor de água
$\overline{T}_{\Delta\nu}(O_3)$	- transmitância de ozônio
$\overline{T}_{\Delta\nu}(\text{Rayleigh})$	- transmitância de Rayleigh
$T_{\Delta\nu}(\text{aerosol})$	- transmitância de aerosol
ϕ	- ângulo azimutal de visão (grau)
ϕ_o	- ângulo azimutal do sol (grau)
ϕ'	- ângulo azimutal inicial de espalhamento (grau)
χ	- ângulo de espalhamento
ω	- concentração de absorvente gm cm^{-2} km^{-1}
ω_o	- albedo de espalhamento (constante)
$\omega(\tau)$	- albedo de espalhamento em τ
ω^*	- quantidade equivalente de absorvente (gm cm^{-2})
ψ_ℓ	- função Riccati-Bessel
ψ'_ℓ	- derivada primeira da função Riccati-Bessel
ξ_ℓ	- função Riccati-Bessel
ξ'_ℓ	- derivada primeira da função Riccati-Bessel

LISTA DE FIGURAS

I.1 - O sistema LANDSAT (Barbosa, 1975)..... 2

I.2 - Radiâncias recebidas pelos sensores orbitais (LaRocca e.... Turner, 1975)..... 3

I.3 - Geometria do Sensoriamento da superfície terrestre..... 7

II.1 - Representação da função distribuição das partículas de ..... aerosóis (Deirmendjian, 1969)..... 30

II.2 - Transmitância atmosférica para um percurso vertical do nível do mar para o espaço a diversos modelos atmosféricos (Selby e McClatchey, 1975)..... 33

III.1 - Fluxograma do método de correção de dados..... 39

III.2 - Representação das curvas de transmitâncias espectrais calculadas em função da visibilidade..... 43

III.3 - Representação das curvas de transmitâncias espectrais em função do ângulo de escaneamento..... 44

III.4 - Curva de transmitância em função da profundidade ótica total, obtida com os resultados do LOWTRAN-3..... 45

III.5 - Dependência espectral da profundidade ótica de Rayleigh e da profundidade ótica de aerosol, obtidas com os resultados do LOWTRAN-3..... 46

III.6 - Representação da variação dos níveis de cinza em diferentes azimutes..... 48

IV.1 - Imagens original e corrigida do canal MSS 4 do LANDSAT, órbita/ponto (192/23), Brasília (21/06/74)..... 52

IV.2 - Imagens original e corrigida do canal MSS do LANDSAT, órbita/ponto (192/23), Brasília (21/06/74)..... 52

IV.3 - Imagens original e corrigida, composição colorida dos canais MSS 4,5 e 7 do LANDSAT, órbita/ponto (192/23), Brasília (21/06/74)..... 53

LISTA DE TABELAS

II.1 - Coeficientes (n) determinados empiricamente no "Airforce..... Geophysics Lab"..... 25

II.2 - Composição normal da atmosfera..... 26

II.3 - Modelo de distribuição vertical do aerosol para atmosferas "clara" e "úmida" (McClatchey et al, 1972)..... 31

III.1 - Canais MSS do LANDSAT..... 35

III.2 - Estado Atmosférico de Brasília em 21/06/1974 (Radiossondagem). 40

III.3 - Representação do estado atmosférico de Ribeirão Preto tomado a radiossondagem de Brasília em 01/07/1977..... 41

III.4 - Coeficientes angulares dos níveis de cinza versus as radiâncias totais..... 47

III.5 - Parâmetros utilizados na correção da imagem órbita/ponto (178/27) de Ribeirão Preto (01/07/1977)..... 49

III.6 - Refletâncias individuais dos alvos reconhecidos no processamento automático preliminar da imagem..... 50

IV.1 - Classificação das diferentes fases de cultura da cana (projeto estatística agrícola do departamento de Sensoriamento Remoto-INPE)..... 56

IV.2 - Áreas comparativas da avaliação de cana de açúcar entre as fotografias aéreas, a imagem original e a imagem corrigida do LANDSAT..... 58

CAPÍTULO I

INTRODUÇÃO

Há aproximadamente cinco anos que o Instituto de Pesquisas Espaciais participa do programa LANDSAT, e dois anos que analisa imagens digitalizadas, através do IMAGE-100, sistema de processamento de dados, desenvolvido pela Companhia "General Eletric", para extrair informações temáticas das imagens multiespectrais.

Os satélites da série LANDSAT captam imagens multiespectrais da superfície terrestre e as transmitem para o centro de rastreamento e recepção (Figura I.1), onde os sinais são convertidos em fotografias e em fitas magnéticas compatíveis com computador, que depois são analisadas pelos usuários, principalmente em pesquisas que envolvem o levantamento de recursos naturais.

Entretanto, esses dados coletados pelos sensores do MSS não correspondem às verdadeiras características das superfícies, porque a atmosfera interage com a radiação refletida na superfície terrestre, alterando a sua distribuição espectral e espacial, absorvendo-a, refletindo-a e espalhando-a. A névoa úmida reduz o contraste entre os alvos de uma cena, dificultando a interpretação da imagem; o espalhamento pelas partículas atmosféricas conduz a uma complexa redistribuição da radiação e provoca multiespalhamento, acrescentando radiação difusa ao campo de visão do sensor (Figura I.2), atenuando o sinal proveniente do solo.

Melhores informações da superfície terrestre, e dos parâmetros atmosféricos que atenuam a radiação, são de interesse de várias áreas científicas, tais como: cartografia, geologia, oceanografia, agricultura, hidrologia, engenharia florestal, estudos urbanos e rurais e, particularmente, meteorologia.

Além disso, as imagens servem de subsídio para planejamentos sócio-econômicos, levando a uma administração mais racional dos

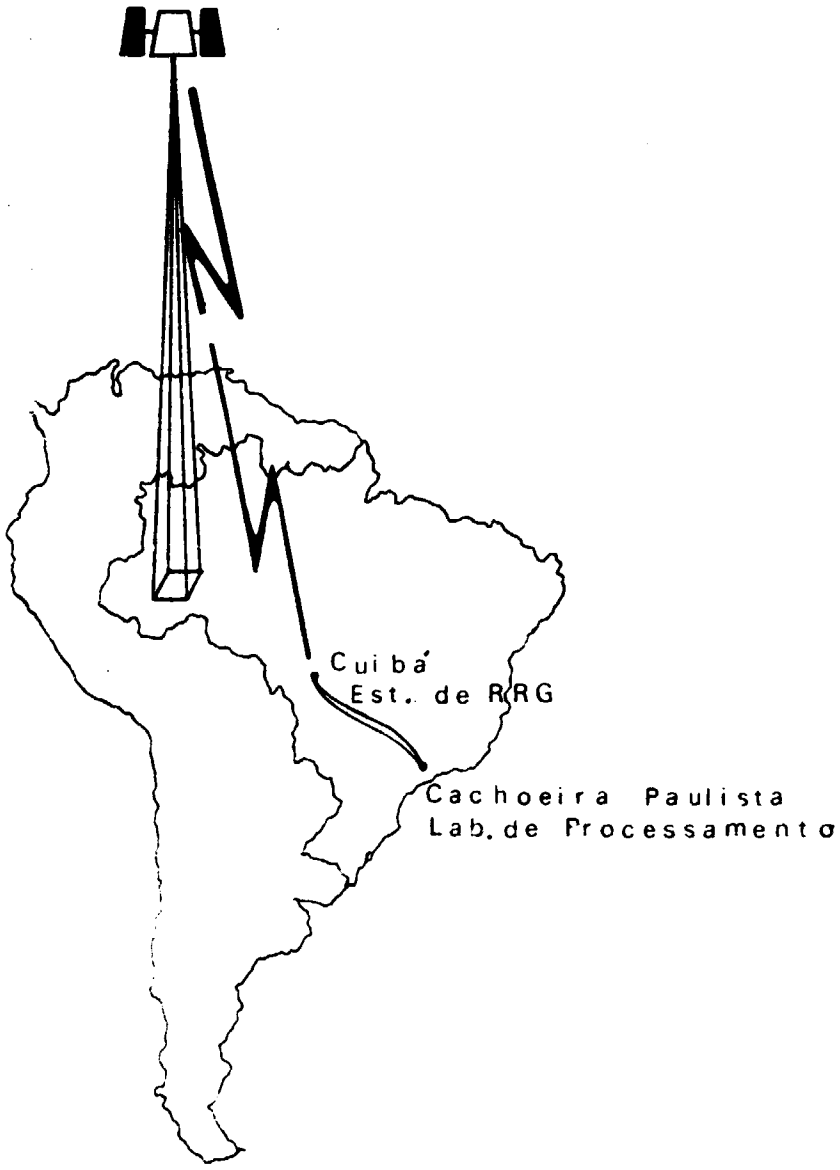

Fig. I.1 - O Sistema LANDSAT (Barbosa, 1975)

L_S = radiância solar direta

L_D = radiância difusa

L_{DS} = radiância difusa refletida na superfície

L_G = radiância da superfície

L_I = radiância intrínseca

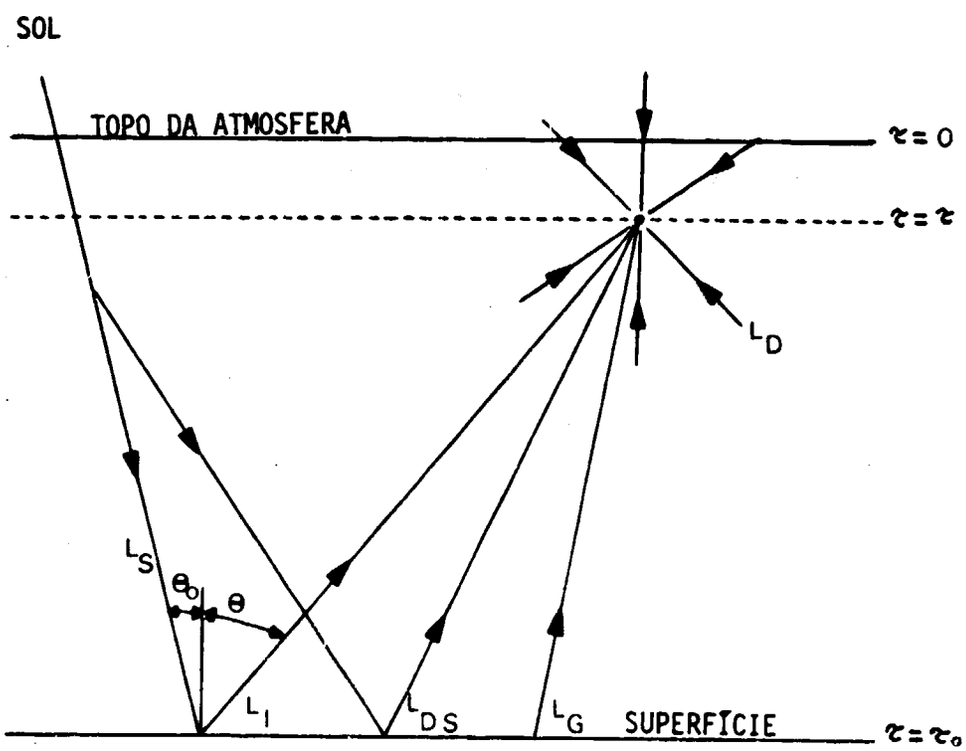

Fig. I.2 - Radiâncias Recebidas pelos Sensores Orbitais
(LaRocca e Turner, 1975)

recursos naturais, o que é um dos maiores problemas da nossa época.

Entre as aplicações práticas (Barbosa, 1975) podem-se mencionar:

- classificação das cenas, quanto às suas características e configurações geológicas, tais como tipos, falhas, estruturas, dobras, etc.;
- redução de perdas na agricultura e nas reservas florestais, através da rápida identificação das causas;
- planejamento da distribuição da produção agrícola anual, através da estimativa das colheitas por áreas;
- melhor planejamento e desenvolvimento urbano;
- monitoria de fenômenos dinâmicos, como sedimentação, mudanças litorâneas, erosão, crescimentos de colheitas, níveis das reservas de água etc.;
- levantamentos de coberturas de nuvens.

As correções dos efeitos atmosféricos nas imagens exigem técnicas que se fundamentam no modelo de transferência radiativa, para calcular-se as irradiâncias ascendentes e descendentes, a radiação difusa, a transmitância atmosférica e outros parâmetros.

LaRocca e Turner (1975) publicaram um trabalho de revisão bibliográfica contendo várias técnicas para cálculos da transmitância atmosférica e radiância atmosférica, reunindo-as, comparando-as e acrescentando-lhes algumas informações auxiliares.

Os trabalhos de Chandrasekhar (1950) e Ambartsumian (1943) marcaram a origem da moderna teoria de transferência radiativa; o primeiro deduziu um conjunto de equações não lineares, de solução exata, para determinação do campo de radiação para uma atmosfera plano-paralela, iluminada pela radiação solar. Posteriormente, surgiram outros métodos matemáticos que também conduzem à soluções exatas. Dentre elas destacam-se:

a) método de iteração que consiste em converter a equação de transferência numa equação integral, expressa por série de Neumann;

b) método de harmônico esférico que utiliza as propriedades de ortogonalidade na equação de transferência para transformá-la em problema de auto-valor;

c) método de ordenadas discretas, que consiste em montar um conjunto de equações tornando discretas as variáveis, ângulos e camadas atmosféricas;

d) método de momento, onde se atribui um certo momento à radiância, em função do ângulo zenital;

e) método de duplicagem, que toma, em camada sucessiva, dois valores de profundidade ótica das camadas precedentes para evitar consumo excessivo de tempo;

f) método de Monte Carlo, que se baseia em procedimento estatístico, atribuindo probabilidades à partícula com os processos físicos envolvidos.

Esses métodos foram utilizados para modificar o tratamento originalmente desenvolvido. Todos esses métodos apresentam desvantagem quanto ao tempo computacional, adaptabilidade e praticabilidade.

Por outro lado, como em muitas aplicações não são necessários resultados altamente precisos, surgiram vários métodos aproximados que produzem resultados razoavelmente satisfatórios e de rápido desenvolvimento computacional. Entre esses métodos vale a pena mencionar:

a) O método de Schuster-Schwarzschild, no qual o campo de radiação é suposto isotrópico, separando-o em campo ascendente e descendente, utilizando valores médios para esses campos.

b) O método de Eddington, procedimento em que se toma a média do campo de radiação sobre o espaço todo, sendo o campo suposto quase-isotrópico.

c) O método de Ramanova, que considera a função fase de espalhamento altamente anisotrópica, pelo fato de levar em conta ângulos

muito pequenos.

d) O método de Turner, que considera a função fase de espalhamento como uma soma de função delta, considerando que o espalhamento, devido aos aerosóis, é predominante na direção de incidência da radiação.

O objetivo principal deste trabalho é averiguar como o efeito atmosférico de espalhamento influi sobre as imagens, para, dessa forma, obter imagens corrigidas desse efeito.

Utilizou-se no processo um modelo de transferência radiativa, considerando uma atmosfera espalhadora plano-paralela, homogênea, isotrópica, onde a radiação penetra (Figura I.3) formando um determinado ângulo θ_o com a normal, em regiões espectrais do visível e do infravermelho próximo. Para tal, escolheu-se o método desenvolvido por Turner e Spencer (1972) e, para os cálculos da transmitância atmosférica, profundidade ótica atmosférica, profundidade ótica de Rayleigh e profundidade ótica do aerosol, utilizou-se o método desenvolvido por Selby e McClatchey (1975).

Em 1961, Altshuler, utilizando métodos empíricos, sugeriu que o cálculo da transmitância fosse baseado principalmente nas medidas de transmitância obtidas em laboratórios e complementado com a teoria de bandas de absorção ou linhas de absorção molecular (Goody, 1964). Selby e McClatchey (1975) decidiram codificar este esquema empírico de previsão, elaborando um programa de computador denominado Low Transmission-3 (LOWTRAN-3), que calcula a transmitância atmosférica entre dois níveis, cobrindo o intervalo espectral de 0,25 μm a 28,5 μm (350 a 400000 cm^{-1}) num passo de 5 cm^{-1}, com resolução espectral de 20 cm^{-1}. O cálculo é feito sobre uma atmosfera representada por 33 camadas de um dos 6 modelos atmosféricos: Tropical (15^oN), Latitude Média-Verão (45^oN), Latitude Média-Inverno (45^oN), Sub-Ártico-Verão (60^oN), Sub-Ártico-Inverno (45^oN), ou um outro que utiliza os dados de radiossondagem.

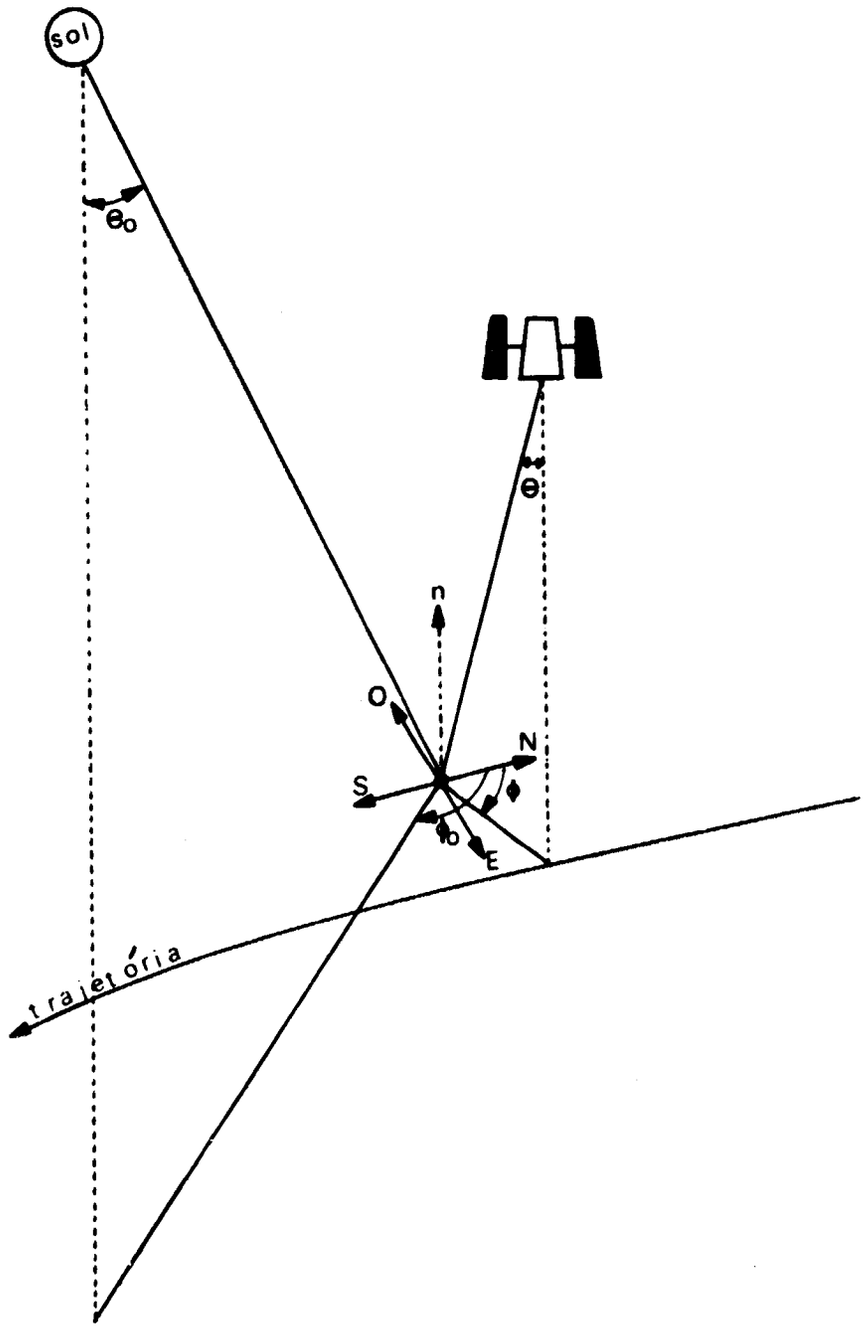

Fig. I.3 - Geometria do Sensoriamento da Superfície Terrestre.

CAPÍTULO II

FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA DO MODELO

2.1 - EQUAÇÃO DE TRANSFERÊNCIA RADIATIVA

A complexidade matemática, envolvida num modelo de transferência radiativa, é a resolução da equação integro-diferencial respectiva. Manipulou-se esta equação para determinar o campo de radiação no interior de uma atmosfera plano-paralela, homogênea e com elementos espalhadores, segundo o procedimento desenvolvido por Turner (1972).

A equação fundamental da radiação solar, penetrando na atmosfera terrestre com ângulo zenital Θ_o($\mu_o = \cos \Theta_o$) e ângulo azimutal ϕ_o, é expressa por:

$$\mu \frac{dL}{d\tau} = L(\tau,\mu,\phi) - \frac{\omega_o}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^{1} p(\mu,\phi,\mu',\phi') \, L(\tau,\mu',\phi') \, d\mu' d\phi'$$

$$- \frac{\omega_o}{4\pi} E_s(\tau) \, p(\mu,\phi,-\mu_o,\phi_o) - (1-\omega_o) \, B(\tau) \qquad \text{(II.1)}$$

onde:

τ = profundidade ótica

ω_o = albedo de espalhamento simples

B = função de Planck

L = radiância espectral total, para um determinado τ

p = função fase de espalhamento

E_s = radiância solar em τ

PRECEDING PAGES BLANK NOT FILMED

As maiores dificuldades durante a resolução da equação consistem em determinar as formas das duas funções, função do albedo de espalhamento simples e função fase de espalhamento. As aproximações admitidas na resolução da equação (Turner, 1972) são:

a) Atmosfera plano-paralela, limitada superiormente pelo vácuo e inferiormente pela superfície;

b) Atmosfera homogênea, isto é, as proporções dos constituintes são constantes com altitude, implicando que

$$\omega(\tau) = \omega_o \qquad \text{(II.2)}$$

$$p(\tau,\mu,\phi,\mu',\phi') = p(\mu,\phi,\mu',\phi') \qquad \text{(II.3)}$$

c) Atmosfera isotrópica: significa que o efeito de espalhamento é independente da direção inicial da radiação;

d) Não existe radiação difusa penetrando pelo topo da atmosfera, proveniente do espaço exterior;

e) Superfície é lambertiana, ou seja, perfeitamente difusora;

f) Não ocorre o efeito de absorção na região de espalhamento;

g) A função fase de espalhamento pode ser aproximada como:

$$p(\mu,\phi,\mu',\phi') = 4\pi\eta\delta(\mu-\mu')\ \delta(\phi-\phi')$$

$$+ 4\pi(1-\eta)\ \delta(\mu+\mu')\ \delta(\pi+\phi-\phi') \qquad \text{(II.4)}$$

onde:

μ = cos ϕ = cosseno do ângulo de espalhamento

μ' = cos ϕ' = cosseno do ângulo inicial de espalhamento

δ = função delta

η = fração da energia espalhada para frente, depois do centro de interação, onde pode-se aproximá-la mediante a equação

$$\eta = \frac{0{,}5\,\tau_R + 0{,}95\,\tau_A}{\tau_R + \tau_A} \qquad \text{(II.5)}$$

onde:

τ_R = profundidade ótica total de Rayleigh

τ_A = profundidade ótica total de Aerosol

Para a região do espectro visível, a função de radiação de Planck é desprezível; assim, reescrevendo a equação (II.1), tem-se:

$$\mu \frac{dL}{d\tau} = L(\tau,\mu,\phi) - \frac{\omega_o}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_{-1}^{1} p(\mu,\phi,\mu',\phi')\, L(\tau,\mu',\phi')\, d\mu' d\phi'$$

$$- \frac{\omega_o}{4\pi} E_s(\tau)\, p(\mu,\phi,-\mu_o,\phi_o) \qquad \text{(II.6)}$$

A equação integro-diferencial acima pode ser resolvida para determinar a radiação difusa em algum ponto da atmosfera, com as seguintes condições de contorno

$$L(0,-\mu,\phi) = 0 \qquad \text{(II.7)}$$

$$L_I(\tau_o,\mu,\phi) = \int_0^{2\pi} \int_{-1}^{1} \mu' \rho'(\mu,\phi,-\mu',\phi') \Big[L_{DS}(\tau_o,-\mu',\phi')$$

$$+ L_s(\tau_o,-\mu',\phi') \Big] d\mu' d\phi' \qquad \text{(II.8)}$$

onde:

$L(0,-\mu,\phi)$ = radiância difusa solar no topo da atmosfera

$L_I(\tau_o,\mu,\phi)$ = radiância intrínseca da superfície

$L_{DS}(\tau_o,-\mu',\phi)$ = radiância difusa na superfície

$L_s(\tau_o,-\mu',\phi')$ = radiância solar direta na superfície

$\rho'(\mu,\phi,-\mu',\phi')$ = refletância bidirecional da superfície

A condição de contorno dada pela equação (II.7) significa que não existe radiação difusa penetrando pelo topo da atmosfera, e a equação (II.8) mostra que se devem integrar as radiações difusa e direta, com a refletância, sobre todo o hemisfério, centrado no alvo.

Multiplicando a equação (II.6) por $d\mu$ e $d\phi$ e integrando a de 0 até 1 e de 0 até 2π e similarmente de -1 até 0 e 0 a 2π, obtêm se duas equações, respectivamente,

$$\frac{d}{d\tau}\int_0^{2\pi}\int_0^1 \mu L(\tau,\mu,\phi)d\mu d\phi = \int_0^{2\pi}\int_0^1 L(\tau,\mu,\phi)d\mu d\phi$$

$$-\frac{\omega_o}{4\pi}\int_0^{2\pi}\int_0^1\int_0^{2\pi}\int_{-1}^1 p(\mu,\phi,\mu',\phi')\,L(\tau,\mu',\phi')d\mu' d\phi' d\mu d\phi$$

$$-\frac{\omega_o}{4\pi}E_s(\tau)\int_0^{2\pi}\int_0^1 p(\mu,\phi,-\mu_o,\phi_o)d\mu d\phi \qquad \text{(II.9)}$$

$$\frac{d}{d\tau}\int_0^{2\pi}\int_{-1}^{0}\mu L(\tau,\mu,\phi)d\mu d\phi = \int_0^{2\pi}\int_{-1}^{0} L(\tau,\mu,\phi)\, d\mu d\phi$$

$$- \frac{\omega_o}{4\pi}\int_0^{2\pi}\int_{-1}^{0}\int_0^{2\pi}\int_{-1}^{1} P(\mu,\phi,\mu',\phi')\, L(\tau,\mu',\phi')\, d\mu' d\phi' d\mu d\phi$$

$$- \frac{\omega_o}{4\pi}\, E_s(\tau)\int_0^{2\pi}\int_{-1}^{0} p(\mu,\phi,-\mu_o,\phi_o)\, d\mu d\phi \qquad \text{(II.10)}$$

Definindo

$$L\uparrow(\tau) = \int_0^{2\pi}\int_0^{1} L(\tau,\mu,\phi)\, d\mu d\phi \qquad \text{(II.11)}$$

$$L\downarrow(\tau) = \int_0^{2\pi}\int_{-1}^{0} L(\tau,\mu,\phi)\, d\mu d\phi \qquad \text{(II.12)}$$

onde as setas $\uparrow$ e $\downarrow$ indicam respectivamente as radiações ascendente e descendente; as irradiâncias ascendente e descendente são, portanto, dadas por:

$$E\uparrow(\tau) = \int_0^{2\pi}\int_0^{1} \mu L(\tau,\mu,\phi)\, d\mu d\phi \qquad \text{(II.13)}$$

$$E\downarrow(\tau) = -\int_0^{2\pi}\int_{-1}^{0} \mu L(\tau,\mu,\phi)\, d\mu d\phi \qquad (II.14)$$

nas quais todas as quantidades são positivas.

Substituindo (II.11), (II.12), (II.13) e (II.14) nas equações (II.9) e (II.10), tem-se

$$\frac{d}{d\tau} E\uparrow(\tau) = L\uparrow(\tau)$$

$$- \frac{\omega_o}{4\pi}\int_0^{2\pi}\int_0^{1}\int_0^{2\pi}\int_{-1}^{1} p(\mu,\phi,\mu',\phi')\, L(\tau,\mu',\phi')\, d\mu' d\phi' d\mu d\phi$$

$$- \frac{\omega_o}{4\pi} E_s(\tau)\int_0^{2\pi}\int_0^{1} p(\mu,\phi,-\mu_o,\phi_o)\, d\mu d\phi \qquad (II.15)$$

$$- \frac{d}{d\tau} E\downarrow(\tau) = L\downarrow(\tau)$$

$$- \frac{\omega_o}{4\pi}\int_0^{2\pi}\int_{-1}^{0}\int_0^{2\pi}\int_{-1}^{1} p(\mu,\phi,\mu',\phi')\, L(\tau,\mu',\phi')\, d\mu' d\phi' d\mu d\phi$$

$$- \frac{\omega_o}{4\pi} E_s(\tau)\int_0^{2\pi}\int_{-1}^{0} p(\mu,\phi,-\mu_o,\phi_o)\, d\mu d\phi \qquad (II.16)$$

Considerando a função fase de espalhamento, dada pela equação (II.4), e representando η analiticamente pela equação

$$\eta = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 p(\mu,\phi,\mu',\phi')\, d\mu d\phi \qquad \text{(II.17)}$$

$$(1-\eta) = \frac{1}{4\pi} \int_0^{2\pi} \int_0^1 p(\mu,\phi,\mu',\phi')\, d\mu d\phi \qquad \text{(II.18)}$$

tem-se:

$$\int_0^{2\pi} \int_{-1}^1 p(\mu,\phi,\mu',\phi')\, L(\tau,\mu',\phi')\, d\mu' d\phi' = 4\pi\eta L(\tau,\mu,\phi)$$

$$+ 4\pi(1-\eta)\, L(\tau,-\mu,\pi+\phi) \qquad \text{(II.19)}$$

Substituindo em (II.15) e (II.16) e desenvolvendo-as obtém-se:

$$\frac{dE_+(\tau)}{d\tau} = (1-\omega_o\eta)L_+(\tau) - \omega_o(1-\eta)L_+(\tau)$$

$$- \omega_o(1-\eta)E_s(\tau) \qquad \text{(II.20)}$$

$$-\frac{dE\downarrow}{d\tau}(\tau) = (1-\omega_o\eta)L\downarrow(\tau) - \omega_o(1-\eta)L\uparrow(\tau) - \omega_o\eta E_s(\tau) \qquad (II.21)$$

Admitindo-se a aproximação de Schuster-Schawarzschild, normalizando o campo de irradiância difusa, ou seja

$$L\uparrow\downarrow(\tau) = \frac{E\uparrow\downarrow}{\mu_o}(\tau) \qquad (II.22)$$

As equações diferenciais tornam-se

$$\frac{dE\uparrow}{d\tau}(\tau) = \frac{(1-\omega_o\eta)}{\mu_o}E\uparrow(\tau) - \frac{\omega_o(1-\eta)}{\mu_o}E\downarrow(\tau) - \omega_o(1-\eta)E_s(\tau) \qquad (II.23)$$

$$-\frac{dE\downarrow(\tau)}{d\tau} = \frac{(1-\omega_o\eta)}{\mu_o}E\downarrow(\tau) - \frac{\omega_o(1-\eta)}{\mu_o}E\uparrow(\tau) - \omega_o\eta E_s(\tau) \qquad (II.24)$$

que ainda podem ser escritas como

$$\frac{d}{d\tau}\left[E\uparrow(\tau) + E\downarrow(\tau)\right] = \frac{1}{\mu_o}\left[1+\omega_o(1-2\eta)\right]\left[E\uparrow(\tau) - E\downarrow(\tau)\right] -$$

$$\omega_o(1-2\eta)\, E_s(\tau) \qquad (II.25)$$

$$\frac{d}{d\tau}\left[E\uparrow(\tau) - E\downarrow(\tau)\right] = \frac{1}{\mu_o}(1-\omega_o)\left[E\uparrow(\tau) + E\downarrow(\tau)\right]$$

$$- \omega_o E_s(\tau) \qquad \text{(II.26)}$$

Considerando

$$F\uparrow = \frac{E\uparrow + E\downarrow}{2} \qquad \text{(II.27)}$$

$$F\downarrow = \frac{E\uparrow - E\downarrow}{2} \qquad \text{(II.28)}$$

tem-se

$$\frac{dF\uparrow}{d\tau} = \frac{1}{\mu_o}\left[1 + \omega_o(1-2n)\right] F\downarrow - \omega_o(1-2n)E_s(\tau) \qquad \text{(II.29)}$$

$$\frac{dF\downarrow}{d\tau} = \frac{1}{\mu_o}(1-\omega_o)\, F\uparrow - \omega_o\, E_s(\tau) \qquad \text{(II.30)}$$

Como, no caso, está-se considerando o espalhamento puro, ou seja, $\omega_o \cong 1$, as equações acima são simplificadas para

$$\frac{dF\downarrow}{d\tau} = \frac{2}{\mu_o}(1-\eta)F\downarrow - (1-2\eta)E_s(\tau)$$

$$= \frac{2}{\mu_o}(1-\eta)F\downarrow - (1-2\eta)E_o e^{-\tau/\mu_o} \qquad \text{(II.31)}$$

$$\frac{dF\downarrow}{d\tau} = -E_s(\tau) = -E_o e^{-\tau/\mu_o} \qquad \text{(II.32)}$$

Resolvendo as equações diferenciais, obtém-se

$$F\downarrow = \mu_o E_o e^{-\tau/\mu_o} + C_1 \qquad \text{(II.33)}$$

$$F\uparrow = -\mu_o E_o e^{-\tau/\mu_o} + \frac{2}{\mu_o}(1-\eta)\tau C_1 + C_2 \qquad \text{(II.34)}$$

Das equações (II.27) e (II.28), tem-se

$$E\downarrow(\tau) = \left[-\mu_o + 2(1-\eta)\tau\right]\frac{C_1}{2\mu_o} + \frac{C_2}{2} - \mu_o E_o e^{-\tau/\mu_o} \qquad \text{(II.35)}$$

$$E\uparrow(\tau) = \left[\mu_o + 2(1-\eta)\tau\right]\frac{C_1}{2\mu_o} + \frac{C_2}{2} \qquad \text{(II.36)}$$

Considerando a superfície lambertiana, as condições de contorno reduzem-se a

$$E\downarrow(\tau) = 0 \tag{II.37}$$

$$E\uparrow(\tau_o) = \rho\left[E\downarrow(\tau_o) + \mu_o E_o e^{-\tau_o/\mu_o}\right] \tag{II.38}$$

onde as constantes C_1 e C_2 são totalmente determinadas para cada uma das equações, (II.35) e (II.36). Essas equações são aquelas que representam, respectivamente, os campos de irradiâncias descendentes e ascendentes; considera-se que cada um desses é resultante de outros dois campos distintos, um campo calculado com $\rho=0$ e outro com $\rho\neq0$. Assim, obtem-se:

$$E\downarrow(\tau) = \frac{\mu_o E_o}{\mu_o+(1-\eta)\tau_o}\left[\mu_o + (1-\eta)(\tau_o-\tau) - \left[\mu_o + (1-\eta)\tau_o\right]e^{-\tau/\mu_o} + \frac{2\rho\mu_o(1-\eta)\tau}{1+2(1-\eta)(1-\rho)\tau_o}\right] \tag{II.39}$$

$$E\uparrow(\tau) = \frac{\mu_o E_o}{\mu_o+(1-\eta)\tau_o}\left[(1-\eta)(\tau_o-\tau) + \rho\mu_o\,\frac{1+2(1-\eta)\tau}{1+2(1-\eta)(1-\rho)\tau_o}\right] \tag{II.40}$$

Combinando as irradiâncias descendentes e ascendentes para $\rho = 0$ e $\rho \neq 0$, tem-se a radiância em uma profundidade ótica τ, aproximada pela seguinte expressão:

$$L(\tau,\mu,\phi) = \frac{1}{\mu_o}\left[E'\uparrow(\tau)\delta(\mu-\mu_o)\delta(\pi+\phi_o-\phi)\right.$$

$$\left. + E'\downarrow(\tau)\delta(\mu+\mu_o)\delta(\phi-\phi_o)\right] + \frac{E\uparrow''(\tau) + E\downarrow''(\tau)}{2\pi} \qquad (II.41)$$

onde as irradiâncias com um apóstrofe representam o campo de radiação para $\rho = 0$ e o apóstrofo duplo representa o campo com $\rho \neq 0$.

Introduzindo (II.4) e (II.41) em (II.6), e com as condições do contorno (II.7) e (II.8), resolve-se a equação, determinando as radiações ascendente e descendente, respectivamente

$$L_{DT}(\tau,\mu,\phi) = \frac{E_o}{4\pi[\mu_o+(1-\eta)\tau_o]}\left\{\left[(1-\eta)\tau_o[p(\mu,\phi,\mu_o,\pi+\phi_o)\right.\right.$$

$$\left. + p(\mu,\phi,-\mu_o,\phi_o)] + \mu_o p(\mu,\phi,-\mu_o,\phi_o) + \frac{2\mu_o^2\rho}{1+2(1-\eta)(1-\rho)\tau_o}\right]$$

$$\left[1-e^{-(\tau o-\tau)/\mu}\right] + \left[(1-\eta)\ [p(\mu,\phi,\mu_o,\pi+\phi_o) + p(\mu,\phi,-\mu_\mu,\phi_o)]\right.$$

$$\left.\left. - \frac{8(1-\eta)\mu_o^2\ \rho}{1+2(1-\eta)(1-\rho)\tau_o}\right]\ [(\tau_o+\tau)e^{-(\tau_o-\tau)/\mu} - (\tau+\mu)]\right\} \qquad (II.42)$$

$$L_{DT}(\tau,-\mu,\phi) = \frac{E_o}{4\pi|\mu_o+(1-\eta)\tau_o|}\left\{\left[(1-\eta)\tau_o[p(-\mu,\phi,\mu_o,\pi+\phi_o)\right.\right.$$

$$\left. + p(-\mu,\phi,-\mu_o,\phi_o)] - \mu_o p(-\mu,\phi,-\mu_o,\phi_o) + \frac{2\mu_o^2\rho}{1+2(1-\eta)(1-\rho)\tau_o}\right]$$

$$(1-e^{-\tau/\mu}) - \left[(1-\eta)[p(-\mu,\phi,\mu_o,\pi+\phi_o) + p(-\mu,\phi,-\mu_o,\phi_o)]\right.$$

$$\left.\left. - \frac{8(1-\eta)\mu_o^2\rho}{1+2(1-\eta)(1-\rho)\tau_o}\right] (\mu e^{-\tau/\mu} + \tau-\mu)\right\} \qquad \text{(II.43)}$$

Para o "topo da atmosfera", $\tau = 0$, logo

$$L_{DT}(0,\mu,\phi) = \frac{E_o}{4\pi|\mu_o+(1-\eta)\tau_o|}\left\{\left[(1-\eta)\tau_o[p(\mu,\phi,\pi+\phi_o)\right.\right.$$

$$\left. + p(\mu,\phi,-\mu_o,\phi_o)] + \mu_o p(\mu,\phi,\mu_o,\phi_o) + \frac{2\mu_o^2\rho}{1+2(1-\rho)(1-\eta)\tau_o}\right] (1-e^{-\tau_o/\mu})$$

$$+ \left[[p(\mu,\phi,\mu_o,\pi+\phi_o) + p(\mu,\phi,-\mu_o,\phi_o)]\right.$$

$$\left.\left. - \frac{8(1-\eta)\mu_o^2\rho}{1+2(1-\eta)(1-\rho)\tau_o}\right] (\tau_o e^{-\tau_o/\mu} -\mu)\right\} \qquad \text{(II.44)}$$

que expressa a radiação difusa que atinge os sensores do satélite, considerado localizado no "topo da atmosfera".

2.2 - TRANSMITÂNCIA ATMOSFÉRICA

A transmitância da radiação na atmosfera é complexa, devido à dependência dos coeficientes de espalhamento e de absorção das diferentes propriedades físicas da atmosfera. Por outro lado, a alteração sofrida por uma radiação monocromática-paralela é dada pela lei de Beer (Siegel e Howel-1971), ou seja, a atenuação dI_λ na intensidade I_λ, num meio homogêneo, é expressa pela seguinte equação:

$$dI = I_\lambda d\ell \qquad \text{(II.45)}$$

onde:

I_λ = intensidade da radiação

γ = coeficiente volumétrico de atenuação

$d\ell$ = comprimento da trajetória

Integrando-se a equação acima, tem-se:

$$I_\lambda = I_{\lambda o} \exp\left[-\int_o^\ell \gamma d\ell\right] \qquad \text{(II.46)}$$

ou

$$\frac{I_\lambda}{I_{\lambda o}} = \exp\left[-\int_o^\ell \gamma d\ell\right] \qquad \text{(II.47)}$$

Consequentemente, obtem-se a definição clássica da transmitância monocromática

PRECEDING PAGES BLANK NOT FILMED

$$T = \exp\left[-\int_0^{\ell} \gamma d\ell\right] \qquad (II.48)$$

Entretanto, a equação acima resulta numa impossibilidade prática de medições de transmitância total para uma determinada frequência de resolução infinita, a não ser num laboratório onde a fonte já é monocromática. Porém, a medida da transmitância média $\overline{T}\Delta\nu(\nu)$ num intervalo expectral $\Delta\nu$ é possível, ou seja

$$\overline{T}_{\Delta\nu}(\nu) = \frac{1}{\Delta\nu} \int_{\nu - \frac{\Delta\nu}{2}}^{\nu + \frac{\Delta\nu}{2}} T(\nu)d\nu \qquad (II.49)$$

onde:

ν = frequência central

$\Delta\nu$ = intervalo de frequência

No intervalo espectral considerado neste trabalho, visível e infravermelho próximo, os coeficientes de espalhamento molecular e coeficiente de espalhamento do aerosol são fracamente dependentes da frequência, e a transmitância média, neste caso, pode ser obtida pela interpolação dos valores monocromáticos (McClatchey et al, 1972), obedecendo à lei exponencial.

$$\overline{T}_{\Delta\nu}(\nu) = \exp\left[-\int_0^{\ell} \overline{\gamma} d\ell\right] \qquad (II.50)$$

Para determinar a transmitância média total numa certa frequência devem-se multiplicar os valores das transmitâncias individuais de cada componente atmosférico, ou seja

$$\overline{T}_{\Delta\nu}(\nu)(\text{total}) = \overline{T}_{\Delta\nu}(\nu)\ (H_2O)\ \ \overline{T}_{\Delta\nu}(\nu)(O_3)$$

$$\overline{T}_{\Delta\nu}(\nu)(\text{Rayleigh})\ \overline{T}_{\Delta\nu}(\nu)\ (\text{aerosol}) \qquad (II.51)$$

A forma funcional da transmitância média do LOWTRAN-3 sobre o intervalo considerado é dada em termos dos parâmetros $C\nu$ e ω^*, ou seja,

$$\overline{T} = f(C_\nu, \omega^*) \qquad (II.52)$$

onde

$C\nu$ = coeficiente de absorção em função do comprimento de onda (frequência)

$$\omega^* = \omega \left\{ \frac{P(z)}{P_o} \sqrt{\frac{T_o}{T(z)}} \right\}^n \qquad (II.53)$$

ω^* = quantidade equivalente do absorvente

ω = concentração do absorvente

$P(z)$ = pressão atmosférica em z

P_o = pressão atmosférica padrão ao nível do mar

$T(z)$ = temperatura em z

T_o = temperatura padrão

n = coeficiente determinado empiricamente dos dados experimentais e dos valores calculados no "Airforce Geophysics Lab". (Tabela II.1).

TABELA II.1

COEFICIENTES (n) DETERMINADOS EMPIRICAMENTE NO "AIRFORCE GEOPHYSICS LAB".

Ozônio.....	n = 0,4
Vapor de água.....	n = 0,9
Gases Uniformemente Misturados.....	n = 1,75

A atmosfera terrestre é composta de gases majoritários e minoritários (Tabela II.2), quase-permanentes e variáveis, que têm participações importantes na transferência radiativa. A radiação é espalhada e absorvida pelos gases e partículas, pelos seguintes mecanismos:

a) absorção da radiação ultravioleta em consequência das transições eletrônicas de moléculas, oxigênio atômico, nitrogêneo e ozônio;

b) absorção da radiação infravermelha devido a vibração e rotação de H_2O, CO_2 e moléculas de O_3;

c) espalhamento da radiação visível pelos aerosóis e moléculas.

O vapor de água é o constituinte que apresenta concentração mais variável da atmosfera; uma das maneiras de expressá-la é:

$$\omega^* = \int_z^{\infty} \omega(z) \left[\frac{P(z)}{P_0} \right]^{0,9} dz \qquad \text{(II.54)}$$

Similarmente, ozônio é um outro constituinte bastante variável, dependendo da época do ano e localização geográfica e é calculado por:

TABELA II.2

COMPOSIÇÃO NORMAL DA ATMOSFERA

CONSTITUINTE	% POR VOLUME
Nitrogênio	78,09
Oxigênio	20,95
Argonio	0,93
Óxido Nitroso	$0,5 \times 10^{-4}$
Neon	$1,8 \times 10^{-3}$
Hélio	$5,2 \times 10^{-4}$
Kriptonio	$1,1 \times 10^{-4}$
Xenonio	$8,7 \times 10^{-6}$
Hidrogênio	$0,5 \times 10^{-4}$
Metano	$2,0 \times 10^{-3}$
Ozonio	0 a 7×10^{-6} *
Óxido Sulfuroso	0 a $0,1 \times 10^{-3}$ *
Dióxido de Nitrogenio	0 a $0,2 \times 10^{-4}$ *
Amonia	0 a traço *
Monóxido de Carbono	0 a traço *
Água	0 a 7,0 *
Dióxido de Carbono	0,01 a 0,1 *

(Segundo Farrow, 1975)

* Constituintes Variáveis da Atmosfera

$$\omega^* = \int_z^\infty \omega(z) \left[\frac{P(z)}{P_o}\right]^{0,4} dz \qquad (II.55)$$

Pode-se afirmar que a maior parte da energia eletromagnética que chega até a superfície terrestre é proveniente do sol, e essa energia é responsável pelos fenômenos físicos que ocorrem na atmosfera. De acordo com Drummond (1970) mais de 99 por cento da energia solar está contida no intervalo espectral de 0,2 μm a 4,0 μm.

O termo γ da equação (II.48) é denominado coeficiente de atenuação. A sua dimensão é o inverso do comprimento, e expressa-se como a soma do coeficiente de espalhamento (k) e do coeficiente de absorção (α), pelo fato dos dois processos serem independentes, portanto

$$\gamma = \alpha + k \qquad (II.56)$$

E ainda os processos de atenuação de Rayleigh e dos aerosóis sendo, também, independentes, escreve-se:

$$\alpha = \alpha_m + \alpha_a \qquad (II.57)$$

$$k = k_m + k_a \qquad (II.58)$$

onde os índices m e a indicam respectivamente os processos de Rayleigh e do aerosol.

O espalhamento por partículas com tamanhos muito menores do que o comprimento de onda é denominado espalhamento Rayleigh (molecular), e foi introduzido por Lord Rayleigh que tencionava explicar o azul do céu. Atualmente, sabe-se que este processo é causado pela flutuação da densidade na atmosfera.

O coeficiente de espalhamento molecular (k_m) depende da densidade numérica das moléculas, e a sua dependência com o comprimento de onda é aproximadamente de λ^{-4}. No Lowtran-3 o cálculo baseia-se nos resultados obtidos por Penndorf (1961) e é dado pela seguinte equação

$$k_m = 9{,}87 \times 10^{-20}\ \nu^4 \qquad \text{(II.59)}$$

enquanto que o coeficiente de absorção molecular (α_m) é uma função dos gases absorventes da atmosfera, da temperatura e pressão; a sua dependência com o comprimento de onda é altamente variável. No presente trabalho, contudo, essa dependência é desprezada, devido ao intervalo espectral considerado.

Outro espalhamento que se considera é aquele devido às partículas com tamanhos maiores do que o comprimento de onda incidente. Estas partículas são denominadas aerosóis. Geralmente define-se como sendo sólidos ou líquidos em suspensão num meio gasoso, e esta definição inclui névoa, nevoeiro, neblina, fumaça, partículas de pó, nuvens, pólen e outros.

Quanto aos tamanhos destas podem-se classificar, segundo Junge (1963), em três categorias.

a) Núcleos de Aitken - 10^{-7} a 10^{-5} cm

b) Partículas grandes - 10^{-5} a 10^{-4} cm

c) Partículas gigantes - maiores do que 10^{-4} cm

Os coeficientes de espalhamento do aerosol (k_a) e de absorção do aerosol (α_a) dependem exclusivamente da densidade total do aerosol, da distribuição de tamanhos dos aerosóis e dos índices de refração destes.

Lowtran-3 utiliza dois modelos de aerosóis, digitalizados no próprio programa, correspondendo à condição de céu limpo e úmido, respectivamente 23 km e 5km de alcance visual ao nível do mar, baseando-se nas seguintes suposições:

a) A distribuição do tamanho das partículas é semelhante ao modelo utilizado pelo Deirmendjian (1969), Figura II.1, ou seja

$$n(r) = ar^d \exp(-br)^c \qquad (II.60)$$

onde

$n(r)$	= função distribuição (distribuição gama modificada)
r	= raio do aerosol
$a,b,d,$	= constantes reais positivas
c	= constante inteira positiva

b) A distribuição de tamanhos dos aerosóis permanece constante com altitude.

c) As variações das densidades das partículas (Tabela II.3) com altitude são aquelas ajustadas pelo Mc Clatchey et al (1972) conforme o modelo de atenuação desenvolvido por Elterman (1964).

Outro parâmetro importante no estudo da transferência radiativa é a quantidade adimensional que mede o processo de atenuação da atmosfera, denominada profundidade ótica, que se define exatamente como o fator exponencial da equação (II.50), ou seja

$$\bar{\tau} = \int_h^\infty \bar{\gamma} dz \qquad (II.61)$$

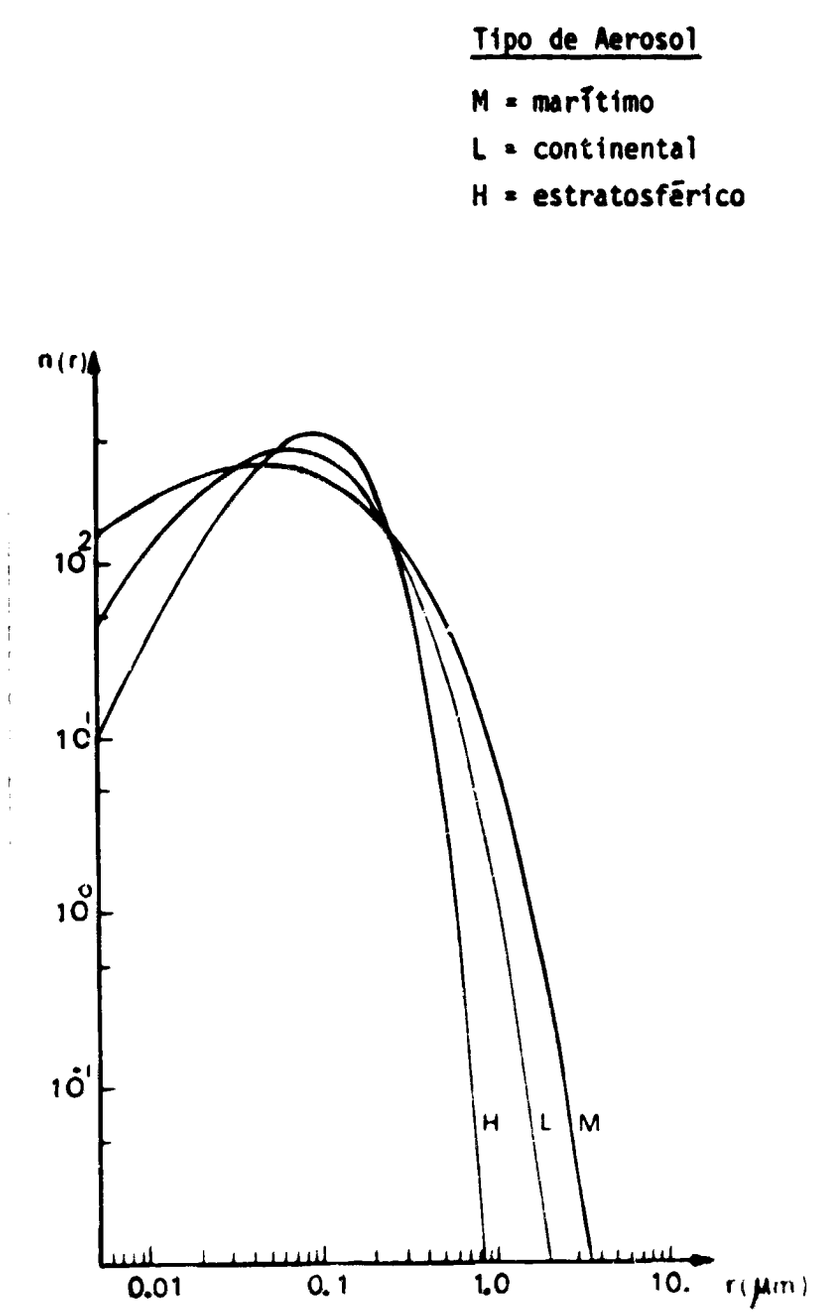

Fig. II.1 - Representação da Função Distribuição das Partículas de Aerosóis (Deirmendjian, 1969)

TABELA II.3

MODELO DE DISTRIBUIÇÃO VERTICAL DO AEROSOL PARA ATMOSFERAS "CLARA" E "UMIDA" (McCLATCHEY et al, 1972)

DENSIDADE NUMÉRICA DAS PARTÍCULAS (PARTÍCULAS CM^{-3})		
Altitude (km)	Atm. Clara	Atm. Umida
0	2,828 E + 03	1,378 E + 04
1	1,244 E + 03	5,030 E + 03
2	5,371 E + 02	1,844 E + 03
3	2,256 E + 02	6,731 E + 02
4	1,192 E + 02	2,453 E + 02
5	8,987 E + 01	8,987 E + 01
6	6,337 E + 01	6,337 E + 01
7	5,890 E + 01	5,890 E + 01
8	6,069 E + 01	6,069 E + 01
9	5,818 E + 01	5,818 E + 01
10	5,675 E + 01	5,675 E + 01
11	5,317 E + 01	5,317 E + 01
12	5,585 E + 01	5,585 E + 01
13	5,156 E + 01	5,156 E + 01
14	5,048 E + 01	5,048 E + 01
15	4,744 E + 01	4,744 E + 01
16	4,511 E + 01	4,511 E + 01
17	4,458 E + 01	4,458 E + 01
18	4,314 E + 01	4,314 E + 01
19	3,364 E + 01	3,364 E + 01
20	2,667 E + 01	2,667 E + 01
21	1,933 E + 01	1,933 E + 01
22	1,455 E + 01	1,455 E + 01
23	1,113 E + 01	1,113 E + 01
24	8,826 E + 00	8,826 E + 00
25	7,429 E + 00	7,429 E + 00
30	2,238 E + 00	2,238 E + 00
35	5,890 E - 01	5,890 E - 01
40	1,550 E - 01	1,550 E - 01
45	4,082 E - 02	4,082 E - 02
50	1,078 E - 02	1,078 E - 02
70	5,550 E - 05	5,550 E - 05
100	1,969 E - 08	1,969 E - 08

logo para uma atmosfera inteira, tem-se:

$$\bar{\tau}_o = \int_o^\infty \bar{\gamma} dz \qquad (II.62)$$

Um valor grande de profundidade ótica significa uma grande atenuação da radiação pela atmosfera.

Comparando as expressões (II.50) e (II.61), pode-se reescrever a transmitância atmosférica como

$$\bar{T}_{\Delta\nu}(\nu) = \exp \left| - \int_o^\ell \bar{\gamma} d\ell \right| = \exp \left| - \int_o^\infty \bar{\gamma} dz \sec\theta \right| =$$

$$\exp \left| - \bar{\tau}_o / \cos\theta \right| = \exp \left| - \bar{\tau}_o / \mu \right| \qquad (II.63)$$

Na figura II.2 notam-se as transmitâncias para diferentes modelos atmosféricos, calculados com o LOWTRAN-3 (Selby e McClatchey, 1975).

Em resumo, para se utilizar integralmente o modelo de Turner, é necessário conhecer a medida de turbidez, na determinação posterior da profundidade ótica do aerosol e da transmitância atmosférica.

Entretanto, a medida de turbidez, que ainda não foi obtida sobre o continente brasileiro, é um elemento necessário, porém ausente no modelo. Então, para computar os parâmetros necessários utilizou-se o programa LOWTRAN, que fornece os valores de transmitância total da atmosfera, transmitância molecular e a transmitância do aerosol, e, além disso, este programa apresenta a vantagem de fornecer os parâmetros mencionados em uma condição mais realista, isto é, utilizam-se os perfis verticais de pressão, temperatura e de umidade, obtidas à partir da radiossondagem local.

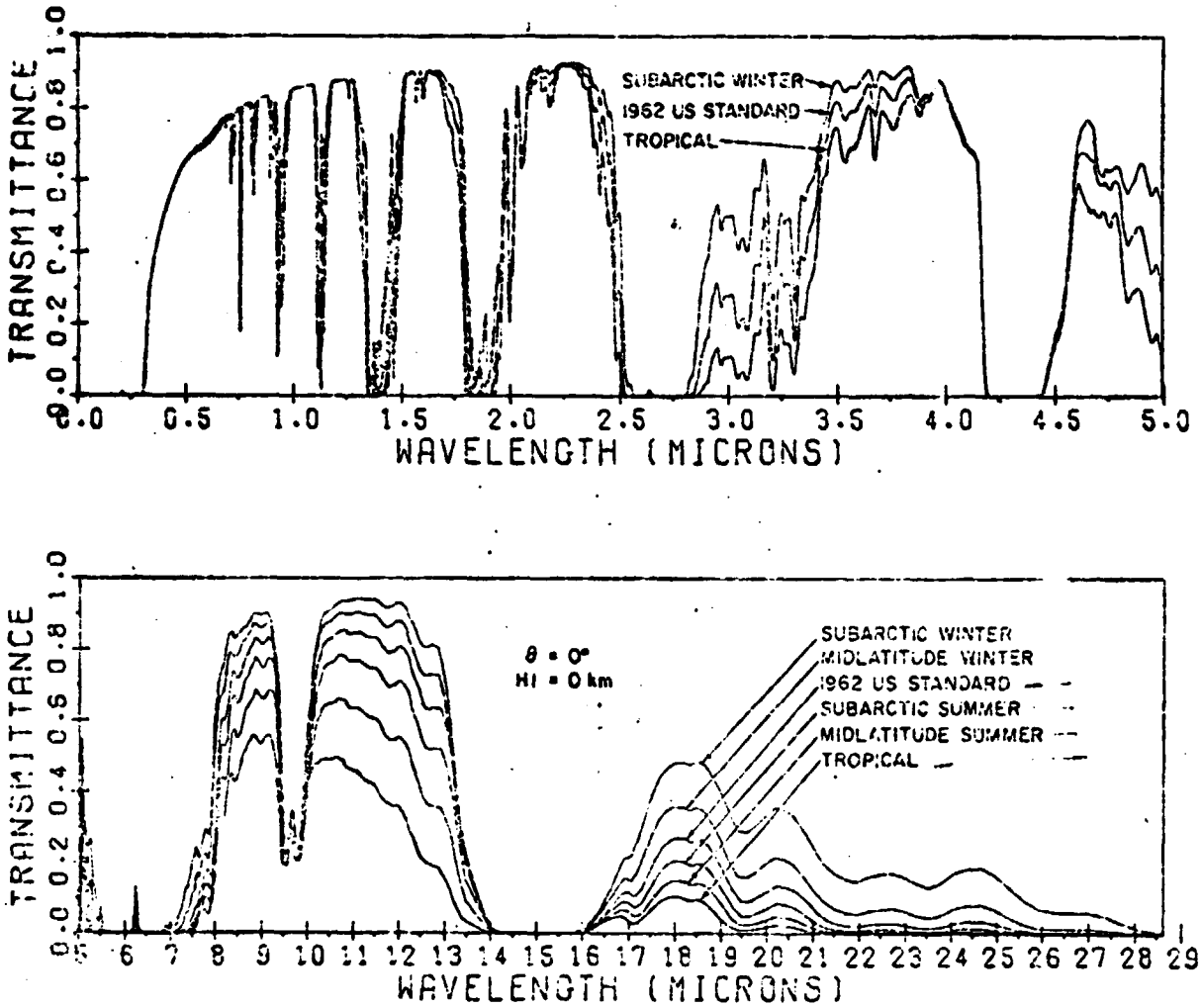

Fig. II.2 - Transmitância Atmosférica para um Percurso Vertical do Nível do Mar para o Espaço a Diversos Modelos Atmosféricos. (Selby e McClatchey, 1975).

PRECEDING PAGE BLANK NOT FILMED

CAPÍTULO III

ELIMINAÇÃO DO EFEITO ATMOSFÉRICO

O sistema MSS (Multispectral Scanner System) do LANDSAT capta os dados, focalizando alvos sobre a superfície terrestre em várias bandas espectrais que cobrem de 0,5 μm a 1,1 μm (Tabela III.1). Este sistema varre uma região de 185 km x 185 km transversalmente à trajetória do satélite, com os seis detetores de fibras óticas para cada banda.

TABELA III.1

CANAIS MSS DO LANDSAT

CANAL MSS	INTERVALO (μm)
4	0,5 a 0,6
5	0,6 a 0,7
6	0,7 a 0,8
7	0,8 a 1,1

As radiações totais incidentes em cada uma das fibras óticas são transformadas, digitalizadas e formatadas em uma série contínua de dados, denominados níveis de cinza, dos campos visuais instantâneos que correspondem a uma área de 79 metros x 56 metros, chamados "pixel" ou elemento de imagem. Tais dados estão em fitas magnéticas compatíveis com computador.

3.1 - ALGORITMO DE CORREÇÃO

A radiância total que atinge os sensores numa profundidade ótica τ, com ângulo nadir θ e azimutal ϕ, pode ser equacionada como:

$$L_T(\tau,\mu,\phi) = L_{TR}(\tau,\mu,\phi) + L_{DT}(\tau,\mu,\phi) \qquad \text{(III.1)}$$

onde

L_T = radiância espectral total

L_{TR} = radiância transmitida

L_{DT} = radiância difusa

A radiância transmitida é aquela refletida sobre o alvo, multiplicada pela transmitância atmosférica total, isto é

$$L_{TR} \ (\tau,\mu,\phi) = L_I \ (\tau_o,\mu,\phi) \ \bar{T} \ (\tau,\tau_o,\mu) \qquad \text{(III.2)}$$

Então, na equação (III.1) para o caso em consideração, deve-se tomar a profundidade ótica nula, assumindo-se como topo da atmosfera o local onde se encontra o satélite, ou seja:

$$L_T \ (o,\mu,\phi) = L_I \ (\tau_o,\mu,\phi) \ \bar{T} \ (\tau_o,\mu) + L_{DT} \ (o,\mu,\phi) \qquad \text{(III.3)}$$

Assim sendo, para eliminar os efeitos atmosféricos das imagens, a radiância intrínseca de cada pixel será determinada usando-se o seguinte algoritmo,

$$L_I \ (\tau_o,\mu,\phi) = \left[L_T \ (o,\mu,\phi) - L_{DT} \ (o,\mu,\phi)\right] \left[\bar{T} \ (\tau_o,\mu)\right]^{-1} \qquad \text{(III.4)}$$

E ainda sabe-se que a radiância intrínseca depende da irradiância direta e difusa. Admitindo-se que a superfície é lambertiana, pode-se aproximar (Turner et. al., 1972) como

$$L_I = \frac{\rho_a}{\pi} \ E_{T\downarrow} \ (\tau_o) \qquad \text{(III.5)}$$

onde

ρ_a = reflectância difusa efetiva do alvo

$E_{T\downarrow} \ (\tau_o)$ = irradiância difusa total descendente

A Equação (II.44) pode ser descompactada em várias funções para facilitar o seu cálculo, portanto

$$\frac{L_{DT}(o,\mu,\phi)}{E_o} = F_1(\mu,\phi,\mu_o,\phi_o,\tau_o) + F_2(\mu,\phi,\mu_o,\phi_o,\tau)\,G(\tau_o,\bar{\rho}) \quad \text{(III.6)}$$

onde as funções F_1,F_2 e G são respectivamente

$$F_1(\mu,\phi,\mu_o,\phi_o,\tau_o) = \frac{1}{4\pi\left[\mu_o + (1-n)\tau_o\right]}\Big\{(1-n)(\tau_o-\mu)\Big[p(\mu,\phi,\mu_o,\pi+\phi_o) + p(\mu,\phi,-\mu_o,\phi_o)\Big] + \mu_o p(\mu,\phi,-\mu_o,\phi_o) + (1-n)\,\mu\Big[p(\mu,\phi,\mu_o,\pi+\phi_o) + p(\mu,\phi,-\mu_o,\phi_o)\Big]\cdot e^{-\tau_o/\mu} - \mu_o p(\mu,\phi,-\mu_o,\phi_o)\cdot e^{-\tau_o/\mu}\Big\} \quad \text{(III.7)}$$

$$F_2(\mu,\phi,\mu_o,\phi_o,\tau_o) = \frac{\mu_o^2}{2\pi\left[\mu_o + (1-\eta)\,\tau_o\right]}\Big\{1 + 4\mu(1-\eta) - \left[1 + 4(1-\eta)(\tau_o+\mu)\right] e^{-\tau_o/\mu}\Big\} \quad \text{(III.8)}$$

$$G(\bar{\rho},\tau_o) = \frac{\bar{\rho}}{1 + 2(1-\eta)(1-\bar{\rho})\,\tau_o} \quad \text{(III.9)}$$

e, também para a irradiância difusa total descendente

$$\frac{E_{T\downarrow}}{E_o} = H(\mu_o,\tau_o)\left[1 + I(\tau_o)\,G(\rho,\tau_o)\right]$$

onde

$$H(\mu_o,\tau_o) = \frac{\mu_o^2}{\mu_o + (1-\eta)\tau_o} \qquad \text{(III.11)}$$

$$I(\tau_o) = 2(1-\eta)\tau_o \qquad \text{(III.12)}$$

As funções fases de espalhamento da expressão são calculadas utilizando o método aplicado por Deirmendjian (1969) (Apêndice A).

3.2 - MÉTODO DE CORREÇÃO DE DADOS

Experimentou-se a correção nas imagens de Brasília (21/06/74) e de Ribeirão Preto (01/07/77) procedendo os passos descritos abaixo e ilustrados na Figura III.1.

Primeiro: Nas fitas magnéticas processadas em Cachoeira Paulista, cujas dimensões são de 3218 pixels na horizontal e 2352 pixels na vertical, delimitou-se a imagem num formato de 512 por 512 pixels, devido à limitação de vídeo do IMAGE-100. O objetivo principal deste procedimento é facilitar a leitura dos pixels constituintes das imagens pelo programa de correção atmosférica, considerando que o novo formato são quatro matrizes de 512 por 512 e gerando desta maneira uma nova fita com as correções radiométrica e geométrica incluídas para todas as bandas do ERTS (LANDSAT).

Segundo: Um elemento essencial no cálculo do efeito da atenuação atmosférica, obviamente, é a representação da característica física da própria atmosfera. A transmitância total da atmosfera, no comprimento de onda de interesse é importante e é considerado um parâmetro básico no presente modelo. Com LOWTRAN-3 calculou-se a transmitância total da atmosfera, onde verifica-se que ela é uma função de vários parâmetros (pressão, temperatura, umidade relativa, visibilidade horizontal) que descrevem a condição do estado atmosférico do percurso da radiância refletida na superfície, assim como do comprimento de onda. Os estados atmosféricos para os quais as transmitâncias foram calculadas são apresentadas nas Tabelas III.2 e III.3.

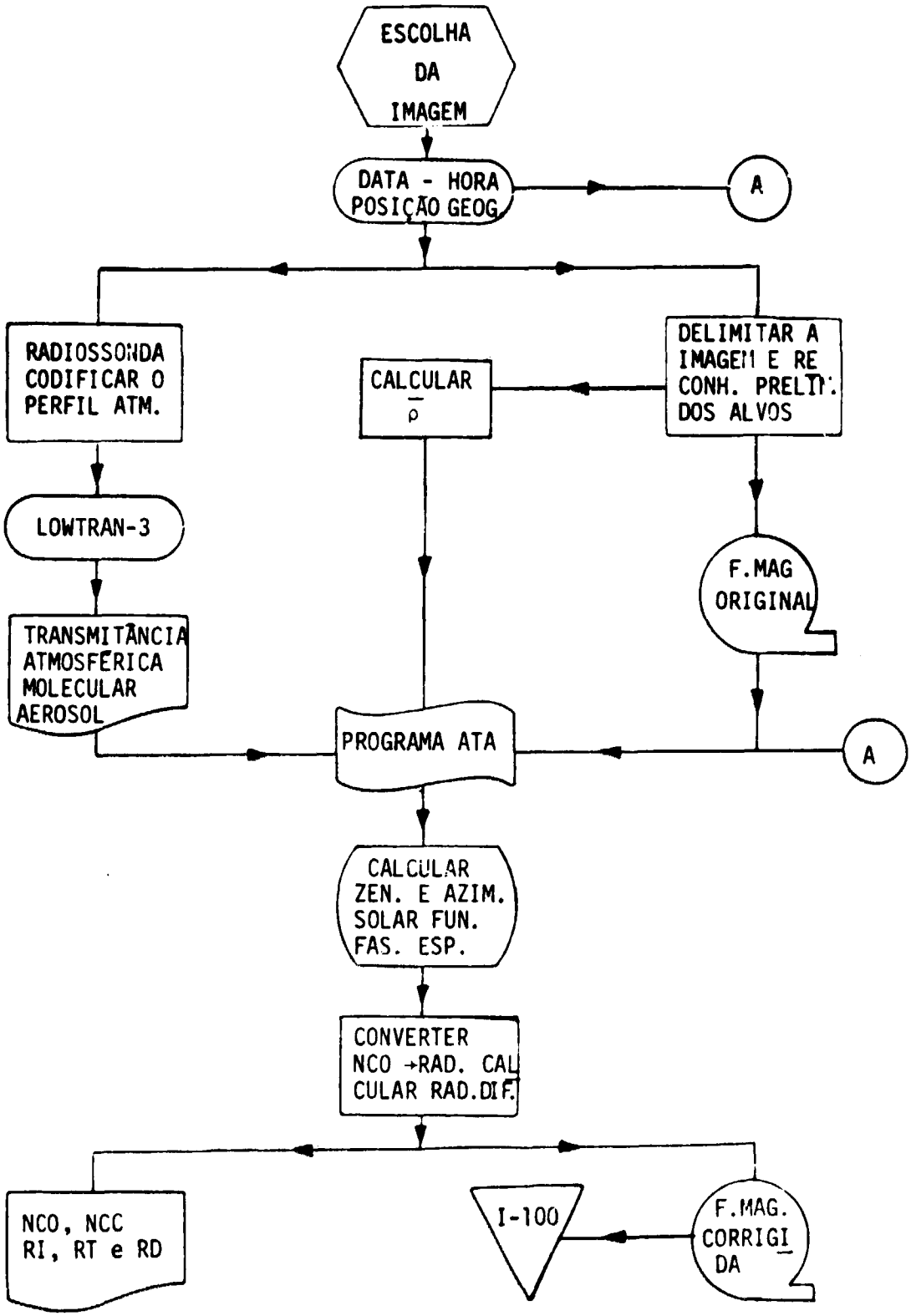

Fig. III.1 - Fluxograma do método de correção de dados.

TABELA III.2

ESTADO ATMOSFÉRICO DE BRASÍLIA EM 21-6-1974 (RADIOSSONDAGEM)

Z (KM)	P (MB)	T (C)	DEW PT	%RH	H2O(GM.M-3)	O3(GM.M-3)	NO. DEN.
1.061	899.000	14.500	0.0	77.0	.957E+01	.559E-04	1182.802
1.100	893.000	14.800	0.0	78.0	.988E+01	.558E-04	1144.675
1.350	869.000	16.100	0.0	85.0	.116E+02	.553E-04	927.821
1.800	824.000	13.700	0.0	82.0	.971E+01	.544E-04	635.729
2.850	727.000	13.100	0.0	15.0	.171E+01	.514E-04	257.067
5.150	548.000	-2.500	0.0	15.0	.611E+00	.447E-04	85.330
5.800	507.000	-7.500	0.0	15.0	.426E+00	.434E-04	67.998
6.400	467.000	-12.700	0.0	16.0	.307E+00	.422E-04	61.579
7.000	431.000	-18.000	0.0	17.0	.215E+00	.410E-04	58.930
7.150	423.000	-19.500	0.0	17.0	.190E+00	.407E-04	59.197
7.350	413.000	-18.500	0.0	13.0	.158E+00	.403E-04	59.554
7.650	395.000	-19.600	0.0	13.0	.144E+00	.397E-04	60.094
7.920	381.000	-19.100	0.0	13.0	.150E+00	.392E-04	60.584
8.300	362.000	-22.000	0.0	14.0	.127E+00	.390E-04	59.966
8.950	331.000	-26.700	0.0	15.0	.913E-01	.390E-04	58.343
9.600	301.000	-31.500	0.0	15.0	.594E-01	.390E-04	57.356
10.350	272.000	-37.200	0.0	15.0	.347E-01	.397E-04	55.507
10.950	247.000	-42.100	0.0	15.0	.213E-01	.409E-04	53.374
11.700	222.000	-49.200	0.0	1.0	.673E-03	.424E-04	55.069
12.200	206.000	-53.900	0.0	1.0	.397E-03	.434E-04	55.002
12.450	198.000	-54.800	0.0	1.0	.358E-03	.439E-04	53.912
12.550	195.000	-55.100	0.0	1.0	.346E-03	.441E-04	53.482
13.100	178.000	-59.200	0.0	1.0	.212E-03	.450E-04	51.482
13.800	160.000	-64.500	0.0	1.0	.109E-03	.450E-04	50.732
14.700	137.000	-71.500	0.0	1.0	.426E-04	.464E-04	48.365
16.000	109.000	-72.500	0.0	1.0	.370E-04	.470E-04	45.140
16.800	95.000	-72.800	0.0	1.0	.355E-04	.639E-04	44.707
17.950	79.000	-74.200	0.0	1.0	.290E-04	.888E-04	43.240
18.900	67.000	-64.800	0.0	1.0	.105E-03	.134E-03	36.990
20.500	52.000	-62.300	0.0	1.0	.145E-03	.214E-03	22.726
22.650	37.000	-55.500	0.0	1.0	.330E-03	.305E-03	12.234
25.450	24.000	-53.100	0.0	1.0	.609E-03	.330E-03	6.673
27.750	17.000	-45.500	0.0	1.0	.900E-03	.281E-03	3.842
29.560	13.000	-40.500	0.0	1.0	.167E-02	.247E-03	2.484

Obs: Devido ao método utilizado para calcular a densidade de vapor de água no LOWTRAN-3, na ausência de informação da umidade relativa na radiossondagem, considerou-se esta igual a um.

TABELA III.2

ESTADO ATMOSFÉRICO DE BRASÍLIA EM 21-6-1974 (RADIOSSONDAGEM)

Z (KM)	P (MB)	T (C)	DEW PT	%RH	H2O(GM.M-3)	O3(GM.M-3)	NO. DEN.
1.061	899.000	14.500	0.0	77.0	.957E+01	.559E-04	1182.802
1.100	893.000	14.800	0.0	78.0	.988E+01	.558E-04	1144.675
1.350	869.000	16.100	0.0	85.0	.116E+02	.553E-04	927.821
1.800	824.000	13.700	0.0	82.0	.971E+01	.544E-04	635.729
2.850	727.000	13.100	0.0	15.0	.171E+01	.514E-04	257.067
5.150	548.000	-2.500	0.0	15.0	.611E+00	.447E-04	85.330
5.800	507.000	-7.500	0.0	15.0	.426E+00	.434E-04	67.998
6.400	467.000	-12.700	0.0	16.0	.307E+00	.422E-04	61.579
7.000	431.000	-18.000	0.0	17.0	.215E+00	.410E-04	58.930
7.150	423.000	-19.500	0.0	17.0	.190E+00	.407E-04	59.197
7.350	413.000	-18.500	0.0	13.0	.158E+00	.403E-04	59.554
7.650	395.000	-19.600	0.0	13.0	.144E+00	.397E-04	60.094
7.920	381.000	-19.100	0.0	13.0	.150E+00	.392E-04	60.584
8.300	362.000	-22.000	0.0	14.0	.127E+00	.390E-04	59.966
8.950	331.000	-25.700	0.0	15.0	.913E-01	.390E-04	58.343
9.600	301.000	-31.500	0.0	15.0	.594E-01	.390E-04	57.358
10.350	272.000	-37.200	0.0	15.0	.347E-01	.397E-04	55.507
10.950	247.000	-42.100	0.0	15.0	.213E-01	.409E-04	53.374
11.700	222.000	-49.200	0.0	1.0	.673E-03	.424E-04	55.069
12.200	206.000	-53.900	0.0	1.0	.397E-03	.434E-04	55.002
12.450	199.000	-54.300	0.0	1.0	.358E-03	.439E-04	53.912
12.550	195.000	-55.100	0.0	1.0	.346E-03	.441E-04	53.482
13.100	175.000	-59.200	0.0	1.0	.212E-03	.450E-04	51.482
13.800	150.000	-64.500	0.0	1.0	.109E-03	.450E-04	50.732
14.700	127.000	-71.500	0.0	1.0	.426E-04	.464E-04	48.365
16.000	100.000	-72.500	0.0	1.0	.370E-04	.470E-04	45.140
16.800	85.000	-72.800	0.0	1.0	.355E-04	.639E-04	44.707
17.950	70.000	-74.200	0.0	1.0	.290E-04	.888E-04	43.240
18.900	57.000	-64.300	0.0	1.0	.105E-03	.134E-03	36.990
20.500	42.000	-62.300	0.0	1.0	.145E-03	.214E-03	22.726
22.650	27.000	-55.500	0.0	1.0	.330E-03	.305E-03	12.234
25.450	14.000	-51.100	0.0	1.0	.609E-03	.330E-03	6.673
27.750	7.000	-45.500	0.0	1.0	.900E-03	.281E-03	3.842
29.560	3.000	-41.500	0.0	1.0	.167E-02	.247E-03	2.464

Obs: Devido ao método utilizado para calcular a densidade de vapor de água no LOWTRAN-3, na ausência de informação da umidade relativa na radiossondagem, considerou-se esta igual a um.

ORIGINAL PAGE IS
OF POOR QUALITY

TABELA III.3

REPRESENTAÇÃO DO ESTADO ATMOSFÉRICO DE RIBEIRÃO PRETO TOMANDO A RADIOSSONDAGEM DE BRASÍLIA EM 1-7-1977

Z (KM)	P (MB)	T (C)	DEW PT	%RH	H2O(GM.M-3)	O3(GM.M-3)	NO. DEN.
0.600	950.000	18.000	0.0	70.0	.107E+02	.560E-04	1729.084
1.061	900.000	16.000	0.0	74.0	.101E+02	.559E-04	1182.802
1.340	870.000	14.000	0.0	80.0	.965E+01	.553E-04	935.649
1.544	850.000	12.200	0.0	83.0	.895E+01	.549E-04	788.278
1.750	830.000	12.000	0.0	80.0	.852E+01	.545E-04	663.003
1.850	820.000	12.200	0.0	73.0	.787E+01	.543E-04	609.577
2.050	800.000	10.800	0.0	73.0	.721E+01	.538E-04	514.588
2.610	748.000	6.600	0.0	72.0	.543E+01	.521E-04	316.570
2.800	730.000	6.500	0.0	45.0	.337E+01	.516E-04	268.463
2.900	722.000	6.600	0.0	30.0	.226E+01	.513E-04	246.155
3.000	715.000	10.000	0.0	20.0	.188E+01	.510E-04	225.700
3.050	710.000	12.200	0.0	10.0	.108E+01	.508E-04	218.619
3.150	700.000	11.500	0.0	10.0	.103E+01	.504E-04	205.115
4.380	604.000	4.400	0.0	10.0	.653E+00	.462E-04	107.148
4.530	590.000	4.800	0.0	10.0	.670E+00	.458E-04	101.257
5.550	522.000	0.100	0.0	10.0	.488E+00	.439E-04	74.203
7.617	400.000	-17.900	0.0	10.0	.127E+00	.398E-04	60.034
10.630	262.000	-40.000	0.0	10.0	.176E-01	.402E-04	54.501
11.800	225.000	-47.900	0.0	1.0	.775E-03	.426E-04	55.341
12.110	210.000	-47.300	0.0	1.0	.827E-03	.432E-04	55.400
15.100	150.000	-76.100	0.0	1.0	.220E-04	.470E-04	47.232
16.400	132.000	-75.100	0.0	1.0	.255E-04	.548E-04	44.923
16.600	130.000	-76.300	0.0	1.0	.213E-04	.592E-04	44.815
17.350	88.000	-77.000	0.0	1.0	.192E-04	.757E-04	44.094
18.380	74.000	-66.800	0.0	1.0	.806E-04	.106E-03	40.444
19.530	61.000	-66.100	0.0	1.0	.886E-04	.165E-03	30.864
20.28	54.000	-61.500	0.0	1.0	.160E-03	.203E-03	24.392
21.280	46.000	-60.700	0.0	1.0	.176E-03	.251E-03	17.869
24.440	28.000	-51.600	0.0	1.0	.577E-03	.340E-03	8.187
26.930	19.000	-52.700	0.0	1.0	.456E-03	.296E-03	4.622
27.700	17.000	-46.300	0.0	1.0	.920E-03	.282E-03	3.889
28.537	15.000	-43.400	0.0	1.0	.101E-02	.266E-03	3.181
30.070	12.000	-34.300	0.0	1.0	.305E-02	.237E-03	2.198
32.040	9.000	-34.300	0.0	1.0	.305E-02	.162E-03	1.297

Obs: Devido ao método utilizado para calcular a densidade de vapor de água no LOWTRAN-3, na ausência de informação da umidade relativa na radiossondagem, considerou-se esta igual a um.

A dependência espectral da transmitância para com a visibilidade está plotada na Figura III.2. Para as diferentes bandas verifica-se a tendência de aumento da transmitância do comprimento de onda menor para maior, isto porque a atenuação atmosférica é mais proeminente na região do comprimento de onda menor do que na região de infravermelho; e ao mesmo fato é, ainda, observado para a visibilidade menor. E a dependência espectral da transmitância em função do ângulo de escaneamento está traçada na Figura III.3, onde se verifica que, para a variação do ângulo 0° até 10°, os valores computados de transmitâncias são quase inalteráveis. Portanto, no presente modelo, considerou-se o ângulo de escaneamento igual a zero.

A Figural III.4 mostra a transmitância em função da profundidade ótica, onde a última expressa a quantidade de espalhamento que ocorre na atmosfera. A dependência espectral da profundidade ótica de Rayleigh e da profundidade ótica do aerosol estão traçadas na Figura III.5. Comparando-as, verifica-se que o espalhamento devido aos aerosóis é mais significativo no intervalo espectral considerado.

Terceiro: A conversão dos níveis de cinza dos pixels para as radiâncias totais recebidas pelo satélite, foi realizada pela sub-rotina implementada no programa de correção atmosférica (Programa ATA), determinando-se, para cada banda espectral do LANDSAT, a radiância máxima e mínima, usando a expressão (III.3), ou seja,

$$L_{T_1} = L_{I_1} \cdot T + L_{DT_1} \qquad \text{(III.13)}$$

$$L_{T_2} = L_{I_2} \cdot T + L_{DT_2} \qquad \text{(III.14)}$$

onde os sub-índices 1 e 2 são, respectivamente, calculados para $\rho_a = 1$ e $\rho_a = 0$, respectivamente. Assim, para cada nível de cinza, tem-se a seguinte relação, dada por

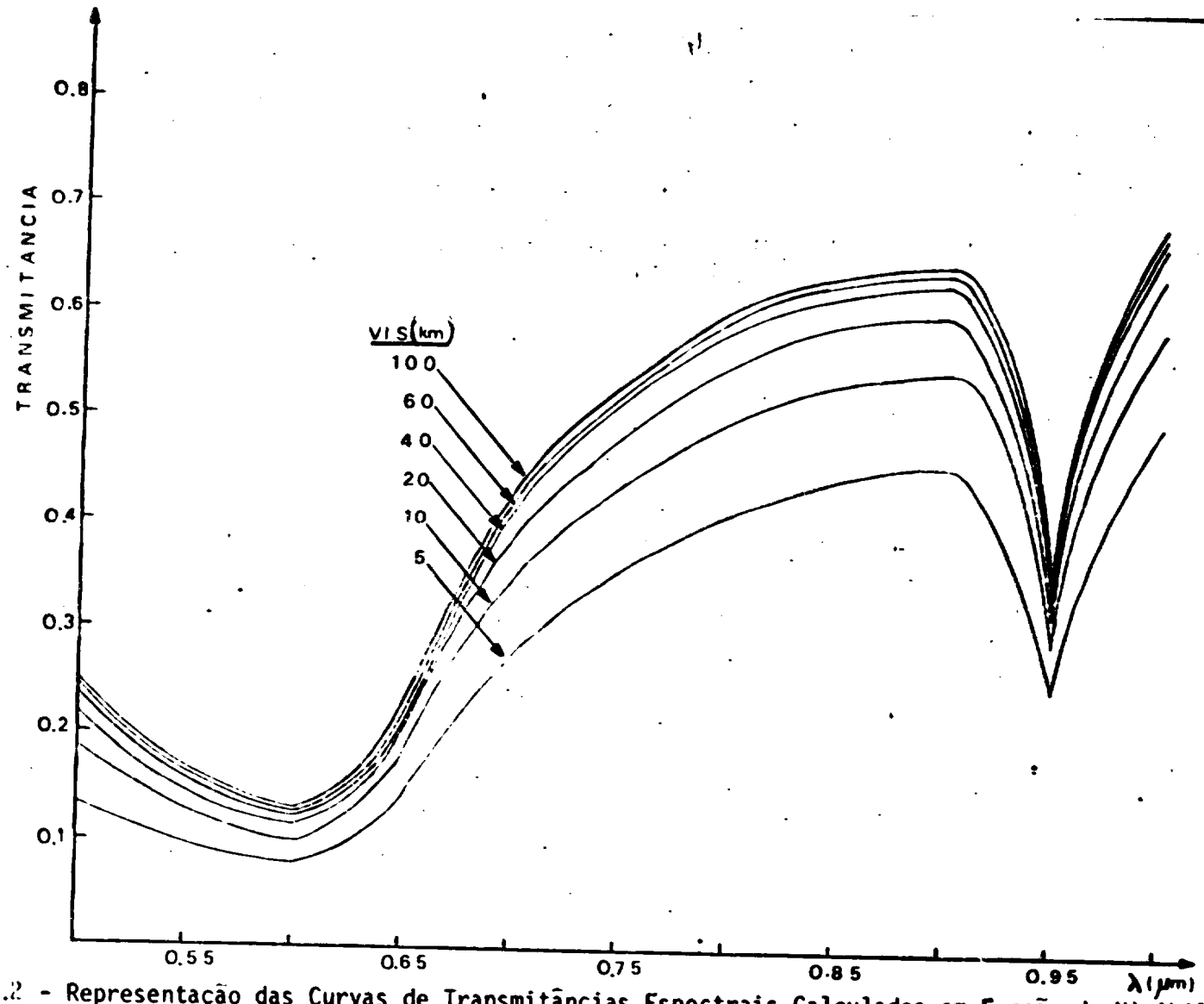

Fig. III.2 - Representação das Curvas de Transmitâncias Espectrais Calculadas em Função da Visibilidade

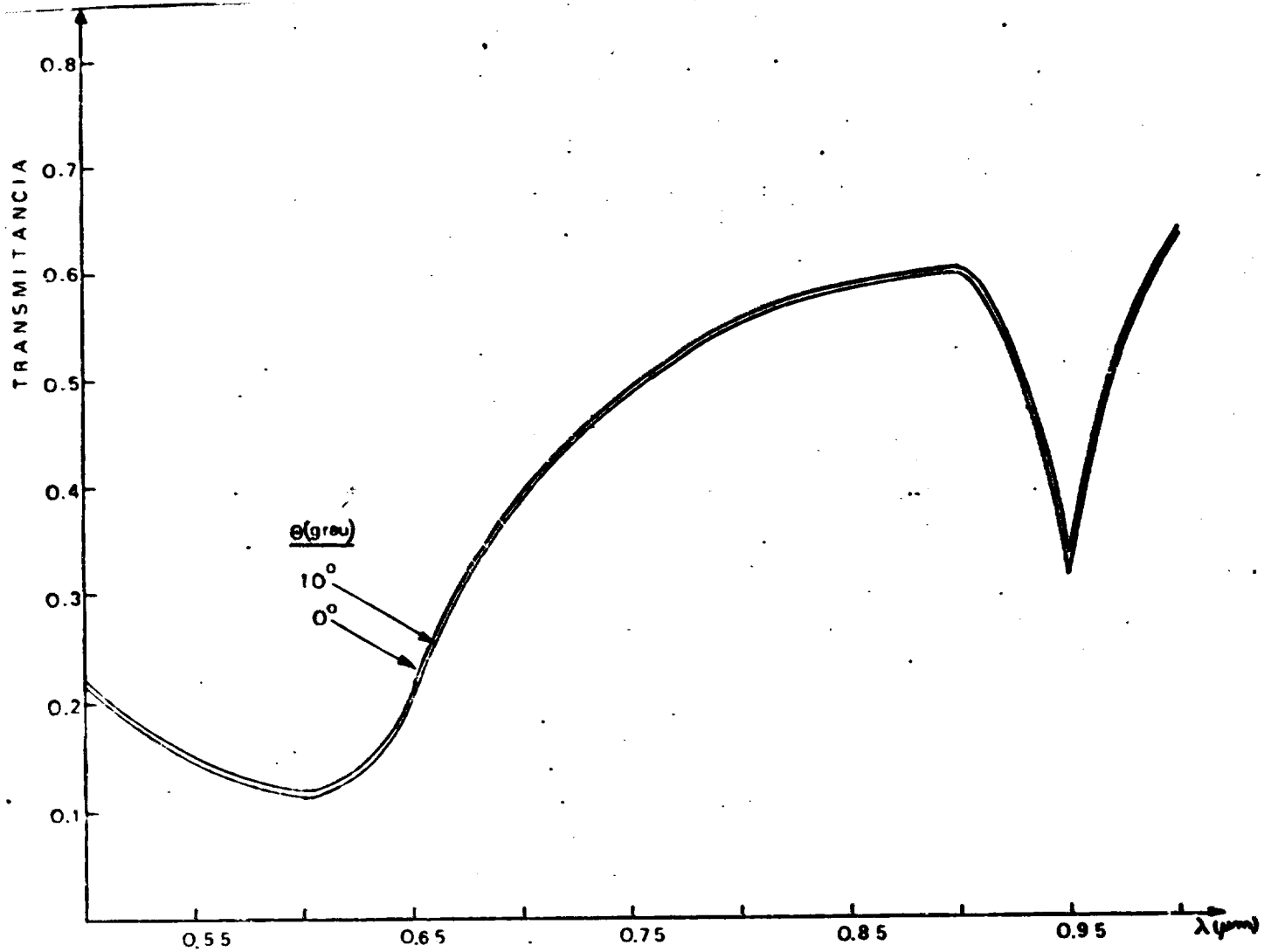

Fig. III.3 - Representação das Curvas de Transmitâncias Espectrais em Função do Ângulo de Escaneamento

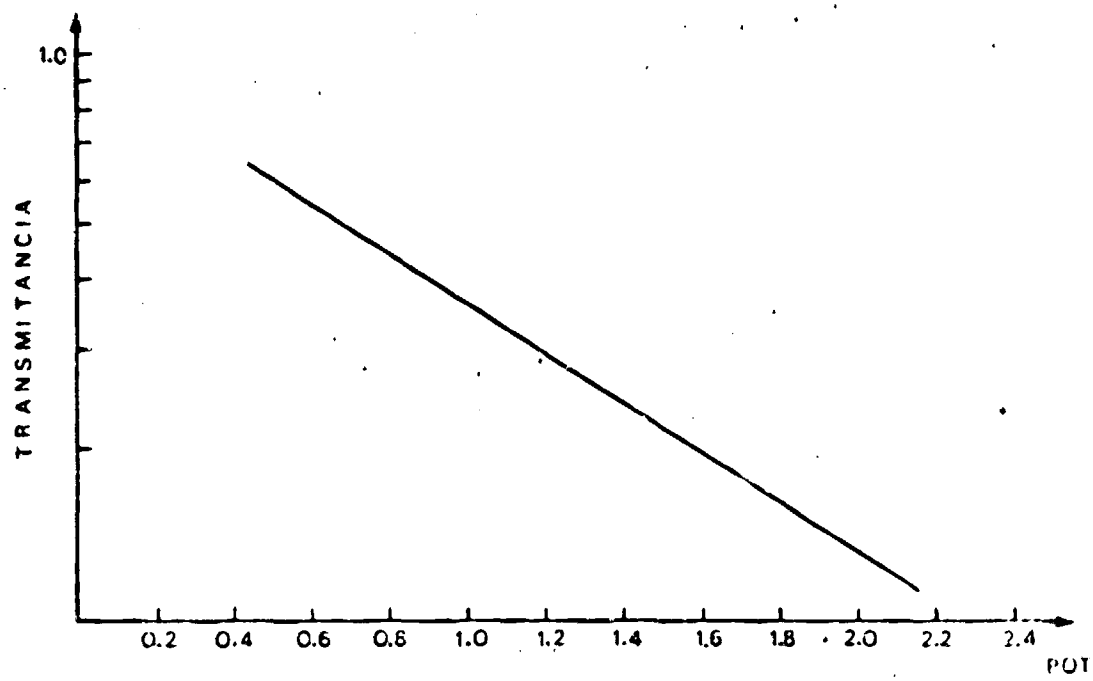

Fig. III.4 - Curva de Transmitância em Função da Profundidade Ótica Total, obtida com os resultados do LOWTRAN-3.

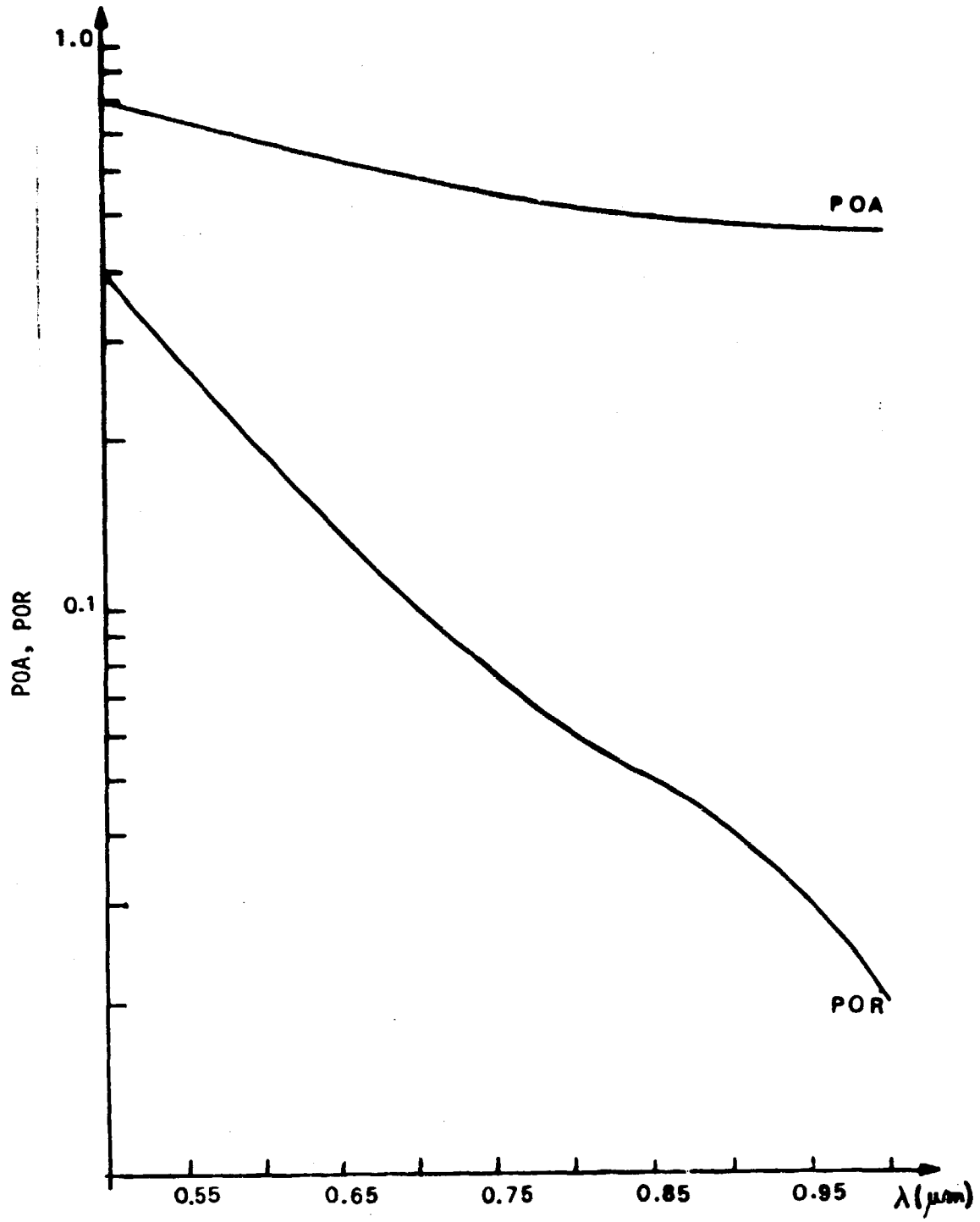

Fig. III.5 - Dependência Espectral da Profundidade Ótica de Rayleigh e da Profundidade Ótica de Aerosol, obtidas com os resultados do LOWTRAN-3.

$$L_{T_i} = \frac{(L_{T_1} - L_{T_2})}{255} \cdot NC_i \qquad (III.15)$$

E a Tabela III.4 mostra os coeficientes angulares resultantes das relações entre os níveis de cinzas versus as radiâncias totais das quatro bandas do satélite, para a imagem de Ribeirão Preto.

TABELA III.4

COEFICIENTES ANGULARES DOS NÍVEIS DE CINZA

VERSUS AS RADIÂNCIAS TOTAIS

CANAL MSS	COEFICIENTE ANGULAR
4	0,034344
5	0,042292
6	0,064376
7	0,067636

Quatro: Sobre a fita gerada, o programa ATA efetua a leitura dos níveis de cinza e calcula os novos valores correspondentes, eliminando as atenuações atmosféricas. Neste processo o programa efetua a leitura de 1.048.576 pixels, e o tempo que leva para calcular os valores dos níveis de cinzas corrigidos no B-6700 é aproximadamente de 15 minutos.

As variações dos níveis de cinza computadas em comparação com os níveis anteriores são plotadas em função do ângulo azimutal na Figura III.6.

Os valores dos parâmetros calculados na correção da imagem de Ribeirão Preto são mostrados na Tabela III.5. Observa-se que a radiação difusa é maior na região de menor comprimento de onda do que na maior, podendo atingir até 55% da radiação total, dependendo da condição atmosférica.

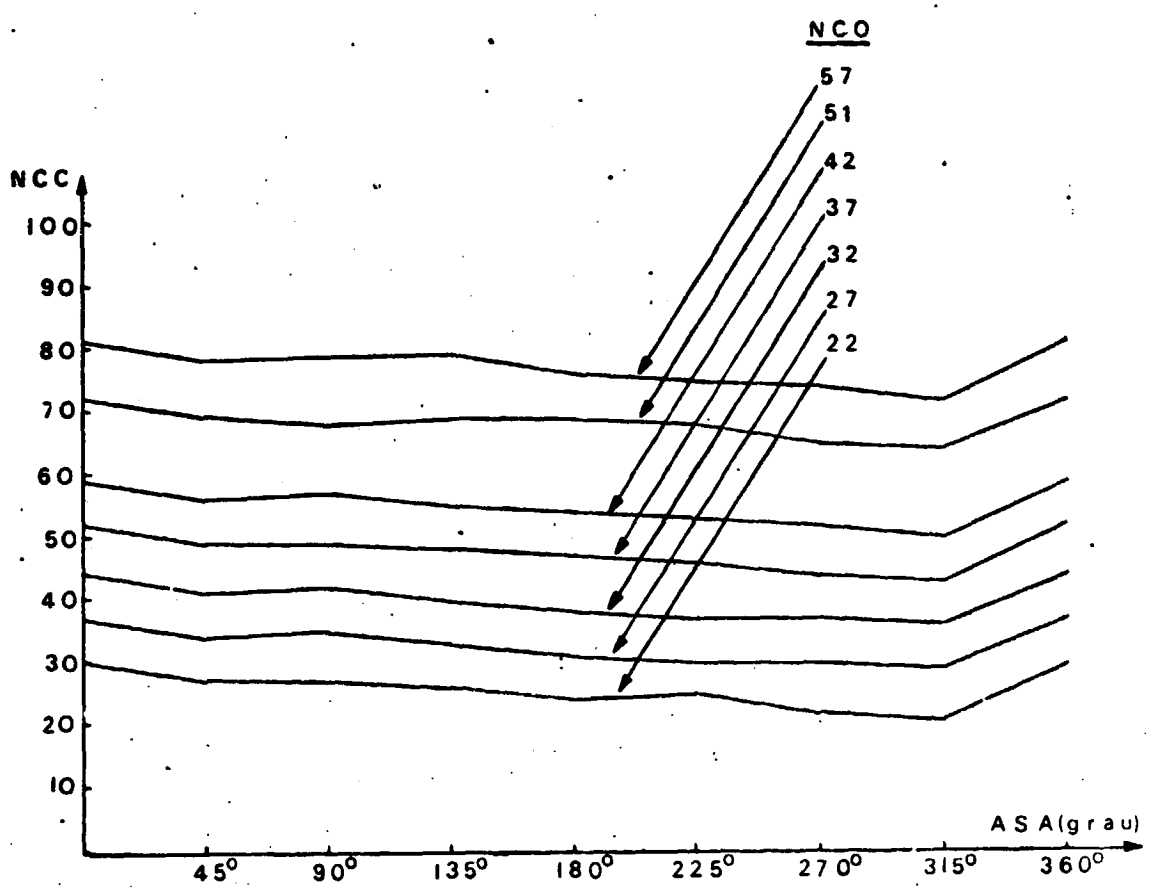

Fig. III.6 - Representação da Variação dos Níveis de Cinza em Diferentes Azimutes.

NCC = Nível de Cinza Corrigido

NCO = Nível de Cinza Original

ASA = Azimute do Satélite

TABELA III.5

PARÂMETROS UTILIZADOS NA CORREÇÃO DA IMAGEM ÓRBITA/PONTO (178/27)

DE RIBEIRÃO PRETO (01/07/1977)

CANAL MSS	$\bar{\rho}$	$\bar{T}$	$\bar{T}_m$	$\bar{T}_a$	L_{DT}(mW cm^{-2} Sr^{-1} μm^{-1})
4	0,1145	0,2675	0,7990	0,6418	0,7007
5	0,1301	0,3465	0,8928	0,6791	0,5053
6	0,3373	0,5640	0,9385	0,7123	0,3456
7	0,3981	0,5997	0,9726	0,7596	0,3270

$\bar{\rho}$ = albedo médio

$\bar{T}$ = transmitância média

$\bar{T}_m$ = transmitância molecular

$\bar{T}_a$ = transmitância de aerosóis

L_{DT} = radiância espectral difusa

Nesta tabela os resultados espectrais foram calculados a partir das refletâncias individuais dos alvos, sendo que estes alvos foram reconhecidos no processamento preliminar da imagem (Tabela III.6).

TABELA III.6

REFLETÂNCIAS INDIVIDUAIS DOS ALVOS RECONHECIDOS NO PROCESSAMENTO AUTOMÁTICO PRELIMINAR DA IMAGEM

CANAL MSS	ÁGUA[1]	CANA[2]	SOLO[3]	PASTO[4]	MATA[5]
4	0,11	0,15	0,12	0,08	0,09
5	0,15	0,10	0,27	0,10	0,09
6	0,14	0,48	0,34	0,23	0,31
7	0,16	0,46	0,37	0,37	0,41

1 - medida por Bentancurt (1978)

2 - calculada por Suits e Safir (1972)

3 - calculada por Condit (1970)

4 - tomado do Meteorological Monographs, pg. 4 (1965)

5 - tomado do Meteorological Monographs, pg. 4 (1965)

CAPÍTULO IV

RESULTADOS EXPERIMENTAIS

A fim de verificar a validade do método apresentado, os resultados conseguidos são apresentados nas duas formas apreciáveis, ou seja, qualitativa e quantitativa, para identificar se houve alterção no aspecto visual e no aspecto de classificação de alvo.

Como primeiro passo, tomou-se a radiossondagem de Brasília (21/06/74) e, codificando os dados de perfil vertical atmosférico, obtiveram-se com LOWTRAN-3 os parâmetros necessários (transmitância, profundidade ótica do aerosol, profundidade ótica de Rayleigh) e, junto com a data e hora da passagem do satélite, latitude e longitude do local, acionou-se o programa ATA para corrigir a imagem original, já antes "formatada" convenientemente.

Após a correção, como resultado qualitativo, tiraram-se "slides" do vídeo do IMAGE-100 das bandas do LANDSAT, os quais, convertidos em fotografias convencionais, são mostrados nas Figuras IV.1, IV.2 e IV.3. Os mesmos correspondem às fotografias comparativas entre as imagens originais e as corrigidas dos canais MSS 4 e 7 do LANDSAT e a composição colorida dos canais MSS 4,5 e 7.

Nas fotografias que correspondem às imagens originais, os contrastes entre as configurações das superfícies adjacentes são reduzidas, dificultando a incerpretação usual da imagem.

Confirmou-se que, no intervalo espectral utilizado, o efeito da atenuação atmosférica é muito maior no canal MSS de comprimentos de ondas menores (0,5 μm a 0,6 μm) do que para o canal MSS de comprimentos de onda maiores (0,8 μm a 1,1 μm).

As imagens corrigidas são sensivelmente melhores; as cores foram realçadas e são mais contrastantes, sendo possível uma melhor discriminação entre alvos diferentes, facilitando o trabalho do foto-intérprete.

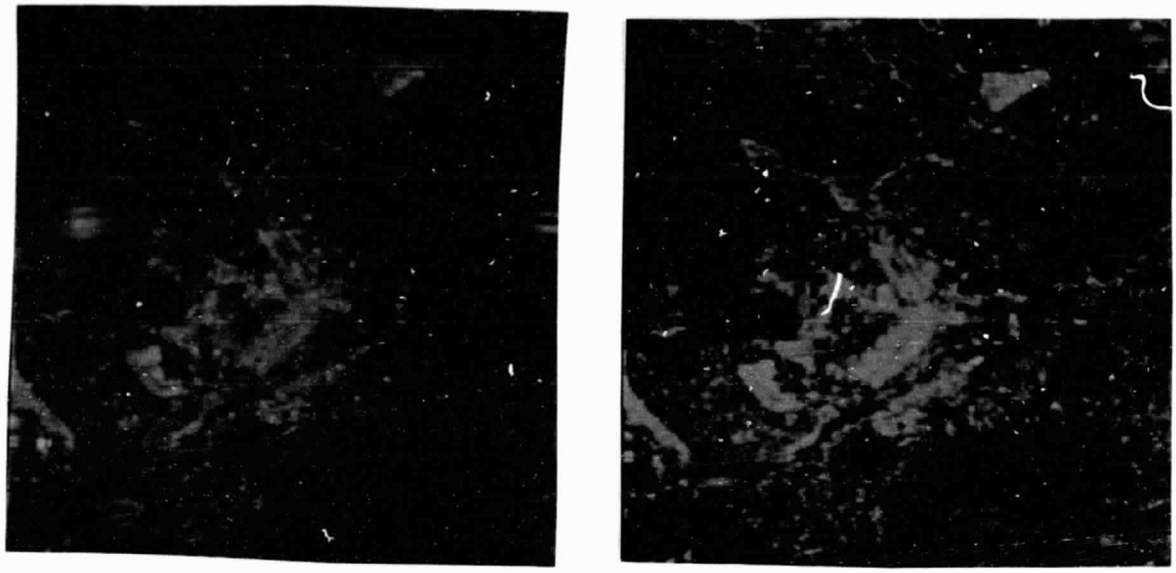

Fig. IV.1 - Imagens Original e Corrigida do Canal MSS 4 do LANDSAT, órbita/ponto (192/23), Brasília (21/06/74).

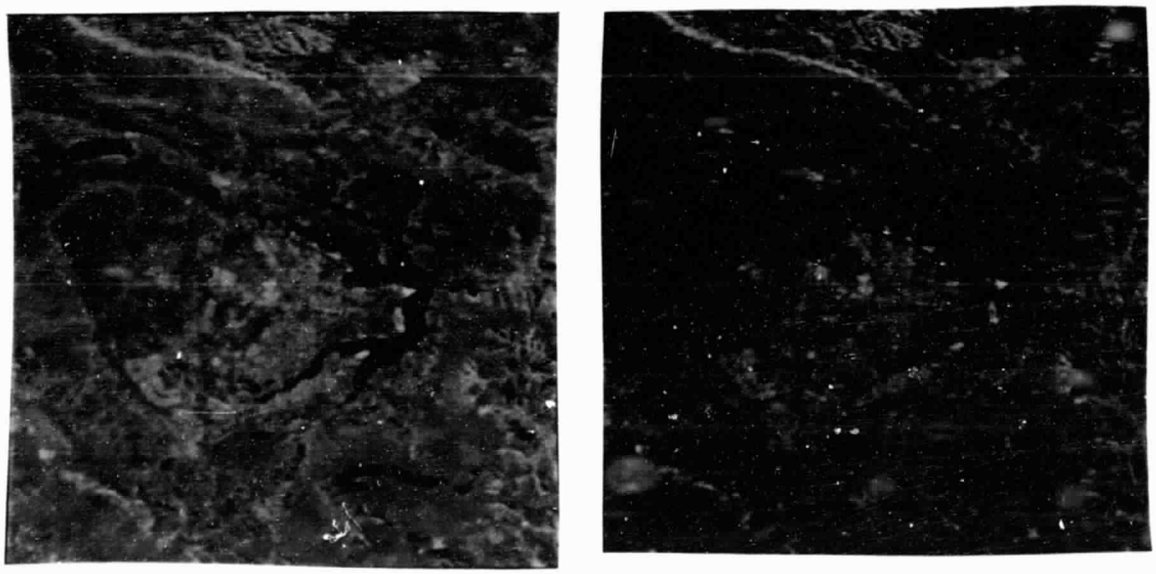

Fig. IV.2 - Imagens Original e Corrigida do Canal MSS 7 do LANDSAT, órbita/ponto (192/23), Brasília (21/06/74).

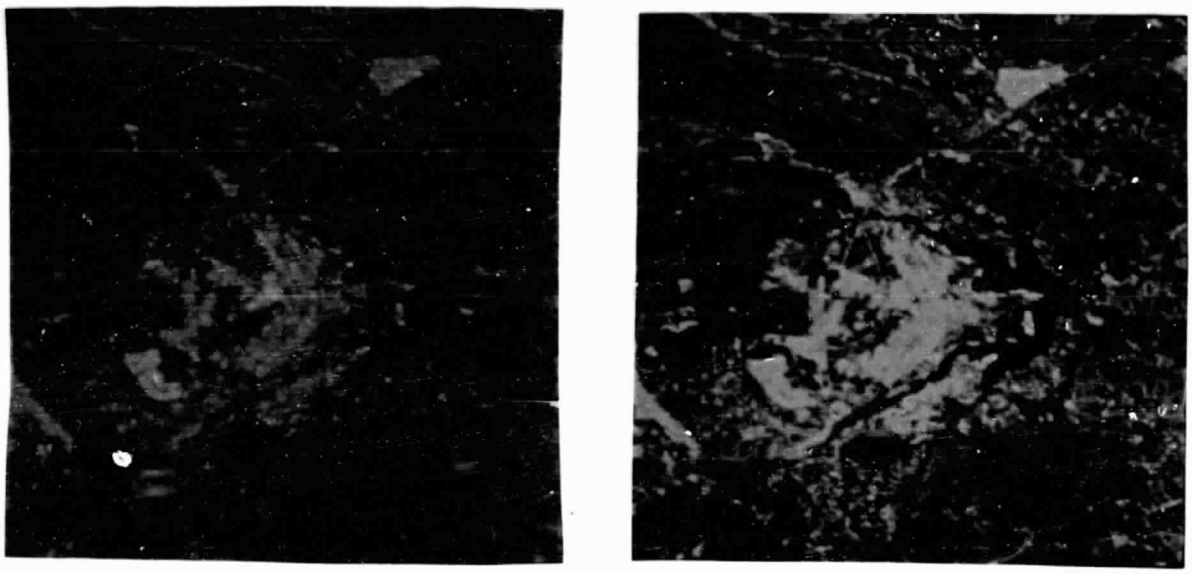

Fig. IV.3 - Imagens Original e Corrigida, Composição Colorida dos Canais MSS 4, 5 e 7 do LANDSAT, órbita/ponto (192/23), Brasília (21/06/74).

Note-se que certas áreas, como estradas e vegetações, apresentam maior contraste em texturas nas imagens corrigidas, aparecendo como configurações pouco definidas nas imagens originais.

Além disso, com a correção, a manipulação de imagens de várias datas torna-se viável, visto que os comportamentos espectrais dos alvos serão mais homogêneos de uma data para a outra mantendo a maior identidade entre suas características, em decorrência da redução dos efeitos atmosféricos. Consequentemente, a correção possibilita a transferência de comportamento espectral de uma imagem para outra com maior segurança do que as imagens originais, nas quais os efeitos atmosféricos estão presentes e acarretam comportamentos espectrais diferentes para datas distintas.

Na imagem de Brasília (LANDSAT, órbita/ponto (192/23), 21/06/74) não houve possibilidade de obter resultado quantitativo devido à ausência de apoio terrestre simultâneo ao sobrevôo.

No segundo objetivo, efetuando todos os passos necessários para a correção da imagem, tentou-se obter uma nova imagem da Baía de Guanabara, objetivando correção da imagem sobre o mar; entretanto, não se obteve resultado positivo porque, na imagem inicial, verificou-se que havia nuvens sobre a área, as quais saturavam a imagem corrigida, principalmente sobre a área continental e sobre as posições onde havia presença de nuvens, dificultando a interpretação.

Então, para obter resultado quantitativo, utilizou-se a região canavieira de Ribeirão Preto (01/07/1977), orbita/ponto (178/27). Na primeira tentativa, dos quatro canais MSS corrigidos do LANDSAT, foram eliminados os dois primeiros canais (4 e 5), em decorrência dos valores das radiações difusas computadas nestas faixas da região do espectro visível.

Neste caso, as radiações difusas foram superestimadas, tornando-se os maiores contribuintes na radiação total percebida pelos sensores MSS do satélite, e que consequentemente mascaram outras mais importantes, isto é, as radiações refletidas pelos alvos imageados.

Isto talvez se deva ao fato de que se utilizou a radiossondagem de São Paulo para simular o perfil atmosférico da região de Ribeirão Preto, na ausência da radiossondagem local. Obtiveram-se com esse procedimento valores de transmitância muito baixos, subestimados, acarretando também baixos valores de radiações transmitidas.

Tais valores incoerentes devem-se provavelmente ao fato de que São Paulo é um grande centro industrial, tendo portanto maior concentração de aerosóis de poluentes e particulados, e ainda maior quantidade de umidade devido ao horário de lançamento de radiossondagem (8 horas e 25 minutos). Haja vista que, no diagrama adiabático, notou-se a presença de duas inversões térmicas, uma a nível de superfície, devido a resfriamento radiativo noturno e outra no nível de 700 milibares, devido ao sistema de alta pressão de grande escala dominante.

Então, para solucionar o problema, procurou-se uma radiossondagem continental mais próxima possível de Ribeirão Preto na mesma data de passagem. Só foi possível a de Brasília.

Repetiram-se todos os passos e obtiveram-se valores de radiações difusas menores do que os anteriores; mesmo assim, não se conseguiu realçar o canal MSS4. Isto porque a informação disponível sobre a cana de açúcar neste canal de imagem original é escassa. (Tabela IV.1). Para todas as fases de crescimento de cana de açúcar consideradas, no intervalo de níveis de cinza entre o superior e o inferior são encontrados apenas 2 ou 3 níveis de cinza. Portanto, imagina-se que ausência do canal MSS não afetará significativamente a classificação desse alvo da cena.

Finalmente, para comparar ambas as imagens, original e corrigidas de uma mesma data, quanto ao aspecto quantitativo, tomou-se como referência uma área delimitada, totalmente coberta por fotografias aéreas, para servir de área teste para medir a precisão de avaliação da área canavieira, obtida com a interpretação automática da imagem original do LANDSAT e da imagem corrigida pelo programa ATA.

TABELA IV.I

CLASSIFICAÇÃO DAS DIFERENTES FASES DE CULTURA DA CANA (PROJETO ESTATÍSTICA AGRÍCOLA DO DEPARTAMENTO DE SENSORIAMENTO REMOTO-INPE)

	Padrão 1				Padrão 3				Padrão 4				Padrão 5			
Canal MSS / Nível de Cinza	4	5	6	7	4	5	6	7	4	5	6	7	4	5	6	7
Nível Inferior	7	6	22	19	8	7	22	18	7	7	22	16	7	6	21	18
Nível Superior	9	10	31	28	10	11	29	30	10	11	28	27	11	11	32	29

Na fotografia aérea obteve-se uma classificação de cana de açúcar elaborada pelos pesquisadores do Projeto "Estatísticas Agrícolas" (EAGRI), do Departamento de Sensoriamento Remoto (DSR), do Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE). E, para o cômputo desta área, utilizou-se uma malha de pontos equidistantes de 1,0 mm, obtendo, assim, uma área correspondente de 106,03 km^2 de cana de açúcar numa área total delimitada de 197,21 km^2 da fotografia aérea.

Os resultados comparativos da avaliação de cana de açúcar entre as imagens e as fotografias aéreas são mostrados na Tabela IV.2.

Em relação às fotografias aéreas, que são consideradas como sendo verdade absoluta, obteve-se com a imagem original do LANDSAT a classificação de 68% da área correspondente à cana enquanto que utilizando-se a imagem corrigida obteve-se 77%, também em relação às fotografias aéreas. Devido à dificuldade operacional do IMAGE-100, não se conseguiu delimitar a mesma área total nas imagens do LANDSAT, mas obteve-se uma área total, quase similar, de 180,33 km^2. Isto corresponde a um erro de 8,5% na determinação da área total das imagens do LANDSAT utilizando o atual sistema operacional do IMAGE-100. Obviamente, as percentagens de classificações de cana mencionadas seriam maiores para ambas as imagens se as áreas totais, isto é, a da fotografia aérea e a do LANDSAT, fossem iguais.

Analisando os "slides" das imagens obtidas por equipamento DICOMED (sistema fotográfico do IMAGE-100 que transfere os sinais correspondentes dos pixels diretamente da memória para o material fotográfico), verificou-se que existe uma distinção radical na classificação de cana de açúcar entre a imagem original e a corrigida. No primeiro, notou-se que são classificadas aquelas canas que são fortemente iluminadas. Logo, para a imagem original existe uma tendência de classificar alvos mais iluminados do que na corrigida, e nesta foram classificadas aquelas canas menos iluminadas.

TABELA IV.2

ÁREAS COMPARATIVAS DA AVALIAÇÃO DE CANA DE AÇÚCAR ENTRE AS FOTOGRAFIAS AÉREAS, A IMAGEM ORIGINAL E A IMAGEM CORRIGIDA DO LANDSAT

MATERIAL DE CLASSIFICAÇÃO	ÁREA TOTAL DELIMITADA (km^2)	ÁREA CANAVIEIRA RECONHECIDA (km^2)	DIFERENÇA RELATIVA (%)
Fotografia aérea	197,21	106,03	
Imagem original	180,33	72,23	68,1
Imagem corrigida	180,33	81,98	77,3

Para avaliar as precisões de classificações de ambas as imagens, ampliou-se o "slide" que contém as duas imagens, simultaneamente, com um projetor KODAK até atingir o tamanho da foto aérea e fez-se a comparação.

Nesta comparação, observou-se que certas áreas que não correspondiam à cana foram classificadas como áreas canavieiras. Isto aconteceu devido ao fato que certos alvos têm refletância espectral semelhante à da cana, sendo portanto, uma deficiência do sistema em si. Esta ocorrência implica redução da área real correspondente à cana; porém, como este fato ocorre em ambas as imagens, original e corrigida, acredita-se que os resultados relativos, isto é, a comparação entre as imagens original e corrigida, não sejam alterados significativamente.

Portanto, para a imagem corrigida, no cômputo final de áreas, teve-se um acréscimo de cerca de 10% da área canavieira classificada.

Porém, uma conclusão quantitativa mais segura, expressa em termos numéricos, somente pode ser obtida com um experimento bem mais elaborado e controlado, a partir dos princípios estabelecidos para este método de correção atmosférica para imagens MSS dos satélites da série LANDSAT.

CAPÍTULO V

CONCLUSÕES

Demonstrou-se, aqui, que o presente método de aplicação da equação de transferência radiativa nas correções dos efeitos atmosféricos nas imagens, produz resultados relevantes.

Pelos resultados alcançados, observa-se um aspecto visual melhor e um aumento quantitativo no reconhecimento dos alvos; no caso típico estudado, a região canavieira de Ribeirão Preto, obteve-se um acréscimo aproximado de 10% na área corretamente classificada como cana de açúcar.

Os cálculos têm sido coerentes, embora nas faixas de comprimento de onda menor (0,5 - 0,6 μm e 0,6 - 0,7 μm), a concordância seja menor (Sharma, 1976). Isto em decorrência do espalhamento atmosférico ser maior nessas faixas, como também a resposta dos alvos, principalmente a vegetação, ser menor nessa faixa do visível do que nas faixas do infravermelho próximo. As análises mostram que as incertezas no conhecimento exato dos valores dos parâmetros ambientais, utilizados como entrada no presente método, podem resultar em erros sistemáticos nos cálculos. Portanto, devem-se tomar precauções nas especificações dos parâmetros sobre os quais o método está baseado.

Alguns aspectos podem ser implementados, tais como:

a) Absorção pelos aerosóis, usualmente dispensável na região espectral visível, mas na região do infravermelho próximo pode ter alguma importância;

b) aproximação da superfície como lambertiana, comum, porém existem muitos casos em que a suposição é falha;

c) formulação bi ou tridimensional para o método, na correção da imagem devido à presença das nuvens que alteram a radiação proveniente dos alvos;

PRECEDING PAGE BLANK NOT FILMED

d) descrições mais exatas das condições atmosféricas locais, com dados medidos simultaneamente com a obtenção das imagens;

e) utilização de um programa classificador automático SISTEMA MAXVER (classificador Gaussiano por Máxima Similaridade) mais sofisticado do que SINGLE-CELL, no IMAGE-100.

A inclusão dos refinamentos acima mencionados poderá proporcionar um método de correção atmosférica para transferência radiativa mais sofisticado e um sistema operacional de correção atmosférica com condições adequadas, produzindo melhores resultados em função da realidade terrestre.

Porém, nunca deixará de existir o problema intrínseco do sistema: a semelhança espectral de alvos, que sempre limitará os resultados alcançados, por mais sofisticados que sejam os modelos de transferência radiativa.

PRECEDING PAGE BLANK NOT FILMED

AGRADECIMENTOS

Aqui expresso meus agradecimentos ao Dr. Nelson de Jesus Parada, Diretor do INPE, pela oportunidade de realização deste trabalho;

Ao Dr. Luiz Gylvan Meira Filho, Coordenador do Departamento de Meteorologia do INPE, pelo apoio;

Ao Dr. Luiz Carlos Baldicero Molion, pela dedicação e orientação e ao Dr. Ravindra Kumar pelas sugestões e co-orientação.

Aos colegas do INPE responsáveis pela operação do computador BURROUGHS-6700 e do analisador multiespectral IMAGE-100 pelos processamentos e "formatações" das imagens e ao Sr. Juan J.V. Bentancurt pelo trabalho ligado à interpretação de imagem do LANDSAT, sem os quais este trabalho não se concretizaria.

À srta. Maria Natividade R. Pimont pelos trabalhos de datilografia.

E, em particular aos meus familiares pelo apoio incessante durante toda minha carreira estudantil.

PRECEDING PAGE BLANK NOT FILMED

BIBLIOGRAFIA

ALTSHULER, T.L. *Infrared transmission and background radiation by clear atmospheres.* Michigan, 1961. (G.E. Report 61 SD)

ANDING, D.C.; WALKER, J.; ROSE, H.M. A computer programme to calculate atmospheric effects on infrared wavelenght nadiation. In: *International symposium on remote sensing,* 7, Ann Arbor, Mich., 1971. Proceedings V. 2, p. 1777 - 1798.

———; KAUTH, R.; TURNER, R. *Atmospheric effects on infrared multispectral sensing of sea-surface temperature from space.* NASA, 1971. (NASA CR-1858).

BARBOSA, M.N.; TAVARES, L.P.; PINHEIROS, E.S. *Manual do usuário de dados de satélite ERTS(LANDSAT).* São José dos Campos, INPE, Julho, 1975. (INPE-688-NTE/009).

BATISTA, G.T.; MENDONÇA, F.J.; LEE, D.C.L.; TARDIN, A.T.; CHEN, S.C.; NOVAES, R.A. *Uso de dados orbitais para identificação de áreas de cana de açúcar.* São José dos Campos, INPE, Abril, 1978. (INPE-1228-NTE/116).

———; ———; ———; ———; ———; ——— *Uso de sensores remotos a bordo de satélite e aeronaves na identificação e avaliação de áreas de culturas para fins de previsão de safras.* São José dos Campos, INPE, Abril, 1978. (INPE-1229-NTI/103).

CAVALCANTI, L.A. *Correção radiométrica dos dados enviados pelo sistema MSS do satélite ERTS.* São José dos Campos, INPE, dezembro, 1975. (INPE-786-NTI/039).

CHANDRASEKHAR, S. *Radiative transfer* N.Y., Dover, 1960.

CONDIT, H.R. The spectral reflectance of American soils. *Photogrammetric Engineering,* 36: 955, 1970.

DEIRMENDJIAN, D. *Eletromagnetic scattering on spherical radiation.* N.Y., Elsevier, 1979.

DRUMMOND, R.R. *Digest of NASA Earth observation sensors.* NASA, 1972 (x-733-72-464).

ELTERMAN, L. *Atmospheric attenuation model, 1964, in the ultraviolet, visible and infrared regions for altitudes to 50 Km.* Hascom AFB, Air Force Geophysics Laboratories, Mass., 1964. (Envionenmental Research Papers nº 46).

FARROW, J.B. *The influence of the atmosphere on remote sensing measurements, ultraviolet, visible and infrared regions.* Stevenage, U.K., ESA(ESRO), 1975 (CR-354).

GRATES, D.M. Heat, radiant and sensible Boston, Mass., 1965. *Meteorological Monographs* V. 6, nº 28, p. 4-21.

GOODY, R.M. *Atmospheric radiation.* Oxford, Clarendon Press, 1964.

HERRING, W.S.; BORDEN, T.R. *Ozone observations over North America.* Hascon AFB, Air Fonce Cambridgl Research Laboratories, 1964, p. 75 (AFCRL-64-30).

JUNGE, C.E. *Air chemistry and radioactivity.* London, Academic, 1963.

KONDRATYEV, K.Y. *Radiation in the atmosphere.* London, Academic, 1969.

LaROCCA, A. Methods of calculating atmospheric transmittance and radiance in the infrared. *Proceedings of IEEE,* 63(1):75-128, 1975.

———; TURNER, R. *Methods of calculating atmospheric transmittance and radiance.* Ann Arbon, Mich., IRIA, Jnn 1975. (N00014-74-C-0285).

LIST, R.J. *Smithsonian meteorological tables.* Washington, Smithsonian Institute Press, 1968.

McCLATCHEY, R.A.; FENN, R.W.; SELBY, F.E.A.; VOLZ, F.E.; GARING, J.S. *Optical properties of the atmosphere.* Hascon AFB, Air Force Cambridge Research Laboratories, 1972 (AFCRL-411).

Paltrige, G.W.; PLATT, C.M.R. Terminology, basic laws and standartds. In: *Radiative processes in meteorology and climatology*. Amsterdam, Elsevier, 1976. Cap. 2.

———; ——— Radiative transfer. In: *Radiative processes in meteorology*. Amsterdam, Elsevier, 1976. Cap. 4.

PENNDORF, R. *Research on aerosol scattering in the infrared*. Hascom AFB, AFCRL, 1961. (Scientific Repont, nº5).

ROBINSON, N. *Solar Radiation*. N.Y., Elsevier, 1966.

SELBY, J.E.A.; McCLATCHEY, R.A. *Atmosphere transmittance from 0,25 to 28,5 μm : computer code LOWTRAN - 3*. Hascom AFB, AFCRL, 1975. (Environmental research papers nº 513, TR-75-0255).

———; SHETTLE, E.P.; McCLATCHEY, R.A. *Atmospheric transmittance from 0,25 to 28,5 μm : supplement LOWTRAN 3B(1976)*. Hascom AFB, Air Force Geophysics Laboratories, 1976 (AFGE-TR-76-02586).

SHARMA, R.D. Enhancement of earth resources technology satellite (ERTS) and aircraft imageru usind atmospheric corrections. In: *International symposium on remote sensing*, 10., ann arbor, Mich., 1976. Proceedings V.1, p. 137-151.

STRATTON, J.A. *Electromagnetic theory*. N.Y., McGraw.Hill, 1941.

SUITS, G.H.; SAFIR, G.R. Verification of a reflectance model for nature corn with applications to corn blight detection. *Remote Sensing of Environment*, 2 (3): 183, 1972.

TURNER, R.E.; MANILA, W.A.; NALEPRA, R.F. Importance of atmospheric scattering in remote sensing. In: *International symposium on remote sensing of environment*, 7., Ann Arbor, Mich., 1971 Proceedings V. 3, p. 1651-1677.

———; SPENCER, M.M. Atmospheric for correction of spacecraft data. In: *International symposium on remote sensing of environment*, 8, Ann Arbor, Micg, 1972 Proceedings V. 1, p. 895-934.

VON DE HULST, H.C. *Ligth scattering by small particles.* N.Y., Willey, 1957.

WEZERNAK, C.T.; TURNER, R.E. *Spectral reflectance and radiance characteristics of water pollutants.* Ann Arbor, Mich., 1976. (NASA-CR-2665).

PRECEDING PAGE BLANK NOT FILMED

APÊNDICE A

DETERMINAÇÃO DA FUNÇÃO FASE DE ESPALHAMENTO

Considerando a teoria de espalhamento da radiação eletromagnética pelas esferas dielétricas homogeneas, isto é, espalhamento de Mie, obtém-se os parâmetros necessários.

A expresão analítica, que é função do comprimento de onda, parâmetro do tamanho e índice de refração das partículas, define-se por

$$p(\cos \chi) = \frac{1}{2\pi x^2 Q_s(m,x)} \cdot (|S_1|^2 + |S_2|^2) \qquad \text{A.I}$$

onde

$Q_s(m,x)$ = fator de eficiência de espalhamento

m = índice de refração

x = parâmetro do tamanho

r = raio da partícula

λ = comprimento de onda

S_1, S_2 = amplitudes do espalhamento

Os termos acima definidos são dados pelas seguintes relações:

$$\pi r^2 Q_s(m,x) = \Gamma_s(m,x) = \frac{\lambda^2}{2\pi} \sum_{\ell=1}^{\infty} (2\ell+1)(|a_\ell|^2 + |b_\ell|^2) \qquad \text{A.2}$$

$$m = m_1 - im_2 \qquad \text{A.3}$$

$$S_1 = \sum_{\ell=1}^{\infty} \frac{2\ell + 1}{\ell(\ell+1)} \left| a_\ell \Pi_\ell + b_\ell \tau_\ell \right| \qquad \text{A.4}$$

$$S_2 = \sum_{\ell=1}^{\infty} \frac{2\ell + 1}{\ell(\ell+1)} \left| a_\ell \tau_\ell + b_\ell \Pi_\ell \right| \qquad \text{A.5}$$

$$x = \frac{2\pi r}{\lambda} \qquad \text{A.6}$$

Nos trabalhos de Stratton (1941), Von de Hulst (1957) e Deirmenfjian (1969) pode-se encontrar um tratamento mais rigoroso.

Na equação (A.2) a_ℓ e b_ℓ são coeficientes de Mie dados por

$$a_\ell = \frac{\Psi_\ell'(mx)\ \Psi_\ell(x) - m\Psi_\ell(mx)\ \Psi_\ell'(x)}{\Psi_\ell'(mx)\ \zeta(x) - m\Psi_\ell} \qquad \text{A.7}$$

$$b_\ell = \frac{m\Psi_\ell'(mx)\ \Psi_\ell(x) - \Psi_\ell(mx)\ \Psi_\ell'(x)}{m\Psi_\ell'(mx)\ \zeta(x) - \Psi_\ell(mx)\ \zeta_\ell'(x)} \qquad \text{A.8}$$

onde Ψ_ℓ e ζ_ℓ são as funções Riccati-Bessel, e os apóstrofos indicam diferenciais em relação ao argumento da função. As funções Π_ℓ e τ_ℓ são dadas por

$$\Pi_\ell(\cos\chi) = \frac{dP_\ell(\cos\chi)}{d(\cos\chi)} \qquad \text{A.9}$$

$$\tau_\ell(\cos\chi) = \cos\chi\,\Pi_\ell(\cos\chi) - \operatorname{sen}\chi\,\frac{d|\Pi_\ell(\cos\chi)|}{d\cos\chi} \qquad \text{A.10}$$

onde $P_\ell(\cos\chi)$ é o polinômio de Legendre.

Determinaram-se os parâmetros acima e calculou-se a função fase de espalhamento para as partículas de aerosóis de raios compreendidos entre 0,1 e 5,0 μm com índice de refração média de $m_1 = 1{,}33$.

A Figura A.1 mostra o resultado calculado, onde se verifica a distribuição angular da radiação espalhada pelos aerosóis, para diferentes comprimentos de ondas. Pode-se notar por comparação com a Figura A.2, que o espalhamento dos aerosóis é totalmente distinto do espalhamento Rayleigh.

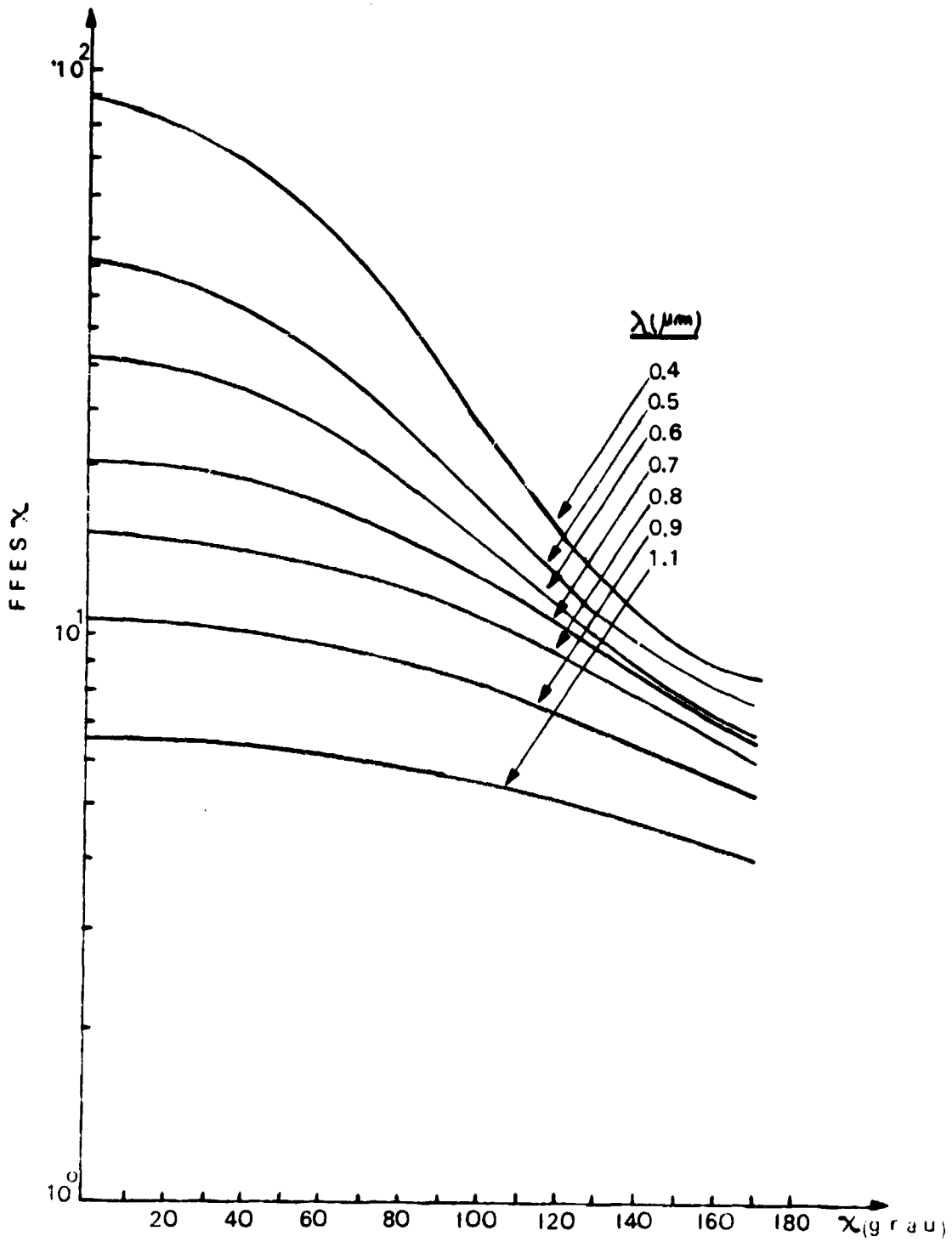

Fig. A.1 - Distribuição Angular da Radiação Espalhada pelos Aerosóis a vários Comprimentos de Ondas, obtida pela Sub-rotina do Programa ATA.

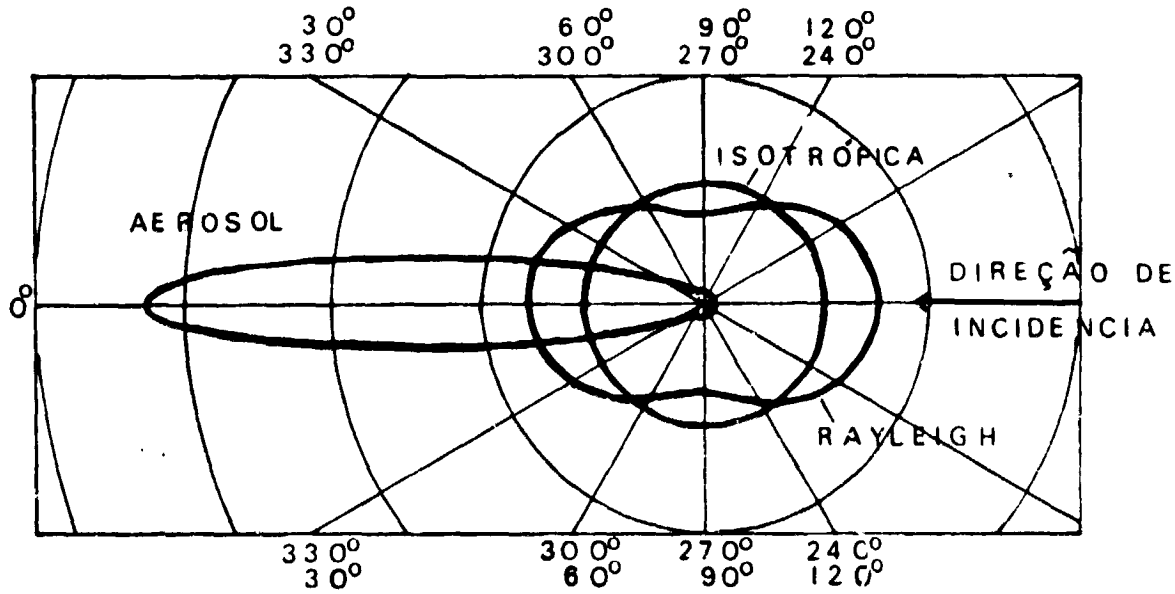

Fig. A.2 - Dependência Angular da Função Fase de Espalhamento (La Rocca, 1975).

APÊNDICE B

PROGRAMA LOWTRAN-3

```
      COMMON Z(34),P(7,34),T(7,34),EH(10,34),WH(7,34),HM,HL,RE,CW,CD,PI
      DIMENSION W0(7,34),H71(34),H72(6),AHAZE(34),AHZ2(34)
      DIMENSION TR(67),FV(67),FU(67),HZ(2),TX(10),VH(10),H(10),E(10)
      DIMENSION C1(2510), C2(1575), C3(540), C4(133), C5(15), C8(102)
      DIMENSION VX(45),C7(45),C7A(45)
      F(A)=EXP(18.9735-14.9595*A-2.43882*A*A)*A
      DATA HZ(1)/5423 KM/,HZ(2)/54.5 KM/
C*****************************************************************
C     PROGRAM LOWTRANS CALCULATES THE TRANSMITTANCE OF THE ATMOSPHERE
C     FROM 350 CM-1 TO 40000 CM-1 (0.25 TO 28.57 MICRONS) AT 20 CM-1
C     SPECTRAL RESOLUTION ON A LINEAR WAVENUMBER SCALE.
C     REFRACTION AND EARTH CURVATURE EFFECTS ARE INCLUDED.    ATMOSPHERE
C     IS LAYERED IN ONE KM. INTERVALS BETWEEN 0 AND 25 KM., 5 KM. INTER-
C     VALS TO 50 KM., A TWENTY KM. INTERVAL TO 70 KM., AND A THIRTY KM.
C     INTERVAL TO 100 KM.
C*****************************************************************
C     PROGRAM ACTIVATED BY SUBMISSION OF FOUR CARD SEQUENCE AS FOLLOWS
C
C   CARD 1 MODEL,IHAZE,ITYPE,LEN,JP,IM,M1,M2,M3,ML,RO   FORMAT(10I3,F10.3 )
C   CARD 2 H1,H2,ANGLE,RANGE,BETA,VIS                   FORMAT(7F10.3)
C   CARD 3 V1, V2, DV                                   FORMAT(7F10.3)
C   CARD 4 IXY                                          FORMAT(I3)
C
C     MODEL=1,2,3,4,5 OR 6 SELECTS ONE OF THE FOLLOWING MODEL ATMOSPHERE
C     TROPICAL,MIDLATITUDE SUMMER,MIDLATITUDE WINTER,SUBARCTIC SUMMER,
C     SUBARCTIC WINTER,OR THE 1962 U.S.  STANDARD RESPECTIVELY
C     MODEL=0 FOR HORIZ. PATH WHEN METEOROL. DATA USED:INSTEAD OF CARD 2
C     READ H1,P(MB),T(DEG C),DEW PT.TEMP(DEG C),%REL HUMIDITY,H2O DENSITY
C     (GM.M-3),O3 DENSITY(GM.M-3), VIS(KM),RANGE(KM) WITH FORMAT 4F9.
C     MODEL=7 WHEN NEW MODEL ATMOSPHERE(E.G. RADIOSONDE DATA) USED.
C     DATA CARDS ARE READ IN BETWEEN CARDS 1 AND 2, AND SHOULD CONTAIN:
C     ALTITUDE(KM.),PRESSURE,TEMP,DEW PT.TEMP,REL. HUMIDITY,H2O DENSITY,
C     O3 DENSITY,AEROSOL NO. DENSITY(CM-3) ACCORDING TO FORMAT 4F9.
C     NOTE THAT EITHER DEW PT. TEMP.OR REL. HUMIDITY CAN BE USED.
C
C     M1,M2,M3, ARE USED TO CHANGE TEMP,H2O, AND O3 ALTITUDE PROFILES.
C
C     IF  HAZE=0 NO AEROSOL SCATTERING IS COMPUTED
C     IHAZE =1 IF AEROSOL ATTENUATION REQUIRED (THIS IS USED IN
C     CONJUNCTION WITH VISUAL RANGE(SEE CARD 2))
C     IHAZE = 1 OR 2 ALSO GIVE AEROSOL ATTENUATION FOR 23KM AND 5KM VIS.
C     HAZE MODELS RESPECTIVELY IF VIS =0 ON CARD 2
C
C     ITYPE=1,2  OR 3 INDICATES THE TYPE OF ATMOSPHERIC PATH
C     ITYPE=3,VERTICAL OR SLANT PATH TO SPACE
C     ITYPE=2,VERTICAL OR SLANT PATH BETWEEN TWO ALTITUDES
C     ITYPE=1, CORRESPONDS TO A HORIZONTAL (CONSTANT PRESSURE) PATH
C
C     H1=OBSERVER ALTITUDE (KM)
C     H2=SOURCE  ALTITUDE (KM)
C     ANGLE= ZENITH ANGLE AT H1 (DEGREES)
C     RANGE=PATH LENGTH (KM)
C     BETA=H1 TO CENTER ANGLE
C     VIS = VISUAL RANGE AT SEA LEVEL (KM)
C     (IF ITYPE=1 READ H1 AND RANGE;IF ITYPE=3 READ H1 AND ANGLE.
```

```
C     IF ITYPE=2 READ H1 AND TWO OTHER PARAMETERS E.G. H2 AND ANGLE)
C
C     V1=INITIAL FREQUENCY (WAVENUMBER CM-1 ) INTEGER VALUE
C     V2=FINAL FREQUENCY(WAVENUMBER CM-1 ) INTEGER VALUE
C     DV= FREQUENCY INTERVALS AT WHICH TRANSMITTANCE IS PRINTED
C     NOTE: DV MUST BE A MULTIPLE OF 5 CM-1
C
C     IXY=0  TO END DATA ,=1 FOR NEW V1,V2,DV ONLY , =2 TO CONTINUE DATA
C     IXY=3 FOR NEW CARD 2 ONLY,=4 FOR NEW CARD 1 ONLY.
C*****************************************************************
      ASIN(A)=ARSIN(A)
      ACOS(A)=ARCOS(A)
      IXY=0
      READ (5,400) IATM,NL

      READ (5,401) (HZ1(I),I=1,NL)
      READ (5,401) (HZ2(I),I=1,5)
      HZ2(6)=HZ1(6)
      DO 1 J=1,3
      K2=2*J
      K1=K2-1
      DO 1 I=1,NL
1     READ (5,402) Z(I),(P(K,I),T(K,I),WH(K,I),WO(K,I),K=K1,K2)
      READ (5,403) (VX(I),C7(I),C7A(I),I=1,44)
      READ (5,403) (TR(I),FN(I),FU(I),I=1,67)
      READ (5,404) (C1(I),I=1,2580)
      READ (5,404) (C2(I),I=1,1575)
      READ (5,404) (C3(I),I=1,540)
      READ (5,405) (C4(I),I=1,133)
      READ (5,404) (C5(I),I=1,15)
      READ (5,405) (C6(I),I=1,102)
      PI=2.0*ASIN(1.0)
      CA=PI/180.
      IF=0
2     CONTINUE
      RE=6371.23
      IFTUD=0
C     JP NE 0  SUPPRESS PRINT
      READ 400,MODEL,IHAZE,ITYPE,LEN,JP,IM,H1,H2,H3,ML,RO
      PRINT 400,MODEL,IHAZE,ITYPE,LEN,JP,IM,H1,H2,H3,ML,RO

 200  M=MODEL
      IF (M.EQ.1) RE=6378.39
      IF (M.EQ.4) RE=6356.91
      IF (M.EQ.5) RE=6356.91
      IF(IXY.GT.3) GO TO 8
      IF(RO.LE.0.0) RE=RO
      IF(M.EQ.7.AND.IHAZE.EQ.0)GO TO 4
      IF (MODEL.EQ.0) GO TO 4
 300  READ 420, V1,V2,ANGLE,RANGE,BETA,VIS
      PRINT 420, V1,V2,ANGLE,RANGE,BETA,VIS
      X1=RE+H1
      IF (ITYPE.EQ.3) GO TO 500
      IF (ITYPE.EQ.1) GO TO 8
      X2=RE+H2
      IF (RANGE.EQ.0.0) GO TO 5
      PRINT 421, V1,V2,H1,H2,ANGLE,RANGE,BETA,VIS
      IF (ANGLE.EQ.0.AND.RANGE.EQ.0.0) GO TO 3
      ANGLE=ACOS(0.5*((H2-H1)*(1.+X2/X1)/RANGE-RANGE/X1))/CA
      GO TO 7
3     X2=SQRT((X1/RANGE-RANGE/X1+2.0*COS(ANGLE*CA))*X1*RANGE)
```

ORIGINAL PAGE IS
OF POOR QUALITY

```
      H2=X2-RE
      GO TO 7
4     CONTINUE
      IF(ML.LE.0)ML=1
      DO 540 K=1,ML
      AHAZE(K)=0.0
      IF(M.EQ.0)READ 429,H1,P(7,1),TMP,DP,RH,WH(7,K),WO(7,K),VIS,RANGE
      IF(M.EQ.0)PRINT 430,H1,P(7,1),TMP,DP,RH,WH(7,K),WO(7,K),VIS,RANGE
      IF(M.GT.0)READ 429,Z(K),P(7,K),TMP,DP,RH,WH(7,K),WO(7,K),AHAZE(K)
      J=IFIX((Z(K)+1.0E-6)+1.
      IF(M.EQ.0)Z(K)=H1
      IF(Z(K).GE.25.0) J=(Z(K)-25.0)/5.0+26.
      IF(Z(K).GE.50.0) J=(Z(K)-50.0)/20.0+31.
      IF(Z(K).GE.70.0) J=(Z(K)-70.0)/30.0+32.
      IF(J.GT.33)J=33
      FAC=Z(K)-FLOAT(J-1)
      IF(J.LT.26) GO TO 500
      FAC=(Z(K)-5.0*FLOAT(J-26)-25.)/5.
      IF(J.GE.31) FAC=(Z(K)-50.0)/20.
      IF(J.GE.32) FAC=(Z(K)-70.0)/30.
      IF(FAC.GT.1.0) FAC=1.0
500   L=J+1
      T(7,K)=TMP+273.15
      IF(M1.GT.0)T(7,K)=T(M1,J)*(T(M1,L)/T(M1,J))**FAC
      TT=273.15/T(7,K)
      IF(RH.LE.0.0) TT=273.15/(273.15+DP)
      IF(WH(7,K).LE.0.0) WH(7,K)=F(TT)
      IF(M2.GT.0)WH(7,K)=WH(M2,J)*(WH(M2,L)/WH(M2,J))**FAC
      IF(RH.GT.0.0) WH(7,K)=0.01*RH*WH(7,K)
      IF(M3.GT.0)WO(7,K)=WO(M3,J)*(WO(M3,L)/WO(M3,J))**FAC
      IF(Z(K).GE.5.0)GO TO 520
      IF(AHAZE(K).EQ.0.0)AHZ2(K)=HZ2(J)*(HZ2(L)/HZ2(J))**FAC
520   IF(AHAZE(K).EQ.0.0)AHAZE(K)=HZ1(J)*(HZ1(L)/HZ1(J))**FAC
      IF(MODEL.EQ.0)GO TO 8
      IF(K.EQ.1)PRINT 441
      PRINT 429,Z(K),P(7,K),TMP,DP,RH,WH(7,K),WO(7,K),AHAZE(K)
540   CONTINUE
      IM=0
      NL=ML
      M1=0
      M2=0
      M3=0
C     NOTE THAT Z(T) MAY NOT CORRESPOND TO THE VALUES GIVEN FOR STANDARD
C     MODEL ATMOSPHERES
      GO TO 300
560   IF (RANGE.GT.0.0) GO TO 580
      IF (H2.GT.0.0.AND.H2.LT.H1) IFIND=1
      GO TO 8
580   ITYPE=2
      BETA=ACOS(0.5*(RANGE*RANGE/(X1*X2)-X2/X1-X1/X2))/CA
5     IF (BETA.EQ.0.) GO TO 6
      IFIND=1
      BET=CA*BETA
      X2=RE+H2
      ANGLE=ATAN(X2*SIN(BET)/(X2*COS(BET)-X1))/CA
      RANGE=X2*SIN(BET)/SIN(ANGLE*CA)
      BET=BETA
      GO TO 7
6     RANGE=(X2/X1)**2-(SIN(ANGLE*CA))**2
      IF (RANGE.GT.0.0) RANGE=X1*(SQRT(RANGE)-ABS(COS(ANGLE*CA)))
7     IF (ANGLE.GE.0..OR.ANGLE.GE.180.) BET=ASIN(RANGE*SIN(ANGLE*CA)/X2)
```

ORIGINAL PAGE IS
OF POOR QUALITY

```
      IF (ANGLE.LT.0.) ANGLE=ANGLE+PI
      IF (RANGE.LT.0.0) RANGE=-RANGE
      BET=BET/CA
      PRINT 428, H1,H2,ANGLE,RANGE,BET,VIS
8     CONTINUE
      SUMA=0.
      IF(IXY.LE.2) READ 406,V1,V2,DV
      IF(IXY.LE.2)PRINT 406,V1,V2,DV
      IF (ITYPE.EQ.1) PRINT 407, H1,RANGE
      IF (ITYPE.EQ.2) PRINT 408, H1,H2,ANGLE
      IF (ITYPE.EQ.3) PRINT 409, H1,ANGLE
      IF (MODEL.EQ.0) M=7
      IF(VIS.GT.0.0) PRINT 417,VIS
      IF(VIS.LT.2.0.AND.VIS.GT.0.0) PRINT 442
      IF (M.EQ.1) PRINT 410, M
      IF (M.EQ.2) PRINT 411, M
      IF (M.EQ.3) PRINT 412, M
      IF (M.EQ.4) PRINT 413, M
      IF (M.EQ.5) PRINT 415, M
      IF (M.EQ.6) PRINT 414, M
      IF (IHAZE.EQ.0.) PRINT 426
      IF (M.NE.7.AND.IHAZE.GT.0) PRINT 416, IHAZE,HZ(IHAZE)
      AVW=10000./V1
      ALAM=10000./V2
      PRINT 418, V1,V2,DV,ALAM,AVW
      AVW=0.5E-4*(V1+V2)
      AVW=AVW*AVW
      CO=77.46+.459*AVW
      CW=43.487-0.3473*AVW
      IF (IFIND.EQ.1) GO TO 15
9     IF (IFIND.EQ.1) CALL ANGL (H1,H2,ANGLE,BETA,LEN,ML)
      IFIND=0
      IF (JP.EQ.0) PRINT 427
      IF (ITYPE.EQ.1) GO TO 15
      DO 11 K=1,10
      VH(K)=0.0
11    CONTINUE
      BETA=0.0
      SR=0.0
      IP=0
C****  NOW DEFINE CONSTANT PRESSURE PATH QUANTITES  EH(1-8)
      Y=CA+ANGLE
      SPHI=SIN(Y)
      R1=(RE+H1)*SPHI
      IF (H1.GT.Z(ML)) GO TO 13
      GO TO 15
13    X=(RE+Z(ML))/(RE+H1)
      IF (SPHI.GT.X) GO TO 14
      H1=Z(ML)
      J1=ML
      SPHI=SPHI/X
      ANGLE=180.0-ASIN(SPHI)/CA
      R1=(RE+H1)*SPHI
      GO TO 15
14    HMIN=H1-RE
      PRINT 433, HMI
      GO TO 95
15    DO 17 I=1,ML
      PS=P(I,I)/[illegible]
      TS=[illegible]/T(M,I)
      IF([illegible].LT.7)TS=273.15/T(M1,I)
```

```
      X=PS*TS
      PT=PS.SQRT(TS)
      D=0.1*WH(M,I)
      IF(M2.GT.0.AND.M.LT.7) D=0.1*WH(M2,I)
      EH(1,I)=D*PT**0.9
      EH(2,I)=X*PT**0.75
      EH(4,I)=0.8*PT*X
      PPW=4.50E-5*D*273.15/TS
      EH(5,I)=(PPW+0.005*(PS-PPW))*D
      EH(6,I)=X
      HAZE=HZ1(I)
      IF(M.EQ.7) HAZE=AHAZE(I)
      IF(Z(I).GE.5.0) GO TO 150
      IF(M.NE.7.AND.IHAZE.EQ.2) HAZE=HZ2(I)
      IF(IHAZE.EQ.2.AND.M.EQ.7)HAZE=AHZ2(I)
      IF(VIS.LE.0.0) GO TO 150
      IF(M.NE.7)HAZE= 6.389*((HZ2(I)-HZ1(I))/VIS+HZ1(I)/5.0-HZ2(I)/23.0)
      IF (M.NE.7) GO TO 150
      HAZE=6.389*((AHZ2(I)-AHAZE(I))/VIS+AHAZE(I)/5.0-AHZ2(I)/23.0)
150   IF(HAZE.LT.0.0) HAZE=0.0
      EH(7,I)=3.5336E-4*HAZE
      IF(MODEL.EQ.7) EH(7,I)=HAZE/AHAZE(1)
      EH(8,I)=46.667*WO(M,I)
      IF(M3.GT.0.AND.M.LT.7) EH(8,I)=46.667*WO(M3,I)
      EH(3,I)=EH(8,I)*PT**0.4
      EH(9,I)=1.0
      EH(10,I)=1.0E-5*(CO+X*1013.0/273.15-PPW*CW)
      IF (I.EQ.NL) GO TO 16
      IF (MODEL.EQ.0.AND.I.GE.1) GO TO 26
      T2=T(M,I+1)
      W2=WH(M,I+1)
      IF(M1.GT.0)T2=T(M1,I+1)
      IF(M2.GT.0)W2=WH(M2,I+1)
      PPW=4.50E-6*W2*T2
      EH(9,I)=0.5*(EH(10,I)+1.0E-6*(CO*P(M,I+1)/T2-PPW*CW))
16    IF (I.EQ.NL) EH(9,I)=0.
      IF (H1.GE.Z(I)) J1=I
      IF (ITIME.EQ.0.OR.JP.EQ.0) PRINT 434, I,Z(I),(EH(K,I),K=1,10)
      EH(9,I)=EH(9,I)+1.0
17    CONTINUE
170   IF (ITIME.EQ.1) GO TO 9
      IP=-1
      IK=0
      X1=H1
      CALL POINT (H1,YN,N,EP1,TX,IP)
      J1=N
      TX1=TX(9)
      DO 18 K=1,8
18    E(K)=TX(K)
      IF (ITYPE.EQ.1) GO TO 26
      IF (ITYPE.EQ.3) H2=Z(NL)
      IF (H2-SLE.GT.90.0) GO TO 28
19    IF (H2-SLE.GT.90.0.AND.EP1.GT.0) J1=J1+1
      J2=N
      IF (ITYPE.EQ.3) GO TO 26
      CALL POINT (H2,YN,N,EP1,TX,IP)
      J2=N
      IF (N.GT.0) J2=J2+1
20    DO 21 K=1,8
      EH(K,I)=TX(K)
      IF (ITYPE.EQ.3) GO TO 21
```

```
      EH(K,J2+1)=TX(K)
21    CONTINUE
      IF (J1.EQ.J2) TX1=TX1+YN-EH(9,J1)
C**** NOW DEFINE VERTICAL PATH QUANTITIES VH(1-8)
      IF (JP.EQ.0) PRINT 420
      DO 25 I=J1,J2
      X1=Z(I)
      X2=Z(I+1)
      IF (I.EQ.J1) X1=H1
      IF (I.EQ.J2) X2=H2
      DZ=X2-X1
      IF (I.EQ.NL) DZ=Z(I)-Z(I-1)
      DS=DZ
C***** UPWARD TRAJECTORY
      RX=(RE+X1)/(RE+X2)
      THETA=ASIN(SPHI)/CA
      PHI=ASIN(SPHI*RX)/CA
      BET=THETA-PHI
      SALP=RX*SPHI
      IF (SPHI.GT.1.E-10) DS=(RE+X2)*SIN(BET*CA)/SPHI
      BETA=BETA+BET
      PSI=BETA+PHI-ANGLE
      PHI=180.-PHI
      SR=SR+DS
      DO 24 K=1,8
      EV=DS*EH(K,I)
      IF (I.EQ.NL) GO TO 22
      IF (EH(K,I).EQ.0.0.OR.EH(K,I+1).EQ.0.0) GO TO 23
      IF (EH(K,I).EQ.EH(K,I+1)) GO TO 24
      EV=DS*(EH(K,I)-EH(K,I+1))/ALOG(EH(K,I)/EH(K,I+1))
      GO TO 24
22    IF (EH(K,I).EQ.0.0) GO TO 23
      IF (EH(K,I-1).EQ.0.0) GO TO 23
      IF (EH(K,I).EQ.EH(K,I-1)) GO TO 24
      EV=EV/ALOG(EH(K,I-1)/EH(K,I))
      GO TO 24
23    EV=0.
24    VH(K)=VH(K)+EV
      IF (JP.EQ.0) PRINT 435, I,X1,(VH(L),L=1,8),PSI,PHI,BETA,THETA,SR
      IF (I.GE.NL) GO TO 25
      IF (I+1.EQ.J2) EH(9,I+1)=YN
      IF (I.EQ.J1) EH(9,I)=TX1
      RN=EH(9,I+1)/EH(9,I)
      SPHI=SPHI*RX/RN
      IF (SALP.GE.RN) SPHI=SALP
25    CONTINUE
      GO TO 47
C**** HORIZONTAL PATH
26    DO 27 K=1,8
      W(K)=RANGE*EH(K,1)
      IF (MODEL.GT.0) W(K)=(RANGE*TX(K)
27    CONTINUE
      GO TO 47
28    CONTINUE
C**** DOWNWARD TRAJECTORY
      K2=0
      IF (NL1.EQ.1) J1=J1-1
      J2=J1+1
      YN1=Y
      J=J1+1
      IF (H1.GT.Z(J1+1).AND.H1.EQ.H2) GO TO 30
```

```
      IF (N.EQ.1.AND.H2.GE.Z(J1+1)) GO TO 30
      CALL POINT (H2,YN,N,NP2,TX,IP)
      DO 29 K=1,8
29    W(K)=TX(K)
      TX2=TX(9)
      YN2=YN
      IF (H2.LT.H1) H=H2
      J2=N
      IF (J1.EQ.J2) TX2=TX1+YN2-EH(9,N)
      IF (H2.GT.H1) TX1=TX2
      IF (J1.EQ.J2.AND.H2.LT.H1) YN1=TX2
30    A0=(RE+H1)*SPHI+YN1
      IF (H2.GE.H1) YN2=YN1
      DO 31 I=1,J1
      HMIN=A0/EH(9,I)-RE
      IF (I.EQ.J1) HMIN=A0/YN1-RE
      JMIN=I
      IF (HMIN.LE.Z(I+1)) GO TO 32
31    CONTINUE
32    X=HMIN
      IF (HMIN.LE.0) GO TO 34
      CALL POINT (X,YN,N,NP,TX,IP)
      JMIN=N
      TX3=TX(69)
      IF(TX3.LT.0.0) TX3=TX(9)
      IF(TX3.LT.0.0) TX3=TX(9)
      IF (J1.EQ.N.AND.H2.GE.H1) GO TO 33
      HMIN=A0/TX3-RE
      IF (ABS(X-HMIN).GT.0.0001) GO TO 32
33    IF (J1.EQ.N.AND.H2.GE.H1) YN1=TX3
      IF (J2.EQ.N.AND.J1.NE.J2) YN2=TX3
      IF (H2.GE.H1) TX2=TX3
      IF (H2.GE.H1) J2=N
      IF (H2.GE.H1.OR.H2.LT.HMIN) H=HMIN
      IF(H2.LT.HMIN) J2=N
      IF (H2.LT.HMIN) PRINT 440, HMIN
      GO TO 35
34    PRINT 436, HMIN
      IF (H2.LT.H1) GO TO 35
      IF (ITYPE.EQ.3.OR.H2.GE.H1) PRINT 437
      ITYPE=2
      TX2=EH(9,1)
      JMIN=1
      J2=1
      H2=0.0
      H=0.0
C**** NOW DEFINE VERTICAL PATH QUANTITIES VH(1-8)
35    IF (J2.EQ.0) PRINT 420
      DO 40 I=1,NL
      J=J-1
      REF=EH(9,J)
      IF (I.EQ.1) REF=YN1
      IF (I.EQ.1.AND.K2.EQ.1) REF=YN2
      IF (J.EQ.J2.AND.K2.EQ.0) REF=TX2
      IF (I.EQ.1) X1=Z(J+1)
      X2=Z(J)
      IF (J.EQ.J2.AND.K2.EQ.0) X2=H
      IF (J.EQ.JMIN.AND.K2.EQ.1) X2=HMIN
      HM=(RE+X1)*SPHI-REF
      IF (HM.LT.Z(J).AND.HM.GT.X2) X2=HM
      RX=(RE+X1)/(RE+X2)
```

```
      DS=X1-X2
      ALP=90.0
      THET=ASIN(SPHI)/CA
      SALP=RX*SPHI
      IF (ABS(X2-HM).GT.1.0E-5) ALP=ASIN(SALP)/CA
      BET=ALP-THET
      IF (SPHI.GT.1.0E-10) DS=(RE+X2)*SIN(BET*CA)/SPHI
      THETA=180.0-THET
      BETA=BETA+BET
      PSI=BETA-ALP-ANGLE+180.0
      SR=SR+DS
      DO 39 K=1,8
      AJ=EH(K,J)
      BJ=EH(K,J+1)
      IF (J.EQ.J1) BJ=E(K)
      IF (J.EQ.J2.AND.H2.LT.H1.AND.H2.GT.0.0) AJ=W(K)
      IF (J.EQ.JMIN.AND.H2.GE.H1) AJ=TX(K)
      IF (J.EQ.JMIN.AND.ABS(H2-HM).LT.1.0E-5) AJ=TX(K)
      IF (K2.EQ.0) GO TO 36
      IF (J.EQ.J2) BJ=W(K)
      IF (J.EQ.JMIN) AJ=TX(K)
36    IF (AJ.EQ.0.0.OR.BJ.EQ.0.0) GO TO 38
      IF (AJ.EQ.BJ) GO TO 37
      EV=DS*(AJ-BJ)/ALOG(AJ/BJ)
      GO TO 39
37    EV=DS*AJ
      GO TO 39
38    EV=0.0
39    VH(K)=VH(K)+EV
      IF (JP.EQ.0) PRINT 435, J,X1,(VH(L),L=1,8),PSI,ALP,BETA,THETA,SR
      IF (J.EQ.J2.AND.H2.GE.H1) GO TO 45
      IF (J.EQ.JMIN.AND.K2.EQ.1) GO TO 43
      IF (J.NE.1) RN=REF/EH(9,J-1)
      IF (J.EQ.J2+1) RN=REF/TX2
      IF (J.EQ.J2.AND.K2.EQ.0) RN=REF/YN2
      IF (J.EQ.(JMIN+1).AND.K2.EQ.1) RN=REF/TX3
      IF (SALP.GE.RN) RN=1.0
      SPHI=SALP*RN
      IF (J.EQ.J2.AND.K2.EQ.0) GO TO 41
40    CONTINUE
41    IF (HMIN.LE.0) GO TO 47
      IF (LEN.EQ.0) PRINT 438
      IF (LEN.EQ.0) GO TO 47
      IF (LEN.EQ.1) PRINT 439
      K2=1
      X1=X2
      IF (ABS(X1-HMIN).LE.0.001) GO TO 47
      H=HMIN
      J=J2+1
      IF (N2.EQ.1) J=J-1
      B=BETA
      PH=180.0-ASIN(SPHI)/CA
      TS=SR
      PS=PSI
      DO 42 K=1,8
42    E(K)=EH(K)
      GO TO 35
43    BETA=2.*BETA-B
      PSI=2.*PSI-PS
      SR=2.*SR-TS
C     LOOP FOR THE TAKEN
```

```
      PHI=PH
      DO 44 K=1,8
44    VH(K)=2.*VH(K)-E(K)
      GO TO 47
45    DO 46 K=1,10
46    VH(K)=2.0*VH(K)
      BETA=2.0*BETA
      SR=2.0*SP
      IF (H2.EQ.H1) GO TO 47
      RN=TX1/YN1
      SPHI=SIN(ANGLE*CA)
      IF (SPHI.LT.RN) SPHI=SPHI/RN
      GO TO 19
47    CONTINUE
      PRINT 406, HM
      DO 48 K=1,10
      W(K)=VH(K)
48    CONTINUE
49    WRITE (6,419)
      WRITE (6,421) (W(I),I=1,8)
      I=1
      L=1
      IV1=V1/5.0
      IV2=V2/5.+.99
      IV1=5*IV1
      IV2=5*IV2
      IF (IV1.LT.350) IV1=350
      IF (IV2.GT.50000) IV2=50000
      IF (DV.LT.5.) DV=5.
      IDV=DV
      IV=IV1-IDV
      ICOUNT=0
C**** BEGINING OF TRANSMITTANCE CALCULATIONS
50    IV=IV+IDV
      IF(JP.NE.0) GO TO 52
      IF (ICOUNT.EQ.0) GO TO 51
      IF (ICOUNT.EQ.50) GO TO 51
      GO TO 52
51    ICOUNT=0
      PRINT 422
52    DO 53 K=1,10
      TX(K)=0.0
      IF (K.LT.4) TX(K)=1.0
53    CONTINUE
      ICOUNT=ICOUNT+1
      SUM=0.0
      V=IV
      I=(IV-350)/5+1
      IF (IV.LT.1400) GO TO 61
      IF (IV.LT.2700) GO TO 68
C******** MOLECULAR SCATTERING
      C6=9.497E-20*(V**4.0117)
      TX(6)=C6*W(6)
      SUM=SUM+TX(6)
      IF (IV.LT.9200) GO TO 72
      IF (IV.LT.13000) GO TO 69
C******** UV OZONE
      IF (IV.LT.23400) GO TO 54
      IF (IV.GE.27500) GO TO 55
      GO TO 57
54    XX=200.0
```

```
      XI=(V-13000.0)/XX+1.0
      L1=1
      L2=53
      GO TO 56
55    XX=500.0
      XI=(V-27500.0)/XX+57.0
      L1=57
      L2=102
56    DO 57 N=L1,L2
      XD=XI-FLOAT(N)
      IF (XD) 59,58,57
57    CONTINUE
58    TX(8)=W(8)*C8(N)
      GO TO 60
59    TX(8)=C8(N)+XD*(C8(N)-C8(N-1))
      TX(8)=W(8)*TX(8)
60    SUM=SUM+TX(8)
      IF(IV.GE.14500)GO TO 87
      GO TO 69
C********     WATER VAPOUR CONTINUUM    :
61    IF (IV.LE.670) GO TO 72
      IF (IV.LT.700) GO TO 66
      XI=(V-700.0)/50.+1.
      DO 63 NH=1,15
      XH=XI-FLOAT(NH)
      IF (XH) 65,64,63
63    CONTINUE
64    TX(5)=C5(NH)
      GO TO 67
65    TX(5)=C5(NH)+XH*(C5(NH)-C5(NH-1))
      GO TO 67
66    TX(5)=(V-670.)*0.89
67    TX(5)=W(5)*TX(5)
      SUM=SUM+TX(5)
      GO TO 72
C********   NITROGEN CONTINUUM
68    IF (IV.LT.2050) GO TO 72
      K4=I-346
      TX(4)=C4(K4)*W(4)
      SUM=SUM+TX(4)
      GO TO 72
C********  WATER VAPOUR
69    IF (IV.LT.12800.AND.IV.GE.9875) GO TO 70
      IF (IV.LE.14520.AND.IV.GE.13400) GO TO 71
      GO TO 76
70    I=I-125
      GO TO 72
71    I=I-255
72    K1=1
      IF (W(1).LT.1.0E-20) GO TO 76
      WS1=ALOG10(W(1))+C1(1)
      IF (WS1.LT.-2.3468) GO TO 76
      IF (WS1.GT.3.5682) GO TO 75
      IF (WS1.GT.2.0) K1=40
      DO 73 K=K1,67
      IF (WS1.LE.FW(K)) GO TO 74
73    CONTINUE
74    TX(1)=TW(K)+(TW(K-1)-TW(K))*(FW(K)-WS1)/(FW(K)-FW(K-1))
      GO TO 76
75    TX(1)=0.0
76    CONTINUE
```

```
C********   UNIFORMLY MIXED GASES
      IF (IV.LT.8640.AND.IV.GE.500) GO TO 77
      IF (IV.LT.13190.AND.IV.GT.12970) GO TO 78
      GO TO 83
77    J=I-30
      GO TO 79
78    J=(IV-12950)/5+1516
79    IF(W(2).LT.1.0E-20) GO TO 83
      K1=1
      WS2=ALOG10(W(2))+C2(J)
      IF (WS2.LT.-2.3466) GO TO 83
      IF (WS2.GT.3.5682) GO TO 82
      IF (WS2.GT.2.0) K1=60
      DO 80 K=K1,67
      IF (WS2.LE.FW(K)) GO TO 81
80    CONTINUE
81    TX(2)=TR(K)+(TR(K-1)-TR(K))*(FW(K)-WS2)/(FW(K)-FW(K-1))
      GO TO 83
82    TX(2)=0.0
83    CONTINUE
C********  OZONE
      IF (IV.LT.575.OR.IV.GT.3270) GO TO 87
      L=I-45
      K1=1
      IF (W(3).LT.1.0E-20) GO TO 87
      WS3=ALOG10(W(3))+C3(L)
      IF (WS3.LT.-1.6778) GO TO 87
      IF (WS3.GT.3.9345) GO TO 86
      IF (WS3.GT.1.5) K1=36
      DO 84 K=K1,67
      IF (WS3.LE.FO(K)) GO TO 85
84    CONTINUE
85    TX(3)=TR(K)-(TR(K)-TR(K-1))*(FO(K)-WS3)/(FO(K)-FO(K-1))
      GO TO 87
86    TX(3)=0.0
87    CONTINUE
C********   AEROSOL EXTINCTION
      ALAM=1.0E+4/V
      XX=0.0
      YY=0.0
      IF (IWAZE.EQ.0.) GO TO 90
      DO 88 N=1,44
      XD=ALAM-VX(N)
      IF(XD)89,88,88
  88  CONTINUE
  89  XX=(C7(N)-C7(N-1))*XD/(VX(N)-VX(N-1))+C7(N)
      YY=(C7A(N)-C7A(N-1))*XD/(VX(N)-VX(N-1))+C7A(N)
  90  TX(10)=YY*X(7)
      TX(7)=XX*X(7)
      SUM=SUM+TX(7)
      TX(9)=SUM
      DO 94 K=4,10
      IF (TX(K).EQ.0.0) GO TO 92
      IF (TX(K).LE.0.1) GO TO 91
      IF (TX(K).GT.20.) GO TO 93
      TX(K)=EXP(-TX(K))
      GO TO 94
91    TX(K)=1.0-TX(K)+0.5*TX(K)*TX(K)
      GO TO 94
92    TX(K)=1.0
      GO TO 94
```

ORIGINAL PAGE IS
OF POOR QUALITY

```
93    TX(K)=0.
94    CONTINUE
      TX(10)=1.0-TX(10)
      TX(9)=TX(1)*TX(2)*TX(3)*TX(9)
      IF (IV.GE.13000) TX(3)=TX(8)
      IF(JP.EQ.3)TX(9)=TX(7)
      AB=1.-TX(9)
      IF(IV.EQ.IV1.OR.IV.EQ.IV2) AB=0.5*AB
      SUMA=SUMA+AB*DV
      IF(JP.EQ.0) WRITE(6,423) IV,ALAM,TX(9),(TX(K),K=1,7),TX(10),SUMA
      IF (IV.GE.IV2) GO TO 95
      GO TO 50
95    READ 400, IXY
      AB=1.0-SUMA/(V2-V1)
      PRINT 424, IV1,IV2,SUMA,AB
      PRINT 400,IXY
      IF(IXY.EQ.0) GO TO 100
      GO TO (96,2,97,98,100),IXY
96    READ 406, V1,V2,DV
      AVW=10000./V1
      ALAM=10000./V2
      PRINT 418, V1,V2,DV,ALAM,AVW
      SUMA=0.0
      GO TO 49
97    IF(MODEL.EQ.0) GO TO 200
      GO TO 300
98    READ 400,MODEL,IHAZE,ITYPE,LEN,JP,IM,M1,M2,M3,ML,RO
      PRINT 400,MODEL,IHAZE,ITYPE,LEN,JP,IM,M1,M2,M3,ML,RO
      GO TO 200
100   STOP
400   FORMAT(10I3,F10.3)
401   FORMAT (8E10.3)
402   FORMAT (F6.1,2(E10.3,F6.1,2E10.1))
403   FORMAT (4(F6.3,2F7.4))
404   FORMAT (15F5.2)
405   FORMAT (8E9.2)
406   FORMAT (7F10.3)
407   FORMAT (//10X,24H HORIZONTAL PATH, ALTITUDE =,F7.3,11H KM,RANGE =,
     1F7.3,3H KM)
408   FORMAT (//10X,50H SLANT PATH BETWEEN ALTITUDES H1 AND H2 WHERE H1
     1=,F7.3,6H KM H2 =,F7.3,18H KM,ZENITH ANGLE =,F7.3,8H DEGREES)
409   FORMAT (//10X,39H SLANT PATH TO SPACE FROM ALTITUDE H1 =,F7.3,19H
     1KM, ZENITH ANGLE =,F7.3,8H DEGREES)
410   FORMAT (/20X,18H MODEL ATMOSPHERE ,I1,11H = TROPICAL)
411   FORMAT (/20X,18H MODEL ATMOSPHERE ,I1,21H = MIDLATITUDE SUMMER)
412   FORMAT (/20X,18H MODEL ATMOSPHERE ,I1,21H = MIDLATITUDE WINTER)
413   FORMAT (/20X,18H MODEL ATMOSPHERE ,I1,21H = SUB-ARCTIC SUMMER )
414   FORMAT (/20X,18H MODEL ATMOSPHERE ,I1,21H = 1962 US STANDARD  )
415   FORMAT (/20X,18H MODEL ATMOSPHERE ,I1,21H = SUB-ARCTIC WINTER )
416   FORMAT (/20X,18H        HAZE MODEL ,I1,3H = ,A5,13H VISUAL RANGE)
417   FORMAT (/25X"HAZE MODEL  =",F5.1," KM VISUAL RANGE AT SEA LEVEL")
418   FORMAT (/10X,21H FREQUENCY RANGE V1= ,F7.1,13H CM-1 TO V2= ,F7.1,1
     14H CM-1 FOR DV =,F6.1,9H CM-1   (,F6.2," - ",F5.2," MICRONS )")
419   FORMAT (/10X,35H EQUIVALENT SEA LEVEL AMSUMEER AMOUNTS//21X110HWAT
     1ER VAPOR     CO2 ETC.        OZONE    NITROGEN (CONT)  H2O (CONT)
     2    MOL  SCAT       AEROSOL      OZONE(U-V)/24X,7HGM CM-2,10X,2HKM,1
     30X,6HCTH CM",10X,2HKM,9X,7HGM CM-2,10X,2HKM,13X,2HKM,10X,6HAIM CM)
420   FORMAT (1H1,/// 5X," VERTICAL PROFILES  ",66X,"PSI",6X,"PHI",6X,"
     1BETA",4X,"THETA",4X,"RANGE")
421   FORMAT (/10X,8H W(1-8)=8(E14.3)/)
422   FORMAT (1H1,/10X,32H  FREQ WAVELENGTH  TOTAL      H2O,5X4HCO2,,5X,6
```

```
     14HOZONE  N2 CONT  H2O CONT MOL SCAT  AEROSOL  AEROSOL   INTEGRATED
     2 /1:x,14H CM-1  MICRONS,8(4x5HTRANS),4x,20H ABS      ABSORPTION )
423   FORMAT (10X,T6,10F9.4,F12.2)
424   FORMAT (" INTEGRATED ASORPTION FROM",I5," TO",I5," CM-1 =",F10.2,
     1",AVERAGE TRANSMITTANCE =",F6.4)
425   FORMAT (10X,7F10.3)
426   FORMAT (/20x,"AEROSOL SCATTERING NOT COMPUTED,IHAZE=0")
427   FORMAT (1H1,///10X,20H HORIZONTAL PROFILES/)
428   FORMAT (10X," H1=",F7.3,"KM,H2=",F7.3,"KM,ANGLE=",F8.4,"GEOM. RANG
     1E =",F7.2,"KM,BETA=",F6.5,",VIS=",F6.1)
429   FORMAT(3F10.3,2F5.1,2F10.3,2F10.3)
430   FORMAT(10x,"INPUT METEOROLOGICAL DATA:"/10X,"Z=",F7.2," KM, P=",F7
     1.2," MB,T=",F5.1," C, DEW PT.TEMP",F5.1," C, REL HUMIDITY=",F5.1,
     2" %, H2O DENSITY=",1PE9.2,"-GM M-3"/10X," OZONE DENSITY=",E9.2," G
     3M-3, VISUAL RANGE=",0PF6.1," KM,RANGE=",F10.3," KM "  )
431   FORMAT(4(F6.2,2F7.5))
432   FORMAT (" STARTING PARAMETERS H1 AND ANGLE HAVE BEEN REDEFINED;H1=
     1 ",F10.3,"ANGLE =",F10.6)
433   FORMAT (" TRAJECTORY MISSES EARTHS ATMOSPHERE. CLOSEST DISTANCE OF
     1 APPROACH IS",F10.2,1x,/,1X,"END OF CALCULATION")
434   FORMAT (10X,T4,F6.1,11(E10.3))
435   FORMAT (I3,F4.1,8E10.3,4F9.4,F7.1)
436   FORMAT (" HMIN = ",F10.3)
437   FORMAT (" PATH INTERSECTS EARTH - PATH CHANGED TO TYPE 2 WITH H2 =
     1 0.0 KM")
438   FORMAT (" CHOICE OF TWO PATHS FOR THIS CASE -SHORTEST PATH TAKEN.
     1 FOR LONGER PATH SET LEN=1.")
439   FORMAT (" CHOICE OF TWO PATHS FOR THIS CASE -LONGEST PATH TAKEN.
     1 FOR SHORT PATH SET LEN = 0 ")
440   FORMAT (" H2 WAS SET LESS THAN HMIN AND HAS BEEN RESET EQUAL TO
     1  HMIN I.E. H2 = ",F10.3)
441   FORMAT("  MODEL ATMOSPHERE NO. 7",/ 4x,"Z (KM)",3x,"P (MB)",4x,
     1 "T (C) DEW PT 6PH  H2O(GM.M-3) O3(GM.M-3) NO. DEN.")
442   FORMAT(" FOG CONDITIONS MAY EXIST AT SEA LEVEL FOR THIS VISUAL RA
     1NGE",/," IF SO THEN ASSUME THE TRANSMITTANCE DUE TO FOG IS GIVEN
     2BY THE TRANSMITTANCE AT 0.55 MICRONS")
      STOP
      END
```

```
      SUBROUTINE POINT (X,YN,N,NP,TX,IP)
      COMMON Z(34),P(7,34),T(7,34),EH(10,34),WH(7,34),M,NL,RE,CW,CD,PI
      DIMENSION TX(10)
C*****************************************************************
C     SUBROUTINE POINT COMPUTES THE MEAN REFRATIVE INDEX ABOVE AND BELOW
C     A GIVEN ALTITUDE AND INTERPOLATES EXPONENTIALLY TO DETERMINE THE
C     EQUIVALENT ABSORBER AMOUNTS AT THAT ALTITUDE.
C
C*****************************************************************
C
C      X IS THE HEIGHT IN QUESTION
C      TX(9) AND YN ARE THE MEAN REFRACTIVE INDICES ABOVE AND BELOW X
C      N IS THE LEVEL INTEGER CORRESPONDING TO X OR THE LEVEL BELOW X
C      NP = 1 IF X COINCIDES WITH MODEL ATMOSPHERE LEVEL .IF NOT NP = 0
C      TX(1-8) ARE ABSORBER  AMOUNTS PER KM AT HEIGHT X
C*****************************************************************
      N=NL
      NP=0
      IF (X.LT.0.0) X=0.
      IF (X.GT.Z(NL)) GO TO 4
      DO 1 I=1,NL
      N=I
      IF (X-Z(I)) 2,4,1
1     CONTINUE
2     J2=N
      N=N-1
      FAC=(X-Z(N))/(Z(J2)-Z(N))
      PX1=P(M,N)*(P(M,J2)/P(M,N))**FAC
      TX1=T(M,N)*(T(M,J2)/T(M,N))**FAC
      WX1=WH(M,N)*(WH(M,J2)/WH(M,N))**FAC
      TX(3)=CD*PX1/TX1-4.56E-6*WX1*TX1*CW
      TX(2)=CD*P(M,J2)/T(M,J2)-4.56E-6*WH(M,J2)*T(M,J2)*CW
      TX(1)=CD*P(M,N)/T(M,N)-4.56E-6*WH(M,N)*T(M,N)*CW
      TX(9)=3.56E-6*(TX(2)+TX(3))
      YN=6.5E-6*(TX(1)+TX(3))
      IF (IP.EQ.0) GO TO 9
      DO 3 K=1,8
      TX(K)=0.0
      IF (EH(K,N).EQ.0.0) GO TO 3
      IF (EH(K,N).GT.1000.0) GO TO 3
      TX(K)=EH(K,N)*(EH(K,J2)/EH(K,N))**FAC
3     CONTINUE
      GO TO 9
4     NP=1
      IF (IP.EQ.0) GO TO 6
      DO 5 K=1,8
5     TX(K)=EH(K,N)
6     TX(9)=EH(K,N)-1.
      YN=0.0
C*****  CARDS 8 24 AND 51 THROUGH 59 ARE NO LONGER REQUIRED
      IF (M.EQ.1) YN=EH(K,N-1)-1.)
9     CONTINUE
      IF (IP.EQ.1) PRINT 400, X,N,NP,TX(9),YN,IP,(TX(K),K=1,8)
      TX(9)=TX(9)+1.
      YN=YN+1.
      RETURN
C
400   FORMAT (/," FROM POINT: HEIGHT=",F10.4," KM,N=",I3,",NP=",I2,",REF
     1. INDEX ABOVE & BELOW X=",2E11.4,",IP=",I3,/,12X,"EQUIV. ABSORBER
     2AMOUNTS PER KM AT X=",9E10.3)
      END
```

```
      SUBROUTINE ANGL (H1,H2,ANGLE,B1,LEN,ML)
      COMMON Z(34),P(7,34),T(7,34),EH(10,34),WH(7,34),M,NL,RE,CW,CD,PI
      DIMENSION TX(10)
C*****************************************************************
C
C     THIS SUBROUTINE CALCULATES THE INITIAL ZENITH ANGLE (ANGLE)
C     TAKING INTO ACCOUNT REFRACTION EFFECTS GIVEN H1,H2, AND BETA
C     (WHERE BETA IS THE EARTH CENTRE ANGLE SUBTENDED BY H1 AND H2 ),
C     ASSUMING THE REFRACTIVE INDEX TO BE CONSTANT IN A GIVEN LAYER.
C     FOR GREATER ACCURACY INCREASE THE NUMBER OF LEVELS IN THE MODEL
C     ATMOSPHERE.
C
C     THIS SUBROUTINE CAN BE REMOVED FROM THE PROGRAM IF NOT REQUIRED.
C*****************************************************************
      ASIN(A)=ARSIN(A)
      ACOS(A)=ARCOS(A)
      IP=59
      CA=PI/180.
      X1=RE+H1
      X2=RE+H2
      LEN=0.
      IT=0
      B1=B1*CA
      IF(B1.EQ.0.0) B1=ACOS(X2/X1)
      TANG=X2*SIN(B1)/(X2*COS(B1)-X1)
      THET=ATAN(TANG)
      IF (THET.LT.0.0) THET=THET+PI
      SPHI=SIN(THET)
      ANG=THET/CA
C     PRINT 404, B1,ANG,TANG
      TN=THET
      TM=TN-0.5*CA
1     ANGLE=THET
      FBT=0.
      BETA=0.
      BET1=0
      BET2=0
      FBT1=0
      FBT2=0
      FBT3=0.0
      IF(B1.LE.0.0) GO TO 2
C     PRINT 400, IT
      Y=2.*THET
      IF (Y-PI.GT.1.0E-6) GO TO 9
      IF (IP.EQ.100) GO TO 6
      XMIN=X2*COS(B1)-RE
      IF (XMIN-H1) 8,4,4
    2 HMIN=H2
      H2=H1
      H1=HMIN
    3 ANGLE=0.5*PI
      THET=ANGLE
      SPHI=1.0
      ANG=ANGLE/CA
C     PRINT 404, B1,ANG,SPHI
4     IP=100
      CALL PRINT (H1,M,Z,WP,TX,IP)
      J1=5
      TX1=TX(5)
```

ORIGINAL PAGE IS
OF POOR QUALITY

```
5       CALL POINT (H2,YN,N,NP,TX,IP)
        J2=N
        IF (NP.EQ.1) N=N-1
        IF (J1.EQ.J2) TX1=TX1+YN-EH(9,J1)
6       DO 7 J=J1,J2
        X1=RE+Z(J)
        X2=RE+Z(J+1)
        IF (J.EQ.J1) X1=RE+H1
        IF (J.EQ.J2) X2=RE+H2
        SALP=X1*SPHI/X2
        ALP=ASIN(SALP)
        RN=EH(9,J+1)/EH(9,J)
        IF ((J+1).EQ.J2) RN=YN/EH(9,J)
        IF (J.EQ.J1) RN=EH(9,J+1)/TX1
        IF ((J+1).EQ.J2.AND.J.EQ.J1) RN=YN/TX1
        BET=THET-ALP
        FB=-TAN(ALP)
        IF (J.NE.J1) FB=FB+TAN(THET)
        FBT=FBT+FB
        BETA=BETA+BET
        TH1=THET/CA
        BE=BET/CA
        C=ALP/CA
C       PRINT 402, J,Z(J),THET,ALP,BET,BETA,FBT,FB,TH1,BE,C
        IF (X2.EQ.RE+H2) C=PI-ALP
        IF (SALP.GE.RN) RN=1.
        SPHI=SALP/RN
        THET=ASIN(SPHI)
7       CONTINUE
        IF(H1.LE.0.0) GO TO 29
        GO TO 26
8       CONTINUE
        TANG=-TANG
        ANGLE=PI-ANGLE
        TN=ANGLE
        ANG=ANGLE/CA
C       PRINT 404, H1,ANG,TANG
        IF (H1.LE.0.0) GO TO 3
9       CONTINUE
        IP=101
        CALL POINT (H1,YN,N,NP1,TX,IP)
        TX1=TX(9)
        YN1=YN
        IF (NP1.EQ.1) N=N-1
        J2=NL
        IF (N.EQ.7) J2=NL
        J1=N
        J=J1+1
        IF (H2.GE.H1) GO TO 13
        CALL POINT (H2,YN,N,NP,TX,IP)
        TX2=TX(9)
        YN2=YN
        J2=N
        IF (J1.EQ.J2) TA2=YN1+TX(9)-EH(9,J1)
10      J=J-1
        X1=RE+Z(J+1)
        X2=RE+Z(J)
        IF (J.EQ.J1) X1=RE+H1
        IF (J.EQ.J2) X2=RE+H2
        SALP=X1*SPHI/X2
        HM1=X1*SPHI-RE
```

C-2

```
C       PRINT 402, J,X1,Z(J),SPHI,SALP,HMIN,RE
        IF (SALP.LE.1.0) GO TO 11
        SALP=SPHI
        IF (HMIN.GT.H2) GO TO 18
11      ALP=ASIN(SALP)
        THET=ASIN(SPHI)
        BET=ALP-THET
        BET1=BET1+BET
        FB=TAN(ALP)
        IF (J.NE.J1) FB=FB-TAN(THET)
        FBT1=FBT1+FB
        TH1=THET/CA
        BE=BET/CA
        AL=ALP/CA
C       PRINT 402, J,X2,THET,ALP,BET1,BET,RMIN,HMIN,FBT1,TH1,BE,AL
        IF (X2.EQ.RE+H2) C=PI-ALP
        REF=EH(9,J)
        IE (J.EQ.J1) REF=YN1
        IF (J.EQ.J2) REF=TX2
        IF (J.EQ.1) GO TO 12
        RN=EH(9,J)/EH(9,J-1)
        IF (J.EQ.J1) RN=YN1/EH(9,J-1)
        IF(J.EQ.J2+1) RN=REF/TX2
        IF(J.EQ.J2) RN=REF/YN2
        IF (SALP.GT.RN) RN=1.
        SPHI=SALP*RN
        IF (Z(J).LE.H2) GO TO 12
        GO TO 10
12      X1=X2
        IF (ABS(Z(J)-H2).LT.1.0E-10.AND.J.NE.1) GO TO 13
        GO TO 14
13      J=J-1
        X1=RE+Z(J+1)
        IF (J.EQ.J1) X1=RE+H1
        IF (J.EQ.J2.AND J.NE.J1) X1=RE+H2
14      X2=RE+Z(J)
        HMIN=X1*SPHI-RE
        IF (HMIN.LE.0.0) GO TO 25
        IF (Z(J).LT.HMIN) GO TO 18
        REF=EH(9,J)
        IF (J.EQ.J2) REF=YN
        SALP=X1*SPHI/X2
        ALP=ASIN(SALP)
        THET=ASIN(SPHI)
        BET1=ALP-THET
        FB=TAN(ALP)-TAN(THET)
        FBT2=FBT2+FB
        BET2=BET2+BET
        BET1=BET1+BET2
        AL=ALP/CA
        TH1=THET/CA
C       PRINT 402, J,X2,THET,ALP,BET2,BET,RMIN,HMIN,FBT2,TH1,BE,AL
        RN=REF/EH(9,J-1)
        IF (SALP.GE.RN) RN=1.0
        SPHI=SALP.RN
        GO TO 13
17      TX3=YN1+TX(9)-EH(9,J1)
        YN1=TX3
        IF (ABS(H2-Z(J+1)).LE.1.0E-5) YN1=TX(9)
        IF (ABS(H1-Z(J+1)).LE.1.0E-5) YN1=TX(9)
        RN=1.
```

ORIGINAL PAGE IS
OF POOR QUALITY

```
      GO TO 19
18    CALL POINT (HMIN,YN,N,NP,TX,IP)
      IP=102
      TX3=TX(9)
      IF (J.EQ.J1.AND.H2.GE.H1) GO TO 17
      IF (J.EQ.J1.OR.J.EQ.J2) TX3=YN2+TX(9)-EH(9,J)
      IF (HMIN.GT.H2) TX3=TX(9)
      IF (J.EQ.J1.AND.HMIN.GT.H2) GO TO 17
      RN=REF/TX3
      IF (SALP.GE.RN) RN=1.
      SPHI=SALP*RN
      X=X1+SPHI-RE
      DIF=ABS(HMIN-X)
      HMIN=X
      IF (DIF-1.0E-5) 19,19,18
19    X2=RE+HMIN
C     PRINT 403, HMIN,DIF,RN
      THET=ASIN(SPHI)
      IF(RN.EQ.1.0) FBT3=-TAN(THET)
      IF (RN.EQ.1) GO TO 20
      DNX=(TX3-1.0)*ALOG((TX3-1.0)/(REF-1.0))/(X2-X1)
      FBT3=-TAN(THET)*(1.0-1.0/(1.0+TX3/(X2*DNX)))
20    BET=0.5*PI-THET
      BET2=BET2+BET
      BMIN=BET1+BET2
      IF (H2.GE.H1) GO TO 23
      BET=BET1+2.*BET2
      DB1=B1-BET1
      DB2=BET-B1
21    DB3=ABS(BMIN-B1)
      IF(DB3.GT.DB1.AND.DB2.GT.DB1) GO TO 25
      IF(DB2.GT.DB3) GO TO 22
      IF(DB2.GT.DB1)  GO TO 25
      BETA=BET
      FBT=FBT1+2.0*(FBT2+FBT3)
      LEN=1.
      GO TO 26
22    BETA=BET1+BET2
      FBT=FBT1+FBT2+FBT3
C     PRINT 401, J,BETA,FBT,FBT1,FBT2,FBT3,TX1,YN1
      GO TO 26
23    BETA=2.0*(BET1+BET2)
      LEN=1.
      FBT=2.0*(FBT1+FBT2+FBT3)
      PRINT 401, J,BETA,FBT,FBT1,FBT2,FBT3,TX1,YN1
      IF (H2.EQ.H1) GO TO 26
      IP=102
      IF (NP1.EQ.1) J1=J1+1
      SPHI=SIN(ALPLE)
      IF (Z(J1+1).LE.H2) GO TO 24
      RN=TX1/YN1
      IF (SPHI.GE.RN) RN=1.
      SPHI=SPHI/RN
      THET=ASIN(SPHI)
      GO TO 5
24    CALL POINT (H2,YN,N,NP,TX,IP)
      TX1=TX1-YN*EH(9,J1)
      RN=TX1/YN1
      J2=J1
      IF (SPHI.GE.RN) RN=1.
      SPHI=SPHI/RN
```

```
      THET=ASIN(SPHI)
      GO TO 5
25    BETA=BET1
      LEN=0.
      FBT=FBT1
26    THET=ANGLE+(B1-BETA)/(1.+FHT/TANG)
      DBETA=BETA/CA
      B=BET1/CA
      TH1=THET/CA
      PRINT 404, BETA,DBETA,FBT,TH1,TANG
      IF (THET.GT.TN.OR.THET.LT.TM) THET=(TN+TM)/2.
      TH1=THET/CA
      PRINT 404, BET1,B,FBT,TH1
      TN1=TN/CA
      TM1=TM/CA
      PRINT 405, TN,TM,TN1,TM1
      SPHI=SIN(THET)
      TANG=TAN(THET)
      IT=IT+1
      DBE=ABS(B1-BETA)
      DTH=ABS(ANGLE-THET)
      IF (IT.EQ.10) THET=0.5*(ANGLE+THET)
      IF (IT.EQ.10) GO TO 28
      IF (DBE.GT.1.0E-7.AND.DTH.GT.1.0E-7) GO TO 1
28    ANGLE=THET/CA
      PRINT 406, ANGLE,IT
      RETURN
29    H1=H2
      ANGLE=C/CA
      PRINT 406, ANGLE,IT
      RETURN
C
400   FORMAT (//" ITERATION NUMBER ",I3,//)
401   FORMAT (I5,E16.7,6F13.8)
402   FORMAT (I4,F10.4,6E13.4,4F10.4/)
403   FORMAT ("  HM1N=",F14.6,"  DIF=",F14.6,"  PR=",E16.8)
404   FORMAT (" TOTAL BETA = ",E14.8,F15.6,",FBT = ",E14.6," THET =",F10
     1.6,"TANG=",F10.6)
405   FORMAT (5F12.6)
406   FORMAT (3X,/1H",7HWITH ANGLE =",F7.3," DEGREES ;  RECOMPUTED
     1 FROM SUBROUTINE ANGL (ITERATION",I3,")")
      END
```

APÊNDICE C

PROGRAMA ATA

PROGRAMA ATA destina-se a:

a) Ler os dados locais

DA - número do dia do ano, em contagem contínua

GMT - hora média Geenwich

OG - longitude (grau)

OM - longitude (minuto)

AG - latitude (grau)

AM - latitude (minuto)

b) Ler os níveis de cinzas originais da imagem do LANDSAT

NIV - nível de cinza original

c) Calcular as radiações difusas.

d) Imprimir os níveis de cinzas de 5 linhas, com radiações difusa, intrínseca e total, nível de cinza original e nível de cinza corrigida.

e) Gravar a imagem em fita magnética com níveis de cinzas corrigidas.

```
FILE  1=HORI,UNIT=TAPE,RECORD=86

FILE  5 = ANY

FILE  8=TSU,UNIT=TAPE,RECORD=06


      DIMENSION C(512),R(512),RI(512),CI(512),NC(512),NIV(512),PR(4),PA(
     *4),TRA(4),PF1(8),PF2(8),ALFA(8),AL(4)
      DATA R/.799,.3928,.9385,.9726/,PA/.6418,.6791,.7123,.7596/,TRA/.2
     *675,.3865,.564,.5997/,AL/.1145,.1301,.3373,.3981/
      COSD=10.7668
      ZMA=1.
      READ(5,100) DA,GMT,DG,DM,AG,AM
  100 FORMAT(6F5.1)
C**** CONVERSAO DAS COORD. DO SUB-SATEL. EM GRAU
      WL1=ABS(DG)+DM/60.
      IF(DG.LT.0.) GO TO 1
      W=WL1
      GO TO 2
    1 W=-WL1
    2 WON=W*0.01745
      FI1=ABS(AG)+AM/60.
      IF(AG.LT.0.) GO TO 3
      F=FI1
      GO TO 4
    3 F=-FI1
    4 FIA=F*0.01745
      CALL SOLAR (DA,GMT,WON,FIA,ZMO,AZO,ZSO,ASO)
C*****SELECAO DE BANDA
      DO 18 IB=1,4
      GO TO (5,6,7,8) IB
  5   CONDA=0.55
      GO TO 9
  6   CONDA=0.65
      GO TO 9
  7   CONDA=0.75
      GO TO 9
  8   CONDA=0.95
  9   CALL BASE (ZMO,ZMA,ASO,PF1,PF2,CONDA)
      POT=-ALOG(TRA(IB))
      POR=-ALOG(PR(IB))
      POA=-ALOG(PA(IB))
      TRANS=TRA(IB)
      ALPE=AL(IB)
      ETA=(0.5*POR+0.95*POA)/(POR+POA)
      ENF=1.-ETA
C*****CALC. DOS COEF. DE CONV.
      CALL CONV(ZMO,ENF,PIT,ZMA,PF1,PF2,TRANS,ALFA)
C*****LEITURA DO NIVEL DE CINZA
      DO 17 I=1,512
      READ(1,10,END=19,DATA=19,END=19 ) NIV
 10   FORMAT(512I1)
      DO 16 J=1,512
      IF(I.LT.171.AND.J.LT.171) GO TO 13
      IF(I.LT.171.AND.J.GT.170.AND.J.LT.342) GO TO 12
      IF(I.LT.171.AND.J.GT.341) GO TO 11
      IF(I.GT.170.AND.I.LT.342.AND.J.LT.171) GO TO 13
      IF(I.GT.170.AND.I.LT.342.AND.J.GT.170.AND.J.LT.342) GO TO 12
```

ORIGINAL PAGE IS
OF POOR QUALITY

```
      IF(I.GT.170.AND.I.LT.342.AND.J.GT.341) GO TO 11
      IF(I.GT.341.AND.J.LT.171) GO TO 13
      IF(I.GT.341.AND.J.GT.170.AND.J.LT.342) GO TO 12
      IF(I.GT.341.AND.J.GT.341) GO TO 99
 11   AS=1.5708
      ANFA=ALFA(2)
      P1=PF1(2)
      P2=PF2(2)
      PT=P1+P2
      GO TO 14
 12   AS=0.
      ANFA=ALFA(1)
      P1=PF1(1)
      P2=PF2(1)
      PT=P1+P2
      GO TO 14
 13   AS=4.7124
      ANFA=ALFA(3)
      P1=PF1(3)
      P2=PF2(3)
      PT=P1+P2
C****CALCULO DAS FUNCOES F1 , F2 E  G
 14   F1=(1./(12.5664*(ZMD+ENE*POT)))*(ENE*(POT-ZMA)*PT+ZMD*P2+ENE*ZMA*P
     *T*TRANS-ZMD*P2*TRANS)
      F2=((ZMD*ZMD)/(6.2832*(ZMD+ENE*POT)))*(1.+4.*ZMA*ENE-(1.+4.*ENE*(P
     *OT+ZMA))*TRANS)
      G=ALBE/(1.+2.*ENE*(1.-ALBE)*POT)
      RD=COSD*(F1+F2+G)
      C(  J)=NIV(J)
      R(  J)=ANFA*C(  J)
      RI(J)=(R(J)-RD)/TRANS
      CI(  J)=RI(  J)/ANFA
      IF(CI(  J).GT.0.) CI(  J)=CI(  J)+0.5
      NC(  J)=IFIX(CI(  J))
      IF(CI(  J).LT.0.) NC(  J)=0.
      IF(CI(  J).GT.255.) NC(  J)=255.
      IF(I.EQ.16) GO TO 15
      IF(I.EQ. 133) GO TO 15
      IF(I.EQ. 256) GO TO 15
      IF(I.EQ. 379) GO TO 15
      IF(I.EQ. 502) GO TO 15
      GO TO 16
 15   WRITE(6,700) I,J,AS,F1,F2,G,RD,R(J),RI(J),NIV(J),NC(J)

700   FORMAT(1X,2I4,F7.3,4F9.4,2I5)
 16   CONTINUE
      WRITE(8,800) NC
800   FORMAT(512C1)
 17   CONTINUE
 18   CONTINUE
 19   STOP
      END
      CONTROL 2  IS THE LOCATION FOR EXCEPTIONAL ACTION ON THE I/O STATEMENT
```

```
      SUBROUTINE SOLAR (DA,GMT,WL,FI,ZMO,AZO,ZSO,ASO)
C*****OBJETIVO
C          CALCULAR A DECLINACAO DO SOL , O ANGULO ZENITAL
C          O ANGULO HORARIO ,O ANGULO ZENITAL E ELEVACAO
C          PARA DETERMINADA HORA DE GREENWICH
C
C*****DESCRICAO DOS PARAMETROS
C
C          DA=NUMERO DE DIA DO ANO(CONTAGEM CONTINUA)
C          WL=LONGETUDE DA ESTACAO CONTADA POSITIVAMENTE NADIRECAO OESTE
C          (W=+) EM GRAUS
C          FI=LATITUDE DA ESTACAO -POSITIVA NORTE- EM GRAUS
C          GMT=HORA MEDIA DE GREENWICH PARA A QUAL SE DESEJA CALCULAR
C          ( EM HORAS )
C          DEC=VARIAVEL QUE GUARDA O VALOR CALCULADO PARA A DEC.(EM GRAUS)
C          ZMO =COSENO DO ANG. ZEN. DO SOL
C
C*****DETERMINACAO DA DECLINACAO DO SOL
      D=DA*0.9856+GMT*0.0411-0.9856
      GL=279.9346+D
      IF(GL.GE.360.) GO TO 10
      RL=GL*0.0175
      SIGMA=GL+0.4087*SIN(RL)+1.8724*COS(RL)-0.0182*SIN(2.*RL)+0.0083*C
     *OS(2.*RL)
      GO TO 20
 10   RL=GL*0.0175-6.2832
      SIGMA=GL-360.+0.4087*SIN(RL)+1.8724*COS(RL)-0.0182*SIN(2.*RL)+0.00
     *83*COS(2.*RL)
 20   RSIGN=SIGMA*0.0175
      SD=SIN(RSIGN)*0.0071
      CD=(1.-SD*SD)**0.5
      TD=SD/CD
      DEC=(ATAN(TD))*57.2958
C*****CALC. DO ANG. HOR. SOLAR H
      RD=D*0.0175
      XM=12.+0.12357*SIN(RD)-0.004289*COS(RD)+0.153809*SIN(2.*RD)+0.060
     *783*COS(2.*RD)
      WO=WL*57.2958
      H=15.*(GMT-XM)-WO
C*****DETERMINACAO DO ANG. ZEN.
      FIR=FI
      HR=H*0.0175
      ZMO=SIN(FIR)*SD+COS(FIR)*CD*COS(HR)
      ZSO=ARCCOS(SIN(FIR)*SD+COS(FIR)*CD*COS(HR))*57.2958
C*****DETERMINACAO DA ELEVACAO DO SOL
      ELE=SIN(FIR)*SIN(RD )+COS(FIR)*COS(RD )*COS(HR)
      EL=ELE*57.2958
C*****DETERMINACAO DO ANG. AZIMUTAL DO SOL
      ASO=ARCSIN(COS(RD)*SIN(HR)/COS(ELE))
      AZO=ASO*57.2958
      WRITE(6,30)H,ZMO,ZSO,ELE,EL,ASO,AZO
 30   FORMAT(6X,7F10.5)
      RETURN
      END
```

ORIGINAL PAGE IS
OF POOR QUALITY

```
      SUBROUTINE CCN(ZXD,EEE,PPT,ZXA,E1,E2,TMITA,COE)
      DIMENSION E1(8),E2(8),RAT(2),COE(8),ES(8)
      CTE=1.7669
      PI=3.1416
      DO 3 K=1,3
3     COE(K)=0.
      DO 2 J=1,3
      ABDO=0.
      ES(I)=E1(I)+E2(I)
      DO 1 I=1,2
      FF1=(1./(12.5664*(ZXD+EEE*PPT)))*(EEE*(PPT-ZXA)*ES(I)+ZXD*E2(I)+EE
     1E*ZXA*ES(I)*TMITA-ZXD*E2(I)*TMITA)
      FF2=((ZXD*ZXD)/(6.2832*(ZXD+EEE*PPT)))*(1.+4.*ZXA*EEE-(1.+4.*EEE*(
     2PPT+ZXA))*TMITA)
      GG=ABDO/(1.+2.*EEE*(1.-ABDO)*PPT)
      RAD=CTE*(FF1+FF2+GG)
      A1=(ZXD*ZXD)/(ZXD+EEE*PPT)
      A2=2.*EEE*PPT
      DE=135.3*A1*(1.+A2*GG)
      RII=ABDO*DE/PI
      RAT(J)=RII*TMITA+RAD
      ABDO=ABDO+1.
1     CONTINUE
      COE(J)=(RAT(2)-RAT(1))/255.
      RAT(2)=0.
      RAT(1)=0.
2     CONTINUE
      WRITE(6,4) COE
4     FORMAT(1X,8F10.7)
      RETURN
      END
```

```
      SUBROUTINE FASE (ZMO,ZMA,ASO,PF1,PF2,CONDA)
      COMPLEX AMIE(100),BMIE(100),S1,S2,ZETAX(100),DZETAX(100),IC
      DIMENSION PSIX(100),VPSIX(100),QSIX(100),DPSIX(100),P(100),TAL(100
     *),PIL(100),DQSIX(100),PSIY(100),DPSIY(100),VPSIY(100),FFES(2),
     *PF1(8),PF2(8)
      PI = 3.1416
      RME=0.01
      RMA=5.0
      DELX=1.0
      RIND=1.33
      ASA=0.
      DO 13 KK=1,3
      C1=0.
      C2=0.
      CZ=COS(ASA-ASO)
      X1=ARCOS(ZMA*ZMO-(((1-ZMA*ZMA)*(1-ZMO*ZMO))**0.5)*CZ)
      X2=ARCOS(-ZMA*ZMO+(((1-ZMA*ZMA)*(1-ZMO*ZMO))**0.5)*CZ)
      XME=(2*PI*RME)/CONDA
      XMA=(2*PI*RMA)/CONDA
      L=(XMA-XME)/DELX+1
      X=XME
      DO 12 I=1,L
      Y=RIND*X
      IL = IFIX(1.2*X+9)
      PSIX(IL+2) = 0
      PSIX(IL+1) = 1
      PSIY(IL+2) =0
      PSIY(IL+1) =1
      DO 1  J=1,IL
      J=IL+1-J
      PSIX(J) = (2*J+1)*PSIX(J+1)/X-PSIX(J+2)
1     PSIY(J) = (2*J+1)*PSIY(J+1)/Y-PSIY(J+2)
      FNORX =(SIN(X))/PSIX(1)
      FNORY =( SIN(Y))/PSIY(1)
      DO 2  IV=1,IL
      VPSIX(IV) = FNORX*PSIX(IV+1)
2     VPSIY(IV) = FNORY*PSIY(IV+1)
      DPSIX(1) = (1.-1./(X*X))*SIN(X)+COS(X)/X
      DPSIY(1) = (1.-1./(Y*Y))* SIN(Y)+ COS(Y)/Y
      DQSIX(1) = (1.-1./(X*X))*COS(X)-SIN(X)/X
      QSIX(1) = COS(X)/X+SIN(X)
      QSIX(2) = (3./(X*X)-1.)*COS(X)+3.*SIN(X)/X
      DO 3  K=2,IL
      DPSIX(K) = -K*VPSIX(K)/X+VPSIX(K-1)
      DPSIY(K) = -K*VPSIY(K)/Y+VPSIY(K-1)
      QSIX(K+1) = (2*K+1)*QSIX(K)/X-QSIX(K-1)
3     DQSIX(K) = -K*QSIX(K)/X+QSIX(K-1)
      IC = CMPLX(0.,1)
      DO 4  M=1,IL
      ZETAX(M) = VPSIX(M)+IC*QSIX(M)
4     DZETAX(M) = DPSIX(M)+IC*DQSIX(M)
      DO 5  K=1,IL
      AMIE(K)=(DPSIY(K)*VPSIX(K)-(RIND)*VPSIY(K)*DPSIX(K))/(DPSIY(K)*ZETAX
     *(K)-RIND*VPSIY(K)*DZETAX(K))
5     BMIE(K)=(RIND*DPSIY(K)*VPSIX(K)-VPSIY(K)*DPSIX(K))/(RIND*DPSIY(K)*
     *ZETAX(K)-VPSIY(K)*DZETAX(K))
      AM=CABS(AMIE(1))
      AMI=C[illegible]*AM
      BM=CABS(BMIE(1))
      BMI=C[illegible]*BM
```

ORIGINAL PAGE IS
OF POOR QUALITY

```
      DO 6  J=2,IL
      AMI=CABS(AMIF(J))
      AMIEC=AMIEC+(2*J+1)*AMI*AMI
      BMI=CABS(BMIF(J))
6     BMIEC=BMIEC+(2*J+1)*BMI*BMI
      SOMIE=AMIEC+BMIEC
      FAEE=((2./(X*X ))*SOMIE)
      DO 11 KX=1,2
      IF(KX.EQ.2) GO TO 8
      TETA=X1
      GO TO 8
7     TETA=X2
8     P(1) = SIN(TETA)
      P(2) = 3*COS(TETA)*SIN(TETA)
      TAL(1) = COS(TETA)
      PIL(1)=1
      S1=1.5*(AMIE(1)+BMIE(1)*TAL(1))
      S2=1.5*(BMIE(1)+AMIE(1)*TAL(1))
      DO 9  M=2,IL
      P(M+1) = ((2*M+1)*TAL(1)*P(M)/M)-(M+1)*P(M-1)/M
      TAL(M) = (M*TAL(1)*P(M)/P(1))-(M+1)*P(M-1)/P(1)
      PIL(M)=P(M)/P(1)
      S1=S1+(2*M+1)*(AMIE(M)*PIL(M)+BMIE(M)*TAL(M))/(M*M+M)
9     S2=S2+(2*M+1)*(BMIE(M)*PIL(M)+AMIE(M)*TAL(M))/(M*M+M)
      SI1=CABS(S1)
      SINT1 = SI1*SI1
      SI2=CABS(S2)
      SINT2 = SI2*SI2
      AMPES=SINT1+SINT2
      FFES(KX)=0.
      FFES(KX)=(1./(2.*PI*(X*X )))*(AMPES/FAEE)
      IF(KX.EQ.2) GO TO 10
      PF1(KK)=0.
      PF1(KK)=C1+FFES(KX)
      C1=PF1(KK)
      GO TO 11
10    PF2(KK)=0.
      PF2(KK)=C2+FFES(KX)
      C2=PF2(KK)
11    CONTINUE
12    X=X+DEL
      WRITE(6,700)CONDA,ZIA,ZHO,ASO,ASA,X1,X2,PF1(KK),PF2(KK)
700   FORMAT(1X,9F10.4)
      ASA=ASA+1.571
13    CONTINUE
      RETURN
      END
```