



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA E TECNOLOGIA
INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS

INPE-14211-TDI/1112

**ESTUDO DA INFLUÊNCIA DA GEOMETRIA DE VISADA NA
RESPOSTA ESPECTRAL DE CLASSES DE COBERTURA
SELECIONADAS NA REGIÃO AMAZÔNICA A PARTIR DE
DADOS MISR/TERRA**

Alexandre da Silva Xavier

Dissertação de Mestrado do Curso de Pós-Graduação em Sensoriamento Remoto,
orientada pelo Dr. Lênio Soares Galvão, aprovada em 25 de abril de 2003.

INPE
São José dos Campos
2007

517.9:528.711.7(811.3)

Xavier, A. S.

Estudo da influência da geometria de visada na resposta espectral de classes de cobertura selecionadas na região Amazônica a partir de dados MISR/TERRA / Alexandre da Silva Xavier. – São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), 2003.

138 p.; (INPE-14211-TDI/1112)

1. Geometria de visada. 2. Resposta espectral. 3. Região Amazônica. 4. Sensor MISR. 5. Earth Observing System. 6. Sensoriamento remoto. I. Título.

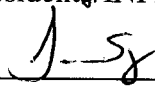
Aprovado pela Banca Examinadora em
cumprimento a requisito exigido para a
obtenção do Título de **Mestre** em
Sensoriamento Remoto.

Dr^a Evlyn Márcia Leão de Moraes Novo



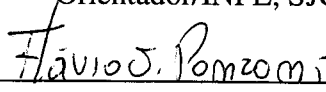
Presidente/INPE, SJCampos-SP

Dr. Lênio Soares Galvão



Orientador/INPE, SJCampos-SP

Dr. Flávio Jorge Ponzoni



Membro da Banca/INPE, SJCampos-SP

Dr. Carlos Roberto de Souza Filho



Membro da Banca
Convidado UNICAMP, Campinas-SP

Candidato: Alexandre da Silva Xavier

São José dos Campos, 25 de abril de 2003.

“I do not know what I may appear to the world, but to myself I seem to have been only like a boy playing on the sea shore and diverting myself and then finding a smoother pebble or a prettier shell than ordinary while the greater ocean of truth lay all undiscovered before me”.

Isaac Newton (1642 - 1727)

À minha esposa, Patrícia, que soube compreender e apoiar minha dedicação a este trabalho e manter a minha vida organizada, dedico.

AGRADECIMENTOS

À Patrícia Garcia Maculan, minha esposa, por ser sempre compreensiva, dedicada e interessada no meu trabalho, e por cuidar de mim para que eu pudesse me dedicar a este trabalho.

Ao Dr. Lênio Soares Galvão, pelo empenho na orientação deste trabalho, pelas freqüentes e produtivas trocas de idéias e pela compreensão frente às adversidades surgidas ao longo do trabalho.

Aos colegas Paulo Eduardo Ubaldino de Souza, Cláudia Ramos Zagaglia, Patrícia Guedes, Alcina Maria Nepomuceno, Maria Sílvia Pardi LaCruz e todos da turma 2001 de pós-graduação em Sensoriamento Remoto do INPE, pelo apoio e por compartilhar horas de estudo e troca de idéias.

Aos participantes do PRODES, Eliana Maria Kalil Melo, José Carlos Moreira e Marcelo Sestini, pela disponibilização dos dados do PRODES e do PROVEG, e pela experiência compartilhada.

Ao meu amigo Henrique da Costa Marques, por debater comigo as idéias empregadas neste trabalho, mesmo quando não possuía domínio do assunto.

Ao Maj. Av. Ênio Salvatore Carmine Esposito, ao Cap. Av. Romero da Costa Moreira e a todos da Divisão de Sensoriamento Remoto do Instituto de Estudos Avançados, por me receberem e me apoiarem ao longo desse período.

À Maria Etelvina Renó Dias, à Angelucci Rodrigues dos Santos, ambas da Secretaria da pós-graduação da OBT e à Evanilce Aparecida Hasselmann Richter, da ESR/IEAv, por cuidarem de toda a burocracia.

Aos meus pais, Zelio dos Santos Xavier e Zenaide da Silva Xavier, e à minha irmã, Jaqueline da Silva Xavier, por acreditarem no meu potencial e por me apoiarem incondicionalmente.

RESUMO

O *Earth Observing System* (EOS) é um projeto da *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) que pretende criar o mais completo banco de dados de sensoriamento remoto da superfície da Terra. Dentre as diversas plataformas orbitais existentes, o satélite TERRA é, atualmente, o que reúne o maior número de sensores imageadores, gerando dados sobre a superfície da Terra e sobre a atmosfera que a cerca. Um destes sensores é o *Multi-angle Imaging Spectroradiometer* (MISR), capaz de gerar imagens de uma mesma área em um curto intervalo de tempo a partir de nove diferentes ângulos de visada ou câmeras em quatro bandas espectrais. O objetivo deste trabalho foi estudar o comportamento da resposta espectral de diferentes tipos de classes de cobertura em uma área de estudo localizada no Estado do Acre em função da variação no ângulo de visada. Um modelo de mistura espectral foi aplicado para a caracterização dos componentes da cena MISR e para a definição de classes de cobertura e subsequente obtenção dos perfis angulares. Dados de radiância de topo da atmosfera e do fator de reflectância bidirecional (BRF) foram utilizados para analisar a influência dos efeitos atmosféricos e direcionais sobre a resposta espectral das classes e sobre o cálculo do índice de vegetação *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI). A influência da geometria de visada na discriminação das classes de cobertura foi analisada. Os resultados mostraram que: a) a comparação das imagens fração sombra e vegetação verde com mapas de vegetação disponíveis permitiram selecionar dois grandes domínios de floresta para estudos angulares subsequentes, além de solo e de duas pequenas áreas de regeneração com características distintas; b) os valores de NDVI das classes de cobertura vegetal, calculados a partir da radiância do topo da atmosfera, foram maiores próximos ao nadir e diminuíram em ambas as direções de visada com o aumento do ângulo de visada, em função do espalhamento atmosférico, porém com uma redução mais acentuada na direção do espalhamento frontal; c) os valores de NDVI calculados a partir do BRF foram maiores que os obtidos a partir de dados de radiância de topo da atmosfera, mas apresentaram uma menor variabilidade em função do ângulo zenital de visada, especialmente entre $\pm 25^\circ$ do nadir; d) a precisão de classificação, calculada com dados da própria imagem para as duas classes de floresta, melhorou de forma acentuada na direção do retroespalhamento; e) ângulos de visada superiores a -45° e $+25^\circ$ do nadir foram prejudiciais à discriminação entre as classes de cobertura selecionadas, conforme indicado pela redução nos valores de precisão de classificação obtidos.

STUDY OF THE INFLUENCE OF VIEWING GEOMETRY ON THE SPECTRAL
RESPONSE OF SELECTED COVER CLASSES OF AMAZON REGION FROM
MISR/TERRA DATA

ABSTRACT

The Earth Observing System (EOS) is a NASA project aiming at creating the most complete terrestrial remote sensing database. At present, among the several available orbital platforms, the TERRA satellite has the largest number of imaging sensors producing data from the Earth surface and its atmosphere. One of these sensors is the Multi-angle Imaging Spectroradiometer (MISR), which is capable to produce images from a given area at nine view angles or cameras and at four spectral bands. The objective of the present investigation was to study the spectral behavior of different land cover types, in a study area located at the Acre state, as a function of variable viewing angle. A linear spectral mixture model was applied to characterize the spatial distribution of the MISR scene components and to define major land cover classes for the subsequent analysis of angular profiles. Radiance of the top of the atmosphere and bidirectional reflectance factor (BRF) data were used to analyze the atmospheric and coupled directional effects on the spectral response of the land cover types and on their normalized difference vegetation index (NDVI) determination. The viewing geometry influence on the discrimination of the land cover types was investigated. The results showed that: a) the comparison of the fraction-images derived from the mixture model with available vegetation maps from the study area allowed the selection of two major forest classes for the subsequent angular analysis, besides soil and two small areas of distinct vegetation regrowth; b) the top of the atmosphere radiance-derived NDVI values of the vegetation covers decrease from nadir to extreme viewing due to atmospheric scattering, especially in the forward scattering direction; c) the BRF-derived NDVI values were higher than the radiance-derived NDVI values but presented a smaller view angle variation, especially between $\pm 25^\circ$ from nadir; d) the classification accuracy, determined from the confusion matrix and from new selected pixels, was better in the backscattering direction; e) view angles higher than -45° and $+25^\circ$ from nadir affected the discrimination between the forest classes, as indicated by the reduction in the classification accuracy values.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS

LISTA DE TABELAS

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

CAPÍTULO 1 - INTRODUÇÃO.....	23
1.1 - Objetivos.....	26
CAPÍTULO 2 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	27
2.1 - Estudos Sobre a Geometria De Visada.....	27
2.2 - Descrição do Sensor.....	37
2.3 - Algoritmos de Geração de Produtos.....	41
2.4 - Técnicas MNF, PPI, Uso do Diagrama de Espalhamento <i>N</i> -Dimensional e a Análise de Mistura Espectral.....	47
2.5 - Métodos de Classificação Supervisionada.....	55
CAPÍTULO 3 - MATERIAL E MÉTODO.....	59
3.1 - Seleção da Área de Estudo e dos Produtos MISR.....	59
3.2 - Caracterização dos Componentes de Cena Através do Modelo de Mistura Espectral.....	61
3.2.1 - Seleção de Membros de Referência.....	62
3.2.2 - Imagens-Fração e Classes de Cobertura.....	63
3.3 - Estudo da Influência da Geometria de Visada Sobre a Resposta Espectral das Classes de Cobertura Seleccionadas.....	64
3.4 - Comparação dos Resultados Obtidos a Partir da Radiância de Topo de Atmosfera e do Fator de Reflectância Bidirecional.....	65
3.5 - Influência da Geometria de Visada na Discriminação de Classes de Cobertura Seleccionadas.....	66
CAPÍTULO 4 - RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	69
4.1 - Caracterização da Cena Através de um Modelo Linear de Mistura Espectral... 69	69
4.1.1 - Seleção dos Membros de Referência.....	69
4.1.2 - Imagens-Fração.....	75
4.1.3 - Imagens-Fração e Classes de Cobertura.....	77
4.2 - Influência da Geometria de Visada Sobre a Resposta Espectral das Classes de Cobertura Seleccionadas.....	81
4.2.1 - Estudo da Variação Angular da Radiância de Topo de Atmosfera.....	81
4.2.2 - Estudo da Variação Angular do Fator de Reflectância Bidirecional (BRF)... 92	92
4.2.3 - Comparação dos Resultados Obtidos a Partir da Radiância de Topo de Atmosfera e do Fator de Reflectância Bidirecional.....	102
4.3 - Influência da Geometria de Visada na Discriminação de Classes de Cobertura Seleccionadas.....	104
CAPÍTULO 5 - CONCLUSÕES.....	109

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	113
APÊNDICE A - DESCRIÇÃO DO ESE, DO SATÉLITE TERRA E DOS SENSORES A BORDO.....	119
APÊNDICE B - DESCRIÇÃO DOS ALGORITMOS DE CALIBRAÇÃO DOS DADOS E GERAÇÃO DOS PRODUTOS MISR.....	127

LISTA DE FIGURAS

2.1 – Perfis angulares da reflectância de superfície de grama (a), pomar (b) e solo exposto (c), para diferentes valores de ângulo zenital solar (Z) e bandas do visível (VIS) e do infravermelho próximo (IVP), no plano principal do Sol.....	29
2.2 – Perfis angulares da reflectância aparente (topo de atmosfera) de grama (a), pomar (b) e solo exposto (c), para diferentes valores de ângulo zenital solar (Z) e bandas do visível (VIS) e do infravermelho próximo (IVP).	30
2.3 – Perfis angulares normalizados em relação ao nadir da alfafa, para as bandas do vermelho (a), infravermelho próximo (b) e para o NDVI (c).....	31
2.4 – Perfis angulares do trigo, normalizados em relação ao nadir, para a reflectância das bandas do vermelho (a), infravermelho próximo (b) e para o NDVI(c), considerados diferentes valores de ângulo zenital solar.	33
2.5 – Perfis angulares do NDVI para três níveis de biomassa de alfafa e solo exposto, em função da carga de aerossóis.	36
2.6 – MISR e o direcionamento das câmeras e bandas.	40
2.7 – Concepção artística do MISR em corte. Os cilindros amarelos são as extremidades das câmeras.	41
2.8 – Diagrama esquemático da separação espectral parcial através da projeção dos dados.	48
2.9 – Conjunto bidimensional de pontos, envolvido pelo <i>simplex</i> , um triângulo. Os asteriscos são os pontos que formam os vértices da casca convexa.	51
2.10 – <i>Simplex</i> de melhor ajuste à casca convexa dos dados, em unidades de distância do centro do <i>simplex</i> , não normalizadas. Dois membros de referência derivados do <i>simplex</i> , representando sericita, o vértice superior do <i>simplex</i> , e carbonato, o vértice inferior. A sombra é o vértice direito.	52
3.1 – Fluxograma da metodologia utilizada	59
4.1 – As quatro componentes geradas pela transformação Minimum Noise Fraction (MNF), a partir da imagem radiância de topo da atmosfera.....	71
4.2 – Imagem resultante da aplicação da técnica PPI sobre as componentes MNF. Os pixels escuros representam candidatos a membros de referência.....	72
4.3 – Visualizador <i>n</i> -dimensional, com os membros de referência selecionados destacados em cores.....	73
4.4 – Composição colorida RGB 342 com a indicação dos membros de referência selecionados, bem como do rio Madeira e da pluma de fumaça observada na imagem.	74
4.5 – Diagrama de espalhamento bidimensional de pixels da radiância das bandas 3 (vermelho) e 4 (infravermelho próximo) do MISR. A posição aproximada dos membros de referência está indicada. A pluma de fumaça e o rio Madeira estão delimitados pelos círculos pontilhados.....	74
4.6 – Perfil espectral dos membros de referência selecionados para emprego no modelo de mistura espectral.	75
4.7 - Imagem fração-solo.....	76
4.8 - Imagem fração vegetação-verde.....	76
4.9 - Imagem fração-sombra.....	76

4.10 - Imagem representando o erro médio quadrático de ajuste do modelo.....	77
4.11 – Imagens fração sombra (a) e fração vegetação verde (b), fatiadas de forma a separar os grandes domínios da vegetação.....	80
4.12 - Mapa de vegetação do IBGE modificado.....	80
4.13 – Mapa de desmatamento do PRODES.....	81
4.14 – Classes de cobertura selecionadas para análise da influência da geometria de visada sobre sua resposta espectral.....	81
4.15 – Composições coloridas normais obtidas a partir das imagens radiância de topo da atmosfera das nove câmeras do MISR.....	83
4.16 – Perfis angulares dos valores médios das imagens de radiância de topo de atmosfera, calculados a partir da soma total para diferentes bandas espectrais.	85
4.17 – Perfis angulares de radiância de topo da atmosfera para cinco classes de cobertura e quatro bandas espectrais do MISR. As abreviações são: Db (Floresta Ombrófila Densa Terras Baixas), As (Floresta Ombrófila Aberta Submontana), Reg 1997(Regeneração antiga) e Reg. 2000 (Regeneração recente).....	87
4.18 - Perfis angulares de radiância do topo da atmosfera para duas das cinco classes de cobertura e para todas as bandas espectrais do MISR. As abreviações das classes de cobertura são as mesmas da Figura 4.17.	88
4.19 – Perfis angulares de radiância de topo da atmosfera das cinco classes de cobertura, normalizados em relação à resposta da câmara do nadir, para as bandas do azul (a), verde (b), vermelho (c) e do infravermelho próximo (d) do sensor MISR. As abreviações das classes de cobertura são as mesmas da Figura 4.17.	89
4.20 - Perfis angulares normalizados em relação ao nadir para a radiância de topo de atmosfera, das classes de cobertura Db e Solo exposto, representando as bandas espectrais do vermelho e do IVP do MISR.	90
4.21 – Perfis angulares do NDVI para as cinco classes de cobertura, calculado a partir da radiância de topo de atmosfera.	91
4.22 – Composições coloridas normais obtidas a partir das imagens Fator de Reflectância Bidirecional (BRF) das nove câmeras do MISR.	93
4.23 – Perfis angulares do fator de reflectância bidirecional (BRF) para todas as classes de cobertura e para as bandas do azul (a), verde (b), vermelho (c) e do infravermelho próximo (d) do sensor MISR.	95
4.24 - Perfis angulares do fator de reflectância bidirecional (BRF) das classes de cobertura Floresta ombrófila densa terras baixas (Db) (a) e solo (b), para as bandas espectrais do MISR.....	96
4.25 - Perfis angulares do fator de reflectância bidirecional (BRF), normalizados em relação à resposta da câmara do nadir, para as cinco classes de cobertura e para as bandas do azul (a), verde (b), vermelho (c) e do infravermelho próximo (d) do MISR.	97
4.26 – Perfil estrutural das Florestas Ombrófila Densa Terras Baixas (Db) e Ombrófila Aberta Submontana (As), com a posição do Sol, das nove câmeras do MISR e os perfis angulares BRF para as bandas espectrais do vermelho e IVP.....	99
4.27 – Fatiamento realizado sobre as imagens-diferença BRF entre as câmeras Bf (-45,6°) e Ba (45,6°), para as Bandas espectrais do Vermelho (a) e do Infravermelho próximo (b).	101

4.28 – Perfis angulares do NDVI para as cinco classes de cobertura, calculados a partir do fator de reflectância bidirecional.	102
4.29 – Perfis angulares do NDVI das classes de cobertura obtidos a partir de dados do fator de reflectância bidirecional (BRF) (a) e da radiância de topo de atmosfera (TOA) (b).....	104
4.30 – Perfil angular da distância Euclidiana (a) e da distância de Mahalanobis (b) entre as classes de cobertura de floresta Db e As, para o fator de reflectância bidirecional (BRF).	105
4.31 – Perfis angulares das diferenças entre os valores médios de BRF para as classes de cobertura de floresta Db e As (a), e normalizados em relação ao nadir (b).	106
4.32 – Perfil angular da diferença do NDVI entre as classes de cobertura de floresta Db e As, a partir das nove câmeras do MISR e do BRF	107
4.33 – Perfis angulares representando a precisão dos classificadores de Máxima Verossimilhança e da Distância de Mahalanobis, aplicados sobre as imagens BRF de cada uma das nove câmeras MISR.	108
A.1 – O satélite TERRA.	121
A.2 – MISR e o direcionamento das câmeras e bandas.....	125
A.3 – Concepção artística do MISR em corte. Os cilindros amarelos são as extremidades das câmeras.	126
B.1 – Produtos gerados a partir do MISR.....	129

LISTA DE TABELAS

2.1 – Geometria das Câmeras do MISR.....	39
2.2 – Bandas espectrais do MISR.....	39
2.3 – Modos de operação X resolução espacial.....	39
A.1 – Geometria das Câmeras do MISR.....	124
A.2 – Bandas espectrais do MISR.....	124
B.1 – Níveis de processamento de produtos do EOSDIS.....	127

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

ASAS	- Advanced Solid-state Array Spectroradiometer
ASTER	- Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
AVHRR	- Advanced Very High Resolution Radiometer
AVIRIS	- Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer
BHR	- Bihemispherical Reflectance
BRDF	- Bidirecional Reflectance Distribution Function
BRF	- Bidirectional Reflectance Factor
CCD	- Charge-Coupled Device
CERES	- Clouds and the Earth's Radiant Energy System
DHR	- Directional Hemispherical Reflectance
DVI	- Difference Vegetation Index
EOS	- Earth Observing System
EOSDIS	- EOS Data and Information System
ESE	- Earth Science Enterprise
ETM+	- Enhanced Thematic Mapper Plus
<i>f</i> APAR	- Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation
GOES	- Geostationary Operational Environmental Satellite
HDF	- Hierarchical Data Format
HDF-EOS	- Hierarchical Data Format - Earth Observing System
HDRF	- Hemispherical-Directional Reflectance Factor
HQE	- High Quality Efficiency
HRV	- High Resolution Visible
LAI	- Leaf Area Index
Landsat	- Land Satellite
LaRC	- Langley Research Center
MISR	- Multi-angle Imaging Spectroradiometer
MODIS	- Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer
MOPITT	- Measurements of Pollution in the Troposphere
NASA	- National Aeronautics and Space Administration

NCSA	- National Center for Supercomputing Application's
ND	- Número Digital
NDVI	- Normalized Diference Vegetation Index
NIR	- Near Infrared
NOAA	- National Oceanic and Atmospheric Administration
NPM/EO-1	- New Millennium Program/Earth Observing-1
OBC	- On-Board Calibrator
POLDER	- POLarization and Directionality of Earth Reflectances
PSF	- Point Spread Function
RCCM	- Radiometric Camera-by-Camera Mask
RVI	- Ratio Vegetation Index
SAVI	- Soil Adjusted Vegetation Index
SeaWiFS	- Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor
SOM	- Space Oblique Mercator
SPOT	- Satellite pour l'observation de la Terre
SSR-1	- Satélite de Sensoriamento Remoto 1
SWIR	- Short-wave Infrared
TEC	- Thermo-Electric Cooler
TIR	- Thermal Infrared
TOVS	- TIROS Operational Vertical Sounder
TM	- Thematic Mapper
TRMM	- Tropical Rainfall Measuring Mission
TVI	- Transformed Vegetation Index
VNIR	- Visible and Near Infrared

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Os maiores esforços da comunidade científica de sensoriamento remoto estão direcionados, hoje em dia, para a previsão das mudanças que possam vir a ocorrer com a qualidade de vida em nosso planeta. Alterações na camada de ozônio, o aumento da concentração de gases poluentes, o aquecimento global, o aumento do nível dos oceanos, o desmatamento de florestas nativas e a ocorrência de acidentes naturais, como erupção de vulcões, furacões, enchentes e secas, são alguns dos principais eventos que preocupam os cientistas. Fenômenos como *El Niño* e *La Niña* apresentam características que ainda não são de conhecimento profundo da comunidade científica. Isto torna difícil estimar as suas conseqüências antecipadamente, impossibilitando o planejamento de ações preventivas. Todos esses fenômenos, tanto os naturais como os causados pelo homem, precisam ser monitorados contínua e freqüentemente, para que seja possível acompanhar seu desenvolvimento, modelar sua periodicidade e identificar seus processos.

Para monitorar a superfície terrestre, sensores remotos, operados a partir de plataformas orbitais, com campo de visada estreito e amplo são normalmente utilizados. Os primeiros incluem instrumentos como o *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+), que está a bordo do satélite Landsat 7 e o *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER), que está a bordo do satélite TERRA. Exemplos de sensores de campo de visada amplo incluem o *Advanced Very High Resolution Radiometer* (AVHRR), a bordo da série de satélites do *National Oceanic and Atmospheric Administration* (NOAA) e o *Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS), a bordo do satélite TERRA, como parte do projeto *Earth Observing System* (EOS). Os sensores de amplo campo de visada possibilitam o imageamento de toda a superfície da Terra em até dois dias, de forma contínua. Existem, ainda, instrumentos, como o *High Resolution Visible* (HRV), um dos sensores a bordo do satélite *Satellite pour l'observation de la Terre* (SPOT), com capacidade de visada lateral não contínua, que pode propiciar um tempo de revisita aparente de quatro dias.

O uso de sensores de amplo campo de visada, apesar de permitir o imageamento completo e contínuo do planeta Terra com a repetitividade desejada, apresenta uma característica que pode ser indesejável para o acompanhamento de alterações ambientais. Esta característica diz respeito ao comportamento não isotrópico dos alvos na superfície da Terra. Desta forma, a direção de onde se observa um determinado alvo interfere na percepção que se tem do mesmo. Em estudos de vegetação este fenômeno é ainda mais marcante, pois a estrutura do dossel, a influência do solo e os efeitos de sombreamento contribuem para a resposta espectral da vegetação.

O conhecimento da resposta espectral dos alvos na superfície da Terra em função da variação na geometria de visada torna-se, portanto, um elemento chave para a correção de dados obtidos em diferentes geometrias em relação à resposta ao nadir. Qi et al. (1995) estimaram valores de albedo espectral a partir do uso do modelo de Rahman et al. (1993a,b) sobre dados de sensores orbitais, aerotransportados e de campo, concluindo que os índices de vegetação derivados do albedo espectral são independentes da geometria de visada, enquanto que os índices derivados do fator de reflectância bidirecional variam substancialmente em função do ângulo de visada. Roujean et al. (1992) propuseram um modelo para corrigir a variabilidade da resposta espectral da superfície em função da geometria de iluminação e visada, para ser utilizado em séries temporais.

A variabilidade na resposta espectral da superfície em função da geometria de visada, tratada por Qi et al. (1995) como perturbações passíveis de correção pode, na verdade, ser uma rica fonte de informações, ainda não adequadamente estudada. Esta variabilidade pode possibilitar a extração de parâmetros da superfície com muito mais precisão do que é possível com o uso apenas da imagem ao nadir. A modelagem da variação angular da resposta espectral dos alvos imageados permite estimar diferentes propriedades biofísicas. Entre essas propriedades podemos citar a estimativa de valores de índice de área foliar (Walthall, 1997; Knyazikhin et al., 1998), e de fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (Martonchik et al., 1998; Epiphanyo e Huete, 1994). Alguns autores conduzem até mesmo pesquisas no sentido de modelar a resposta espectral de diferentes tipos de floresta sob diferentes geometrias de visada, em

função do diâmetro individual de cada folha do dossel, sua altura, a distribuição angular de folhas e o brilho do solo (Gobron et al., 2000).

A variação na geometria de visada apresenta dois grandes fatores que podem influenciar negativamente na capacidade de extração de informações que essa própria variação proporciona. Esses dois fatores são os efeitos atmosféricos e a mudança no tamanho dos pixels conforme a visada da maior parte dos sistemas sensores se afasta do nadir.

Os efeitos atmosféricos dizem respeito à espessura óptica da atmosfera, que aumenta sob a perspectiva do sensor quando o imageamento é feito fora do nadir (Holben e Fraser, 1984; Tanré et al., 1983; Myneni e Asrar, 1994). Diferentes componentes atmosféricos causam alterações igualmente diferentes, e essas alterações são dependentes do comprimento de onda da radiação incidente. Os efeitos espaciais dizem respeito à perda de poder de resolução espacial causada pelo aumento da área projetada do detector na superfície, definindo um pixel na imagem. O aumento da área de um pixel pode chegar a quatro vezes o tamanho nominal, como é o caso do NOAA/AVHRR, cuja resolução espacial no nadir é de pouco mais de um quilômetro, e no limite da faixa imageada é de mais de quatro quilômetros (Holben e Fraser, 1984). A redução da influência desses dois fatores é essencial ao estudo do papel do ângulo de visada na variação da resposta espectral de alvos na superfície da Terra.

A NASA desenvolveu uma plataforma orbital, o satélite TERRA, lançado em 18 de dezembro de 1999, que transporta uma série de sensores, entre eles o MISR. O MISR observa a Terra de uma perspectiva única, utilizando nove câmeras, direcionadas ao longo da trajetória do satélite, que geram imagens em quatro bandas nas faixas do visível e infravermelho próximo e com resolução espacial considerada constante, de 1100 metros ao longo dos nove ângulos de visada, no modo de cobertura global, ou de 275 metros para faixas selecionadas de até 300 quilômetros, no modo local. Além disso, outros sensores a bordo do satélite TERRA permitem extrair dados sobre a composição da atmosfera, auxiliando na estimativa da espessura da camada atmosférica, que é utilizada no cálculo da Função de Distribuição da Reflectância Bidirecional (BRDF).

1.1 - Objetivos

Dentro deste cenário, o objetivo deste trabalho é estudar o comportamento da resposta espectral de diferentes tipos de classes de cobertura na Região Amazônica em função da variação no ângulo de visada. Para atingir este objetivo geral, outros objetivos específicos são definidos, a saber:

- Caracterização de classes de cobertura selecionadas da Amazônia na imagem obtida pelo sensor MISR, a partir da geração e análise de um modelo de mistura espectral;
- Análise da influência da geometria de visada e dos efeitos atmosféricos associados sobre a resposta espectral e NDVI de componentes de cena da Amazônia;
- Estudo da influência da geometria de visada na discriminação das classes de cobertura da Amazônia.

O presente estudo é importante no contexto do Programa Espacial Brasileiro, especialmente tendo em vista o futuro lançamento do Satélite de Sensoriamento Remoto (SSR-1). O SSR-1 irá ocupar uma órbita equatorial e será provido de três câmeras com um campo de visada total de cerca de 90°. As imagens serão obtidas entre as latitudes de 5° N e 15° S, com um tempo de revisita inferior a duas horas (DLR, 2001), aumentando as possibilidades de obtenção de imagens livres da influência de nuvens. O tamanho do pixel deverá variar de 50 metros (nadir) a 200 metros (15° S). Os efeitos atmosféricos e direcionais decorrentes da geometria de iluminação e de visada da cena estarão certamente presentes nas imagens obtidas pelo SSR-1, especialmente para latitudes próximas a 15° S. A possibilidade de conhecer o comportamento espectral esperado das diversas classes de cobertura em função desse amplo campo de visada é importante para a pesquisa e monitoramento da Amazônia.

CAPÍTULO 2

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 - Estudos Sobre a Geometria de Visada

Mudanças na geometria de visada de sensores remotos introduzem variações na resposta espectral dos alvos na superfície da Terra. Essas variações podem ser consideradas como fonte de informações úteis ou como efeitos negativos, passíveis de correção. A maior parte dos trabalhos na literatura está relacionada com a necessidade de minimizar tais efeitos. Pinty et al. (2002), Gobron et al. (2002), Walthall (1997) e Verstraete et al. (1990) são alguns autores que destacaram a necessidade de extrair mais informações da variação na resposta espectral em função da geometria de visada. Dymond et al. (2001), Hu et al. (2000) e Kennedy et al. (1997), entre outros, consideraram a variabilidade espectral dos alvos na cena como um efeito indesejável.

Diversas pesquisas sobre os efeitos espectrais da geometria de visada foram conduzidas com dados de diferentes sensores orbitais ou aerotransportados. Por exemplo, Knyazikhin et al. (1998) utilizaram dados do sensor MISR para estimar valores de Índice de Área Foliar e Fração da Radiação Fotossinteticamente Ativa Absorvida, enquanto Leroy e Bréon (1996) usaram dados gerados pelo sensor *POLarization and Directionality of Earth Reflectances* (POLDER). Kennedy et al. (1997) e Lobell et al. (2002) usaram dados do sensor hiperespectral *Airborne Visible Infrared Imaging Spectrometer* (AVIRIS). Rahman et al. (1993b) analisaram dados do AVHRR/NOAA. Outros pesquisadores, por outro lado, utilizaram dados de campo ou de laboratório. Sandmeier (2000), Middleton (1991) e Martonchik (1994) são alguns autores que conduziram pesquisas de campo, com o uso de espectrômetros associados a dispositivos que lhes permitiu variar de forma controlada e rápida a geometria de visada de um único alvo. Pinty et al. (1990), por outro lado, utilizaram dados de laboratório em seu trabalho de inversão e validação de um modelo de reflectância bidirecional.

Kimes et al. (1984), em seu estudo sobre os melhores ângulos de visada para uso em missões de sensoriamento remoto, apresentaram duas diferentes estratégias de planejamento de missão. A primeira estratégia visou utilizar a visada fora do nadir para

reduzir o tempo de revisita de cena, como é feito com a câmera HRV do SPOT. A segunda estratégia procurou utilizar esta visada para aumentar o conhecimento adquirido a respeito de um determinado alvo. De acordo com estes autores, os melhores ângulos azimutais de visada para extrair o máximo de informações das feições na superfície da Terra estariam próximos ao plano principal do Sol. Dentro deste intervalo de azimute algumas variações na resposta espectral do alvo são maximizadas, permitindo realizar inferências a respeito da natureza física da cena.

Kimes et al. (1984) analisaram também a resposta espectral nas bandas do visível e do infravermelho próximo para a reflectância de superfície e para a reflectância aparente de topo de atmosfera simulada, conforme a variação do ângulo zenital de visada dentro de três planos: o plano principal solar, o plano perpendicular e um plano defasado 45° em relação ao plano do Sol. Foram utilizados dados coletados em campo, para três diferentes tipos de superfície: um gramado, um pomar e um solo exposto.

Para o plano principal do Sol, Kimes et al. (1984) mostraram que um pomar, que cobre completamente o solo, apresentou valores mínimos de reflectância de superfície ao nadir, com valores crescentes para a visada fora do nadir, simétricos em relação ao retroespalhamento e ao espalhamento frontal. O solo exposto apresentou um forte acréscimo na reflectância no sentido do retroespalhamento, o que acabou influenciando o comportamento de um gramado que, apresentando uma cobertura esparsa da superfície, foi espectralmente dominado pelo solo (Figura 2.1).

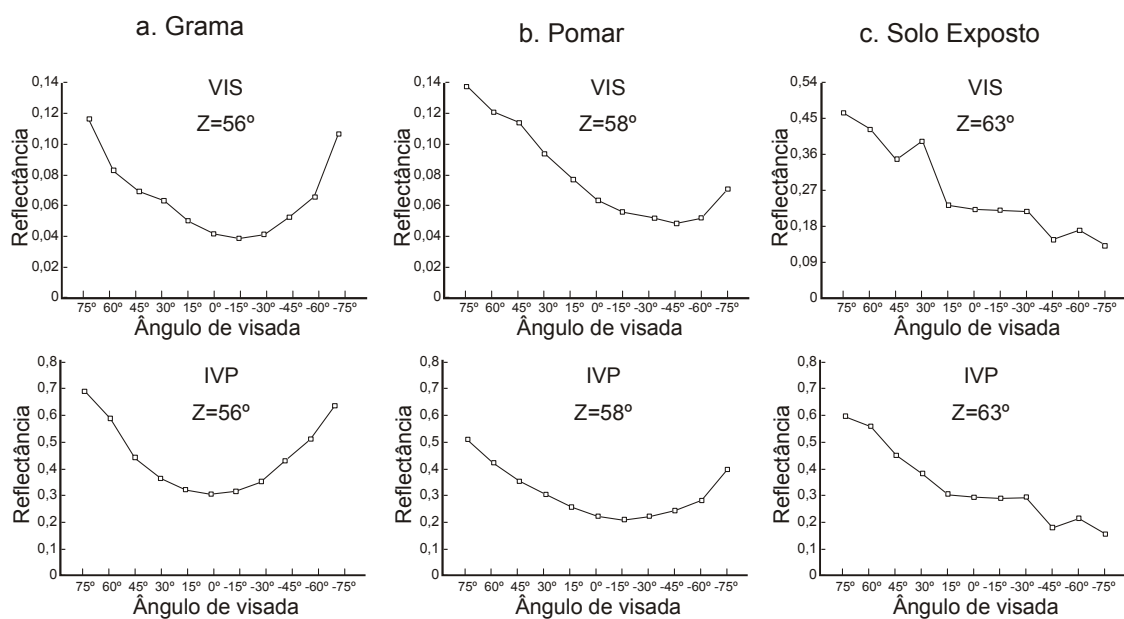


FIGURA 2.1 – Perfis angulares da reflectância de superfície de grama (a), pomar (b) e solo exposto (c), para diferentes valores de ângulo zenital solar (Z) e bandas do visível (VIS) e do infravermelho próximo (IVP), no plano principal do Sol.
 FONTE: Adaptada de Kimes et al. (1984).

Para a reflectância de topo de atmosfera simulada, foi observado que o plano principal do Sol continuou sendo o mais sensível às alterações no ângulo zenital de visada, para ambas as bandas espectrais (Figura 2.2). As bandas do visível foram mais influenciadas pela atmosfera, em todos os ângulos de visada, que as bandas do infravermelho próximo, porém o comportamento foi diferente do observado com a reflectância de superfície. Enquanto a reflectância de superfície para a grama se espalhou de forma simétrica ou com maior resposta na direção anti-solar, a reflectância de topo de atmosfera foi dominada pelo espalhamento frontal (Figura 2.2a).

Valores de NDVI gerados no estudo de Kimes et al. (1984), a partir de dados de reflectância de superfície e de reflectância aparente, mostraram que as feições angulares nos perfis das Figuras 2.1 e 2.2 foram minimizadas. De acordo com estes autores, o uso de índices de vegetação dificulta, portanto, a extração de informação relacionada às propriedades angulares do campo de energia refletida pelos alvos que pode surgir a partir da variação da geometria de visada.

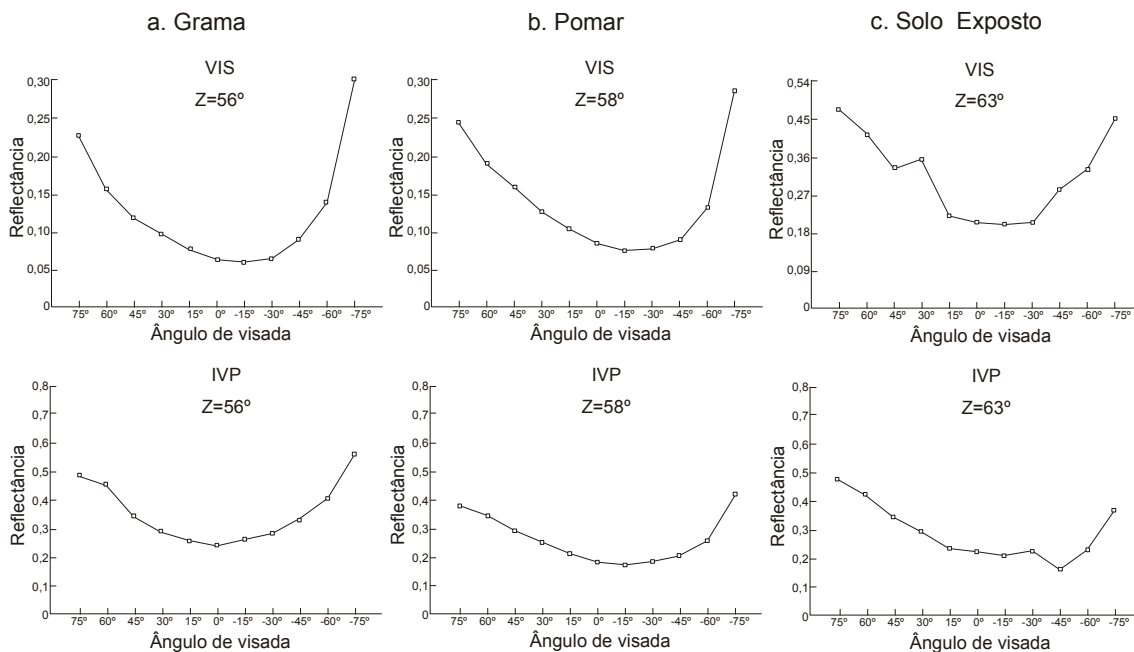


FIGURA 2.2 – Perfis angulares da reflectância aparente (topo de atmosfera) de grama (a), pomar (b) e solo exposto (c), para diferentes valores de ângulo zenital solar (Z) e bandas do visível (VIS) e do infravermelho próximo (IVP).

FONTE: Adaptada de Kimes et al. (1984).

Epiphanyo e Huete (1995), mostraram, a partir de dados de campo, que a variação na resposta espectral das bandas do vermelho e do infravermelho próximo influenciou na variação do valor de NDVI, entre outros índices de vegetação, de uma cultura de alfafa. Diversos fatores podem influir na resposta espectral dessas duas bandas, de forma e intensidade diferentes para cada uma delas. Dentre as situações que podem resultar na variação do NDVI, os autores destacaram o aumento simultâneo da resposta do infravermelho próximo e a redução da resposta do vermelho, que está mais comumente associado ao desenvolvimento da vegetação e à variação do ângulo zenital solar, causando o aumento do NDVI. O aumento da resposta das duas bandas, situação relacionada ao espalhamento atmosférico, pode causar tanto a redução como o aumento do NDVI, dependendo de quanto cada uma das bandas varia em função do tipo de espalhamento.

Desta forma, Epiphanyo e Huete (1995) puderam relacionar a resposta do NDVI às respostas das duas bandas, de forma que no sentido do retroespalhamento (ângulos de visada negativos) houve menos variação do NDVI, visto que a variação das bandas foi

similar. No sentido do espalhamento frontal (ângulos de visada positivos), o valor de NDVI aumentou, o que refletiu os maiores valores observados para a reflectância do infravermelho próximo, em relação aos do vermelho, considerando as amostras de alfafa jovem (Figura 2.3).

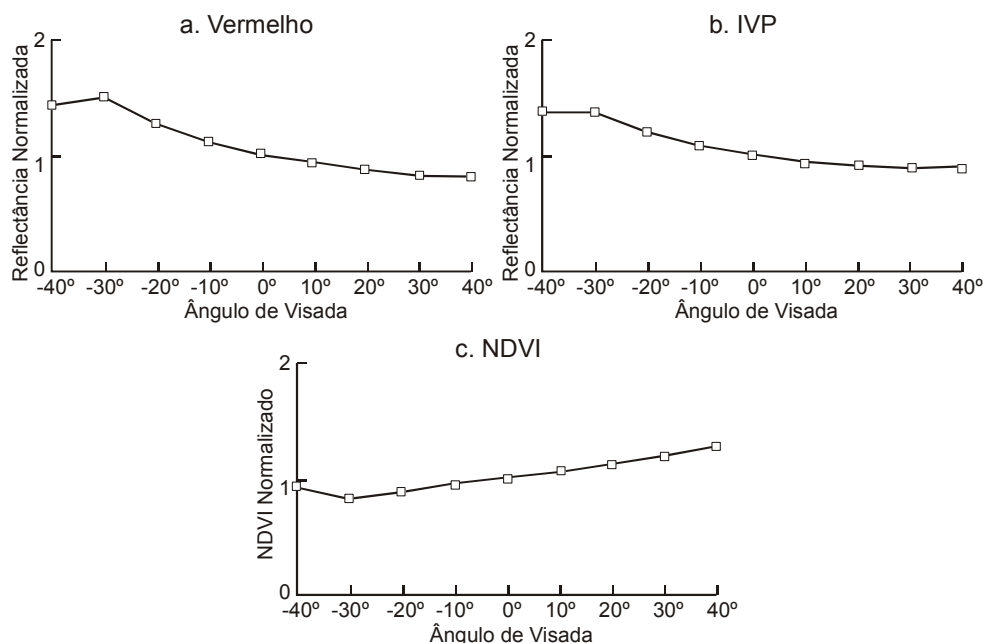


FIGURA 2.3 – Perfis angulares normalizados em relação ao nadir da alfafa, para as bandas do vermelho (a), infravermelho próximo (b) e para o NDVI (c).
 FONTE: Adaptada de Epiphanyo e Huete (1995).

Dados de campo foram utilizados também por Jackson et al. (1990), para estudar o comportamento do fator de reflectância bidirecional (BRF) do trigo. A análise do trigo envolveu a variação da resposta espectral em função dos ângulos zenitais de visada e solar, para as bandas do vermelho e do infravermelho próximo, bem como para a razão entre o vermelho e o infravermelho próximo e para o NDVI. Foram gerados perfis angulares para os ângulos zenitais de visada de -45° (retroespalhamento) a +45° (espalhamento frontal), com intervalos de 5° entre cada coleta, considerando a resposta espectral do sensor *Thematic Mapper / Land Satellite* (TM / Landsat) e do *High Resolution Visible / Satellite pour l'observation de la Terre* (HRV / SPOT).

O trigo apresentou as mesmas tendências espectrais em função da geometria de visada determinada por Epiphanyo e Huete (1995) no estudo da alfafa. Para a banda do

vermelho os valores máximos de reflectância normalizada, em relação ao nadir, foram observados na direção anti-solar (ângulos de visada negativos), no ângulo zenital de visada de 45°, onde a resposta foi até quatro vezes maior que a resposta no nadir. No sentido do espalhamento frontal (ângulos de visada positivos), o trigo apresentou, para ângulos zenitais de visada entre 0 e 30°, valores relativos abaixo de 1. Um valor mínimo de reflectância normalizada foi observado em torno de 20° de ângulo zenital de visada, no sentido do espalhamento frontal (Figura 2.4). A principal causa do comportamento observado, apontada por Jackson et al. (1990), foi o sombreamento mútuo que varia em função da geometria de visada.

A resposta espectral no infravermelho próximo em função da geometria de visada apresentou um comportamento diferente do observado para a banda do vermelho. Os valores de reflectância normalizados em relação ao nadir foram todos maiores que um, isto é, maiores que a resposta observada no nadir. A curva foi praticamente simétrica, com amplitude máxima 1,7 vezes maior que o valor no nadir. De maneira geral, as respostas foram menores, para ambas as bandas espectrais, com a diminuição do ângulo zenital solar (Figura 2.4). Esse comportamento simétrico, quando comparado com o comportamento da banda do vermelho deveu-se, em parte, à menor influência da sombra na resposta do trigo no infravermelho próximo.

Além de analisar a resposta espectral nas bandas do vermelho e do infravermelho próximo, Jackson et al. (1990) geraram também valores de NDVI. Os perfis angulares obtidos mostraram que o NDVI pode, na verdade, contrariando outros autores, aumentar os efeitos direcionais de ângulo zenital do Sol e de visada. O ângulo zenital solar apresentou grande influência sobre o formato da curva do perfil angular do NDVI. De maneira geral, maiores ângulos zenitais do Sol resultaram em curvas com valores de NDVI que aumentaram do sentido do retroespalhamento para o do espalhamento frontal. Ângulos menores resultaram em curvas que aumentaram seus valores de NDVI do nadir para os ângulos extremos, nos dois sentidos. Em qualquer ângulo solar, entretanto, entre -20° e -15° de ângulo zenital de visada (direção anti-solar) foi observado que existe, aparentemente, uma independência do NDVI em relação à posição do Sol, além de apresentar pouca variação angular (Figura 2.4).

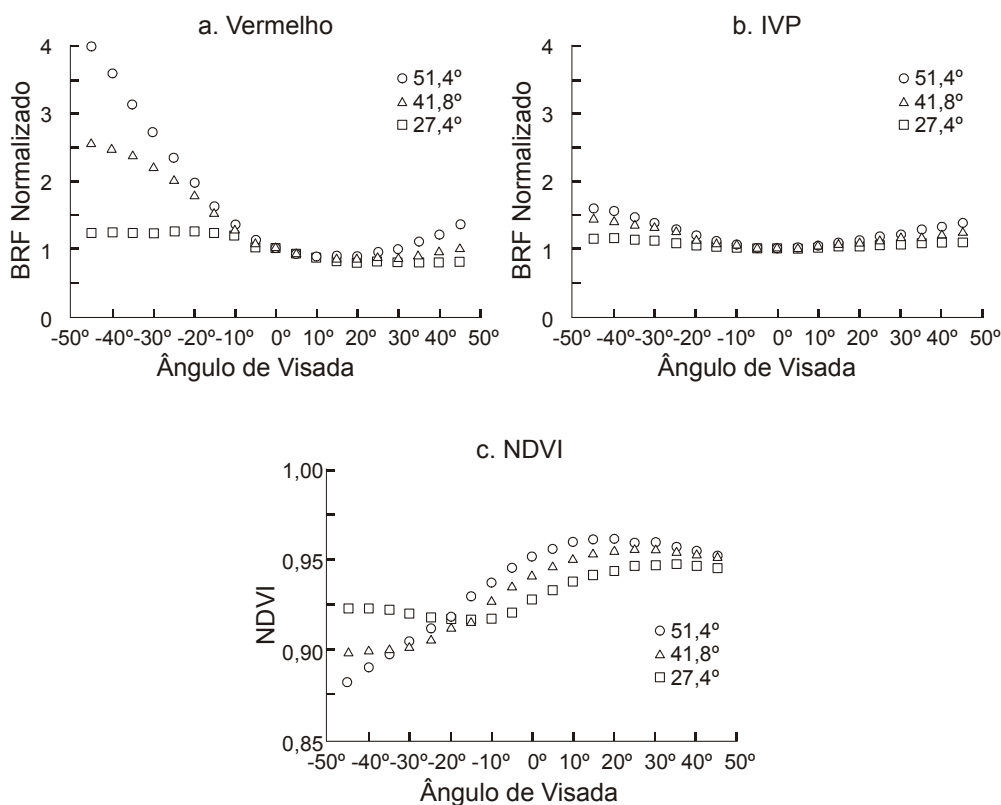


FIGURA 2.4 – Perfis angulares do trigo, normalizados em relação ao nadir, para a reflectância das bandas do vermelho (a), infravermelho próximo (b) e para o NDVI (c), considerados diferentes valores de ângulo zenital solar.

FONTE: Jackson et al. (1990).

Qi et al. (1995) mostraram que o cálculo do albedo a partir da modelagem da reflectância de superfície permite a geração de valores de NDVI que não são influenciados pelos efeitos direcionais da superfície. Foram utilizados um modelo de função de distribuição de reflectância bidirecional (BRDF) semiempírico e um algoritmo de integração para gerar os valores de albedo. Dados do sensor orbital HRV/SPOT, do sensor aerotransportado *Advanced Solid-state Array Spectroradiometer* (ASAS) e do radiômetro Exotech, também aerotransportado, foram usados na investigação. Os dados dessas duas últimas fontes foram reamostrados espectralmente para se adequarem aos dados do SPOT. Os dados do sensor ASAS foram utilizados na inversão do modelo de BRDF.

A análise dos dados SPOT, contudo, é de mais interesse a este trabalho, na medida em que permite observar a dependência do NDVI à geometria de iluminação e de visada. O

NDVI baseado na reflectância, como foi chamado em contrapartida ao NDVI baseado no albedo calculado a partir dos dados modelados, apresentou comportamento distinto para cada um dos quatro tipos de cobertura pesquisados por Qi et al. (1995). Os tipos de cobertura foram: solo exposto, um campo de alfafa colhida, uma plantação de um tipo de noz, com cobertura de 60 a 80 % do solo e um campo de algodão, com cobertura total do solo.

O solo exposto e o campo de alfafa apresentaram comportamento semelhante, uma vez que ambos representavam uma superfície plana com pouca ou nenhuma vegetação. Foi possível observar, a despeito da ausência de vegetação nos dois alvos, a variação na sua resposta espectral em função do ângulo de visada. As variações angulares na resposta espectral da plantação de nozes foram consideradas com sendo devidas ao sombreamento mútuo de folhas e troncos. O campo de algodão também apresentou grandes variações em sua resposta espectral, principalmente nos maiores comprimentos de onda.

Os valores de NDVI foram extraídos tanto dos dados do SPOT como dos dados do sensor ASAS. Em relação aos ângulos de visada utilizados, os dados do sensor ASAS foram coletados tanto dentro do plano solar como no plano ortogonal a ele. Os dados SPOT utilizados estavam praticamente no plano ortogonal ao plano solar, devido ao uso da visada lateral do sensor. Os perfis angulares do NDVI que estavam fora do plano solar apresentaram menos variações que os extraídos no plano solar. A explicação apresentada por Qi et al. (1995) foi que no plano ortogonal o sombreamento é simétrico, enquanto no plano solar as feições da cobertura são mais aparentes. A conclusão final de Qi et al. (1995) foi que o uso do NDVI baseado no fator de reflectância bidirecional apresentava muitas variações não controladas, o que impedia seu uso para o acompanhamento de fenômenos temporais, enquanto o NDVI baseado no albedo espectral minimizou os efeitos direcionais da superfície.

Holben e Fraser (1984) estudaram a resposta dos sensores AVHRR a bordo dos satélites NOAA 6, 7 e 8 na visada fora do nadir. A partir de modelos de superfície e atmosfera, eles estudaram a variação da radiância da atmosfera pura e de alguns tipos de cobertura, como água, solo exposto e três diferentes níveis de biomassa de alfafa, em função do

ângulo de visada em uma linha de varredura do sensor. Com uma largura de campo de visada da ordem de 53° , o AVHRR é capaz de imagear uma faixa da superfície da Terra de 2700 quilômetros, o que equivale a uma cobertura diária de toda a superfície terrestre.

O estudo da influência da atmosfera permitiu dimensionar a variação da resposta do sensor em função do ângulo de visada, para cinco diferentes tipos de atmosfera de latitudes médias. Foram gerados modelos atmosféricos que incluíam somente espalhamento molecular até a presença de gases diversos, vapor d'água e outros aerossóis. Segundo Holben e Fraser (1984), a influência da atmosfera foi mínima ao nadir, aumentando com o aumento da espessura óptica da atmosfera e mantendo um comportamento simétrico para o visível e uma leve assimetria para o infravermelho próximo. Foi observado que os valores máximos de NDVI ocorreram na direção do espalhamento frontal, próximo ao nadir.

O estudo com os três tipos de cobertura vegetal permitiu estabelecer os limites de separabilidade entre eles, em função do ângulo de visada, a partir do NDVI. A condição de não separabilidade entre os tipos de vegetação ocorreu principalmente em função das diferentes cargas de aerossóis simuladas utilizadas no estudo. De maneira geral, o perfil angular do NDVI tende a ser mais côncavo conforme aumenta a biomassa da vegetação. O formato da curva também é semelhante para todos níveis de biomassa e cargas de aerossóis, apresentando valor mínimo no ângulo de retroespalhamento extremo, alcançando valor máximo no sentido do espalhamento frontal, próximo ao nadir, voltando a reduzir seu valor até o outro extremo da curva (Figura 2.5).

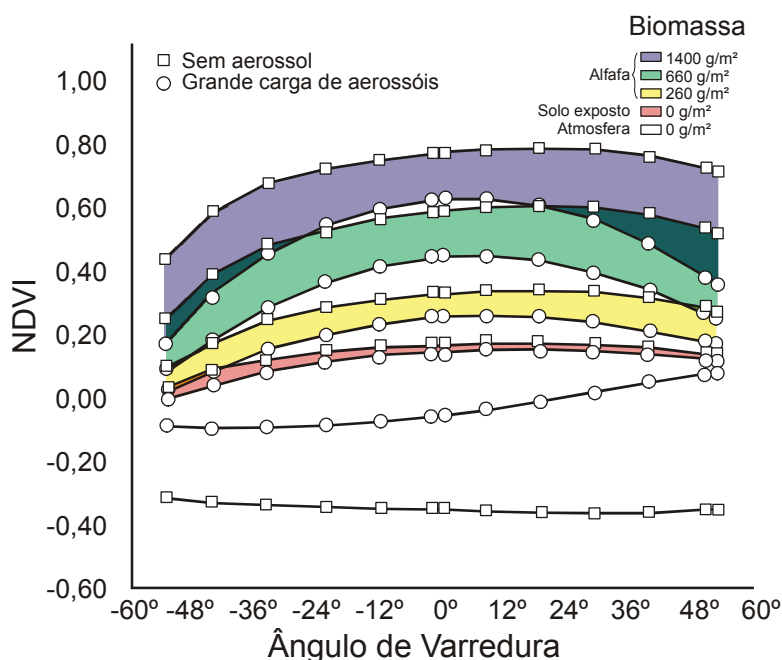


FIGURA 2.5 – Perfis angulares do NDVI para três níveis de biomassa de alfafa e solo exposto, em função da carga de aerossóis.
 FONTE: Holben e Fraser (1984).

Martonchik et al. (1998), em seu artigo sobre a determinação de propriedades reflectivas, radiativas e biofísicas de terra e oceano utilizando imageamento multiangular, abordaram os conceitos dos produtos baseados em reflectância gerados a partir de dados MISR. Os autores discutiram os algoritmos utilizados para gerar estes produtos, seus níveis de precisão para alguns tipos de cobertura, apresentando alguns perfis angulares de interesse. Foram gerados valores de *Hemispherical-Directional Reflectance Factor* (HDRF) e *Bi-Hemispherical Reflectance* (BHR) para onze diferentes tipos de cobertura, incluindo solo exposto, dois tipos de grama, dois estágios de trigo, dois tipos de floresta e alguns tipos de culturas. Em seguida foi medida a eficiência dos modelos em simular os valores observados. Para o HDRF foi utilizado o desvio médio, em que é somado o módulo da diferença entre o HDRF calculado e o medido em campo para as nove câmeras e calculada a média entre esses valores. Para o BHR foi utilizado o erro diretamente, calculado a partir da diferença entre os valores de albedo espectral calculado e o real, gerado a partir dos dados de campo. Foi utilizado um modelo

atmosférico equivalente ao encontrado nas condições reais de coleta dos dados de campo.

Martonchik et al. (1998) observaram que os valores de desvio médio eram diretamente proporcionais aos níveis de reflectância dos alvos. Observaram também que os valores de eficiência dos algoritmos eram pouco dependentes do ângulo relativo azimutal entre a visada e o Sol, sendo o maior erro encontrado para ângulos próximos a 90°. Após estabelecer essas grandezas para cada tipo de cobertura, foram gerados novos valores a partir de diferentes modelos atmosféricos, de forma a dimensionar a alteração na confiabilidade dos algoritmos utilizados e fornecer subsídios para a escolha do tipo de modelo que, apesar de impreciso, insira menos erro nos valores gerados.

Outra análise que foi feita por Martonchik et al. (1998) foi sobre a diferença entre os parâmetros HDRF e BRF e entre os valores gerados pelos modelos e os medidos em campo, para as onze classes de cobertura consideradas no trabalho. A conclusão a que chegaram foi de que a diferença entre os dois parâmetros aumenta com o aumento do ângulo zenital de visada, em função do aumento da espessura óptica. Foi observado também que essa razão aumenta com o aumento do ângulo zenital solar. Quando foram comparados valores medidos e valores modelados, foi possível observar que o HDRF é muito mais confiável que o BRF, ainda que os valores de BRF sejam bastante confiáveis.

2.2 - Descrição do Sensor

O MISR está instalado a bordo do satélite TERRA, lançado em 18 de Dezembro de 1999. Este satélite encontra-se em uma órbita igual ao do Landsat 7, apenas defasado alguns minutos em relação à hora de passagem. Ambas as plataformas fazem parte de um grande empreendimento, o *Earth Science Enterprise* (ESE), que engloba vários outros satélites e um extenso programa de pesquisas, com o objetivo de conhecer melhor o planeta Terra, bem como as dinâmicas que envolvem os diversos processos físicos que ocorrem na superfície. Outros detalhes sobre o ESE e sobre o satélite TERRA podem ser obtidos no Apêndice A.

Um dos sensores instalados a bordo do satélite TERRA e que foi a fonte de dados de toda esta pesquisa é o MISR. Este sensor apresenta a característica única de observar a Terra de nove ângulos de visada diferentes, com nove câmeras que variam de 70,5° à frente até 70,5° para trás, em relação ao nadir, da vertical no ponto de onde está sendo capturada a radiação eletromagnética (vide Tabela 2.1 e Figuras 2.6 e 2.7). Cada câmera é capaz de gerar imagens em quatro bandas espectrais, conforme pode ser visto na Tabela 2.2, de forma que cada ponto da superfície da Terra que for imageado será visto 36 vezes.

A resolução espacial é de 250m para a câmera a nadir e de 275m para as câmeras fora do nadir, sendo possível programar o computador de bordo para aglomerar os pixels em arranjos de 2x2, 4x4, 1x4 e 1x1 (linhas x colunas) (Tabela 2.3). Martonchik et al. (1998) apresentaram a razão pela qual os produtos MISR são gerados com 1100 metros de resolução espacial, uma vez que a melhor resolução que o sensor pode fornecer dados é de 275 metros. Segundo Martonchik et al. (1998), o projeto das câmeras do MISR tem como vantagem o fato de que a resolução espacial no sentido *cross-track* (275 metros) é praticamente constante para as nove câmeras. No sentido *along-track*, entretanto, a resolução pode variar de 236 metros (duas câmeras A mais próximas ao nadir com ângulo de visada de 26,1°) até 707 metros (câmeras extremas D com 70,5°). Ao fazer a reamostragem para 1100 metros, criando sub-regiões de 4 por 4 pixels, essa diferença é reduzida para 17% entre as câmeras D e as A. Essa diferença é considerada insignificante em todo o processo de geração de produtos.

TABELA 2.1 – Geometria das câmeras do MISR.

Câmera	Sentido	Ângulo de visada especificado	Ângulo de visada produzido	Distância focal (mm)
Df	Frente	70,5°	70,3°	123,67
Cf	Frente	60°	60,2°	95,34
Bf	Frente	45,6°	45,7°	73,03
Af	Frente	26,1°	26,2°	58,90
An	Nadir	0°	0,1°	58,94
Aa	Trás	26,1°	26,2°	59,03
Ba	Trás	45,6°	45,7°	73,00
Ca	Trás	60°	60,2°	95,33
Da	Trás	70,5°	70,6°	123,66

FONTE: Adaptada de Diner et al. (1998, p. 1076).

TABELA 2.2 – Bandas espectrais do MISR.

Número da banda	Comprimento de onda central	Largura de banda
1 – azul	446,4 nm	41,9 nm
2 – verde	557,5 nm	28,6 nm
3 – vermelho	671,7 nm	21,9 nm
4 – infravermelho próximo	866,4 nm	39,7 nm

FONTE: Adaptada de Diner et al. (1998, p. 1076).

TABELA 2.3 – Modos de operação x resolução espacial.

Modo de Operação	Arranjo de Pixels	Resolução Espacial (metros)
Global	4 X 4	1100 X 1100
Local	4 X 1	1100 X 275
Local	2 X 2	550 X 550
Local	1 X 1	275 X 275

FONTE: Diner et al. (1998, p. 1077).

Os detectores utilizados são matrizes lineares de *Charge-Coupled Device* (CCD), cada uma com 1520 elementos, sendo que apenas 1504 são efetivamente utilizados para gerar imagens. Cada detector na matriz mede 21 μm (*cross-track*) por 18 μm (*along-track*). A distância entre as matrizes dentro de uma câmera é de 160 μm (Diner et al., 1998), fazendo com que as bandas de uma mesma câmera estejam defasadas espacialmente, como pode ser visto na Figura 2.6. O registro entre bandas e entre visadas é feito durante os processamentos em solo. A radiação capturada pelo sensor é quantizada em 14 níveis digitais, sendo codificada através da raiz quadrada do sinal em 12 bits através

de uma tabela de conversão de valores. Esta técnica minimiza erros de quantização com sinais mais fracos, às custas de maiores erros nos números digitais maiores (Diner et al., 1998).

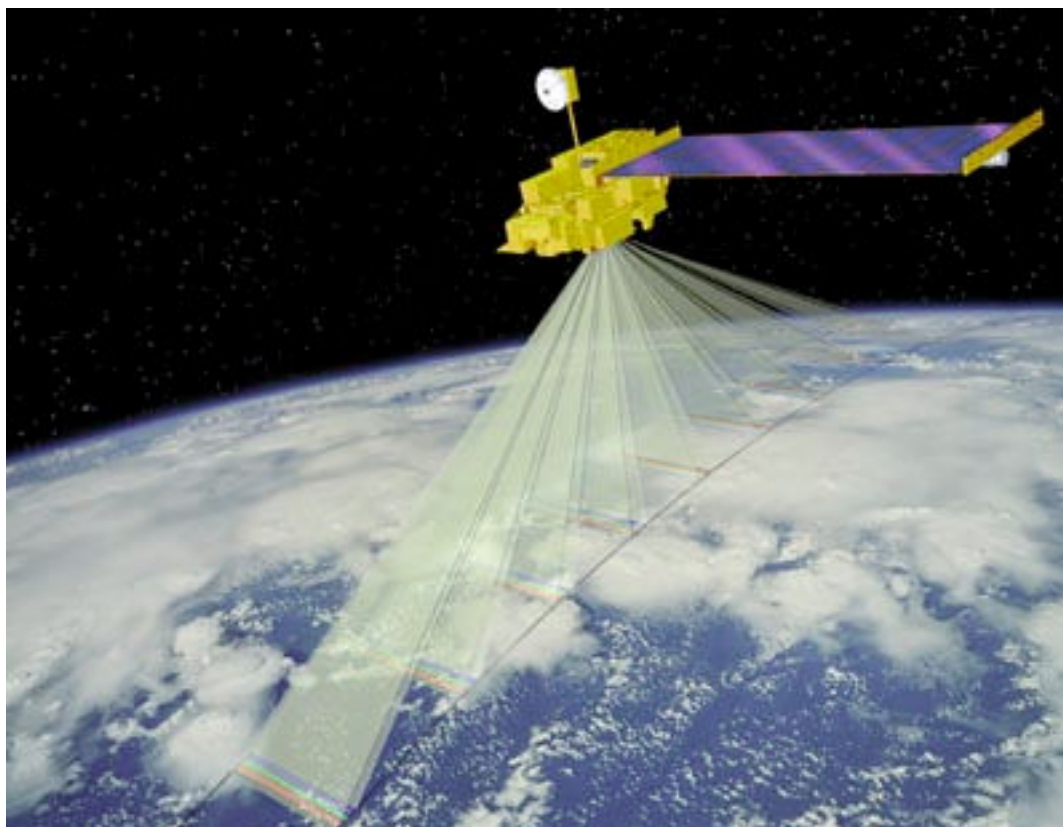


FIGURA 2.6 – MISR e o direcionamento das câmeras e bandas.

FONTE: Jet Propulsion Laboratory – JPL (2001b - JPL image P-49081).

A temperatura de todas as matrizes CCD é controlada através de refrigeradores termoelétricos (*Thermo-Electric Cooler – TEC*), instalados no plano focal de cada matriz, que as mantêm a -5°C , otimizando o balanço entre a corrente de fundo e a sensibilidade à radiação. A calibração de bordo dos detectores do MISR é feita através de dois painéis extensíveis, cobertos com Spectralon, e de diodos e fotodiodos. Os painéis, quando não estão em uso ficam retraídos e seguros, sendo utilizados aproximadamente a cada mês. Quando o satélite está sobre o pólo norte, o painel traseiro se estende, refletindo a luz do Sol diretamente nos campos de visada das câmeras à frente e ao nadir. Quando o satélite está sobre o pólo sul, o painel dianteiro é

utilizado para calibrar as câmeras viradas para trás, bem como a câmera ao nadir, que é utilizada para calibração cruzada. Os diodos e fotodiodos são utilizados para estabelecer uma escala radiométrica sobre a qual é feita a calibração dos detectores, definindo a resposta de cada detector em função da radiação incidente.



FIGURA 2.7 – Concepção artística do MISR em corte. Os cilindros amarelos são as extremidades das câmeras.

FONTE: Jet Propulsion Laboratory – JPL (2001b - JPL image P-44988).

2.3 - Algoritmos de Geração de Produtos

Os dados MISR utilizados neste trabalho foram gerados pelo *EOS Data and Information System* (EOSDIS), que é o órgão do *Earth Observing System* (EOS) responsável pela aplicação dos algoritmos desenvolvidos para o processamento dos dados do EOS, bem como seu arquivamento e distribuição. O formato de dados utilizado para a distribuição dos dados do MISR foi o *Hierarchical Data Format* (HDF). Uma discussão mais detalhada sobre esses assuntos, bem como sobre a

calibração dos dados do MISR e sobre os algoritmos utilizados na geração dos diversos produtos pode ser vista no Apêndice B.

A radiância capturada pelas câmeras do MISR é quantificada em 14 bits, sendo transformada para 12 bits através do uso de uma tabela de conversão de valores, o que diminui os requisitos de largura de banda para transmissão dos dados para as estações de recepção, na superfície. Esses dados são então corrigidos para os erros de sistema, sendo projetados conforme a projeção Espaço Oblíqua de Mercator e condicionados em blocos. Uma órbita completa do MISR possui 180 blocos, de forma que é possível dizer que cada bloco mede aproximadamente um grau no sentido *along-track*. Esse é o produto de nível 1B2 (vide Apêndice B).

O nível 2 de produtos do MISR consiste de três tipos de produto, que são os parâmetros de aerossóis, parâmetros da superfície e estereoscopia de topo de atmosfera e de nuvens. Os conjuntos de dados de aerossóis e de superfície são gerados em conjunto, produzindo três arquivos diferentes com os parâmetros de aerossóis, de terras emersas e de oceanos. O produto de superfície/aerossol consiste dos seguintes parâmetros: fator de reflectância hemisférico-direcional (HDRF), reflectância bihemisférica (BHR), fator de reflectância bidirecional (BRF), parâmetros do modelo de reflectância bidirecional, reflectância hemisférico-direcional (DHR), dados atmosféricos auxiliares, índice de área foliar (LAI), fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida (FPAR), reflectância equivalente da água, concentração de pigmentos de fitoplâncton e índices de qualidade de geração de parâmetros. Neste trabalho serão utilizados apenas os parâmetros de superfície que representem valores de reflectância. Portanto, será abordada a geração específica desses produtos.

Os dois primeiros parâmetros da superfície a serem calculados pelo algoritmo são o fator de reflectância hemisférico-direcional (*Hemispherical-Directional Reflectance Factor* – HDRF) e a reflectância bihemisférica (*Bihemispherical Reflectance* – BHR), que incluem os efeitos da iluminação direta do Sol e difusa da atmosfera na superfície, ou iluminação ambiente. O HDRF é igual a radiância que deixa uma superfície dividida pela radiância de uma superfície refletora isotrópica iluminada sob as mesmas condições, e é essencialmente a medida da radiância que deixa a superfície nos nove

ângulos de visada e nos quatro comprimentos de onda ou bandas do MISR para a geometria de iluminação específica encontrada no momento do imageamento. A BHR é igual a exitância radiante dividida pela irradiância sob iluminação ambiente.

A resposta espectral da superfície isotrópica hipotética deve ser considerada como se ela fosse iluminada sob as mesmas condições atmosféricas que a cena imageada. Portanto deve-se empregar um modelo de transferência radiativa para entender e simular a influência da atmosfera na iluminação da cena. O modelo de transferência radiativa utilizado no tratamento dos dados do MISR é unidimensional. A escolha por este tipo de modelo deve-se ao fato de que o erro introduzido por ele é da mesma magnitude que o erro inserido pelos modelos de aerossol empregados, considerando a resolução utilizada na geração dos produtos do MISR, que é de 1,1 km ou 17,6 km.

O modelo atmosférico empregado utiliza seis parâmetros que são dependentes dos componentes dos modelos de mistura de aerossóis selecionados, a saber: a espessura óptica τ , a reflectância equivalente correspondente à radiância de trajetória atmosférica ρ^{atm} , a transmitância difusa ascendente T , a transmitância difusa ascendente integrada angularmente t , o albedo bihemisférico de superfície para radiação incidente isotrópica s e a irradiância difusa normalizada de uma superfície escura e_b^{diff} . Os modelos de aerossol utilizados consideram a existência de apenas um tipo de partícula pura, mas podem ser misturados até três tipos de partículas puras no processo de simulação da distribuição dos aerossóis existentes na atmosfera, na seleção das misturas que resultem no melhor ajuste do modelo aos dados observados.

Para reduzir os erros inerentes aos diversos modelos de aerossóis empregados, é utilizada a média dos parâmetros atmosféricos conseguidos com o uso das misturas de aerossóis que apresentaram os melhores ajustes, em regiões de 17,6 por 17,6 km, ou 16 por 16 pixels. Desta forma, consegue-se a estimativa do HDRF e do BHR que apresenta o menor desvio padrão estimado baseado apenas nos resultados dos modelos de aerossol, pois não é utilizada nenhuma informação adicional para selecionar um dos modelos de aerossol. Desta forma, o HDRF é calculado através da seguinte fórmula:

$$r_{\lambda}(-\mu, \mu_0, \phi - \phi_0) = q_{\lambda}(-\mu, \mu_0) \cdot \rho_{\lambda}(-\mu, \mu_0, \phi - \phi_0) - \mu_{\lambda}(-\mu, \mu_0, \phi - \phi_0), \quad (\text{eq. 2.1})$$

onde r_{λ} é o HDRF para radiação incidente não-isotrópica, q_{λ} e μ_{λ} são os fatores atmosféricos que expressam, respectivamente, o espalhamento e a extinção radiativa do modelo atmosférico, ρ_{λ} é a reflectância equivalente de topo de atmosfera, $-\mu$ é o cosseno do ângulo de visada da câmera do MISR utilizada, μ_0 é o cosseno do ângulo de elevação solar e $\phi - \phi_0$ é o cosseno do ângulo azimutal de visada em relação ao Sol.

O BHR é calculado através da fórmula:

$$A_{\lambda}^{hem}(\mu_0) = \frac{m_{\lambda}(\mu_0)}{e_{\lambda}(\mu_0)}, \quad (2.2)$$

onde $A_{\lambda}^{hem}(\mu_0)$ é a reflectância bihemisférica para radiação incidente não-isotrópica, ou BHR, $m_{\lambda}(\mu_0)$ é a radiância exitante na superfície, $e_{\lambda}(\mu_0)$ é a irradiância na superfície, e μ_0 é o ângulo de elevação solar.

Os dois parâmetros vistos acima consideram que a cena imageada é iluminada tanto pela luz direta do Sol como pela radiação que é espalhada pela atmosfera. Quando não se leva em conta a interação da radiação que ilumina a cena com a atmosfera, tanto no sentido de reduzir a radiação incidente por atenuação, como no sentido da radiação adicionada à radiação incidente devido ao espalhamento múltiplo, o HDRF dá origem ao fator de reflectância bidirecional (*Bidirectional Reflectance Factor* - BRF) e o BHR à reflectância direcional-hemisférica (*Directional Hemispherical Reflectance* - DHR). Para que seja possível remover os efeitos do espalhamento atmosférico múltiplo faz-se necessário modelar a distribuição da reflectância bidirecional da superfície através da aplicação de um modelo paramétrico de superfície, a Função de Distribuição da Reflectância Bidirecional (*Bidirectional Reflectance Distribution Function* - BRDF), que permite estimar as propriedades angulares da reflectância de superfície e estender a abrangência geométrica do BRF e do DHR para incluir outros ângulos de visada e do Sol não coberto pelas observações do MISR.

Existem vários modelos de BRDF, alguns com 2 a 3 parâmetros e outros com 10 ou mais. Esses últimos modelos necessitam de dados superpostos de diversas passagens do

satélite, com diferentes geometrias de iluminação e visada, e até mesmo de dados de outros sensores, como o MODIS. O modelo selecionado para o processamento dos dados do MISR pelo EOSDIS possui três parâmetros, e pode ser computado a partir dos valores de HDRF calculados a partir de uma única passagem do satélite. O valor de BRDF é igual a $1/\pi$ do valor de BRF e, exceto este fator, uma vez que os dois parâmetros são essencialmente descrições idênticas das propriedades de espalhamento de uma superfície, pode-se usar um no lugar do outro. Desta forma, o algoritmo de modelagem da superfície empregado com os dados do MISR é traçado em termos de BRF.

O cálculo do valor de BRF, e a partir dele o de DHR, é realizado em um processo iterativo que tenta ajustar o valor do HDRF calculado a um valor de HDRF computado a partir da modelagem do BRF. A primeira das interações iguala o valor do BRF ao do HDRF, e a última é aquela onde é mínimo o quadrado dos resíduos da subtração dos logaritmos naturais do HDRF calculado na penúltima interação e do HDRF modelado na última interação.

A melhor estimativa do BRF computada a partir do HDRF calculado no algoritmo anteriormente apresentado, $r_{best,x,y}(-\mu, \mu_0, \phi - \phi_0)$, segue a seguinte fórmula:

$$\begin{aligned}
R_{best,x,y}^{(n+1)}(-\mu, \mu_0, \phi - \phi_0) &= \frac{\mu_0 e^{-\tau/\mu_0} + e_b^{diff}(\mu_0)}{[1 - A_{x,y}^{hem}(\mu_0) \cdot s] \cdot \mu_0 e^{-\tau/\mu_0}} \cdot r_{best,x,y}(-\mu, \mu_0, \phi - \phi_0) \\
&- \frac{2\pi}{e^{-\tau/\mu_0}} \cdot \int_0^1 R_{model}^{0(n)}(-\mu, \mu') T_0(-\mu_0, -\mu') d\mu' \\
&- \frac{\pi \cdot \cos(\phi - \phi_0)}{e^{-\tau/\mu_0}} \cdot \int_0^1 R_{model}^{1(n)}(-\mu, \mu') T_1(-\mu_0, -\mu') d\mu' \\
&- \frac{A_{x,y}^{hem}(\mu_0) \cdot s \cdot [\mu_0 e^{-\tau/\mu_0} + e_b^{diff}(\mu_0)]}{[1 - A_{x,y}^{hem}(\mu_0) \cdot s] \cdot \mu_0 e^{-\tau/\mu_0}} \cdot 2 \int_0^1 R_{model}^{0(n)}(-\mu, \mu') \mu' d\mu', \quad (2.3)
\end{aligned}$$

onde $R_{best,x,y}^{(n+1)}(-\mu, \mu_0, \phi - \phi_0)$ é a melhor estimativa do BRF, o primeiro termo à direita do sinal de igual é a radiância exitante, considerando a superfície recebendo iluminação direta e difusa, o segundo e o terceiro referem-se à radiação espalhada pela atmosfera,

sem interagir com a superfície. O segundo termo contém a parcela desse espalhamento sem variação azimutal, enquanto o terceiro considera o ângulo azimutal entre o sensor e o Sol, e o quarto termo diz respeito à radiação espalhada após múltiplas reflexões entre a atmosfera e a superfície.

O valor de DHR é conseguido a partir da seguinte fórmula:

$$A_{best,x,y}^{dir}(\mu_0) = 2 \int_0^1 R_{0,x,y}^{(N)}(-\mu, \mu_0) \mu d\mu, \quad (2.4)$$

onde $A_{best,x,y}^{dir}(\mu_0)$ é o DHR e $R_{0,x,y}^{(N)}(-\mu, \mu_0)$ é o BRF, interpolado para abranger todos os ângulos azimutais de visada.

Os fatores R_0 e R_1 existentes na equação que é usada no cálculo do BRF estão relacionados ao modelo de BRF utilizado para explicar o comportamento angular da reflectância da superfície. Esta relação é expressa pelas expressões

$$R_{0,model}^{(n)}(-\mu, \mu') = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} R_{model}^{(n)}(-\mu, \mu', \phi - \phi') d\phi' \quad e \quad (2.5)$$

$$R_{1,model}^{(n)}(-\mu, \mu') \cos(\phi - \phi_0) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} R_{model}^{(n)}(-\mu, \mu', \phi - \phi') \cos(\phi' - \phi_0) d\phi', \quad (2.6)$$

onde $R_{model}^{(n)}(-\mu, \mu', \phi - \phi')$ é a expressão na n -ésima interação do modelo de BRF, conforme apresentado por Rahman et al. (1993b), e calculado pela expressão

$$R_{model}(-\mu, \mu_0, \phi - \phi_0) = r_0 \cdot \frac{\mu^{k-1} \cdot \mu_0^{k-1}}{(\mu + \mu_0)^{1-k}} \cdot \exp[b \cdot p(\Omega)] \cdot h(-\mu, \mu_0, \phi - \phi_0), \quad (2.7)$$

onde r_0 , k e b são três parâmetros livres, h é um fator que leva em conta o ponto de brilho referente à reflexão especular, dependendo da geometria de iluminação e visada e do fator r_0 , e a função p é dependente apenas do ângulo Ω entre a radiação incidente e refletida.

2.4 - Técnicas MNF, PPI, Uso do Diagrama de Espalhamento N -Dimensional e a Análise de Mistura Espectral

A transformação conhecida por fração máxima de ruído (*Maximum Noise Fraction – MNF*), proposta por Green et al. (1988) foi apresentada como uma alternativa à transformação por principais componentes (PC). A transformação por PC reduz a dimensionalidade dos dados e elimina a correlação entre as bandas espectrais transformadas da imagem, concentrando mais informação nas primeiras componentes. O problema com a PC é que ela ordena suas componentes pela variância, mas não necessariamente pela qualidade da imagem. A transformação MNF, por outro lado, procura organizar as imagens de forma a maximizar a razão sinal/ruído, que é uma medida comum de qualidade da imagem. Com esse processamento é possível realizar tratamentos nas componentes mais contaminadas para reduzir o ruído e realizar em seguida a transformação inversa, obtendo os dados originais, porém com o ruído reduzido e com menor perda de informação que outros processamentos.

A qualidade da imagem pode ser expressa tanto pela razão sinal/ruído como pela fração de ruído presente na imagem. A fração de ruído é calculada pela razão entre o ruído e o sinal original. A transformação por PC gera um grupo de auto-vetores e seus autovalores associados. Green et al. (1988) mostraram que os auto-vetores representam a matriz de covariância do ruído e os autovalores a fração de ruído na imagem. A fração de ruído, então, é utilizada para ordenar as componentes da transformada MNF. No caso do trabalho de Green et al. (1988), as componentes foram ordenadas em ordem decrescente de ruído, quer dizer, a primeira componente contém maior ruído que as outras. Os sistemas de processamento de imagens em uso no mercado, entretanto, comumente ordenam as componentes em ordem crescente de ruído, de forma que a última componente é a que apresenta maior ruído. A sigla MNF nesses sistemas significa fração mínima de ruído (*Minimum Noise Fraction – MNF*), e não fração máxima de ruído.

O processamento que gera as imagens *Pixel Purity Index* (PPI), ou imagens-índice de pureza de pixel, foi idealizada, da forma como foi utilizada neste trabalho, por Boardman et al. (1995). Boardman e sua equipe propuseram um processo de análise de

mistura espectral que realiza uma separação parcial da informação espectral existente nos dados de sensoriamento remoto. As proporções aparentes dos membros de referência são mapeadas, considerando a existência de um fundo arbitrário impuro e com comportamento espectral desconhecido. Para a aplicação deste processo é necessário apenas o conhecimento dos perfis espectrais dos materiais que se procura na cena, e não de todos os materiais presentes nela.

O modelo de mistura utilizado sempre gera um valor de proporção a mais que o número de membros de referência selecionados, que se refere ao material de fundo de cena, ou “nenhum membro de referência”. Desta forma, é possível que os membros de referência apresentem proporções significativas com relação à covariância da cena. A Figura 2.8 ilustra o conceito da separação parcial, em uma cena onde existam, por exemplo, cinco materiais que compõem o fundo da cena e, portanto, não são de interesse à investigação individualmente, e dois materiais de interesse. Com a agregação de toda a informação secundária em um único material, o fundo da cena, é possível destacar as proporções dos membros de interesse. O grande desafio está na escolha da projeção apropriada para aumentar a variância entre os materiais de interesse, aglomerando todo o resto e escondendo a variância do fundo.

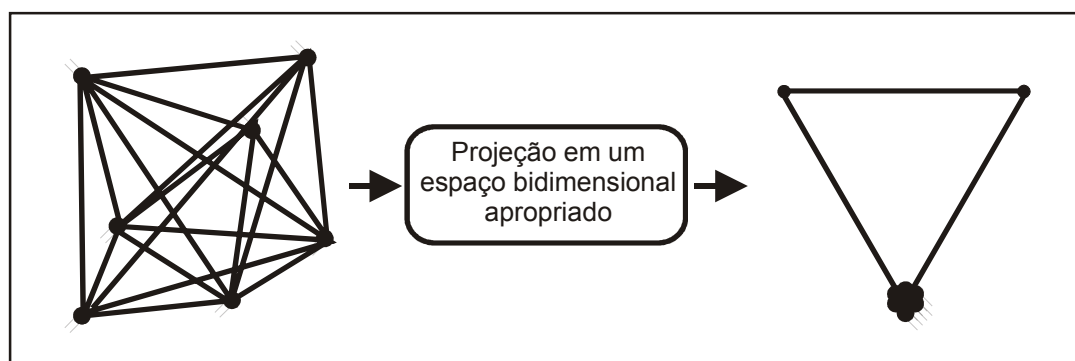


FIGURA 2.8 – Diagrama esquemático da separação espectral parcial através da projeção dos dados.

FONTE: Boardman et al. (1995).

Conforme Boardman et al. (1995), o processamento dos dados segue três passos básicos: transformação dos dados em reflectância de superfície, a determinação da pureza dos dados e a separação espectral parcial. A transformação dos dados de

radiância em reflectância de superfície é obtida através do uso de um modelo de transferência radiativa.

A determinação da pureza dos pixels através da técnica PPI é conseguida através do uso da transformação por fração mínima de ruído, que permite a análise da dimensionalidade dos dados e a redução do ruído. Esse processamento é seguido de uma série de transformações de ajuste, que fazem com que os dados tenham média zero e o ruído não apresente correlação entre bandas e possua variância unitária.

A separação espectral parcial é obtida através da projeção dos dados em vetores unitários aleatórios em um espaço n -dimensional, onde n é o número de bandas espectrais existentes na imagem, ou o número de componentes MNF utilizadas. Pixels extremos são considerados mais puros por serem capazes de representar os outros pixels na imagem, como será visto adiante e de acordo com Boardman (1993). Os pixels extremos em cada projeção são anotados e é realizada uma contagem de quantas vezes cada pixel foi considerado extremo, ou puro. A partir dessa informação é gerada uma imagem onde o número digital de cada pixel representa o número de vezes que esse pixel foi contado como sendo puro. Essa é a imagem índice PPI.

Recentemente, foi implementado no *software* ENVI (RSI, 2000), um procedimento automático para identificar pixels candidatos a membros de referência através da aplicação seqüencial das técnicas MNF, PPI e do uso do visualizador n -dimensional. O uso do diagrama de espalhamento n -dimensional foi apresentado por Boardman (1993), que abordou uma metodologia para a análise de mistura espectral que procura automatizar o processo de seleção de membros de referência, permitindo definir seu número, seus perfis espectrais e proporções na imagem. Segundo Boardman (1993), um perfil espectral pode ser visto como pontos em um espaço n -dimensional, onde n é o número de bandas espectrais.

As coordenadas de um ponto representam os valores de radiância ou reflectância em cada uma das bandas considerada. Quando são consideradas até três bandas é fácil de visualizar este conceito, uma vez que é produzida uma “nuvem” de pixels em um espaço tridimensional. A partir de quatro bandas não é fácil de visualizar, mas o conceito se mantém. A distribuição destes pixels no espaço n -dimensional pode ser

usada para estimar o número e os perfis espectrais dos membros de referência a serem empregados em um modelo de mistura espectral. Os dados do sensor AVIRIS, que é hiperespectral, são gerados com até 224 bandas, mas a informação está contida em apenas três a dez bandas transformadas por PC ou MNF, devido à grande correlação existente entre as bandas originais. A redução do número de bandas utilizadas simplifica e reduz os requisitos computacionais do processo. Desta forma, outros sensores que possuam menos bandas espectrais, ou multiespectrais, também são passíveis de terem seus dados processados segundo essa metodologia.

A proposta de Boardman (1993) foi sobre o uso de métodos geométricos de tratamento dos dados, como a geometria convexa, aplicada a conjunto convexos. Conjuntos convexos são representados por um grupo de pontos em um espaço n -dimensional onde todos os pontos são combinações lineares de apenas alguns deles, de forma que as proporções são todas positivas e somam um, para cada ponto. Para que se possa entender melhor esse conceito foi utilizado um conjunto bidimensional (Figura 2.9), onde a totalidade dos pontos foi envolvida por um triângulo, e cada um deles pode ser representado pela combinação linear dos vértices do triângulo. Esse triângulo é a forma geométrica mais simples capaz de envolver o conjunto de pontos e é chamada de *simplex*. O conjunto de dados pode, na verdade, ser envolvido por uma forma mais complexa, que é a casca convexa. Seus vértices são os pontos extremos do conjunto. Boardman (1993) explicou que essa casca convexa seria feita dos pontos que seriam pintados se o conjunto de dados pudesse ser “rolado” sobre uma “almofada de carimbo” $(n-1)$ -dimensional. Outra analogia possível é que se um conjunto de dados tridimensional fosse um objeto sólido que estivesse embrulhado em um lençol, a casca convexa teria a forma do pacote.

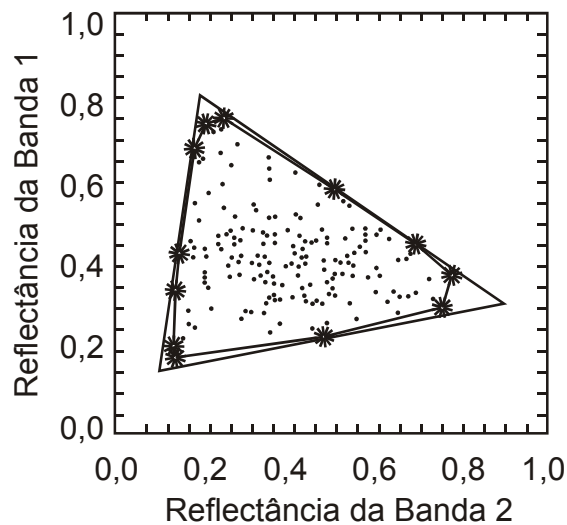


FIGURA 2.9 – Conjunto bidimensional de pontos, envolvido pelo *simplex*, um triângulo. Os asteriscos são os pontos que formam os vértices da casca convexa.

Após apresentar conceitos como *simplex* e casca convexa, Boardman (1993) mostrou que a decomposição espectral linear dos pixels da imagem se transforma em um problema de geometria convexa. A partir do conjunto de pixels da imagem, representado por um diagrama de espalhamento n -dimensional, onde n é o número de bandas que contém a dimensionalidade inerente dos dados (conseguida por MNF ou PC), existem $n+1$ membros de referência, assumindo que os membros de referência são espectralmente distintos para o sensor utilizado.

Para a solução deste problema é necessário que se faça, inicialmente, a conversão da radiância em reflectância de superfície. Em seguida é utilizada uma transformação MNF, que separa o ruído e reduz o número de bandas espectrais, restando apenas imagens não correlacionadas, que agrupam toda a variabilidade espectral da cena. A partir dos autovalores retornados pela transformação MNF e da análise das componentes, são selecionadas as n componentes que serão utilizadas na geração do diagrama de espalhamento. O diagrama de espalhamento n -dimensional dessas bandas é então gerado e o *simplex* que melhor se ajuste aos dados é determinado. Isso pode ser conseguido com a análise da casca convexa do diagrama de espalhamento. Uma vez definido o *simplex*, os membros de referência são estimados a partir dos seus vértices. A estimativa do perfil espectral desses membros de referência é conseguida com a procura

do *simplex* que melhor se ajuste ao diagrama de espalhamento. Os vértices deste *simplex* são os membros de referência, e as proporções deles para cada pixel da imagem é calculada através da transformação dos dados para coordenadas baricêntricas. Uma vez que todos os pixels estão contidos no *simplex*, todas as proporções serão positivas e somarão um para cada pixel. Finalmente os perfis espectrais são transformados novamente para o número de bandas original e o perfil espectral completo é gerado. Esses perfis podem então ser comparados com perfis de materiais reais e de sombra, à procura de um perfil de um material conhecido que melhor se ajuste ao perfil extraído da imagem (Figura 2.10).

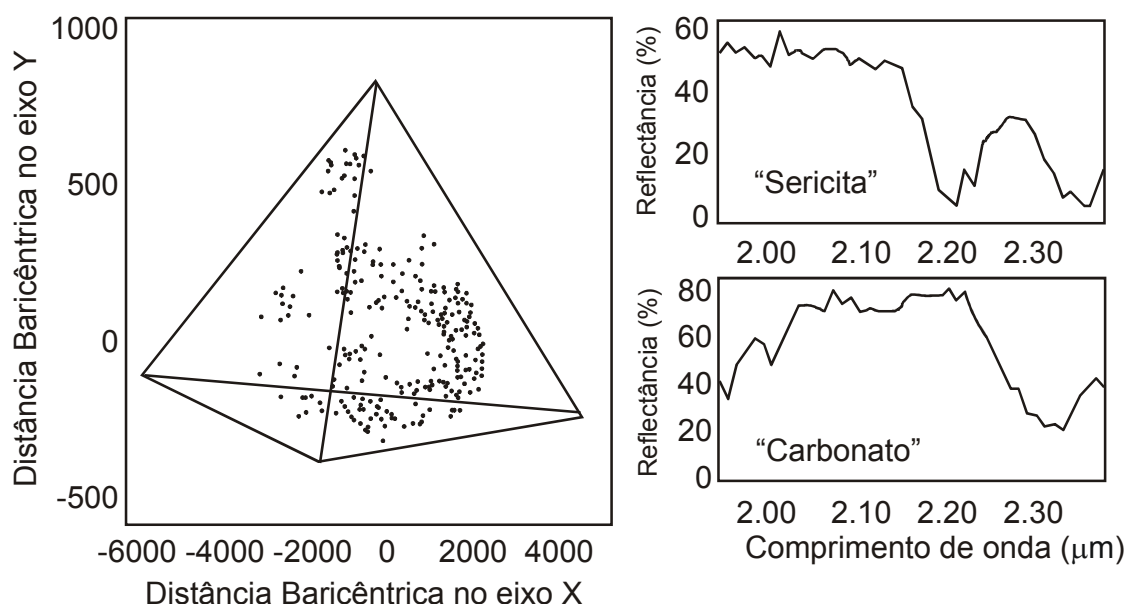


FIGURA 2.10 – *Simplex* de melhor ajuste à casca convexa dos dados, em unidades de distância do centro do *simplex*, não normalizadas. Dois membros de referência derivados do *simplex*, representando sericita, o vértice superior do *simplex*, e carbonato, o vértice inferior. A sombra é o vértice direito.

FONTE: Adaptada de Boardman (1993).

Uma vez selecionados os membros de referência, o modelo de mistura espectral pode ser utilizado para caracterizar os componentes de cena. Diversos autores apresentaram diferentes abordagens para o emprego do modelo de mistura espectral (Boardman, 1989, Carvalho et al., 2001, Shimabukuro e Smith, 1991). Ao longo deste trabalho será utilizada a metodologia apresentada por Boardman (1989).

O modelo de mistura espectral se baseia no princípio de que um pixel em uma imagem raramente é composto de apenas um material, e que a resposta espectral capturada pelo sensor é, na verdade, uma composição de todos os elementos contidos na área do pixel. Quando um fóton interage com apenas um tipo de material na superfície antes de ser capturado pelo sensor, diz-se que a interação foi macroscópica e que a resposta espectral do pixel resulta da mistura linear da resposta espectral dos materiais presentes na área imageada de um pixel. Quando, por outro lado, o fóton interage com diversos materiais, como solo e vegetação em diversos níveis de estratificação, dizemos que a interação foi microscópica, e que a relação entre a resposta espectral de cada componente do pixel e a resposta espectral do pixel como um todo é não-linear (Boardman, 1989). No caso da mistura espectral não-linear, o modelo é linearizado apenas através da transformação de variáveis.

Boardman (1989) apresentou o modelo de decomposição (ou "desmistura") espectral linear (*Linear Spectral Unmixing*), capaz de explicar o comportamento espectral de um pixel observado em uma imagem ou linearizado a partir de uma observação, conforme os componentes de cena que tenham sido capturados na área imageada pelo pixel. O modelo apresentado utiliza uma técnica de análise matricial conhecida como decomposição de valor singular (*Singular Value Decomposition – SVD*), desenvolvida por Press et al. (1993). Segundo Boardman (1989), o perfil espectral de um pixel na imagem pode ser decomposto em dois fatores, em uma multiplicação de matrizes. O primeiro fator é uma matriz de perfis espectrais de materiais puros, que contribui na formação do pixel conforme o segundo fator, um vetor de abundância. Esta relação é expressa pela equação 2.8:

$$\mathbf{B} = \mathbf{A} * \mathbf{X}, \quad (2.8)$$

onde \mathbf{A} é a matriz $m \times n$ da biblioteca de amostras, \mathbf{X} é um vetor de abundância n -dimensional, \mathbf{B} é o vetor m -dimensional do pixel observado, em que m é o número total de bandas da imagem e de canais dos perfis espectrais e n é o número total de materiais puros que podem contribuir para a formação do pixel na imagem.

A partir da criação da matriz inversa \mathbf{A}^{-1} (equação 2.9), a simples multiplicação de \mathbf{A}^{-1} pelo vetor que representa o perfil espectral do pixel sendo observado fornece o vetor de abundância de cada um dos materiais da biblioteca de amostras na composição do pixel.

$$\mathbf{X} = \mathbf{A}^{-1} * \mathbf{B}, \quad (2.9)$$

A técnica SVD é utilizada para criar a matriz \mathbf{A}^{-1} . Qualquer matriz pode ser decomposta no produto de duas matrizes ortogonais e uma matriz diagonal. A decomposição de valores singulares utiliza este princípio para gerar a matriz \mathbf{A}^{-1} a partir da matriz \mathbf{A} . Este método de decomposição utiliza o algoritmo desenvolvido por Press et al. (1993) para gerar as duas matrizes ortogonais e a matriz diagonal. A partir dessas matrizes é possível gerar a matriz inversa da biblioteca espectral \mathbf{A}^{-1} tomando o produto das matrizes transpostas das duas matrizes ortogonais e a matriz recíproca da matriz diagonal, como pode ser visto nas equações 2.10 e 2.11.

$$\mathbf{A} = \mathbf{U} * \mathbf{W} * \mathbf{V}^T, \quad (2.10)$$

$$\mathbf{A}^{-1} = \mathbf{V} * 1/\mathbf{W} * \mathbf{U}^T, \quad (2.11)$$

onde \mathbf{A} é a matriz $m \times n$ da biblioteca de amostras, \mathbf{U} é uma matriz $m \times m$ de colunas ortogonais, \mathbf{W} é uma matriz diagonal $n \times n$ de valores singulares e \mathbf{V}^T é uma matriz $n \times n$ de colunas ortogonais.

Após a aplicação do algoritmo expresso pela equação 2.9 a cada um dos pixels da imagem, tem-se uma imagem-fração para cada um dos materiais de entrada, mais uma imagem com o erro médio quadrático (RMS) do modelo para cada pixel. Os valores de proporção obtidos deverão estar entre zero e um nas imagens-fração, de forma que um valor mais próximo de um (pixel mais claro) representa um material mais abundante no pixel e um pixel com valor mais próximo de zero (pixel escuro) indica um material menos abundante na mistura do pixel. A imagem RMS pode indicar se a solução de espectros foi adequada ou não. Altos valores de erro médio quadrado podem indicar que os espectros selecionados não são representativos, ou que existem mais materiais do que os que foram selecionados.

A aplicação deste modelo exige a coleta anterior de amostras para a criação da biblioteca de amostras, que pode ser composta por materiais originários de bibliotecas

espectrais convencionais, perfis espectrais coletados em campo ou laboratório e de amostras coletadas através de regiões de interesse definidas na imagem. A situação ideal acontece com a existência de mais bandas que materiais nas matrizes de entrada, ou seja, $m > n$. Quando existem mais amostras que o número de bandas espectrais, pode acontecer de os pesos não somarem um, pois surgem valores fora da faixa esperada, negativos ou acima da unidade. Os resultados dependem dos materiais selecionados e mudam conforme a seleção de materiais.

2.5 - Métodos de Classificação Supervisionada

Richards (1986) apresentou, em seu livro sobre análise de imagens digitais de sensoriamento remoto, as técnicas de classificação supervisionada mais utilizadas na comunidade científica. Richards (1986) mostrou que a classificação supervisionada é o método mais utilizado para análise quantitativa de dados de sensores remotos. A classificação supervisionada consiste em utilizar diferentes algoritmos para rotular os pixels de uma imagem segundo um grupo de classes de cobertura pré-definidas. Dentre os algoritmos apresentados em seu trabalho, serão apresentados sucintamente os da classificação por máxima verossimilhança e por mínima distância de Mahalanobis.

A classificação supervisionada por máxima verossimilhança é o método mais comum entre os empregados sobre dados de imagem de sensoriamento remoto. Este método foi desenvolvido sobre uma base estatisticamente aceitável, assumindo que todas as classes presentes na imagem apresentam distribuição normal. Considerando que uma determinada cena imageada apresente M classes, a probabilidade de que um pixel pertença a uma determinada classe pode ser expressa da seguinte forma:

$$p(\varpi_i | x), i = 1, K, M, \quad (2.12)$$

que é a probabilidade condicional de ocorrer a classe ϖ_i , uma vez que tenha ocorrido o pixel x . A partir desta equação, a classificação da imagem por máxima verossimilhança é realizada de acordo com

$$x \in \varpi_i \text{ se } p(\varpi_i | x) > p(\varpi_j | x) \quad \forall j \neq i. \quad (2.13)$$

Isto quer dizer que o pixel x pertence a uma determinada classe ϖ_i se a probabilidade

condicional dele pertencer a essa classe for maior que a de pertencer a qualquer outra classe. Apesar do princípio do classificador ser simples, o valor de $p(\varpi_i | x)$ é desconhecido. Entretanto, o valor de $p(x | \varpi_i)$ pode ser estimado se houver dados de treinamento suficientes. Este valor descreve a probabilidade de se encontrar um pixel da classe ϖ_i , uma vez que o pixel seja o x . A relação entre $p(\varpi_i | x)$ e $p(x | \varpi_i)$ foi estabelecida pelo teorema de Baye's (Richards, 1986):

$$p(\varpi_i | x) = p(x | \varpi_i)p(\varpi_i) / p(x), \quad (2.14)$$

onde $p(\varpi_i)$, conhecida como probabilidade *a priori*, é a probabilidade da classe ϖ_i ocorrer na cena e $p(x)$ é a probabilidade de ocorrer qualquer classe na posição do pixel x . É interessante notar que a soma de $p(x | \varpi_i)p(\varpi_i)$ para as diversas classes presentes na imagem é igual a $p(x)$, e não auxilia na discriminação entre as classes. A equação 2.13 pode ser escrita então da seguinte forma:

$$x \in \varpi_i \text{ se } p(x | \varpi_i)p(\varpi_i) > p(x | \varpi_j)p(\varpi_j) \quad \forall j \neq i, \quad (2.15)$$

Assumindo que $p(x | \varpi_i)$ possui distribuição normal, aplicando a equação da curva Gaussiana, que a representa, e adaptando-a para o caso multivariado, ao invés do univariado, têm-se:

$$p(x | \varpi_i) = (2\pi)^{-N/2} |\Sigma_i|^{-1/2} \exp\left\{-\frac{1}{2}(x - m_i)' \Sigma_i^{-1} (x - m_i)\right\}, \quad (2.16)$$

onde N é o número de bandas espectrais, ou dimensões, existentes no conjunto de dados, Σ_i é a matriz de covariância da classe ϖ_i nas diversas bandas e m_i é o vetor de médias da classe ϖ_i . A parte $(2\pi)^{-N/2}$ da equação é comum a todas as classes e pode ser eliminada, portanto.

Substituindo 2.16 em 2.14 e tomando-se o logaritmo natural, chega-se a seguinte equação:

$$g_i(x) = \ln p(\varpi_i) - \frac{1}{2} \ln |\Sigma_i| - \frac{1}{2} (x - m_i)' \Sigma_i^{-1} (x - m_i). \quad (2.17)$$

Usualmente não se possui valores precisos de $p(\varpi_i)$, de forma que se consideram as

classes equiprováveis, o que permite eliminar também $\ln p(\varpi_i)$ da equação. O fator $\frac{1}{2}$ também pode ser eliminado, simplificando a equação para:

$$g_i(x) = -\ln|\Sigma_i| - (x - m_i)' \Sigma_i^{-1} (x - m_i), \quad (2.18)$$

e a equação 2.13 pode ser reescrita da forma

$$x \in \varpi_i \text{ se } g_i(x) > g_j(x) \quad \forall j \neq i, \quad (2.19)$$

e $g_i(x)$ pode ser chamada de função discriminante.

Outra técnica de classificação supervisionada abordada por Richards (1986) foi a que utiliza a distância de Mahalanobis. A partir da equação 2.18, que é a função discriminante do classificador por máxima verossimilhança, invertem-se os sinais da função, obtendo uma nova equação, de forma quadrática,

$$d(x, m_i)^2 = \ln|\Sigma_i| + (x - m_i)' \Sigma_i^{-1} (x - m_i), \quad (2.20)$$

uma vez que o primeiro é uma constante e o segundo termo do lado direito contém a multiplicação de uma matriz pela sua transposta. Uma identificação entre um pixel e uma determinada classe é obtida com a mínima distância $d(x, m_i)^2$. Usualmente se considera que todas as classes existentes na imagem apresentam a mesma matriz de covariância Σ_i , tornando essa parte da equação desnecessária à discriminação entre as classes. Eliminando esta parte da equação, temos:

$$d(x, m_i)^2 = (x - m_i)' \Sigma_i^{-1} (x - m_i), \quad (2.21)$$

conhecida como distância de Mahalanobis. Apesar das duas formas apresentadas (equações 2.20 e 2.21) receberem a mesma denominação, a segunda é mais amplamente utilizada.

Uma vez que tenha sido classificada a imagem, Richards (1986) propõe que seja estimada a precisão da classificação. O método proposto por Richards (1986) para determinar a precisão do classificador baseia-se na escolha de dois grupos de pixels. O primeiro grupo é selecionado a partir da imagem classificada e o outro, conhecido como verdade terrestre, a partir de outras fontes, tais como dados de campo ou outras fontes. A partir desses dois grupos de pixels é gerada a matriz de confusão, que é uma tabela

onde são apresentados, tanto em termos numéricos absolutos como percentuais do número total de pixels em cada classe da verdade terrestre, os acertos e erros do classificador. A matriz de confusão permite determinar os erros de inclusão (colocar pixels em uma classe a qual não pertencem) e os de exclusão (retirar pixels da classe à qual realmente pertencem), bem como estimar o desempenho geral do processo de classificação, através do cálculo da precisão geral e do coeficiente Kappa.

CAPÍTULO 3

MATERIAL E MÉTODO

Ao longo deste capítulo serão apresentados os métodos utilizados no processamento das imagens do MISR para alcançar os objetivos propostos. Uma visão geral do processo pode ser observada na Figura 3.1.

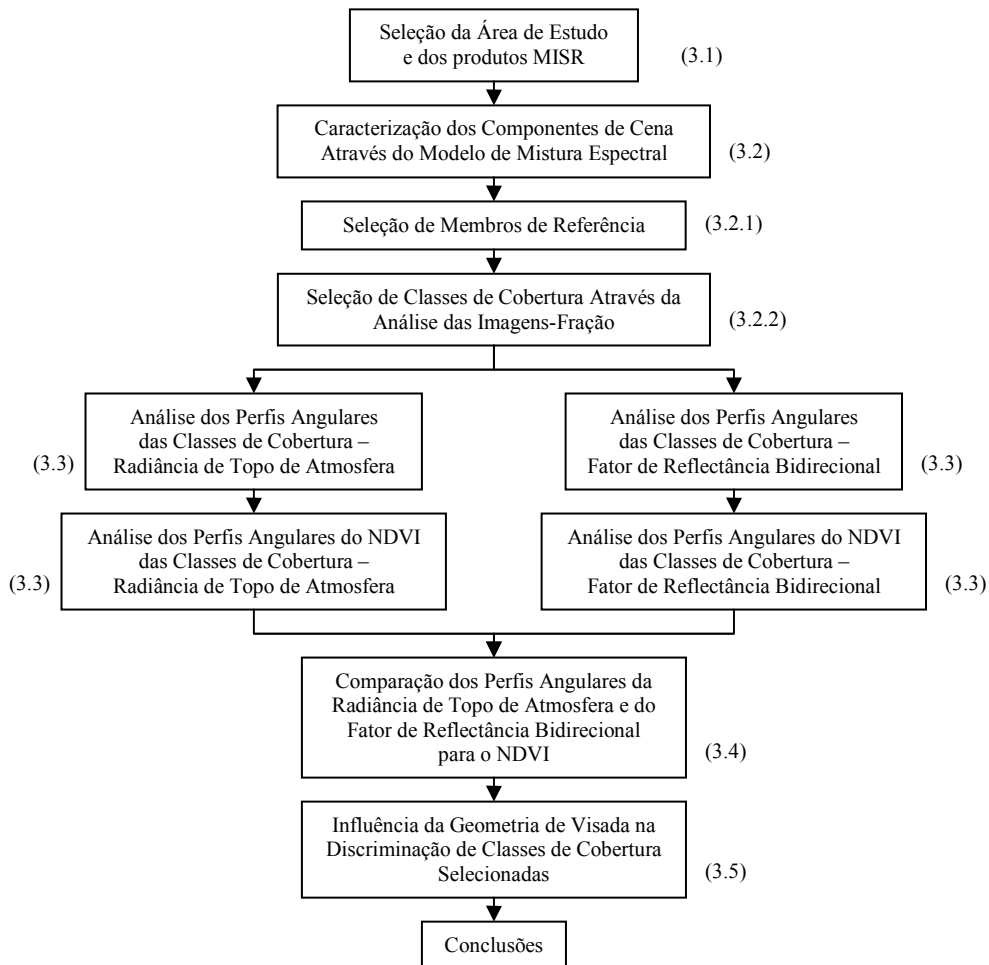


FIGURA 3.1 – Fluxograma da metodologia utilizada

3.1 - Seleção da Área de Estudo e dos Produtos MISR

A seleção da área de estudo para este trabalho foi feita em função dos seguintes fatores:

- a) a importância econômica e estratégica da região Amazônica;

- b) o seu provável monitoramento pelo futuro satélite SSR-1, cujo conjunto de câmeras com amplo campo de visada introduzirá efeitos direcionais nas imagens que ocorrerão em forte associação com os efeitos atmosféricos; e
- c) a existência de dados MISR de boa qualidade radiométrica e de produtos gerados a partir de seu processamento.

A área selecionada está localizada na porção leste do Estado do Acre, a nordeste da cidade de Rio Branco, sendo coberta pelo bloco 098 da órbita 001 do satélite TERRA para o sensor MISR (Figura 3.2). Foi selecionada a imagem gerada na revolução de número 3251 do satélite em 28 de julho de 2000, devido ao fato desta imagem apresentar menor cobertura de nuvens, quando comparada a outras imagens da mesma região.

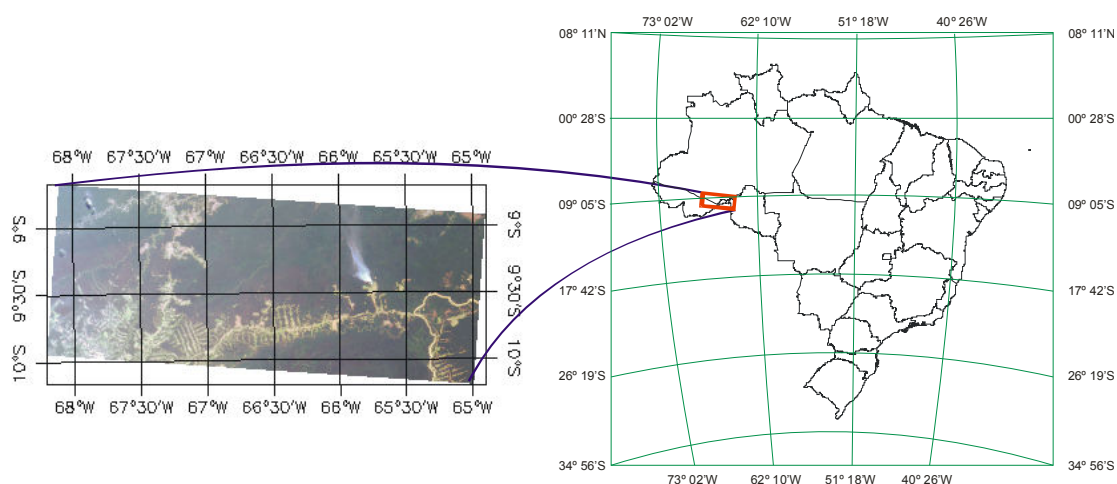


FIGURA 3.2 – Área de estudo e composição colorida RGB 321 do MISR.

Segundo o Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM, 1976) do Ministério das Minas e Energia, essa região faz parte da Amazônia Legal Brasileira, incorporando terras dos Estados do Acre, Amazonas e Rondônia. Os principais rios que drenam a região, mapeada nas folhas SC-19-X-D e SC-20-V-C, são o Madeira e o Ituxí e seu confluente, o rio Endimari, ambos afluentes do rio Purús. A área não apresenta grandes acidentes topográficos, alcançando cotas de, no máximo, 300 metros. A cobertura vegetal predominante é a floresta densa com árvores emergentes, com ocorrência de floresta ombrófila aberta do tipo terras baixas e submontana, e floresta ombrófila densa dos tipos aluvial, terras baixas e submontana (Sestini et al., 2002). Os tipos de solos

encontrados são principalmente o podzólico vermelho amarelo distrófico, associado a latossolo vermelho amarelo. O clima é quente e úmido, com uma estação seca que vai de maio a outubro e outra chuvosa, de outubro a maio.

A área de estudo selecionada é imageada pelo MISR na órbita-ponto 001/067 do satélite TERRA. O grupo de imagens utilizado foi adquirido no dia 28 de julho de 2000, aproximadamente às 10:30h. A partir desses dados o EOSDIS foi capaz de gerar diversos subprodutos, ou parâmetros. Neste trabalho foram utilizados os seguintes subprodutos:

- A radiância de topo de atmosfera; e
- O fator de reflectância bidirecional (*Bidirectional Reflectance Factor* - BRF).

Estes subprodutos foram selecionados para possibilitar uma melhor caracterização da influência atmosférica (radiância) e dos efeitos direcionais mais diretamente relacionados com a resposta espectral da superfície do terreno. O primeiro parâmetro, a radiância de topo de atmosfera, é a radiância que atravessa a atmosfera e atinge a superfície, sem sofrer qualquer correção das interferências que a atmosfera tenha causado na energia incidente no terreno ou refletida pelo mesmo. Este produto foi utilizado nas resoluções de 275 e 1100 metros. O BRF, que é o melhor estimador do *Bidirectional Reflectance Distribution Function* (BRDF), foi utilizado na resolução de 1100 metros, que é a única resolução em que esse produto é gerado. Uma discussão mais detalhada sobre o conceito desses subprodutos, bem como sobre a geração deles é apresentada no apêndice B.

Os recursos computacionais utilizados para a geração dos resultados deste trabalho foram o aplicativo RSI ENVI, em sua versão 3.5 e o Microsoft Excel XP.

3.2 - Caracterização dos Componentes de Cena Através do Modelo de Mistura Espectral

O estudo da variação angular da reflectância espectral da superfície depende do conhecimento prévio das características da cena imageada. O modelo linear de mistura espectral foi utilizado para fazer a caracterização geral dos componentes de cena e para

a subsequente seleção de classes de cobertura que pudessem ser utilizadas no estudo do seu comportamento espectral em função da geometria de visada.

Optou-se pelo uso de um modelo linear de mistura espectral simples baseado na seleção de três membros de referência (vegetação verde, solo exposto e sombra), cujas abundâncias foram quantificadas pixel-a-pixel.

3.2.1 - Seleção de Membros de Referência

Para facilitar a seleção de membros de referência, utilizou-se a imagem de radiância de topo de atmosfera, único produto com resolução espacial de 275 metros. A abordagem metodológica usada para a seleção dos pixels representativos dos três membros de referência incluiu a aplicação sequencial das técnicas MNF (redução da dimensionalidade dos dados), PPI (identificação dos pixels mais puros ou candidatos a membros de referência) e da inspeção dos resultados no visualizador n -dimensional do ENVI.

A rotação MNF, um processamento que visou definir a dimensionalidade inerente dos dados, consistiu basicamente de duas transformações por principais componentes encadeadas aplicadas sobre os dados espectrais das quatro bandas MISR. A primeira transformação descorrelacionou o ruído em todas as bandas, deixando-o com variância unitária, o que é chamado de ruído branco (Du Bois, 2000). A segunda transformação foi aplicada sobre o resultado da primeira etapa, o ruído branco, reorganizando os dados de forma que o ruído existente se concentre nas últimas componentes geradas (RSI, 2000), o que pode ser determinado pelos autovalores retornados pelo processamento (RSI, 2000). Os autovalores e a inspeção visual da qualidade das imagens MNF foram os principais critérios utilizados para determinar quais componentes seriam utilizadas na geração da imagem PPI.

A imagem PPI representa o grau de pureza espectral de um pixel, o que é um indicativo de que ele possa ser um bom membro de referência para um modelo de mistura espectral. O grau de pureza é representado pelo número digital (ND) do pixel na imagem PPI, que indica o número de vezes que eles foram contabilizados como extremos quando repetidamente projetados em diagramas de espalhamento n -

dimensionais em um vetor unitário aleatório. Os pixels que foram considerados pelo menos uma vez como extremos foram separados para análise no visualizador n -dimensional.

O visualizador n -dimensional permitiu que o conjunto de dados fosse visto de diferentes pontos de vista, de forma complementar ao diagrama de espalhamento bidimensional. Neste trabalho foram utilizados os pixels selecionados pelo PPI no visualizador n -dimensional, com os dados MNF. Esses dados são utilizados preferencialmente aos dados originais por já terem sido processados, de forma a reduzir o ruído e aumentar a quantidade de informação em cada uma das bandas, ou componentes. O diagrama de espalhamento tetradimensional foi então rotacionado em diferentes direções, e os pixels que se destacavam como extremos foram então analisados espectral e espacialmente. As análises das distribuições espaciais destes pixels na imagem e nos diagramas de espalhamento bidimensional das bandas do vermelho e do infravermelho próximo do MISR foram critérios adicionais para a seleção final dos membros de referência representativos de vegetação verde, solo e sombra para fins de análise de mistura espectral.

3.2.2 - Imagens-Fração e Classes de Cobertura

Após a seleção dos membros de referência, o modelo linear de mistura espectral foi aplicado sobre a imagem radiância de topo de atmosfera ao nadir, com resolução espacial de 275 metros. Uma análise exploratória das imagens-fração criadas pelo modelo de mistura foi efetivada através do uso interativo da técnica de fatiamento. Os resultados desses fatiamentos foram comparados com mapas de vegetação atualizados da região, o que auxiliou a seleção de classes de cobertura que fossem espectralmente bem definidas e espacialmente consistentes.

Um dos mapas de vegetação úteis no presente trabalho é um recorte do que foi utilizado por Sestini et al. (2002) em seu relatório sobre a “Integração e atualização de dados de uso/cobertura do terreno da Amazônia Legal para utilização em modelos de superfície”, que se baseou, por sua vez, no mapa de vegetação do IBGE, de 1993. O mapa do IBGE foi atualizado por Sestini et al. (2002) quanto à nomenclatura e à especificação da

composição das áreas de contato. O outro mapa utilizado é o mapa da extensão do desflorestamento na Amazônia, produzido por Mello et al. (2003), como parte do Projeto de Estimativa do Desflorestamento Bruto da Amazônia (PRODES), e gerado a partir de imagens Landsat/TM de 2000.

O objetivo da comparação das imagens-fração fatiadas com os mapas de vegetação foi identificar classes de cobertura espectral e espacialmente bem definidas nas imagens-fração geradas pelo modelo de mistura linear espectral a partir dos dados de resolução de 1,1 km. Nesta resolução espacial, a maior parte dos subprodutos do MISR (p. ex., radiância de topo de atmosfera e fator de reflectância bidirecional) foram gerados.

3.3 - Estudo da Influência da Geometria de Visada Sobre a Resposta Espectral das Classes de Cobertura Seleccionadas

As classes de cobertura seleccionadas pelo procedimento anterior foram utilizadas no estudo da influência da geometria de visada sobre sua resposta espectral, através da obtenção de perfis angulares. Para essas classes de cobertura, foram seleccionados grupos de 10 x 10 pixels, de forma a melhor caracterizar estatisticamente a classe em questão. Quando as classes de cobertura não puderam ser caracterizadas por uma área contínua de pelo menos 10 x 10 pixels, foram seleccionadas áreas contínuas de pelo menos cinco pixels. Cada classe de cobertura foi caracterizada pelos valores médios da resposta espectral extraídos de cada uma das quatro bandas espectrais e cada uma das nove câmeras do MISR.

Desta forma, cada classe de cobertura gerou trinta e seis valores para cada um dos dois subprodutos seleccionados. Esses valores foram organizados em perfis angulares e analisados classe a classe, para cada banda espectral do MISR, e banda a banda, para cada classe de cobertura seleccionada. O NDVI foi calculado para cada visada do MISR, a partir dos valores médios das bandas do vermelho e infravermelho próximo, para cada uma das classes de cobertura seleccionada. Foram conduzidas análises separadas para cada um dos subprodutos utilizados (radiância do topo da atmosfera e BRF), determinando como efeitos atmosféricos e direcionais acoplados podem influenciar na

resposta espectral das classes de cobertura, em função da variação na geometria de visada.

A matriz de covariância entre as bandas espectrais de cada classe, em cada uma das nove câmeras do MISR, também foi computada.

Os valores médios para cada classe de cobertura, em cada banda espectral e cada câmera foram divididos pelo valor médio da respectiva banda e classe ao nadir, gerando novos perfis angulares, normalizados em relação à resposta ao nadir. Esses perfis permitiram determinar a escala da variabilidade da resposta espectral de cada classe em função da geometria de visada, quando comparada à resposta do imageamento ao nadir.

3.4 - Comparação dos Resultados Obtidos a Partir da Radiância de Topo de Atmosfera e do Fator de Reflectância Bidirecional

O estudo da variação angular da resposta espectral dos diversos produtos MISR tem sua importância definida a partir do momento que se leva em consideração o esforço computacional envolvido pelo EOSDIS na geração de cada produto. O nível de correção utilizado em cada um dos produtos pressupõe uma crescente complexidade no processamento realizado. Os dados de radiância de topo de atmosfera, por exemplo, são corrigidos quanto aos erros de sistema, reprojatados espacialmente e condicionados no formato HDF. O fator de reflectância bidirecional (BRF) representa a resposta espectral da cena corrigida quanto aos efeitos de iluminação difusa e, portanto, está mais diretamente relacionado com as propriedades biofísicas da superfície do terreno. Para que isso seja possível, entretanto, é necessário que seja feita a inversão de um modelo parametrizado da resposta espectral da superfície, conforme apresentado no Capítulo 2 e no Apêndice B.

Diante disso, foi feita uma análise comparativa da resposta do NDVI entre a radiância de topo de atmosfera e o BRF, em função da variação na geometria de visada. O objetivo dessa análise foi melhor caracterizar o impacto dos efeitos atmosféricos sobre a radiância de topo da atmosfera e o papel das características da superfície sobre os efeitos direcionais observados no BRF no cálculo deste índice de vegetação.

3.5 - Influência da Geometria de Visada na Discriminação de Classes de Cobertura Seleccionadas

Uma vez determinada a influência da geometria de visada na resposta espectral das classes de cobertura da área de estudo, tanto para a radiância de topo de atmosfera como para o fator de reflectância bidirecional (BRF), foi feita a análise do papel da geometria de visada na separabilidade entre algumas dessas classes. Essa análise foi conduzida somente sobre os dados BRF, uma vez que este subproduto está corrigido dos efeitos da atmosfera. Apenas as classes de cobertura de floresta foram abordadas nessa parte do trabalho, uma vez que apenas essas classes permitiram selecionar áreas grandes o suficiente para realizar a caracterização estatística das classes de cobertura.

Inicialmente foi calculada a distância entre as classes de cobertura para cada câmera do MISR e consideradas todas as bandas espectrais do MISR, segundo duas medidas de distância calculadas a partir dos mesmos grupos de pixels utilizados nas análises anteriores: a distância Euclidiana e a distância de Mahalanobis. A principal diferença entre essas duas medidas é que a distância Euclidiana utiliza apenas o vetor de médias das classes avaliadas, enquanto a distância de Mahalanobis leva em conta ainda a matriz de covariância e o número de pixels existente em cada classe.

Em seguida foram gerados os perfis angulares das diferenças entre os valores médios de BRF em cada banda espectral, com o objetivo de determinar qual o papel de cada banda espectral no cálculo dos valores das distâncias Euclidiana e de Mahalanobis. A diferença entre os valores médios de NDVI das classes também foi calculada, complementando a análise das bandas espectrais do vermelho e do infravermelho próximo.

A precisão do processo de classificação supervisionada também foi avaliada, em função da separabilidade entre as classes. Foram utilizados os classificadores de Máxima Verossimilhança e da Distância de Mahalanobis. Os vetores de médias e as matrizes de covariância utilizados pelos classificadores foram os extraídos das classes de cobertura seleccionadas.

Para criar o grupo de pixels de controle empregado na avaliação do desempenho dos classificadores ou validação, as imagens-fração e os mapas de vegetação utilizados na seleção das classes de cobertura foram novamente utilizados. Pelo menos cinquenta novos pixels foram selecionados aleatoriamente dentro das classes de cobertura definidas nos mapas de vegetação, com valores de proporção ou abundância nas imagens-fração equivalentes àqueles encontrados nas classes de cobertura selecionadas originalmente.

O processo foi aplicado às imagens de cada uma das câmeras do sensor MISR. A partir dos valores de desempenho geral, extraídos da matriz de confusão gerada para cada câmera, foram obtidos perfis angulares da precisão dos dois classificadores. Esses perfis foram então avaliados e as causas do comportamento dos classificadores foi analisada.

CAPÍTULO 4

RESULTADOS E DISCUSSÃO

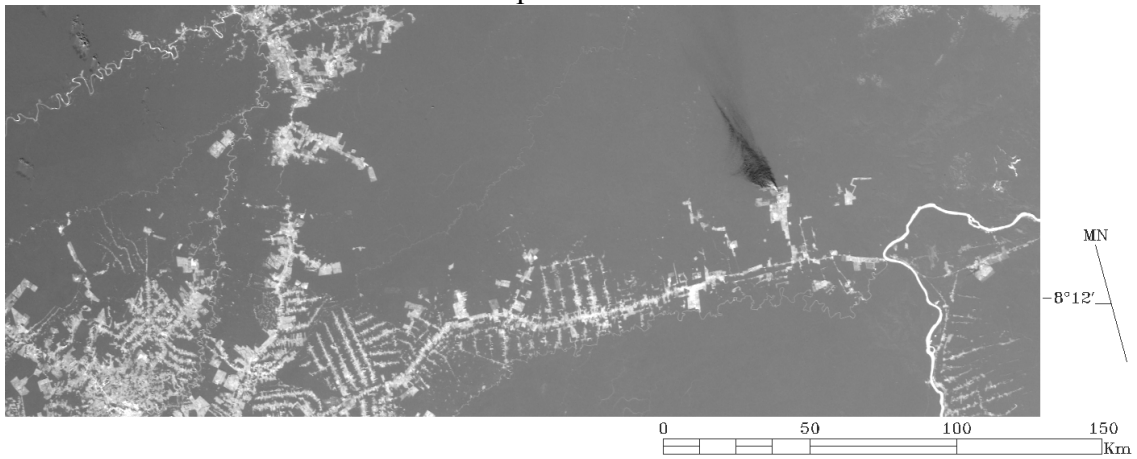
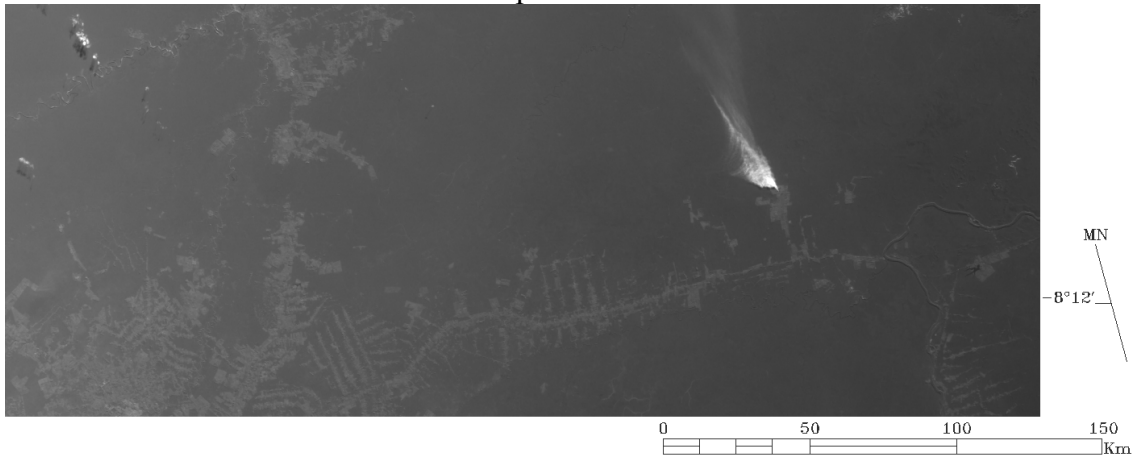
4.1 - Caracterização da Cena Através de um Modelo Linear de Mistura Espectral

4.1.1 - Seleção dos Membros de Referência

A Figura 4.1 (*a* a *d*) ilustra as 4 componentes geradas pela transformação MNF, aplicada sobre a imagem radiância de topo de atmosfera, obtida ao nadir, conforme descrito no Capítulo 3. A principal função do uso deste produto no trabalho foi facilitar a seleção dos membros de referência. Isso se deve ao fato de que apenas a câmera ao nadir gera imagens com 275 metros no modo global. As imagens das outras oito câmeras são geradas com resolução de 1100 metros, e os produtos gerados a partir daí apresentam essa mesma resolução, para todas as câmeras.

As imagens MNF na Figura 4.1 estão representadas sem nenhuma aplicação de contraste, permitindo assim a visualização mais realista da qualidade das mesmas. Como é possível perceber da análise visual das imagens, nenhuma das quatro imagens apresenta informação que consista apenas de ruído, e os autovalores gerados pela transformação confirmam que todas as componentes contêm informação útil. A quarta componente apresentou auto-valor igual a 4,8, muito maior que o suposto valor de corte, igual à unidade, abaixo do qual todas as componentes MNF deveriam conter apenas ruído. Os outros autovalores encontrados foram: 115,8 (MNF 1), 17,9 (MNF 2) e 12,58 (MNF 3).

a. Componente MNF 1



d. Componente MNF 4

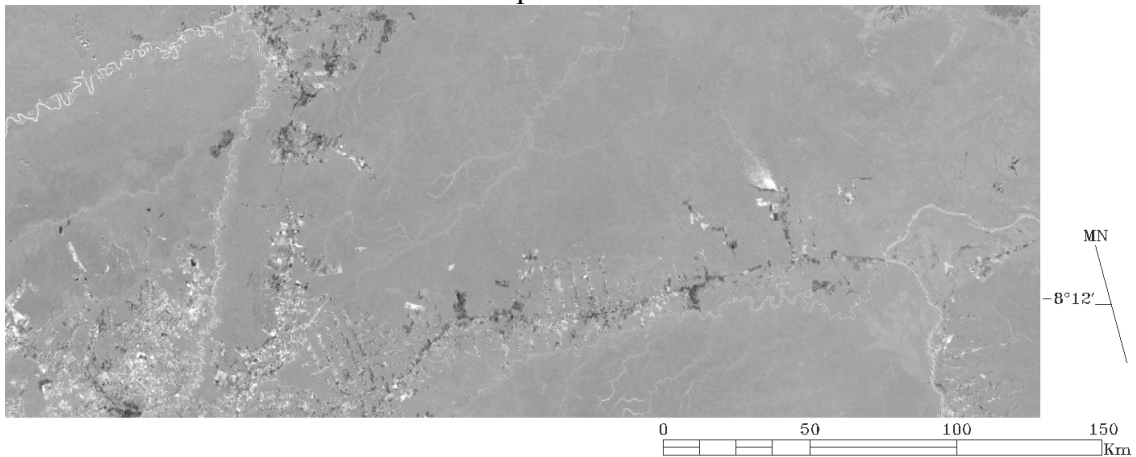


FIGURA 4.1 – Conclusão.

A Figura 4.2 mostra a imagem PPI, obtida a partir das quatro componentes MNF, resultante do uso de 5000 interações e de um limiar igual a 1,5. Esses valores foram determinados experimentalmente e foram considerados adequados para essa imagem somente, segundo a quantidade de pixels separados como puros. O objetivo do uso da técnica PPI foi identificar os pixels mais puros, candidatos a membros de referência, para o modelo de mistura espectral. Os pixels indicados em preto na Figura 4.2 foram considerados extremos ou mais puros pela técnica PPI em pelo menos cem das sucessivas interações. Os demais, em branco, representam pixels considerados impuros pelo processamento.

Como pode ser visto na Figura 4.2, o processamento forneceu um grande número de pixels considerados puros. Isso se deve ao fato de que a técnica PPI considera puro todo pixel que seja espectralmente muito diferente dos outros na imagem. Pixels que apresentem uma resposta atípica tenderão, portanto, a serem considerados puros. A região localizada na parte direita da imagem, onde foi observada uma grande concentração de pixels supostamente puros, corresponde, na verdade, a uma região com relevo mais acidentado, o que possivelmente justifica a ocorrência de tantos pixels diferentes naquela parte da imagem. Outro fator que pode ter causado essa concentração é a presença do rio Madeira nesta porção da imagem, que torna o solo muito úmido nas

proximidades, novamente alterando o comportamento espectral dos pixels da região em relação ao resto da imagem.

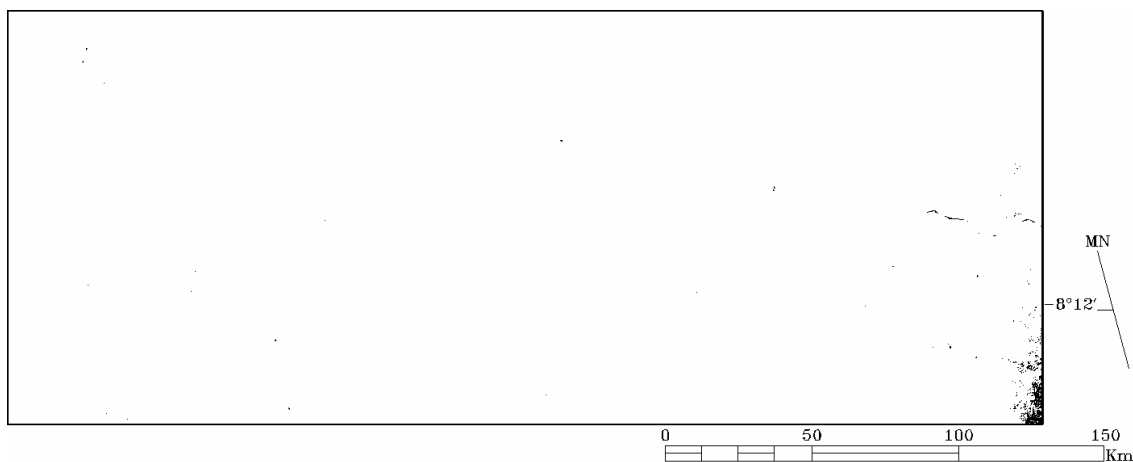


FIGURA 4.2 – Imagem resultante da aplicação da técnica PPI sobre as componentes MNF. Os pixels escuros representam candidatos a membros de referência.

Em função da grande quantidade de pixels considerados puros pelo PPI, foi necessário lançar mão de outro artifício para possibilitar a seleção de membros de referência para o modelo de mistura espectral. Este artifício foi o visualizador n -dimensional, que gera um gráfico de espalhamento de pixels, onde n é o número de bandas espectrais ou imagens MNF existentes. Após diversas projeções de pixels candidatos a membros de referência no visualizador n -dimensional, da análise complementar de sua distribuição espacial na imagem, de seus espectros e de sua posição relativa em diagramas de espalhamento das bandas MISR do vermelho e do infravermelho próximo, os membros de referência foram selecionados.

A Figura 4.3 mostra, em cores destacadas, a localização no visualizador n -dimensional dos três membros de referência selecionados para o modelo de mistura espectral. Em vermelho está o pixel de solo exposto, em verde o pixel que representou a vegetação verde pura e em azul, a sombra. É possível observar que existem pixels mais extremos que os selecionados na imagem, mas a análise visual comprovou que se tratavam de outros materiais que não os desejados, como fumaça ou água do rio Madeira.

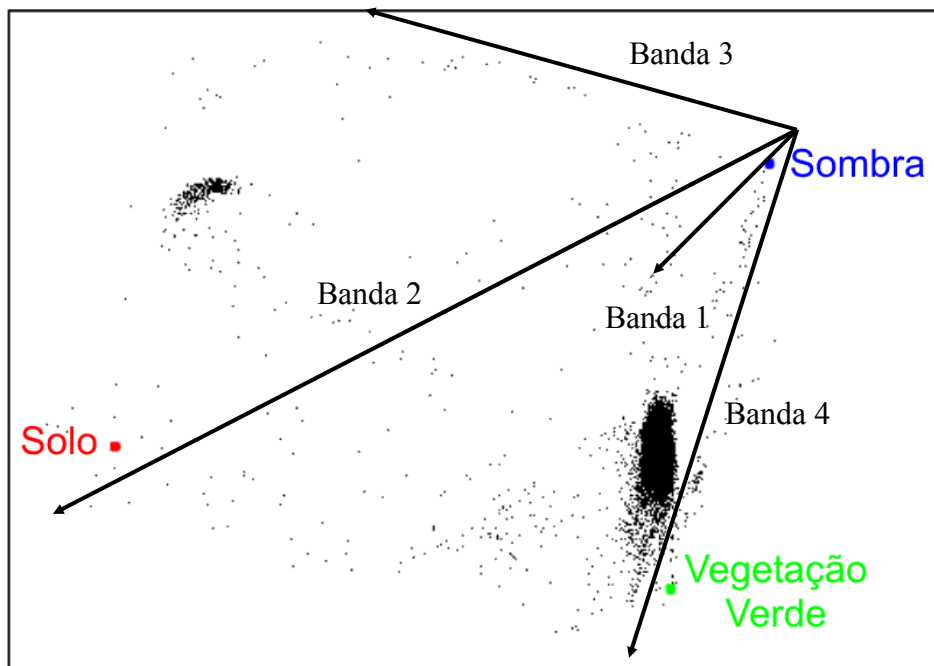


FIGURA 4.3 – Visualizador n -dimensional, com os membros de referência selecionados destacados em cores.

A Figura 4.4 mostra uma composição colorida RGB das bandas 3, 4 e 2 do MISR, onde está indicada a localização espacial dos membros de referência selecionados (vegetação verde, solo e sombra). Também estão indicados o rio Madeira e uma pluma de fumaça presente na imagem. Nesta composição colorida, as áreas em verde claro representam fazendas com pastos e pontos de regeneração da cobertura vegetal, em diferentes estágios de crescimento. As áreas em verde escuro correspondem à floresta primária, sendo que as áreas mais escuras na parte direita da imagem estão influenciadas ainda pelo relevo mais acidentado e pela presença do rio Madeira. As porções da imagem em magenta compreendem áreas antropizadas, de solo, desmatamentos de grande porte, estradas de terra e a água barrenta do rio Madeira.

A Figura 4.5 mostra um gráfico de espalhamento bidimensional com as bandas MISR do vermelho e do infravermelho próximo. A localização aproximada dos membros de referência também está indicada neste gráfico. A sombra ocorre na porção inferior esquerda do gráfico devido à resposta espectral baixa em ambas as bandas. A vegetação verde ocorre na porção superior esquerda em função da absorção no vermelho pela clorofila e da resposta espectral mais alta no IVP devido ao espalhamento das folhas e

de outros componentes do dossel. Finalmente, o solo da área de estudo apresenta uma resposta espectral intermediária em ambas as bandas.

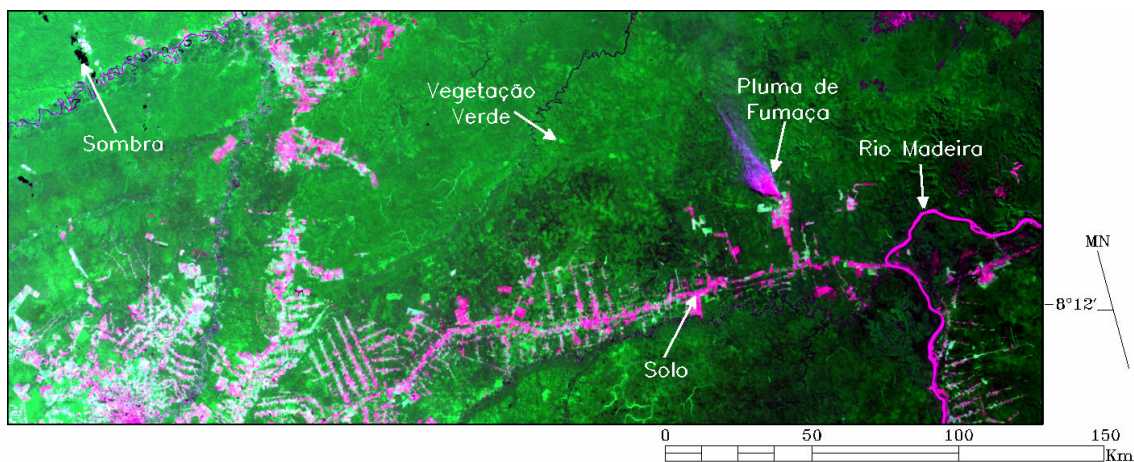


FIGURA 4.4 – Composição colorida RGB 342 com a indicação dos membros de referência selecionados, bem como do rio Madeira e da pluma de fumaça observada na imagem.

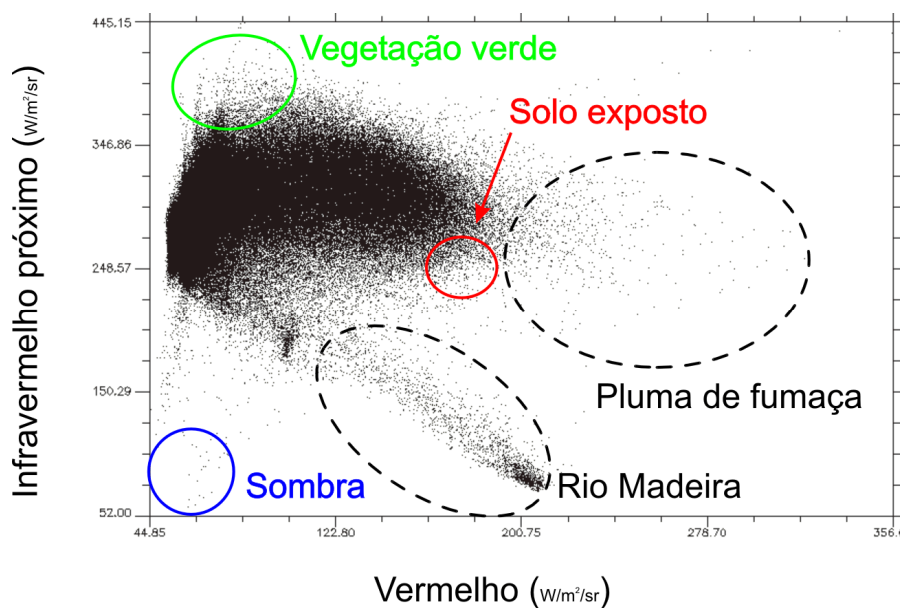


FIGURA 4.5 – Diagrama de espalhamento bidimensional de pixels da radiação das bandas 3 (vermelho) e 4 (infravermelho próximo) do MISR. A posição aproximada dos membros de referência está indicada. A pluma de fumaça e o rio Madeira estão delimitados pelos círculos pontilhados.

A Figura 4.6 mostra as curvas de radiação de topo de atmosfera do MISR dos três membros de referência selecionados. A influência do espalhamento atmosférico é

claramente visível neste gráfico especialmente sobre a banda MISR do azul com centro posicionado em 0,446 μm .

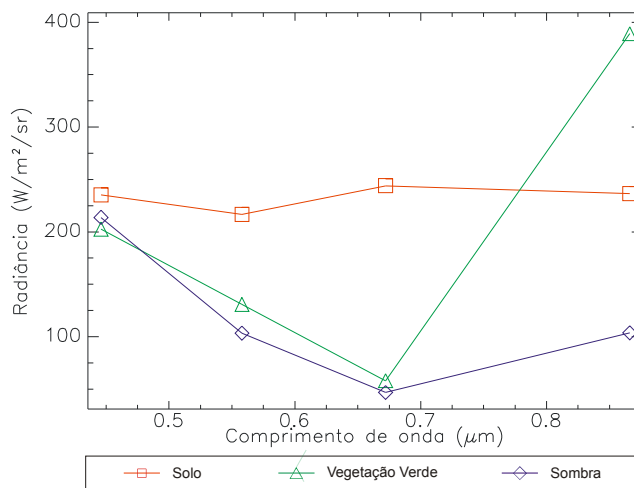


FIGURA 4.6 – Perfil espectral dos membros de referência selecionados para emprego no modelo de mistura espectral.

4.1.2 - Imagens-Fração

Os espectros de radiação dos membros de referência da Figura 4.6 foram utilizados na aplicação do modelo linear de mistura espectral sobre as imagens radiância do topo de atmosfera da câmara ao nadir com valores de resolução espacial de 275 metros e 1100 metros.

As Figuras 4.7 a 4.9 mostram as imagens-fração obtidas do uso do modelo de mistura espectral aplicado sobre o produto de 275 metros de resolução espacial. As frações solo, vegetação verde e sombra estão representadas com um contraste onde os valores de fração foram escalonados de 0 a 1 para o intervalo de 0 a 255 níveis de cinza na imagem. Valores acima da unidade ou abaixo de zero foram saturados em 255 ou zero, respectivamente. Na imagem fração-solo, este fato ocorreu para a pluma de fumaça, à direita do centro da imagem, e para a nuvem, no canto superior esquerdo da imagem (Figura 4.7). Esse fato foi observado novamente para a imagem fração-sombra na porção equivalente à pluma de fumaça (Figura 4.9).



FIGURA 4.7 - Imagem fração-solo.

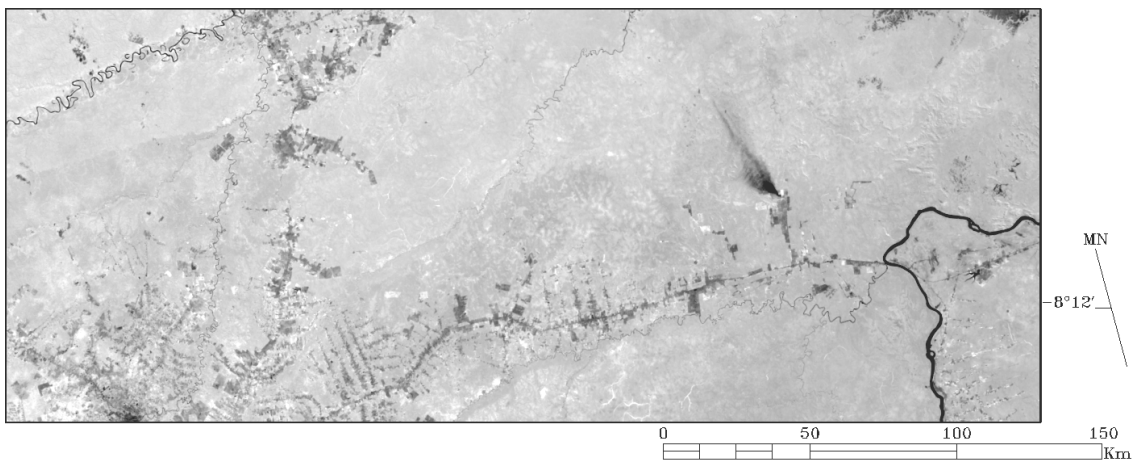


FIGURA 4.8 - Imagem fração vegetação-verde.

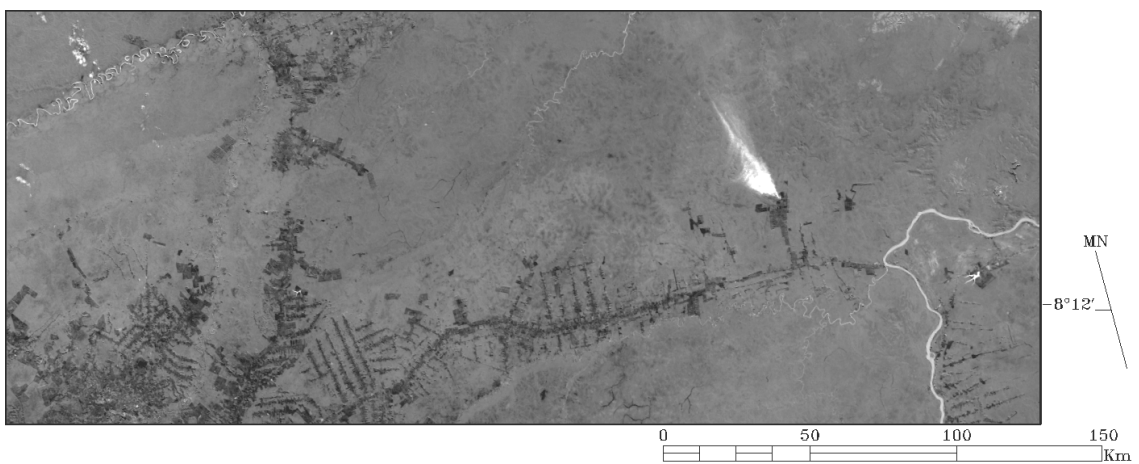


FIGURA 4.9 - Imagem fração-sombra.

A Figura 4.10 representa o erro médio quadrático do modelo para cada pixel. O ND de cada pixel é igual ao quadrado da diferença entre o valor de radiância da imagem e o valor modelado, consideradas as proporções de cada membro de referência e seus perfis espectrais. Foi aplicado um contraste, na imagem, de forma que a gama de tons de cinza representados na imagem correspondesse a valores de erro entre 0 e 10 unidades de radiância ($W/m^2/sr$). Os maiores erros do modelo na Figura 4.10 (pixels mais claros) foram observados para a pluma de fumaça e para a nuvem, para as águas dos rios presentes na imagem e, com erro em menor intensidade, para algumas áreas correspondentes à ocupação humana.



FIGURA 4.10 - Imagem representando o erro médio quadrático de ajuste do modelo.

Quando o modelo de mistura espectral foi aplicado à imagem radiância de topo de atmosfera, reamostrada para 1100 metros de resolução espacial, utilizando os mesmos membros de referência, os valores médios de suas proporções e de desvio-padrão sofreram pequenas alterações. O erro médio quadrático da cena como um todo foi o que sofreu maior alteração, de 2,5 para 9,4 $W/m^2/sr$ de média, o que foi considerado aceitável. Isso sugere que a alteração causada pelo uso da imagem de pior resolução espacial não foi significativa para a distribuição dos dados no resultado final nem para o desempenho do modelo.

4.1.3 - Imagens-Fração e Classes de Cobertura

As Figuras 4.11a e 4.11b ilustram as imagens-fração sombra e vegetação verde, respectivamente, obtidas a partir do modelo de mistura aplicado à imagem radiância da

câmara ao nadir, com 1100 metros de resolução espacial. As imagens-fração foram fatiadas para auxiliar a seleção de classes de cobertura para posterior análise da influência da geometria de visada sobre sua resposta espectral. Ambas as imagens mostram duas grandes áreas homogêneas com valores de proporção distintos.

A Figura 4.12 apresenta um recorte do mapa de vegetação utilizado por Sestini et al. (2002) que se baseou, por sua vez, no mapa de vegetação do IBGE, de 1993. O mapa do IBGE foi atualizado quanto à nomenclatura e à especificação da composição das áreas de contato. Como pode ser observado na Figura 4.12, a área de trabalho selecionada apresenta os seguintes tipos de vegetação:

- Sp - Savana Parque;
- As - Savana Arborizada;
- Da - Floresta Ombrófila Densa Aluvial;
- Db - Floresta Ombrófila Densa Terras Baixas;
- Ds - Floresta Ombrófila Densa Submontana;
- D_agric - Floresta Ombrófila Densa com Agricultura;
- Ab - Floresta Ombrófila Aberta Terras Baixas;
- As - Floresta Ombrófila Aberta Submontana;
- A_agric - Floresta Ombrófila Aberta com Agricultura;
- SO - Contato Savana / Floresta Ombrófila;

Uma comparação entre as Figuras 4.11 e 4.12 mostra que há uma correspondência relativamente boa entre as imagens-fração, especialmente a de vegetação verde, e o mapa de vegetação para as classes Floresta Ombrófila Densa Terras Baixas (Db) e Floresta Ombrófila Aberta Submontana (As). A primeira classe (Db) apresenta pixels com valores de fração vegetação verde variando entre 0,64 e 0,75, enquanto a classe de floresta As apresenta valores de fração entre 0,50 e 0,64 na Figura 4.12b. Esta comparação também mostra que estas duas classes ocupam mais de cinquenta por cento da área total de estudo (Floresta Db com 26% e Floresta As com 26%). A classe

Floresta Ombrófila Aberta Terras Baixas (Ab) tende a ocupar 17% da imagem e a classe Floresta Ombrófila Densa Aluvial (Da), 10%, porém ambas estão distribuídas em áreas de grande antropização na imagem MISR e não apresentaram um padrão bem definido nas imagens-fração do modelo de mistura espectral.

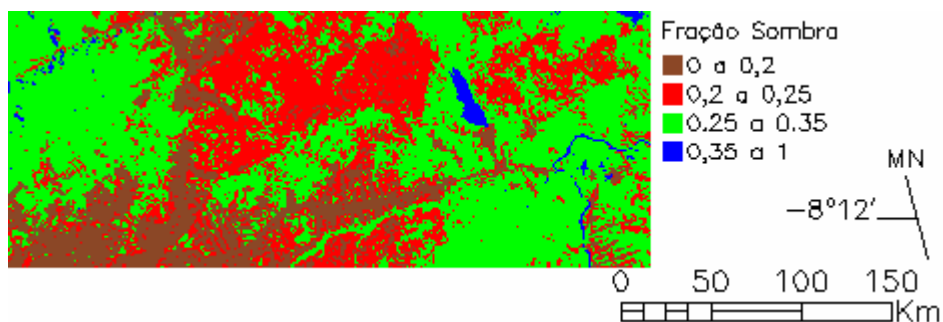
Além das classes Floresta Db e As, o fatiamento das imagens fração vegetação verde e sombra permitiu selecionar áreas de possível regeneração, com grande proporção de vegetação verde e pequenas proporções de sombra e solo. O mapa de desmatamento (Figura 4.13) do Projeto de Estimativa do Desflorestamento Bruto da Amazônia (PRODES), atualizado com o mosaico de imagens da Amazônia do ano 2000, fornece a localização de áreas que estavam desmatadas no ano de 1997 e as novas áreas desmatadas em 2000 (Mello et al., 2003). O cruzamento desses dados com as imagens-fração fatiadas possibilitou a identificação de duas áreas de regeneração: uma mais recente, desmatada em 2000, e uma mais antiga, desmatada em 1997.

A partir da imagem-fração solo foi possível aplicar um limiar simples, de forma a selecionar os pixels com valores de proporção de solo máximos e que representassem uma área homogênea.

Após o fatiamento das imagens-fração e a comparação dos resultados com mapas de vegetação pré-existentes, foram consideradas as seguintes cinco classes de cobertura do terreno para análise subsequente da influência da geometria de visada sobre sua resposta espectral (Figura 4.14):

- Floresta Ombrófila Densa Terras Baixas (Db);
- Floresta Ombrófila Aberta Submontana (As);
- Regeneração recente (Reg_2000);
- Regeneração antiga (Reg_1997); e
- Solo (Solo).

a. Fração Sombra



b. Fração Vegetação Verde

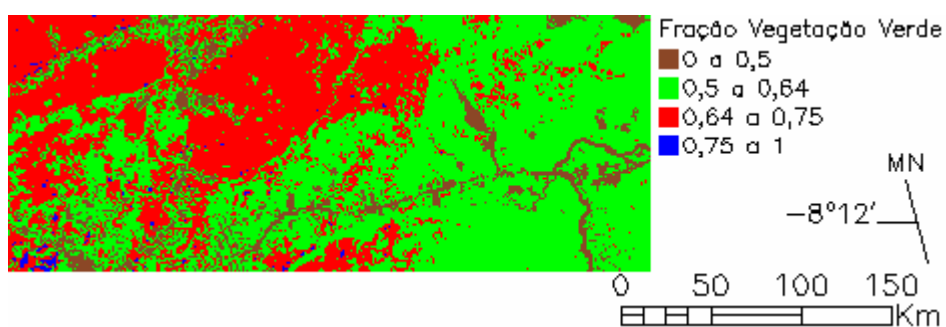


FIGURA 4.11 – Imagens fração sombra (a) e fração vegetação verde (b), fatiadas de forma a separar os grandes domínios da vegetação.

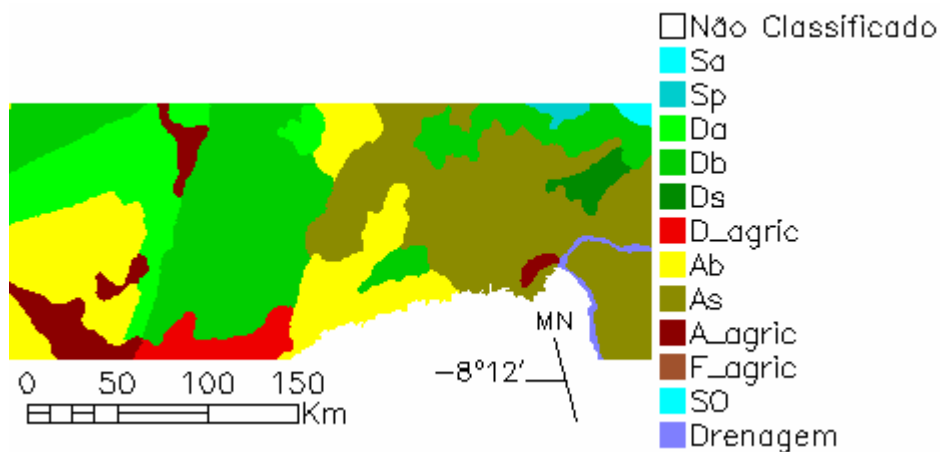


FIGURA 4.12 - Mapa de vegetação do IBGE modificado.
 FONTE: Adaptada de Sestini et al. (2002).

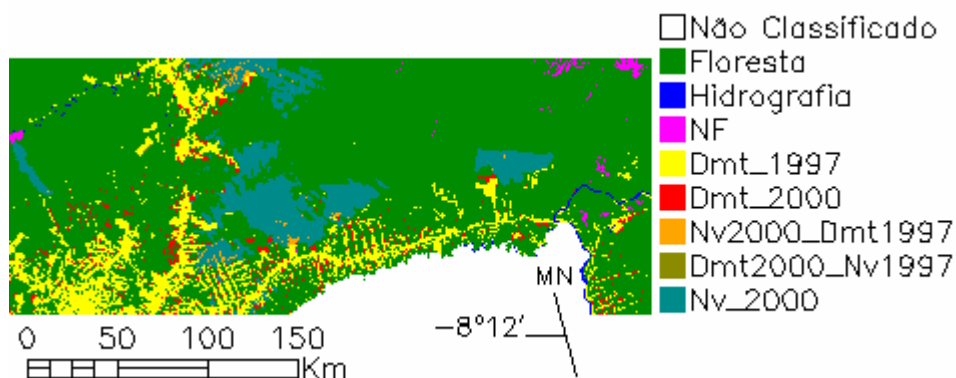


FIGURA 4.13 – Mapa de desmatamento do PRODES.

FONTE: Mello et al. (2003).

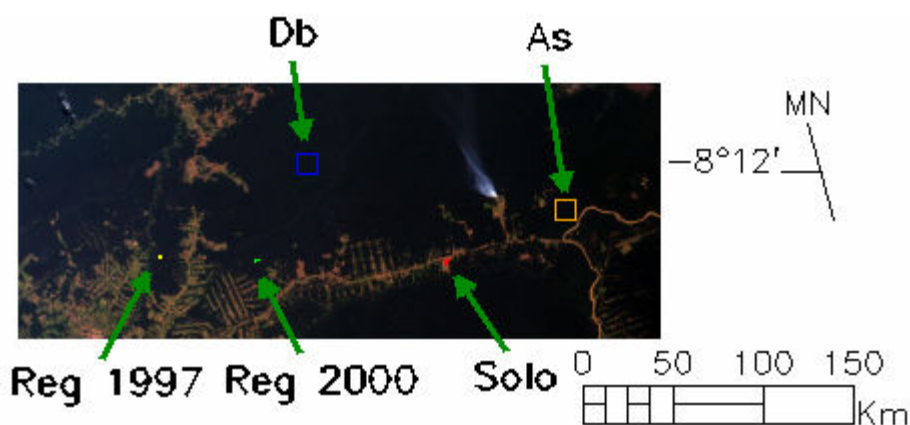


FIGURA 4.14 – Classes de cobertura selecionadas para análise da influência da geometria de visada sobre sua resposta espectral.

4.2 - Influência da Geometria de Visada Sobre a Resposta Espectral das Classes de Cobertura Selecionadas

4.2.1 - Estudo da Variação Angular da Radiância de Topo de Atmosfera

A Figura 4.15 ilustra composições coloridas normais geradas a partir das imagens radiância das nove câmeras do MISR. A primeira coluna representa as câmeras direcionadas para trás (Aa até Da), enquanto a segunda, as câmeras voltadas para frente (Af até Df). A imagem de baixo é a do nadir (An). A partir daí, têm-se, em seqüência, as câmeras que se afastam do nadir em direção às visadas extremas com as imagens de baixo para cima. Na representação das imagens não foi utilizado nenhum tipo de

contraste, isto é, os tons de cinza 0 e 255 de cada componente RGB de cada imagem foram mapeados para os valores mínimo e máximo, respectivamente, de cada imagem.

A posição do Sol era de $36,1^\circ$ de ângulo zenital e $37,4^\circ$ de azimute. Com o Sol nessa posição, as câmeras voltadas para frente, (Af a Df) capturaram a radiação retroespalhada pela superfície, enquanto as câmeras voltadas para trás, (Aa a Da) capturaram a radiação espalhada frontalmente. Nessa posição o Sol produziu reflexão especular nas águas do rio Madeira, o que pode ser visto nos pixels brancos na parte direita das imagens das câmeras Aa ($26,1^\circ$) e Ba ($45,6^\circ$), com maior intensidade na primeira (Figura 4.15).

Observando ainda as nove imagens, é possível constatar que as imagens mais escuras, isto é, que apresentam menor valor médio de radiância integrada para toda a imagem, são as das câmeras voltadas para trás, que capturaram a radiação espalhada para frente, tomando o Sol como referência. A imagem da câmera Aa ($26,1^\circ$), notadamente, foi a que apresentou os menores valores, o que pôde ser constatado inclusive nos gráficos de perfil angular das classes de cobertura e nos perfis angulares das médias de cada câmera, para cada comprimento de onda (Figura 4.16).

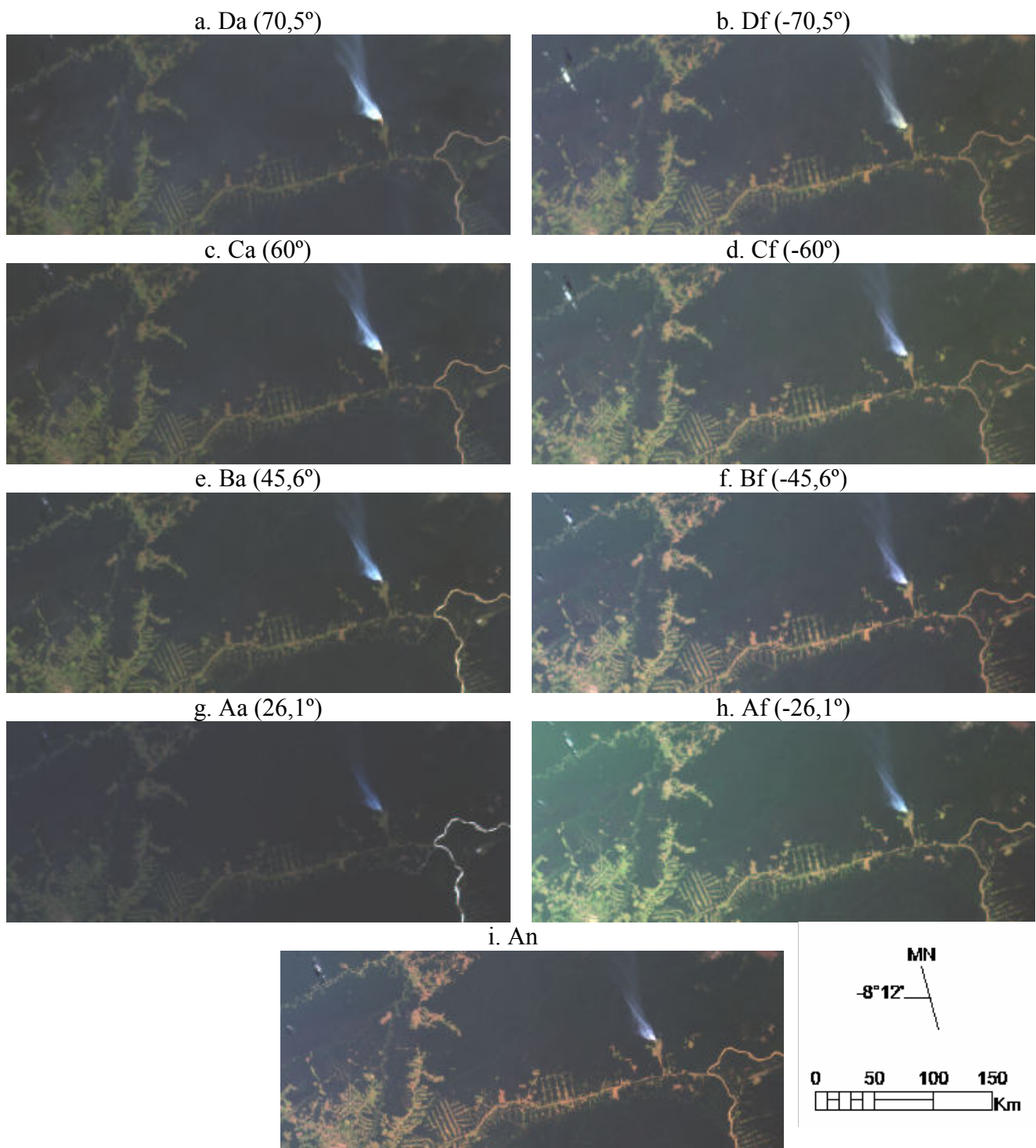


FIGURA 4.15 – Composições coloridas normais obtidas a partir das imagens radiância de topo da atmosfera das nove câmeras do MISR.

A Figura 4.16 mostra os perfis angulares produzidos com os valores médios de radiância, calculados a partir de toda a cena, em cada imagem de cada câmera do MISR.

A influência dos efeitos atmosféricos pode ser facilmente observada no gráfico. Conforme esperado, a contribuição aditiva do espalhamento atmosférico é mais forte na banda MISR do azul, que mostra valores médios de radiância relativamente maiores do que os observados nos intervalos do vermelho e verde. Estes valores tendem a aumentar com o aumento do ângulo de visada ou da trajetória óptica da radiação. O perfil angular para o infravermelho próximo (IVP) possui um formato diferente, pois essa banda é muito menos influenciada pelo efeito aditivo da atmosfera. É importante ressaltar que os efeitos atmosféricos ocorrem em forte associação com os efeitos direcionais e que a distinção entre ambos não é fácil.

A inspeção das imagens das bandas nas diferentes câmaras do MISR confirmou a tendência da Figura 4.16. O valor mínimo de radiância foi observado na câmera Aa ($26,1^\circ$), que coincidiu com a direção oposta ao Sol, no sentido do espalhamento frontal. Para as câmeras extremas os valores tenderam a aumentar em uma razão maior, sendo que na direção do retroespalhamento foram observados valores sempre maiores que os que ocorreram na direção do espalhamento frontal. Para a banda do infravermelho próximo, entretanto, o comportamento foi diferente. O valor mínimo foi observado na câmera Ba ($45,6^\circ$), também próxima à direção contrária à posição do Sol, apenas mais distante do nadir. A partir dessa câmera na direção das câmeras voltadas para frente, contudo, os valores tenderam a aumentar bastante, até a câmera Bf ($-45,6^\circ$), que é uma das mais próximas à direção do Sol, voltando a reduzir o valor médio a partir daí. Este comportamento deve-se, sobretudo, ao fenômeno do *hotspot*.

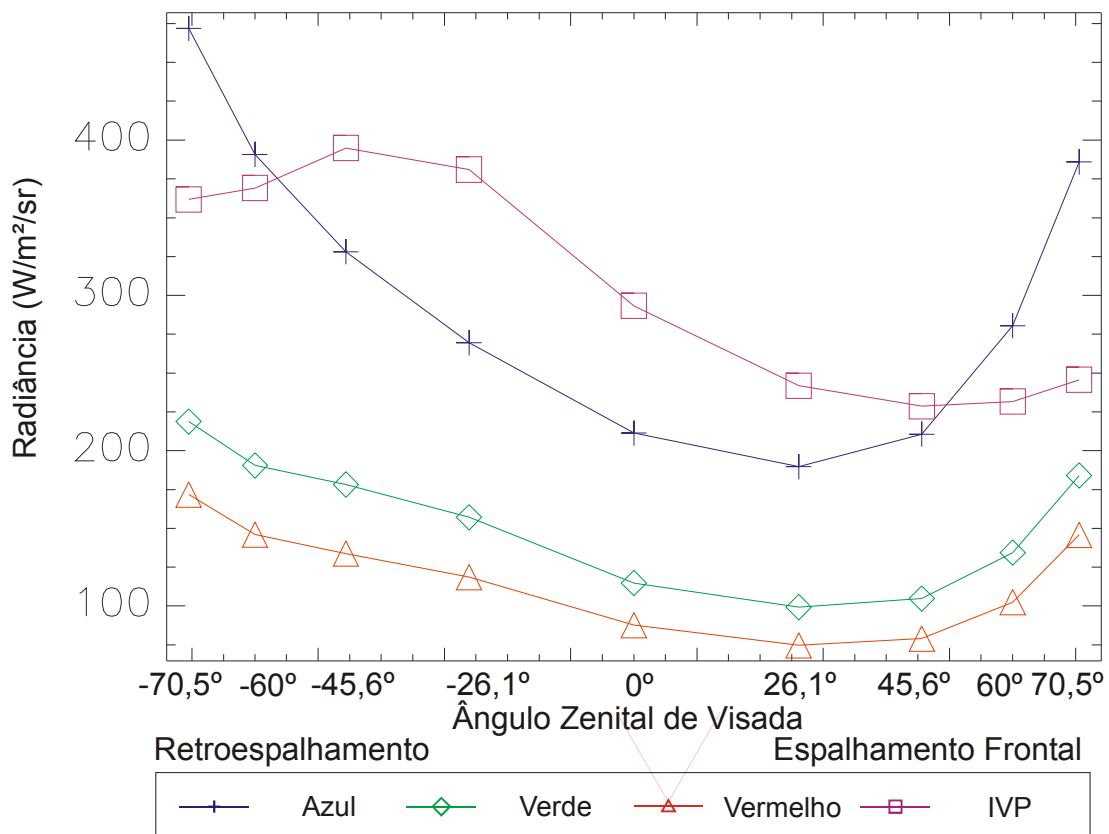


FIGURA 4.16 – Perfis angulares dos valores médios das imagens de radiância de topo de atmosfera, calculados a partir da cena total para diferentes bandas espectrais.

A Figura 4.17 mostra os perfis de radiância do topo da atmosfera para cada banda espectral do MISR e para cada uma das cinco classes de cobertura selecionadas (Floresta Db e As, Regeneração 1997 e 2000, e solo), em função do ângulo de visada das câmaras. Pode-se observar na Figura 4.17a que os perfis relativos à banda do azul apresentaram pouca separação entre as classes. A forma parabólica dos perfis na banda do azul reflete a contribuição aditiva do espalhamento atmosférico, que tende a aumentar do nadir para visadas extremas.

Na banda do verde (Figura 4.17b), o solo apresentou valores de radiância muito mais altos que os da vegetação, para todos os ângulos de visada. Os valores mínimos de radiância ocorreram na câmera Aa (26,1°), o que já havia sido constatado pela análise dos perfis dos valores médios de radiância da cena total. As classes de vegetação foram mais facilmente distinguíveis nas câmaras ao nadir e nas voltadas para frente, sendo que

as duas classes de regeneração apresentaram valores muito próximos ao longo de todos os ângulos de visada na banda do verde. O comportamento da radiância, apesar de influenciado pelo espalhamento atmosférico, apresentou sinais da presença do *hotspot*, fazendo com que a forma do perfil fosse um pouco diferente da observada para a banda do azul. Os valores obtidos para as câmeras Af (-26,1°) e Bf (-45,6°) da banda do verde foram maiores que os esperados se os perfis se comportassem como os da banda do azul, em função do *hotspot*.

Os perfis referentes às classes de cobertura para a banda do vermelho (Figura 4.17c) apresentaram distribuição bastante semelhante à observada para a banda do verde (Figura 4.17b), exceto para o solo, consideradas as câmeras Cf (-60°) e Df (-70,5°), onde os valores médios observados foram bastante próximos aos obtidos para a câmera Bf (-45,6°).

É interessante observar que, apesar das curvas apresentarem formas semelhantes, as escalas dos gráficos são diferentes. Os valores máximos para o azul estão próximos a 480 W/m²/sr, enquanto atingem apenas 250 W/m²/sr para o verde e 300 W/m²/sr para o vermelho, respectivamente. A banda do infravermelho próximo (Figura 4.17d), apesar de apresentar valores máximos próximos a 430 W/m²/sr, mostrou um formato de curva bastante diferente do observado para as outras bandas, com valor máximo na direção do retroespalhamento, entre as câmeras Af e Bf. Uma vez que a banda do infravermelho próximo sofre menos os efeitos aditivos da atmosfera, o comportamento das diversas classes de cobertura nessa banda, para a radiância de topo de atmosfera em todas as câmeras do MISR, é muito parecido com o observado para o fator de reflectância bidirecional.

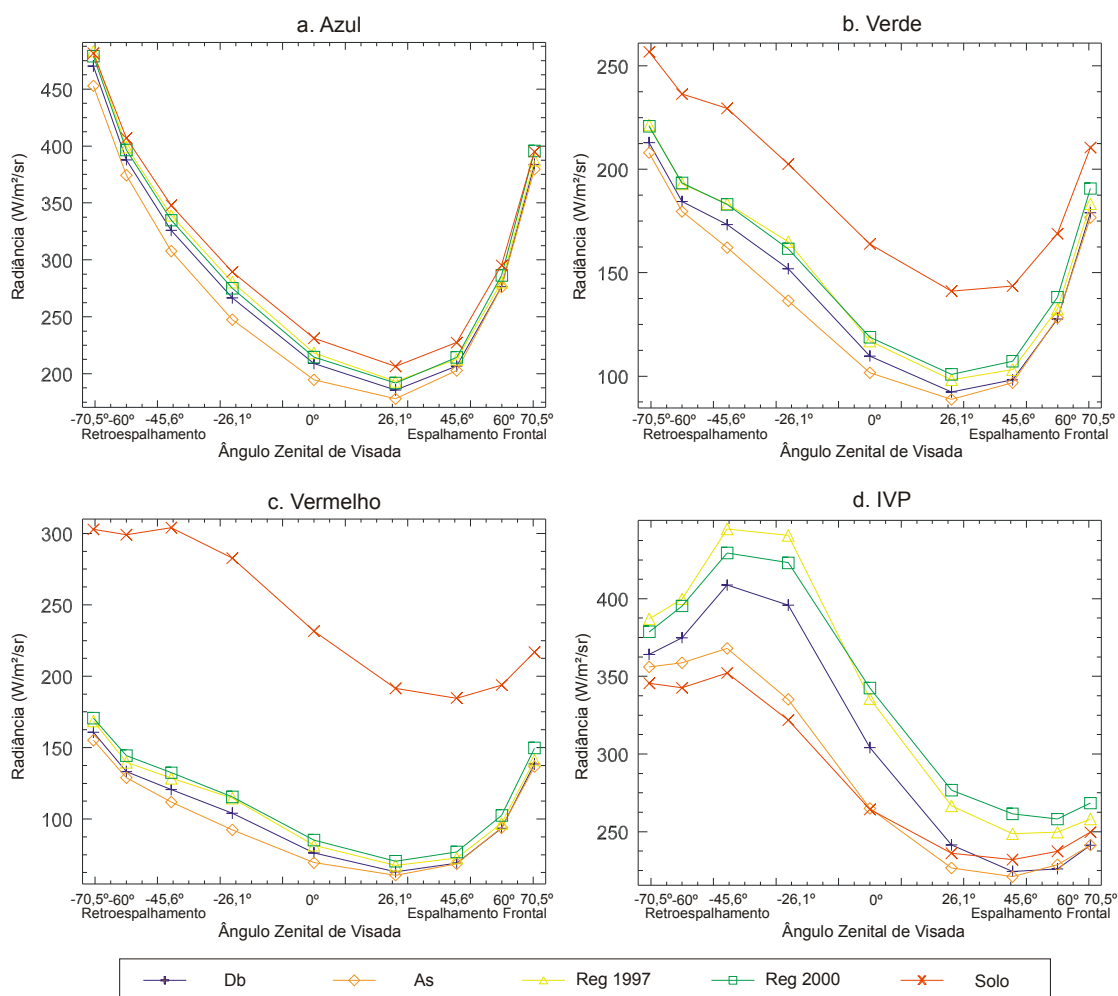


FIGURA 4.17 – Perfis angulares de radiância de topo da atmosfera para cinco classes de cobertura e quatro bandas espectrais do MISR. As abreviações são: Db (Floresta Ombrófila Densa Terras Baixas), As (Floresta Ombrófila Aberta Submontana), Reg 1997 (Regeneração antiga) e Reg. 2000 (Regeneração recente).

A Figura 4.18 permite comparar a resposta das classes de cobertura em cada banda do MISR. Foram representadas apenas as classes de floresta ombrófila densa terras baixas (Db) e solo, uma vez que os perfis das outras classes de vegetação apresentam a mesma relação entre as bandas que a observada para a classe Db.

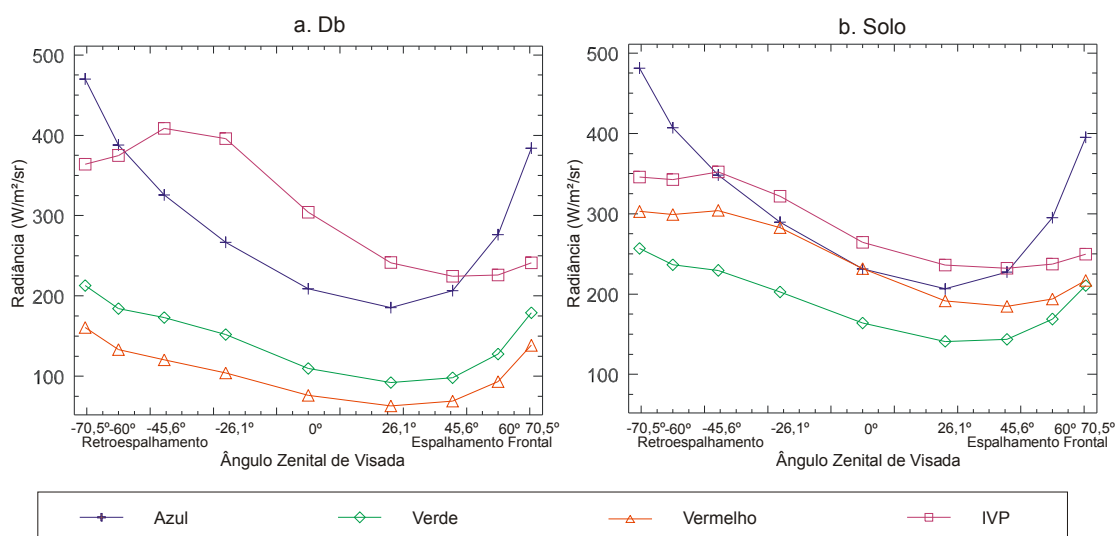


FIGURA 4.18 - Perfis angulares de radiância do topo da atmosfera para duas das cinco classes de cobertura e para todas as bandas espectrais do MISR. As abreviações das classes de cobertura são as mesmas da Figura 4.17.

O comportamento espectral típico da vegetação pode ser observado parcialmente através dos dados da câmera ao nadir na Figura 4.18, com valores de radiância para a banda do verde um pouco maiores que os da banda do vermelho, e valores bem maiores na banda do infravermelho próximo (IVP). O azul apresenta resposta maior que a do verde e a do vermelho, devido ao espalhamento atmosférico. Além disso, os valores de radiância no azul obtidos para as câmeras extremas são maiores que os do IVP, principalmente na direção do espalhamento frontal.

O solo apresenta os perfis angulares das quatro bandas mais próximos entre si do que o observado para a vegetação. A resposta do solo nas bandas do vermelho e do verde são muito maiores que a resposta da vegetação, o que já pôde ser observado nos gráficos da Figura 4.17. É interessante observar que a resposta do solo para as câmeras próximas ao nadir para as bandas do vermelho e azul é quase a mesma. A influência da atmosfera é maior apenas a partir dos 25° de visada fora do nadir, alterando a resposta do azul muito mais que a do vermelho.

A Figura 4.19 mostra a variação da resposta espectral de cada classe, normalizada em relação à resposta da câmara do nadir, em função do ângulo zenital de visada e das bandas do MISR. A Figura 4.19a indica que as variações relativas entre as classes de

cobertura na banda do azul são mínimas, principalmente até os 45° de visada fora do nadir. Nos gráficos das três bandas do visível é possível observar que os dois tipos de regeneração e a floresta Db apresentam variações relativas bastante parecidas.

O gráfico da banda do IVP (Figura 4.19d) foi o que apresentou maior separabilidade entre as classes. Os valores relativos referentes ao retroespalhamento permitiram maior distinção entre as classes para todas as câmeras, em relação ao que pôde ser observado nas outras bandas. Isto se deve ao fato de que o IVP é o comprimento de onda menos influenciado pelo espalhamento atmosférico.

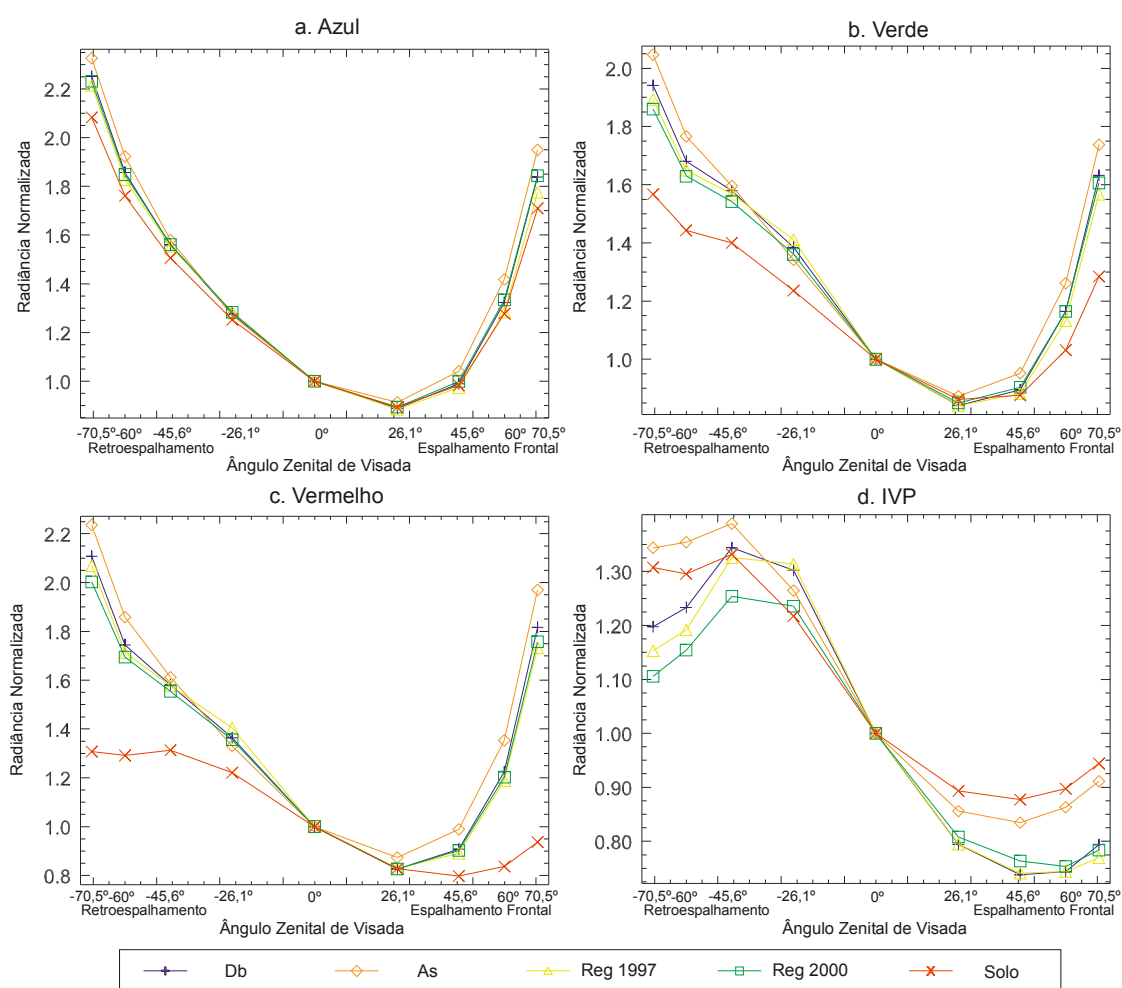


FIGURA 4.19 - Perfis angulares de radiância de topo da atmosfera das cinco classes de cobertura, normalizados em relação à resposta da câmara do nadir, para as bandas do azul (a), verde (b), vermelho (c) e do infravermelho próximo (d) do sensor MISR. As abreviações das classes de cobertura são as mesmas da Figura 4.17.

Quando os perfis são reorganizados por classe de cobertura e não por banda espectral, é possível observar a variabilidade de cada banda para uma determinada classe. A Figura 4.20 apresenta esses perfis, apenas para as classes Db e Solo. Na Figura 4.20a, a inspeção das bandas utilizadas no cálculo do NDVI mostra que a floresta Db apresenta valores normalizados para o IVP sempre menores que os obtidos para o vermelho, conforme o ângulo zenital de visada aumenta. Para o solo (Figura 4.20b), as bandas do vermelho e do IVP apresentam o mesmo comportamento, exceto para as câmeras Aa (26,1°), Ba (45,6°) e Ca (60°), onde a resposta normalizada do IVP é um pouco maior que a do vermelho.

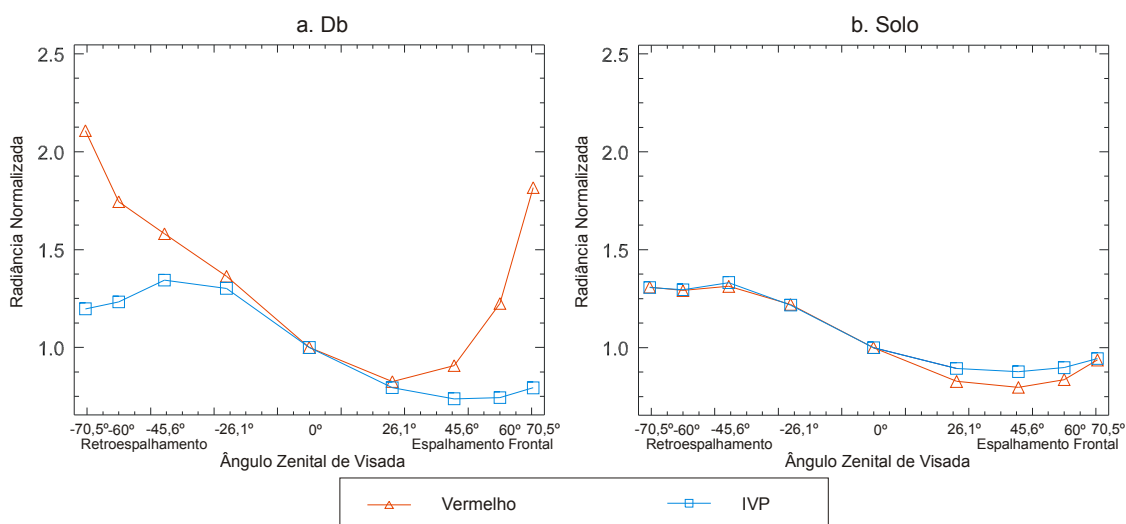


FIGURA 4.20 - Perfis angulares normalizados em relação ao nadir para a radiância de topo de atmosfera, das classes de cobertura Db e Solo exposto, representando as bandas espectrais do vermelho e do IVP do MISR.

As variações nos valores de NDVI das classes de cobertura, calculados a partir dos dados de radiância do topo da atmosfera, em função do ângulo de visada, podem ser vistas na Figura 4.21. Conforme observado, os valores de NDVI para o solo variaram de 0,065 a 0,113. As classes de vegetação, por outro lado, apresentaram valores que variaram de 0,27 a 0,61.

A variação dos valores de NDVI entre as classes de vegetação foi pequena, sendo um pouco maior nos menores ângulos de visada. De fato, conforme esperado, os valores máximos ocorreram ao nadir, diminuindo nas visadas extremas, especialmente na direção do espalhamento frontal. Este comportamento reflete em grande parte a

contribuição aditiva do espalhamento atmosférico, que adiciona uma maior quantidade de radiação à banda do vermelho e produz uma redução nos valores de NDVI. A contribuição atmosférica é maior do nadir para ângulos de visada extremos, em função do aumento da trajetória óptica da radiação. Para ângulos de visada de até 26° do nadir (câmeras Aa, An e Af), o NDVI sofreu pouca alteração, uma vez que nessa faixa angular a variação na espessura óptica da atmosfera praticamente não varia, diminuindo a influência da atmosfera na resposta espectral da superfície e, conseqüentemente, na variação angular do NDVI.

O solo exposto apresentou um comportamento bem característico, com o valor máximo observado para a câmera Ba (45,6°). Para a radiação retroespalhada o valor do NDVI foi sempre muito baixo, apresentando apenas um pequeno aumento para a direção do *hotspot*. Os resultados da Figura 4.21 sugerem um menor impacto dos efeitos atmosféricos sobre o cálculo do NDVI do solo, uma superfície mais clara que a vegetação. Isto provavelmente é devido ao fato de que a maior parte da interferência da atmosfera está relacionada aos efeitos aditivos do espalhamento, que têm um peso muito maior para alvos escuros que para alvos claros.

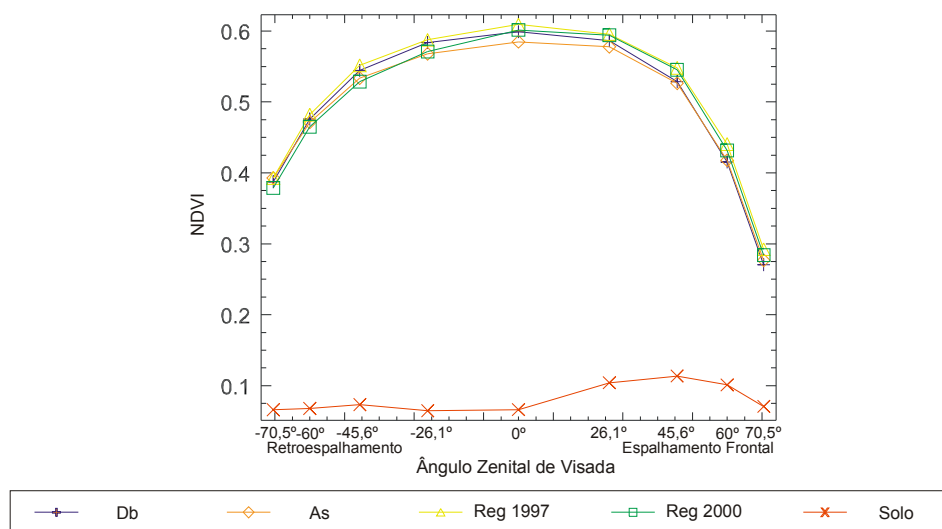


FIGURA 4.21 – Perfis angulares do NDVI para as cinco classes de cobertura, calculado a partir da radiância de topo de atmosfera.

4.2.2 - Estudo da Variação Angular do Fator de Reflectância Bidirecional (BRF)

Outro produto de interesse para o estudo da resposta espectral das classes de cobertura em função da geometria de visada é o fator de reflectância bidirecional (*bidirectional reflectance factor - BRF*). Esse produto foi selecionado devido ao fato de ser o que melhor expressa o *Bidirectional Reflectance Distribution Function* (BRDF), que é a função de distribuição da reflectância bidirecional de superfície.

A Figura 4.22 ilustra as imagens BRF geradas pelas nove câmeras do MISR, com resolução espacial de 1,1 km. A primeira coluna representa as câmeras direcionadas para trás (Aa até Da), enquanto a segunda, as câmeras voltadas para frente (Af até Df). A imagem de baixo é a do nadir. A partir daí, têm-se em seqüência as câmeras que se afastam do nadir em direção às visadas extremas com as imagens de baixo para cima.

O aspecto quadriculado das imagens pode ser explicado pelo processamento de geração dos produtos BRF. Uma discussão detalhada do processamento realizado na geração desse produto é apresentada no Apêndice B. Entretanto, de forma resumida, pode-se dizer que esse aspecto é devido ao uso de grupos de 16x16 pixels (17,6 x 17,6 quilômetros) para a geração do modelo atmosférico. Esse modelo atmosférico pode utilizar como fonte de dados parâmetros coletados pelo AVHRR/NOAA, fornecidos com 16 quilômetros de resolução espacial (Diner et al., 1999 e Lewicki et al., 1999), vindo daí a motivação do uso de células de 16 x 16 pixels para a correção atmosférica.

Na representação das imagens não foi utilizado nenhum tipo de contraste, isto é, os tons de cinza 0 e 255 de cada componentes RGB de cada imagem foram mapeados para os valores mínimo e máximo, respectivamente, de cada imagem.

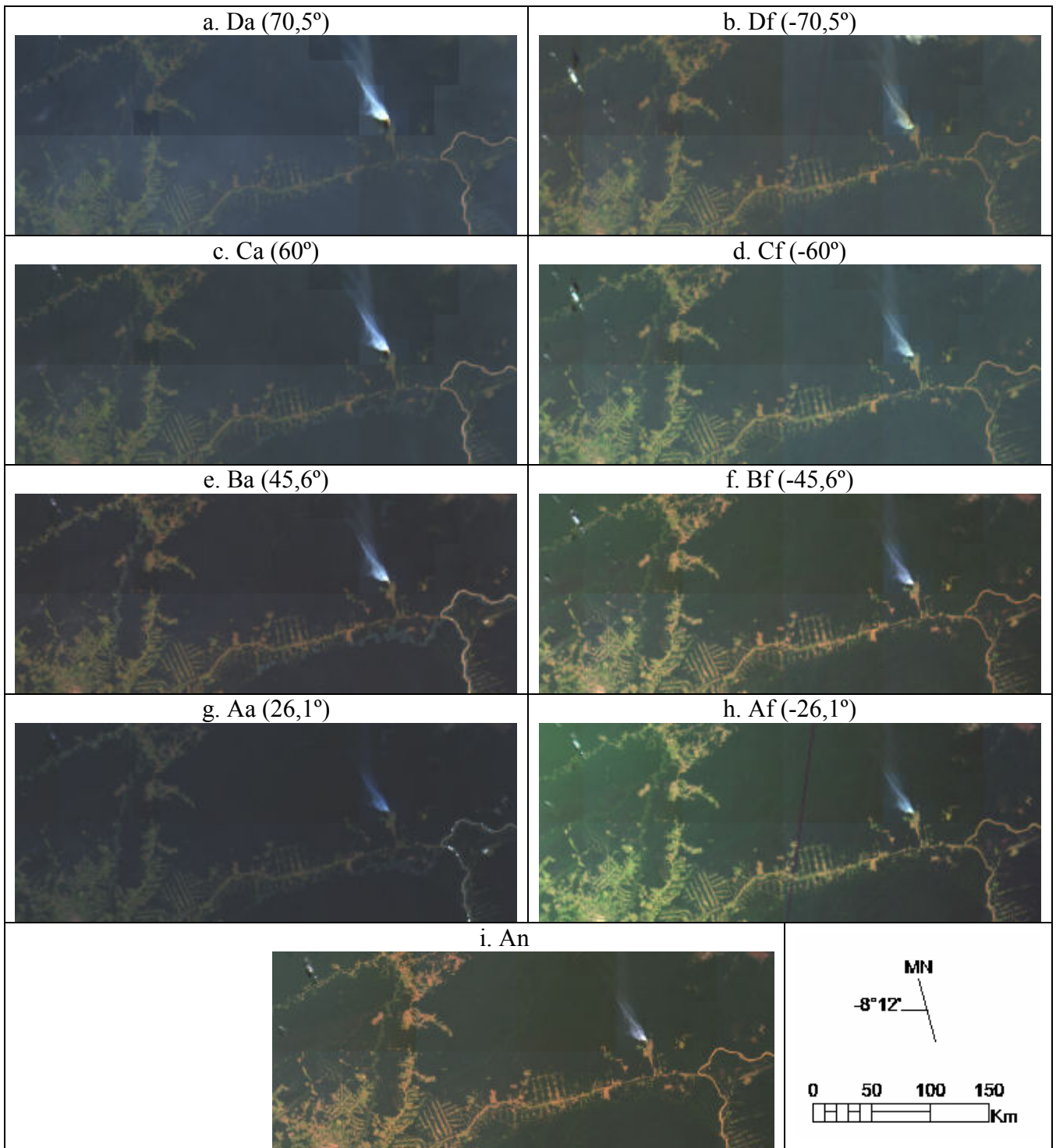


FIGURA 4.22 – Composições coloridas normais obtidas a partir das imagens Fator de Reflectância Bidirecional (BRF) das nove câmeras do MISR.

A partir das imagens da Figura 4.22 foram gerados diversos gráficos, com os perfis angulares das classes de cobertura selecionadas anteriormente. A Figura 4.23 mostra os

perfis angulares das quatro classes, em função do ângulo zenital de visada e da banda espectral do MISR. Os gráficos estão em escalas diferentes, de forma a otimizar a representação das feições retratadas em cada gráfico.

Para a banda espectral do azul (Figura 4.23a), todas as classes apresentaram valores máximos para a câmera Da ($70,5^\circ$), referente à visada extrema na direção do espalhamento frontal. Para as bandas do verde (Figura 4.23b) e do IVP (Figura 4.23d), os valores máximos ocorreram para a câmera Bf ($-45,6^\circ$), que é a câmera que coincide com a posição do Sol, no sentido do retroespalhamento, exceto para a floresta As e para o solo, que apresentaram valores máximos para a câmera Df ($-70,5^\circ$). A banda do vermelho (Figura 4.23c) apresentou valores máximos para a câmera Df ($-70,5^\circ$), exceto para o solo, onde o valor máximo ocorreu na câmera Bf ($-45,6^\circ$). Na verdade, o aspecto mais importante é que em todos os perfis foi possível perceber a presença do *hotspot*, ainda que o valor máximo das curvas tenha ocorrido em outra câmera. Na direção das câmeras Af ($-26,1^\circ$) e Bf ($-45,6^\circ$), ocorre um pico nos perfis angulares BRF, que é devido ao sombreamento mínimo observado na direção do Sol, fenômeno este conhecido como *hotspot*.

É possível observar, a partir dos gráficos da Figura 4.23, que a regeneração mais nova (Reg 2000) apresenta sempre valores de BRF maiores que os observados para a regeneração mais antiga (Reg 1997), no intervalo entre as câmeras An e Da ($70,5^\circ$), isto é, para a radiação ao nadir e espalhada frontalmente. Na direção do retroespalhamento ocorre o inverso, a regeneração mais antiga apresenta valores de BRF maiores que a regeneração mais nova. Este comportamento mantém-se para as bandas do azul, verde e IVP. Na banda do vermelho o perfil angular da regeneração mais nova está sempre acima do perfil da mais antiga.

As duas classes de cobertura de floresta (Db e As) apresentam também um comportamento característico. Para a faixa espectral do visível e câmeras mais próximas ao nadir (Aa, An, Af e Bf), a floresta As apresentou valores de BRF médios menores que os observados na floresta Db. Para as outras câmeras (Da, Ca, Ba, Cf e Df), o comportamento se inverteu, com a resposta da floresta As sendo maior que a da floresta Db. Para o IVP, por outro lado, o perfil angular da floresta Db esteve sempre acima do

perfil da floresta As devido, possivelmente, à maior quantidade de biomassa presente na classe Db.

Pôde ser observado, da análise dos gráficos da Figura 4.23, que as duas classes de regeneração apresentaram valores médios de BRF maiores que as duas classes de floresta, para todas as câmeras e todas as bandas espectrais consideradas.

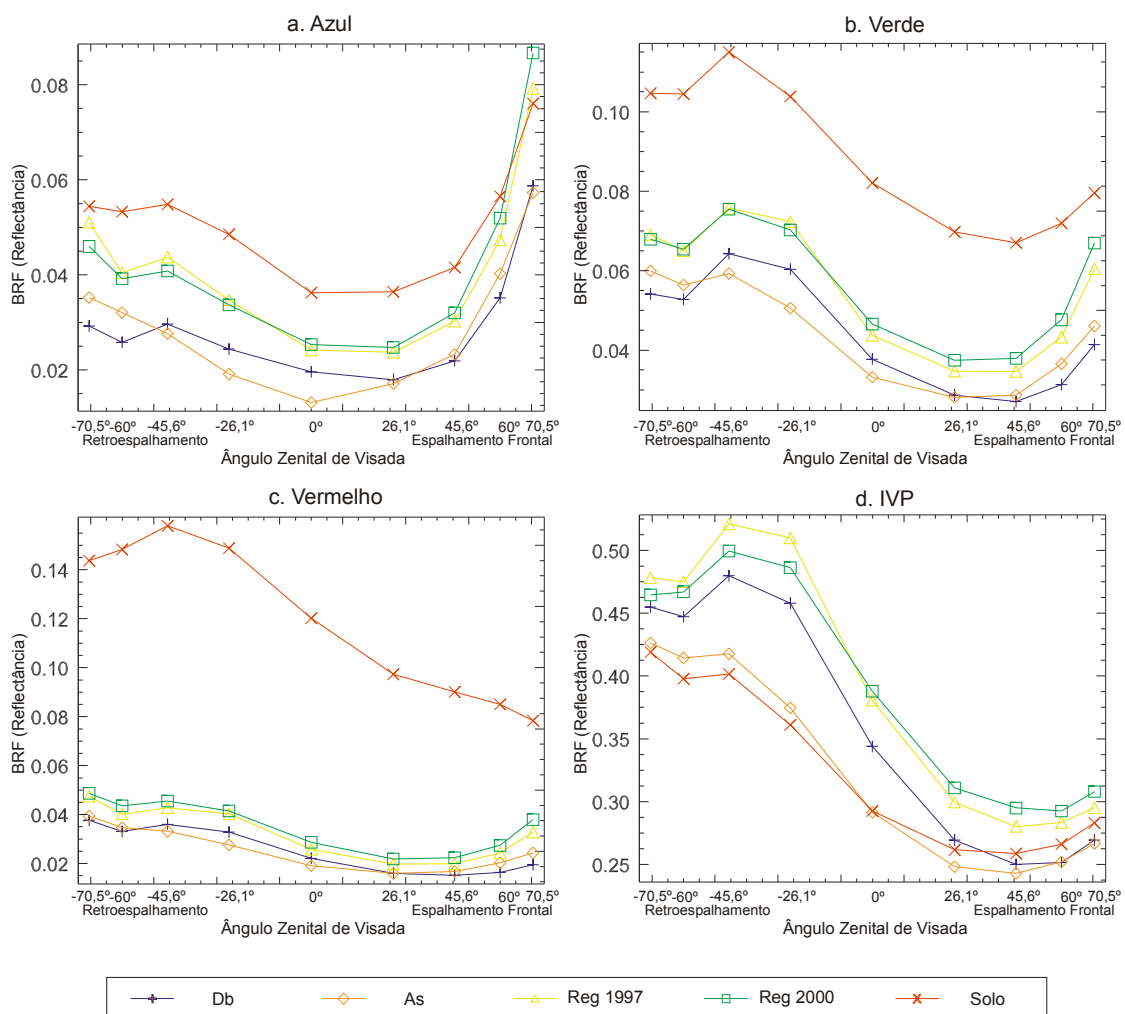


FIGURA 4.23 – Perfis angulares do fator de reflectância bidirecional (BRF) para todas as classes de cobertura e para as bandas do azul (a), verde (b), vermelho (c) e do infravermelho próximo (d) do sensor MISR.

A Figura 4.24 mostra os perfis angulares BRF para as classes de floresta Db e Solo em função da geometria de visada, para todas as bandas espectrais. O comportamento da Floresta Db (Figura 4.24a) foi bastante semelhante para a câmera ao nadir e para as

câmeras voltadas para frente, especialmente para as bandas espectrais do visível. A banda do azul apresentou valores médios maiores que os das demais bandas do visível para ângulos de visada extremos na direção do espalhamento frontal. Para a banda do IVP o comportamento foi também similar aos das bandas do visível, apenas com valores muito maiores, e amplitude da variação absoluta também maior. Um comportamento aproximadamente similar foi observado para o solo (Figura 4.24b).

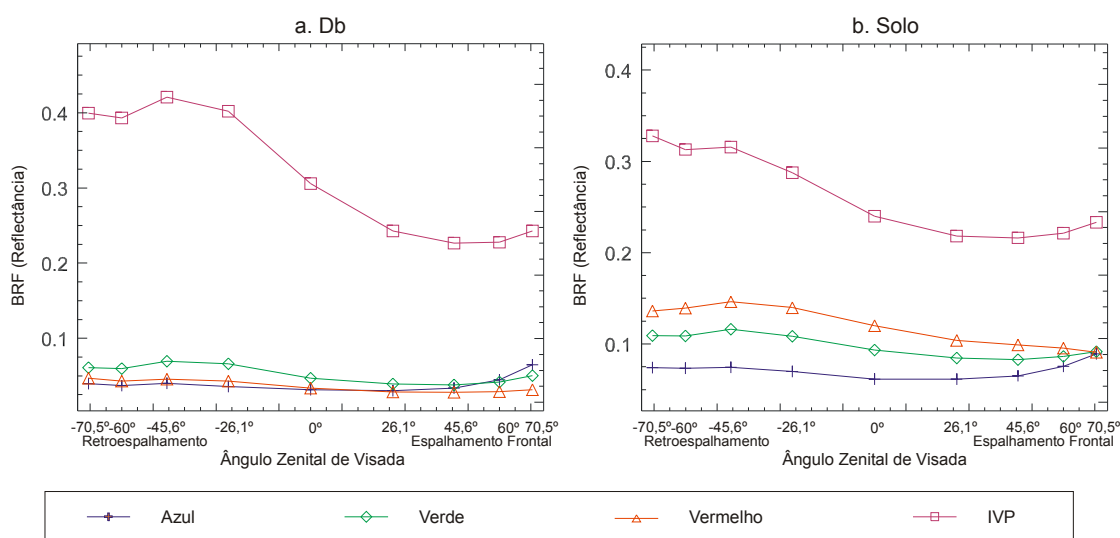


FIGURA 4.24 - Perfis angulares do fator de reflectância bidirecional (BRF) das classes de cobertura Floresta ombrófila densa terras baixas (Db) (a) e solo (b), para as bandas espectrais do MISR.

A Figura 4.25 ilustra os perfis angulares das cinco classes de cobertura, para cada banda do MISR, normalizados em relação ao nadir. A floresta As foi a que apresentou quase sempre os maiores valores relativos, exceto para a visada extrema (Da, 70,5°) do espalhamento frontal, para as bandas do verde e do vermelho. Em seguida vêm-se as duas regenerações, sendo que a mais nova (Reg 2000) apresentou valores relativos um pouco maiores que a mais antiga (Reg 1997), seguidas da floresta Db, que apresentou os menores valores relativos. Nas bandas do verde e do vermelho, o comportamento relativo ao nadir dos perfis angulares das classes de regeneração foi mais parecido com o da floresta As, enquanto que para as bandas do azul e do IVP, com o da floresta Db.

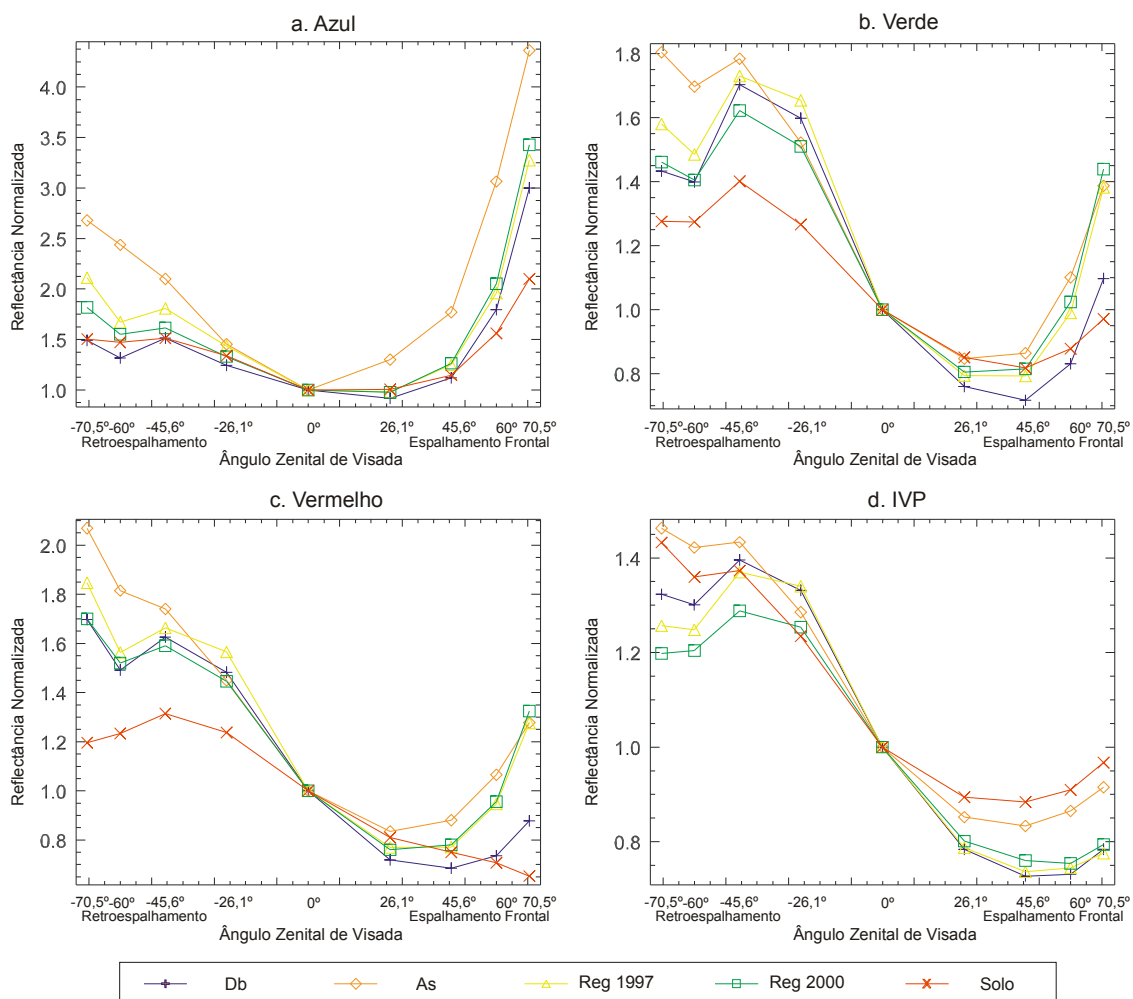


FIGURA 4.25 - Perfis angulares do fator de reflectância bidirecional (BRF), normalizados em relação à resposta da câmera do nadir, para as cinco classes de cobertura e para as bandas do azul (a), verde (b), vermelho (c) e do infravermelho próximo (d) do MISR.

Na direção do retroespalhamento, houve maior variabilidade entre as classes, com a amplitude dos valores relativos maiores que aqueles observados para o espalhamento frontal, para as bandas do verde, vermelho e do IVP. A banda do azul apresentou valores maiores para o espalhamento frontal. As duas classes de regeneração mantiveram seus valores relativos na mesma proporção, com os valores normalizados da regeneração mais antiga maiores que os da regeneração mais recente.

A Figura 4.26 ilustra os perfis estruturais das Florestas Db (porção esquerda do gráfico) e As (porção direita), segundo o DNPM (1976) e Veloso et al. (1991). A Figura mostra, além dos perfis estruturais, a posição do Sol, a direção da radiação espalhada para cada uma das nove câmeras e os perfis angulares das duas classes para as bandas do vermelho e do IVP. A escala dos perfis da banda do vermelho está do lado esquerdo do gráfico, enquanto a escala da banda do IVP está do lado direito.

A Figura 4.26 permite observar a influência do sombreamento mútuo na resposta espectral nas duas bandas, em função do ângulo zenital de visada. Ambas as classes de floresta apresentam valor máximo para a direção do retroespalhamento.

Como também pode ser observado na Figura 4.26, a direção do espalhamento frontal foi dominada pela sombra. Todas as câmeras voltadas para trás, que capturaram a radiação espalhada frontalmente, apresentaram valores médios de reflectância bidirecional menores que os observados para o retroespalhamento, devido ao sombreamento. Uma vez que as duas classes apresentam cobertura completa do solo, ocorre somente o sombreamento mútuo, e não o sombreamento simples do solo pela vegetação.

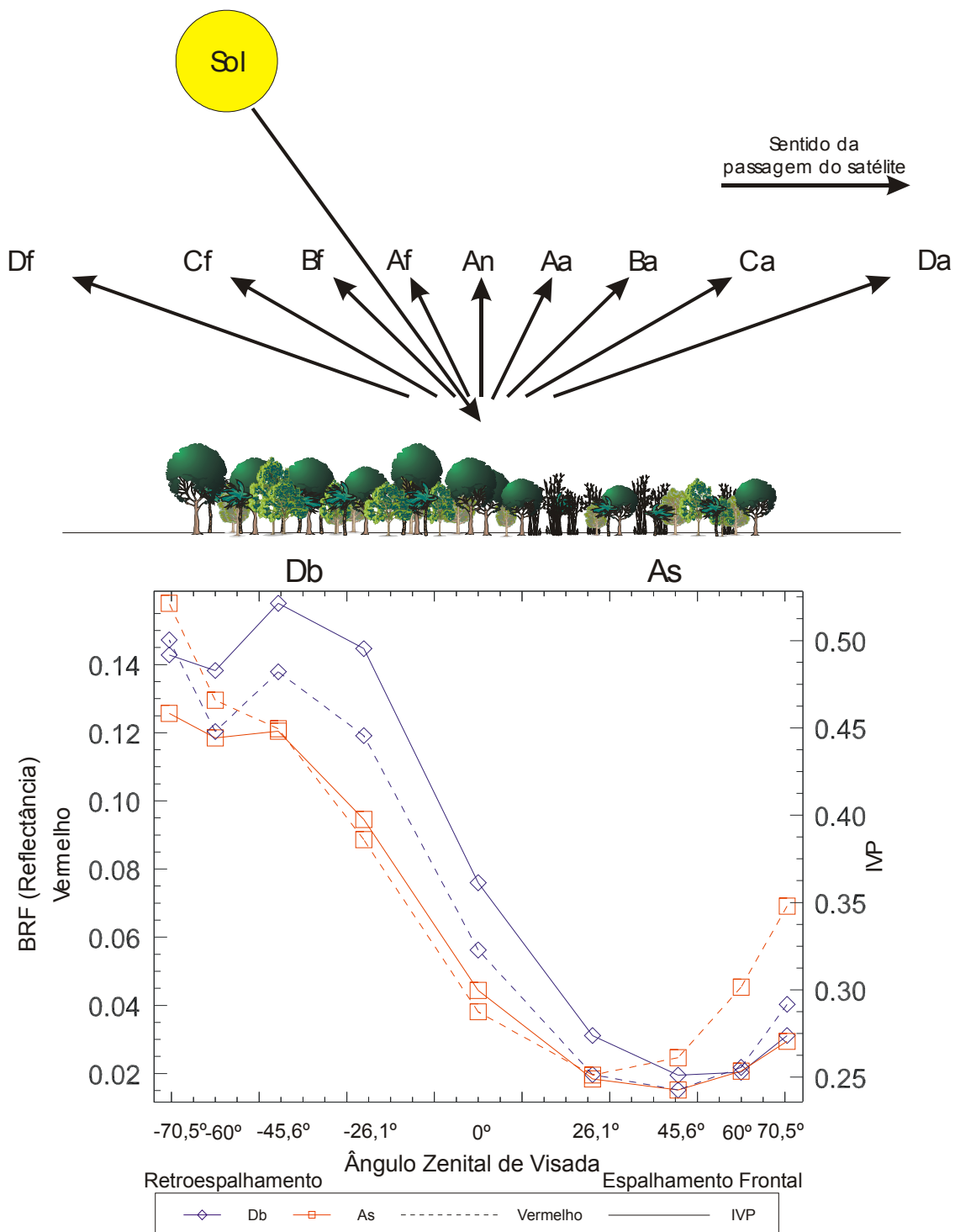


FIGURA 4.26 – Perfil estrutural das Florestas Ombrófila Densa Terras Baixas (Db) e Ombrófila Aberta Submontana (As), com a posição do Sol, das nove câmeras do MISR e os perfis angulares BRF para as bandas espectrais do vermelho e IVP.

A floresta ombrófila densa (Db) apresenta um comportamento angular característico em relação à floresta aberta (As), que os perfis estruturais ajudam a explicar. A floresta densa apresenta muito mais biomassa que a aberta, o que é observado pela maior reflectância na banda do IVP. Nelson et al. (2002) mostraram que a floresta aberta chega a apresentar de 30% a 50% menos biomassa que a floresta densa. Para a banda do vermelho, por outro lado, a floresta densa apresentou valores maiores apenas nas visadas próximas ao nadir, como foi visto anteriormente. As visadas extremas, nas duas direções, apresentaram valores maiores para a floresta aberta, e não para a densa. A dimensão do efeito foi maior no sentido do espalhamento frontal. A mais provável causa para esse comportamento é a presença de sombra, muito mais influente na banda do vermelho, em relação ao IVP, e para a floresta densa, em relação à floresta aberta.

A Figura 4.26 permitiu ainda observar que para as câmeras Bf (-45,6°) e Ba (45,6°) ocorre a maior diferença entre as respostas espectrais das duas classes de floresta. Este comportamento pôde ser extrapolado para toda a cena, o que está ilustrado na Figura 4.27, gerada a partir do fatiamento das imagens-diferença entre as câmeras Bf (-45,6°) e Ba (45,6°), para o vermelho e o infravermelho próximo. A banda do vermelho (Figura 4.27a) permitiu boa separação entre as classes de cobertura de floresta ombrófila aberta submontana (laranja), floresta ombrófila densa terras-baixas (azul), áreas de possível regeneração (verde) e áreas com maior incidência de solo exposto (vermelho). A banda do infravermelho próximo (Figura 4.27b) ofereceu boa separabilidade entre os dois tipos de floresta ombrófila, mas trouxe alguma confusão entre a floresta As, em laranja, e o solo, em vermelho. A regeneração, em verde, foi confundida hora com a floresta Db (azul), hora com a floresta As (laranja).

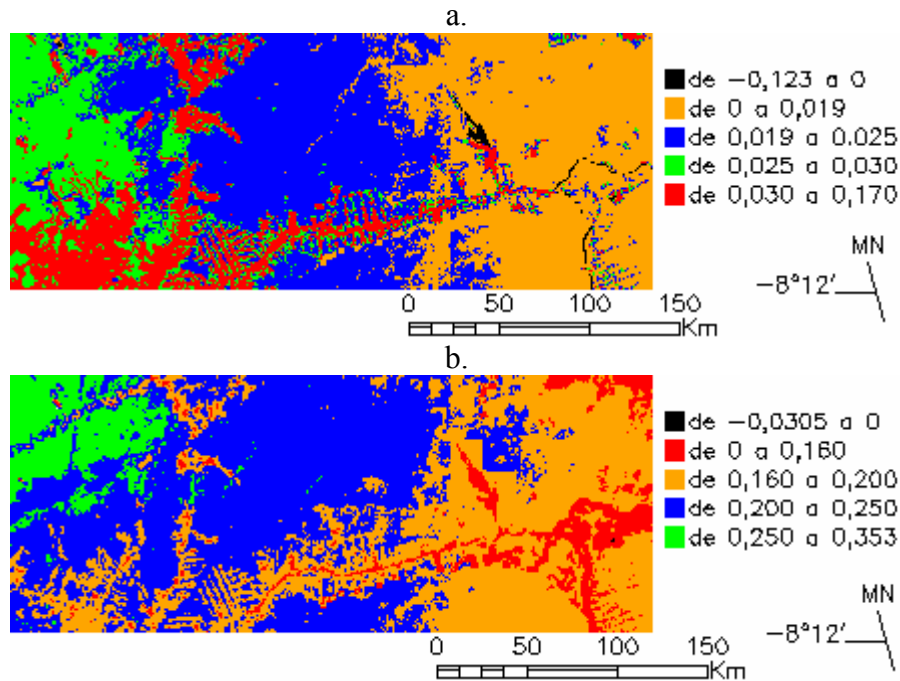


FIGURA 4.27 – Fatiamento realizado sobre as imagens-diferença BRF entre as câmeras Bf (-45,6°) e Ba (45,6°), para as Bandas espectrais do Vermelho (a) e do Infravermelho próximo (b).

A Figura 4.28 ilustra os perfis angulares NDVI gerados a partir dos dados BRF para todas as câmeras e todas as classes de cobertura. Os perfis NDVI das classes de vegetação apresentaram, todos, comportamento semelhante. Esse comportamento foi bastante diferente do observado para o solo exposto. Todas as classes de vegetação apresentaram NDVI máximo para a câmera Aa (26,1°), com valores progressivamente menores para visadas extremas. As duas regenerações apresentaram valores mínimos para a visada extrema no sentido do espalhamento frontal, o que significa que o perfil foi muito mais côncavo nesse sentido que no sentido do retroespalhamento. As duas florestas apresentaram valor mínimo para a visada extrema no sentido do retroespalhamento, mas com pouca diferença em relação ao espalhamento frontal.

O solo exposto, por outro lado, apresentou valores mínimos muito próximos para as câmeras An e Af (-26,1°), isto é, ao nadir e na direção do retroespalhamento, próximo ao nadir. Valores maiores foram observados com o aumento do ângulo zenital de

visada, com tendência a serem observados índices maiores no sentido do espalhamento frontal. A amplitude máxima obtida em relação ao nadir foi até 3,6 vezes maior que a de qualquer classe de vegetação.

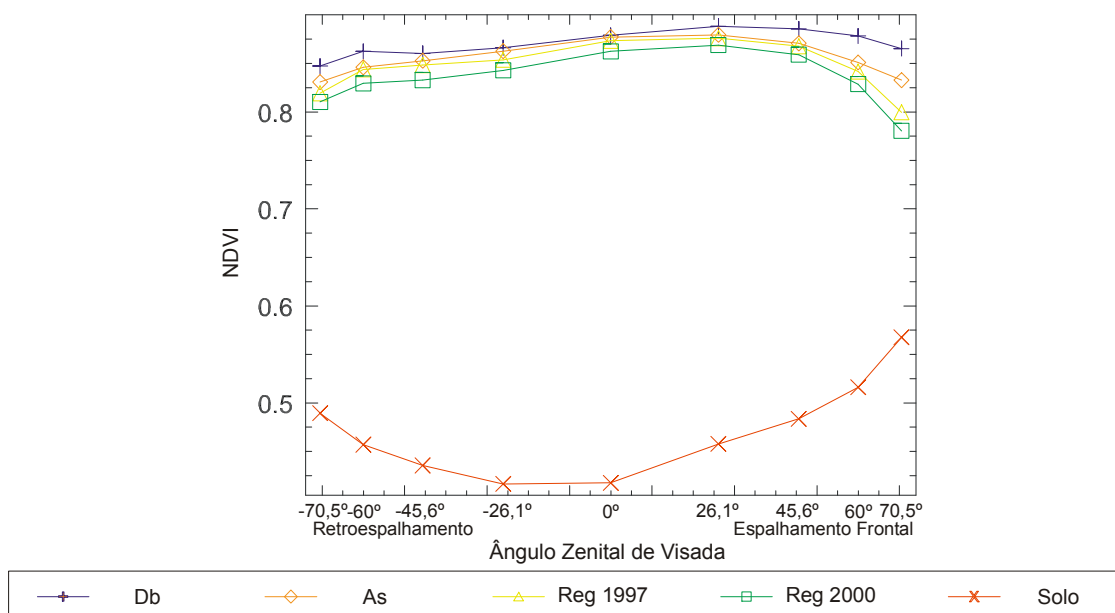


FIGURA 4.28 – Perfis angulares do NDVI para as cinco classes de cobertura, calculados a partir do fator de reflectância bidirecional.

4.2.3 - Comparação dos Resultados Obtidos a Partir da Radiância de Topo de Atmosfera e do Fator de Reflectância Bidirecional

Diversos fatores influenciam a resposta espectral da superfície da Terra, em função da geometria de visada. A radiância capturada por um sensor orbital como o MISR está sob a influência da atmosfera, com a contribuição aditiva ou subtrativa dos seus componentes. A radiação eletromagnética que acaba de deixar a superfície ainda não sofreu essas alterações, mas apenas mudanças causadas apenas pela sua interação com a superfície, refletindo as características físicas, químicas e biológicas dos alvos. O conhecimento da diferença na resposta espectral desses alvos sob essas duas condições pode ajudar a compreender as consequências de utilizar um produto que não passou por nenhum pré-processamento, no lugar de outro, já pré-processado, e corrigido para os efeitos atmosféricos.

A Figura 4.29 mostra, de forma comparativa, os perfis de NDVI obtidos a partir de dados BRF e de radiância de topo da atmosfera, de forma a permitir a visualização das relações entre as classes de cobertura, para os dois produtos. A primeira e mais clara conclusão que se pode chegar é que os valores de NDVI obtidos a partir da radiância de topo de atmosfera são menores que os obtidos com o fator de reflectância bidirecional, em função da contribuição aditiva do espalhamento atmosférico sobre a banda do vermelho. Por exemplo, em geral, as classes de cobertura de vegetação mostram valores de NDVI entre 0,78 e 0,89 quando o índice é calculado a partir do BRF. Quando o índice é calculado a partir da radiância de topo da atmosfera, os valores situam-se entre 0,27 e 0,60. O formato côncavo do perfil de NDVI das classes de vegetação reflete o aumento da influência atmosférica do nadir para a visada extrema em ambas as direções (retroespalhamento e espalhamento frontal), em função do aumento da trajetória óptica da radiação com o aumento do ângulo de visada.

Se fossem utilizados dados corrigidos e não corrigidos para os efeitos atmosféricos simultaneamente em uma análise, seria possível confundir o solo exposto com a floresta primária, em algumas visadas, principalmente entre 45° e 60°. A distinção entre as classes também foi diferente nos dois produtos. As classes de vegetação foram mais facilmente distinguíveis para o BRF que para a radiância, que tendeu a dificultar ainda mais a separação entre as classes para as visadas mais distantes do nadir, nos dois sentidos.

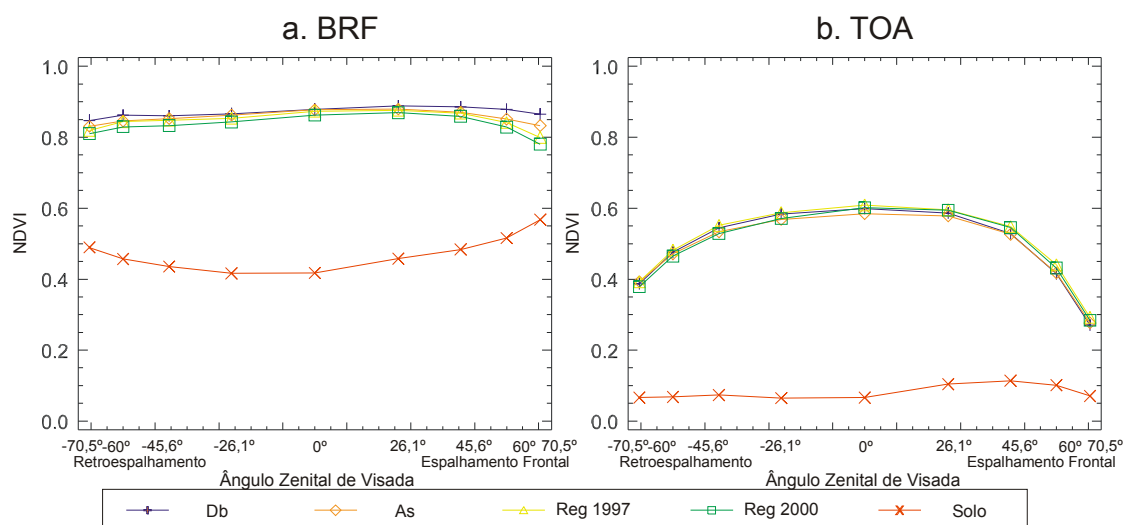


FIGURA 4.29 – Perfis angulares do NDVI das classes de cobertura obtidos a partir de dados do fator de refletância bidirecional (BRF) (a) e da radiância de topo de atmosfera (TOA) (b).

4.3 - Influência da Geometria de Visada na Discriminação de Classes de Cobertura Seleccionadas

Ao longo deste trabalho, mencionou-se o fato de que a variação na geometria de visada é capaz de acrescentar informação ao uso do imageamento apenas ao nadir. Foi, inclusive, mostrada a característica do uso da diferença entre as duas imagens que apresentavam a maior e a menor resposta espectral nas bandas do vermelho e infravermelho próximo (Figura 4.27). A variação do NDVI frente a essa variação angular também foi abordada. O aspecto seguinte e natural dessa análise é a separabilidade entre algumas das classes de cobertura seleccionadas, em função da geometria de visada.

A Figura 4.30 mostra os perfis angulares da distância Euclidiana (Figura 4.30a) e da distância de Mahalanobis (Figura 4.30b) entre as duas classes de cobertura de floresta, Db e As. Os valores de distância foram calculados conforme equações apresentadas por Huberty (1994). A partir das distâncias calculadas para cada câmera do MISR, foi observada a mesma tendência em ambos os perfis, com valor máximo de distância obtido para a câmera Af (-26,1°), e mínimo para a câmera Ba (45,6°). Essas câmeras

coincidem com a direção do *hotspot* (entre as câmeras Af e Bf) e a direção oposta a ele (entre as câmeras Aa e Ba), que é a direção de maior sombreamento. A ocorrência dos maiores valores de distância na direção do *hotspot* e dos menores valores na direção de maior sombreamento mostra que a sombra tende a mascarar o comportamento espectral da vegetação.

A Figura 4.30 permite ainda determinar que a distância Euclidiana entre as duas classes de cobertura (Db e As) é mais de 50% maior para a câmera Af (-26,1°) que para a câmera ao nadir. A distância de Mahalanobis para a mesma câmera é 30% maior que a distância ao nadir. Esses valores indicam que a direção do *hotspot* seria mais favorável à discriminação entre os dois tipos de floresta que o nadir.

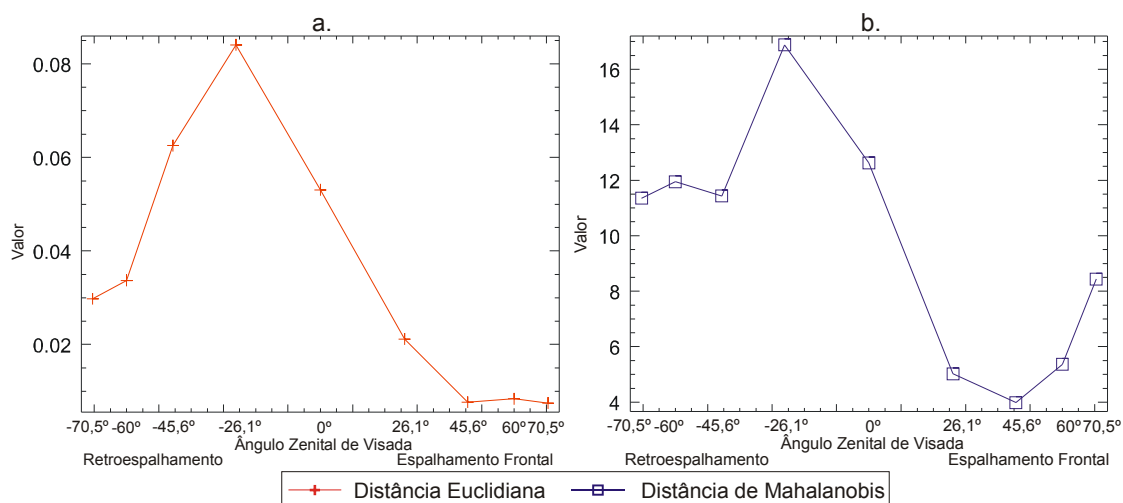


FIGURA 4.30 – Perfil angular da distância Euclidiana (a) e da distância de Mahalanobis (b) entre as classes de cobertura de floresta Db e As, para o fator de reflectância bidirecional (BRF).

A Figura 4.31a apresenta a diferença entre os valores de BRF para as duas classes de cobertura consideradas nesta parte do estudo (Db e As), para cada câmera do MISR. Pode-se observar que a banda espectral do infravermelho próximo apresentou valores muito maiores que os das outras bandas para todas as câmeras, exceto as câmeras extremas na direção do espalhamento frontal. O comportamento do infravermelho próximo nesse gráfico mostra que sua contribuição foi a maior para a determinação dos valores de distância Euclidiana e de Mahalanobis observados na Figura 4.30. As bandas espectrais na faixa do visível, além de valores muito menores que os obtidos para o

infravermelho próximo, apresentaram valores positivos da diferença entre Db e As apenas para as câmeras Bf (-45,6°), Af (-26,1°) e An (nadir). A Figura 4.31b apresenta os mesmos perfis da Figura 4.31a, agora normalizados em relação à diferença ao nadir. Nesse gráfico observa-se que o infravermelho próximo, apesar de apresentar as maiores amplitudes de diferença entre Db e As, varia em relação ao nadir com menor amplitude que as outras bandas, para quase todos ângulos de visada considerados.

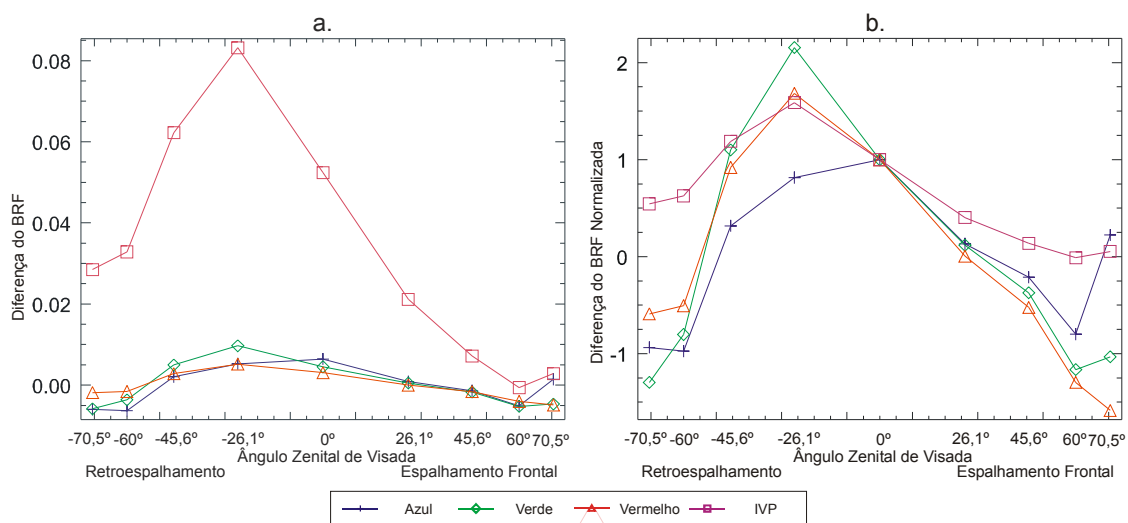


FIGURA 4.31 – Perfis angulares das diferenças entre os valores médios de BRF para as classes de cobertura de floresta Db e As (a), e normalizados em relação ao nadir (b).

A Figura 4.32 mostra o perfil das diferenças entre as classes de cobertura Db e As, para o NDVI. A escala do gráfico mostra que a amplitude da variação da diferença do NDVI é da ordem de 0,030 para a câmera Da. Considerando que esse valor está relacionado a valores de NDVI próximos a 0,85, a diferença pôde ser considerada não significativa. Mesmo para valores tão pequenos, a diferença entre os valores médios das duas classes de cobertura para a câmera ao nadir foi o menor de todos, sendo praticamente igual a zero.

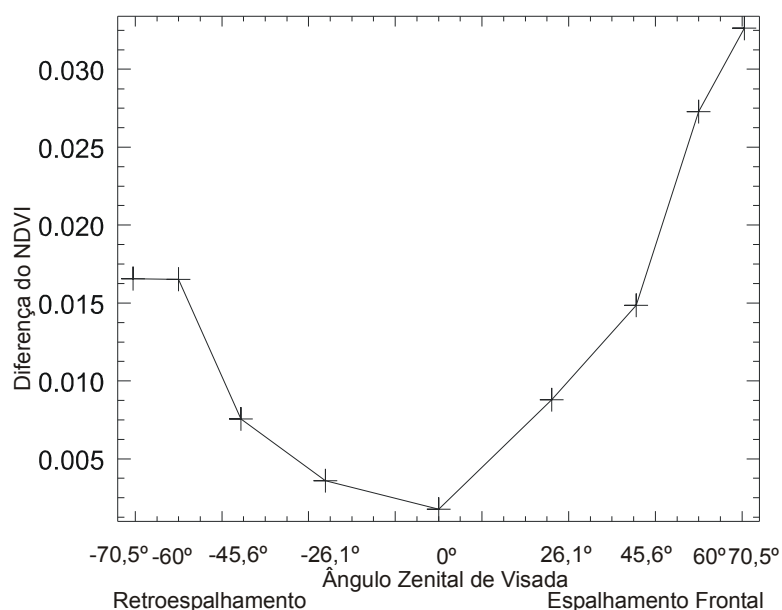


FIGURA 4.32 – Perfil angular da diferença do NDVI entre as classes de cobertura de floresta Db e As, a partir das nove câmeras do MISR e do fator de reflectância bidirecional (BRF).

Uma vez que se conhece o comportamento da separabilidade espectral entre as classes de cobertura de floresta em função da geometria de visada, é possível avaliar alguns algoritmos de classificação supervisionada de uso comum na comunidade científica, quando aplicados a imagens obtidas de diferentes visadas. A Figura 4.33 apresenta o grau de precisão geral dos classificadores de Máxima Verossimilhança e da Distância de Mahalanobis, em função do ângulo zenital de visada. A diferença entre os dois classificadores é que o da Distância de Mahalanobis considera que todas as classes presentes na imagem possuem a mesma matriz de covariância, enquanto que o classificador de Máxima Verossimilhança presume apenas que cada classe apresenta distribuição normal em cada banda espectral. A precisão dos classificadores foi calculada usando 50 novos pixels extraídos das imagens de cada uma das câmeras.

O desempenho de ambos os classificadores foi melhor na câmera Af (-26,1°). A precisão geral foi de 2% a 3% maior nesta câmera, em relação ao nadir. O pior desempenho ocorreu nas câmeras Ba (45,6°) e Ca (60°), para os classificadores da Distância de Mahalanobis e Máxima Verossimilhança, respectivamente (Figura 4.33). O desempenho dos classificadores foi 32% e 22% pior que o desempenho obtido ao nadir.

De maneira geral, o uso de câmeras com visadas relacionadas ao retroespalhamento proporcionam melhor desempenho que as relacionadas ao espalhamento frontal.

Uma explicação possível para esse fato é a influência normalizadora da sombra, que faz com que as duas classes de floresta As e Db apresentem um comportamento espectral bastante semelhante na direção do espalhamento frontal. Esta influência da sombra reduz a separabilidade entre estas classes, comprometendo o desempenho de alguns algoritmos classificadores supervisionados.

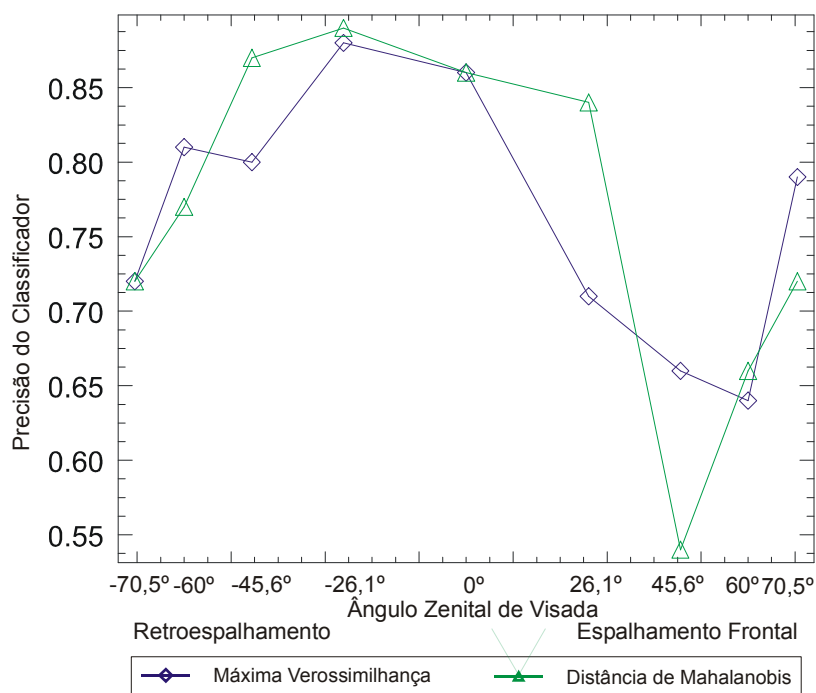


FIGURA 4.33 – Perfis angulares representando a precisão dos classificadores de Máxima Verossimilhança e da Distância de Mahalanobis, aplicados sobre as imagens BRDF de cada uma das nove câmeras MISR.

CAPÍTULO 5

CONCLUSÕES

Em relação à caracterização dos componentes da cena MISR, a partir da geração e análise de um modelo de mistura espectral, pôde-se concluir que:

- 1) O processamento para seleção de membros de referência, através da aplicação seqüencial das técnicas MNF, PPI, visualizador n -dimensional de pixels, diagrama de espalhamento bidimensional e análise visual da imagem foi realizado satisfatoriamente sobre a imagem radiância de topo de atmosfera com 275 metros de resolução espacial. Foram selecionados membros de referência, que permitiram gerar um modelo de mistura espectral com valores de proporção adequados à cena imageada nos produtos de 275 metros e 1100 metros de resolução espacial;
- 2) O fatiamento das imagens fração sombra e vegetação verde e sua comparação com mapas de vegetação disponíveis permitiram selecionar dois grandes domínios de floresta (Floresta Ombrófila Densa Terras Baixas e Floresta Ombrófila Aberta Submontana) para estudos angulares subsequentes, além de solo e de duas pequenas áreas de regeneração com características distintas (Regeneração 1997 e Regeneração 2000). Diferentemente do que é normalmente observado em outros trabalhos (Shimabukuro e Smith, 1991), o fatiamento da fração vegetação verde forneceu melhores subsídios à seleção de classes de cobertura que o fatiamento da fração sombra.

Em relação ao estudo da influência da geometria de visada sobre a resposta espectral e sobre o cálculo do NDVI de componentes de cena da Amazônia, pôde-se concluir que:

- 1) A análise dos perfis angulares extraídos das imagens das nove câmeras do MISR para a radiância de topo de atmosfera, permitiu observar o papel da atmosfera, quando associada à resposta da superfície, na variação da radiância em função da geometria de visada. A faixa espectral do visível foi a mais afetada pela atmosfera, uma vez que todos os perfis angulares de todas as classes de cobertura para as três bandas do visível apresentaram o mesmo

comportamento, com valor mínimo na direção do espalhamento frontal, próximo ao nadir, na câmera Aa (26,1°). Valores de radiância crescentes foram observados a partir dessa câmera, com o máximo observado na direção do espalhamento frontal, para a câmera de visada extrema. Esse aumento na radiância, capturada pelas câmeras do MISR com o aumento do ângulo de visada, deve-se ao aumento da espessura óptica da atmosfera, com o conseqüente aumento do espalhamento atmosférico da radiação nos menores comprimentos de onda. A banda do infravermelho próximo não sofreu alteração significativa;

- 2) Os valores de NDVI das classes de cobertura vegetal, calculados a partir da radiância do topo da atmosfera, foram maiores próximos ao nadir e diminuíram em ambas as direções de visada com o aumento do ângulo de visada, porém com uma redução mais acentuada na direção do espalhamento frontal. Este comportamento é explicado principalmente pela contribuição aditiva do espalhamento atmosférico sobre a banda do vermelho, cujo efeito é mais intenso com o aumento do ângulo de visada ou da trajetória óptica da radiação detectada pelo sensor. Além disso, a redução mais acentuada do NDVI na direção do espalhamento frontal pode ser explicada pela diminuição relativa na radiância da banda do infravermelho próximo produzida pela ação de efeitos direcionais mais intensos em ângulos de visada superiores a -45° (aumento da resposta na banda do vermelho e diminuição na do IVP). Por outro lado, o solo apresentou valores de NDVI sutilmente maiores na direção do espalhamento frontal, em função da contribuição aditiva sobre as bandas do vermelho e do infravermelho próximo do espalhamento atmosférico e dos efeitos direcionais associados (aumento da resposta espectral nas bandas do vermelho e IVP);
- 3) O estudo da variação angular do BRF em função da geometria de visada permitiu uma melhor avaliação da resposta da superfície, com uma menor interferência da atmosfera. Os alvos na cena apresentaram comportamentos distintos para as bandas espectrais na faixa do visível. A banda do azul

apresentou valores máximos para a câmera Da (70,5°), extrema na direção do espalhamento frontal. As bandas do verde, vermelho e infravermelho próximo apresentaram valores máximos na direção do *hotspot*, que para a geometria de imageamento da cena ocorreu na câmera Bf (-45,6°), na direção do retroespalhamento. Este comportamento foi observado para todas as classes de cobertura selecionadas. Os valores mínimos observados ocorreram na direção oposta à do *hotspot*, devido a essa direção ter apresentado maior sobreamento sob a perspectiva do sensor;

- 4) Os valores de NDVI calculados a partir do BRF foram maiores que os obtidos a partir de dados de radiância de topo da atmosfera, mas apresentaram uma menor variabilidade em função do ângulo zenital de visada. Para as classes de cobertura vegetal, houve pouca variação entre $\pm 45^\circ$ do nadir. Para o solo, variações mais intensas foram observadas para ângulos de visada superiores a $\pm 25^\circ$ do nadir. Foi mostrado que a realização da correção atmosférica é essencial à correta interpretação dos valores de NDVI obtidos a partir de diferentes visadas.

Em relação ao estudo da influência da geometria de visada na discriminação das classes de cobertura da Amazônia, pôde-se concluir que:

- 1) A análise dos dois indicadores de distância espectral (Distâncias Euclidiana e de Mahalanobis) mostrou que a câmera Af (-26,1°) realçou a discriminação das classes Floresta Ombrófila Aberta Submontana e Densa Terras Baixas. Uma vez que a visada desta câmera está relacionada ao *hotspot*, pode-se dizer que esta direção é mais favorável à discriminação entre essas duas classes. Essa mesma direção de visada proporcionou o melhor desempenho dos dois classificadores, por máxima verossimilhança e por menor distância de Mahalanobis. A precisão de classificação, calculada com dados da própria imagem para as duas classes de floresta, melhorou de forma acentuada na direção do retroespalhamento. Entretanto, o melhor desempenho de classificação obtido com a câmera Af não foi aparentemente significativo em relação ao desempenho obtido com o uso da câmera ao nadir. Ângulos de visada superiores a -45° e $+25^\circ$ do nadir foram

prejudiciais à discriminação entre as classes de cobertura selecionadas, conforme indicado pela redução nos valores de precisão de classificação obtidos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Boardman, J. W. Automated spectral unmixing of AVIRIS data using convex geometry concepts. JPL Airborne Geoscience Workshop, 4., 1993. **Summaries...**[S.1]: JPL Publication, 1993. v. 1, p 11-14.
- Boardman, J. W. Inversion of imaging spectrometry data using singular value decomposition: Canadian Symposium on Remote Sensing, 12., 1989. **Proceedings...**[S.1]: IGARSS, 1989. v. 4, p 2069-2072.
- Boardman, J. W.; Kruse, F. A.; Green, R. O. Mapping target signatures via partial unmixing of AVIRIS data. JPL Airborne Earth Science Workshop, 5., 1995. **Summaries...** [S.1] JPL Publication 1995. v. 1, p 23-26.
- Bruegge, C. J.; Diner, D. J.; Korechoff, R. P.; Lee, M. MISR level 1 radiance scaling and conditioning algorithm theoretical basis. Pasadena, CA, EUA: Jet Propulsion Laboratory (JPL), 1999. 40p. (JPL D-11507, Rev. E).
- California Institute of Technology (CalTech). The ASTER brochure. Disponível em: <<http://asterweb.jpl.nasa.gov/aster.pdf>>. Acesso em: 15 nov. 2001.
- Carvalho, A. P. F; Guimarães, R. F.; Carvalho Jr., O. A.; Bustamante, M. M. C. Metodologia para análise de mistura espectral em imagens TM-Landsat. Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 10., 2001. **Anais...** [S.1] Foz do Iguaçu, p 1531-1538, 2001.
- Departamento Nacional de Produção Mineral (DNPM). Folha SC-19 Rio Branco; geologia, geomorfologia, pedologia, vegetação e uso potencial da terra. **Projeto RADAMBRASIL**. Rio de Janeiro, DNPM, 1976. 464 p.
- Deutsches Zentrum für Luft – mnd Raumfahrt e. v. (DLR). Phase A/B study for the VIS/ NIR/ MIR payload on the brazilian equatorial satellite SSR-1. **Final Report**. Berlin: German Aerospace Center, 2001. 169 p.
- Diner, D. J.; Martonchik, J. V.; Borel, C.; Gerstl, S. A. W.; Gordon, H. R.; Knyazinkhin, Y.; Myeni, R.; Pinty, B.; Verstraete, M. M. **MISR level 2 surface retrieval algorithm theoretical basis**. Pasadena, CA, EUA: Jet Propulsion Laboratory (JPL), 1999. 100p. (JPL D-11401, Rev. D).
- Diner, D. J.; Beckert, J. C.; Reilly, T. H.; Bruegge, C. J.; Conel, J. E.; Kahn, R. A.; Martonchik, J. V.; Ackerman, T. P.; Davies, R.; Gerstl, S. A. W.; Gordon, H. R.; Muller, J. P.; Myneni, R. B.; Sellers, P. J.; Pinty, B.; Verstraete, M. M. Multi-angle imaging spectroradiometer (MISR) instrument description and experiment overview. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 4, p. 1072-1086. July 1998.
- Du Bois, F. P. **Dicionário de sensoriamento remoto**. Argentina: Sociedad de Especialistas Latinoamericanos en Percepcion Remota (SELPER). [2000?]. 219p.
- Dymond, J. R.; Shepherd, J. D.; Qi, J. A simple physical model of vegetation reflectance for standardising optical satellite imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 77, p. 230-239, 2001.

- EOS-AM. TERRA instruments. Disponível em:
<<http://eos-am.gsfc.nasa.gov/instruments.html>>. Acesso em: 12 fev. 2002.
- Epiphânio, J. C. N.; Huete, A. R. Dependence of NDVI and SAVI on sun/sensor geometry and its effect on fAPAR relationships in alfafa. **Remote Sensing of Environment**, v. 51, p. 351-360, 1995.
- Gobron, N.; Pinty, B.; Verstraete, M. M.; Martonchik, J. V.; Knyazikhin, Y. e Diner, D. J. Potential of multiangular spectral measurements to characterize land surfaces: conceptual approach and exploratory application. **Journal of Geophysical Research**, v.105, n. D13, p. 17539-17549, July 2000.
- Gobron, N.; Pinty, B.; Verstraete, M. M.; Widlowski, J.; Diner, D. J. Uniqueness of multiangular measurements – part II: joint retrieval of vegetation structure and photosynthetic activity from MISR. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 40, n. 7, p. 1574-1592, July 2002.
- Goddard Space Flight Center (GSFC). MODIS Brochure. Disponível em:<modis.gsfc.nasa.gov/about/modis_brochure.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2001.
- Goddard Space Flight Center (GSFC). MODIS Data. Disponível em:<<http://modis.gsfc.nasa.gov/data/index.html>>. Acesso em: 28 mar. 2002.
- Green, A. A.; Berman, M.; Switzer, P.; e Craig, M. D. A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 26, n. 1, p. 65-74, 1988.
- Holben, B.; Fraser, R. S. Red and near-infrared sensor response to off-nadir viewing. **International Journal of Remote Sensing**, v. 5, n. 1, p. 145-160, 1984.
- Hu, B.; Lucht, W.; Strahler, A. H.; Schaaf, C. B.; Smith, M. Surface albedos and angle-corrected NDVI from AVHRR observations of south america. **Remote Sensing of Environment**, v. 71, p. 119-132, 2000.
- Huberty, C. J. **Applied discriminant analysis**. Series: Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics. Applied Probability and Statistics Section. New York: John Wiley & Sons, 1994. 466 p.
- Jackson, R. D.; Teillet, P. M.; Slater, P. N.; Fedosejevs, G.; Jasinski, M. F.; Aase, J. K.; Moran, M. S. Bidirectional measurements of surface reflectance for view angle corrections of oblique imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 32, p. 189-202, 1990.
- Jet Propulsion Laboratory (JPL). An Overview of MISR Calibration Objectives. Disponível em:<<http://www-misr.jpl.nasa.gov/mission/calib.html>>. Acesso em: 11 oct. 2001a.
- Jet Propulsion Laboratory (JPL). MISR's Range of Viewing Angles. Disponível em:<<http://www-misr.jpl.nasa.gov/mission/iangles.html>>. Acesso em: 11 oct. 2001b.
- Kennedy, R. E.; Cohen, W. B.; Taxao, G. Empirical methods to compensate for a view-angle-dependent brightness gradient in AVIRIS imagery. **Remote Sensing of Environment**, v. 62, p. 277-291, 1997.

Kimes, D. S.; Holben, B. N.; Tucker, C. J. Optimal directional view angles for remote sensing missions. **International Journal of Remote Sensing**, v. 5, n. 6, p. 887-908, 1984.

King, M. EOS Mission Profiles: TERRA Quick Guide. Disponível em: <http://eosps0.gsfc.nasa.gov/eos_homepage/Satellites/Terra/>. Acesso em: 15 nov. 2001.

Knyazikhin, Y.; Martonchik, J. V.; Diner, D. J.; Myneni, R. B.; Verstraete, M. M.; Pinty, B.; Gobron, N. Estimation of vegetation canopy leaf area index and fraction of absorbed photosynthetically active radiation from atmosphere-corrected MISR data. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. D24, p. 32239-32256, Dec. 1998.

Langley Research Center - LaRC. CERES Introduction. Disponível em: <<http://asd-www.larc.nasa.gov/ceres/brochure/brochure.pdf>>. Acesso em: 15 oct. 2001.

Leroy, M.; Bréon, F. M. Angular signatures of surface reflectances from airborne POLDER data. **Remote Sensing of Environment**, v. 57, p. 97-107, 1996.

Lewicki, S.; Chafin, B.; Crean, K.; Gluck, S.; Miller, K.; Paradise, S. MISR data products specifications. **JPL D-13963, Rev. C**. California: Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, 14 Dec. 1999.

Lobell, D. B.; Asner, G. P.; Law, B. E.; Treuhaft, R. N. View angle effects on canopy reflectance and spectral mixture analysis of coniferous using AVIRIS. **International Journal of Remote Sensing**, v. 23, n. 11, p. 2247-2262, 2002.

Martonchik, J. V. Retrieval of surface directional reflectance properties using ground level multiangle measurements. **Remote Sensing of Environment**, v. 50, p. 303-316, 1994.

Martonchik, J. V.; Diner, D. J.; Pinty, B.; Verstraete, M. M.; Minen, R. B.; Knyazikhin, Y.; Gordon, R. Determination of land and ocean reflective, radiative and biophysical properties using multiangle imaging. **IEEE Transactions on Geosciences and Remote Sensing**, v. 36, n. 4, p. 1266-1281, 1998.

Mello, E. M. K.; Moreira, J. C.; Santos, J. R.; Shimabukuro, Y. E.; Duarte, V.; Souza, I. M.; Barbosa, C. C.; Souza, R. C. M.; Paiva, J. A. C. Técnicas de modelo de mistura espectral, segmentação e classificação de imagens TM-Landsat para o mapeamento do desflorestamento da amazônia. In: Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 11., 5-10 abr. 2003, Belo Horizonte, MG. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2003. 1 CD-ROM.

Meneguette, A. A. C. Introdução à cartografia matemática - projeção espacial oblíqua de mercator. Disponível em: <http://www.prudente.unesp.br/dcartog/arlete/hp_arlete/courseware/som.html>. Acesso em: 14 mar. 2002.

Middleton, E. M. Solar zenith angle effects on vegetation indices in tallgrass prairie. **Remote Sensing of Environment**, v. 38, p. 45-62, 1991.

Myneni, R. B.; Asrar, G. Atmospheric effects and spectral vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 47, p. 390-402, 1994.

Nelson, B. W.; Oliveira, A. C. A.; Silveira, M.; Smith, M.; Vidalenc, D.; França, M. B.; Miranda, I.; Kalliola, R. Bamboo-dominated forests of the southwest amazon. In: Conferência Científica Internacional do LBA, 2., jul. 2002. **Resumos...** [S.l.]: [S.n.], 2002. p.428.

Pinty, B.; Verstraete, M. M.; Dickinson, R. E. A Physical model of the bidirectional reflectance of vegetation canopies. 2. Inversion and Validation. **Journal of Geophysical Research**, v. 95, n. D8, p. 11767-11775, July 1990.

Pinty, B.; Widlowski, J.; Gobron, N.; Verstraete, M. M.; Diner, D. J.; Uniqueness of multiangular measurements – part I: an indicator of subpixel surface heterogeneity from MISR. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 40, n. 7, p. 1560-1573, July 2002.

Press, W. H.; Flannery, B. P.; Teukolsky, S. A.; Vetterling, W. T. **Numerical recipes in C: the art of scientific computing**. New York: Cambridge University Press, 1993. p. 59-70.

Qi, J.; Moran, M. S.; Cabot, F.; Dedieu, G. Normalization of sun/view angle effects using spectral albedo-based vegetation indices. **Remote Sensing of Environment**, v. 52, p. 207-217, 1995.

Rahman, H.; Pinty, B.; Verstraete, M. M. Coupled surface-atmosphere reflectance (CSAR) model 1. model description and inversion on synthetic data. **Journal of Geophysical Research**. v. 98, p. 20779-20789, 1993a.

Rahman, H.; Pinty, B.; Verstraete, M. M. Coupled surface-atmosphere reflectance (CSAR) model 2. semiempirical surface model usable with NOAA advanced very high resolution radiometer. **Journal of Geophysical Research**. v. 98, p. 20791-20801, 1993b.

Research Systems, Inc. (RSI). **ENVI user's guide**. Colorado: RSI, Sept. 2000. 930 p.

Richards, J. A. **Remote sensing digital image analysis: an introduction**. Berlin: Springer-Verlag, 1986. 281 p.

Roujean, J. -L.; LeRoy, M.; Deschamps, P.-Y. A bidirectional reflectance model of the earth's surface for the correction of remote sensing data. **Journal of Geophysical Research**, v. 97, p. 20445-20468, 1992.

Sandmeier, S. R. Acquisition of bidirectional reflectance factor data with field goniometers. **Remote Sensing of Environment**, v. 73, p. 257-269, 2000.

Sestini, M. F.; Alvala, R. C. S.; Mello, E. M. K.; Valeriano, D. M.; Reimer, E. S.; Chan, C. S.; Nobre, C. A. **Integração e Atualização de Dados de Uso/Cobertura do Terreno da Amazônia Legal para Utilização em Modelos de Superfície (SSiB)**. São José dos Campos: INPE, 2002. 8 p. (INPE-8972-RPQ/730).

Shimabukuro, Y. E.; Smith, J. A. The least-squares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 29, n. 1, Jan. 1991.

Tanré, D.; Herman, M.; Deschamps, P. Y. Influence of the atmosphere on space measurements of directional properties. **Applied Optics**, v. 22, p. 733-741, 1983.

University Corporation for Atmospheric Research (UCAR). MOPITT Overview. Disponível em: <<http://www.eos.ucar.edu/mopitt/overview/index.html>>. Acesso em: 21 fev. 2002.

Veloso, H. P.; Filho, A. L. R. R.; Lima, J. C. A. **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal**. Rio de Janeiro: IBGE, Departamento de Recursos Naturais e Estudos Ambientais, 1991. 124 p.

Verstraete, M. M.; Pinty, B.; Dickinson, R. E. A physical model of the bidirectional reflectance of vegetation canopies. I. theory. **Journal of Geophysical Research**, v. 95, p. 11755-11765, 1990.

Walthall, C. L. A study of reflectance anisotropy and canopy structure using a simple empirical model. **Remote Sensing of Environment**, v. 61, p. 118-128, 1997.

Whalen, K.; Meyer, T. EOSDIS information architecture and the web. Disponível em: <<http://spsosun.gsfc.nasa.gov/Overview.html>>. Acesso em: 16 oct. 2001.

APÊNDICE A

DESCRIÇÃO DO ESE, DO SATÉLITE TERRA E DOS SENSORES A BORDO

Um dos principais objetivos da pesquisa científica em sensoriamento remoto está voltado para a previsão das condições de vida no futuro do planeta Terra. Diversos grupos de pesquisa estão desenvolvendo sensores, plataformas e algoritmos para entender o funcionamento dos diversos ambientes no nosso planeta. Pesquisas voltadas para o estudo da atmosfera, das águas, tanto oceânicas como continentais, da vegetação, da ocupação da terra pelo homem, de nuvens e aerossóis, entre outros temas, despertam a necessidade de integrar esses esforços no sentido de observar a Terra como um todo. Dentro deste espírito, a NASA, juntamente com diversas instituições científicas ao redor do mundo, criou o empreendimento científico da Terra (*Earth Science Enterprise – ESE*), cujo objetivo é aumentar o entendimento científico de todos os sistemas existentes no planeta Terra a partir do conhecimento profundo de cada sistema e da interação entre eles. Os participantes do ESE estão empenhados em descobrir padrões que permitam realizar previsões acerca de eventos ambientais que possam ocorrer, tais como enchentes, secas, tempestades, erupções vulcânicas, aquecimento global, entre outros, permitindo que governos, entidades e indivíduos possam tomar ações preventivas ou que permitam diminuir os efeitos de tais eventos. Além deste objetivo, procura-se também o conhecimento das mudanças que ocorrem no meio ambiente em função da atividade humana, bem como melhorar a capacidade de previsão meteorológica, tanto a curto como longo prazo.

O empreendimento ESE compreende quatro partes: uma série de satélites, chamada de Sistema de Observação da Terra (*Earth Observing System - EOS*); outra série de satélites menores, conhecida como Explorador Científico de Sistemas Terrestres (*Earth System Science Pathfinder*); um programa de pesquisa científica; e o sistema de armazenamento, processamento e distribuição de dados científicos, o Sistema de Dados e Informações do EOS (*EOS Data and Information System – EOSDIS*). Todas as partes estão integradas, de forma a permitir o desenvolvimento de sensores específicos para atender necessidades da comunidade científica, otimizar os esforços de pesquisa ao redor do mundo e a disponibilização dos dados e resultados obtidos à comunidade

científica e a entidades, organizações, empresas e indivíduos interessados. O EOS é a parte principal do empreendimento, visto que ali estão os principais sensores, os maiores esforços de desenvolvimento e a fonte principal de dados para o ESE. Dentro do projeto EOS estão sensores como o ETM+, a bordo do Landsat 7, o *Sea-viewing Wide Field-of-view Sensor* (SeaWiFS), a bordo do OrbView-2, o Hyperion, a bordo do NPM/EO-1 e os sensores que estão a bordo do satélite TERRA, entre os mais conhecidos. O ESE prevê o lançamento de outras plataformas, que levarão os mesmos sensores já existentes, para permitir a criação de séries temporais, além de novos sensores, que permitirão coletar dados sobre a superfície da Terra, tanto da parte terrestre como da aquática, e da atmosfera, em diversos níveis e com enfoque para as nuvens, aerossóis e poluição.

A plataforma orbital que trouxe mais inovações ao projeto EOS até o momento é o satélite TERRA, devido à variedade de sensores existentes a bordo, e à capacidade de integração entre os dados destes sensores para a geração de produtos específicos. O satélite TERRA, também conhecido como AM-1, apresenta as seguintes características (Figura A.1):

- Diâmetro: 3,5 m;
- Comprimento: 6,8 m;
- Peso: 5.190 kg;
- Potência elétrica: 2.530 W, em média;
- Taxa de dados: 18.545 kbps, em média;
- Tempo de vida estimado: 5 anos;
- Lançamento: lançado por um foguete ATLAS II AS em 18 de Dezembro de 1999;
- Órbita:
 - Tipo: Polar;
 - Altitude: 705 km (no equador);
 - Inclinação: 98.2°;
 - Cruzamento com o equador: 10:30 descendente;
 - Período: 98.88 minutos;
 - Tempo de revisita: 16 dias;
- Sensores a bordo:
 - *Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer* (ASTER);
 - *Clouds and the Earth's Radiant Energy System* (CERES);
 - *Multi-angle Imaging Spectroradiometer* (MISR);
 - *Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer* (MODIS);

- *Measurements of Pollution in the Troposphere (MOPITT).*

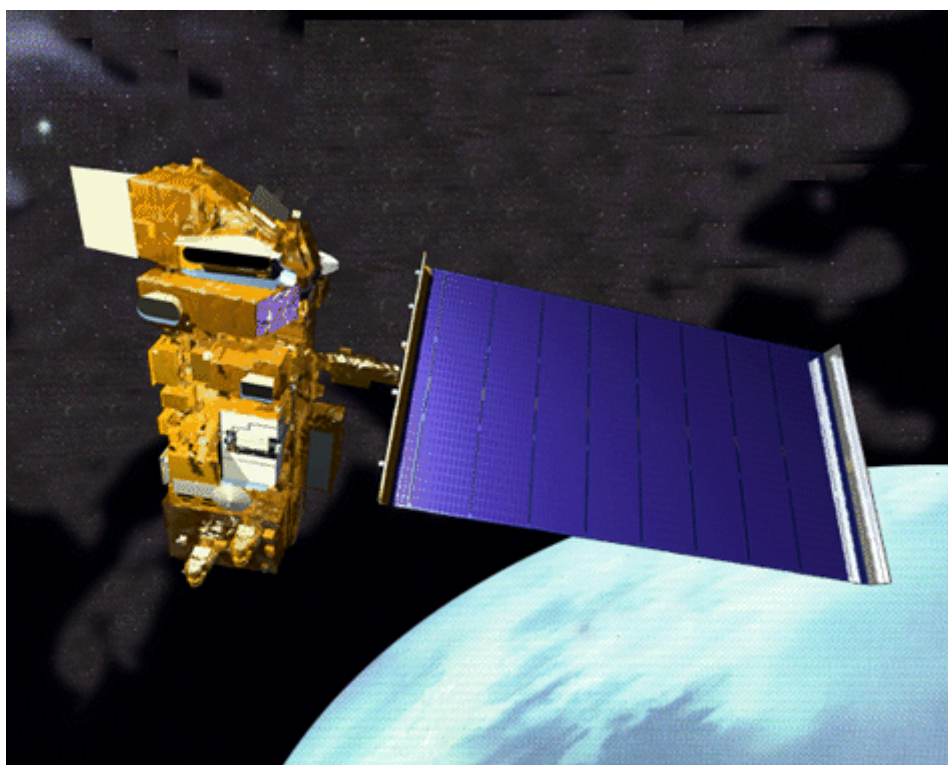


FIGURA A.1 – O satélite TERRA.

FONTE: EOS-AM (2002).

O ASTER é o principal sensor a bordo do TERRA, e o que é capaz de gerar imagens com melhor resolução espacial, variando de 15 a 90 metros. O sensor dispõe de 14 bandas espectrais, que estão dispostas desde a faixa do visível e infravermelho próximo (*Visible and Near Infrared - VNIR*), com 3 bandas com 15 metros de resolução, passando pelo infravermelho médio (*Short-wave Infrared - SWIR*) com 6 bandas de 30 metros de resolução até o infravermelho termal (*Thermal Infrared - TIR*) com 5 bandas que apresentam resolução de 90 metros. O ASTER dispõe ainda de outra câmera com visada *off-nadir* para trás, apenas para a banda do infravermelho próximo (*Near Infrared - NIR*), para geração de pares de imagens para estereoscopia. O recurso de visada *cross-track* está disponível para todas as câmeras, com amplitudes de 24° para cada lado das câmeras VNIR e de 8,55° para as outras câmeras. A largura da faixa imageada é de 60 km no nadir e uma cena gerada tem o comprimento de 60 km (*California Institute of Technology - CalTech, 2001*).

Outro sensor disponível a bordo do TERRA é o CERES. Este sensor teve uma versão que voou a bordo do satélite *Tropical Rainfall Measuring Mission* (TRMM). O objetivo deste sensor é medir o fluxo da energia emitida e refletida pela Terra, absorvida pelas nuvens e espalhada pela atmosfera. Com essas medições, é possível estimar a influência das nuvens, de gases produzidos pela atividade humana e de aerossóis no aquecimento global, bem como auxiliar na previsão interanual da meteorologia, determinar variações climáticas de longo prazo, acompanhar desastres naturais e auxiliar na previsão de safras. O sensor trabalha com três bandas, sendo uma na faixa da radiação solar refletida (0,3 – 5 μm), outra na faixa do Infravermelho termal, capturando a radiação emitida pela Terra (8 –12 μm) e outra que cobre todo o espectro óptico da radiação eletromagnética (0,3 até acima de 100 μm), todas com resolução de 20 km. Dentro da estrutura do satélite TERRA existem dois sensores desse tipo, um com varredura *cross-track* e outra com varredura de 360° em azimute, provendo informação direcional a respeito do fluxo radiante emitido e refletido pela Terra (LaRC, 2001).

Um outro sensor existente na plataforma orbital TERRA é o MODIS. Este sensor é capaz de gerar imagens em 36 bandas, que cobrem o espectro de 0,405 μm até 14,385 μm . A disposição das bandas está correlacionada com a determinação de limites, propriedades e temperatura de nuvens, limites de áreas emersas, cor do oceano, teor de vapor d'água na atmosfera, temperatura atmosférica, além da detecção de fitoplâncton, vapor d'água, ozônio, topo de nuvens e nuvens cirrus (*Goddard Space Flight Center - GSFC*, 2001). A resolução espacial também varia, sendo de 250 metros para as bandas 1 e 2, de 500 metros para as bandas 3 a 7 e 1000 metros para as bandas restantes. A largura de faixa imageada é de 2330 km, o que permite imagear toda a superfície da Terra em dois dias. A partir das imagens geradas nessas bandas, são obtidos 44 produtos pelo EOSDIS, que são utilizados na pesquisa de mudanças globais (GSFC, 2002).

Existe um sensor a bordo do satélite TERRA que foi desenvolvido especificamente para estudar a poluição atmosférica do nosso planeta. Este sensor é o MOPITT. Para ser capaz de fornecer dados que permitam estudar a concentração de poluentes na atmosfera, o MOPITT coleta dados sobre a distribuição, transporte, fontes e concentração de monóxido de carbono (CO) e metano (CH₄) na troposfera (UCAR,

2002). São geradas imagens a partir dos seguintes comprimentos de onda: 2,3 μm , utilizado para a detecção de metano e 2,4 μm e 4,7 μm , utilizados para a detecção de monóxido de carbono. Apesar de utilizar apenas três bandas, o sensor dispõe de oito canais, pois de forma diferente dos outros sensores, a radiação passa por células de gás sob pressão, onde a pressão ou o comprimento da célula pode variar. Desta forma, quatro canais são utilizados para a detecção da emissão termal de monóxido de carbono, dois são utilizados para a detecção de bandas de absorção de monóxido de carbono e os outros dois são utilizados para detectar bandas de absorção de metano. Após a detecção da radiação infravermelha que passou por estas células, é aplicada uma técnica de espectroscopia de correlação, que permite a extração de informações a respeito da distribuição de monóxido de carbono e metano na atmosfera.

O último sensor instalado a bordo do satélite TERRA é o MISR. Este sensor apresenta a característica única de observar a Terra de nove pontos de vista diferentes, com nove câmeras que variam de 70,5° à frente até 70,5° para trás, em relação ao nadir, da vertical no ponto de onde está sendo capturada a radiação eletromagnética (vide Tabela A.1 e Figuras A.2 e A.3). Cada câmera é capaz de gerar imagens em quatro bandas, conforme pode ser visto na Tabela A.2, de forma que cada ponto da superfície da Terra que for imageado será visto 36 vezes. A resolução espacial é de 250m para a câmera a nadir e de 275m para as câmeras *off-nadir*, sendo possível programar o computador de bordo para aglomerar os pixels em arranjos de 2 x 2, 4 x 4, 1 x 4 e 1 x 1 (linhas x colunas).

TABELA A.1 – Geometria das câmeras do MISR.

Câmera	Sentido	Ângulo de visada especificado	Ângulo de visada produzido	Distância focal (mm)
Df	Frente	70,5°	70,3°	123,67
Cf	Frente	60°	60,2°	95,34
Bf	Frente	45,6°	45,7°	73,03
Af	Frente	26,1°	26,2°	58,90
Na	Nadir	0°	0,1°	58,94
Aa	Trás	26,1°	26,2°	59,03
Ba	Trás	45,6°	45,7°	73,00
Ca	Trás	60°	60,2°	95,33
Da	Trás	70,5°	70,6°	123,66

FONTE: Adaptada de Diner et al. (1998, p. 1076).

TABELA A.2 – Bandas espectrais do MISR.

Número da banda	Comprimento de onda central	Largura de banda
1 – azul	446,4 nm	41,9 nm
2 – verde	557,5 nm	28,6 nm
3 – vermelho	671,7 nm	21,9 nm
4 – infravermelho próximo	866,4 nm	39,7 nm

FONTE: Adaptada de Diner et al. (1998, p. 1076).

Os detectores utilizados são matrizes lineares de CCD, cada uma com 1520 elementos, sendo que apenas 1504 são efetivamente utilizados para gerar imagens. Cada detector na matriz mede 21 μm (*cross-track*) por 18 μm (*along-track*). A distância entre as matrizes dentro de uma câmera é de 160 μm (Diner et al., 1998), fazendo com que as bandas de uma mesma câmera estejam defasadas espacialmente, como pode ser visto na Figura A.2. O registro entre bandas e entre visadas é feito durante os processamentos em solo. A radiação capturada pelo sensor é quantizada em 14 níveis digitais, sendo codificada através da raiz quadrada do sinal em 12 bits através de uma *look-up table*. Esta técnica minimiza erros de quantização com sinais mais fracos, às custas de maiores erros nos números digitais maiores (Diner et al., 1998).

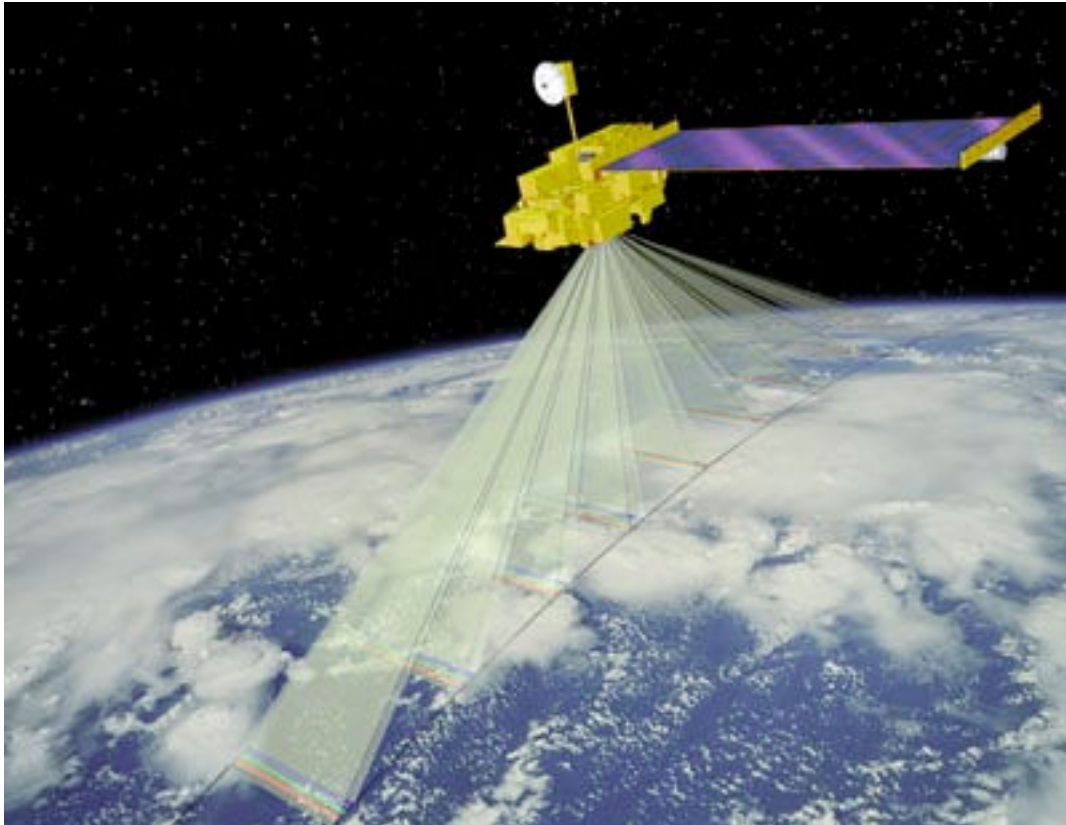


FIGURA A.2 – MISR e o direcionamento das câmeras e bandas.

FONTE: Jet Propulsion Laboratory – JPL (2001b - JPL image P-49081).

A temperatura de todas as matrizes CCD é controlada através de refrigeradores termoelétricos (*Thermo-Electric Cooler – TEC*), instalados no plano focal de cada matriz, que as mantêm a -5°C , otimizando o balanço entre a corrente de fundo e a sensibilidade à radiação. A calibração de bordo dos detectores do MISR é feita através de dois painéis extensíveis, cobertos com Spectralon, e de diodos e fotodiodos. Os painéis, quando não estão em uso ficam retraídos e seguros, sendo utilizados aproximadamente a cada mês. Quando o satélite está sobre o pólo norte, o painel traseiro se estende, refletindo a luz do Sol diretamente nos campos de visada das câmeras à frente e ao nadir. Quando o satélite está sobre o pólo sul, o painel dianteiro é utilizado para calibrar as câmeras viradas para trás, bem como a câmera ao nadir, que é utilizada para calibração cruzada. Os diodos e fotodiodos são utilizados para estabelecer

uma escala radiométrica sobre a qual é feita a calibração dos detectores, definindo a resposta de cada detector em função da radiação incidente.



FIGURA A.3 – Concepção artística do MISR em corte. Os cilindros amarelos são as extremidades das câmeras.

FONTE: Jet Propulsion Laboratory – JPL (2001b - JPL image P-44988).

APÊNDICE B

DESCRIÇÃO DOS ALGORITMOS DE CALIBRAÇÃO DOS DADOS E GERAÇÃO DOS PRODUTOS MISR

Antes da descrição do processo de calibração dos dados e geração de produtos a partir dos dados do MISR, é interessante apresentar uma breve introdução à arquitetura de dados empregada pelo EOSDIS, bem como o formato de dados que o EOSDIS utiliza para distribuir seus produtos, o HDF. O objetivo do EOSDIS é tornar dados científicos disponíveis com o maior alcance possível dentro da comunidade científica (Whalen e Meyer, 2001). A arquitetura utilizada é baseada no conceito de pirâmide de dados.

A pirâmide de dados apresenta as camadas de dados do EOSDIS de forma conceitual. Os níveis superiores são os metadados, que descrevem os dados das duas camadas inferiores, a camada auxiliar, onde estão bibliografias de referência, históricos dos produtos gerados, estatísticas de qualidade dos dados, entre outros dados de suporte. A camada inferior consiste nos produtos propriamente ditos, dentro de seis níveis de processamento diferentes, que podem variar de instrumento para instrumento. A Tabela B.1 apresenta estes seis níveis, bem como seus significados.

TABELA B.1 – Níveis de processamento de produtos do EOSDIS.

Nível	Significado
Nível 0	Dado bruto, na resolução original e ordenado no tempo.
Nível 1a	Dado bruto mais os dados necessários à calibração radiométrica e à geocodificação.
Nível 1b	Dados radiometricamente corrigidos e geocodificados, reamostrados para a resolução do sensor.
Nível 2	Parâmetros geofísicos derivados dos dados do nível 1, com a mesma resolução
Nível 3	Parâmetros geofísicos reamostrados espacial ou temporalmente, e derivados dos dados de nível 1 ou 2.
Nível 4	Dados modelados ou resultantes de processamento de dados de nível inferior a partir de outros dados que não do sensor.

O formato de dados selecionado foi o HDF, desenvolvido pelo Centro Nacional para Aplicações em Supercomputação (*National Center for Supercomputing Application's* -

NCSA). Este formato surgiu da necessidade da comunidade científica de um formato de dados que fosse acessível a partir de qualquer uma das diversas plataformas computacionais existentes, que não fosse proprietário, que permitisse o aumento de performance e a otimização da eficiência do armazenamento. Na estrutura hierárquica do formato existe um diretório, onde estão relacionados os diversos objetos existentes no arquivo, o tipo de objeto e um ponteiro para a localização dos dados do objeto. Existem vários tipos de objetos, que vão desde tabelas de atributos a dados rasterizados. Para atender a necessidade do EOSDIS, entretanto, foi criada uma variação do formato HDF, que é o *Hierarchical Data Format - Earth Observing System* (HDF-EOS). Este formato acrescenta objetos ao formato original, permitindo o arquivamento de dados geocodificados e dados ordenados no tempo, como faixas imageadas de satélite, que são apenas seqüências temporais de linhas varridas pelo sensor a bordo do satélite.

Os produtos gerados pelo EOSDIS a partir dos dados do MISR seguem os padrões descritos anteriormente, sendo especificados conforme Lewicki et al. (1999) e a Figura B.1. No nível 1A os dados são apenas reformatados para o formato HDF e é realizada uma verificação a respeito da qualidade dos dados e funcionamento do instrumento. O nível 1B1 consiste da conversão do número digital extraído das câmeras do MISR em radiância de topo de atmosfera, que é quantizada com o uso dos dados de calibração produzidos pelo *On-Board Calibrator* (OBC). Para o nível 1B2 os dados das nove câmeras são registrados conforme a projeção Espaço Oblíqua de Mercator (*Space Oblique Mercator – SOM*), que foi escolhida devido ao fato de causar o mínimo de distorções geométricas nos dados, tendo sido desenvolvida especialmente para o mapeamento contínuo de imagens de satélite (Meneghette, 2002).

O nível 2 abrange dois tipos de dados. Um deles apresenta medidas de diversos parâmetros de nuvens, como altitude e textura, além de ventos, albedo do topo da atmosfera e fatores de reflectância bidirecional, além de outros parâmetros. O outro está direcionado para a radiação de superfície e a interação dessa radiação com aerossóis, apresentando dados como a espessura óptica dos aerossóis na troposfera, sua composição e tamanho, além de diversos parâmetros da superfície, como fatores de reflectância bidirecional, bihemisférica, índice de área foliar de vegetação, tipo de

bioma, entre outros. O nível 3 apresenta alguns dos parâmetros existentes no nível 2 em escala global, com cobertura temporal mensal, trimestral e anual.

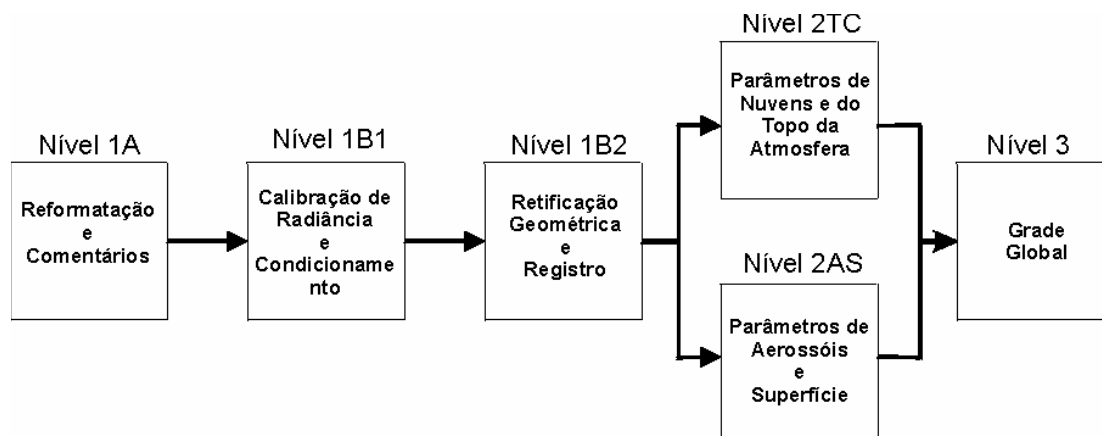


FIGURA B.1 – Produtos gerados a partir do MISR.
FONTE: Adaptada de JPL (2001a).

O produto de nível 1A não é distribuído dentro da comunidade científica, pois consiste apenas na reconstituição dos dados brutos do sensor para 14 bits, após o recebimento dos dados em 12 bits. Para a geração de produtos do nível 1B1 é necessário que os dados recebidos do instrumento a bordo do satélite sejam calibrados. O MISR foi calibrado antes de seu lançamento através do uso de uma esfera integradora de 1,65 metro de diâmetro, dotada de 25 lâmpadas com comportamento espectral conhecido. Após o lançamento passou a ser realizada a calibração em vôo, utilizando o calibrador de bordo, juntamente com a calibração absoluta, que é feita em campanhas de calibração em campo, onde é realizada a medição da radiação em áreas selecionadas simultaneamente ao imageamento pelo MISR. Esses processos fornecem parâmetros para a determinação dos coeficientes da equação de calibração, que é realizada através da regressão dos ND do nível 1A sobre valores coletados em campo e valores fornecidos pelo OBC (Bruegge et al., 1999).

O calibrador de bordo é composto de dois painéis difusores escamoteáveis cobertos com Spectralon, cinco conjuntos de quatro fotodiodos PIN¹ resistentes à radiação e quatro jogos de três diodos de alta eficiência quântica (*High Quantum Efficiency* - HQE). Um

¹ PIN é a descrição de um tipo de diodo onde camadas de semicondutores dopados positivas, intrínsecas e negativas são empilhadas.

dos painéis difusores é desdobrado e posicionado uma vez por mês, de forma a difundir a luz solar para as câmeras à frente e a câmera a nadir, quando o satélite está sobre o pólo norte. Analogamente, quando o satélite está sobre o pólo sul o outro painel é desdobrado e ilumina as câmeras que estão viradas para trás e a câmera a nadir. Desta forma é realizada a calibração absoluta das nove câmeras existentes no MISR, sendo que a câmera a nadir é utilizada para calibração cruzada (Diner et al., 1998).

Os diodos e fotodiodos são utilizados para estabelecer a escala radiométrica em que se baseia a calibração do instrumento. A radiação que incide sobre cada fotodiodo PIN de um grupo é filtrada para cada uma das bandas espectrais do MISR. Dois dos cinco grupos de fotodiodos fazem a calibração da câmera a nadir, dois para cada uma das duas câmeras extremas, a Da e Df, e o quinto grupo está montado em um braço articulado eletricamente para monitorar as propriedades de reflectância angular dos dois painéis difusores. Os diodos HQE foram montados em uma configuração em armadilha, de forma que a radiação refletida por um é absorvida por um dos outros, e a saída dos três diodos é somada em paralelo, aumentando a eficiência quântica do arranjo. Os quatro arranjos estão associados a filtros espectrais para cada banda espectral do sensor.

Dentre os produtos descritos anteriormente dois serão utilizados neste trabalho e, portanto, serão descritos mais detalhadamente. O primeiro deles é o de nível 1B2, que apresenta a radiância de topo de atmosfera, registrados conforme a projeção SOM. O único tipo de dado da superfície da Terra adquirido pelo MISR é a radiância incidente nas nove câmeras do sensor. Essa radiância é traduzida em números digitais (ND) através da calibração radiométrica e deve passar por uma série de transformações, chamadas de quantização e condicionamento da radiância, para que seja possível extrair valores confiáveis de radiância desses ND (Bruegge et al., 1999).

Após a geração do produto 1A, os dados do MISR estão acondicionados como ND de 14 bits. O processo de quantização da radiância transforma esses ND em valores de radiância através da aplicação de uma equação de calibração. Essa equação representa a curva de transferência radiométrica do sensor, e seus coeficientes são estimados dentro de um limiar de confiabilidade a partir dos dados do OBC e do conteúdo dos registradores seriais das câmeras CCD do MISR, conforme a equação B.1:

$$L^{std} = \frac{-G_1 + \sqrt{G_1^2 + 4(D - D_{OVERCLOCK} - G_0)G_2}}{2G_2}, \quad (\text{eq. B.1})$$

onde L^{std} é a radiância ponderada por banda, considerando a resposta espectral do sensor como sendo uma curva gaussiana, D é o ND de um pixel da imagem, $D_{OVERCLOCK}$ é o termo que representa o conteúdo dos registradores seriais das câmeras CCD, e G_0 , G_1 e G_2 são os coeficientes de calibração. Essa equação foi extraída da equação B.2, que relaciona o ND gerado pelo sensor com a radiação incidente sobre ele:

$$D - D_{OVERCLOCK} = G_0 + G_1 L^{std} + G_2 (L^{std})^2. \quad (\text{B.2})$$

O coeficiente G_2 pode ser igual a zero, desde que a resposta do sensor seja perfeitamente linear, simplificando a equação B.1 para a equação B.3:

$$L^{std} = \frac{D - D_{OVERCLOCK} - G_0}{G_1}. \quad (\text{B.3})$$

A condição do coeficiente G_1 ser igual a zero, pode ser entendida como não ter sido lida nenhuma radiância pelo detector que gerou aquele pixel, o que pode ser verificado antecipadamente por um índice de qualidade do detector, que informa se o detector está funcionando corretamente e se os dados produzidos por ele são confiáveis.

Um ponto brilhante em meio a uma cena mais escura causa interferência em quase toda uma linha de detectores do MISR, marcando a imagem com um “halo”. Este fenômeno é causado pelo espalhamento difuso da radiação que incide sobre um detector na superfície interna do conjunto óptico da câmera, e pode ser traduzido matematicamente como o resultado da convolução de uma função de espalhamento pontual (Point Spread Function – PSF) sobre os pixels daquela linha da imagem. O efeito deste espalhamento é diferente conforme o comprimento de onda e a câmera que gera a imagem.

A partir das 36 linhas de dados que são geradas no imageamento de uma mesma linha no terreno é calculada uma função de deconvolução. Esta função é derivada de uma transformada Fourier sobre os PSF's, tomando-se o inverso da função resultante, realizando a transformação inversa para o domínio do espaço e tomando-se somente a parte real do resultado. Como as PSF's são quase simétricas, a parte imaginária da função de deconvolução pode ser ignorada. O resultado da aplicação desta função sobre

os dados é semelhante à aplicação de um filtro passa-alta, reduzindo o borrado na imagem causado pela interferência.

A aplicação das correções descrita acima gera o produto de nível 1B1. Para chegar ao nível 1B2 é necessário que os dados das nove câmeras estejam corregistrados e georreferenciados. Os dados necessários à geração dos produtos de nível 1B2 estão arquivados no banco de dados de calibração geométrica (*Geometric Calibration Dataset - GCD*). O GCD contém três subconjuntos de dados, o modelo geométrico de calibração de câmera (*Camera Geometric Model - CGM*), os parâmetros de projeção (*Projection Parameters - PP*) e a imagens de referência de órbita (*Reference Orbit Imagery - ROI*).

O primeiro subconjunto de dados, o CGM, visa corrigir erros de posicionamento e orientação das nove câmeras do MISR. Este produto é gerado antes do lançamento do satélite, no laboratório de calibração do sensor e atualizado regularmente com dados orbitais, onde são definidos os parâmetros e a expressão matemática que retornam a direção de visada, ou vetor de visada, dos pixels da imagem, em relação ao sistema de coordenadas do satélite. Esta expressão matemática promove uma série de transformações, que ajustam o plano da imagem ao plano focal, o plano focal ao sistema de coordenadas do detector, o sistema de coordenadas do detector ao sistema de coordenadas da câmera, deste para o sistema de coordenadas do instrumento e deste finalmente para o sistema de coordenadas da plataforma orbital. Essas cinco transformações corrigem as distorções inseridas no processo de aquisição pelas deformações mecânicas entre as câmeras, o conjunto óptico e a plataforma espacial, devido ao lançamento do satélite e alterações na força da gravidade a que o mesmo está submetido. As transformações levam em conta ainda dados como a distância focal de cada câmera, os ângulos de rotação da câmera, do sensor e do satélite e a variação térmica a que o sensor está exposto.

O objetivo dos PP é estabelecer a interseção entre o vetor de visada e o terreno, desde que o ponto no terreno não corresponda a corpos d'água, e fornecer as coordenadas do pixel da imagem dentro da projeção Espaço Oblíqua de Mercator. Os dados nominais de navegação do satélite são utilizados para estimar o deslocamento dos pixels nas imagens ocorridos em função da topografia do terreno e dos ângulos de visada do MISR e

projetá-los na grade de coordenadas. Este método produz o subconjunto de dados dos PP que, apesar de ser livre de erros relativos aos dados de navegação e aos deslocamentos devidos à topografia, não é produzido frequentemente, devido à sua complexidade. Este subconjunto é produzido para cada câmera uma única vez a cada ciclo de 16 dias, ou 233 órbitas, quando o padrão de cobertura do satélite se repete.

A fim de aumentar a precisão dos dados de navegação que serão usados na criação da ROI, é utilizada uma técnica de estimativa de mínimos quadrados, chamada de ajuste simultâneo de pacotes, a partir de modelos digitais de elevação de resolução relativamente alta, de pontos de controle no terreno e de algoritmos de identificação de pontos comuns às imagens fornecidas pelas nove câmeras. Os resultados deste processamento são parâmetros que serão utilizados para corrigir os efeitos de posicionamento e atitude do satélite na geração das ROIs. Outro dado necessário para a geração de produtos do nível 1B2 é a distribuição de nuvens na cena, o que é feito a partir de outro produto do MISR, a máscara radiométrica de nuvens câmera a câmera (*Radiometric Camera-by-Camera Mask – RCCM*).

Uma ROI contém o produto final do processo de geração do nível 1B2, que é a radiância de topo de atmosfera geocodificada. Todos os subprodutos apresentados até aqui são utilizados na geração de uma ROI. Para minimizar a cobertura de nuvens do produto final, no mínimo 4 blocos de dados no nível 1B1 são utilizados, em conjunto com as respectivas RCCM. Cada um dos blocos 1B1 é corrigido com relação ao posicionamento e atitude do satélite com o uso dos dados de ajuste simultâneo de pacotes e com relação às distorções da geometria do sensor a partir do CGM, sendo reamostrado para a grade de projeção SOM, a partir dos dados dos PP.

O nível 2 de produtos do MISR consiste de três tipos de produto, que são os parâmetros de aerossóis, da superfície e estereoscopia de topo de atmosfera e de nuvens. Os conjuntos de dados de aerossóis e de superfície são gerados em conjunto, produzindo três arquivos diferentes com os parâmetros de aerossóis, de terras emersas e de oceanos. O produto de superfície/aerossol consiste dos seguintes parâmetros: fator de reflectância hemisférico-direcional, reflectância bihemisférica, fator de reflectância bidirecional, parâmetros do modelo de reflectância bidirecional, reflectância hemisférico-direcional,

dados atmosféricos auxiliares, índice de área foliar, fração da radiação fotossinteticamente ativa absorvida, reflectância equivalente da água, concentração de pigmentos de fitoplânctons e índices de qualidade de geração de parâmetros. Neste trabalho serão utilizados apenas os parâmetros de superfície. Portanto, será abordada a geração específica desses produtos.

Os dois primeiros parâmetros da superfície a serem calculados pelo algoritmo são o fator de reflectância hemisférico-direcional (*Hemispherical-Directional Reflectance Factor* – HDRF) e a reflectância bihemisférica (*Bihemispherical Reflectance* – BHR), que incluem os efeitos da iluminação direta do Sol e difusa da atmosfera na superfície, ou iluminação ambiente. O HDRF é igual a radiância que deixa uma superfície dividida pela radiância de uma superfície refletora lambertiana iluminada sob as mesmas condições, e é essencialmente a medida da radiância que deixa a superfície nos nove ângulos de visada e nos quatro comprimentos de onda do MISR para a geometria de iluminação específica encontrada no momento do imageamento. A BHR é igual a exitância radiante dividida pela irradiância sob iluminação ambiente.

A resposta espectral da superfície lambertiana hipotética deve ser considerada como se ela fosse iluminada sob as mesmas condições atmosféricas que a cena imageada. Portanto deve-se empregar um modelo de transferência radiativa para entender e simular a influência da atmosfera na iluminação da cena. O modelo de transferência radiativa utilizado no tratamento dos dados do MISR é unidimensional. A escolha por este tipo de modelo deve-se ao fato de que o erro introduzido por ele é da mesma magnitude que o erro inserido pelos modelos de aerossol empregados, considerando a resolução utilizada na geração dos produtos do MISR, que é de 1,1 km ou 17,6 km.

O modelo atmosférico empregado utiliza seis parâmetros atmosféricos, que são dependentes dos componentes dos modelos de mistura de aerossóis selecionados, a saber: a espessura óptica τ , a reflectância equivalente correspondente à radiância do caminho atmosférico ρ^{atm} , a transmitância difusa ascendente T , a transmitância difusa ascendente integrada angularmente t , o albedo bihemisférico de superfície para radiação incidente isotrópica s e a irradiância difusa normalizada de uma superfície escura e_b^{diff} . Os modelos de aerossol utilizados consideram a existência de apenas um tipo de

partícula pura, mas podem ser misturados até três tipos de partículas puras no processo de simulação da distribuição dos aerossóis existentes na atmosfera, na seleção das misturas que resultem no melhor ajuste do modelo aos dados observados.

Para reduzir os erros inerentes aos diversos modelos de aerossóis empregados, é utilizada a média dos parâmetros atmosféricos conseguidos com o uso das misturas de aerossóis que apresentaram os melhores ajustes, em regiões de 17,6 por 17,6 km, ou 16 por 16 pixels. Desta forma, consegue-se a estimativa do HDRF e do BHR que apresenta o menor desvio padrão estimado baseado apenas nos resultados dos modelos de aerossol, pois não é utilizada nenhuma informação adicional para selecionar um dos modelos de aerossol. Desta forma, o HDRF é calculado através da seguinte fórmula:

$$r_{\lambda}(-\mu, \mu_0, \phi - \phi_0) = q_{\lambda}(-\mu, \mu_0) \cdot \rho_{\lambda}(-\mu, \mu_0, \phi - \phi_0) - \mu_{\lambda}(-\mu, \mu_0, \phi - \phi_0), \quad (\text{B.4})$$

onde r_{λ} é o HDRF para radiação incidente não-isotrópica, q_{λ} e μ_{λ} são os fatores atmosféricos que expressam, respectivamente, o espalhamento e a extinção radiativa do modelo atmosférico, ρ_{λ} é a reflectância equivalente de topo de atmosfera, $-\mu$ é o cosseno do ângulo de visada da câmera do MISR utilizada, μ_0 é o cosseno do ângulo de elevação solar e $\phi - \phi_0$ é o ângulo azimutal de visada em relação ao Sol.

O BHR é calculado através da fórmula:

$$A_{\lambda}^{hem}(\mu_0) = \frac{m_{\lambda}(\mu_0)}{e_{\lambda}(\mu_0)}, \quad (\text{B.5})$$

onde $A_{\lambda}^{hem}(\mu_0)$ é a reflectância bihemisférica para radiação incidente não-isotrópica, ou BHR, $m_{\lambda}(\mu_0)$ é a radiância exitante na superfície, $e_{\lambda}(\mu_0)$ é a irradiância na superfície, e μ_0 é o ângulo de elevação solar.

Os dois parâmetros vistos acima consideram que a cena imageada é iluminada tanto pela luz direta do Sol como pela radiação que é espalhada pela atmosfera. Quando não se leva em conta a interação da radiação que ilumina a cena com a atmosfera, tanto no sentido de reduzir a radiação incidente por atenuação como no sentido da radiação adicionada à radiação incidente devido ao espalhamento múltiplo, o HDRF dá origem ao fator de reflectância bidirecional (*Bidirectional Reflectance Factor* - BRDF) e o BHR

à reflectância direcional-hemisférica (*Directional Hemispherical Reflectance* - DHR). Para que seja possível remover os efeitos do espalhamento atmosférico múltiplo faz-se necessário modelar a distribuição da reflectância bidirecional da superfície através da aplicação de um modelo paramétrico de superfície, a função de distribuição da reflectância bidirecional (*Bidirectional Reflectance Distribution Function* - BRDF), que permite estimar as propriedades angulares da reflectância de superfície e estender a abrangência geométrica do BRF e do DHR para incluir outros ângulos de visada e do Sol não coberto pelas observações do MISR.

Existem vários modelos de BRDF, alguns com 2 a 3 parâmetros e outros com 10 ou mais. Esses últimos modelos necessitam de dados superpostos de diversas passagens do satélite, com diferentes geometrias de iluminação e visada, e até mesmo de dados de outros sensores, como o MODIS. O modelo selecionado para o processamento dos dados do MISR pelo EOSDIS possui três parâmetros, e pode ser computado a partir dos valores de HDRF calculados a partir de uma única passagem do satélite. O valor de BRDF é igual a $1/\pi$ do valor de BRF e, exceto este fator, uma vez que os dois parâmetros são essencialmente descrições idênticas das propriedades de espalhamento de uma superfície, pode-se usar um no lugar do outro. Desta forma, o algoritmo de modelagem da superfície empregado com os dados do MISR é traçado em termos de BRF.

O cálculo do valor de BRF, e a partir dele o de DHR, é realizado em um processo iterativo que tenta ajustar o valor do HDRF calculado a um valor de HDRF computado a partir da modelagem do BRF. A primeira das interações iguala o valor do BRF ao do HDRF, e a última é aquela onde é mínimo o quadrado dos resíduos da subtração dos logaritmos naturais do HDRF calculado na penúltima interação e do HDRF modelado na última interação.

A melhor estimativa do BRF computada a partir do HDRF calculado no algoritmo anteriormente apresentado, $r_{best,x,y}(-\mu, \mu_0, \phi - \phi_0)$, segue a seguinte fórmula:

$$R_{best,x,y}^{(n+1)}(-\mu, \mu_0, \phi - \phi_0) = \frac{\mu_0 e^{-\tau/\mu_0} + e_b^{diff}(\mu_0)}{[1 - A_{x,y}^{hem}(\mu_0) \cdot s] \cdot \mu_0 e^{-\tau/\mu_0}} \cdot r_{best,x,y}(-\mu, \mu_0, \phi - \phi_0)$$

$$\begin{aligned}
& - \frac{2\pi}{e^{-\tau/\mu_0}} \cdot \int_0^1 R_{\text{model}}^{0(n)}(-\mu, \mu') T_0(-\mu_0, -\mu') d\mu' \\
& - \frac{\pi \cdot \cos(\phi - \phi_0)}{e^{-\tau/\mu_0}} \cdot \int_0^1 R_{\text{model}}^{1(n)}(-\mu, \mu') T_1(-\mu_0, -\mu') d\mu' \\
& - \frac{A_{x,y}^{\text{hem}}(\mu_0) \cdot s \cdot [\mu_0 e^{-\tau/\mu_0} + e_b^{\text{diff}}(\mu_0)]}{[1 - A_{x,y}^{\text{hem}}(\mu_0) \cdot s] \cdot \mu_0 e^{-\tau/\mu_0}} \cdot 2 \int_0^1 R_{\text{model}}^{0(n)}(-\mu, \mu') \mu' d\mu', \tag{B.6}
\end{aligned}$$

onde $R_{\text{best},x,y}^{(n+1)}(-\mu, \mu_0, \phi - \phi_0)$ é a melhor estimativa do BRF, o primeiro termo à direita do sinal de igual é a radiância exitante, considerando a superfície recebendo iluminação direta e difusa, o segundo e o terceiro referem-se à radiação espalhada pela atmosfera, sem interagir com a superfície. O segundo termo contém a parcela desse espalhamento sem variação azimutal, enquanto o terceiro considera o ângulo azimutal entre o sensor e o Sol, e o quarto termo diz respeito à radiação espalhada após múltiplas reflexões entre a atmosfera e a superfície.

O valor de DHR é conseguido a partir da seguinte fórmula:

$$A_{\text{best},x,y}^{\text{dir}}(\mu_0) = 2 \int_0^1 R_{0,x,y}^{(N)}(-\mu, \mu_0) \mu d\mu, \tag{B.7}$$

onde $A_{\text{best},x,y}^{\text{dir}}(\mu_0)$ é o DHR e $R_{0,x,y}^{(N)}(-\mu, \mu_0)$ é o BRF, interpolado para abranger todos os ângulos azimutais de visada.

Os fatores R_0 e R_1 existentes na equação que é usada no cálculo do BRF estão relacionados ao modelo de BRF utilizado para explicar o comportamento angular da reflectância da superfície. Esta relação é expressa pelas expressões

$$R_{0,\text{model}}^{(n)}(-\mu, \mu') = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} R_{\text{model}}^{(n)}(-\mu, \mu', \phi - \phi') d\phi' \text{ e} \tag{B.8}$$

$$R_{1,\text{model}}^{(n)}(-\mu, \mu') \cos(\phi - \phi_0) = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} R_{\text{model}}^{(n)}(-\mu, \mu', \phi - \phi') \cos(\phi' - \phi_0) d\phi', \tag{B.9}$$

onde $R_{\text{model}}^{(n)}(-\mu, \mu', \phi - \phi')$ é a expressão na n ésima interação do modelo de BRF, conforme apresentado por Rahman et al. (1993b), e calculado pela expressão

$$R_{\text{model}}(-\mu, \mu_0, \phi - \phi_0) = r_0 \cdot \frac{\mu^{k-1} \cdot \mu_0^{k-1}}{(\mu + \mu_0)^{1-k}} \cdot \exp[b \cdot p(\Omega)] \cdot h(-\mu, \mu_0, \phi - \phi_0), \quad (\text{B.10})$$

onde r_0 , k e b são três parâmetros livres, h é um fator que leva em conta o ponto de brilho referente à reflexão especular, dependendo da geometria de iluminação e visada e do fator r_0 , e a função p é dependente apenas do ângulo Ω entre a radiação incidente e refletida.