



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/03.14.13.05-TDI

AVALIAÇÃO DA RESOLUÇÃO ESPACIAL DE SENSORES ÓPTICOS ORBITAIS

Giovanni de Araujo Boggione

Tese de Doutorado do Curso de
Pós-Graduação em Sensoriamento
Remoto, orientada pela Dra. Leila
Maria Garcia Fonseca, aprovada
em 20 de janeiro de 2014.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP5W34M/3FTJFGE>>

INPE
São José dos Campos
2014

PUBLICADO POR:

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE

Gabinete do Diretor (GB)

Serviço de Informação e Documentação (SID)

Caixa Postal 515 - CEP 12.245-970

São José dos Campos - SP - Brasil

Tel.:(012) 3208-6923/6921

Fax: (012) 3208-6919

E-mail: pubtc@sid.inpe.br

CONSELHO DE EDITORAÇÃO E PRESERVAÇÃO DA PRODUÇÃO INTELLECTUAL DO INPE (RE/DIR-204):**Presidente:**

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

Membros:

Dr. Antonio Fernando Bertachini de Almeida Prado - Coordenação Engenharia e Tecnologia Espacial (ETE)

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

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

Dr. Germano de Souza Kienbaum - Centro de Tecnologias Especiais (CTE)

Dr. Manoel Alonso Gan - Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos (CPT)

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

Dr. Plínio Carlos Alvalá - Centro de Ciência do Sistema Terrestre (CST)

BIBLIOTECA DIGITAL:

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

REVISÃO E NORMALIZAÇÃO DOCUMENTÁRIA:

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

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

EDITORAÇÃO ELETRÔNICA:

Maria Tereza Smith de Brito - Serviço de Informação e Documentação (SID)

André Luis Dias Fernandes - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/03.14.13.05-TDI

AVALIAÇÃO DA RESOLUÇÃO ESPACIAL DE SENSORES ÓPTICOS ORBITAIS

Giovanni de Araujo Boggione

Tese de Doutorado do Curso de
Pós-Graduação em Sensoriamento
Remoto, orientada pela Dra. Leila
Maria Garcia Fonseca, aprovada
em 20 de janeiro de 2014.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP5W34M/3FTJFGE>>

INPE
São José dos Campos
2014

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)

Boggione, Giovanni de Araujo.

B634a Avaliação da resolução espacial de sensores ópticos orbitais / Giovanni de Araujo Boggione. – São José dos Campos : INPE, 2014.

xxvi + 131 p. ; (sid.inpe.br/mtc-m21b/2014/03.14.13.05-TDI)

Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2014.

Orientadora : Dra. Leila Maria garcia Fonseca.

1. resolução espacial. 2. zernike. 3. EIFOV. 4. simulação. 5. MTF. I.Título.

CDU 528.8



Esta obra foi licenciada sob uma Licença [Creative Commons Atribuição-NãoComercial 3.0 Não Adaptada](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

This work is licensed under a [Creative Commons Attribution-NonCommercial 3.0 Unported License](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/).

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

Dr. José Carlos Neves Epiphânio



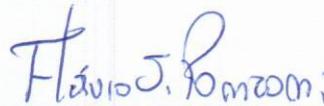
Presidente / INPE / SJC Campos - SP

Dra. Leila Maria Garcia Fonseca



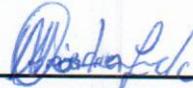
Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Flávio Jorge Ponzoni



Orientador(a) / INPE / SJC Campos - SP

Dr. Nilson Clementino Ferreira



Convidado(a) / UFG / Golanla - GO

Dr. Salvador Bosch Puig



Convidado(a) / Univ. de Barcelona / Barcelona - ES

Este trabalho foi aprovado por:

() maioria simples

(x) unanimidade

Aluno (a): **Giovanni de Araújo Boggione**

São José dos Campos, 20 de Janeiro de 2014

Diálise

“Olhar, verso, mão e tinta. O que passa pela trinca.

Tensão, ódio vão, escracho. O que tolhe o meu compasso.

Suor, beijo, sangue e míngua. O anseio dessa língua.

Aperto o passo, cruzo o paço.

Onde o crivo das cores, filtrando as dores pra disfarçar,

O cheiro das flores que eu sinto.

Mas há de soprar vento e direção, a testemunhar que eu não minto.

O torto, o certo, o absurdo. O tácito escuro.

O surto cego, submundo. Inútil latifúndio.

Favela, o fogo, o tiro e o medo. Na pele o pesadelo.

O olhar abraça o mar inteiro!”.

Fred Aleixo

A meus pais Basílio e Amália, a minha esposa Veruska e a meus filhos, Maria e João.

AGRADECIMENTOS

Ninguém conquista algo sem a ajuda, o apoio e a compreensão daqueles que o rodeiam. Só tenho a agradecer. Pessoas importantes não só nesta etapa, mas durante toda a minha vida.

Obrigado:

Pai e mãe, exemplos de honestidade e perseverança. Manas, respeito e cumplicidade.

Veruska, pela coragem e segurança. Maria e João, por vocês existirem.

Aurora e Vanessa, suporte sem medida.

Professores de Goiás: Nilton, João Côrtes, Fábio, Nilson Clementino, João Paulo, Valdeir, Marina, Domingos, Elaine, Avilmar. Cumplicidade.

Amigos do INPE e em especial: Raian, Lino, Gabriel, Fran, Kléber, Carol, Giovana, Bárbara, Bráulio, Jeferson, Emiliano, Jussara, Carina, Gavlak, Etoze, Talita, Édipo, Adriana, Júlio, Thales, Alexandre, Denilson, Rafael, Mariane, Daniel, Vanessa e os atletas do TENSO FC. Horas e mais horas de companheirismo.

Corpo Docente do INPE e em especial: Epiphânio, Flávio, Miguel, Formaggio, Evlyn, Eduardo, Bete, Lúbia e Camilo. O aprendizado é constante com vocês.

Funcionários do INPE: Luciana, Helen, Valéria, Vera, José Dias. Solicitude e disponibilidade.

Banda. Pela paciência e pelos poucos, mas intensos, momentos de criatividade.

Aos excelentes amigos que me acolheram em Anápolis: Fred, Higor, Jeff, Daniel, Noel, Viviane, Neto, Patrícia, Saulo e Léo.

Aos amigos de sempre: Marcelinho, Flávia, André, Léo Monteiro, Regiane, Dona Rosa e “Seu João”. Essenciais.

Meus alunos. Muito me ensinam. Obrigado Osny. Sua colaboração foi essencial.

Herman, Fernanda, Santiago & Cintra e Imagem pelo material disponibilizado.

Família Bosch. Tão bem me receberam em Barcelona que me senti em casa.

Professor Dr. Salvador Bosch Puig, pela seriedade, retidão e uma competência a toda prova. Obrigado pelos ensinamentos e paciência.

E por último, e de importância imensurável, agradeço a minha orientadora Dra. Leila Maria Garcia Fonseca. Obrigado pela orientação, paciência, ensinamentos que extrapolaram a sala de aula. Inspiração.

RESUMO

Uma forma de avaliar a qualidade espacial de sensores eletro-ópticos a bordo de satélites é por meio da Função de Espalhamento Pontual (*PSF-Point Spread Function*), no domínio do espaço, ou Função de Transferência de Modulação (*MTF – Modulation Transfer Function*) no domínio da frequência. Medidas da MTF ou PSF do sistema são realizadas antes do lançamento, em laboratório, e também durante a vida útil do satélite para avaliar e monitorar o desempenho do sistema em órbita. Estas funções caracterizam a resposta espacial do sensor e por meio delas pode-se calcular a resolução espacial efetiva, conhecida por EIFOV (*Effective Instantaneous Field of View*), que leva em conta as distorções inseridas pelo sensor. Geralmente, a resolução efetiva do sensor é pior do que a resolução nominal especificada no projeto do sistema. Dentro deste contexto, esta tese apresenta um novo método de estimação da MTF de sensores eletro-ópticos orbitais. Este método é baseado nos Polinômios de Zernike usados para avaliar a deformação de sistemas ópticos e que podem assumir, praticamente, qualquer forma. Para validar o método de estimação da MTF, vários experimentos foram realizados com dados dos sensores TM do Landsat-5 (TM-5), e CCD e HRC do CBERS-2B (Satélite Sino-Brasileiro de Recursos Terrestres). Os resultados mostraram que os valores de EIFOV para o TM-5 ficaram próximos aos valores especificados no projeto, com variação aproximada de 7,1% e 6,3% nas direções *Along-track* e *Across-track*, respectivamente. No caso das câmeras CCD e HRC, os valores de EIFOV foram piores do que os especificados no projeto, com variação aproximada de 19,3% e 103% nas direções *Along-track* e *Across-track*, respectivamente. Valores de MTF e EIFOV para o sensor *Operational Land Imager (OLI)* do Landsat-8 também foram avaliados e os resultados mostraram que o desempenho do sistema está conforme o especificado. Neste trabalho, um novo método para simulação de imagens de sensores ópticos também é proposto. Para avaliar o método de simulação proposto, imagens TM-5 e CCD foram simuladas a partir de imagens de melhor resolução espacial e comparadas às imagens reais, cujos resultados mostraram a eficácia da metodologia. Finalmente, um estudo de caso é apresentado para mostrar como o método de simulação pode ser usado em aplicações de sensoriamento remoto. Uma imagem da câmera *MUX* do CBERS-4 foi simulada, usando os parâmetros especificados no projeto e classificada em quatro classes de cobertura do solo: vegetação arbórea, desmatamento, queimadas e corpos d'água. Os resultados sugerem que a câmera MUX apresentará melhor capacidade de discriminação entre as classes, para a aplicação analisada, quando comparada ao sensor TM-5.

EVALUATION OF SPATIAL RESOLUTION OF OPTICAL SENSORS

ABSTRACT

One way to characterize the quality of electro-optical imaging systems on board remote sensing satellites is through the Point Spread Function (PSF), in the space domain, or through the Modulation Transfer Function (MTF) in the frequency domain. Measurements of the camera MTF or PSF are made on the ground prior to launch as well as while the satellite is in orbit in order to evaluate and monitor the complete system performance. The MTF or PSF can be used to calculate the effective spatial resolution (EIFOV - Effective Instantaneous Field of View), which takes into account the sensor distortions that produces a blurring effect in the image. The effective spatial resolution is usually worse than the nominal resolution specified in the sensor project. Therefore, this thesis presents an innovative methodology to estimate the MTF of sensors on board satellites based on Zernike polynomials, which are used to evaluate the optical systems deformation. To validate the MTF estimation method several experiments were conducted with data acquired from TM of Landsat-5, and CCD and HRC from CBERS-2B (China Brazil Earth Resources Satellite). The results showed that the EIFOV values obtained for TM-Landsat-5 were close to the expected values with variations of 7.1% and 6.3%, in the *Along-track* and *Across-track* directions, respectively. In the case of CCD-CBERS-2B and HRC-CBERS-2B, the EIFOV values were worse than those specified in the system project with variations of 19.3% and 103% in the *Along-track* and *Across-track* directions, respectively. MTF and EIFOV values for the OLI (Operational Land Imager) on board Landsat-8 were also estimated, which are in conformity with the system project. This work also presents a new image simulation method for sensors on board satellite. To evaluate the proposed image simulation method, TM-5 and CCD-CBERS-2B images were simulated from images acquired from higher spatial resolution systems and then compared to real images. Finally, a case study is presented to show how the image simulation can be used in remote sensing applications. A MUX image from CBERS-4 was simulated using the parameters specified in the system project and then classified into four land cover classes: woody vegetation, deforestation, fire, and water bodies. The results suggest that classification obtained from simulated MUX images was better than the one from TM-5 images in terms of discrimination among the classes.

LISTA DE FIGURAS

	<u>Pág.</u>
Figura 2.1 – Definição de EIFOV.	7
Figura 2.2 – Diferentes formas da Função de Espalhamento Pontual. (a) Gaussiana; (b) Sinc; (c) Radial.	8
Figura 2.3 – Sistema de formação de imagens (a) sem e (b) com distorções ópticas. ...	10
Figura 2.4 – Modelos das aberrações representadas pelos 15 primeiros polinômios de Zernike sem o termo constante.	14
Figura 2.5 – Figuras de mérito utilizadas para avaliar o desempenho de sensores ópticos. Frequência de <i>Nyquist</i> (Ny) e metade da frequência de <i>Nyquist</i> ($Ny/2$). A frequência de <i>Nyquist</i> (Ny) corresponde à metade da frequência espacial de amostragem do sistema.	15
Figura 2.6 - (a) Imagem original; (b) Efeito de <i>aliasing</i> na imagem.	16
Figura 2.7 - Fluxograma do processo de estimação da MTF e EIFOV.	19
Figura 2.8 - Imagens que mostram os efeitos de degradação na (a) imagem de borda ideal (128x128 pixels); (b) efeitos inseridos pelo sistema óptico (1024x1024 pixels); (c) efeitos inseridos pelo sistema óptico e reamostragem (128x128 pixels).	23
Figura 2.9 – Avaliação dos valores de MTF na frequência de <i>Nyquist</i> (MTF_{Nq}) estimados e comparados com os valores de Referência.	24
Figura 2.10 – Avaliação dos valores de MTF na metade da frequência de <i>Nyquist</i> ($MTF_{Nq/2}$) estimados e comparados com os valores de Referência.	24
Figura 2.11 – Correlação entre os valores de MTF do gabarito e os valores de MTF estimados em (a) <i>Nyquist</i> e (b) na metade da frequência de <i>Nyquist</i>	25
Figura 2.12 – Comparação entre os valores de Referência e estimados da MTF_{Nq} , para 10 simulações de degradação adicionando ruído.	26
Figura 2.13 – Comparação entre os valores de Referência e estimados da $MTF_{Nq/2}$, para 10 simulações de degradação adicionando ruído.	26
Figura 2.14 - Imagens com borda em diferentes direções.	27
Figura 2.15 – Comparação entre os valores de MTF_{Nq} de referência e estimados para 8 imagens com borda em diferentes direções. (Continua).	28

Figura 2.15 – Conclusão.....	29
Figura 2.16 – Localização geográfica dos experimentos.	31
Figura 2.17 – Amostras das imagens utilizadas em cada teste.....	32
Figura 2.18 - Imagens TM/Landsat-5 e QuickBird. a) TM/Landsat-5; b) QuickBird equalizado em relação à imagem TM; c) Histograma de TM; d) Histograma equalizado da QB. (Banda 3).	34
Figura 2.19 – Valores da MTF estimados nas direções <i>Along-track</i> (a) e <i>Across-track</i> (b) na frequência de <i>Nyquist</i> para o sensor TM/Landsat-5.....	35
Figura 2.20 – Valores da MTF estimadas nas direções <i>Along</i> (a) e <i>Across-track</i> (b) na frequência de <i>Nyquist</i> para o sensor CCD/CBERS-2B.	37
Figura 2.21 - Imagens: (a) Banda 1 -TM/Landsat-5; (b) Banda 1 - QuickBird; (c) Curva da MTF estimada pelo método proposto.	40
Figura 2.22 – Valores de EIFOV estimados para o sensor TM/Landsat-5 nas direções (a) <i>Along-track</i> e (b) <i>Across-track</i> em diferentes datas.	41
Figura 2.23 – Imagens: (a) Banda 2 - CCD/CBERS-2B; (b) Banda 2 - QuickBird; (c) Curva de MTF estimada pelo método proposto.	42
Figura 2.24 – EIFOV estimado para o sensor CBERS-2B/CCD nas direções (a) <i>Along-track</i> e (b) <i>Across-track</i>	43
Figura 2.25 – Imagens: (a) Banda pancromática - HRC/CBERS-2B; (b) Banda pan – WorldView; (c) Curva de MTF estimada pelo método proposto.....	44
Figura 2.26 – EIFOV estimado para o sensor HRC nas direções <i>Along-track</i> e <i>Across-track</i>	45
Figura 2.27 – Localização geográfica do município de Franco da Rocha/SP.....	46
Figura 2.28 - Composição natural das bandas dos sensores RapidEye (esquerda) e OLI/Landsat-8 (direita), com 4 recortes em diferentes coberturas de solo na região de Franco da Rocha/SP.	47
Figura 3.1 - Simulação utilizando modelo físico.....	51
Figura 3.2 - Imagem Simulada a partir de modelos físicos.	52
Figura 3.3 - Efeitos dos subsistemas na imagem.....	54
Figura 3.4. Diagrama de blocos do método de simulação.....	57

Figura 3.5 – Esquema do Módulo de Correção Radiométrica e Geométrica.	58
Figura 3.6 - Principais fatores e trajetórias da radiância espectral que atenuam, incrementam e ocasionam ruídos no sinal captado pelos sensores.	62
Figura 3.7 - Sistema amostrado e o filtro de restauração.	65
Figura 3.8 - Esquema do módulo de estimação da MTF.	66
Figura 3.9 – Esquema do módulo de contribuição atmosférica.	67
Figura 3.10 – Esquema do módulo de simulação.	68
Figura 3.11- Processo de simulação. O filtro baseado na PSF é aplicado na imagem de acordo com a relação entre as imagens de entrada e saída.	69
Figura 3.12 - Composição 3R2G1B da (a) Imagem QB com resolução espacial nominal de 2.4 metros, Alegrete/RS, 30/03/2008; (b) Imagem original TM/Landsat 5, com resolução espacial nominal de 30 metros e (c) Imagem TM/Landsat 5 Simulada a partir da QB e resolução espacial de 30m.	72
Figura 3.13 - Recorte de imagem da região de Luís Eduardo Magalhães: (a) Banda 3 (original) do TM/Landsat 5 (29/09/2009), resolução espacial nominal de 30 m; (b) Banda 3 do TM/Landsat 5 Simulada a partir da imagem RE, resolução espacial de 30 m; (c) Imagem RE, composição 3R5G2B, (01/10/2009) com resolução espacial nominal de 5 metros.	73
Figura 3.14 - Composição 3R2G1B de São José dos Campos, SP. (a) TM-5 original, 30 m; (b) TM-5 simulada, 30 m a partir da imagem QB. Em destaque, feições lineares. ..	74
Figura 3.15 - Imagens na composição 3R4G2B, São José dos Campos/SP: (a) CCD/CBERS-2B original, 20 m; (b) CCD/CBERS-2B simulada, 20 m. (c) RESOURCESAT, 24 m. Em destaque, algumas feições lineares.	75
Figura 3.16 - (a) Diferença entre as imagens (Banda 2) TM/Landsat-5 Referência e Simulada, de Alegrete/RS; (b) Diferença entre a banda 4 da imagem CCD/CBERS-2B de Referência e Simulada para o município de São José dos Campos/SP.	76
Figura 3.17 - Classificação não supervisionada K-médias, considerando 5 classes: (a) imagem TM-5 original e (b) imagem TM-5 simulada (Alegrete/RS).	77
Figura 4.1 - Localização da área de estudo. Município de Apuí/AM.	81

Figura 4.2 - Processo de simulação: o filtro de simulação depende da relação entre os valores da resolução espacial da imagem de Referência (5 m) e Simulada (20 m).	84
Figura 4.3 - (a) Imagem simulada CBERS-4 MUX, composição 2B3R4G, 14/07/2009; (b) Imagem Landsat-5 TM, composição 2B3R4G, 08/07/2009.....	86
Figura 4.4 - Imagem fração-solo estimada a partir da MUX (a) e TM-5 (b); imagem fração-sombra estimada a partir da MUX (c) e TM-5 (d); imagem fração-vegetação estimada a partir da MUX (e) e TM-5 (f); classificação: vegetação arbórea (verde escuro), desmatamento (amarelo), queimadas (marrom) e corpos d'água (azul) para a MUX (g) e TM-5 (h).	88
Figura 4.5 - (a) Gráfico de dispersão entre as estimativas de NDVI a partir das imagens MUX (eixo x) e TM-5 (eixo y); frequência das observações das amostras referentes à correlação (b) e coeficiente angular (c).	89
Figura 4.6 - Pontos sorteados para análise estatística e valores de NDVI para a câmera MUX (esquerda) e TM-5 (direita).	90

LISTA DE TABELAS

	<u>Pág.</u>
Tabela 2.1. Polinômios de Zernike.	13
Tabela 2.2 – Métodos de estimação da MTF.....	17
Tabela 2.3 – Descrição das imagens usadas nos experimentos.....	30
Tabela 2.4 – Parâmetros dos sensores.	33
Tabela 2.5 - Valores da MTF na Frequência de <i>Nyquist</i> – TM/Landsat-5 (Banda 3).	34
Tabela 2.6 - Valores da MTF na metade da Frequência de <i>Nyquist</i> - TM/Landsat-5 (Banda 3).	34
Tabela 2.7 – Coeficiente de variação com imagens TM.	36
Tabela 2.8 – Coeficiente de variação com imagens CCD.	38
Tabela 2.9 – Valores médios do EIFOV, em metros, estimados para cada sensor e banda.....	45
Tabela 2.10 – Parâmetros estimados para o OLI/Landsat-8.....	48
Tabela 3.1 – Imagens usadas na simulação.	56
Tabela 3.2 – Características dos sensores.....	56
Tabela 3.3 – Porcentagem de áreas classificadas do TM/Landsat 5.	77
Tabela 3.4 - Índice de Similaridade SSIM.	78
Tabela 4.1 - Características dos sensores.	83

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

AEB	Agência Espacial Brasileira
ALI	Advanced Land Imager
APM	Affine Projection Model
AVIRIS	Airborne Visible / Infrared Imaging Spectrometer
BRDF	Função de Distribuição de Reflectância Bidirecional
CBERS	China Brazil Earth Resources Satellite
CCD	Câmera Imageadora de Alta Resolução
CEOSS	Committee on Earth Observation Satellites
DEM	DEM – Digital Elevation Model
EIFOV	Effective Instantaneous Field of View
EMQ	Erro Médio Quadrático
FLAASH	Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes
FOV	Field of View
HRC	Câmera Pancromática de Alta Resolução
IFOV	Instantaneous Field of View
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
JACIE	Joint Agency Commercial Imagery Evaluation
LDCM	Landsat Data Continuity Mission
LIDQA	Landsat Image Data Quality Assessment
LOWTRAN	Low Spectral Resolution Atmospheric Transmittance Algorithm and Computer Model
MAXVER	Máxima Verossimilhança
MLME	Modelo Linear de Mistura Espectral
MODTRAN	Moderate Spectral Resolution Atmospheric Transmittance Algorithm and Computer Model
MTF	Modulation Transfer Function

MUX	Câmera Multi-Espectral
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
OTF	Função de Transferência Óptica
OLI	Operational Land Imager
PSF	Point Spread Function
PTF	Phase Transfer Function
QA4EO	Quality Assurance Framework for Earth Observation
QB	QuickBird
RE	RapidEye
RMSE	Erro Médio Quadrático
SPOT	Satellite Pour l'Observation de la Terre
SRTM	<i>Shuttle Radar Topography Mission</i>
SSI	Spectral Sciences Inc.
SSIM	Structural SIMilarity
TM	Thematic Mapper
TOA	Reflectância no Topo da Atmosfera
WFI	Wide Field Imager
WGCV	Working Group on Calibration and Validation
WV	WorldView

LISTA DE SÍMBOLOS

g	- Imagem no domínio do espaço
f	- Cena no domínio do espaço
h	- Função de Espalhamento Pontual
G	- Imagem no domínio da frequência
F	- Cena no domínio da frequência
H	- Função de Transferência de Modulação
Φ	- Função de Transferência de Fase
σ	- Desvio-padrão da função gaussiana
u	- Frequência espacial
Z	- Polinômios de Zernike
ρ	- Raio normalizado da pupila
θ	- Ângulo azimutal em torno da pupila
w	- Frente de onda
k	- Enésimo termo de Zernike
R	- Polinômio Radial
n	- Número inteiro não negativo (índice)
l	- Número inteiro (índice)
N_y	- Frequência de <i>Nyquist</i>
$N_y/2$	- Metade da Frequência de <i>Nyquist</i>
MTF_{N_q}	- MTF na Frequência de <i>Nyquist</i>
$MTF_{N_q/2}$	- MTF na Metade da Frequência de <i>Nyquist</i>
T	- Propagação da Frente de Onda
λ	- Comprimento de onda
df	- Distância Focal
$relp$	- Relação entre o tamanho dos pixels das imagens de ajuste e referência
M	- Tamanho da imagem de ajuste
$samp$	- Tamanho do detector
x_p	- Grade formada em x
y_p	- Grade formada em y
sD	- Semi-diâmetro da lente
pup	- Posição da pupila
sDi	- Semi-diâmetro interior da lente
V	- Coeficientes do Polinômio de Zernike
$fpup$	- Função pupila
M	- Número de Linhas da imagem
N	- Número de Colunas da imagem
$a(x, y)$	- Valor do nível digital na imagem de ajuste
$b(x, y)$	- Valor do nível digital na imagem de referência
\Re	- Parte real da Função
m	- Metro
mm	- Milímetro
km	- Quilômetro
μm	- Micrômetro
nm	- Nanômetro
C_v	- Coeficiente de Variação
μ	- Média

u_w	- Frequência espacial em que a MTF é igual a 0,5
u_{wa}	- Frequência espacial em que a MTF é igual a 0,5 na imagem de ajuste
u_{wr}	- Frequência espacial em que a MTF é igual a 0,5 na imagem de referência
$PIXEL_a$	- Tamanho do pixel da imagem de ajuste
$PIXEL_r$	- Tamanho do pixel da imagem de referência
X	- Referencial geodésico em x
Y	- Referencial geodésico em y
Z	- Referencial geodésico em z
$R_{\phi i}$	- Matriz de rotação no eixo x
$R_{\omega i}$	- Matriz de rotação no eixo y
$R_{\kappa i}$	- Matriz de rotação no eixo z
U	- Parâmetro de escala
c	- Distância principal
i	- Número da linha da imagem
A	- Parâmetros de transformação
L_λ	- Radiância Espectral
$E_{o,\lambda}$	- Irradiância solar espectral direta
$E_{d,\lambda}$	- Irradiância solar espectral difusa
$\tau_{a,\lambda}$	- Transmitância espectral da atmosfera
ρ_λ	- Reflectância
L_λ	- Banda Espectral
d	- Distância instantânea Sol-Terra
dm	- Distância média Sol-Terra
$E_{sol\lambda}$	- Irradiância solar média no topo da atmosfera
η	- Dia juliano
φ	- Latitude em graus decimais
ψ	- Ângulo horário
nr	- Ruído aditivo
S	- Função de amostragem
Nr	- Ruído aditivo no domínio da frequência
Δx	- Intervalo de amostragem
P	- Filtro de restauração
u_c	- Frequência de corte do sistema
σ_F	- Desvio-padrão do filtro de simulação
σ_{Sai}	- Desvio-padrão da curva de MTF da imagem de saída
σ_{Ent}	- Desvio-padrão da curva de MTF da imagem de entrada
G_p	- Imagem Proporção
G_{TOA}	- Imagem reflectância aparente
G_{Sup}	- Imagem reflectância da superfície

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	1
1.1 Motivação	1
1.2 Objetivos.....	4
1.3 Organização do documento	4
2 ESTIMAÇÃO DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE MODULAÇÃO.....	7
2.1. Função de Transferência de Modulação (MTF)	7
2.2. Polinômios de Zernike.....	10
2.3. Métodos de estimação da MTF	14
2.4. Avaliação do Método de Estimação da MTF baseado em Polinômios de Zernike .	22
2.5 Estimação da MTF de sensores a bordo de satélites	29
2.5.1 Avaliação da MTF em imagens reais	33
2.5.2 Avaliação da Resolução Espacial Efetiva (EIFOV).....	38
2.6 Operational Land Imager - OLI/Landsat-8.....	45
3 SIMULAÇÃO DA RESOLUÇÃO ESPACIAL DE SENSORES ORBITAIS.....	49
3.1 Métodos de Simulação de Imagens	50
3.2 Método de simulação proposto.....	55
3.2.1 Simulação da cena (correção geométrica e radiométrica)	58
3.2.2 Estimação da MTF	66
3.2.3 Contribuição dos efeitos atmosféricos.....	67
3.2.4 Simulação da resolução espacial	68
3.3. Avaliação do método de simulação	69
3.3.1 Análise Visual	71
3.3.2 Diferença de imagens	75
3.3.3 Classificação e similaridade entre as imagens.....	77
4 ESTUDO DE CASO: SIMULAÇÃO DE IMAGENS MUX/CBERS-4.....	79
4.1. Área de estudo	80

4.2 Metodologia.....	82
4.2.1 Simulação da imagem MUX do CBERS-4	83
4.2.2 Processamento Digital	84
4.3 Resultados e Discussão.....	85
5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS.....	91
5.1 Conclusões.....	91
5.2 Trabalhos Futuros.....	92
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93
APÊNDICE A	105
APÊNDICE B.....	107
APÊNDICE C.....	117
APÊNDICE D	125

1 INTRODUÇÃO

A produção de imagens com qualidade radiométrica e geométrica adequada às várias aplicações em sensoriamento remoto depende do desempenho dos sistemas sensores a bordo de satélites. A avaliação do desempenho dos sensores deve ser realizada antes do lançamento, durante a fase de comissionamento (logo após o lançamento do satélite) e durante a sua vida útil (testes em órbita) para garantir a qualidade das imagens. Esta avaliação é essencial para assegurar a interoperabilidade e consistência dos produtos gerados, e para corrigir possíveis distorções presentes nas imagens, garantindo assim a geração de dados com qualidade.

1.1 Motivação

Desde 1988, o Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) tem trabalhado no Programa CBERS (*China Brazil Earth Resources Satellite*), em cooperação com a China, o que tem permitido aos dois países o aprimoramento da tecnologia espacial e a disponibilidade de dados do sensoriamento remoto para observação da Terra. A segunda geração de satélites desenvolvida na parceria sino-brasileira, CBERS-3 e 4, representa uma evolução dos satélites CBERS-1, CBERS-2 e CBERS-2B.

Além do Programa CBERS, o Programa Espacial Brasileiro prevê o desenvolvimento de outros sistemas tais como o AMAZÔNIA-1, projetado para monitorar a Amazônia brasileira, o SABIA-MAR, desenvolvido em cooperação com a Argentina para estudos oceânicos, e o GPM-BRASIL para estudos meteorológicos (AEB, 2005; CARVALHO, 2011).

O Programa CBERS possui quatro principais segmentos denominados: Segmento Espacial – Satélite; Segmento de Controle; Segmento de Aplicações; e Segmento de Lançamento. O *Segmento Espacial* consiste na plataforma propriamente dita e suas interfaces com os outros segmentos. O *Segmento de Controle* controla as operações do satélite de acordo com os requisitos definidos pelo programa de atividade das cargas úteis, além de tratar as anomalias identificadas no satélite. O *Segmento de Aplicações* é responsável pelas atividades de recepção, de processamento e de geração de produtos de imagem nos diferentes níveis de processamento, que são executadas pela Estação de Processamento de Imagens multissatelitária desenvolvida pela indústria brasileira. O *Segmento de Lançamento* consiste do veículo lançador e da base de lançamento.

Para garantir a qualidade das imagens, alguns *Requisitos de Missão* precisam ser verificados antes do lançamento do satélite e durante a sua operação em órbita. Nesta fase, deve-se verificar a conformidade das características dos sistemas com os requisitos estabelecidos no projeto do satélite e de seus subsistemas. O desempenho dos sistemas de imageamento é avaliado para verificar se os requisitos das câmeras estão de acordo com as especificações de projeto e também para obter os parâmetros de correção a serem usados na estação de processamento de imagens.

Nas reuniões do JACIE (*Joint Agency Commercial Imagery Evaluation*) e do WGCV (*Working Group on Calibration and Validation*) do CEOS (Committee on Earth Observation Satellites), têm-se discutido métodos de avaliação da qualidade de dados de sensoriamento remoto e procedimentos de validação de missões espaciais. Como resultado das discussões, alguns protocolos de avaliação de qualidade de dados de observação da Terra têm sido definidos e registrados no documento QA4EO (*Quality Assurance Framework for Earth Observation*) (GEO/CEOS, 2008). Este documento estabelece medidas de qualidade de imagens tais como calibração radiométrica, relação sinal-ruído, medidas da MTF, precisão de registro entre bandas e outras (BARALDI et al., 2010). Um bom exemplo de plano de verificação de qualidade de imagens é o do Programa Landsat, conhecido por LIDQA - *Landsat Image Data Quality Assessment* (BARKER, 1994).

De forma geral, os dados adquiridos por sensores a bordo de satélites são afetados por fatores como: degradação da resposta dos detectores, difração óptica, efeitos atmosféricos, movimentos da plataforma, variação do relevo e outros. Estes fatores degradam a qualidade das imagens, e quando não corrigidos podem comprometer o uso das imagens nas diversas aplicações de sensoriamento remoto.

Em relação à qualidade geométrica dos sistemas sensores, Silva (2007), Schowengerdt (2006), e Richards (2013) analisaram as causas de degradação geométrica das imagens e propuseram alguns modelos de correção geométrica. Considerando a qualidade radiométrica dos sensores a bordo de satélites, algumas medidas e parâmetros de avaliação foram propostos em Fonseca *et al.* (2004); Yong *et al.* (2006); Gouvêa e Fonseca (2009):

- Calibração óptica por meio da MTF (*Modulation Transfer Function*): a função de transferência de modulação é usada para medir o desempenho da câmara em termos de resolução espacial. Quando a MTF do sistema não atende as especificações de projeto as imagens adquirem uma aparência borrada. Na avaliação, valores de MTF são medidos para algumas frequências, inclusive na frequência de *Nyquist* (metade da frequência de amostragem);
- Relação sinal ruído (SNR): este parâmetro mede o nível de ruído do sinal e é dado pela razão entre o sinal e o ruído da imagem (GOUVÊA, 2008; ANJOS, 2006);
- Calibração relativa (intercalibração): quando as respostas dos detectores são diferentes para o mesmo alvo, as imagens apresentam efeito de *striping*, visíveis em áreas homogêneas. Para cada detector calculam-se os valores de ganho e offset para corrigir a distorção radiométrica entre eles (GOUVÊA, 2008; GOUVÊA; FONSECA, 2009);
- Calibração absoluta: o objetivo da calibração absoluta é definir os coeficientes de calibração usados para relacionar os níveis digitais (DN – Digital Number) na imagem com o valor de radiância na entrada do sistema óptico (PONZONI et al., 2007).
- Função de resposta espectral: consiste em caracterizar a resposta espectral de cada banda. A resposta espectral deve ser medida com boa resolução espectral, em torno de 10 nm (DIAS e WEI, 2010). Os dados são fornecidos na forma de curvas ou tabelas com os valores numéricos;
- Calibração interna: o objetivo da calibração interna é permitir a calibração, tanto absoluta como a relativa, durante a vida útil da câmera para compensar a degradação dos detectores e eletrônica do sistema;
- Análise e correção de ruídos tais como perda de linhas ou colunas nas imagens (efeito *striping*), saturação de níveis de cinza, etc;
- Simulação de imagens para avaliar o potencial da missão espacial nas diferentes aplicações em sensoriamento remoto e qualificar a missão espacial.

(SCHOWENGERT, 2006; SCHOTT, 2007; SCHOTT, 2010; ARNESEN, 2011; RIBEIRO et al., 2013).

Atualmente, uma equipe do INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - está desenvolvendo um plano de verificação, manutenção e monitoramento sistemático da qualidade das imagens geradas e entregues aos usuários finais. Os métodos desenvolvidos nesta tese serão contribuições para a realização de parte deste plano.

1.2 Objetivos

Com o objetivo de desenvolver um plano de avaliação e de validação de novas missões espaciais em termos da qualidade de imagens, esta tese apresenta um novo método de estimação da resolução espacial efetiva de sensores ópticos e orbitais. O método consiste em estimar a MTF baseado em Polinômios de Zernike, cujo desenvolvimento foi realizado em cooperação com a Universidade de Barcelona. Um novo método de simulação de imagens também é proposto. Este método pode ser utilizado em aplicações na área de sensoriamento remoto como, por exemplo, na avaliação do potencial do uso de um sensor em estudos urbanos (RIBEIRO, 2010) ou em análise ambiental a partir de imagens simuladas. Nesta tese, o método foi usado para avaliar o potencial das imagens do sensor MUX do CBERS-4 na discriminação entre classes de cobertura do solo.

Esta tese contribui para o fortalecimento da capacidade dos profissionais da tecnologia espacial no desenvolvimento de atividades de avaliação e validação de sensores de novas missões e análise do potencial de novos sensores em aplicações em sensoriamento remoto. Estas atividades incluem estudos de avaliação da qualidade radiométrica e geométrica de imagens para a qualificação da missão espacial e acompanhamento da evolução das novas missões espaciais de forma que o conhecimento adquirido possa dar suporte para definição de futuras missões. Desta forma, o desenvolvimento de métodos de estimação da MTF e simulação de imagens propostos neste trabalho é uma atividade essencial para a qualificação de uma missão espacial.

1.3 Organização do documento

Este trabalho está organizado da seguinte forma:

O Capítulo 2 apresenta o método de estimação da MTF utilizando Polinômios de Zernike. Este Capítulo contém uma revisão bibliográfica sobre métodos de estimação da MTF e os fundamentos teóricos sobre os Polinômios de Zernike. Para validar os métodos propostos, alguns resultados experimentais com imagens sintéticas e imagens reais dos satélites Landsat e CBERS são também apresentados.

O Capítulo 3 apresenta o método de simulação de imagens e os módulos que o compõem. O método de simulação é usado para analisar o desempenho dos sensores TM e CCD dos satélites Landsat e CBERS em termos de sua resolução espacial.

O Capítulo 4 avalia o potencial do uso das imagens do sensor MUX do satélite CBERS-4, similar ao do CBERS-3, cujo lançamento em Dezembro de 2013 falhou.

Finalmente, as conclusões sobre o trabalho realizado e futuras pesquisas são apresentadas no Capítulo 5.

2 ESTIMAÇÃO DA FUNÇÃO DE TRANSFERÊNCIA DE MODULAÇÃO

2. 1. Função de Transferência de Modulação (MTF)

Pode-se afirmar que a imagem de um objeto observado por um sensor a bordo de satélite é uma cópia borrada do objeto, devido ao efeito de degradação inserido pelo sistema sensor durante o processo de imageamento (FONSECA et al., 1993; BOGGIONE, 2003). Geralmente, a resolução espacial efetiva, que leva em conta as degradações inseridas pelo sensor, é pior do que a resolução nominal definida no projeto do satélite. A resolução espacial efetiva pode ser estimada a partir da MTF (*Modulation Transfer Function*) ou PSF (*Point Spread Function*) do sensor. Um parâmetro usado para medir a resolução espacial efetiva é o EIFOV (*Effective Instantaneous Field of View*), que é dado pelo inverso do dobro da frequência espacial para a qual a MTF é igual a 0,5, como mostra a Figura 2.1. (FONSECA et al., 1993).

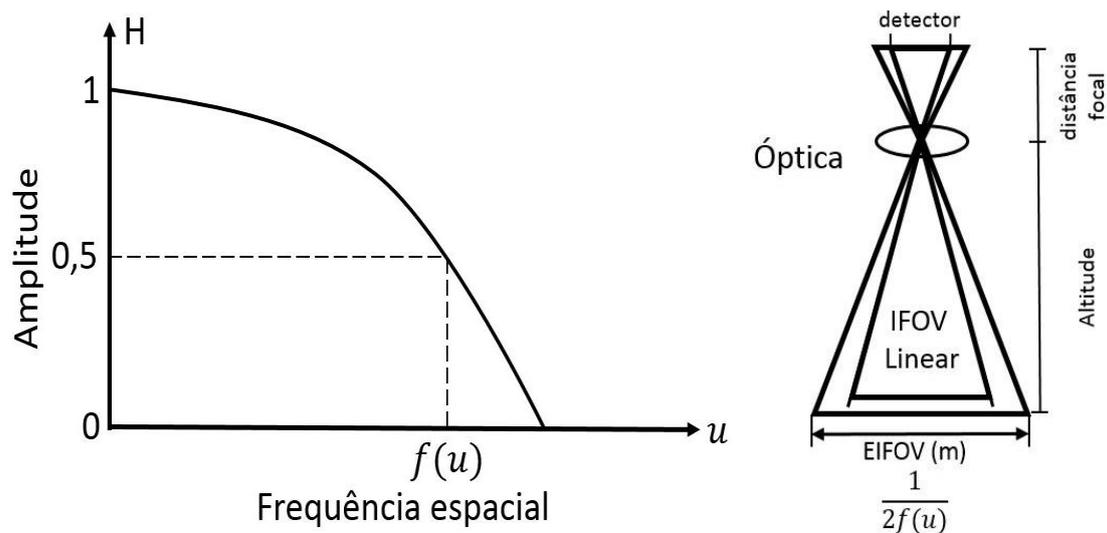


Figura 2.1 – Definição de EIFOV.

A PSF (Função de Espalhamento Pontual), ou resposta impulsiva, é a função que descreve a forma como um sensor óptico reproduz a imagem de um ponto de luz: se o sistema fosse perfeito, a imagem de uma fonte de luz pontual seria idêntica ao ponto original. Dado que o sensor não é perfeito, a resposta a esta fonte de luz pontual apresenta espalhamento, em maior ou menor extensão, em torno de um máximo, como mostra a Figura 2.2. A forma desta função depende do desempenho do sistema de imageamento e o seu conhecimento permite que o processo de reconstrução de imagens

seja realizado (BATISTA, 2007).

Se o processo de formação de imagens é considerado linear e invariante com o deslocamento e sem ruído, a imagem de saída, g , pode ser descrita como a convolução da resposta impulsiva do sistema, h , com o sinal de entrada f :

$$g = f * h, \quad (2.1)$$

onde o símbolo $*$ indica a operação de convolução. Pelo teorema da convolução, a Equação 2.1 pode ser representada no domínio da frequência espacial por:

$$G = F \cdot H, \quad (2.2)$$

onde G , F e H são as transformadas de Fourier de g , f e h , respectivamente. A função H é conhecida por função de transferência do sistema e, no caso de sistemas ópticos, Função de Transferência Óptica (OTF).

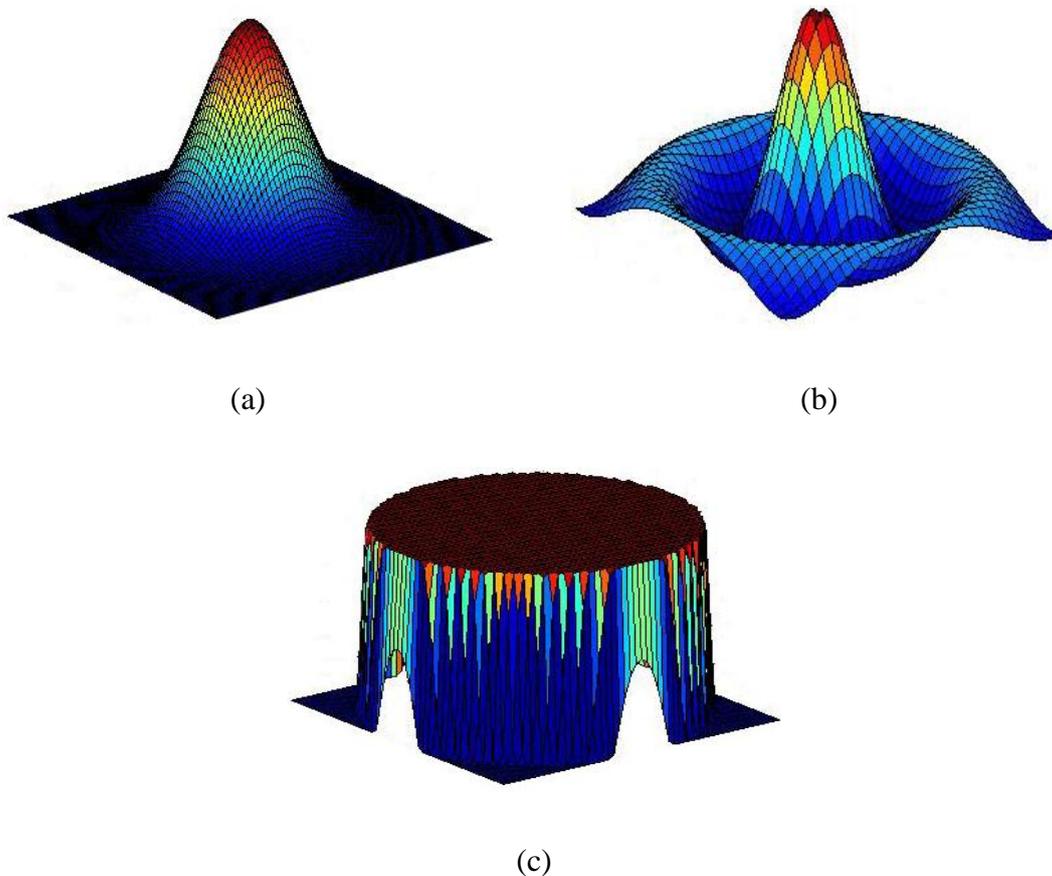


Figura 2.2 – Diferentes formas da Função de Espalhamento Pontual. (a) Gaussiana; (b) Sinc; (c) Radial.

A OTF é uma função complexa e pode ser escrita na forma:

$$OTF = |H|e^{i\Phi}, \quad (2.3)$$

onde $|H|$ e Φ são o módulo e a fase da função H , conhecidos por Função de Transferência de Modulação (MTF) e Função de Transferência de Fase (PTF – *Phase Transfer Function*), respectivamente. A OTF descreve como o sistema modifica a amplitude e desloca a fase das componentes em frequência de um sinal de entrada ao sistema (SCHOWENGERDT, 2006).

A MTF é importante nas fases de especificação e de projeto de um sistema imageador, assim como na análise da qualidade das imagens que ele produz. Ela mede a habilidade do sistema em recriar o conteúdo de frequência espacial (detalhes) de uma cena. De acordo com a Equação 2.2, um sistema imageador ideal tem uma MTF unitária em todas as frequências espaciais, isto é, todas as componentes em frequência da cena são reproduzidas na imagem de saída. Na prática, os valores da MTF diminuem quando a frequência espacial aumenta. Assim, quanto mais lentamente o seu valor cai para zero melhor é a qualidade da imagem em termos da reproducibilidade do conteúdo em frequência espacial.

Geralmente a MTF de um sistema linear e invariante no espaço, H , pode ser aproximada por uma função gaussiana (FONSECA *et al.*, 1993):

$$H(u) = \exp(-2\pi^2\sigma^2u^2), \quad (2.4)$$

onde u é a frequência espacial e σ é o desvio-padrão da função gaussiana.

Este modelo é simples, e não se aplica, por exemplo, ao caso de modelos ópticos adaptativos usados para descrever e modelar as aberrações ópticas e os efeitos de distorção de frentes de onda (TYSON, 2000). Um modelo mais completo que descreve tais aberrações ópticas é conhecido por Polinômios de Zernike, descrito na próxima seção.

2.2. Polinômios de Zernike

O comportamento de um sistema óptico pode ser analisado usando o conceito de frentes de onda. Os raios de luz que atravessam a lente produzem frentes de ondas que podem ter diferentes formas dependendo das aberrações provocadas pelo sistema óptico. Em um sistema ideal a frente de onda é plana, mas devido às distorções ópticas esta frente de onda apresenta deformações, como ilustrado na Figura 2.3.

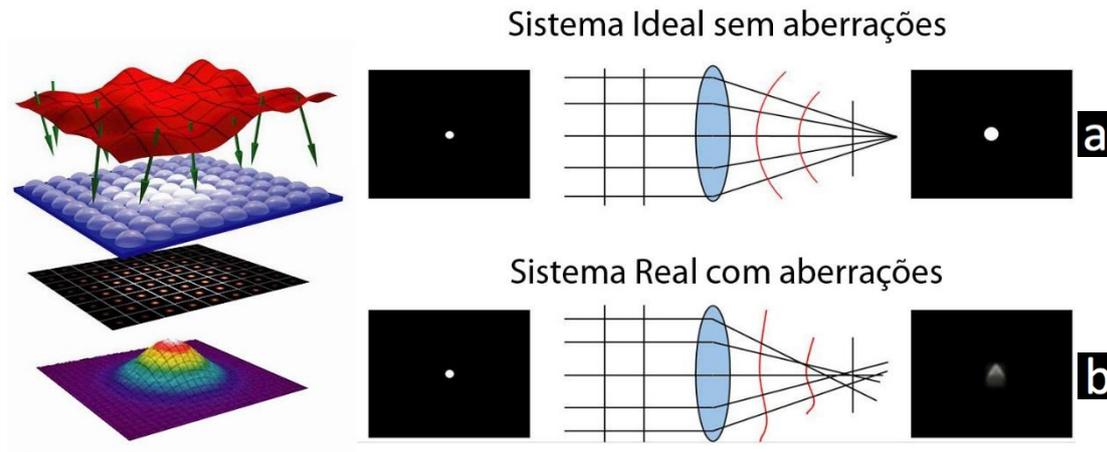


Figura 2.3 – Sistema de formação de imagens (a) sem e (b) com distorções ópticas.

Fonte: Adaptado de: <http://www.llg-ev.de/en/departments/optics-short-wavelengths/beam-propagation/wavefront-detection.html> (2012)

A onda deformada pode ser analisada por meio de um mapa que descreve as características desta onda. Como a frente de onda deformada é complexa, ela é decomposta em ondas com formas mais simples, que representam, individualmente, as aberrações presentes no sistema. Usando estes conceitos, Frederik Zernike desenvolveu um modelo baseado em um conjunto de polinômios, chamados Polinômios de Zernike, que descrevem as distorções presentes nos sistemas ópticos (WYANT; CREATH, 1992). Este modelo é usado para descrever as aberrações do sistema óptico humano (BATISTA, 2007).

Estes polinômios representam as aberrações ópticas como função das suas subcomponentes (aberrações de diferentes ordens de Zernike) e a sua fidelidade depende unicamente do número e precisão dos seus componentes. A aberração total é o resultado da soma da contribuição de todos os polinômios (BATISTA, 2007).

Apesar de outros sistemas de equações, como as Séries de Taylor e de Fourier, serem também adequados para este estudo, os Polinômios de Zernike possuem características que os tornam particularmente indicados e úteis para modelar a resposta espacial de sensores ópticos: permitem detalhar o mapa de aberrações de frente de onda com um conjunto relativamente pequeno de coeficientes; as funções individuais básicas de Zernike (chamadas de modos) ajustam-se muito bem às formas das aberrações clássicas como a desfocagem ou o astigmatismo; as combinações dos diferentes modos representam bem as aberrações de frentes de onda bem comportadas; formam um conjunto de funções completo e normalizado sobre o círculo unitário (como a maioria dos componentes ópticos, tais como lentes e orifícios são circulares, logo se beneficiam de um conjunto de funções descritas em um círculo (AMARAL; MONTEIRO, 2012)) e, finalmente, possuem algumas propriedades de invariância, desejáveis em termos de simetria e elegância matemática.

Em coordenadas polares, os polinômios de Zernike resultam do produto entre um polinômio radial e uma projeção azimutal (plana):

$$Z_n^l(\rho, \theta) = \begin{cases} R_n^l(\rho) \cos(l\theta), & l < 0 \\ R_n^l(\rho) \sin(l\theta), & l \geq 0 \end{cases}, \quad (2.5)$$

onde l pode ser qualquer número n inteiro não negativo, ou seja $n \geq 1$, ρ representa o raio normalizado da pupila e θ é o ângulo azimutal em torno da pupila ($0 \leq \theta \leq 2\pi$).

Os componentes radiais dos polinômios de Zernike são dados por:

$$R_n^l(\rho) = \sum_{s=0}^{(n-1)/2} \frac{(-1)^s (n-s)!}{s! \left[\frac{(n+l)}{2} - s \right]! \left[\frac{(n-l)}{2} - s \right]!} \rho^{n-2s}, \quad (2.6)$$

Seja k o k -ésimo termo de Zernike, calculado em função dos índices n e l :

$$k = \frac{n(n+1)}{2} + \frac{(n-l)}{2} + 1. \quad (2.7)$$

Uma frente de onda determinada por 15 termos, por exemplo, pode ser representada pela equação:

$$w(x, y) = \sum_{k=1}^{15} C_k Z_k(x, y), \quad (2.8)$$

com derivadas parciais:

$$w'_x(x, y) = \sum_{k=1}^{15} C_k \frac{d(Z_k(x, y))}{dx}, \quad (2.9)$$

$$w'_y(x, y) = \sum_{k=1}^{15} C_k \frac{d(Z_k(x, y))}{dy}, \quad (2.10)$$

onde C_k são os coeficientes de Zernike.

O número de termos dos polinômios de Zernike, $k=15$ nas Equações (2.8) a (2.10), é geralmente escolhido de forma que o somatório resulte na descrição precisa da deformação que se deseja modelar. Segundo Batista (2007) os primeiros 15 polinômios são suficientes para descrever adequadamente as aberrações ópticas mais comuns.

A Tabela 2.1 mostra alguns polinômios e as aberrações modeladas por eles (MALACARA, 2007). A Figura 2.4 ilustra as aberrações modeladas pelos 15 primeiros polinômios de Zernike sem o termo constante.

Tabela 2.1. Polinômios de Zernike.

Termo	Polar	Cartesiano	Significado
$Z_0(x, y)$	1	1	Termo Constante (piston)
$Z_1(x, y)$	$\rho \sin \theta$	x	Tilt (direção x)
$Z_2(x, y)$	$\rho \cos \theta$	y	Tilt (direção y)
$Z_3(x, y)$	$\rho^2 \sin(2\theta)$	$2xy$	Astigmatismo 1ª ord. 45°
$Z_4(x, y)$	$2\rho^2 - 1$	$-1 + 2y^2 + 2x^2$	Desfocagem
$Z_5(x, y)$	$\rho^2 \cos(2\theta)$	$y^2 - x^2$	Astigmatismo 1ª ord. 0°
$Z_6(x, y)$	$\rho^3 \sin(3\theta)$	$3xy^2 - x^3$	Trifoil
$Z_7(x, y)$	$(3\rho^3 - 2\rho) \sin \theta$	$2x + 3xy^2 + x^3$	Coma (direção x)
$Z_8(x, y)$	$(3\rho^3 - 2\rho) \cos \theta$	$-2y + 3yx^2 + y^3$	Coma (direção y)
$Z_9(x, y)$	$\rho^3 \cos(3\theta)$	$y^3 - 3yx^2$	Trifoil
$Z_{10}(x, y)$	$\rho^4 \sin(4\theta)$	$4y^3x - 4yx^3$	Quadrifoil
$Z_{11}(x, y)$	$(4\rho^4 - 3\rho^2) \sin(2\theta)$	$-6xy + 8y^3x + 8x^3y$	Astigmatismo
$Z_{12}(x, y)$	$6\rho^4 - 6\rho^2 + 1$	$1 - 6y^2 - 6x^2 + 6y^4 + 12y^2x^2 + 6x^4$	Aberração Esférica
$Z_{13}(x, y)$	$(4\rho^4 - 3\rho^2) \cos(2\theta)$	$-3y^2 + 3x^2 + 4y^4 - 4y^2x^2 - 4x^4$	Astigmatismo
$Z_{14}(x, y)$	$\rho^4 \cos(4\theta)$	$y^4 - 6y^2x^2 + x^4$	Quadrifoil

Fonte: Malacara (2007).

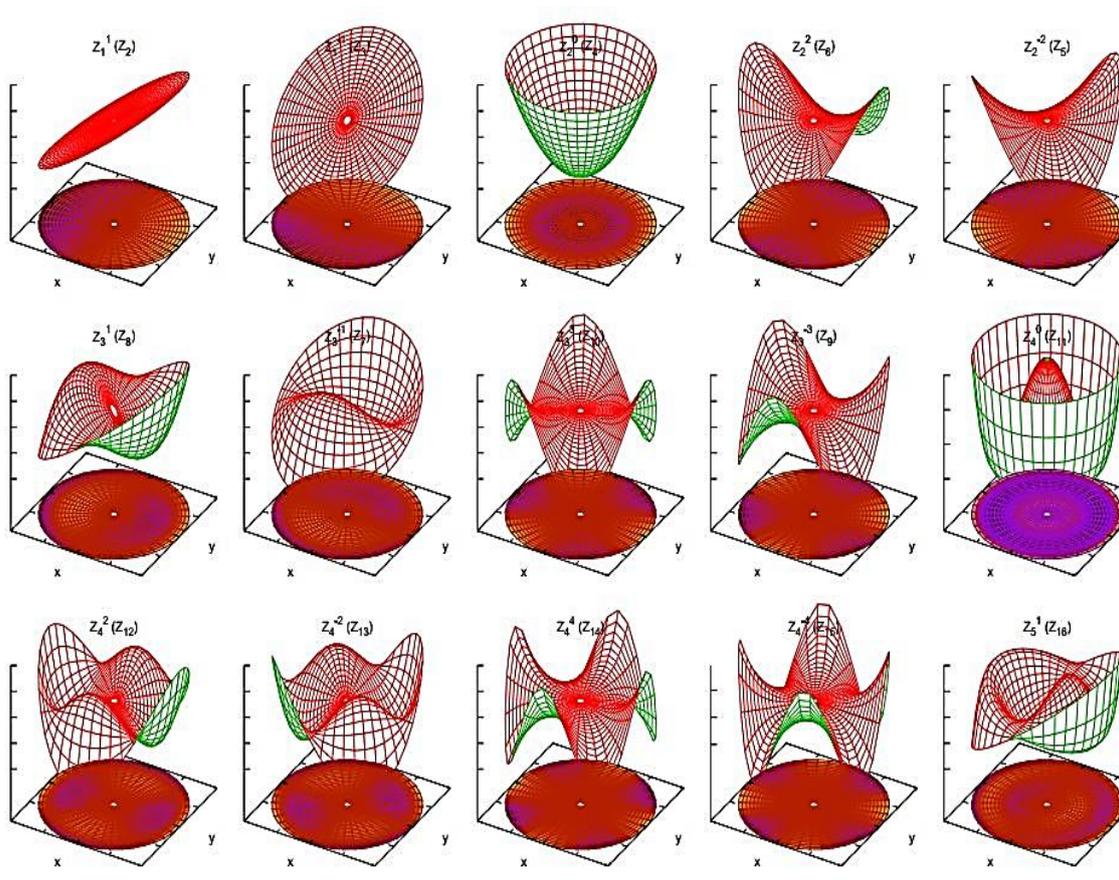


Figura 2.4 – Modelos das aberrações representadas pelos 15 primeiros polinômios de Zernike sem o termo constante.

Fonte: Adaptado de:

http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Zernike_polynomials3.pdf (2013).

2.3. Métodos de estimação da MTF

Antes do lançamento do satélite, a MTF do sensor é medida em laboratório para avaliar o desempenho do sensor. As medições são obtidas usando alvos com diferentes padrões tais como alvos senoidais, alvos do tipo fenda, ponto e borda (SCADUTTO, 2008). No caso da câmera MUX a bordo do satélite CBERS-3, por exemplo, a MTF foi medida em laboratório usando o padrão do tipo fenda (SANTOS JUNIOR et. al., 2010).

Em laboratório, os valores de MTF são medidos para algumas frequências como, por exemplo, na frequência de *Nyquist* (Ny) e na metade da frequência de *Nyquist* ($Ny/2$), figuras de mérito utilizadas para avaliar o desempenho de sensores ópticos, como mostra a Figura 2.5. O critério de *Nyquist* especifica que um sinal precisa ser amostrado pelo menos duas vezes em cada ciclo de variação, ou seja, a frequência de amostragem

precisa ser no mínimo o dobro da maior frequência presente no sinal (GONZALEZ; WOODS, 2010). Se não for observado este critério, os sinais de mais alta frequência serão erroneamente registrados como de baixa frequência, causando serrilhamento em bordas determinado pelo efeito de *aliasing*, como mostra a Figura 2.6. A frequência de *Nyquist* corresponde à metade da frequência espacial de amostragem do sistema, que geralmente define o tamanho do pixel.

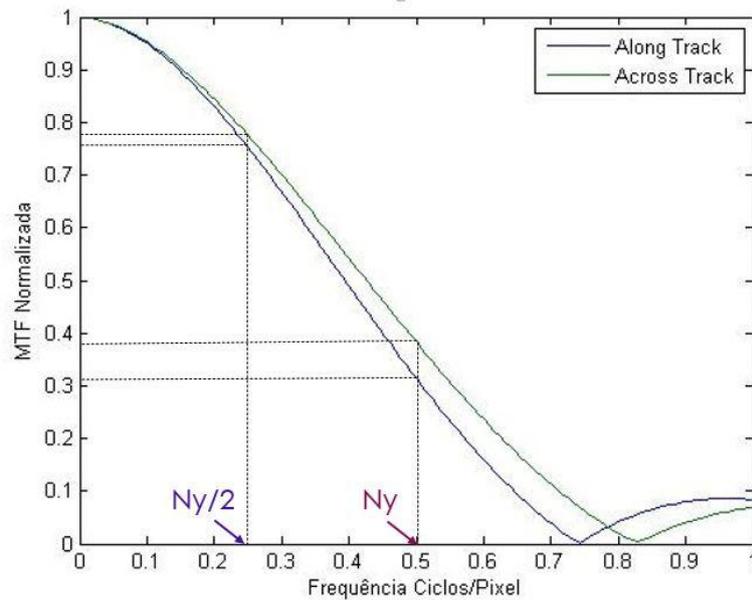


Figura 2.5 – Figuras de mérito utilizadas para avaliar o desempenho de sensores ópticos. Frequência de *Nyquist* (Ny) e metade da frequência de *Nyquist* ($Ny/2$). A frequência de *Nyquist* (Ny) corresponde à metade da frequência espacial de amostragem do sistema.



(a)

(b)

Figura 2.6 - (a) Imagem original; (b) Serrilhamento em bordas provocado pelo efeito de *aliasing* na imagem.

Os valores de MTF podem também ser medidos em duas direções: ao longo da trajetória do satélite (*Along-track*) e na direção perpendicular a trajetória do satélite (*Across-track*).

Os requisitos de projeto da câmera CCD do CBERS-2B estabelecem que o valor da MTF na frequência de *Nyquist* (MTF_{Nq}) para as bandas de 1 a 4 são: $MTF_{Along-track} \geq 0,28$ e $MTF_{Across-track} \geq 0,18$. Para o TM do Landsat-5 os valores de MTF nas bandas 1 a 5 e 7 devem ser maiores ou iguais a 0,275 (NASA, 1996).

Após o lançamento do satélite, a MTF é avaliada para verificar se a resolução espacial do sistema foi degradada. Os métodos mais utilizados para estimar a MTF de um sensor em órbita são:

- 1) Análise de feições lineares (bordas) na imagem (VIALLEFONT-ROBINET, 2010);
- 2) Análise de objetos naturais de formas bem definidas tais como pontes, estradas, pistas de aeroportos (STOREY, 2001; CHOI e HELDER, 2001; NELSON e BARRY, 2001; LEGER *et al.*, 2002; LUXEN e FOSTNER,

2002; BENSEBAA *et al.*, 2011);

- 3) Comparação com imagens de alta resolução (BANON, 1990; LI, 2009; BENSEBAA *et al.*, 2011);
- 4) Modelos teóricos do processo de formação de imagens (MARKHAM, 1985; FONSECA *et al.*, 1988; STOREY, 2001; VIALLEFONT-ROBINET, 2010);
- 5) Análise de alvos artificiais colocados em áreas homogêneas (BENSEBAA *et al.*, 2004, 2011).

A Tabela 2.2 apresenta um resumo das informações sobre os métodos usados nos trabalhos acima mencionados.

Tabela 2.2 – Métodos de estimação da MTF.

Método	Alvos / Parâmetros	Descrição	Referências
Baseado em bordas	¹ Cenas Urbanas	¹ pontes, lonas e superfícies pintadas ² áreas de agricultura Objetos devem possuir contraste alto para maximizar a relação sinal/ruído Fácil implementação Obtém PSF bidimensional Adaptável a qualquer sensor	Choi e Helder, 2001 Kohn, 2004 Léger <i>et al.</i> , 2003 Reulke <i>et al.</i> , 2006 Saunier <i>et al.</i> , 2006 Hearn, 2002 Helder <i>et al.</i> , 2004 Storey, 2001 Bensebaa <i>et al.</i> (2011)
	² Áreas de transição de culturas		Kubik <i>et al</i> (1998) Léger <i>et al.</i> (2003)
	³ Refletores	³ Espelhos convexos(passivos) ⁴ Lâmpadas de Xenon (ativos) Obtém PSF bidimensional Contraste alto da fonte de luz para maximizar a relação sinal/ruído	Rauchmiller e Schowengerdt (1988) Rangaswamy (2003) Helder <i>et al.</i> (2004)
	⁴ Fontes de luz artificial	A quantidade de fontes depende das características do sensor tais como a forma da PSF e o Campo de Visada Instantâneo (IFOV)	Léger <i>et al.</i> (2003)
Alvos Celestes	Lua	Fonte pontual de luz: Lua Interoperabilidade Utiliza a Função de espalhamento de Borda A MTF final é calibrada com dados de pré-lançamento O sensor é ajustado para o imageamento (angulação e velocidade)	Hearn (2002) Kieffer e Anderson (1998)

	<i>Estrelas e Planetas</i>	<i>Fontes pontuais de luz: estrelas</i> <i>Interoperabilidade</i> <i>Posições aparentes e conhecidas dos astros contribuem para precisão do resultado</i> <i>O sensor é ajustado para o imageamento (angulação e velocidade)</i> <i>Modelo gaussiano</i>	<i>Hearn (2000)</i> <i>Hearn (2002)</i>
Modelos Teóricos	<i>Parâmetros de Projeto</i>	<i>Utiliza valores de projeto e/ou valores determinados antes do lançamento</i>	<i>Markham (1985)</i> <i>Fonseca et al. (1996)</i> <i>Storey (2001)</i> <i>Viallefont-Robinet, (2010)</i>
Bi Resolução	<i>MTF Relativa</i>	<i>MTF das imagens é desconhecida</i> <i>Avalia a degradação do foco ou variação espacial da MTF dado um referencial</i>	<i>Léger et al. (2003)</i>
	<i>Degradação de Imagens de Melhor Resolução</i>	<i>MTF da imagem de melhor resolução é conhecida ou assume-se como igual a 1</i> <i>Estima a resolução do sensor em avaliação</i> <i>Degrada a imagem de melhor resolução</i>	<i>Kubik et al. (1998)</i> <i>Viallefont-Robinet (2004)</i> <i>Bensebaa (2011)</i>

Como se pode observar na literatura, a maioria dos métodos de estimação da MTF é baseada em bordas e, geralmente, a MTF é modelada como uma função gaussiana. Neste trabalho, a MTF é estimada pelo modelo de Bi-resolução utilizando a abordagem da degradação da imagem de melhor resolução modelada por Polinômios de Zernike. O método usa os seguintes parâmetros do sensor como entrada: comprimento de onda da banda, tamanho do detector, diâmetro da lente e distância focal do sistema de ajuste.

O método de estimação da MTF proposto compara uma imagem considerada ideal (Referência) com a imagem do sistema a ser analisado (Ajuste). Para que o método funcione corretamente, alguns critérios devem ser atendidos: (1) as imagens de Referência e Ajuste devem cobrir a mesma região e apresentar feições de alto contraste tais como bordas; (2) a imagem de Referência deve ter resolução espacial melhor do que a imagem de Ajuste; (3) a MTF da imagem de Referência deve ser conhecida ou assumida ideal; e (4) deve-se definir um critério de similaridade para comparar as imagens.

Diferente de alguns métodos baseados em bordas, o método proposto nesta pesquisa usa apenas uma imagem de entrada e as diferenças nos tons de cinza entre as imagens de

Referência e Ajuste contém as informações sobre as alterações da PSF ou MTF em todas as direções. A Figura 2.7 apresenta o fluxograma metodológico do processo de estimação da MTF baseado nos Polinômios de Zernike.

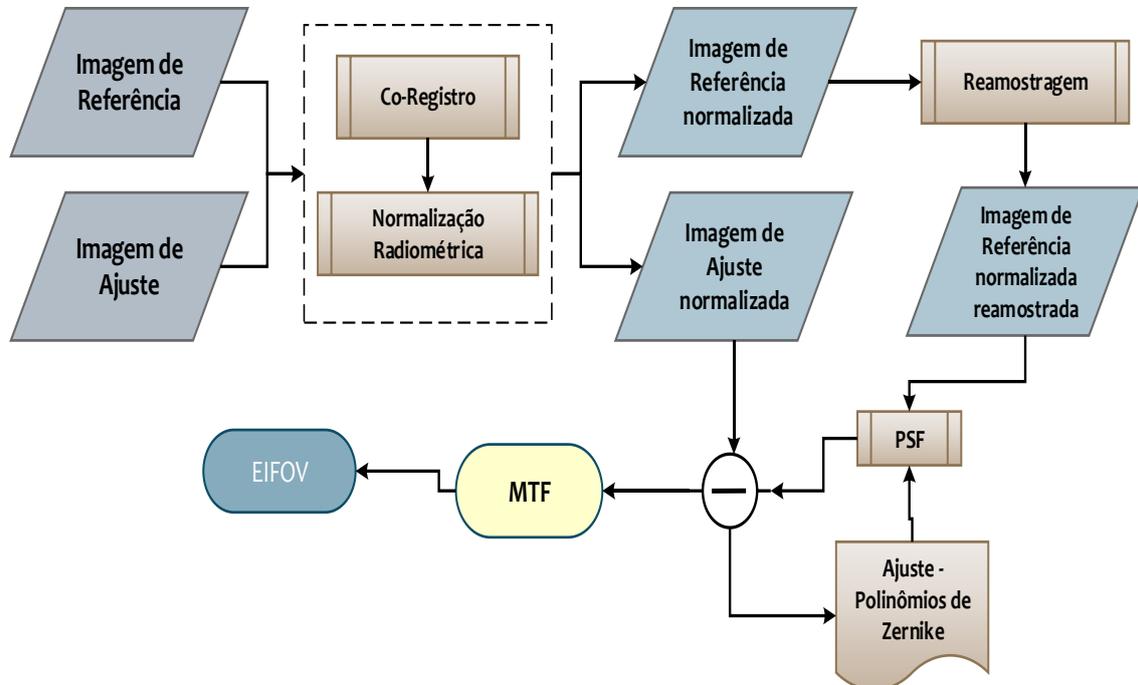


Figura 2.7 - Fluxograma do processo de estimação da MTF e EIFOV.

Dada a imagem de Ajuste como entrada, o procedimento de estimação da MTF é descrito pelos seguintes passos:

1. Identifica uma imagem (Referência) de um sensor com resolução espacial melhor do que a da imagem de ajuste. As imagens devem possuir faixas espectrais semelhantes;
2. Utiliza os parâmetros do sensor de Ajuste como dados de entrada para calcular a propagação da frente de onda (T): comprimento de onda da banda a ser estimada (λ), distância focal (df), tamanho do detector ($samp$), número de linhas da imagem de Ajuste (M), e relação entre o tamanho dos pixels das imagens de Ajuste e Referência ($relp$). Esta relação é dada por:

$$T = \lambda \cdot df \cdot \frac{relp}{M \cdot samp}, \quad (2.11)$$

3. Registra as imagens de Ajuste e Referência;

4. Reamostra a imagem de Referência para o mesmo tamanho de pixel da imagem de Ajuste usando média simples;

5. Normaliza radiometricamente as duas imagens de Ajuste e Referência. Neste processo são igualadas média (brilho) e variância (contraste);

6. Gera a grade de pontos do mesmo tamanho que o das imagens de entrada para gerar a frente de onda definida na Equação 2.10:

$$x = -\frac{M}{2} : \left(\frac{M}{2} - 1\right), \quad (2.12)$$

$$y = -\frac{M}{2} : \left(\frac{M}{2} - 1\right), \quad (2.13)$$

$$(x, y) \cdot T = [xp, yp], \quad (2.14)$$

onde x e y são os tamanhos das PSFs criadas em x e y , respectivamente. $[xp, yp]$ é a grade gerada em x, y .

7. Calcula os parâmetros ρ e θ da Equação (2.6) em função dos parâmetros do sensor (item 2) e da grade (item 6).

$$\rho = \frac{\sqrt{xp^2 + yp^2}}{sD}, \quad (2.15)$$

$$\theta = \text{atan}(xp, yp), \quad (2.16)$$

onde sD é o semi-diâmetro da lente.

8. Constrói os Polinômios de Zernike utilizando a posição da pupila (pup) em relação ao sDi (semidiâmetro interior da lente) e sD :

$$pup = \begin{cases} 1, & sDi \leq \sqrt{xp^2 + yp^2} \leq sD \\ 0, & \text{qualquer outro caso} \end{cases}, \quad (2.17)$$

$$w = V(1) \cdot \rho \cdot \cos(\theta) + V(2) \cdot \rho \cdot \text{sen}(\theta) + V(3) \cdot (2\rho^2 - 1) + V(4) \cdot \rho^2 \cdot \cos(2\theta) + V(5) \cdot \rho^2 \cdot \text{sen}(2\theta) + V(6) \cdot (3\rho^2 - 2) \cdot \rho \cdot \cos(\theta) + V(7) \cdot (3\rho^2 - 2) \cdot \rho \cdot \text{sen}(\theta) + V(8) \cdot (6\rho^4 - 6) \cdot \rho^2 + 1, \quad (2.18)$$

onde w é a frente de onda determinada pelo Polinômio de Zernike e os $V(k)$ são os termos dos coeficientes com k variando de 1 a 8.

9. Determina a função pupila ($fpup$):

$$fpup = e^{(i2\pi W)} \cdot pup , \quad (2.19)$$

10. Calcula os polinômios de Zernike que melhor ajustam a diferença mínima entre as imagens de Ajuste e Referência.

Em problemas de otimização, geralmente, a definição de uma solução ótima é uma tarefa difícil. Por exemplo, no caso de minimização de uma dada função objetiva, no lugar de procurar por um mínimo global, na prática, usam-se métodos para encontrar mínimos locais, representando soluções aproximadas para o problema. Neste trabalho, foi utilizado o método *downhill simplex* proposto por Nelder-Mead (1965). Dada uma função $f(\bar{p})$ onde (\bar{p}) são os parâmetros a serem estimados, queremos encontrar \bar{p}^* tal que $f(\bar{p}^*) < f(\bar{p}), \forall \bar{p} \in$ a vizinhança de \bar{p}^* , ou seja, buscamos um mínimo local de $f(\bar{p})$. O simplex é um conjunto de vetores (pontos) em um espaço M-dimensional. O algoritmo de Nelder-Mead emprega um simplex de M+1 pontos num espaço de M dimensões. Assim um espaço M-dimensional é varrido por M+1 vetores. Este simplex, portanto, é capaz de definir um hiperplano da função $f(\bar{p})$, representada como uma hipersuperfície num espaço M-dimensional. Uma vez que o simplex em um determinado instante (iteração) representa de modo razoável uma aproximação local de $f(\bar{p})$, é simples obter um ponto que, provavelmente, produzirá valores mais baixos de $f(\bar{p})$. Portanto, basta procurar este ponto na direção que liga o ponto produzindo o maior valor de $f(\bar{p})$ com o centróide dos outros pontos.

O método simplex é bastante popular devido à sua simplicidade: não usa derivadas e é baseado somente nos valores calculados pela função. Ele pode ser usado como um primeiro algoritmo de otimização para um protótipo do sistema (Press *et al.*, 2007). Em particular, para estimar os parâmetros de um modelo matemático (por exemplo, os Polinômios de Zernike), os resíduos podem representar a diferença entre os pixels de duas imagens: Ajuste (pior resolução) e a Referência (imagem ideal – melhor resolução) deteriorada artificialmente por um filtro gerado pelo modelo matemático.

A função objetivo utilizada no algoritmo de estimação, por tratar-se de um problema de

ajuste de parâmetros, foi o Erro Quadrático Mínimo (EMQ) dado por:

$$EMQ = \frac{1}{MN} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} (a(x, y) - b(x, y))^2, \quad (2.20)$$

onde M é o número de linhas e N o número de colunas das imagens; a é o valor do nível digital na imagem de ajuste e b o valor na imagem de referência na posição (x, y) .

11. A PSF/MTF é estimada pelo melhor conjunto de coeficientes de Zernike encontrado em função da aberração óptica determinada por eles.

$$PSF = \Re(fpup \cdot \overline{fpup}), \quad (2.21)$$

onde \Re é a parte real da função e \overline{fpup} é a função pupila conjugada.

2.4. Avaliação do Método de Estimação da MTF baseado em Polinômios de Zernike

Para ilustrar o potencial e desempenho do método de estimação da MTF baseado nos Polinômios de Zernike alguns experimentos foram realizados. A ideia foi testar o método em condições controladas com imagens que apresentem borda ideal e com degradação conhecida. Essas imagens serão aqui chamadas de imagens “sintéticas”.

A imagem degradada é gerada da seguinte forma:

- 1) Gera-se uma imagem de borda ideal com 1024 x 1024 pixels (Figura 2.8a);
- 2) A imagem interpolada é degradada por uma PSF modelada pela função de Zernike, cujos coeficientes são conhecidos (Figura 2.8c). A PSF é modelada pelos polinômios de Zernike com 8 coeficientes (Z_2, \dots, Z_9);
- 3) A imagem degradada é reamostrada (decimação por média simples) para gerar uma imagem 128x128. As imagens nas Figuras 2.8c e 2.8d mostram detalhes das imagens nas Figuras 2.8a e 2.8b, respectivamente. Os efeitos de borramento e de *aliasing* devido ao processo de reamostragem podem ser observados na borda na imagem.

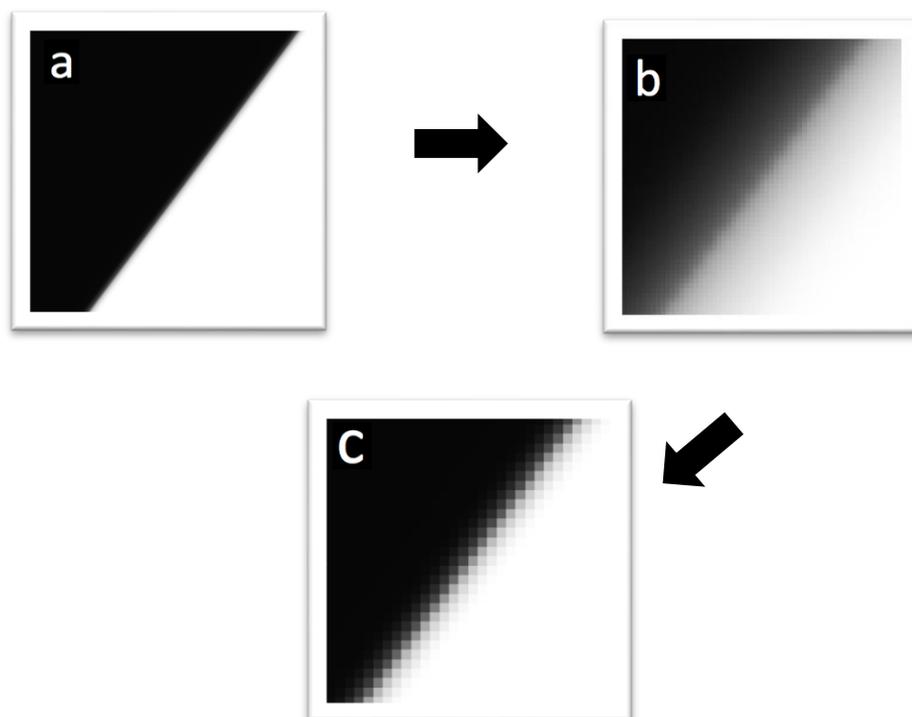


Figura 2.8 - Imagens que mostram os efeitos de degradação na (a) imagem de borda ideal (128x128 pixels); (b) efeitos inseridos pelo sistema óptico (1024x1024 pixels); (c) efeitos inseridos pelo sistema óptico e reamostragem (128x128 pixels).

Neste experimento, uma imagem de borda ideal foi degradada com diferentes PSFs conhecidas e o objetivo é estimá-las usando o método proposto baseado em Polinômios de Zernike. A PSF é modelada por Polinômios de Zernike com coeficientes conhecidos. Desta forma, a ideia consiste em estimar (recuperar) o valor da MTF na frequência de *Nyquist* (MTF_{Nq}) e na metade desta frequência ($MTF_{Nq/2}$) e comparar estes valores com os valores da MTF_{Nq} e $MTF_{Nq/2}$ conhecidos. Neste caso, 92 diferentes valores de MTF foram usados no experimento.

A Figura 2.9 apresenta o comportamento dos valores estimados e os valores de referência para a MTF_{Nq} . Da mesma forma, a Figura 2.10 apresenta o comportamento dos valores estimados e os valores de referência para a $MTF_{Nq/2}$. Os resultados mostram que os valores estimados são muito próximos aos valores de referência com uma diferença média de aproximadamente 1,4%. Portanto, isto indica que o desempenho do método de estimação proposto é robusto, pois consegue gerar resultados similares para os diferentes testes realizados. Os valores numéricos, representados na forma de gráficos aqui, são apresentados nos Apêndices A1 (*Nyquist*) e A2 (*Nyquist/2*).

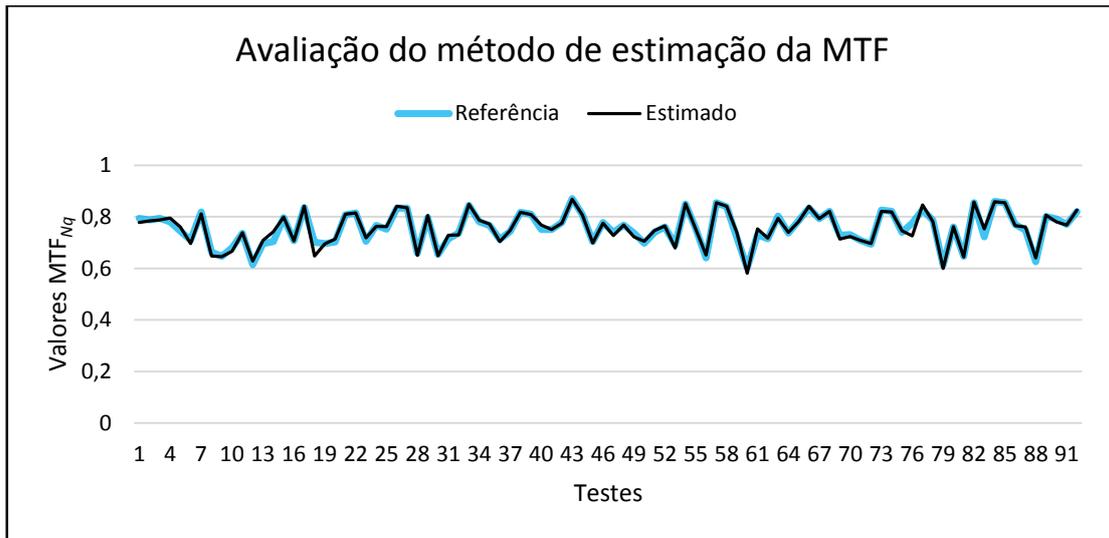


Figura 2.9 – Avaliação dos valores de MTF na frequência de *Nyquist* (MTF_{Nq}) estimados e comparados com os valores de Referência.

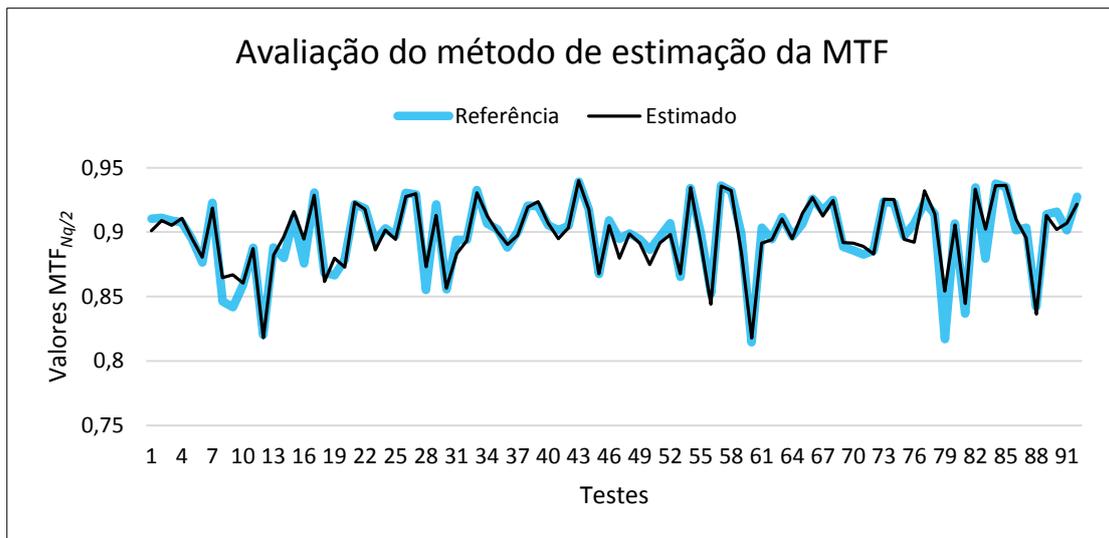
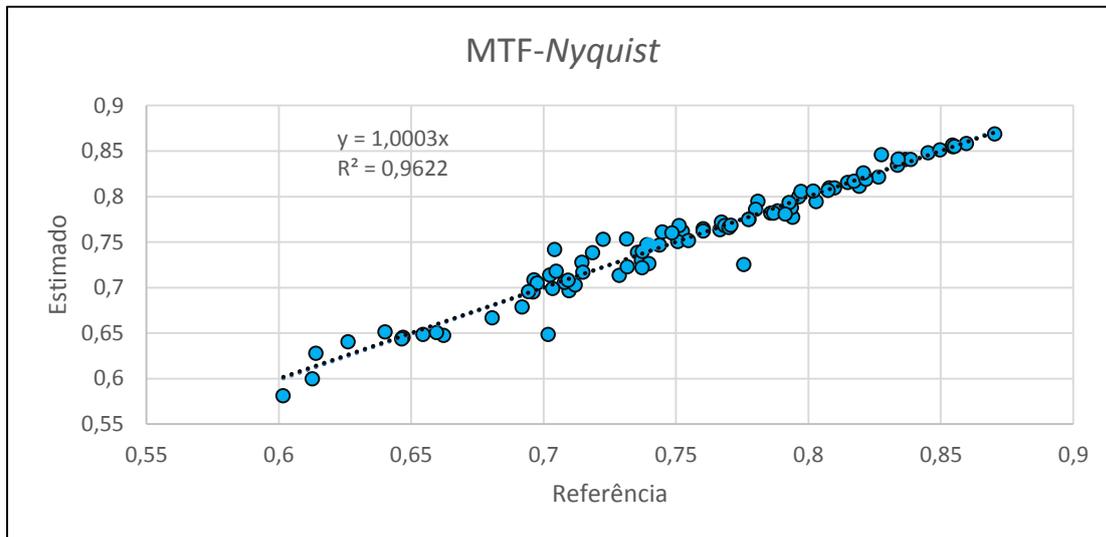


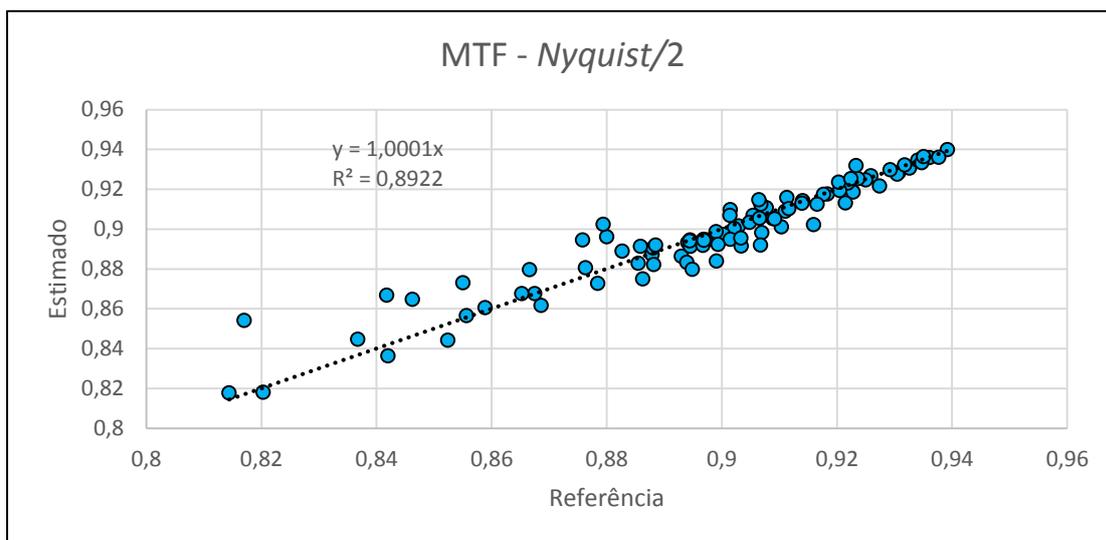
Figura 2.10 – Avaliação dos valores de MTF na metade da frequência de *Nyquist* ($MTF_{Nq/2}$) estimados e comparados com os valores de Referência.

Para avaliar o desempenho do método, também foi realizada a regressão linear comparando os valores de referência e os valores estimados dos 92 testes realizados, conforme Figura 2.11. Para os valores de MTF em *Nyquist* (Figura 2.10a) foi encontrado coeficiente de determinação (R^2) de 0,96 e para os valores de MTF na metade da frequência de *Nyquist* (Figura 2.10b) o coeficiente de determinação foi de 0,89. Estes resultados indicam alta correlação entre as variáveis, o que mostra que o método apresenta consistência e robustez. Além disso, o valor do coeficiente angular

(ca) é muito próximo de 1, e o intercepto (*inter*) é zero. Assim os métodos possuem acurácia (*ca*), precisão (R^2) e estão isentos de tendência (*inter*).



(a)



(b)

Figura 2.11 – Correlação entre os valores de MTF do gabarito e os valores de MTF estimados em (a) *Nyquist* e (b) na metade da frequência de *Nyquist*.

Para analisar uma situação em que a imagem está contaminada com ruído, a imagem de borda foi degradada por 10 diferentes funções de degradação (PSF) e a cada imagem degradada foi adicionado um ruído aleatório. Os resultados encontrados apresentaram diferenças médias de 15,4% em *Nyquist* e 4,1% em *Nyquist/2*. A Figura 2.12 mostra que os valores da MTF_{Nq} reais e estimados estão com resultados próximos mesmo

adicionando ruído. O mesmo procedimento é apresentado na Figura 2.13, com os valores na $MTF_{Nq/2}$.

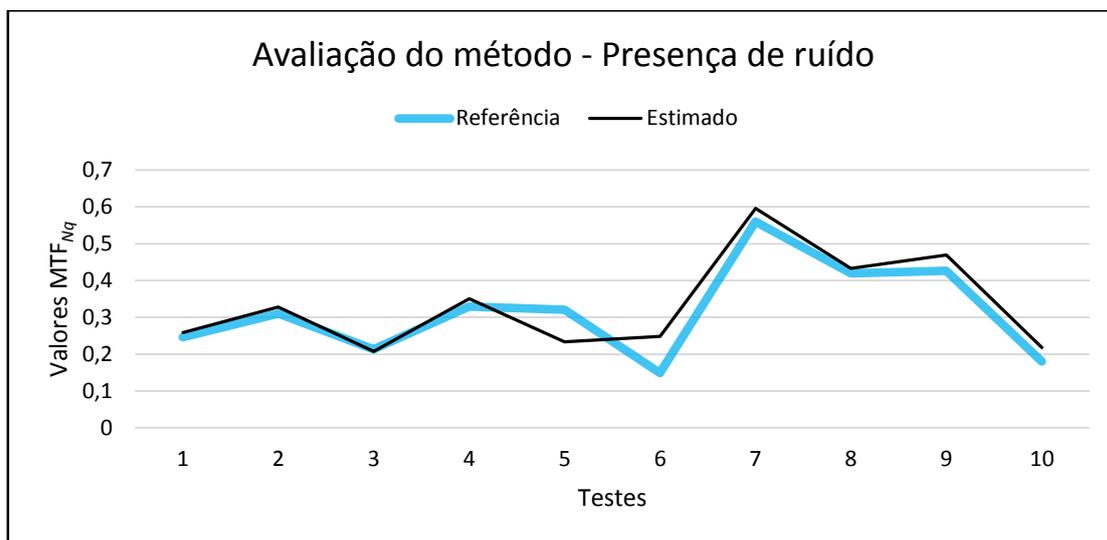


Figura 2.12 – Comparação entre os valores de Referência e estimados da MTF_{Nq} , para 10 simulações de degradação adicionando ruído.

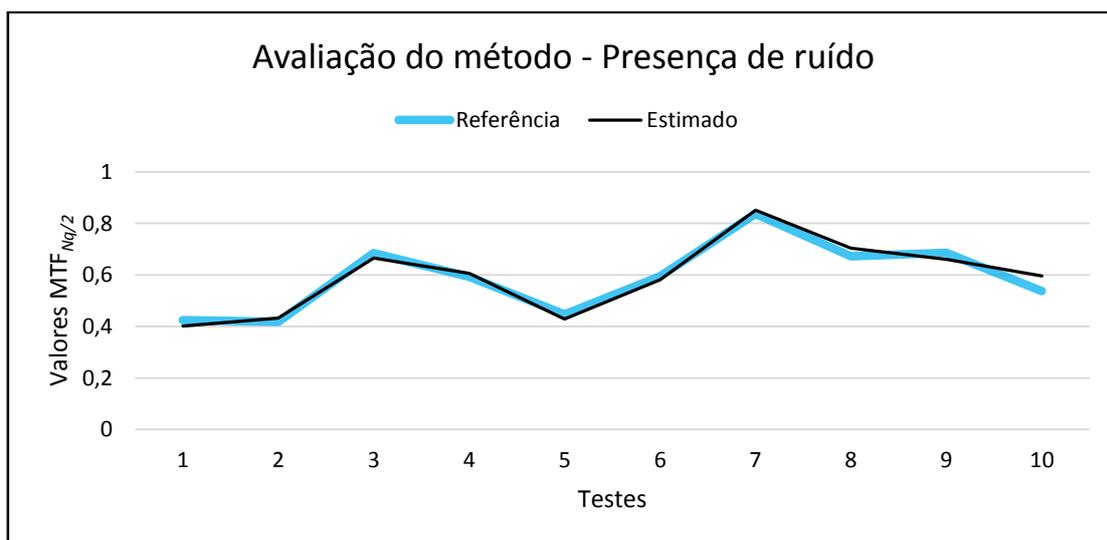


Figura 2.13 – Comparação entre os valores de Referência e estimados da $MTF_{Nq/2}$, para 10 simulações de degradação adicionando ruído.

Para avaliar o desempenho do método proposto no caso da imagem apresentar bordas em diferentes direções, um experimento foi realizado. O experimento consiste em testar o método com imagens que apresentem bordas em diferentes direções para averiguar se há influência da orientação das bordas no resultado. A Figura 2.14 apresenta 8 imagens de bordas com diferentes direções. Cada uma destas imagens foi degradada por seis funções de degradações conhecidas, modeladas pelo polinômio de Zernike. A variação

da diferença entre os valores de MTF de referência e estimados foi em média de, aproximadamente, 9,0%.

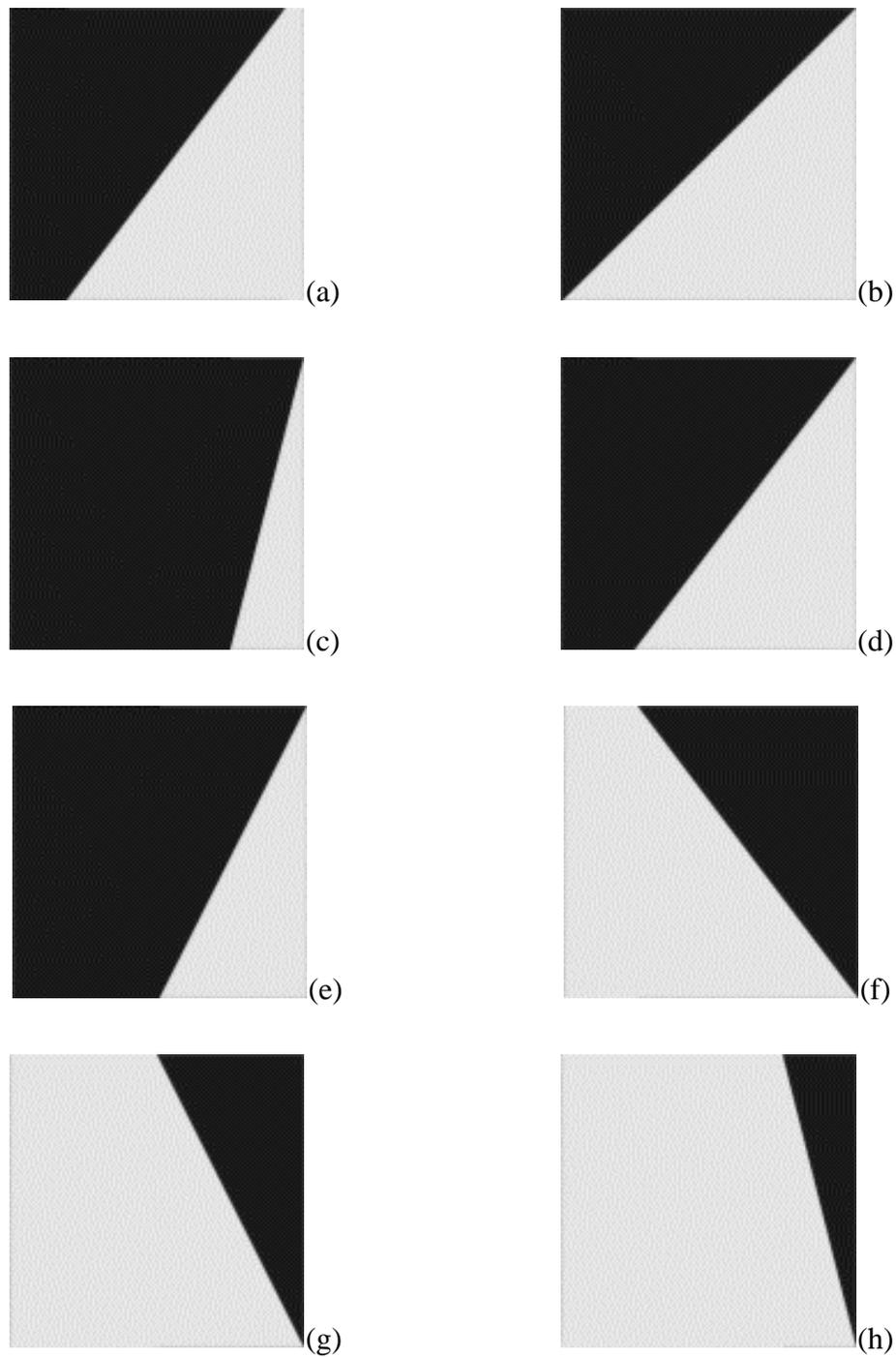


Figura 2.14 - Imagens com borda em diferentes direções.

O experimento é similar aos anteriores, onde, estimam-se os valores MTF_{Nq} para cada imagem degradada e compara-se estes valores com os valores da MTF_{Nq} de Referência. Os gráficos na Figura 2.15 mostram os valores da MTF_{Nq} de Referência e estimados.

Como se pode observar, os valores são muito similares, o que indica que a eficiência e robustez do método independem da direção das bordas presentes na imagem.

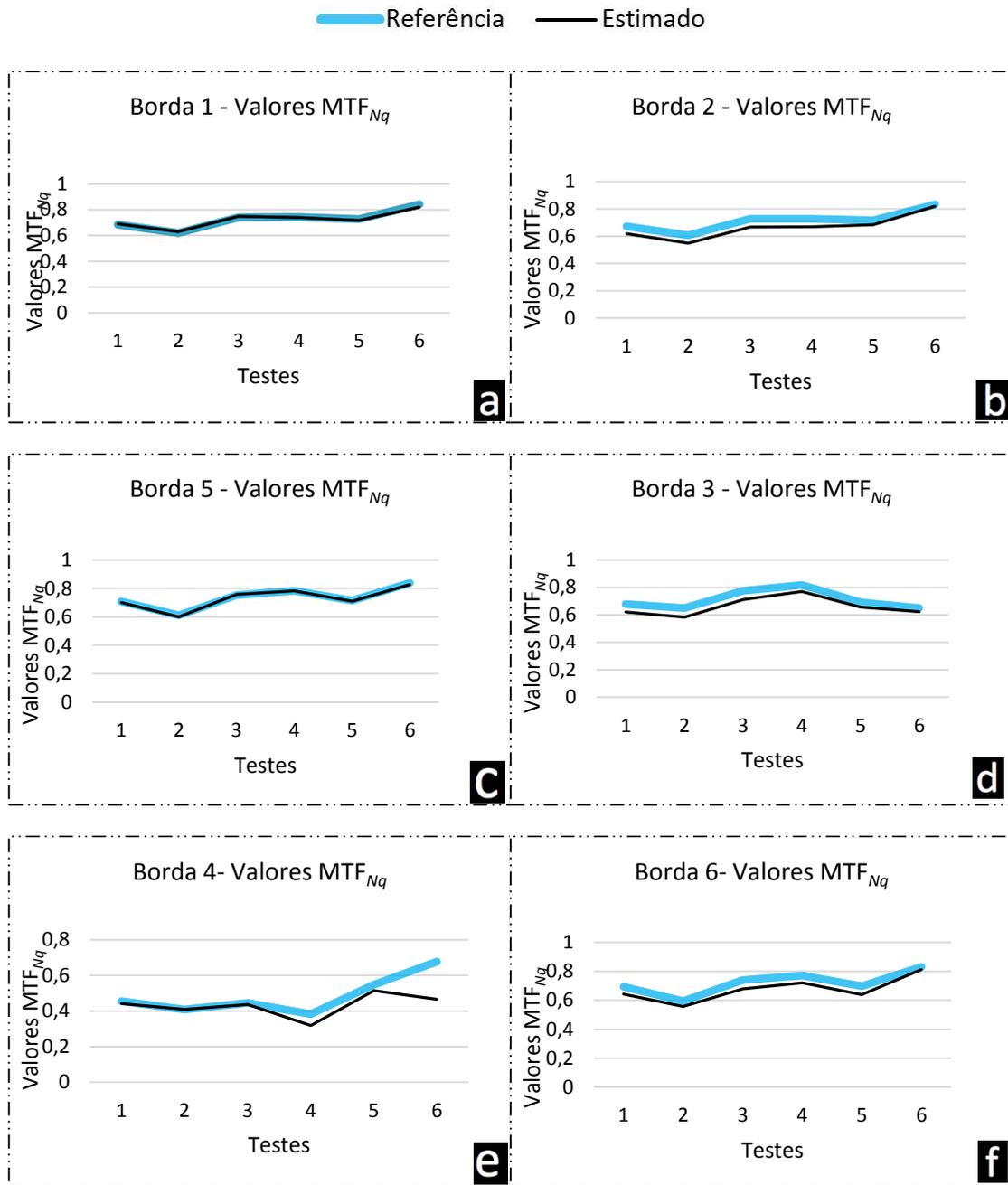


Figura 2.15 – Comparação entre os valores de MTF_{Nq} de referência e estimados para 8 imagens com borda em diferentes direções. (Continua)

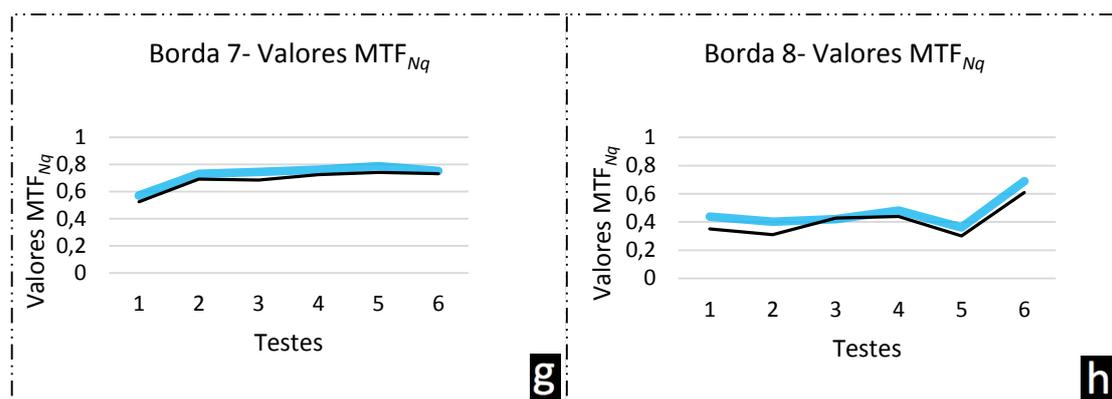


Figura 2.15 – Conclusão.

2.5 Estimação da MTF de sensores a bordo de satélites

Os procedimentos para estimação da MTF apresentados para as imagens simuladas podem ser facilmente generalizados para o caso de imagens reais conforme fluxograma metodológico apresentado na Figura 2.6.

Duas abordagens podem ser usadas na estimação da MTF de sensores ópticos. Na primeira abordagem, a imagem de alta resolução é considerada como cena “ideal”, ou seja, assume-se que o sistema que produziu esta imagem tem MTF igual a 1. Mesmo sendo uma abordagem conservadora, porque o sistema eletrônico causa alguma degradação na MTF, ela é uma boa aproximação segundo Scaduto (2008). A segunda abordagem leva em conta a degradação inserida pelo sistema que produziu a imagem de alta resolução e, neste caso, ela é levada em consideração na estimação da MTF do sensor de Ajuste. Neste trabalho, a primeira abordagem foi utilizada para estimar a MTF dos sensores nas direções *Along-track* (direção do movimento do satélite) e *Across-track* (perpendicular à direção do movimento do satélite).

Nesta seção, o objetivo é estimar a MTF dos sensores CCD – CBERS-2B (20m) e TM – Landsat-5 (30m) a partir de imagens obtidas pelos sensores/satélites WV – WorldView (pan=0,5 m, multi=2 m), QB – QuickBird (pan =0,6 m, multi=2,4 m) e RE – RapidEye (5 m/6,5m). Além disso, os valores de EIFOV para os sensores TM, CCD e HRC/CBERS-2B são também calculados. A Tabela 2.3 apresenta informações sobre os satélites, datas e região de cobertura das imagens usadas nos experimentos. As imagens de cada experimento foram adquiridas no mesmo dia ou no máximo com intervalo de 11 dias, para evitar possíveis alterações nas feições das imagens no período de aquisição das imagens. Foram utilizadas 11 áreas testes com diferentes tipos de cobertura do solo.

A Figura 2.16 apresenta a localização geográfica das regiões usadas nos experimentos.

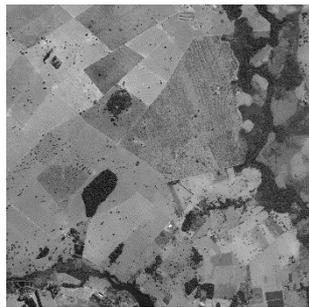
Tabela 2.3 – Descrição das imagens usadas nos experimentos.

<i>Sensor</i>	Imagens de Entrada			Imagens de Ajuste		
	WV	QB	RE	CCD	HRC	TM
Teste 1 - Sudoeste Goiano (GO)	18/06/10	---	---	---	---	26/06/10
Teste 2 – Anápolis (GO)	---	26/05/08	---	12/06/08	---	19/05/08
Teste 3- Luis Eduardo Magalhães (BA)	---	---	01/10/09	30/09/09		29/09/09
Teste 4 – São Paulo (SP)	---	01/09/10	---	---	---	01/09/10
Teste 5 - São José dos Campos (SP)	---	12/08/08	---	12/08/08	---	12/08/08
Teste 6 - Alegrete(RS)	---	03/03/08	---	03/03/08	---	03/03/08
Teste 7 – Veranópolis (RS)	23/01/09	---	---	---	22/01/09	23/01/09
Teste 8 – Igrejinha (RS)	---	13/04/09	---	13/04/09	---	13/04/09
Teste 9 – Itabirito (MG)	---	10/07/09	---	10/07/09	---	13/07/09
Teste 10 - São Francisco de Sales (MG)	---	19/08/08	---	19/08/08	19/08/08	23/08/08
Teste 11 - Cruzeiro da Fortaleza (MG)	11/06/08	---	---	11/06/08	11/06/08	06/06/08



Figura 2.16 – Localização geográfica das regiões utilizadas nos experimentos.

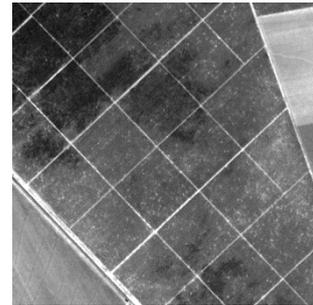
A Figura 2.17 apresenta recortes das imagens utilizadas nos experimentos. As áreas testes foram selecionadas de forma que apresentassem diferentes tipos de cobertura e assim o método fosse testado para diferentes alvos (agricultura, feições lineares, rios e etc.). Os recortes apresentados na Figura 2.17 foram contrastados apenas para melhor visualização das áreas.



*Teste 1 –
Sudoeste Goiano (GO)*



Teste 2 – Anápolis (GO)



*Teste 3 – Luís Eduardo
Magalhães (BA)*



Teste 4 – São Paulo (SP)



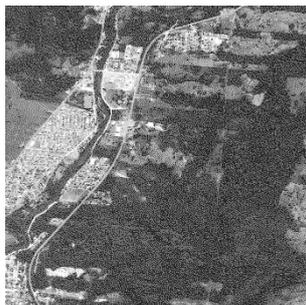
Teste 5 – São José dos Campos (SP)



Teste 6 - Alegrete (RS)



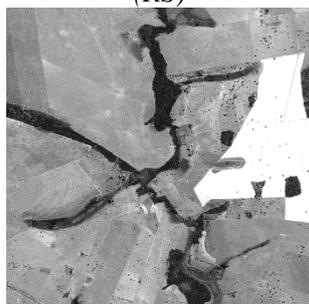
*Teste 7 – Veranópolis
(RS)*



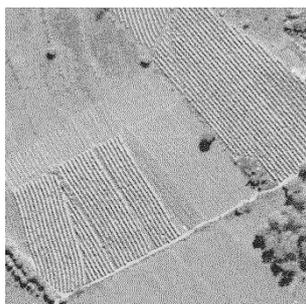
Teste 8 – Igrejinha (RS)



Teste 9 – Itabirito (MG)



*Teste 10 – São Francisco
de Sales (MG)*



*Teste 11 – Cruzeiro da Fortaleza
(MG)*

Figura 2.17 – Amostras das imagens utilizadas em cada teste.

Para a estimação da MTF foram utilizados os valores dos parâmetros dos sensores TM (SCHUELER, 2008), CCD e HRC (KRAMER, 2002) apresentados na Tabela 2.4.

Tabela 2.4 – Parâmetros dos sensores.

Sensor	Distância Focal (mm)	Tamanho do detector (mm)	Semidiâmetro da lente (mm)
TM/Landsat-5	2438	0,01037	203,16
CCD/CBERS-2B	520	0,0134	65
HRC/CBERS-2B	3398	0,010	65

2.5.1 Avaliação da MTF em imagens reais

Nesta seção são apresentados os valores de MTF estimados na frequência de *Nyquist* e na metade da frequência de *Nyquist* para os sensores TM do satélite Landsat-5 e CCD do satélite CBERS-2B. Para realizar estes experimentos foram utilizados conjuntos de imagens de mesma data ou datas próximas e mesma banda como mostra a Tabela 2.3.

O primeiro experimento foi realizado com imagens TM/Landsat-5. Os resultados foram comparados com os valores de MTF apresentados na literatura e usados como Referência. A imagem TM/Landsat-5, adquirida em 01/09/2010 no município de São Paulo/SP, possui diferentes feições (Teste 4 na Tabela 2.3). No teste foi utilizada a banda 3 (Vermelho) da imagem TM, equivalente à banda 3 (Vermelho) do QuickBird (Referência). Como as imagens TM e QB possuíam brilho e contraste diferentes, elas foram equalizadas para que possuíssem a mesma média e variância. A Figura 2.18 mostra as imagens TM e QB equalizadas e seus respectivos histogramas.

A Tabela 2.5 apresenta os valores de MTF na frequência de *Nyquist* estimados e de Referência. Os resultados mostram que os valores estimados são próximos aos de Referência (colunas 3 e 4 da Tabela 2.5).

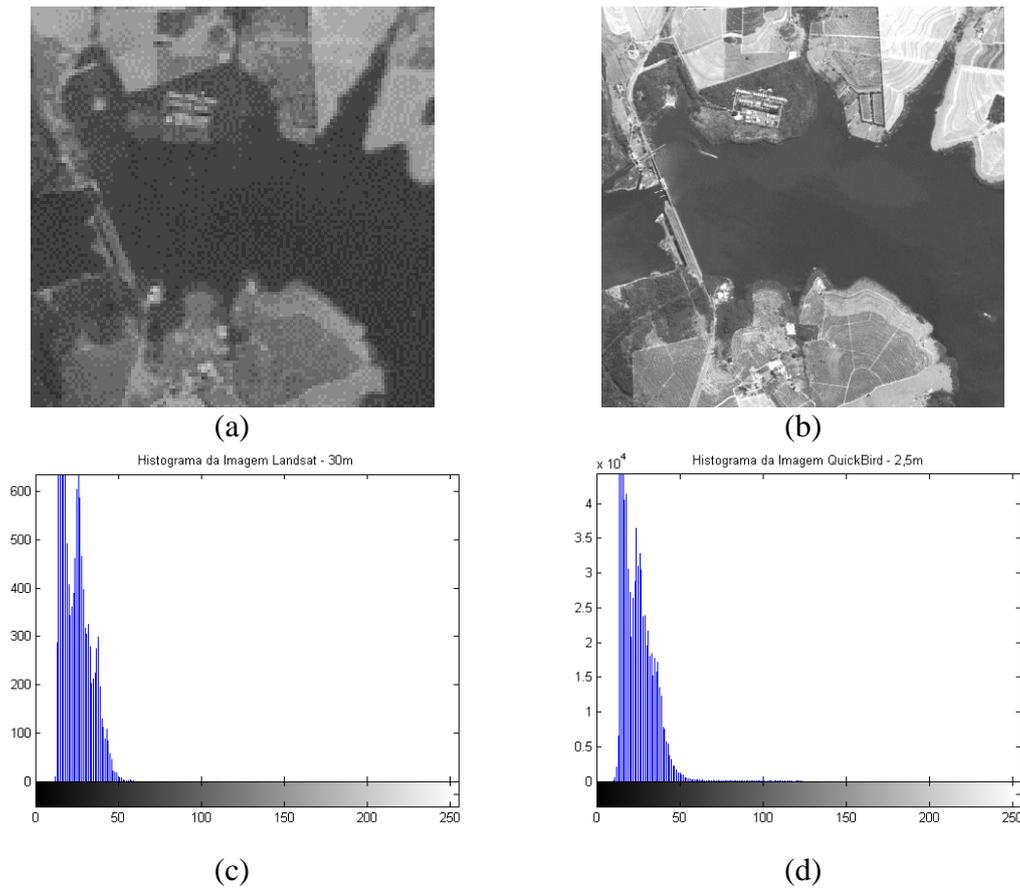


Figura 2.18 - Imagens TM/Landsat-5 e QuickBird. a) TM/Landsat-5; b) QuickBird equalizado em relação à imagem TM; c) Histograma de TM; d) Histograma equalizado da QB. (Banda 3).

Tabela 2.5 - Valores da MTF na Frequência de *Nyquist* – TM/Landsat-5 (Banda 3).

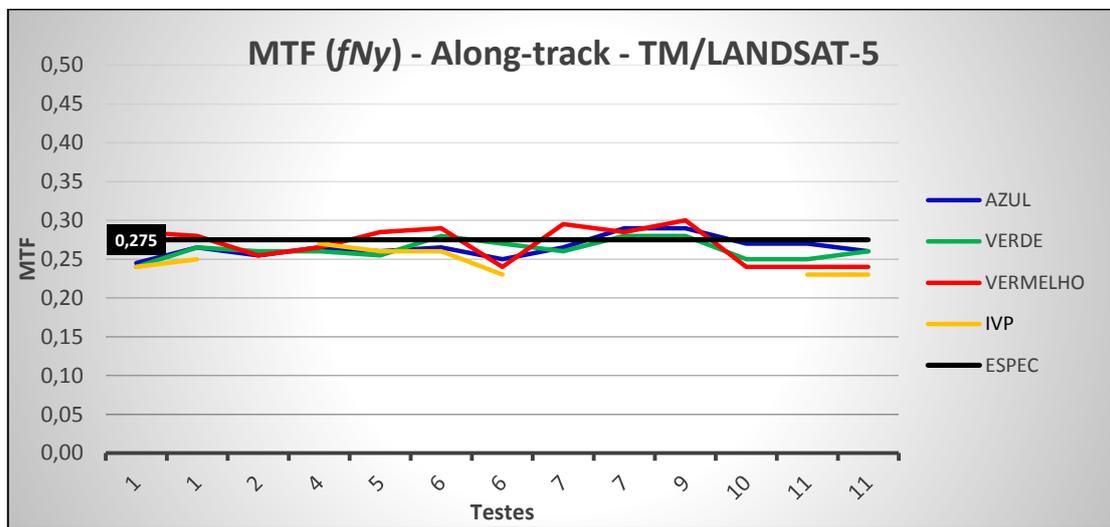
Referência - MTF_{Nq}	<i>Bi Resolução - Zernike</i>	Fonseca (1988)	Markham (1985)
Direção Along-track	0,38	0,45	0,38
Direção Across-track	0,32	0,35	0,38

Os valores da MTF na metade da frequência de *Nyquist* são apresentados na Tabela 2.6.

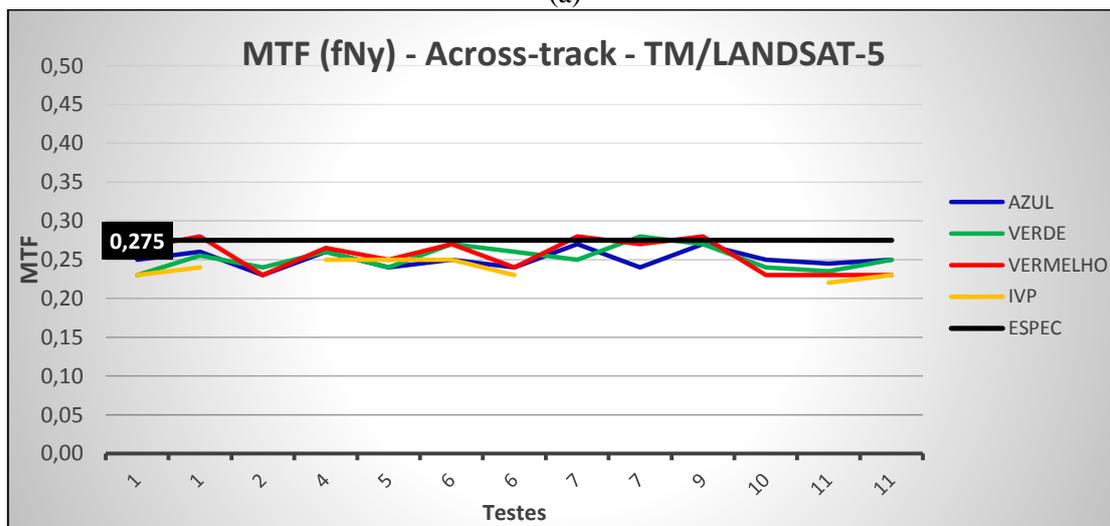
Tabela 2.6 - Valores da MTF na metade da Frequência de *Nyquist* - TM/Landsat-5 (Banda 3).

Referência - MTF_{Nq}	<i>Bi Resolução - Zernike</i>	Fonseca (1988)	Markham (1985)
Direção Along-track	0,78	0,80	0,80
Direção Across-track	0,75	0,78	0,80

A mesma metodologia foi aplicada para as outras imagens do TM/Landsat-5 e CCD/CBERS-2B, cujos resultados são apresentados a seguir. A Figura 2.19 apresenta os valores de MTF estimados na frequência de *Nyquist* nas direções *Along-track* (a) e *Across-track* (b) para o sensor TM do Landsat-5. Os testes foram realizados para as bandas do azul (26 testes), verde (26 testes), vermelho (26 testes) e infravermelho próximo (IVP) (16 testes). O número de testes é diferente para cada banda devido à disponibilidade de imagens. Os números no eixo x do gráfico indicam os testes realizados conforme a Tabela 2.3. Para números repetidos, outros recortes de cena foram utilizados na mesma área. As linhas contínuas nos gráficos mostram que a banda em questão foi utilizada em todos os testes. A interrupção da linha indica que para aquele teste a banda não foi utilizada devido a não disponibilidade de imagens.



(a)



(b)

Figura 2.19 – Valores da MTF estimados nas direções *Along-track* (a) e *Across-track* (b) na frequência de *Nyquist* para o sensor TM/Landsat-5.

Embora os valores, em média ($\mu=0,256$), estejam abaixo do especificado ($ESPEC=0,275$), esta diferença não é significativa, principalmente se levarmos em conta o tempo em que o TM/Landsat-5 esteve em funcionamento e o desgaste natural de seus componentes.

Para avaliar a precisão dos valores de MTF estimados, calculou-se o coeficiente de variação ou dispersão relativa que representa o desvio-padrão expresso como porcentagem da média:

$$C_v = \frac{\sigma}{\mu} \cdot 100, \quad (2.22)$$

onde σ é o desvio-padrão e μ é a média dos valores de MTF estimados.

A Tabela 2.7 apresenta os valores dos coeficientes de variação de 94 experimentos realizados com as imagens TM, considerando todas as bandas e datas apresentadas na Tabela 2.3. O método apresentou resultados com desempenho de variação médio de 5,10%, que pode ser considerado um valor baixo, dado que vários tipos de imagens com diferentes coberturas do solo foram utilizados. A maior variação foi de 8,33% na direção *Along-track* para a banda 3, que representa a diferença entre os valores de MTF (mínimo de 0,24 e máximo de 0,30) na frequência de *Nyquist*.

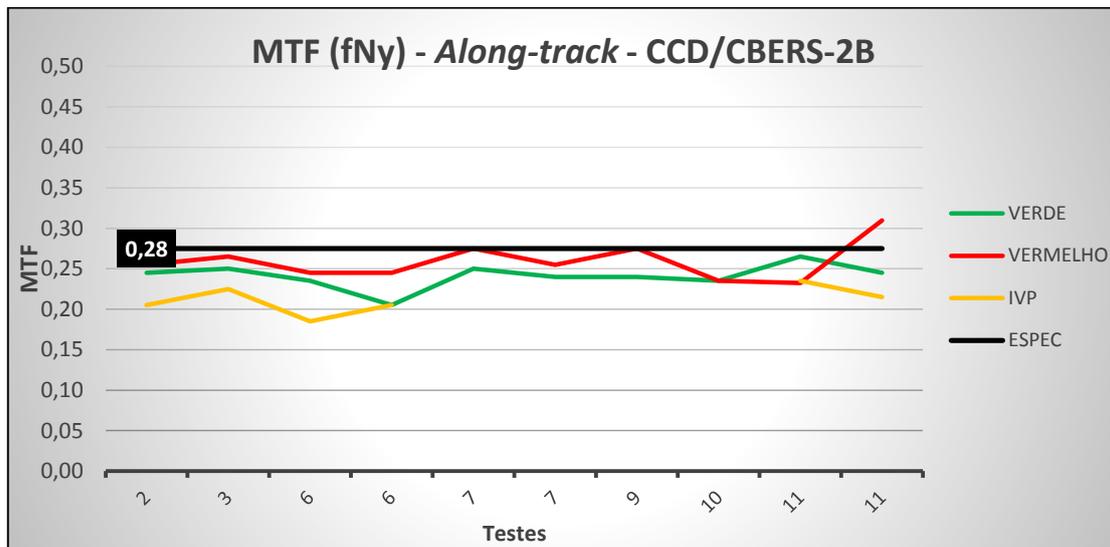
Tabela 2.7 – Coeficiente de variação com imagens TM.

Direção \ Bandas	<i>Along-track</i>	<i>Across-track</i>
Banda 1	4,76%	4,60%
Banda 2	4,59%	5,80%
Banda 3	8,33%	7,89%
Banda 4	6,07%	4,59%

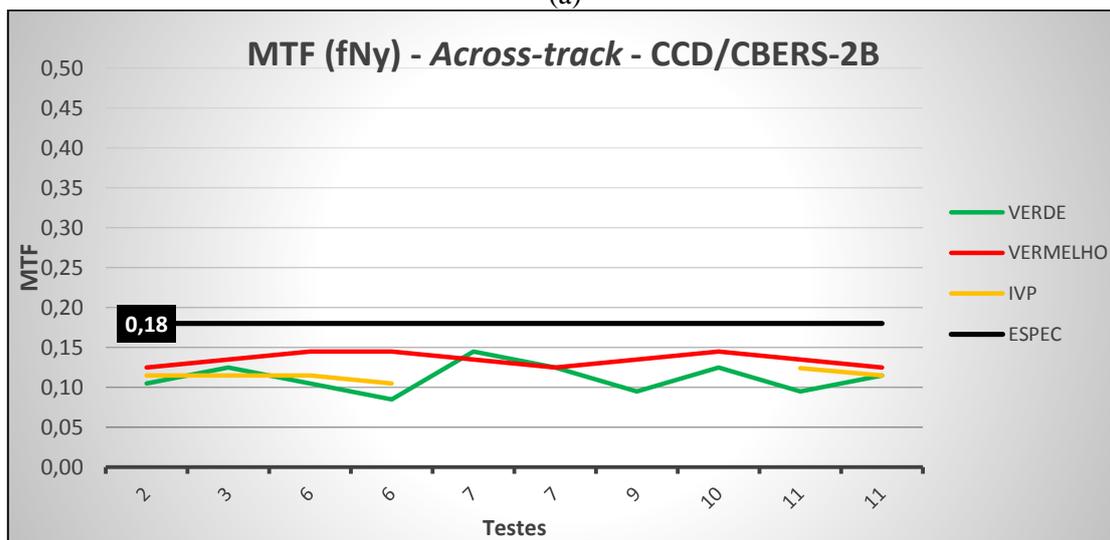
A Figura 2.20 apresenta os valores de MTF estimados na frequência de *Nyquist* nas direções *Along-track* (a) e *Across-track* (b) para o sensor CCD do CBERS-2B para os diferentes testes. Os testes foram realizados para as bandas do verde (20 testes), vermelho (20 testes) e infravermelho próximo (IVP) (12 testes). Pode-se observar que os valores, para todas as bandas, estão abaixo dos valores especificados no projeto, o

que indica uma degradação da resolução espacial da câmera CCD do CBERS-2B.

A Tabela 2.8 apresenta os coeficientes de variação dos testes utilizando imagens CCD. Como foram feitos 52 experimentos, considerando todas as bandas e datas, pode-se observar que a variação dos resultados é pequena, mesmo utilizando imagens adquiridas em datas diferentes e com tipos diferentes de alvos. O valor de MTF estimado para a banda 2, na direção *Across-track* apresentou um coeficiente de variação de 15,49%. Em uma investigação inicial, nenhuma causa pôde ser atribuída a esta diferença na banda 2 em relação às outras bandas.



(a)



(b)

Figura 2.20 – Valores da MTF estimadas nas direções *Along* (a) e *Across-track* (b) na frequência de *Nyquist* para o sensor CCD/CBERS-2B.

Tabela 2.8 – Coeficiente de variação com imagens CCD.

orientação bandas	<i>Along-track</i>	<i>Across-track</i>
Banda 2	6,07%	15,49%
Banda 3	8,48%	5,74%
Banda 4	7,55%	4,79%

2.5.2 Avaliação da Resolução Espacial Efetiva (EIFOV)

Uma forma de avaliar o desempenho de um sensor é através de um parâmetro conhecido como EIFOV (*Effective Instantaneous Field of View*). Segundo Slater (1975), o EIFOV equivale ao inverso do dobro da frequência espacial para a qual a MTF é igual a 0,5:

$$EIFOV = \frac{1}{2 \cdot u_w} \cdot IFOV \quad , \quad (2.23)$$

onde u_w é a frequência espacial na qual a MTF é igual a 0,5 e $IFOV$ é resolução espacial nominal em metros.

O EIFOV corresponde à resolução espacial efetiva do sensor que, geralmente, é pior do que a resolução espacial nominal do sensor, pois leva em conta as degradações inseridas pelo processo de imageamento (FONSECA, 1988; FONSECA *et al.*, 1993). Esta medida é comparável à largura da resposta impulsiva do sistema na metade de seu valor máximo.

Duas abordagens foram usadas no cálculo do EIFOV. A primeira considera a MTF do sistema de melhor resolução igual a 1, ou seja ideal. Na Equação 2.2, pode-se observar que se $H=1$, a imagem é igual à cena que foi imageada e, portanto, não tem degradação. Neste caso, a hipótese é que o sensor de melhor resolução espacial (Referência) possui resolução superior ao sensor de Ajuste e, portanto, tem efeito de degradação desprezível no processo de estimação. A segunda abordagem é baseada no método de estimação proposto por Fonseca e Banon (1989), que leva em conta a MTF do sistema de melhor resolução e a compensa no processo de estimação da MTF do sistema de Ajuste. Neste caso, o valor de EIFOV é calculado da seguinte forma:

$$EIFOV_{est} = \left(\left(\frac{IFOV_a}{2 \cdot u_{wa}} \right)^2 + \left(\frac{IFOV_r}{2 \cdot u_{wr}} \right)^2 \right)^{1/2}, \quad (2.24)$$

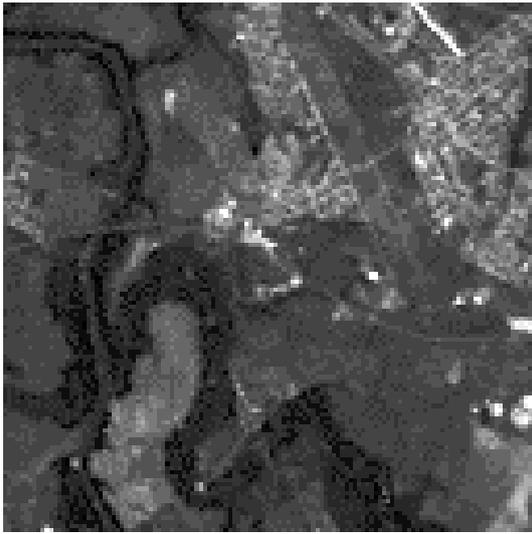
onde $EIFOV_{est}$ é o EIFOV estimado, $IFOV_a$ e $IFOV_r$ é a resolução espacial nominal (metros) da imagem de Ajuste e imagem de Referência, respectivamente. Os parâmetros u_{wa} e u_{wr} são as frequências espaciais na qual a MTF é igual a 0,5 para os sistemas de Ajuste e de Referência, respectivamente. Nos experimentos realizados neste trabalho, os valores de EIFOV estimados pelos dois métodos apresentaram valores aproximados.

De forma empírica, observa-se que geralmente o valor de EIFOV é aproximadamente 1,5 vezes o valor da Resolução Espacial Nominal quando o desempenho do sistema atende às especificações de projeto, o que pode ser comprovado em Carvalho *et al.*, 2009. Neste caso, o valor de EIFOV esperado para o TM é de aproximadamente 45 m; para a CCD 30 m; e para a HRC 4,05 m, levando em consideração os valores de Resolução Espacial Nominal de 30 m, 20 m e 2,7 m, respectivamente.

Imagens TM/Landsat-5

A Figura 2.21 mostra as imagens utilizadas para estimar a MTF do sensor do Landsat, usando a imagem QuickBird como Referência, e a curva da MTF para a banda 1 (Azul) do TM/Landsat-5. A área teste é no município de Alegrete-RS conforme Teste 6 da Tabela 2.3. O valor do EIFOV é calculado usando a Equação 2.24.

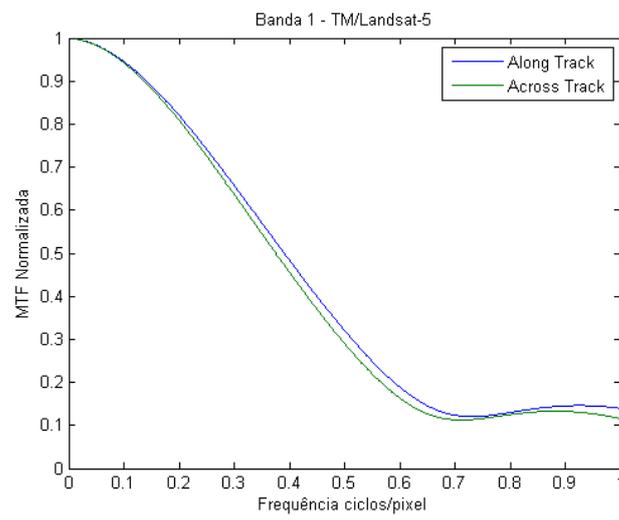
Os valores de EIFOV estimados para o sensor Landsat-5/TM, em datas diferentes, são apresentados na Figura 2.22. Para os 94 testes realizados para o sensor TM, considerando todas as bandas e datas, o método apresentou coeficiente de variação de 4,97% na direção *Along-track* e 4,76% na direção *Across-track*. O valor médio na direção *Along-track* encontrado foi de 48,5 m e na direção *Across-track* 50,4m.



(a)

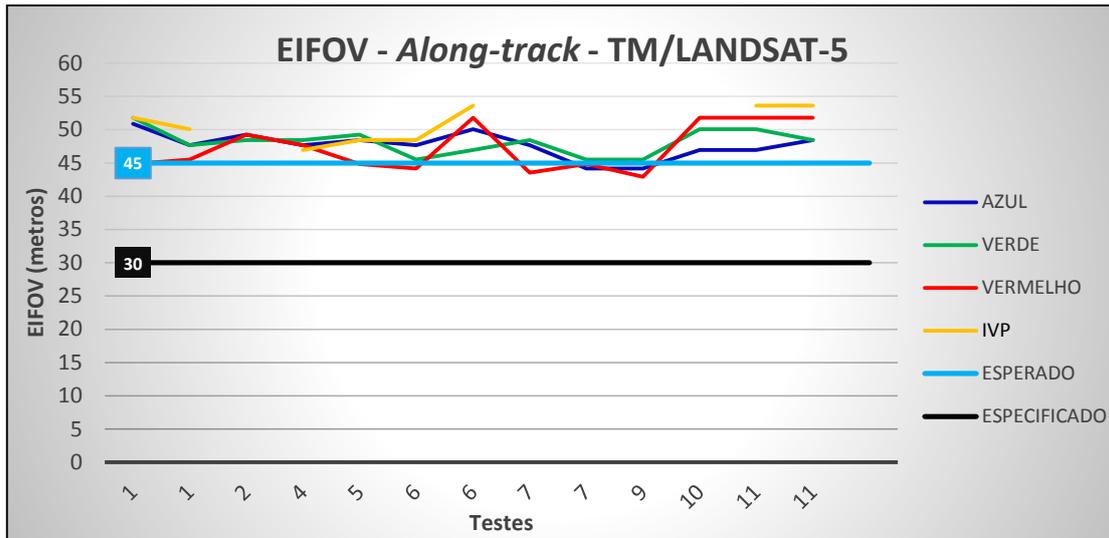


(b)

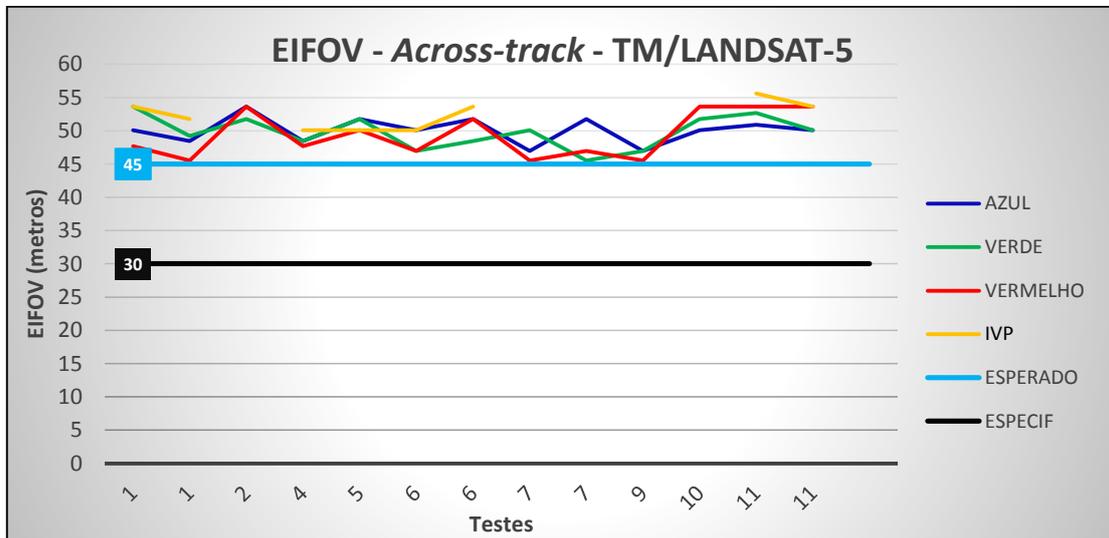


(c)

Figura 2.21 - Imagens: (a) Banda 1 -TM/Landsat-5; (b) Banda 1 - QuickBird; (c) Curva da MTF estimada pelo método proposto.



(a)



(b)

Figura 2.22 – Valores de EIFOV estimados para o sensor TM/Landsat-5 nas direções (a) *Along-track* e (b) *Across-track* em diferentes datas.

Imagens CCD/CBERS-2B

A Figura 2.23 apresenta as imagens utilizadas para estimar a MTF da câmera CCD do CBERS-2B, usando como Referência a imagem do QuickBird, e a curva da MTF para a banda 2 (Verde) do CCD/CBERS-2B. A área teste é no município de Alegrete-RS conforme Teste 6 na Tabela 2.3.

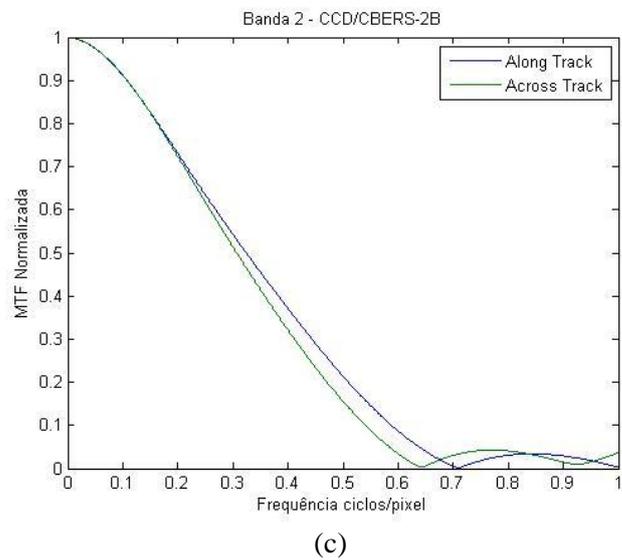
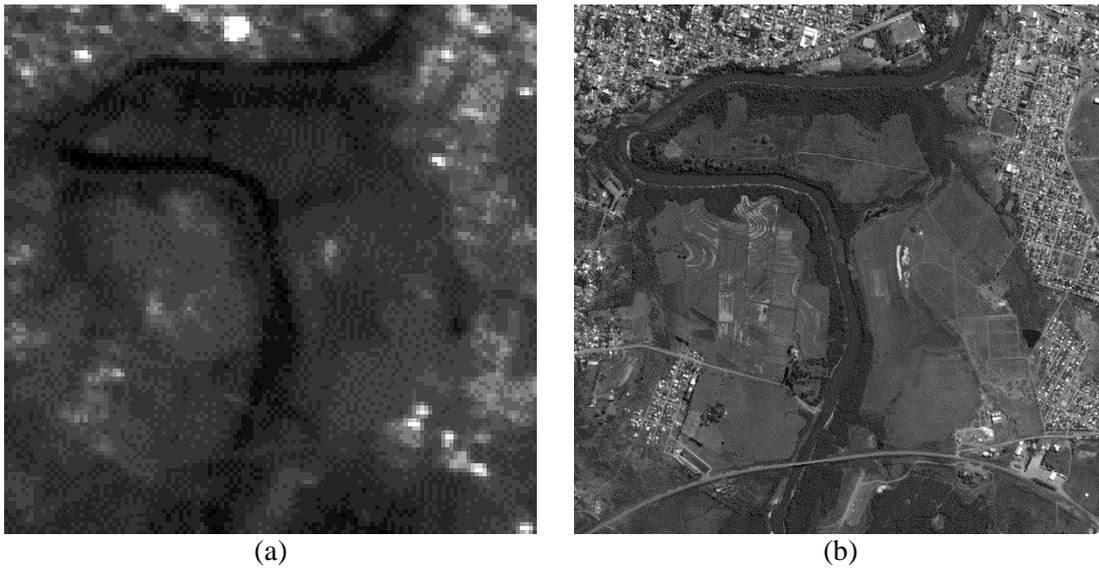
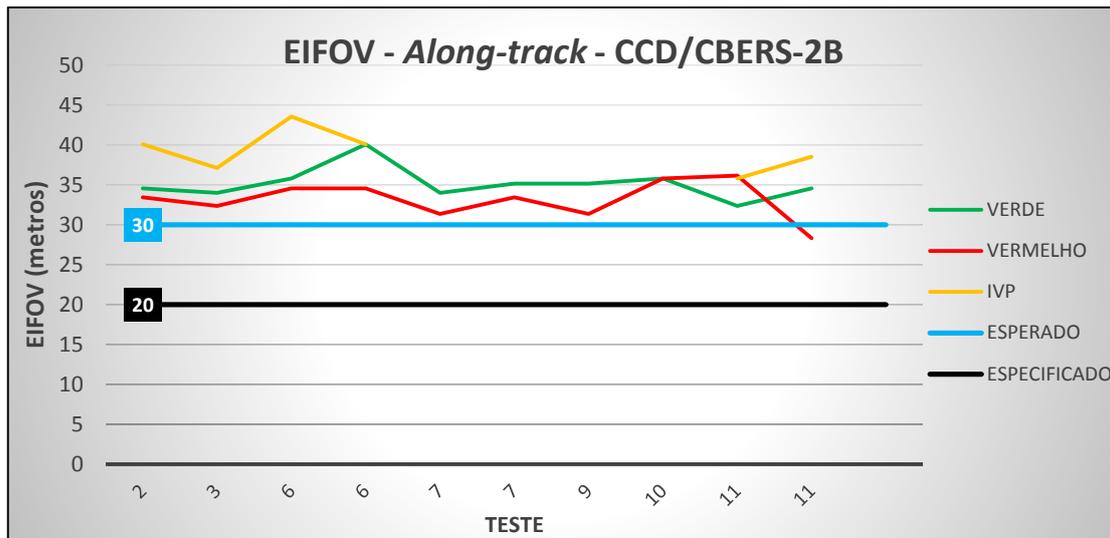
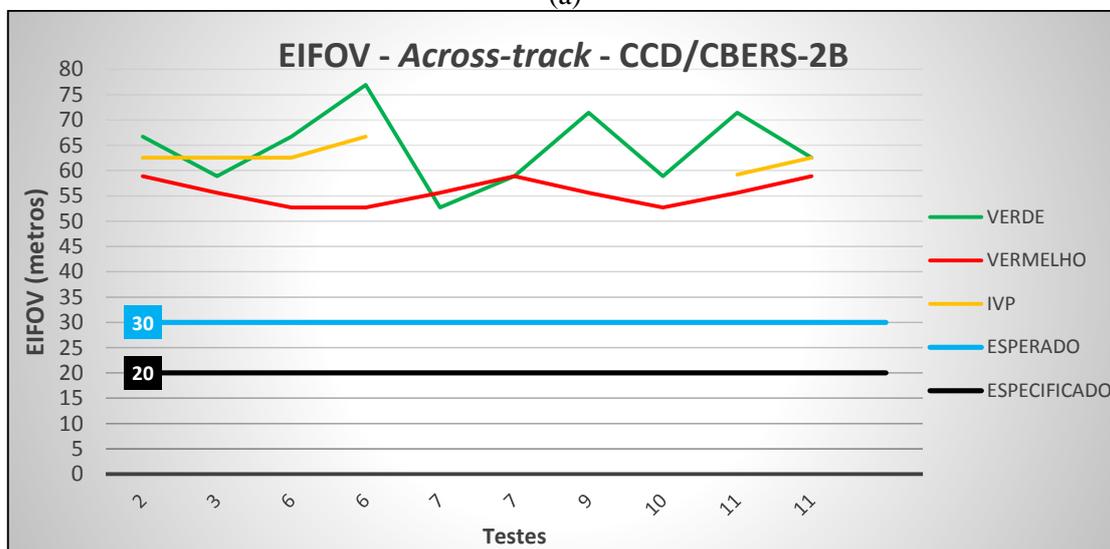


Figura 2.23 – Imagens: (a) Banda 2 - CCD/CBERS-2B; (b) Banda 2 - QuickBird; (c) Curva de MTF estimada pelo método proposto.

Os valores de EIFOV estimados para a câmara CCD são apresentados na Figura 2.24. Na direção *Across-track* o valor médio do EIFOV (60,9 m) é maior do que na direção *Along-track* (35,8 m).



(a)



(b)

Figura 2.24 – EIFOV estimado para o sensor CBERS-2B/CCD nas direções (a) *Along-track* e (b) *Across-track*.

Considerando todas as bandas e datas das imagens (52 testes) do sensor CBERS-2B/CCD, os valores do EIFOV variaram em torno de 4,6% o que representa a robustez do método.

Imagens HRC/CBERS-2B

A Figura 2.25 apresenta as imagens utilizadas para estimar a MTF do HRC, a partir das imagens do WorldView, e a curva da MTF para a banda pancromática do CBERS-2B/HRC. A área teste é no município de São Francisco de Sales-MG conforme Teste 10 na Tabela 2.3.

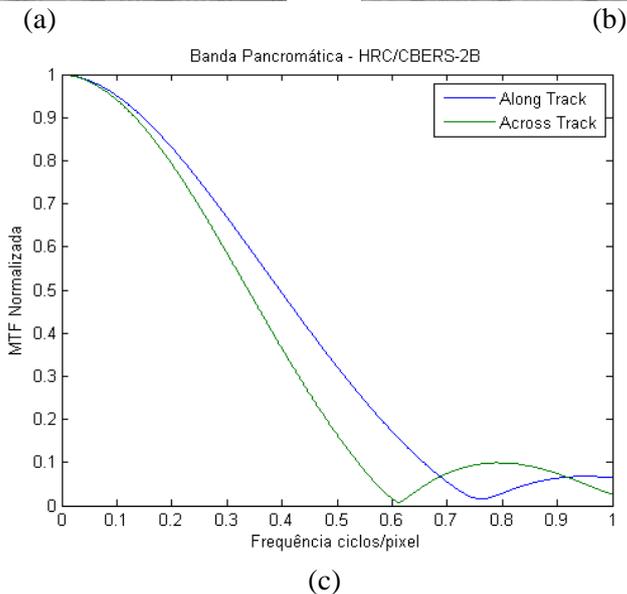
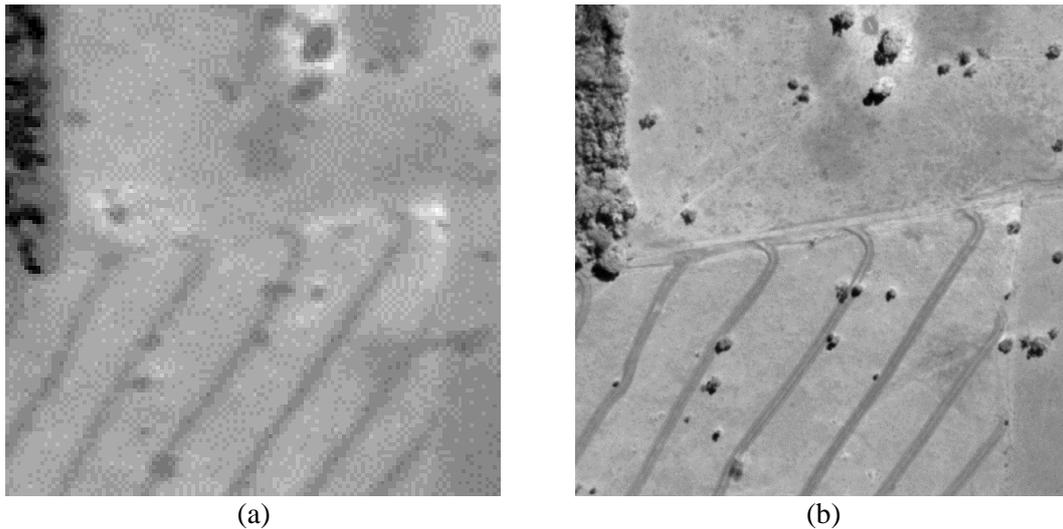


Figura 2.25 – Imagens: (a) Banda pancromática - HRC/CBERS-2B; (b) Banda pan – WorldView; (c) Curva de MTF estimada pelo método proposto.

Os valores de EIFOV estimados para a câmara HRC são apresentados na Figura 2.26. Os valores médios nas direções *Along-track* e *Across-track* são, respectivamente, 5,1 m e 8,4 m. A Tabela 2.9 apresenta um resumo com os valores de EIFOV estimados, em metros, para cada sensor e cada banda nas direções *Along-track* e *Across-track*.

Os resultados mostraram que os valores de EIFOV para o TM-5 ficaram próximos aos valores especificados no projeto, com variação aproximada de 7,1% e 6,3% nas direções *Along-track* e *Across-track*, respectivamente. No caso da CCD e HRC, os valores de EIFOV foram piores do que os especificados no projeto, com variação média aproximada de 19,3% e 103% nas direções *Along-track* e *Across-track*, respectivamente.

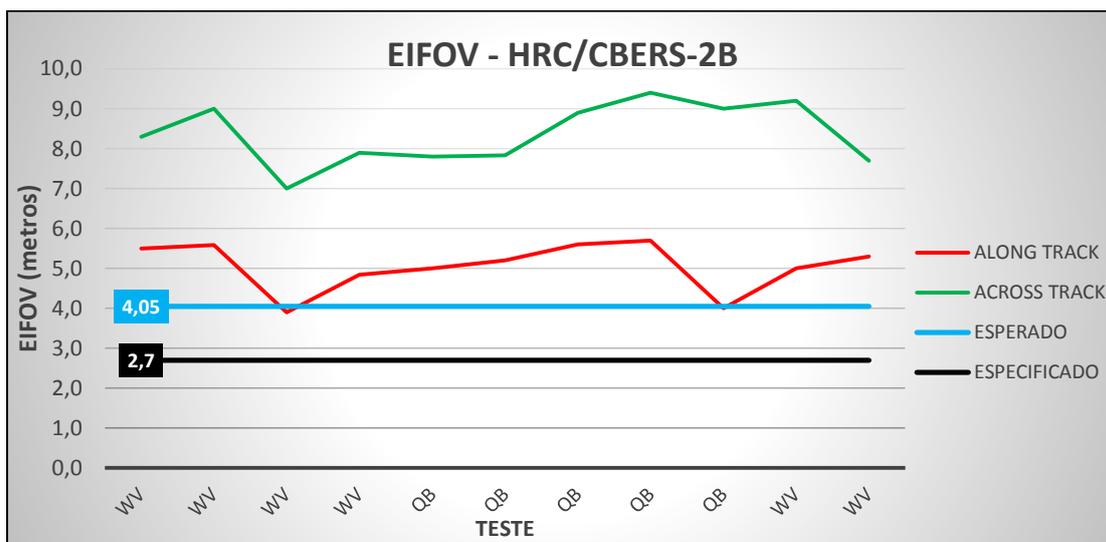


Figura 2.26 – EIFOV estimado para o sensor HRC nas direções *Along-track* e *Across-track*.

Tabela 2.9 – Valores médios do EIFOV, em metros, estimados para cada sensor e banda.

Sensor	Banda 1		Banda 2		Banda 3		Banda 4	
	<i>Along Track</i>	<i>Across Track</i>						
Landsat/TM5	47,7	50,1	48,2	49,8	47,3	49,4	50,8	52,3
CBERS-2B/CCD			35,1	64,5	33,1	55,7	39,2	62,6
Banda Pancromática								
CBERS-2B/HRC	5,1	8,4						

Os valores estimados da MTF na frequência de Nyquist, na metade da frequência de Nyquist e EIFOV para todos os testes são apresentados no Apêndice B. A interface e funcionamento do aplicativo de estimação da MTF são apresentados no Apêndice C.

2.6 Operational Land Imager - OLI/Landsat-8

Um experimento adicional foi realizado para estimar a MTF e o EIFOV do sensor OLI do Landsat-8. Os resultados deste experimento foram comparados com os valores de MTF definidos no projeto e com os valores de EIFOV esperados. Os valores de MTF estimados em órbita não estavam disponíveis na literatura até o momento da publicação desta tese. Os parâmetros do OLI foram gentilmente disponibilizados pelo senhor James

Storey, pesquisador do United States Geological Survey (USGS)/NASA. Estes parâmetros são: distância focal (85,4 cm na direção *Along-track*; 88,6 cm na direção *Across-track* no centro do FOV e 88,9 cm na direção *Across-track* na borda do FOV), tamanho do detector (0,018 mm) e semidiâmetro da lente (6,75 cm).

No experimento foram utilizadas imagens OLI e imagens RapidEye do município de Franco da Rocha-SP adquiridas no mesmo dia (29/06/2013). A Figura 2.27 mostra a localização geográfica do município.



Figura 2.27 – Localização geográfica do município de Franco da Rocha/SP.

A Figura 2.28 mostra os recortes utilizados para o experimento. Diversos tipos de cobertura do solo foram utilizados para avaliar a independência do método em relação às imagens e alvos. Os recortes das imagens RapidEye e OLI/Landsat-8 estão dispostas nas colunas esquerda e direita, respectivamente.

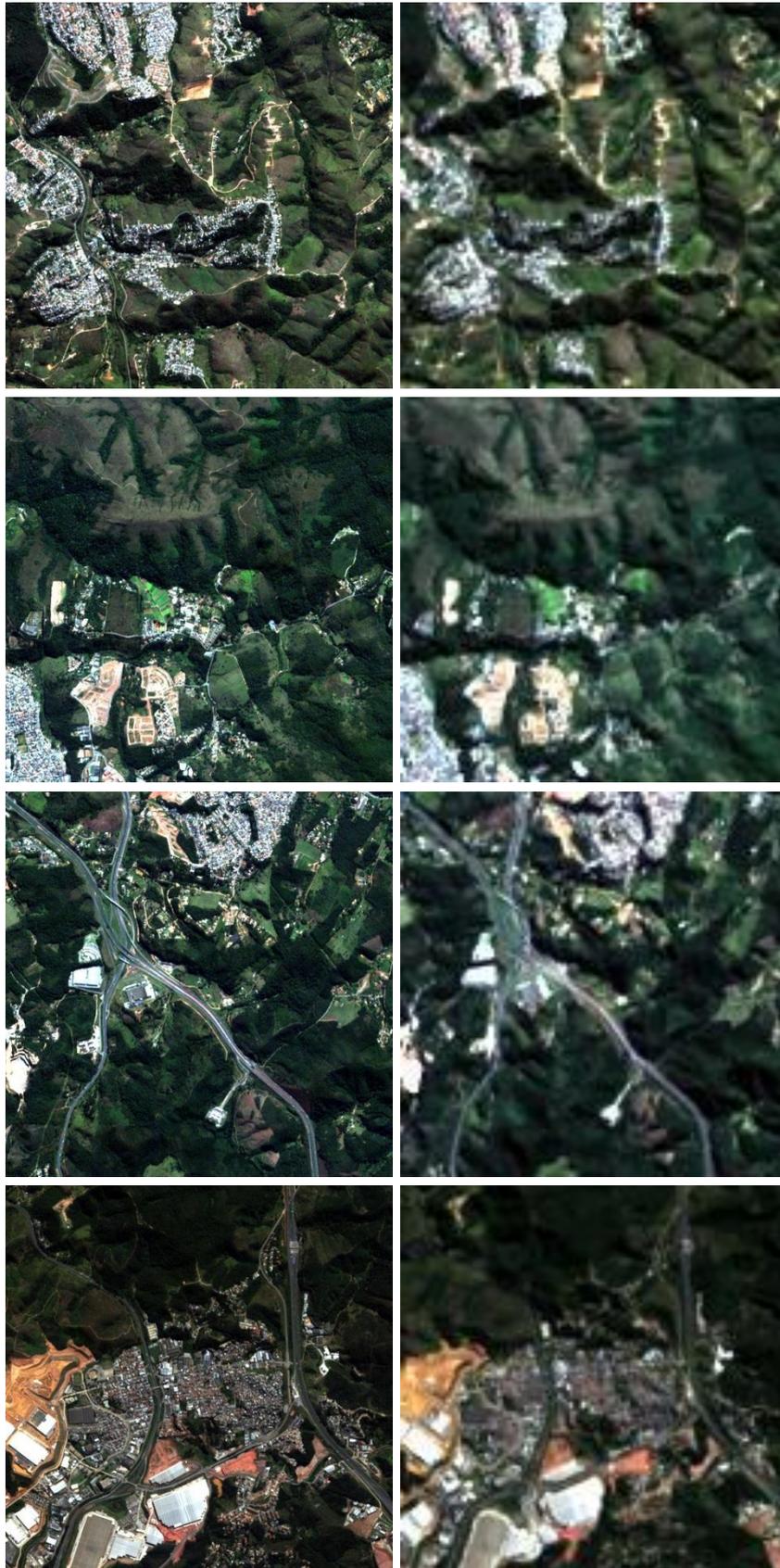


Figura 2.28 - Composição natural das bandas dos sensores RapidEye (esquerda) e OLI/Landsat 8 (direita), com 4 recortes em diferentes coberturas de solo na região de Franco da Rocha/SP.

Os valores médios estimados são apresentados na Tabela 2.10 e todos os resultados são apresentados no Apêndice B4. Os valores de EIFOV compensados são os valores obtidos conforme abordagem apresentada na Equação 2.24 da seção 2.5.2.

Tabela 2.10 – Parâmetros estimados para o OLI/Landsat-8.

<i>Bandas</i>	<i>B2 (azul)</i>	<i>B3 (verde)</i>	<i>B4 (vermelho)</i>
<i>MTF Nyquist (Along-track)</i>	0,40	0,38	0,52
<i>MTF Nyquist (Across-track)</i>	0,37	0,28	0,36
<i>MTF Nyquist/2 (Along-track)</i>	0,77	0,80	0,80
<i>MTF Nyquist/2 (Across-track)</i>	0,74	0,74	0,73
<i>EIFOV (Along-track)</i>	34,40	34,48	32,68
<i>EIFOV (Across-track)</i>	37,75	40,08	39,28
<i>EIFOV compensado (Along-track)</i>	35,01	35,08	33,32
<i>EIFOV compensado (Across-track)</i>	38,31	40,60	39,81

Os valores estimados mostram que o sensor está em conformidade com os valores especificados no projeto e que, portanto, o sensor não sofreu nenhuma anomalia, mantendo assim a sua qualidade, como esperado.

3 SIMULAÇÃO DA RESOLUÇÃO ESPACIAL DE SENSORES ORBITAIS

Técnicas de simulação de imagens digitais são frequentemente usadas na avaliação de sistemas sensores orbitais, principalmente quando os dados reais ainda não estão disponíveis para avaliação, ou mesmo quando se deseja avaliar o desempenho dos sistemas sensores já em operação, podendo, desta forma, ocorrer em todas as fases do projeto e da vida útil dos satélites. Pelo emprego de técnicas de simulação é possível estimar as características das imagens que serão geradas pelos sensores projetados, possibilitando dar aos futuros usuários uma estimativa da qualidade e de aplicações das imagens que serão geradas. Além disso, também é possível avaliar se as imagens geradas estão em conformidade com as especificações do projeto.

A qualidade da imagem depende das características do sensor projetado e também de outros fatores tais como efeitos da atmosfera, iluminação, ruídos e distorções inseridas no processo de imageamento. Assim, um modelo de simulação adequado para avaliação de sistemas de imageamento deve incorporar as informações relevantes da cena, o processo de aquisição e os efeitos de degradação inerentes ao sensor. Os principais programas espaciais possuem um plano de verificação sistemática da qualidade de imagens e o processo de simulação faz parte deste plano.

Schott (2010) apresenta uma ferramenta de simulação de imagens para dar suporte ao programa de avaliação de qualidade das imagens Landsat. O método de simulação proposto pelo autor incorpora modelos de elevação digital, texturas espaciais provenientes de imagens de alta resolução, variabilidade espectral dos dados de satélite Hyperion e efeitos atmosféricos calculados pelo modelo MODTRAN (*Moderate Spectral Resolution Atmospheric Transmittance Algorithm and Computer Model*). Essas ferramentas de simulação e de modelagem são usadas para apoiar o projeto de sensores e na análise de desempenho dos sistemas de uma missão espacial como, por exemplo, a LDCM (*Landsat Data Continuity Mission*) da NASA (*National Aeronautics and Space Administration*).

Este Capítulo apresenta um novo método de simulação de imagens adquiridas por sensores a bordo de satélites. O método é baseado em 4 módulos de processamento: simulação de cena (eliminando os efeitos de relevo, atmosfera e sensor), estimação da MTF do sensor, contribuição do efeito atmosférico e a simulação da imagem. A imagem

simulada é obtida a partir de imagens adquiridas por outros sensores, usando técnicas de processamento digital. Para validar o método de simulação aqui proposto, imagens simuladas das câmeras CCD do satélite CBERS-2B (CB) e TM do satélite Landsat-5 (LS) foram geradas a partir de imagens QuickBird (QB) e RapidEye (RE). O objetivo consiste em comparar as imagens simuladas com as imagens reais do sistema simulado utilizando imagens adquiridas em datas próximas às datas das imagens RE e QB.

3.1 Métodos de Simulação de Imagens

Na literatura existem diferentes métodos de simulação de imagens. Para a simulação da resolução espacial, alguns métodos usam a PSF ou a MTF do sensor (GUIJUN *et al.*, 2009; ZETIAN *et al.*, 2000; GUANTER *et al.*, 2009; FIETE, 2007). Em geral, esta técnica de utilização da MTF simula uma imagem de resolução espacial pior do que a imagem de entrada ao sistema de simulação. Outras técnicas simulam uma dada banda espectral a partir de um conjunto de bandas espectrais (BANON e SANTOS, 1993; BOGGIONE *et al.*, 2005; MASCARENHAS *et al.*, 1991).

Justice *et al.* (1989) descreveram uma técnica de degradação espacial de dados de satélite de alta resolução para produzir imagens de resoluções espaciais mais baixas. As imagens são simuladas a partir do sensor MSS (Multispectral Scanner/Landsat), em seis grades de resoluções diferentes em um intervalo de 79 m a 4000 m. O método usa um filtro digital projetado a partir da resposta do sensor MSS. Banon e Fonseca (1998) descrevem um método de simulação para imagens do programa CBERS por meio do encadeamento de filtros lineares modelados por funções gaussianas a partir de imagens SPOT. Mascarenhas *et al.* (1991) simularam uma banda pancromática do SPOT (*Satellite Pour l'Observation de la Terre*) utilizando a relação de áreas entre as bandas espectrais deste sistema e incorporando informação da relação sinal/ruído. Esposito *et al.* (1999) apresentaram um método de simulação de imagens das câmeras do CBERS-1 usando imagens AVIRIS (Airborne Visible / Infrared Imaging Spectrometer). As bandas espectrais dos sensores CCD e WFI do CBERS-1 foram simuladas a partir das bandas espectrais do AVIRIS. As respostas espectrais do AVIRIS são ponderadas pelas respostas espectrais obtidas em laboratório dos sensores CCD e WFI. A radiância espectral medida pelo AVIRIS a 20 km de altitude é extrapolada para a altitude da órbita do CBERS a 778 km. O modelo MODTRAN é utilizado para fornecer os valores de transmitância em cada comprimento de onda do sensor. Como havia diferença no

horário de aquisição das imagens CBERS (10:30 h, no equador) e das imagens AVIRIS (entre 13:30 h e 16:30 h), o ângulo zenital solar foi calculado para os horário de passagem do AVIRIS e do CBERS, obtendo-se um fator de correção que foi aplicado em toda a cena.

Chen *et al.* (2008) simularam imagens hiperespectrais do sensor Hyperion a partir de imagens de baixa resolução espectral do sensor multiespectral *Advanced Land Imager* (ALI). O método proposto utiliza a técnica de mistura de pixel (ICHOKU e KARNIELI, 1996; MOODY *et al.*, 1996) para determinar a relação entre os valores espectrais de um pixel e para simular o processo de transmissão de radiação. Para isso, foram utilizadas bibliotecas espectrais e dados de classificação de objetos derivados da imagem ALI. Os autores usaram valores de coeficientes de correlação entre as imagens simuladas e imagens do Hyperion para analisar os resultados.

Outras abordagens de simulação de imagens baseiam-se em modelos físicos tais como relevo do terreno, cobertura do solo e elementos presentes na cena, além do detalhamento da cena em função da resolução do sensor a ser simulado (FRANCIS *et al.*, 1993). A cena é iluminada com um feixe colimado para simular o Sol e muitas fontes difusas para simular o céu como mostra a Figura 3.1. Os sensores estão localizados acima do modelo e a óptica é ajustada para simular o campo de visada desejado. A PSF do sistema a ser simulado é, então, convoluída com a imagem digital adquirida pelo sistema de teste. A imagem, neste caso, é projetada para representar o campo de radiância no sensor.



Figura 3.1 - Simulação utilizando modelo físico.

Fonte: Schott (2007).

A vantagem desta abordagem é que as condições de aquisição da imagem podem ser modificadas, ou seja, é possível mudar a posição da câmera e o ângulo solar para gerar várias imagens da mesma cena. A desvantagem deste método é a necessidade de incluir no modelo as possíveis variações da reflectância e a reflectância direta, que pode ser um problema no caso de simulação de imagens multiespectrais. Maver e Scarff (1993) descreveram uma abordagem híbrida para simular cenas multiespectrais, onde os modelos físicos e a iluminação são utilizados para gerar cenários processados por meio de técnicas da visão computacional. Esta abordagem tem a vantagem de incluir no modelo algumas variações na topografia. A desvantagem deste método é a dificuldade na geração de cenas complexas, pois alguns efeitos tais como os especulares (BRDF – Função de Distribuição de Reflectância Bidirecional) são muito difíceis de simular. Os elementos do modelo que compõem a cena precisam ser mais difusos para evitar reflexões especulares de uma das muitas fontes de iluminação. Por outro lado, quando o detalhe espacial é importante no processo de simulação, este método pode gerar bons resultados. Um resultado deste método é ilustrado na Figura 3.2, que mostra uma imagem simulada modelada nas condições de simulação apresentada na Figura 3.1.

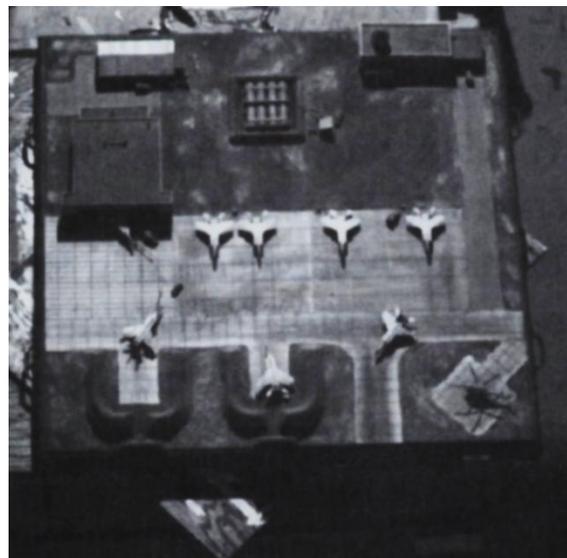


Figura 3.2 - Imagem Simulada a partir de modelos físicos.

Fonte: Schott (2007).

Segundo Schott (2007), outra abordagem de simulação é aquela baseada em modelagem computacional. Ou seja, os elementos de cena tais como a propagação da radiação e os efeitos do sensor são simulados usando modelagem computacional. Esta abordagem é atraente e muito usada porque permite variações no ajuste dos elementos de cena e sua

interação com a atmosfera. A desvantagem reside no alto custo computacional na implementação de modelos complexos. Na prática, este método modela com precisão os processos físicos que ocorrem durante a geração das imagens. Normalmente, um modelo radiométrico é usado para gerar uma estimativa da radiação do alvo para o sensor. Este modelo é associado a um modelo de propagação da radiação tal como o MODTRAN, utilizado para calcular o nível de radiação na superfície. O MODTRAN calcula a transmitância atmosférica e/ou a radiância na faixa espectral das ondas eletromagnéticas do infravermelho, visível e ultravioleta próximo e micro-ondas (LATORRE, 2002). Os modelos de propagação atmosférica, geralmente, possuem uma base de dados sobre as condições atmosféricas necessárias como entrada do modelo. Finalmente, deve-se conhecer o modelo do sensor para caracterizar a geometria de aquisição, campo de visada, resolução espacial, espectral e radiométrica.

Boggione *et al.* (2003) apresentaram a simulação da banda pancromática (PAN) do sensor TM/Landsat-5 a partir de suas bandas multiespectrais. Os autores usam uma técnica de restauração combinada com a interpolação para simular a imagem em uma grade mais fina. A resposta espectral da banda PAN foi obtida por meio da relação entre áreas das curvas espectrais das bandas multiespectrais.

Fiete (2007) mostrou a necessidade do conhecimento sobre o processo de formação de imagens para entender como os componentes do sistema de imageamento interferem na qualidade das imagens gerados pelo sensor. A Figura 3.3 ilustra o efeito de cada componente do sistema de imageamento e a imagem após a correção dos efeitos do sensor.

Yang *et al.* (2009) propuseram um método de simulação de imagens de alta resolução no topo da atmosfera, no intervalo espectral do infravermelho médio, usando um modelo analítico de transferência radiativa da atmosfera. A análise dos resultados indicou que o modelo analítico e o modelo de efeitos atmosféricos de adjacência foram mais adequados para simulação de imagens no infravermelho médio do que outros modelos existentes. De acordo com Yang *et al.* (2009), o efeito atmosférico de adjacência, nas imagens de topo da atmosfera, foi significativo e seu impacto atingiu cerca de 3% do sinal.

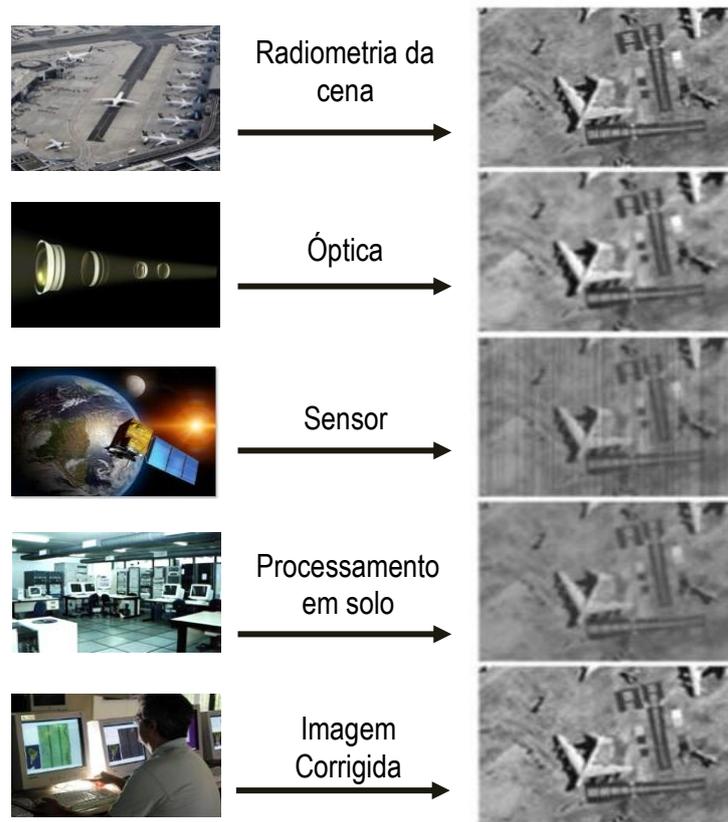


Figura 3.3 - Efeitos dos subsistemas na imagem.

Fonte: Adaptado de Fiete (2007).

De forma complementar, vários outros trabalhos têm usado a simulação de imagens em diferentes aplicações na área de sensoriamento remoto (SANTOS 1992; PONZONI *et al.*, 2002; PONZONI; REZENDE, 2002; BOGGIONE *et al.*, 2003; MAEDA *et al.*, 2008; FONSECA *et al.*, 2009; NELSON *et al.*, 2009). Pode-se destacar o trabalho de Nelson *et al.* (2009), que simulou imagens para estudar os efeitos da resolução espacial na estimativa de áreas de floresta. Imagens com resolução espacial variando entre 90 e 990 m foram simuladas a partir de imagens do satélite Landsat-5 (30 m). Eles utilizaram dois métodos para reamostrar as imagens: a agregação por média, que não afetou a estimativa, e a agregação por moda, que alterou o cálculo da área florestal. Isto mostra como o modelo usado na simulação pode interferir nos resultados. Maeda *et al.* (2008) simularam e avaliaram o potencial das imagens WFI/CBERS-3 para classificação de uso e cobertura da terra em duas regiões com características de paisagens distintas. As simulações usaram a técnica da degradação de imagens ETM+/Landsat-7 e reamostragem por vizinho mais próximo. Os autores usaram dois classificadores

supervisionados (MAXVER; BHATTACHARYA) nas imagens simuladas. Eles verificaram que os resultados usando as imagens simuladas do WFI/CBERS-3 foram coerentes nas áreas agrícolas e que, em certos casos, a degradação da imagem implicou em erros na classificação.

3.2 Método de simulação proposto

Com base na revisão bibliográfica descrita anteriormente, este trabalho propõe um método em que as imagens são simuladas a partir da degradação de imagens adquiridas por sensores de melhor resolução espacial e com resolução espectral similar à imagem que se deseja simular. A degradação baseia-se em técnicas de filtragem e reamostragem, e a resposta radiométrica leva em conta os efeitos da atmosfera e ruídos aleatórios.

O modelo de simulação é genérico e, portanto, pode ser adotado na simulação de qualquer imagem desde que a imagem de melhor resolução tenha bandas espectrais similares às imagens simuladas. Para a apresentação da metodologia, as imagens de melhor resolução como imagens QuickBird e RapidEye, por exemplo, serão chamadas de “Entrada”; as imagens simuladas serão chamadas de “Saída”, e as imagens usadas como referência na avaliação do método, por exemplo as imagens TM/Landsat-5 e CCD/CBERS-2B, serão chamadas de “Referência”.

Para validar o método proposto, simulações de imagens TM/Landsat-5 e CCD/CBERS-2B são realizadas. Estas imagens apresentam diferentes tipos de alvos (urbano, agricultura). A Tabela 3.1 apresenta as informações sobre as imagens usadas nos experimentos de simulação. As imagens foram adquiridas, aproximadamente, nas mesmas condições atmosféricas (mesma data) para que os efeitos atmosféricos não interferissem na avaliação do método. A Tabela 3.2 apresenta as características dos sistemas sensores usados nos experimentos.

Tabela 3.1 – Imagens usadas na simulação.

Sensor	Data	Município	Bandas	Alvos
QUICKBIRD	03/03/2008	Alegrete/RS	1,2,3	alvos urbanos/ agricultura
TM/Landsat-5	03/03/2008	Alegrete/RS	1,2,3	alvos urbanos/ agricultura
CCD/CBERS-2B	03/03/2008	Alegrete/RS	2,3	alvos urbanos/ agricultura
RapidEye	01/10/2009	Luis Eduardo Magalhães/BA	1,2,3,4	agricultura
TM/Landsat-5	29/09/2009	Luis Eduardo Magalhães/BA	1,2,3,4	agricultura
CCD/CBERS-2B	30/09/2009	Luis Eduardo Magalhães/BA	2,3,4	agricultura
QUICKBIRD	04/09/2008	São José dos Campos/SP	1,2,3,4	alvos urbanos
TM/Landsat-5	03/09/2008	São José dos Campos/SP	1,2,3,4	alvos urbanos
CCD/CBERS-2B	03/09/2008	São José dos Campos/SP	2,3,4	alvos urbanos

Tabela 3.2 – Características dos sensores.

Sensor	RE	QB	TM/ Landsat-5	CCD/ CBERS-2B
Bandas Espectrais	B01: 0,44 – 0,51 μm	B01: 0,45 – 0,52 μm	B01: 0,44 – 0,52 μm	B01: 0,45 – 0,52 μm
	B02: 0,52 – 0,59 μm	B02: 0,52 – 0,60 μm	B02: 0,52 – 0,60 μm	B02: 0,52 – 0,59 μm
	B03: 0,63 – 0,68 μm	B03: 0,63 – 0,69 μm	B03: 0,63 – 0,69 μm	B03: 0,63 – 0,69 μm
	B05: 0,76 – 0,85 μm	B04: 0,76 – 0,90 μm	B04: 0,76 – 0,90 μm	B04: 0,77 – 0,89 μm
Campo de Visada	77 km	16,5 km	185 km	113 km
Resolução Espacial Nominal	5m/6,5 m	2,4 m	30 m	20 m
Resolução Radiométrica	12 bits	11 bits	8 bits	8 bits

O diagrama de blocos do método de simulação proposto neste trabalho é apresentado na Figura 3.4, dividido em quatro módulos de processamento. No primeiro módulo, a cena é simulada a partir de imagens de melhor resolução espacial, levando em conta a degradação inserida pela atmosfera, relevo e sensor. Na segunda e terceira etapas, os efeitos de degradação são calculados e inseridos na cena simulada no quarto módulo, levando em conta o novo tamanho do pixel e a presença de ruídos. Os detalhes sobre os procedimentos de cada módulo são apresentados a seguir.

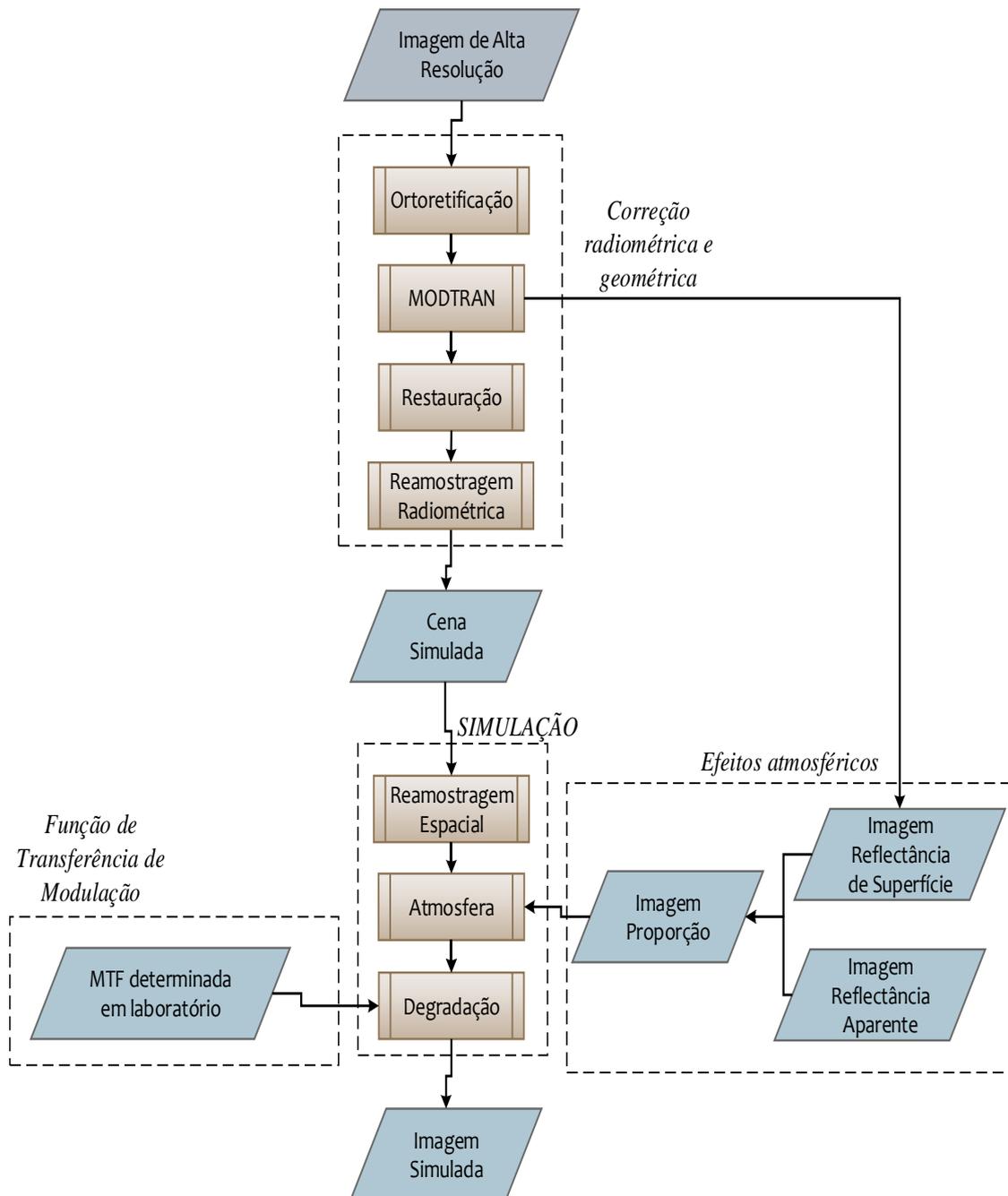


Figura 3.4. Diagrama de blocos do método de simulação.

3.2.1 Simulação da cena (correção geométrica e radiométrica)

O módulo de simulação da cena trata da eliminação ou minimização dos efeitos de degradação da radiometria e da geometria da imagem. São aplicadas correções geométricas (ortorretificação) e correções radiométricas (atmosfera e compensação da MTF) além da reamostragem radiométrica para que a imagem de Entrada tenha a mesma resolução radiométrica das imagens de Referência. O esquema deste módulo é apresentado na Figura 3.5.

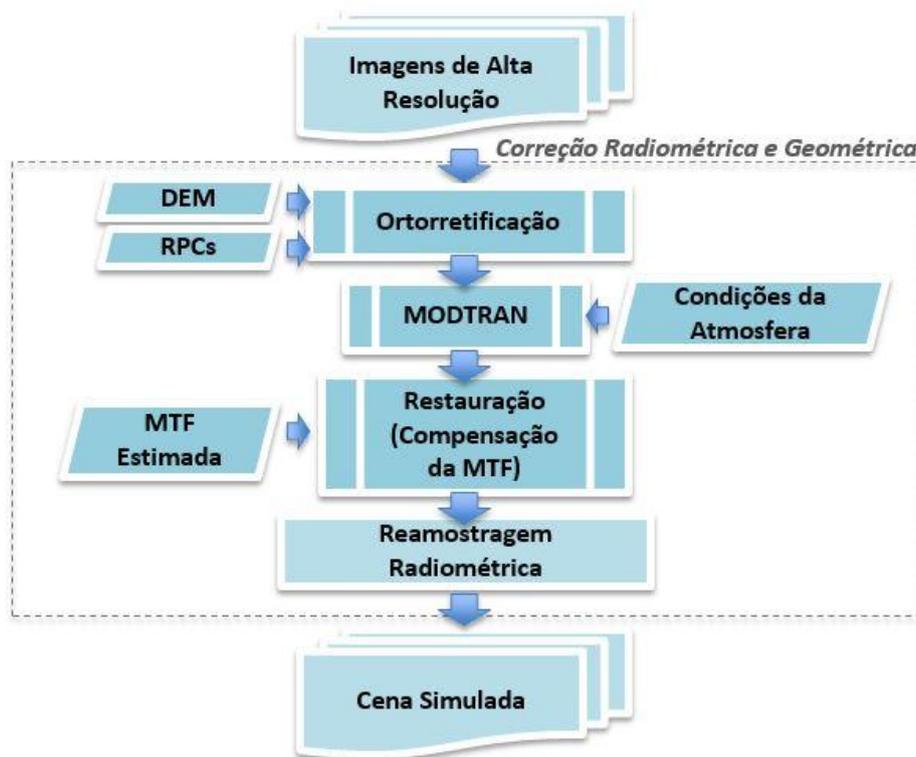


Figura 3.5 – Esquema do Módulo de Correção Radiométrica e Geométrica.

Ortorretificação

Os objetos na imagem podem apresentar diferentes elevações e deslocamentos em relação às suas posições originais na cena. Usando os princípios da fotogrametria digital, estas diferenças nas elevações e deslocamentos podem ser estimadas. Usando estas informações, uma imagem ortogonal, onde a posição de cada ponto é corrigida em relação aos outros pontos independentemente da elevação, é produzida. É como se toda distorção de perspectiva fosse removida e cada ponto no solo fosse visto a partir de cima diretamente.

Assim, o processo de ortorretificação corrige as degradações geométricas inseridas na imagem pelo sistema sensor e pela variação do relevo. O processo de correção da elevação do terreno usa o Modelo Digital de Elevação (DEM – Digital Elevation Model), extraído a partir dos dados SRTM (*Shuttle Radar Topography Mission*), interpolados para 30 m conforme proposto por Valeriano e Rossetti (2011).

O modelo matemático que relaciona a imagem ortorretificada à imagem original é a equação de colinearidade. Segundo Mendonça Junior (2010), existem duas abordagens para a geração de imagens ortorretificadas: o método direto e o método inverso, que utilizam as equações de colinearidade e colinearidade inversa, respectivamente. No processo direto, parte-se de um *pixel* na imagem original e determina-se seu correspondente na imagem ortorretificada. No método inverso, parte-se de um *pixel* da imagem ortorretificada e procura-se na imagem original o *pixel* correspondente.

Os modelos matemáticos rigorosos, baseados nas equações de colinearidade, exigem o conhecimento de dados de calibração do sensor, informações da órbita do satélite e atitude do sensor, que nem sempre são disponíveis para as imagens orbitais de alta resolução. Desta forma, é necessário o desenvolvimento de um modelo matemático que defina, de forma mais exata, a transformação entre os sistemas de referência da imagem e o sistema de referência do terreno (Cerqueira, 2004).

Um modelo matemático utilizado para a transformação entre os sistemas de referência da imagem (x,y) e o referencial geodésico local (X,Y,Z) é a equação APM (*Affine Projection Model*), conhecido como Equação de Projeção Paralela que projeta o tridimensional no espaço bidimensional. Segundo Mitishita (2002), esta transformação matemática permite a extração de informações tridimensionais do terreno a partir de imagens sem o conhecimento dos parâmetros geométricos do sensor e órbita do satélite. Considera-se o deslocamento de pontos na imagem devido ao relevo e por isso é necessário adicionar a informação altimétrica da região, que pode ser obtida através do DEM.

De acordo com Lugnani (1987), a projeção paralela é um caso particular da projeção central onde o centro de projeção foi deslocado para o infinito. Este tipo de projeção modela o comportamento dos sistemas de sensores dos satélites de alta resolução espacial que são tipicamente lineares do tipo *push-broom*, que são utilizados nestes

experimentos.

O modelo de projeção APM pode ser derivado da equação de colinearidade convencional (OKAMOTO, 1999):

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ -c \end{pmatrix} = \mathcal{U}(R_{\phi_i}R_{\omega_i}R_{\kappa_i})^T \begin{pmatrix} X - X_{0i} \\ Y - Y_{0i} \\ Z - Z_{0i} \end{pmatrix}, \quad (3.1)$$

onde, (X, Y, Z) são as coordenadas do ponto no terreno, \mathcal{U} é o parâmetro de escala, c é a distância principal, $R_{\phi_i}R_{\omega_i}R_{\kappa_i}$ são matrizes de rotação nos três eixos e (x, y) são coordenadas de ponto imagem.

Considerando a imagem como uma projeção paralela, a distância c pode ser considerada no infinito e a Equação 3.1 pode ser escrita como:

$$x = a_{11}(X - X_{0i}) + a_{12}(Y - Y_{0i}) + a_{13}(Z - Z_{0i}), \quad (3.2)$$

$$y = a_{21}(X - X_{0i}) + a_{22}(Y - Y_{0i}) + a_{23}(Z - Z_{0i}), \quad (3.3)$$

onde a_{ij} são elementos da matriz $\mathcal{U}(R_{\phi_i}R_{\omega_i}R_{\kappa_i})^T$.

Considerando que o movimento do satélite é linear no espaço e que os parâmetros de orientação permanecem constantes, o centro de projeção de cada linha pode ser descrito por:

$$X_{0i}X_0 + \Delta Xi, \quad (3.4)$$

Supõe-se que X_0 e ΔX são valores constantes e i é o número da linha. Expressões semelhantes são igualmente definidas para Y_{0i} e Z_{0i} .

A linha de número i é obtida substituindo a Equação 3.4 na Equação 3.2 e é dada por:

$$i = \frac{a_{11}(X-X_0)+a_{12}(Y-Y_0)+a_{13}(Z-Z_0)}{a_{11}\Delta X+a_{12}\Delta Y+a_{13}\Delta Z}, \quad (3.5)$$

Substituindo a linha de número i pela coordenada de imagem x , e considerando os parâmetros de orientação constantes, a Equação 3.5 pode ser expressa por:

$$x = \frac{a_{11}(X-X_0)+a_{12}(Y-Y_0)+a_{13}(Z-Z_0)}{a_{11}\Delta X+a_{12}\Delta Y+a_{13}\Delta Z}, \quad (3.6)$$

A Equação 3.6 organizada para os coeficientes constantes é descrita pela seguinte expressão algébrica:

$$x = A_1X + A_2Y + A_3Z + A_4 \quad , \quad (3.7)$$

A Equação 3.3 também é expressa através de arranjo semelhante por:

$$y = A_5X + A_6Y + A_7Z + A_8 \quad , \quad (3.8)$$

onde, (x, y) são coordenadas planas no sistema de referência da imagem; (X, Y, Z) são coordenadas tridimensionais no sistema de referência geodésico local; (A_1, A_2, \dots, A_8) são parâmetros de transformação.

As Equações 3.7 e 3.8 são conhecidas como Equações de Projeção Paralela.

Correção Atmosférica

A radiação eletromagnética ao incidir na atmosfera terrestre interage com os diversos gases, vapor d'água, aerossóis e partículas que a compõem. Nesta interação, a radiação pode ser espalhada, absorvida, refletida e/ou refratada, interferindo nas medidas de reflectância de superfície estimadas por sensores orbitais. De um modo geral, a radiância espectral (L_λ) registrada pelos detectores pode ser expressa em função do fluxo radiante que deixa determinado alvo da superfície terrestre em determinado ângulo sólido (Jensen, 2007). Porém, é comum que outros elementos da superfície sensibilizem os detectores e introduzam um sinal que não é característico do objeto a ser imageado.

Desta forma, a radiância espectral de determinado alvo da superfície ($L_{\lambda, \text{alvo}}$) que sensibiliza os detectores de um determinado sensor é função de diversos componentes. Os principais fatores e trajetórias da radiação eletromagnética que interferem na radiância espectral captada pelos sensores são: (a) irradiância solar espectral direta ($E_{o, \lambda}$) que incide na superfície devido à alta transmitância espectral da atmosfera ($\tau_{a, \lambda}$); (b) irradiância solar espectral difusa ($E_{d, \lambda}$) que sofre o processo de espalhamento na atmosfera e incide no sensor sem interagir com a superfície; (c) irradiância solar espectral difusa ($E_{d, \lambda}$) que sofre os espalhamentos Rayleigh, Mie e Não-seletivo, ou tem parte de seu fluxo radiante absorvido e incide sobre a área de estudo; (d) radiância que foi refletida ou espalhada por áreas vizinhas; (e) radiância que foi refletida por áreas

vizinhas para a atmosfera, e foi espalhada ou refletida para o alvo de interesse; e (f) atenuação do sinal captado pelo sensor devido ao espalhamento e absorção da radiação que deixa determinado alvo da superfície terrestre em determinado ângulo sólido (Figura 3.6).

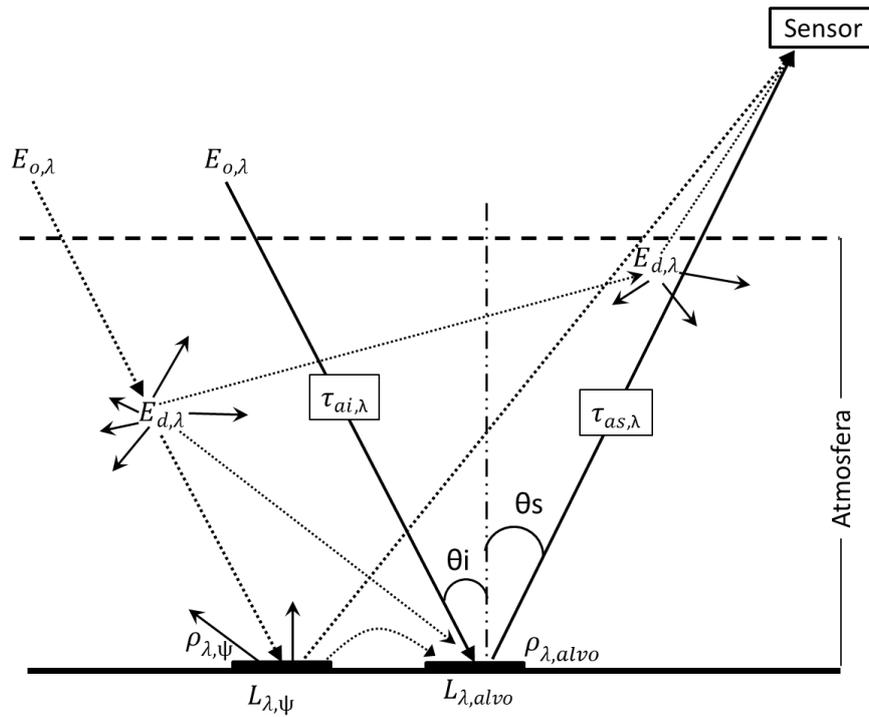


Figura 3.6 - Principais fatores e trajetórias da radiação espectral que atenuam, incrementam e ocasionam ruídos no sinal captado pelos sensores.

Fonte: Adaptado de Jensen (2007).

Desta forma, apenas uma pequena fração do fluxo radiante incidente em determinada área da superfície terrestre (Irradiância) será refletida na direção do sensor. Assim, se assumirmos que a Terra se comporta como uma superfície lambertiana, a radiação que deixa o alvo e sensibiliza os detectores pode ser definida como:

$$L_{\lambda,alvo} = \frac{1}{\pi} \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} \rho_{\lambda} \tau_{a,s} (E_{o,\lambda} \tau_{a,\lambda} \cos\theta + E_{d,\lambda}) d\lambda \quad , \quad (3.9)$$

Em muitos estudos, o efeito atmosférico é indesejável e pode ser minimizado a partir de modelos de transferência radiativa. Exemplos destes modelos são: *Second Simulation of a Satellite Signal in the Solar Spectrum (6S)*, *Moderate Spectral Resolution*

Atmospheric Transmittance Algorithm and Computer Model (MODTRAN), *Low Spectral Resolution Atmospheric Transmittance Algorithm and Computer Model (LOWTRAN)* e *Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes (FLAASH)* (VERMOTE *et al.*, 1997; THOME, 2001; HU *et al.*, 2001; RÖDER *et al.*, 2005). Os modelos de transferência radiativa usam informações da atmosfera para simular os principais efeitos resultantes da absorção e espalhamento pelas moléculas e aerossóis (VERMOTE *et al.*, 1997).

Neste trabalho, foi utilizado o modelo MODTRAN, que é um código de transferência radiativa, desenvolvido pela *Spectral Sciences Inc. (SSI)*. Neste modelo, a atmosfera é considerada estratificada e horizontalmente homogênea, na qual os efeitos da absorção, espalhamento e emissão pelos gases e aerossóis constituintes, assim como as múltiplas reflexões da superfície são corrigidas a partir de informações do perfil atmosférico ou parâmetros definidos pelo usuário (ADLER-GOLDEN *et al.*, 1999).

Para a obtenção dos dados de reflectância da superfície por meio do modelo MODTRAN, é necessária a transformação dos níveis de cinza em valores de reflectância aparente (TOA). O cálculo da reflectância aparente, a partir da radiância aparente, apresenta boa acurácia em situações de céu com baixa nebulosidade. Isto permite a comparação de imagens de diferentes sensores, visto que os efeitos do ângulo solar zenital e as diferenças na irradiância no topo da atmosfera são obtidos com boa precisão. A reflectância aparente é obtida da seguinte forma:

$$\rho_p = \frac{\pi \cdot L_\lambda \cdot \left(\frac{d_m}{d}\right)^2}{E_{sol\lambda} \cdot \cos\theta_{zenital}}, \quad (3.10)$$

Em cada banda espectral, L_λ representa a radiância aparente de cada pixel; d e d_m representam, respectivamente, a distância instantânea e média Sol-Terra em unidades astronômicas; $E_{sol\lambda}$ é a irradiância solar média no topo da atmosfera e $\cos\theta_{zenital}$ representa o cosseno do ângulo zenital.

A irradiância média no topo da atmosfera ($E_{sol\lambda}$) é estimada a partir da tabela do MODTRAN. Ainda, para os cálculos da distância média Sol-Terra (Equação 3.11) e do cosseno do ângulo zenital (Equação 3.12) as seguintes expressões são utilizadas:

$$\left(\frac{dm}{d}\right)^2 = 1,00011 + 0,034221 \cos \alpha + 0,000719 \cos 2\alpha + 0,000077 \sin 2\alpha, \quad (3.11)$$

onde $\alpha = \left(\frac{360(\eta-1)}{365}\right)$, e $\eta =$ dia juliano.

$$\cos \theta_{zenital} = \sin \varphi \sin \delta + \cos \varphi \cos \delta \cos \psi, \quad (3.12)$$

onde $\delta = 23,45 \sin \left[\frac{360}{365}(284 + n)\right]$; $\varphi =$ latitude em graus decimais e $\psi =$ ângulo horário.

Restauração (Compensação da MTF)

Após a correção atmosférica e ortorretificação, as imagens de entrada são processadas por um filtro de restauração baseado na técnica proposta por FONSECA *et al.* (1993). O processo de restauração tem como objetivo reduzir o efeito de degradação inserido pelo sensor no processo de formação de imagens tais como a difração óptica, tamanho do detector, filtragem eletrônica (FONSECA *et al.*, 1993; BOGGIONE e FONSECA, 2003; BOGGIONE *et al.*, 2010).

O processo de formação de imagens é modelado como um sistema linear e invariante no espaço (FONSECA, 1988):

$$g = [f * h + nr] \cdot S, \quad (3.13)$$

onde g é a imagem de saída, f representa a cena original, h é a função de espalhamento pontual, nr é o ruído aditivo e S representa o processo de amostragem.

No domínio da frequência, o processo de imageamento pode ser descrito como:

$$G(u) = \frac{1}{\Delta x} \sum_n F(u - nu_a) \cdot H(u - nu_a) + Nr(u), \quad (3.14)$$

onde G, F, H e Nr são as transformadas de Fourier de g, f, h e nr respectivamente. Δx é o intervalo de amostragem e u_a é a frequência de amostragem.

A Equação (3.14) pode ser reescrita na forma:

$$G(u) = \frac{1}{\Delta x} \sum_n G(u - nu_a) + Nr(u), \quad (3.15)$$

onde $G = F \cdot H$.

No processo de restauração, os elementos da imagem degradada são convoluídos com a resposta impulsiva do filtro de restauração p tal que:

$$g'(x) = \sum_n g(x - n\Delta x) \cdot p(n\Delta x), \quad (3.16)$$

onde g' é a imagem restaurada. O processo de restauração é ilustrado na Figura 3.7.

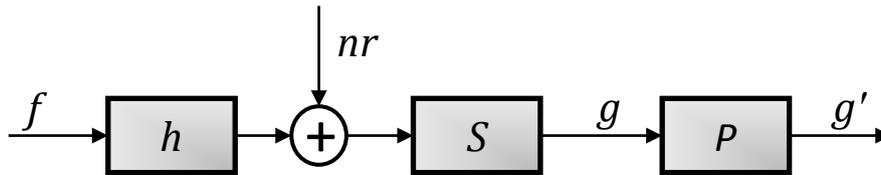


Figura 3.7 - Sistema amostrado e o filtro de restauração.

A restauração pode ser vista como um processo de filtragem espacial. O filtro de restauração, P , amplifica (restaura) a resposta do sensor naquelas frequências onde a amplitude do espectro do sinal é reduzida e que produz o borramento da imagem.

No caso ideal, restaurar uma imagem consiste em projetar um filtro espacial que modifica H de tal forma que a MTF do sistema restaurado H' seja igual a:

$$H' = \begin{cases} 1 & |u| \leq u_c \\ 0 & \text{fora,} \end{cases} \quad (3.17)$$

onde u_c é a frequência de corte do sistema H e que define a sua resolução espacial. Neste caso, a MTF do sistema modificado deixa passar todas as componentes em frequência da cena no intervalo de frequências $|u| \leq u_c$, sem modificá-las.

Na prática, é impossível projetar um filtro de restauração ideal (GONZALEZ e WOODS, 2010) Neste caso, deve-se projetar um filtro que é uma aproximação do filtro ideal (FONSECA et al., 1993). Neste trabalho, os coeficientes do filtro de restauração para corrigir as imagens RapidEye e QuickBird foram calculados a partir dos valores de MTF dos sensores publicadas em Beckett *et al.*, (2010) e Helder *et al.*, (2006).

Após a restauração, a imagem restaurada é requantizada para alterar os níveis de quantização de 11 (RE) e 12 (QB) bits para 8 bits, que é o mesmo nível de quantização das imagens de Referência TM/Landsat-5 e CCD/CBERS-2B.

3.2.2 Estimação da MTF

Este módulo estima a MTF do sensor a ser simulado a partir dos valores especificados no projeto do sensor. A MTF é modelada por uma função gaussiana, cujo parâmetro é estimado a partir dos dados de projeto da imagem de Saída. O esquema deste módulo é apresentado na Figura 3.8.

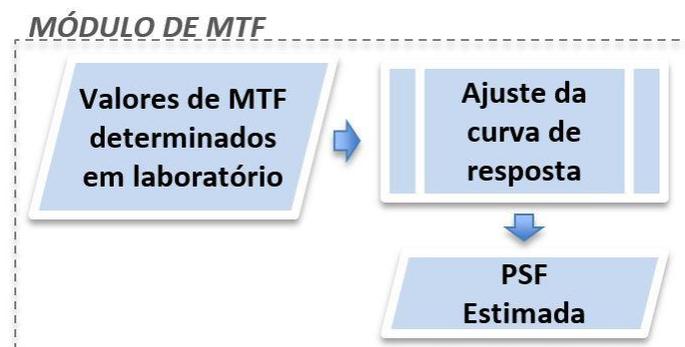


Figura 3.8 - Esquema do módulo de estimação da MTF.

A teoria de filtro linear possui um teorema análogo ao teorema do limite central da estatística: o produto de K funções de transferências e de bandas limitadas tende a um formato gaussiano quando K é relativamente grande. Normalmente, os sistemas imageadores têm pelo menos quatro funções de transferências, e geralmente uma delas pode assumir um formato gaussiano, como, por exemplo, o sistema óptico. Portanto, a MTF pode ser aproximada por uma função gaussiana,

$$H(u) = \exp(-2\pi^2\sigma^2u^2), \quad (3.18)$$

onde σ é o desvio-padrão e u é a frequência normalizada em relação à frequência de amostragem u_a do sistema.

Neste estudo, os parâmetros do sensor foram obtidos em Santos Junior *et al.* (2010) para a câmera CCD do CBERS-2B e Markhan (1985) para o TM-5. Utilizando os dados de especificação de pré-lançamento, a função gaussiana foi ajustada e a MTF determinada.

3.2.3 Contribuição dos efeitos atmosféricos

O modelo MODTRAN foi usado para transformar os valores de níveis de cinza da imagem de entrada em duas novas imagens: reflectância de superfície e reflectância aparente (TOA – reflectância no topo da atmosfera). Em seguida, a imagem de reflectância de superfície foi reamostrada espacialmente utilizando como interpolador a resposta do sensor (PSF) de Saída. O mesmo procedimento foi realizado para reamostrar as imagens de reflectância aparente (TOA). Assim, nesta fase, duas imagens (para cada imagem de Entrada) são reamostradas para um tamanho de pixel igual ao da imagem de Saída (30 m para TM e 20 m para CCD). O esquema deste módulo é apresentado na Figura 3.9

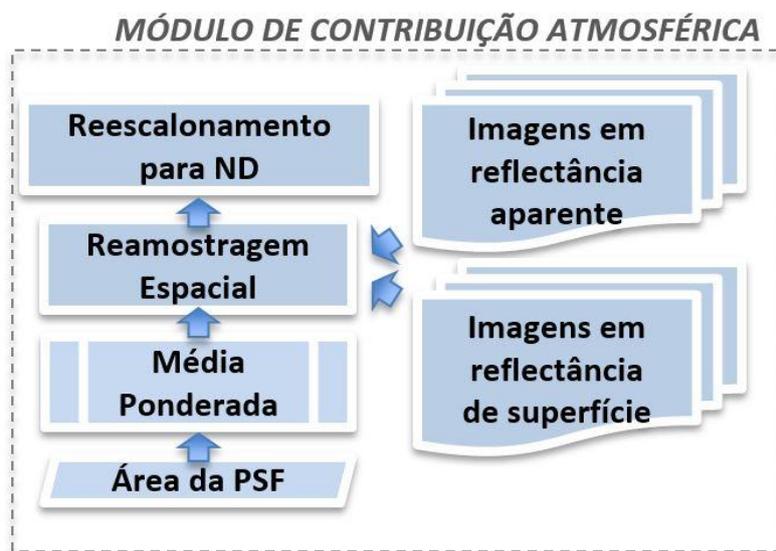


Figura 3.9 – Esquema do módulo de contribuição atmosférica.

A partir das imagens reamostradas, uma em reflectância aparente (TOA) e outra em reflectância da superfície, a proporção das componentes absorvidas e/ou espalhadas para cada banda foi calculada como:

$$G_p = G_{TOA} - G_{Sup} \quad , \quad (3.19)$$

onde G_p é a imagem proporção, G_{TOA} é a imagem reflectância aparente e G_{Sup} é a imagem de reflectância da superfície.

Neste caso, consideramos que a diferença entre os valores de ND, que representam a reflectância aparente, e a imagem corrigida pelo MODTRAN, em reflectância de superfície, correspondem à quantidade de radiação eletromagnética extinta. Após a estimativa da imagem proporção, ela é adicionada no processo de simulação das imagens do CCD/CBERS-2B e do TM/Landsat.

3.2.4 Simulação da resolução espacial

A imagem de alta resolução (Entrada) é processada por um filtro linear. O projeto do filtro de simulação da resolução espacial leva em consideração a relação entre as resoluções das imagens de Entrada e Saída. O esquema deste módulo é ilustrado na Figura 3.10.

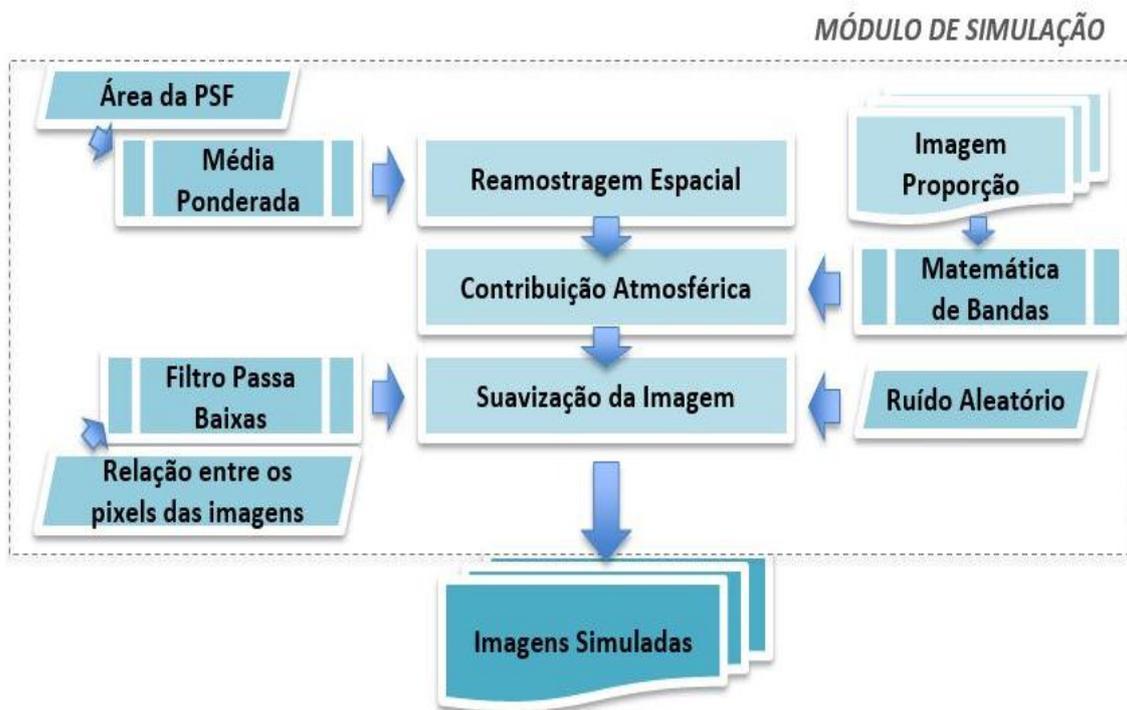


Figura 3.10 – Esquema do módulo de simulação.

Os pesos do filtro são calculados pela relação entre a MTF do sensor de Saída e a MTF de Entrada:

$$\sigma_F = \sqrt{\sigma_{Sai}^2 - \sigma_{Ent}^2}, \quad (3.20)$$

onde σ_F é o desvio-padrão do filtro de simulação, σ_{Sai} é o desvio-padrão da curva de MTF da imagem de Saída e σ_{Ent} é o desvio-padrão da curva de MTF da imagem de Entrada, modeladas por uma função gaussiana.

O tamanho do pixel da imagem simulada é definido no processo de reamostragem. Por exemplo, no caso da simulação da imagem TM (30 m) a partir da imagem RE (5 m), a máscara do filtro é aplicada de 6 em 6 pixels para reduzir o tamanho da imagem e obter uma imagem de Saída com tamanho de pixel igual a 30 m. Este procedimento é ilustrado na Figura 3.11.

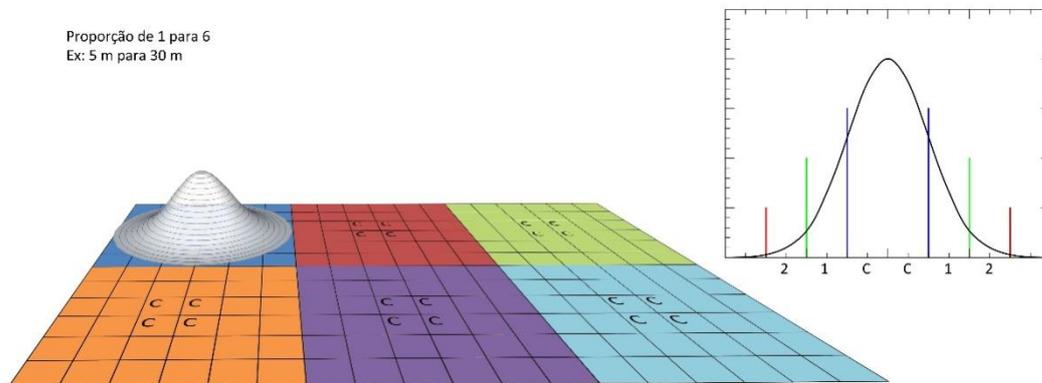


Figura 3.11 - Processo de simulação. O filtro baseado na PSF é aplicado na imagem de acordo com a relação entre as imagens de entrada e saída.

O filtro de simulação da resolução espacial é aplicado nas bandas da imagem de melhor resolução espacial para degradar a imagem de Entrada e assim obter a resolução espacial desejada da imagem de Saída.

3.3. Avaliação do método de simulação

Alguns experimentos são realizados para testar a eficiência do método e avaliar se as imagens geradas pelos sistemas TM e CCD atendem às especificações de projeto em termos de resolução espacial. Os resultados são apresentados separadamente por experimentos e dentro de cada experimento, organizados por sensor simulado TM e CCD.

No processo de avaliação, os seguintes testes são realizados:

(a) Análise visual;

Este teste identifica as diferenças visuais entre a imagem Simulada (saída) e a imagem de Referência, buscando reconhecer feições lineares do tipo ruas, aeroportos, pontes e bordas. O processo de simulação proposto aqui usa os parâmetros definidos no projeto e, portanto, as imagens simuladas não levam em consideração as distorções que possam ocorrer após o lançamento. Desta forma, eventuais diferenças na qualidade visual das imagens podem apontar para a existência destas distorções.

(b) Diferença de imagens;

A diferença de imagens é obtida pela subtração pixel-a-pixel (Simulada e Referência). Como a imagem Simulada é obtida pela degradação modelada pela MTF do sensor (filtro passa-baixas), é razoável concluir que as diferenças mais significativas ocorrerão nas feições lineares, representadas pelas altas frequências, e que são as que mais sofrem degradação. Esta degradação será maior ou menor de acordo com as características do sistema. A imagem diferença destaca qualquer traço de estrutura presente em uma imagem e ausente na outra.

(c) Classificação não supervisionada K-médias;

O método de classificação não supervisionada K-médias é um classificador que utiliza uma abordagem de agrupamento. O espaço de atributos da imagem é particionado em K grupos. Posteriormente, cada pixel da imagem é alocado ao centro mais próximo segundo a distância euclidiana até que todos os pixels tenham sido agrupados.

(d) Índice de similaridade (SSIM);

O índice SSIM (Structural SIMilarity) é uma métrica objetiva de avaliação da qualidade de imagens em tons de cinza e que considera características da percepção humana em sua elaboração (WANG *et al.*, 2006). O SSIM foi elaborado pela observação de que imagens naturais são estruturadas de tal forma que cada pixel na imagem tem dependências com os vizinhos e que essas dependências carregam importantes informações sobre as estruturas dos objetos na cena que possuem relação com a análise visual (WANG; BOVIK, 2004).

O índice SSIM varia entre 0 a 1 e quanto mais próximo de 1 maior a similaridade entre

as imagens. O índice SSIM leva em consideração o brilho, contraste e correlação entre as imagens e é descrito por:

$$SSIM(m, n) = b(m, n) \cdot c(m, n) \cdot e(m, n) = \left(\frac{2\mu_m\mu_n + C_1}{\mu_m^2 + \mu_n^2 + C_1} \right) \left(\frac{2\sigma_m\sigma_n + C_2}{\sigma_m^2 + \sigma_n^2 + C_2} \right) \left(\frac{\sigma_{m,n} + C_3}{\sigma_m\sigma_n + C_3} \right), \quad (3.21)$$

onde $\mu_m\mu_n$ e $\sigma_m\sigma_n$ representam, respectivamente, as médias e os desvios padrão das imagens m e n ; e $\sigma_{m,n}$ é a correlação. Por definição, $C_1 = (K_1L)^2$, onde $L = 2^n - 1$ é o valor máximo de um pixel de acordo com o número de bits e $K_1 \ll 1$; $C_2 = (K_2L)^2$ e $K_2 \ll 1$ e $C_3 = \frac{C_2}{2}$. Estas constantes têm como função estabilizar cada componente na equação (WANG *et al.*, 2004).

3.3.1 Análise Visual

A Figura 3.12 mostra o resultado das simulações da resolução espacial do sensor TM/Landsat 5 para a região de Alegrete, Rio Grande do Sul, a partir da imagem QB adquirida no dia 30/03/2008. A região analisada é composta por áreas urbanas, localizadas nas porções oeste e central da imagem, e por áreas cujo uso do solo predominante é a agricultura sazonal que ocorre no período de chuvas (entre novembro e março). Na imagem QB, ilustrada na Figura 3.12a, podem-se observar os diferentes padrões espaciais da área de estudo, com elementos geométricos bem definidos tais como estradas e áreas com acentuado contraste (corpos d'água, talhões agrícolas e vegetação secundária).

Quando as imagens de Referência (TM/Landsat-5 em 30/03/2008 na Figura 3.12b) e Simulada (Figura 3.12c) são comparadas, podemos observar grande semelhança entre elas. De um modo geral, apenas algumas pequenas diferenças relacionadas com padrões diferentes podem ser observadas, como, por exemplo, a área urbana e os elementos que a compõe. Portanto, podemos verificar que, visualmente, a imagem Simulada é bastante similar à imagem de Referência TM.

A Figura 3.13 mostra um recorte da banda 3 do sensor TM/Landsat-5 (Figura 3.13a) e a imagem simulada a partir do sensor a bordo do satélite RE para a mesma banda espectral (Figura 3.13b). A cidade de Luís Eduardo Magalhães/BA possui uma recente ocupação de vegetação nativa para produção de grãos em larga escala. (BRANNSTROM *et al.*, 2008). Desta forma, em todo o bioma Cerrado,

aproximadamente, 40% das áreas de vegetação nativa foi convertida em áreas de pecuária e agricultura. Esta característica é evidenciada na Figura 3.13 que mostra um recorte para talhões agrícolas de soja. Nesta área, podem-se observar áreas de solo exposto (em tons de vermelho) e áreas de plantio recente (em tons de verde) com diversas linhas geométricas decorrentes do processo de plantio (em linhas) ou da colheita. Podemos verificar que ao simular a Banda 3 do sensor TM/Landsat 5 a partir da imagem RE de 01/10/2009, a característica espectral e espacial apresentam uma boa concordância com a imagem original, uma vez que as linhas estão geometricamente compatíveis e os valores ND são semelhantes aos valores de radiância coletados pelo sensor original.

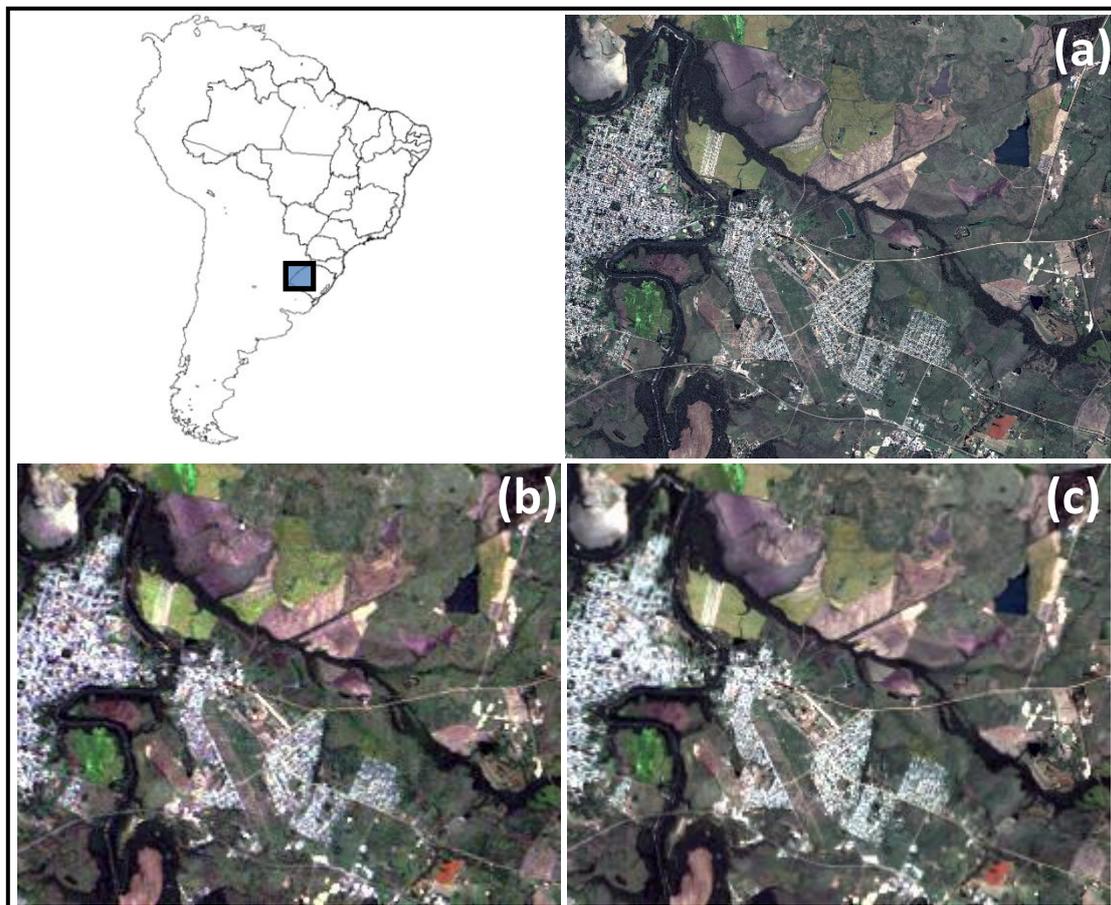


Figura 3.12 - Composição 3R2G1B da (a) Imagem QB com resolução espacial nominal de 2.4 metros, Alegrete/RS, 30/03/2008; (b) Imagem original TM/Landsat 5, com resolução espacial nominal de 30 metros e (c) Imagem TM/Landsat 5 Simulada a partir da QB e resolução espacial de 30m.

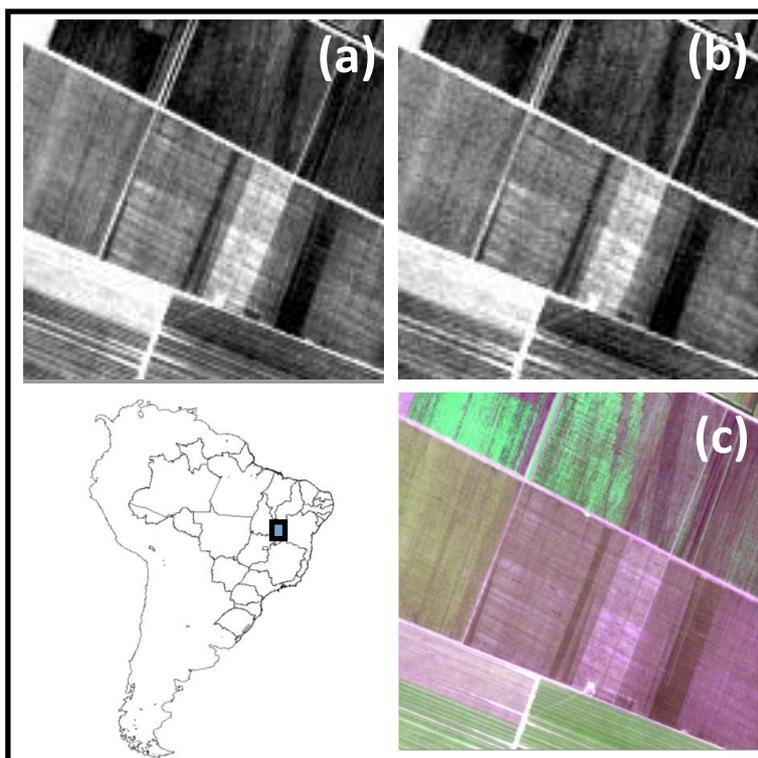


Figura 3.13 - Recorte de imagem da região de Luís Eduardo Magalhães: (a) Banda 3 (original) do TM/Landsat 5 (29/09/2009), resolução espacial nominal de 30 m; (b) Banda 3 do TM/Landsat 5 Simulada a partir da imagem RE, resolução espacial de 30 m; (c) Imagem RE, composição 3R5G2B, (01/10/2009) com resolução espacial nominal de 5 metros.

A Figura 3.14 apresenta uma composição colorida 3R2G1B do município de São José dos Campos/SP, uma cidade de médio porte, com aproximadamente 800.000 habitantes e uma área urbanizada de 353,9 km². Na Figura 3.14 percebe-se que tanto a imagem TM/Landsat-5 original (Figura 14a) como a imagem simulada a partir do QB (Figura 14b) mostram coerência em relação aos padrões dos alvos, como feições lineares e regiões de altas frequências. Porém, nas áreas com elevada densidade populacional, observa-se que a imagem simulada apresenta quantidade maior de detalhes enquanto que a imagem original TM/Landsat-5 apresenta um aspecto borrado, embora este efeito seja desprezível no contexto da análise na escala 1:60.000. Esta característica pode ser melhor percebida na região realçada na imagem, que representa uma estrada e áreas de gramíneas. Devido à diferença de tonalidade, podem-se observar variações sutis nos valores de reflectância estimados a partir do QB e à imagem original TM/Landsat-5.

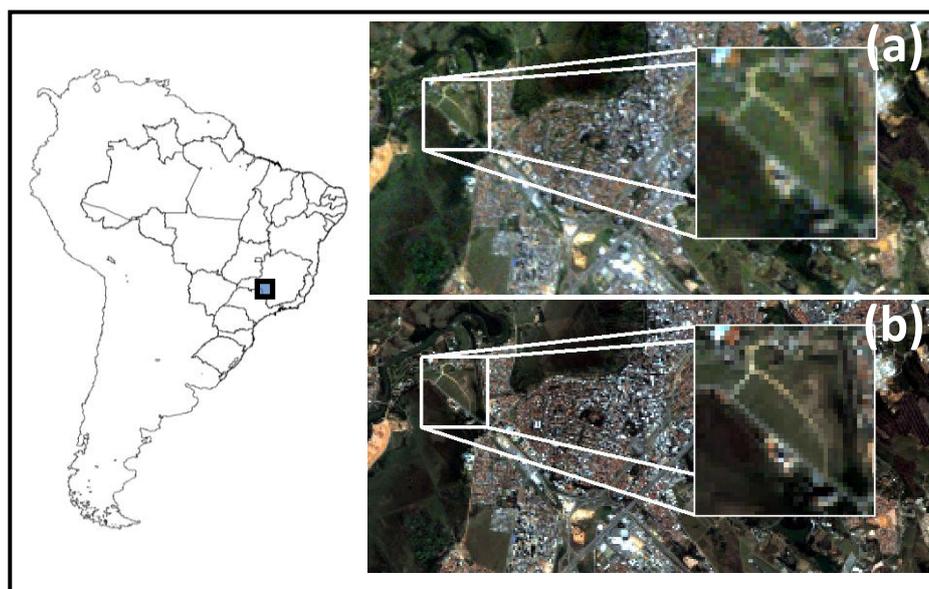


Figura 3.14 - Composição 3R2G1B de São José dos Campos, SP. (a) TM-5 original, 30 m; (b) TM-5 simulada, 30 m a partir da imagem QB. Em destaque, feições lineares.

A Figura 3.15 mostra a imagem CCD/CBERS-2B original (Figura 3.15a); a imagem simulada a partir da imagem QB (Figura 3.15b), e a imagem RESOURCESAT com resolução nominal de 24 m (Figura 3.15c), para o município de São José dos Campos/SP, na composição falsa-cor 3R4G2B. Diferentemente da simulação da imagem TM/Landsat-5, podemos observar que a imagem simulada para o sensor CCD/CBERS-2B a partir da imagem QB, adquirida no dia 04/09/2008, apresenta melhor definição dos contornos e de padrões estruturais. Tal característica é visível na área ampliada, uma vez que a identificação de ruas e estruturas urbanas na imagem original do CCD/CBERS-2B é dificultada pelo aspecto borrado da cena, que foi observado também por BENSEBAA *et al.*, (2011). Tal fato era esperado, já que as imagens do CCD/CBERS-2B são, na realidade, um pouco borradas devido à não conformidade do sistema com as especificações do projeto. Por outro lado, a imagem CCD/CBERS-2B deveria apresentar capacidade de detalhamento um pouco melhor do que a imagem RESOURCESAT.

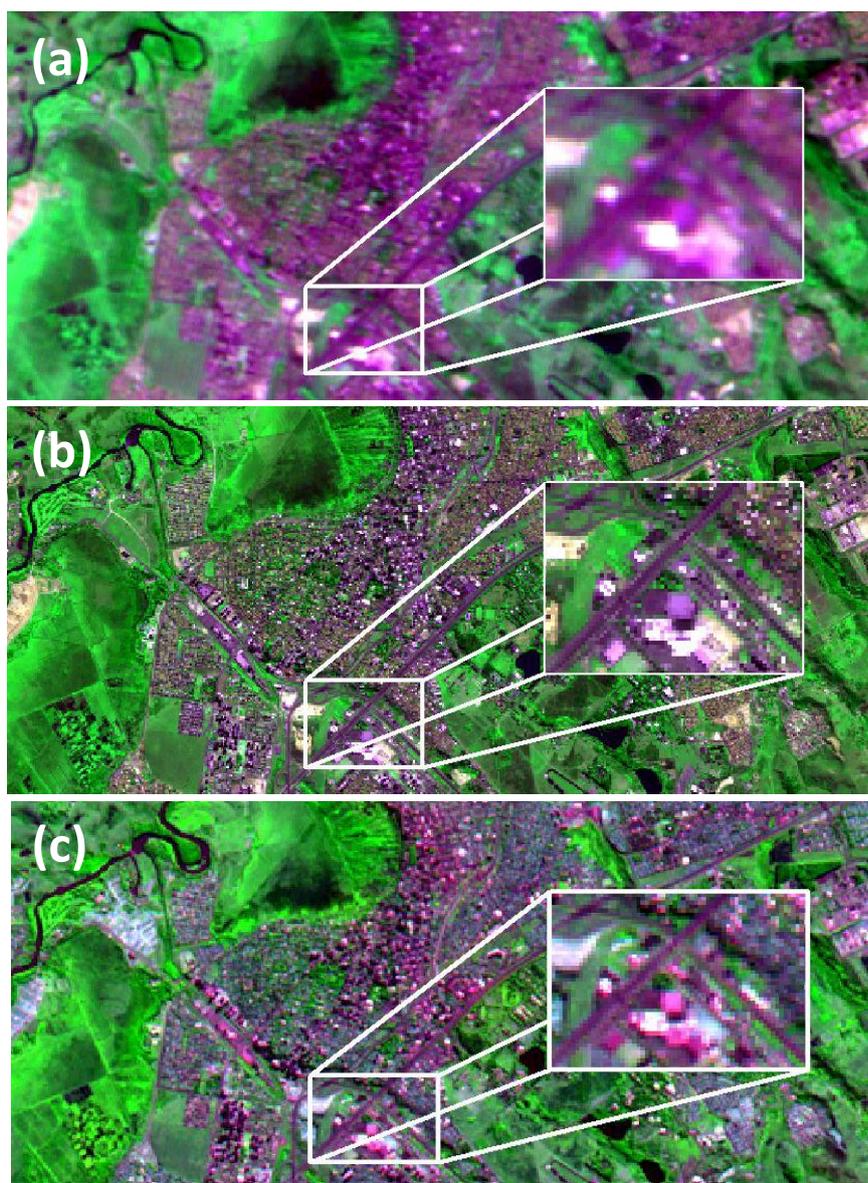


Figura 3.15 - Imagens na composição 3R4G2B, São José dos Campos/SP: (a) CCD/CBERS-2B original, 20 m; (b) CCD/CBERS-2B simulada, 20 m. (c) RESOURCESAT, 24 m. Em destaque, algumas feições lineares.

3.3.2 Diferença de imagens

A diferença entre imagens permite identificar as divergências entre os valores de níveis de cinza para cada pixel da imagem. Neste procedimento, as imagens de referência e simulada são normalizadas em relação à média e variância e depois é aplicada a subtração de imagens pixel a pixel. Isto evita a introdução de artefatos que possam

interferir na análise. A Figura 3.16 mostra a imagem diferença entre a banda 2 da imagem TM original e simulada para o município de Alegrete/RS (Figura 3.16a) e a diferença entre a banda 4 da imagem CCD/CBERS-2B de referência e simulada para o município de São José dos Campos/SP (Figura 3.16b). Ao analisar a imagem diferença no caso da simulação do TM, podemos observar boa concordância entre as imagens original e simulada. Tal característica não é observada para a o experimento com imagens CCD/CBERS-2B, pois as imagens CCD/CBERS-2B reais apresentam aspecto borrado sem as altas frequências características de detalhes e bordas que estão presentes na imagem simulada.

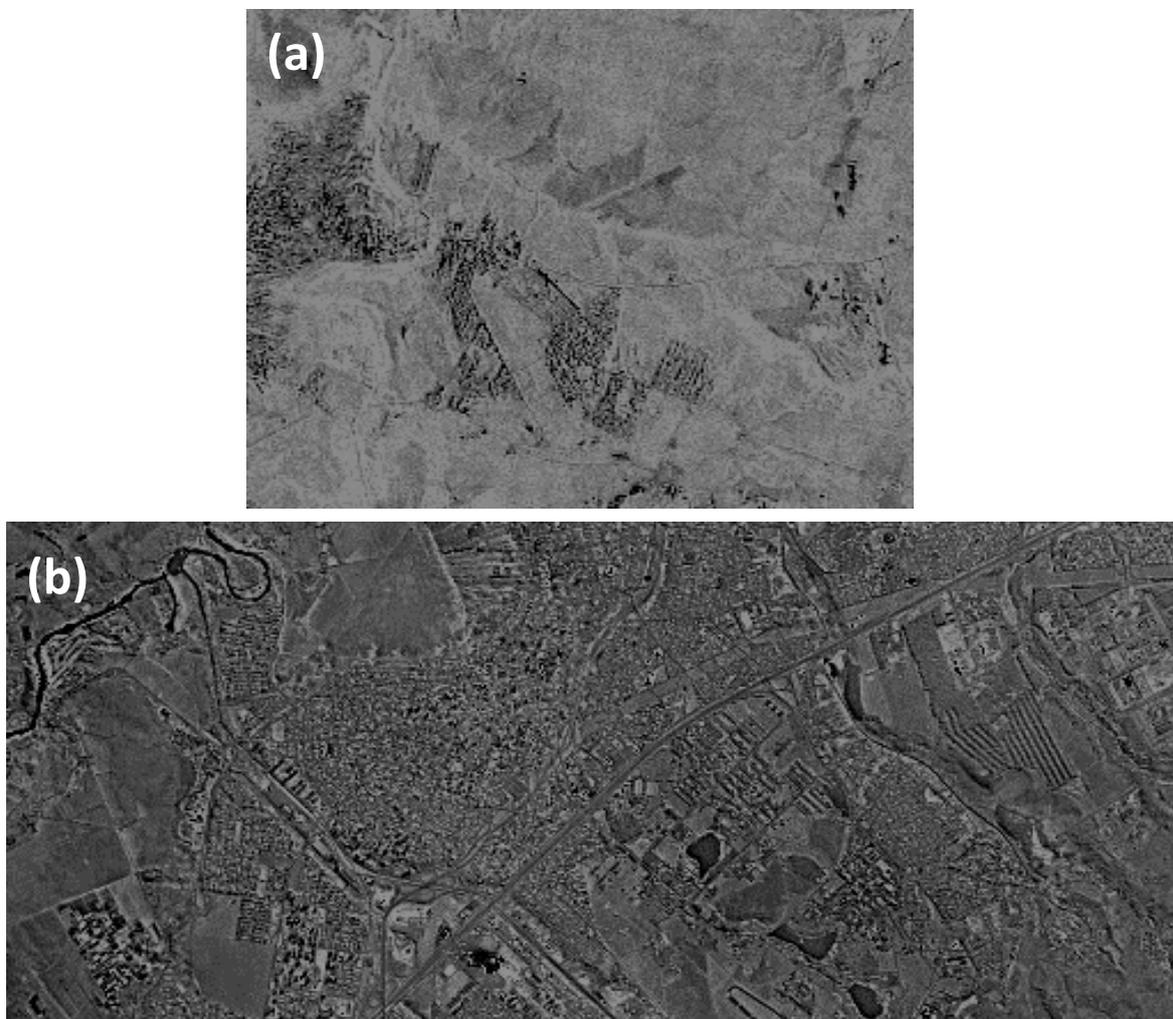


Figura 3.16 - (a) Diferença entre as imagens (Banda 2) TM/Landsat-5 Referência e Simulada, de Alegrete/RS; (b) Diferença entre a banda 4 da imagem CCD/CBERS-2B de Referência e Simulada para o município de São José dos Campos/SP.

3.3.3 Classificação e similaridade entre as imagens

Para avaliar a similaridade da imagem simulada em relação à imagem original, alguns experimentos de classificação não supervisionada k-medias para as imagens TM/Landsat-5, de Alegrete/RS, foram realizados. De acordo com interpretação visual da imagem, foram definidas 5 classes. A Figura 3.17 mostra o resultado da classificação das imagens original (3.17a) e simulada (3.17b). A Tabela 3.3 apresenta a porcentagem de área classificada para cada classe. Podemos observar que os valores são muito próximos para as imagens original e simulada. Tal característica é um indicativo da semelhança espectral e espacial entre ambas as imagens. A diferença entre os resultados da classificação ficou, na média, em torno de 4%.

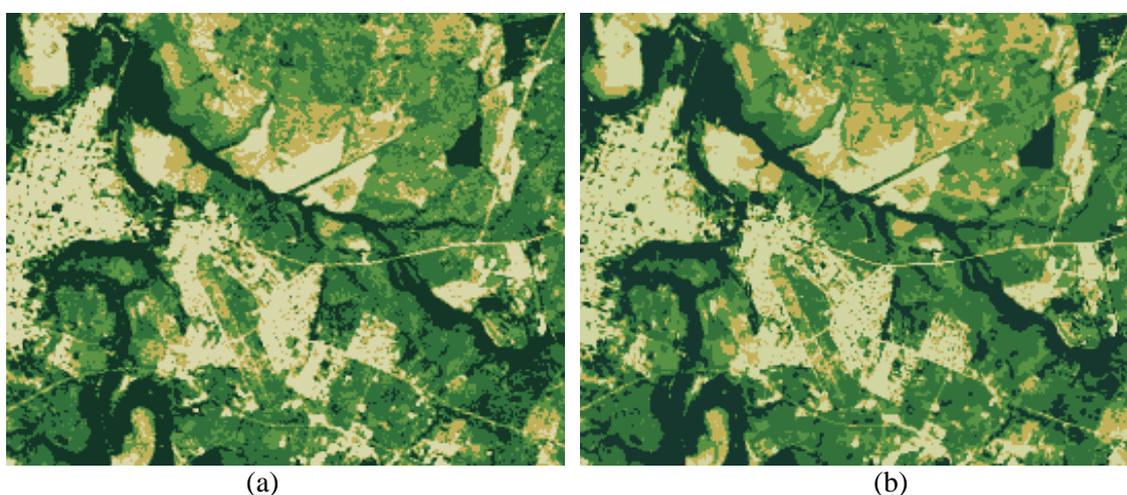


Figura 3.17 - Classificação não supervisionada K-médias, considerando 5 classes: (a) imagem TM-5 original e (b) imagem TM-5 simulada (Alegrete/RS).

Tabela 3.3 – Porcentagem de áreas classificadas do TM/Landsat 5.

	<i>Classe 1</i>	<i>Classe 2</i>	<i>Classe 3</i>	<i>Classe 4</i>	<i>Classe 5</i>
<i>ORIGINAL</i>	18,12%	28,21%	22,94%	12,98%	17,75%
<i>SIMULADA</i>	17,44%	29,66%	21,25%	13,85%	17,80%

A análise dos resultados obtidos a partir do SSIM é apresentada na Tabela 3.4. Os valores indicam que as imagens do sensor TM/Landsat-5 (original e simulada) possuem mais similaridade que as imagens CBERS (original e simulada), o que confirma os resultados das outras análises comparativas.

Tabela 3.4 - Índice de Similaridade SSIM.

	<i>TM</i> <i>B1</i>	<i>TM</i> <i>B2</i>	<i>TM</i> <i>B3</i>	<i>TM</i> <i>B4</i>	<i>CBERS</i> <i>B2</i>	<i>CBERS</i> <i>B3</i>	<i>CBERS</i> <i>B4</i>
<i>SSIM</i>	0,88	0,78	0,80	0,74	0,65	0,70	0,61

4 ESTUDO DE CASO: SIMULAÇÃO DE IMAGENS MUX/CBERS-4

Técnicas de simulação de imagens podem ser usadas para avaliar o potencial de novos sensores em diferentes aplicações em sensoriamento remoto e também para simular imagens em aplicações nas quais é necessário assegurar as mesmas condições de aquisição das imagens a serem analisadas. O modelo de simulação deve levar em conta o processo de formação de imagens e, assim, recriar o ambiente na qual elas são reproduzidas.

Considerando que o satélite CBERS-4 tem previsão para ser lançado em 2014 e que este possui uma câmera MUX, com resolução espacial nominal de 20 m, esta seção tem como objetivo avaliar o potencial das imagens MUX para o mapeamento de cobertura do solo (vegetação arbórea, desmatamento, queimada e corpos d'água). As imagens CBERS-4 MUX são simuladas a partir de imagens do satélite RapidEye (RE) usando a metodologia apresentada no Capítulo 3. As bandas espectrais MUX simuladas são processadas para gerar mapas de cobertura do solo e NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*) para o município de Apuí, Amazonas. Estes resultados são comparados aos resultados do processamento das imagens TM-5 do Satélite Landsat-5 como referência.

No Brasil, as mudanças no uso e cobertura da terra ocorrem principalmente devido à substituição de fisionomias naturais por áreas antrópicas, relacionadas com a constante expansão agrícola e pecuária. Consequentemente, vastas extensões da superfície são submetidas a processos de degradação ambiental, fatores que ocasionam alterações significativas no balanço de energia, nos ciclos biogeoquímicos e no ciclo hidrológico (RICHARDS, 1990; NIYOGI *et al.*, 2009).

As queimadas representam um dos mais importantes mecanismos de conversão da cobertura da terra em áreas antrópicas, utilizadas principalmente para os desmatamentos, abertura e renovação de áreas agropecuárias e limpeza de pastos. Assim, as queimadas afetam, anualmente, milhões de hectares de florestas por todo o globo alterando significativamente o equilíbrio dos ecossistemas terrestres (PYNE *et al.*, 1996; FEARNSSIDE *et al.*, 2009). Os principais impactos das queimadas são a modificação da qualidade da água, do ar, do solo e de outros recursos naturais, além de serem uma das mais importantes fontes de emissão de gases e aerossóis na atmosfera

(KAUFMAN *et al*, 1995; ANDREA e MERLET, 2001). Dados de satélites e técnicas de processamento digital de imagens têm sido utilizados para o monitoramento e mapeamento de queimadas, assim como na análise de seus impactos no meio ambiente em diversas escalas (SILVA *et al.*, 2006).

4.1. Área de estudo

A área de estudo abrange o Município de Apuí (Figura 4.1), no Estado do Amazonas, localizado ao longo da rodovia Transamazônica (BR-230), a 408 km ao sul da capital Manaus, ocupando uma área de mais de 54.000 km². A expansão da malha viária e das atividades agropecuárias do Município deu-se no início da década de 1970, após a construção da BR-230. A principal atividade econômica do Município é a pecuária, atividade que provoca o desmatamento de áreas de vegetação natural além de propiciar o crescimento populacional da região, que triplicou entre os anos de 1990 e 2000. Segundo o Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) 41% da população do Município morava no campo no ano de 2010, sendo que a pastagem ocupava, aproximadamente, 90% da região (MASSOCA *et al*, 2002).

A vegetação é composta principalmente por três regiões fitoecológicas. A primeira é a Floresta Ombrófila Densa, caracterizada por fatores climáticos tropicais de elevadas temperaturas (25° em média) e precipitação alta e bem-distribuída durante o ano. Este tipo de região fitoecológica apresenta duas formações na área de estudo: (1) Formação Terras Baixas, situada em áreas de terrenos sedimentares do terciário/quaternário, em terraços, planícies e depressões aplanadas não susceptíveis a inundações e (2) Formação Submontana, situada nas encostas dos planaltos e/ou serras.

A segunda região fitoecológica é caracterizada pela Floresta Ombrófila Aberta, que apresenta quatro faciações florísticas e apresentam mais de sessenta dias secos por ano. Nessa região fitoecológica estão presentes a formação das Terras Baixas, em altitudes que variam de 5 até 100 m, apresentando predominância da faciação com palmeiras e a formação Submontana, distribuída por toda a Amazônia e mesmo fora dela, principalmente com a faciação floresta com palmeiras.

Na Amazônia ocorrem quatro faciações florísticas (com palmeiras, cipó, sororoca e bambu) situadas acima de 100 m de altitude, podendo chegar a cerca de 600 m. A floresta aberta com bambu encontra-se distribuída principalmente nos Estados do

Amazonas e do Acre. A floresta aberta com palmeiras pode ser observada em estado natural nos Estados do Pará, Amazonas, Roraima e Mato Grosso, pois nos Estados de Tocantins e Rondônia provavelmente não mais existe devido à devastação realizada na década de 1980.

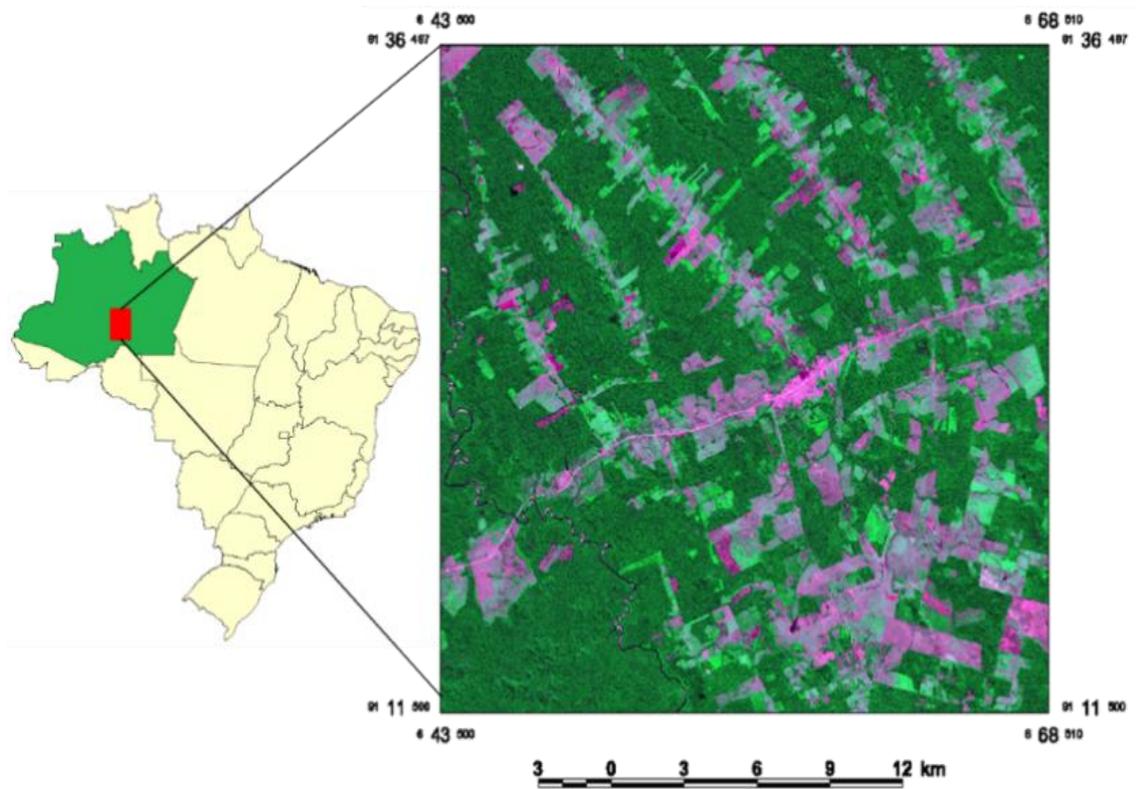


Figura 4.1 - Localização da área de estudo. Município de Apuí/AM.

A floresta-de-cipó está distribuída por toda região Amazônica, sendo que nas encostas dos planaltos e nas serras ela apresenta uma fisionomia com elementos de alto porte isolados e envolvidos pelas lianas lenhosas. A floresta aberta com sororoca é quase exclusiva da Bacia do Rio Xingu, embora possa ser encontrada em menores áreas nos Estados de Rondônia, Amazonas e Roraima, apresentando menor representatividade dentro das faciações florísticas.

A terceira região fitoecológica localizada na área de estudo é a Savana (Cerrado), conceituada como uma vegetação xeromorfa que ocorre em distintos tipos de clima, revestindo solos lixiviados aluminizados, com ocorrência em toda a Zona Neotropical e, prioritariamente, no Brasil Central. A formação presente na área de estudo é a Parque, constituída essencialmente por um estrato graminoide, sendo que a Savana Parque de

natureza antrópica pode ser encontrada em todo o País, enquanto que a natural ocorre algumas vezes com feição de campos litossólicos e/ou rupestres.

Neste trabalho, as espécies arbóreas foram agrupadas na classe de cobertura do solo denominada vegetação arbórea. Ainda, áreas de pastagem e vegetação herbácea-arbustiva foram inseridas na classe desmatamento, indicando que em algum momento a vegetação foi removida pelas ações antropogênicas.

4.2 Metodologia

A Câmera Multiespectral MUX do CBERS-4 cobre quatro faixas espectrais com comprimentos de ondas de 450 nm a 890 nm, FOV de 120 km, e resolução espacial nominal de 20 metros ao nadir (DIAS *et al.*, 2010). Uma imagem RapidEye (RE), adquirida em 14/07/2009, foi utilizada para simulação da imagem produzida pela câmera MUX. Uma imagem TM/Landsat-5 correspondente à órbita 231 e ponto 65, adquirida em 08/07/2009, assim como dados SRTM do programa TOPODATA (VALERIANO, 2005) também foram usados nos experimentos. A Tabela 4.1 apresenta as características dos sensores utilizados neste trabalho.

Tabela 4.1 - Características dos sensores.

Sensor	RapidEye	TM/Landsat-5	MUX/CBERS-4
Bandas Espectrais	B01: 0,44 – 0,51 μ m	B01: 0,44 – 0,52 μ m	B05: 0,45 – 0,52 μ m
	B02: 0,52 – 0,59 μ m	B02: 0,52 – 0,60 μ m	B06: 0,52 – 0,59 μ m
	B03: 0,63 – 0,68 μ m	B03: 0,63 – 0,69 μ m	B07: 0,63 – 0,69 μ m
	B05: 0,76 – 0,85 μ m	B04: 0,76 – 0,90 μ m	B08: 0,77 – 0,89 μ m
Campo de Visada	77 km	185 km	120 km
Resolução Espacial Nominal	5m/6,5 m	30 m	20 m
Resolução Radiométrica	12 bits	8 bits	8 bits

4.2.1 Simulação da imagem MUX do CBERS-4

Neste trabalho, a simulação das imagens da câmera MUX/CBERS-4 foi realizada a partir da reamostragem da imagem RapidEye (RE), que possui características espectrais semelhantes à câmera MUX. O processo de reamostragem é baseado em técnicas de filtragem e no modelo de imageamento que leva em conta os efeitos da atmosfera e ruído, como descrito no Capítulo 3. A simulação consiste em reamostrar a resolução espacial da imagem RE com um filtro passa-baixas cujos coeficientes são calculados a partir da MTF dos sensores RE e MUX. A imagem filtrada é reamostrada para o tamanho de pixel igual ao do sensor a ser simulado.

O filtro de simulação depende da relação entre as resoluções espaciais das imagens de Referência e Simulada. Ou seja, considerando as resoluções espaciais das imagens RapidEye (5 m) e MUX (20 m), o valor de pixel da imagem simulada é calculado a partir dos 4 pixels vizinhos na imagem de Referência (RE), como mostra a Figura 4.2. O filtro é modelado por uma função gaussiana e os pesos deste filtro são calculados a partir dos valores da MTF ou PSF dos sensores RE e MUX.

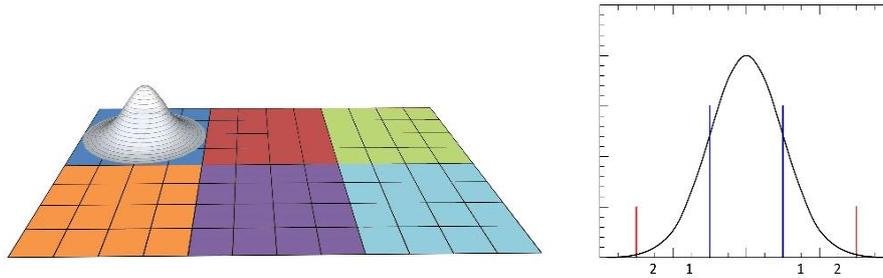


Figura 4.2 - Processo de simulação: o filtro de simulação depende da relação entre os valores da resolução espacial da imagem de Referência (5 m) e Simulada (20 m).

4.2.2 Processamento Digital

Basicamente, dois produtos foram gerados: mapa de cobertura do solo com quatro classes e a imagem NDVI. A imagem TM/Landsat-5 foi corrigida geometricamente a partir do modelo polinomial de 1° grau e do interpolador vizinho mais próximo. A imagem foi registrada a partir da base Geocover disponibilizada pela *National Aeronautics and Space Administration* (NASA) e ortorretificada para minimizar os efeitos do relevo. Após o georreferenciamento, o erro médio quadrático (RMSE) foi de 0,513.

Como a análise consiste na comparação de produtos gerados por dois sensores diferentes, é necessário normalizar os valores de níveis de cinza das imagens. Desta forma, antes do processamento, as imagens MUX simulada e TM-5 foram normalizadas radiometricamente por meio da técnica proposta por Hall *et al.* (1991). Inicialmente, as imagens são convertidas para valores de reflectância aparente segundo o modelo proposto por Chander e Markham (2003) e a imagem TM-5 é tomada como referência.

Para realçar os alvos de interesse e assim facilitar o processo de classificação, as imagens foram processadas usando o Modelo Linear de Mistura Espectral (MLME) (TEIXEIRA, 2004). O valor de cada elemento de imagem digital é a combinação ponderada dos componentes puros (solo, sombra e vegetação) presentes em cada elemento de cena (SHIMABUKURO e SMITH, 1991; ROBERTS *et al.*, 1998). Neste trabalho, os pixels puros (*endmembers*) utilizados no modelo foram selecionados diretamente na imagem e o valor do pixel foi definido por:

$$\rho_i = a * veg_i + b * solo_i + c * sombra_i + e_i, \quad (4.1)$$

onde ρ_i é o valor de reflectância do pixel na banda i ; a , b e c são as proporções de vegetação, solo e sombra, respectivamente; veg_i , $solo_i$ e $sombra_i$ são as respostas espectrais das componentes vegetação, solo e sombra (ou água), respectivamente e e_i é o erro na banda i .

As componentes fração-sombra foram segmentadas usando os limiares 12 para similaridade e 8 para área (BINS *et al.*, 1993). Após a segmentação, os polígonos foram editados para minimizar eventuais erros e, assim, garantir um mapeamento mais confiável. Posteriormente, as imagens frações solo, vegetação e sombra foram classificadas em quatro classes (vegetação arbórea, queimadas, desmatamento e corpos d'água) usando o método de classificação não supervisionada ISOSEG (BINS *et al.*, 1993).

Da mesma forma, as imagens MUX simulada e TM-5 foram processadas para gerar o índice de vegetação NDVI:

$$NDVI = (IVP - V)/(IVP + V) , \quad (4.2)$$

onde IVP representa a banda espectral infravermelho próximo e o V representa a banda espectral do vermelho. O NDVI apresenta valores entre -1 e +1. Assim, áreas de vegetação exuberante e densa apresentam valores próximos a um, enquanto que solo exposto e vegetação menos densa apresentam valores mais baixos.

4.3 Resultados e Discussão

A Figura 4.3 mostra o resultado da simulação da câmera CBERS-4 MUX (20 m) a partir da imagem RapidEye (Figura 4.3a) e uma imagem do sensor TM-5 (Figura 4.3b) do Município de Apuí, Amazonas. Na composição falsa-cor, as áreas de vegetação densa são representadas pelas tonalidades verde-escuro, enquanto que regiões verde-claro representam áreas agrícolas, pastagem e vegetação secundária. A cor magenta representa áreas de solo exposto e a área urbana na região central da cena. As áreas de queimadas estão representadas pela cor violeta.

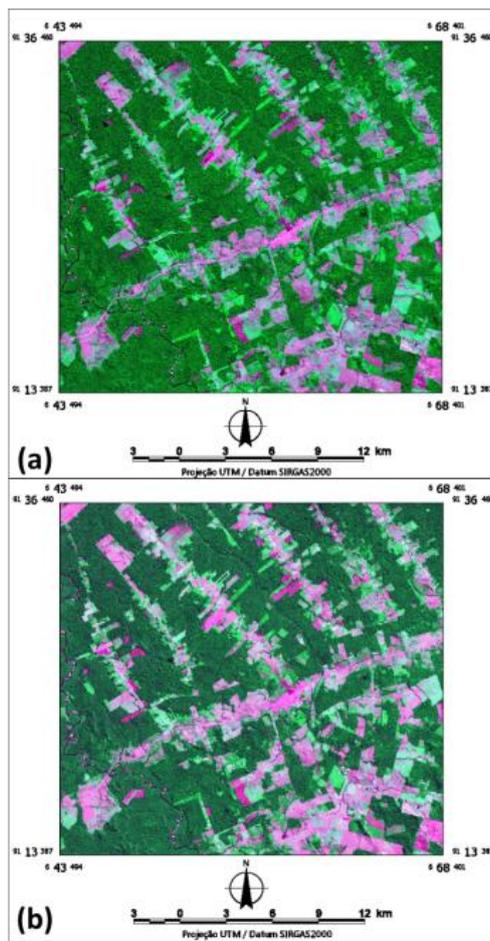


Figura 4.3 - (a) Imagem simulada CBERS-4 MUX, composição 2B3R4G, 14/07/2009; (b) Imagem Landsat-5 TM, composição 2B3R4G, 08/07/2009.

As Figuras 4.4a e 4.4b mostram as imagens fração-solo estimadas a partir das imagens MUX. A imagem fração solo permite identificar áreas de solo exposto nas imagens orbitais. Pode-se observar na Figura 4.3 a semelhança entre os resultados obtidos pela imagem TM-5 e MUX simulada.

As Figuras 4.4c e 4.4d ilustram a fração-sombra para as imagens MUX e TM-5, respectivamente. Regiões em tons mais claros representam áreas de baixa reflectância tais como água e queimadas. Finalmente, as Figuras 4.4e e 4.4f representam as frações-vegetação estimadas a partir da MUX e TM-5, respectivamente, onde os valores mais altos representam áreas de vegetação.

Comparando as componentes frações das imagens MUX e TM-5, podem-se observar algumas pequenas diferenças que são, basicamente, devido à diferença entre as resoluções espaciais dos sensores em questão. As imagens classificadas (vegetação

arbórea (verde escuro), desmatamento (amarelo), áreas queimadas (marrom) e corpos d'água (azul) são mostradas nas Figuras 4.4g e 4.4h. A classificação da imagem MUX mapeou 355,30 km² para vegetação arbórea; 264,00 km² para áreas desmatadas; 3,96 km² de queimadas e 1,58 km² de corpos d'água. Da mesma forma, a classificação da imagem TM-5 mapeou 380,26 km² de vegetação arbórea, 241,76 km² de desmatamento, 1,23 km² de áreas queimadas e 1,59 km² de corpos d'água. As estimativas de cobertura do solo para ambos os sensores apresentam uma boa concordância e a tabulação cruzada destes dados apresentou uma acurácia global de 87% e Kappa de 0,72. Na estimativa de áreas queimadas e desmatamento, obteve-se um melhor desempenho para a imagem MUX devido ao seu maior detalhamento espacial em relação à imagem TM, que detecta áreas pequenas que sofreram mudanças.

Em relação ao produto NDVI, a Figura 4.5a mostra o gráfico de dispersão com os valores de NDVI da MUX no eixo x e os do TM-5 no eixo y. Pode-se observar que os valores de NDVI da imagem MUX são maiores em relação aos valores de NDVI da imagem TM. A frequência das observações das amostras referentes à correlação e o coeficiente angular são identificadas na regressão linear entre os dados de NDVI a partir da técnica estatística denominada bootstrap, que estima o intervalo de confiança entre as amostras, Figuras 4.5b e 4.5c, respectivamente. A técnica bootstrap desenvolvida por Efron (1982) reconstrói, a partir do universo amostral de $1,0 \times 10^4$, a curva original dos dados e fornece os parâmetros que gera o intervalo de confiança para as estimativas da regressão.

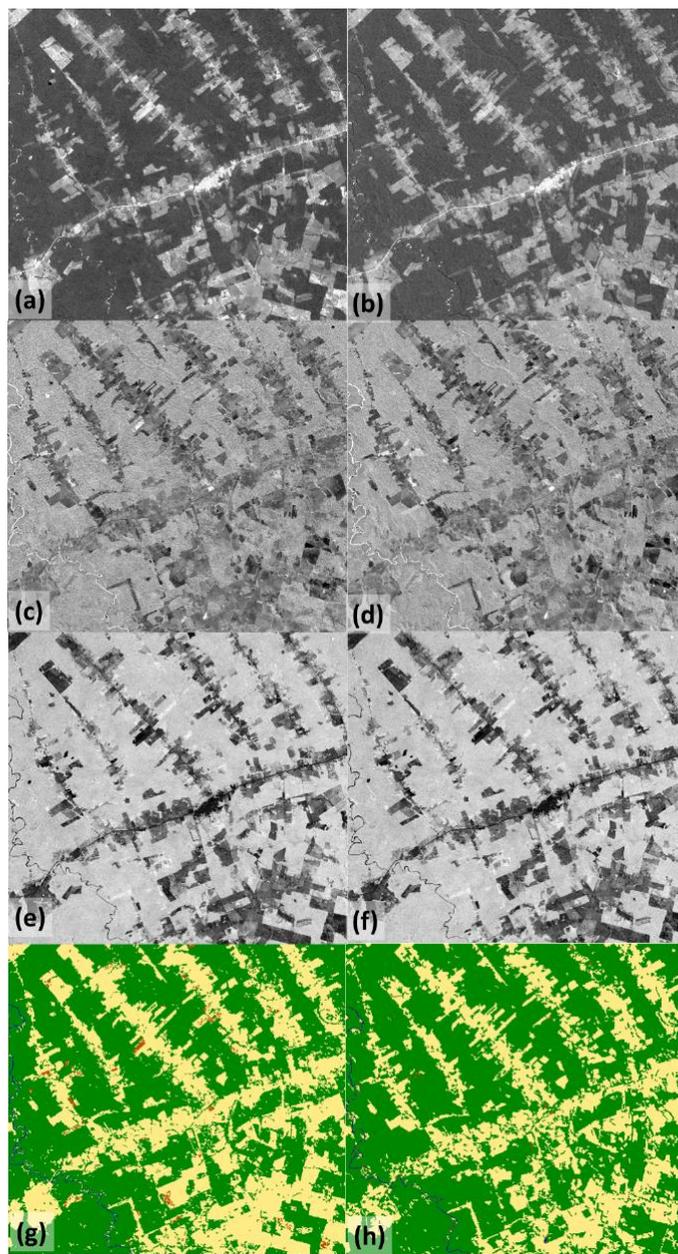


Figura 4.4 - Imagem fração-solo estimada a partir da MUX (a) e TM-5 (b); imagem fração-sombra estimada a partir da MUX (c) e TM-5 (d); imagem fração-vegetação estimada a partir da MUX (e) e TM-5 (f); classificação: vegetação arbórea (verde escuro), desmatamento (amarelo), queimadas (marrom) e corpos d'água (azul) para a MUX (g) e TM-5 (h).

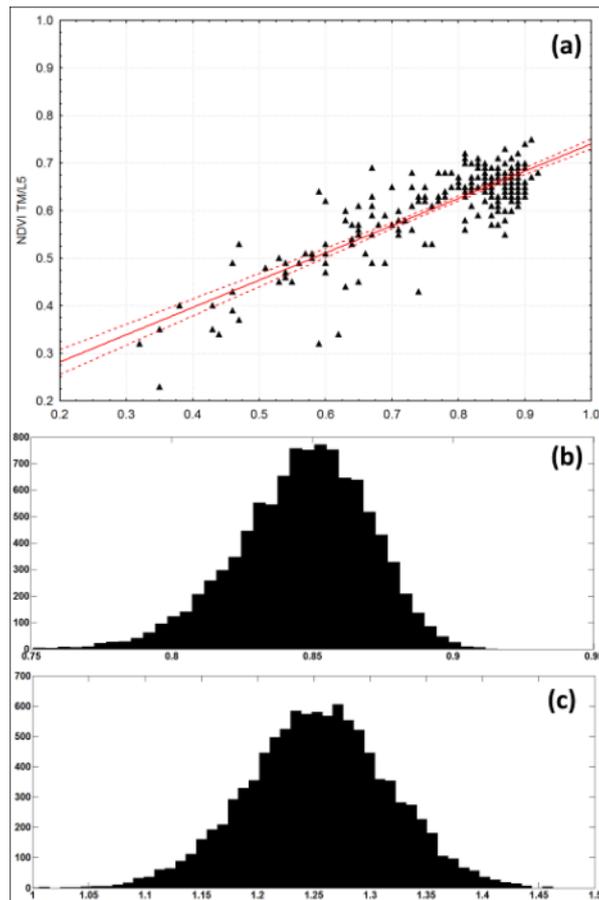
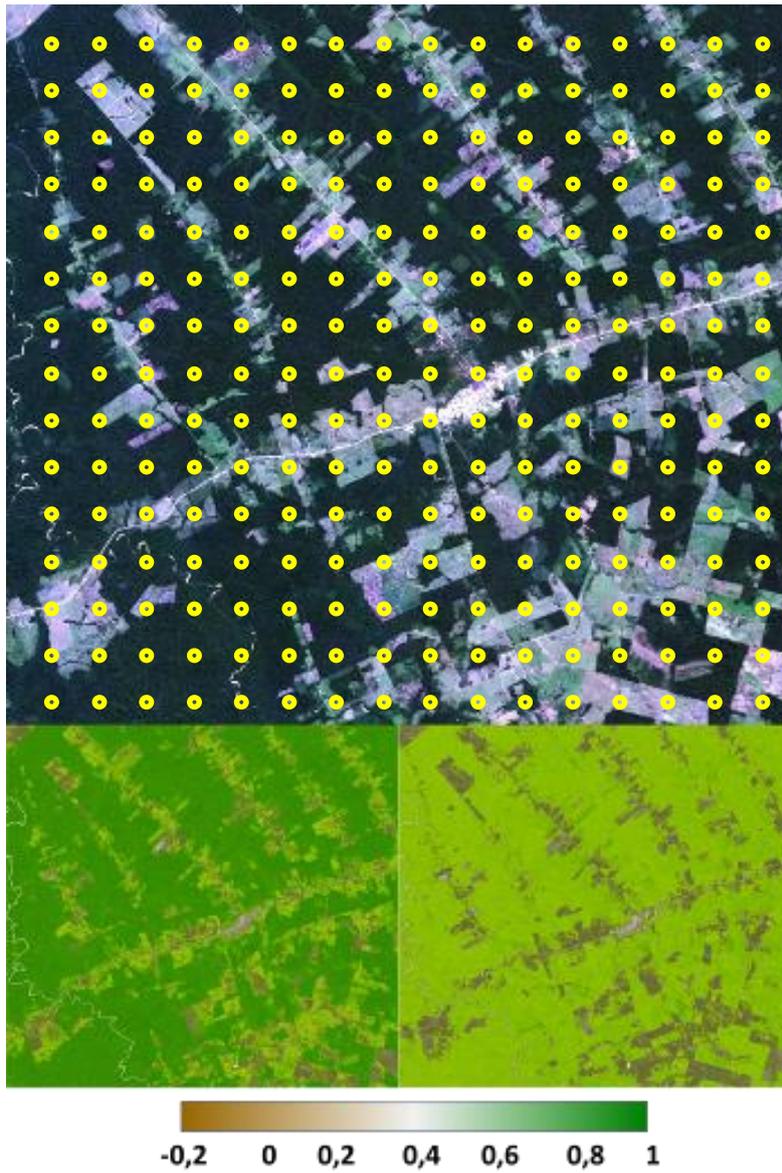


Figura 4.5 - (a) Gráfico de dispersão entre as estimativas de NDVI a partir das imagens MUX (eixo x) e TM-5 (eixo y); frequência das observações das amostras referentes à correlação (b) e coeficiente angular (c).

A Figura 4.6 mostra os pontos sorteados (círculos amarelo) para a análise estatística e os valores de NDVI para ambas as imagens. Percebe-se que os valores de NDVI estimados pela MUX são em média 25% maiores que os valores estimados pelo TM-5. A análise do intervalo de confiança permite identificar que os valores de NDVI estimados pela MUX podem superestimar entre 10% e 40% esta variável quando comparados aos valores provenientes do TM/Landsat-5, com a maior probabilidade de superestimarem os dados em 25% a uma correlação de 85%.



a

Figura 4.6 - Pontos sorteados para análise estatística e valores de NDVI para a câmera MUX (esquerda) e TM-5 (direita).

5 CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

5.1 Conclusões

Esta tese apresentou dois métodos para avaliar a qualidade de sensores orbitais: (1) método de estimação da MTF baseado nos Polinômios de Zernike e (2) método de simulação da resolução espacial de sensores orbitais. Estes métodos são muito importantes na avaliação do desempenho de sistemas ópticos a bordo de satélites de novas missões espaciais. O Programa Espacial Brasileiro carece de um sistema de avaliação da qualidade de imagens, e os resultados deste trabalho podem contribuir para a construção de um sistema deste tipo.

O método de estimação de MTF proposto neste trabalho utiliza os Polinômios de Zernike para modelar a MTF do sistema óptico, usado para modelar diferentes deformações ópticas. O método de estimação da MTF foi utilizado para estimar a resolução espacial efetiva dos sensores TM do Landsat-5 e CCD do CBERS-2B, além de determinar os valores de MTF na frequência de Nyquist, figura de mérito utilizada para avaliar o desempenho de sensores ópticos. Os valores de EIFOV estimados para o TM-5 foram de 48,2 m na direção *Along-track* e 47,9 m na direção *Across-track*. Os resultados para o TM-5 ficaram muito próximos dos valores especificados no projeto. Para a câmera CCD, os valores estimados ficaram em torno de 35,8 m e 60,9 m nas direções *Along-track* e *Across-track*, respectivamente. Para a câmera HRC, os valores da resolução espacial efetiva ficaram em torno de 5,1 e 8,4 nas direções *Along-track* e *Across-track*, respectivamente. Os valores estimados da resolução espacial para as câmeras CCD e da HRC foram piores do que os especificados em projeto, devido ao efeito de borramento visível, principalmente, nas bordas e feições lineares nas imagens. Estes resultados são similares aos apresentados na literatura, o que evidencia a eficiência do método. A MTF e o EIFOV do sensor OLI do Landsat-8 também foram avaliados e os resultados mostraram que o desempenho do sistema, em termos de resposta espacial, está em conformidade com projeto do sensor.

O método de simulação proposto neste trabalho foi avaliado com dados reais de satélites. O método foi desenvolvido em quatro módulos de processamento: Correção Geométrica e Radiométrica, Função de Transferência de Modulação, Efeitos

Atmosféricos e Simulação da Resolução Espacial. Imagens do TM-5 e CCD/CBERS-2B foram simuladas a partir de imagens de melhor resolução espacial, como Quickbird e RapidEye, e comparadas às imagens originais. Os resultados encontrados pela avaliação por simulação corroboraram com a avaliação da MTF dos sistemas TM-5 e CCD. As imagens simuladas comprovaram a conformidade das características do TM-5 com as especificações do projeto, a despeito de sua vida longa em funcionamento. Por outro lado, o sensor CCD mostrou não conformidade com as especificações do projeto, o que era esperado devido ao borramento das feições e bordas nas imagens, como já observado. A simulação da resposta espacial da câmera MUX do satélite CBERS-4, ainda a ser lançado, avaliou o potencial das imagens deste sensor no mapeamento de cobertura do solo (vegetação arbórea, desmatamento, queimadas e corpos d'água). Os resultados da classificação e análise do índice NDVI da imagem simulada MUX foram comparados com os resultados obtidos com as imagens TM-5. A avaliação dos resultados sugere a superioridade das imagens MUX em relação ao sensor TM-5 no mapeamento de áreas de queimadas e desmatamento, devido à sua melhor resolução espacial.

5.2 Trabalhos Futuros

A eficiência das metodologias apresentadas e os resultados obtidos na avaliação do desempenho dos sensores TM, CCD, OLI e HRC motivam a continuidade dos trabalhos realizados até agora por meio do aprimoramento dos métodos propostos nesta tese. O estudo do uso dos Polinômios de Zernike para modelar degradações inseridas pelo sensor pode ser mais aprofundado. Pode-se, por exemplo, determinar a contribuição de cada coeficiente do Polinômio e assim, identificar os tipos de deformações modeladas. Conhecendo-se a degradação como, por exemplo, a desfocalização, é possível analisar a contribuição de cada degradação específica para MTF total e assim determinar formas de corrigi-la. No caso da simulação de imagens, novas aplicações podem ser desenvolvidas. Por exemplo, imagens podem ser simuladas para compor séries temporais utilizando a MTF real do sistema. Finalmente, os métodos de caracterização de sensores ópticos propostos neste trabalho poderão ser usados para avaliar sistematicamente o desempenho dos sistemas das missões espaciais brasileiras.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADLER-GOLDEN, S.M., M.W. MATTHEW, L.S. BERNSTEIN, R.Y. LEVINE, A. BERK, S.C. RICHTSMEIER, P.K. ACHARYA, G.P. ANDERSON, G. FELDE, J. GARDNER, M. HOKE, L.S. JEONG, B. PUKALL, A. RATKOWSKI AND H.K. BURKE. Atmospheric correction for short-wave spectral imagery based on MODTRAN4, In: ANNUAL JPL EARTH SCIENCE WORKSHOP, 8., 1999. **Summaries...** Jet Propulsion Laboratory, National Aeronautics and Space Administration, 1999. v. I.

AGÊNCIA ESPACIAL BRASILEIRA (AEB). **Programa Nacional de Atividades Espaciais PNAE – 2005- 2014**. Brasília, 2005. 118p. (disponível em: http://www.aeb.gov.br/wpcontent/uploads/2012/11/pnae_web.pdf)

AMARAL, F. T.; MONTEIRO, D. W. L. Alternative methodology for intraocular lenses characterization. In: EOS TOPICAL MEETING ON VISUAL AND PHYSIOLOGICAL OPTICS (EMVPO 2012), 6., 2012, Dublin. **Proceedings...** Dublin: EOS, 2012. v. 1. p. 57-58.

ANDREA, M. O.; MERLET, P. Emission of trace gases and aerosols from biomass burning. **Global Biogeochem. Cycles**, v. 4, n. 15, p. 955-966, 2001.

ANJOS, C. S. **Análise de características radiométricas e geométricas dos dados CCD/CBERS-2**. 2006. 119 p. (INPE-14792-TDI/1235). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2006. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/MTC-m13@80/2006/12.15.16.59>>. Acesso em: 26 dez. 2013.

ARNESEN, A. S.; FERREIRA, R. D.; LOPES, F. B.; CARVALHO, L. A. S.; NOVO, E. M. L. M.; FONSECA, L. M. G.; BOGGIONE, G. A. Simulação de uma imagem WFI/CBERS-3 para a classificação de massas d'água no Reservatório de Ibitinga – SP. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15. (SBSR), 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p. 2530-2537. DVD, Internet. ISBN 978-85-17-00056-0 (Internet), 978-85-17-00057-7 (DVD). Disponível em: <<http://urlib.net/3ERPFQTRW/3A5J3L2>>. Acesso em: 26 dez. 2013.

BANON, G. J. F.; FONSECA, L. M. G. **CBERS simulation from SPOT and its restoration**. CP 515, 12201-970 São José dos Campos, SP, Brazil: INPE, 1998. (INPE-/-). Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/banon/1998/05.18.09.47>>. Acesso em: 19 nov. 2013.

BANON, G. J. F. Simulação de imagens de baixa resolução. **Controle & Automação**, v.2, n. 3, p. 180-192, mar./ abr. 1990.

BANON, G. J. F.; SANTOS, A. C. **Digital filter design for sensor simulation: application to the Brazilian Remote Sensing Satellite**. São José dos campos: INPE, 1993. (INPE-5523-RPQ/665). Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/banon/1995/12.14.18.12>>. Acesso em: 19 nov. 2013.

BARALDI, A.; DURIEUX, L.; SIMONETTI, D.; CONCHEDDA, G.; HOLECZ, F.; BLONDA, P. Automatic spectral-rule-based preliminary classification of radiometrically calibrated SPOT-4/-5/IRS, AVHRR/MSG, AATSR, IKONOS/QuickBird/OrbView/GeoEye, and DMC/SPOT-1/-2 Imagery—Part I: system design and implementation. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 48, n. 3, Mar 2010.

BARKER, J. L. Landsat 4 science investigation summary. In: **NASA Conference Publication 2326**. Greenbelt, MD: NASA-GSFC, 1985. v. I and II.

BATISTA, I. R. P. Aberrações oculares associadas ao uso de lentes de contacto hidrofílicas mensais – estudo clínico. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Biomédica) - Instituto Superior Técnico Universidade Técnica de Lisboa, Lisboa, 2007.

BECKETT, K; BRIAN R; JOE S. MTF characterization and deconvolution of rapideye imagery. In: GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS), 2010, Honolulu, Hawaii, USA, **Proceedings...** IEEE International, 2010.

BENSEBAA, K.; BANON, G. J. F.; FONSECA L. M. G. On orbit spatial resolution estimation of CBERS-I CCD camera. . In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON IMAGE AND GRAPHICS, 3. (ICIG), 2004, Hong Kong. **Proceedings...** 2004. p. 576-579. Papel, On-line. doi:<[10.1109/ICIG.2004.109](https://doi.org/10.1109/ICIG.2004.109)>.

BENSEBAA, K.; BANON, G. J. F.; FONSECA, L. M. G. **Spatial resolution estimation of CBERS-1 and CBERS-2 CCD cameras**. São José dos Campos: INPE, 2011. (INPE ePrint sid.inpe.br/ePrint@80/2006/04.26.16.38). Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP8W/RJHH8P>>. Acesso em: 19 nov. 2013.

BINS, L. S.; ERTHAL, G. J.; FONSECA, L. M. G. Um método de classificação não supervisionada por regiões. In: SIMPOSIO BRASILEIRO DE COMPUTACAO GRAFICA E PROCESSAMENTO DE IMAGENS, 6., 1993, Recife. **Anais...** 1993. p. 65-68. (INPE-6369-PRE/2443).

BOGGIONE, G. A. **Restauração de imagens do satélite Landsat-7**. 2003. 160 p. (INPE-10462-TDI/929). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2003. Disponível em:<<http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2003/08.19.08.48>>. Acesso em: 19 nov. 2013.

BOGGIONE, G.A.; PIRES, E.G; SANTOS, P.A; FONSECA, L.M.G. Simulation of Panchromatic band by spectral combination of multispectral ETM+ bands. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT (ISRSE), 2003, Hawai. **Proceedings...** Hawai, 2003.

BOGGIONE, G. A.; PIRES, É. G.; SANTOS, P. A.; FONSECA, L. M. G. Simulação de uma banda pancromática para o sensor TM (Landsat 5), utilizando filtro combinado de restauração e interpolação. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12. (SBSR), 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 4005-4012. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8. (INPE-12759-PRE/8049). Disponível em:<<http://urlib.net/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.21.12.45>>. Acesso em: 19 nov. 2013.

BOGGIONE, G. A.; FONSECA, L. M. G. Restoration of Landsat-7 images. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENTAL (ISRSE), 30., 2003, Hawai, HA. **Proceedings...** 2003. Papel, On-line. (INPE-10574-PRE/6037).

BOGGIONE, G. A.; FONSECA, L. M. G.; CARVALHO, L. A. S.; PONZONI, F. J. Image restoration and its impact on radiometric measurements. In: GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS), 2010, Honolulu. **Proceedings...** IEEE International, 2010. p. 2218-2221. DVD; On-line. ISBN 978-1-4244-9564-1, 978-1-4244-9565-8. ISSN 2153-6996. doi: <[10.1109/IGARSS.2010.5654098](https://doi.org/10.1109/IGARSS.2010.5654098)>.

BRANNSTROM, C.; JEPSON, W.; FILIPPI, A.M.; REDO, D.; XU, Z.; GANESH, S. Land change in the Brazilian savanna (Cerrado), 1986-2002: comparative analysis and implications for land-use policy. **Land Use Policy**, v. 25, p. 579-595, 2008.

CARVALHO, L. A. S.; STRAUSS, C.; FONSECA, L. M. G. Determinação da resolução espacial efetiva da câmera HRC-CBERS-2B pelo método de espalhamento de borda. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14. (SBSR), 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 1975-1982. DVD, On-line. ISBN 978-85-17-00044-7. (INPE-15849-PRE/10459). Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.13.17.41>>. Acesso em: 20 nov. 2013.

CARVALHO, H. C. Alternativas de financiamento e parcerias internacionais estratégicas no setor espacial. In: BRASIL. Secretaria de Assuntos Estratégicos. **Desafios do programa espacial brasileiro**. Brasília, 2011. 276 p. Disponível em: <http://www.sae.gov.br/site/wpcontent/uploads/espacial_site.pdf>.

CERQUEIRA, J. D. M. **Ortorretificação digital de imagens de satélite de alta resolução espacial**. 2004. 80 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) – Centro de Tecnologia e Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2004.

CHANDER, G.; MARKHAM, B. Revised Landsat-5 TM radiometric calibration procedures and postcalibration dynamic ranges. **IEEE Trans. Geosc. And Remote Sens.**, v. 41, n. 11, p. 2674-2677, 2003.

CHEN, F.; NIU, Z.; SUN, G.; WANG, C.; TANG, J. Using low-spectral-resolution images to acquire simulated hyperspectral images. **International Journal of Remote Sensing**, v. 29, p. 2963-2980, 2008.

CHOI, T.; HELDER, D. L. Techniques for measuring the in-orbit modulation transfer function (MTF) for high spatial resolution imaging satellite. In: HIGH SPATIAL RESOLUTION COMMERCIAL IMAGERY WORKSHOP, Mar. 2001, Greenbelt, USA. **Proceedings...** Greenbelt, 2001.

DIAS, J; WEI, H. **Critical design review**, CBERS 3&4. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, 2010. (unpublished).

EFRON, B. **The jackknife, the bootstrap and other resampling plans**. Philadelphia: SIAM, 1982.

- ESPOSITO, E.S.C.; KRUG, T.; GREEN, R. **Simulation of the spectral bands of the CCD and wfi cameras of the CBERS satellite using AVIRIS data**. Pasadena, CA, USA: JPL Publication, 1999. Available at: <http://hdl.handle.net/2014/13693>.
- FEARNSIDE, P. M.; RIGHI, C. A.; GRAÇA, P. M. L. A.; KEIZER, E. W. H.; CERRI, C. C.; NOGUEIRA, E. M.; BARBOSA, R. I. Biomass and greenhouse gas emissions from land-use change in Brazil's Amazonian "arc of deforestation": The states of Mato Grosso and Rondônia. **Forest Ecology and Management**, v. 258, p. 1968-1978, 2009.
- FIETE, R.D. Image chain analysis for space imaging systems. **Journal of Imaging Science and Technology**, v. 51, n. 2, p. 103-109, 2007.
- FONSECA, L. M. G.; BANON, G. J. F. Duas técnicas de filtragem espacial para simular a resolução espacial ao nadir do satélite de Sensoriamento Remoto Brasileiro (SSR). In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE COMPUTAÇÃO GRÁFICA E PROCESSAMENTO DE IMAGENS, ÁGUAS DE LINDÓIA, SP, 2., 1989, Aguas de Lindoia, BR. **Anais...** 1989. p. 69-76. (INPE-6627-PRE/2663).
- FONSECA, L. M. G. **Restauração e interpolação de imagens do satélite Landsat por meio de técnicas de projeto de filtros FIR**. 1988. (INPE-6628-TAE/30). Dissertação de Mestrado - ITA, São José dos Campos, 1988. Disponível em:<http://www.bd.bibl.ita.br/tesesdigitais/lista_resumo.php?num_tese=000142917>. Acesso em: 19 nov. 2013.
- FONSECA, L. M. G.; PRASAD, G. S. S. D.; MASCARENHAS, N. D. A. Combined interpolation—restoration of Landsat images through FIR filter design techniques. **International Journal of Remote Sensing**, v. 14, n. 13, p. 2547-2561, 1993.
- FONSECA, L. M. G.; PONZONI, F.; CARTAXO, R. **Radiometric quality assessment of CBERS-2**. São José dos Campos: INPE, 2004. 55p. (APPL-06-2004, 1.1).
- FONSECA, L.M.G.; BOGGIONE, G.A.; PIZARRO, M. A.; CARNEIRO, M.V. **RALCAM3 spatial resolution performance assessment**. (Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2009) Comunicação pessoal.
- FRANCIS, I; MAVER, L.; SCHOTT, J.R. Comparison of physically and computer generated imagery. **Proceedings SPIE**, v. 1904, p. 20-23, 1993.
- GUANTER, L; SEGL, K; KAUFMANN, H. Simulation of optical remote-sensing scenes with application to the enmap hyperspectral mission. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 47, n. 7, p. 2340-2351, 2009. DOI: [10.1109/TGRS.2008.2011616](https://doi.org/10.1109/TGRS.2008.2011616).
- GROUP ON EARTH OBSERVATIONS / COMMITTEE ON EARTH OBSERVATION SATELLITES (GEO/CEOS). **A quality assurance framework for earth observation**. 2008, ver. 2.0. [Online]. Available: <http://calvalportal.ceos.org/CalValPortal/showQA4EO.do?section=qa4eoIntro>
- GONZALEZ, R. C.; WOODS, R. E. **Processamento digital de imagens**. 3. ed. São Paulo, SP: Pearson Prentice Hall, 2010. 624 ISBN 978-85-7605-401-6.

GOUVÊA, É. J. C. **Calibração radiométrica relativa da câmara CCD dos satélites CBERS-2 e CBERS-2B**. 2008. 103 p. (INPE-15270-TDI/1347). Dissertação (Mestrado em Computação Aplicada) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2008/03.17.18.30>>. Acesso em: 26 dez. 2013.

GOUVÊA, É. J. C.; FONSECA, L. M. G. Avaliação da qualidade radiométrica das imagens do satélite CBERS-2B. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14. (SBSR), 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 2041-2048. DVD, On-line. ISBN 978-85-17-00044-7. (INPE-15891-PRE/10501). Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.22.53>>. Acesso em: 19 nov. 2013.

GUIJUN, Y.; QINHUO, L. ; ZHURONG, X. ; WENJIANG, H ; XIAN, L. Simulation system development of infrared remote sensing images: HJ-1B case. In: GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS), 2009, Cape Town. **Proceedings...** Cape Town, South Africa: IEEE International, 2009. v. 2.

HALL, F; G.; STREBEL, D. E.; NICKESON, J. E.; GOETZ, S. J. Radiometric rectification: toward a common radiometric response among multitemporal, multisensor images. **Remote Sensing of Environment**, v. 35, p. 11-27, 1991.

HEARN, D. R. **EO-1 advanced land imager modulation transfer functions**. LEXINGTON, MASSACHUSETTS: MIT Lincoln Laboratory Technical, 2000. Report 1061.

HEARN, D. R. **Earth observing-1 advanced land imager**: imaging performance on-orbit. Project report F19628-00-C-0002, NASA under US Air Force contract, 2002.

HELDER, D.; CHOI, T.; RANGASWAMY, M. In-flight characterization of the spatial quality of Remote Sensing imaging systems using point spread function estimation **International Society for Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 2, p 149-170, Dec 2004.

HELDER, D.; CHOI, J.; ANDERSON, C. On-orbit modulation transfer function (MTF) measurements for IKONOS and QuickBird. **CIVIL COMMERCIAL IMAGERY EVALUATION WORKSHOP**, 2006, Laurel, MD, USA: **Proceedings...** Laurel, Maryland: Joint Agency Commercial Imagery Evaluation (JACIE), 2006.

HU, C.; MULLER-KARGER, F. E.; ANDREFOUET, S.; CARDER, K. L. Atmospheric correction and cross-calibration of Landsat-7/ETM+ imagery over aquatic environments: a multiplatform approach using SeaWiFS/MODIS. **Remote Sensing of Environment**, v.78, n.1-2, p.99-107, 2001.

JENSEN, J.R. **Remote sensing of the environment**: an earth resource perspective. Upper Saddle River: Prentice-Hall, 2007. 592 p.

ICHOKU, C; KARNIELI, A. A review of mixture modeling techniques for sub-pixel land cover estimation. **Remote Sensing Reviews**, v. 13, n. 3-4, 161-186, 1996.

JUSTICE, C. O.; MARKHAM, B. L.; TOWNSHEND, J. R. G.; KENNARD, R. L. Spatial degradation of satellite data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 10, n.9, p. 1539-1561, 1989.

KAUFMAN, J. B.; CUMMINGS, D. L.; WARD, D. E.; BABBITT, R. Fire in the Brazilian Amazon: biomass, nutrient pools, and losses in slashed primary forests. **Oecologia**, v. 104, p. 397-408, 1995.

KIEFFER, H. H.; ANDERSON, J. M. Use of the moon for spacecraft calibration over 350 to 2500 nm. **Proc. SPIE**, v. 3498, p. 325-335, 1998.

KRAMER, H. J. **Observation of the Earth and its environment: survey of missions and sensors**. Springer, 2002.

KUBIK, P.; BRETON, E.; MEYGRET, A.; CABRIERES, B.; HAZANE, P.; LEGER, D. SPOT4 HRVIR first in-flight image quality results. **Proceedings of SPIE**, v. 3498, n. 1, Dec 21, 1998. International Society for Optics and Photonics.

LATORRE, M.; ABÍLIO, O.; JÚNIOR, D.C.; PAULA, A.; CARVALHO, F.D.; SHIMABUKURO, Y.E. Correção atmosférica: conceitos e fundamentos. **Espaço & Geografia**, v.5, n. 1, p. 153-178, 2002.

LEGER, D., F. VIALLEFONT, E. HILLAIRET AND A. MEYGRET. In-flight refocusing and MTF assessment of Spot5 HRG and HRS cameras. In: **SENSORS, SYSTEMS, AND NEXT-GENERATION SATELLITES**, 6., 2003, Crete. **Proceedings...** Crete: SPIE, 2003. v. 4881, p. 224-231.

LI, X. Y.; GU, X. F.; YU, T. In-flight MTF measurement and compensation for the CBERS-2 WFI. **International Journal of Remote Sensing**, v. 30, n. 4, p. 829-839, 2009.

LUGNANI, J.B. **Introdução à fototriangulação**. UFPR. Curitiba. 1987. 134p.

LUXEN, M.; FORSTNER, W. Characterizing image quality: Blind estimation of the point spread function from a single image. **International Archives of Photogrammetry Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, v. 34, n. 3/A, p. 205-210, 2002.

MAEDA, E.E.; ARCOVERDE, G.F. B.; FORMAGGIO, A.R.; SHIMABUKURO, Y.E. Evaluation of the potentiality of WFI/CBERS-4 Sensor data for land use and land cover classification. **Revista Brasileira de Cartografia**, v. 1, n. 60, p. 79-87, 2008.

Mahajan, V. N. Zernike polynomials and wavefront fitting. In: MALACARA, D. (ed.). **Optical shop testing**. Hoboken: John Wiley & Sons, 2007. P. 498-545.

MARKHAM, B.L. The Landsat sensor's spatial response. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 23, n. 6, p. 864-875, Nov. 1985.

MAVER, L.; SCARFF, L. Multispectral image simulation. **Proceedings SPIE**, v.1904, p. 144-160, 1993.

MASCARENHAS, N. D. A.; BANON, G. J. F.; FONSECA, L. M. G. Simulation of a panchromatic sand by spectral linear combination of multispectral bands. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON REMOTE SENSING OF ENVIRONMENT, 24., 1991, Rio de Janeiro, BR. **Proceedings...** 1991. (INPE-5293-PRE/1698).

MASSOCA, P. E. S.; YANAI, A. M.; GRAÇA, P. M. L. A.; FEARNSSIDE, P. M.; MITISHITA, E.; SARAIVA, C. Modelos matemáticos para fins de monorestituição de imagens de alta resolução IKONOS 2 – GEO. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOMÁTICA, 2002, Presidente Prudente – SP. **Anais...** Presidente Prudente: UNESP, 2002.

MENDONÇA JÚNIOR, M. G. Reconstrução de edificações para geração de ortoimagens verdadeiras com emprego de dados LIDAR. 2010. Tese (Doutorado em Ciências Geodésicas) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

Modelos das aberrações representadas pelos 15 primeiros polinômios de Zernike sem o termo constante. 2013. Disponível em:
http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Zernike_polynomials3.pdf (2013).
Acesso em: 24 Feb. 2014. Uma figura adaptada.

MOODY, A.; GOPAL, S.; STRAHLER, A.H. Artificial neural network response to mixed pixels in coarse-resolution satellite data. **Remote Sensing of Environment**, v. 58, p. 329-343, 1996.

NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION (NASA). GODDARD SPACE FLIGHT CENTER (GSFC). **Landsat 7 system specification**, Greenbelt, MD, Nov 1996. Revision, 430-L-000-2.

NELDER, J. A.; MEAD, R. A simplex method for function minimization. **Computer Journal**, v. 7, p. 308–313, 1965.

NELSON, M.D.; MCROBERTS, R.E.; HOLDEN, G.R; BAUER, M.E. Effects of satellite image spatial aggregation and resolution on estimates of forest land area. **International Journal of Remote Sensing**, v. 30, n. 8, p. 1913-1940, 2009.

NELSON, N. R.; BARRY, P. S. Measurement of hyperion MTF from on-orbit scenes. In: GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS'01) 2001, Sydney, Australia. **Proceedings...** IEEE 2001 International, 2001. v. 7.

NIYOGI, D.; MAHMOOD, R.; ADEGOKE, J.O. Land-use/land-cover change and its impacts on weather and climate. **Boundary-Layer Meteorology**, v. 133, p. 297–298, 2009.

OKAMOTO, A. O; Geometric characteristics of alternative models for satellite imagery. In: ASPRS ANUAL CONFERENCE, 1999, Portland, Oregon. **Proceedings...** Portland: ASPRS, 1999.

- PONZONI, F. J.; GALVÃO, L. S.; EIPHANIO, J. C. N. Spatial resolution influence on the identification of land cover classes in the Amazon environment. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 74, n. 4, p. 717-725, 2002.
- PONZONI, F.J.; REZENDE, A.C. Influências da resolução espacial de imagens orbitais na identificação de elementos da paisagem em Altamira-PA. **Revista Árvore**, v. 26, n. 4., p. 403-410, 2002.
- PONZONI, F. J.; ZULLO JR, Z.; LAMPARELLI, R. A. C. Calibração absoluta de sensores orbitais conceituação, principais procedimentos e aplicação. São José dos Campos, SP: Parêntese, 2007. 72 ISBN 978-85-60507-01-6.
- PYNE, S. J.; ANDREWS, P. L.; LAVEN, R. D. **Introduction to wildland fire**. 2. ed, New York: Wiley, 1996, 769p.
- RANGASWAMY, M. K. **Two dimensional on-orbit modulation transfer function analysis using convex mirror array**. Master (Science Thesis) - South Dakota State University, 2003.
- RAUCHMILLER JR, R. F.; SCHOWENGERDT, R. A. Measurement of the Landsat Thematic Mapper modulation transfer function using an array of point sources. **Optical Engineering**, v. 27, n. 4, p. 274334-274334, 1988.
- REULKE, R.; BECKER, S.; HAALA, N.; Tempelmann, U. Determination and improvement of spatial resolution of the CCD-line-scanner system ADS40. **Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 60, p. 81-90, 2006.
- RIBEIRO, B. M. G. **Avaliação das imagens WorldView-II para o mapeamento da cobertura do solo urbano utilizando o sistema InterIMAGE**. 2010. 177 p. (sid.inpe.br/mtc-m19@80/2010/08.03.12.52.20-TDI). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2010. Disponível em: <<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3826JHA>>. Acesso em: 19 nov. 2013.
- RIBEIRO, B. M. G.; BOGGIONE, G. A.; FONSECA, L. M. G. Simulação das bandas espectrais do sensor QuickBird-2 a partir do sensor WorldView-2. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16. (SBSR), 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2013. p. 7981-7988. DVD, Internet. ISBN 978-85-17-00066-9 (Internet), 978-85-17-00065-2 (DVD). Disponível em:<<http://urlib.net/3ERPFQTRW34M/3E7GAA7>>. Acesso em: 26 dez. 2013.
- RICHARDS, J.F. Land transformation. In: TURNER II, B.L. et al. (eds.). **The earth as transformed by human action**. New York: Cambridge Univ. Press, 1990. p. 163–178.
- RICHARDS, J. A. **Remote sensing digital image analysis: an introduction**. 5. ed. Berlin, Germany: Springer, 2013. 494 ISBN 978-3-642-30061-5.
- ROBERTS, D.A.; BATISTA, G.T.; PEREIRA, J.L.G.; WALLER, E.K.; NELSON, B.W. Change identification using multitemporal spectral mixture analysis: applications in eastern Amazonia. In: LUNETTA R. S.; ELVIDGE C. D (Orgs.). **Remote sensing**

change detection: environmental monitoring methods and applications. Michigan: Ann Arbor Press, 1998. v.1, cap. 9, p. 137 – 161.

RÖDER, A.; KUEMMERLE, T.; HILL, J. Extension of retrospective datasets using multiple sensors. An approach to radiometric intercalibration of Landsat TM and MSS data. **Remote Sensing of Environment**, v.95, n.2, p.195-210, 2005.

SANTOS, A. C. **Simulação de imagens de sensores com largo campo de visada a partir de imagens de sensores com menor campo de visada-** o caso SSR/TM. 1992. 142 p. (INPE-5378-TDI/473). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 1992. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/iris@1912/2005/07.19.22.58.34>>. Acesso em: 10 out. 2010.

SANTOS JUNIOR, D.; COSTA, D. F.; PAZELLI, H.; SUPINO, L. F.; SCADUTO, L. C. N.; MODUGNO, R. G.; SCADUTO, R. H.; STEFANI, M. A. **Especificação de teste função de transferência de modulação (MTF) e uniformidade de foco no CCD - OMB câmera MUX CBERS 3&4.** São Carlos: OPTO, 2010. (RBN-7.3.6-TST-34).

SAUNIER, S.; SANTER, R.; GORYL, P.; GRUEN, A.; WOLF, K.; BOUVET, M.; VIALLEFONT, F. The contribution of the European Space Agency to the ALOS PRISM / commissioning phase. In: IEEE INTERNATIONAL GEOSCIENCE AND REMOTE SENSING SYMPOSIUM (IGARSS '05), 2005, Seoul, Korea. **Proceedings...** IEEE, 2005. p. 208–211.

SCADUTO, L. C. N. **Desenvolvimento e avaliação do desempenho de sistema óptico aplicado a sensoriamento remoto orbital.** 2008. 243 f. Dissertação (Mestrado em Física Aplicada) – Universidade de São Paulo, Instituto de Física de São Carlos, São Carlos, 2008.

SCHOWENGERDT, R. A. **Remote sensing:** models and methods for image processing. Academic Press, 2006.

SCHOTT, J. R. **Remote sensing:** the image chain approach. 2. ed. New York, NY: Oxford University, 2007. 666305169.

SCHOTT, J. R.; RAQUENO, R. V.; RAQUENO, N. G.; BROWN, S. D. A Synthetic sensor/image simulation tool to support the Landsat Data Continuity Mission (LDCM). In: ASPRS 2010 ANNUAL CONFERENCE, 2010, San Diego. **Proceedings...** San Diego: ASPRS, 2010.

SHIMABUKURO, Y.E.; SMITH, J.A. The leastsquares mixing models to generate fraction images derived from remote sensing multispectral data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 29, p. 16-20, 1991.

SCHUELER, C. F. Image quality vs. sensitivity: fundamental sensor system engineering. **Proc. of SPIE**, v. 7087, 2008. doi:10.1117/12.800922.

SILVA, M.E.S.; FRANCHITO, S.H.; RAO, V.B. Effects of Amazonian deforestation on climate: a numerical experiment with a coupled biosphere-atmosphere model with soil hydrology. **Theoretical and Applied Climatology**, v. 85, p. 1-18, 2006.

SILVA, A. J. F. M. **Geometria de imagens**: do projeto do satélite à geração dos produtos. 2007. Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2007. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2007/08.14.18.19.44>>. Acesso em: 12 maio 2011.

Sistema de formação de imagens (a) sem e (b) com distorções ópticas. 2012. Disponível em: <http://www.llg-ev.de/en/departments/optics-short-wavelengths/beam-propagation/wavefront-detection.html>. Acesso em: 24 Feb. 2014. Uma figura adaptada.

SLATER, P. N. Use of MTF in the specification and first-order design of electro-optical and photographic imaging and radiometric systems. **Journal of Modern Optics**, v. 22, n.4, p. 277-290, 1975.

STOREY, J. C. Landsat 7 on-orbit modulation transfer function estimation. In: SENSORS, SYSTEMS, AND NEXT GENERATION SATELLITES 5., 17-20 Sept. 2001, Toulouse, France. **Proceedings...** Bellingham, WA, USA: SPIE, 2001. p. 50-61.

TEIXEIRA, C.G. **Validação do modelo linear de mistura espectral em imagens ASTER/TERRA a partir de dados Ikonos**. 2004. 127 p. (INPE-13183-TDI/1029). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2004. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/jeferson/2005/02.15.15.35>>. Acesso em: 20 fev. 2014.

THOME, K. J. Absolute radiometric calibration of Landsat-7 ETM+ using the reflectance-based method. **Remote Sensing of Environment**, v. 78, n.1-2, p.27-38, 2001.

TYSON, R. **Principles of adaptative optics**. 3. ed. [S.l.]: CRC Press, 2010.

VALERIANO, M. M. Modelo digital de variáveis morfométricas com dados SRTM para o território nacional: o projeto TOPODATA. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12. (SBSR), 2005, Goiânia. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2005. p. 3595-3602. CD-ROM, On-line. ISBN 85-17-00018-8. (INPE-12739-PRE/8029). Disponível em: <<http://marte/ltid.inpe.br/sbsr/2004/10.29.11.41>>. Acesso em: 20 fev. 2014.

VALERIANO, M. M.; ROSSETTI, D. F. Topodata: Brazilian full coverage refinement of SRTM data. **Applied Geography** (Sevenoaks), v. 32, p. 300-309, 2011.

VERMOTE, E. F; TANRE, D.; DEUZE, J. L.; HERMAN, M.; MORCRETTE J. J. Second Simulation of the satellite signal in the solar spectrum, 6S: An overview. **IEEE Trans. Geosc. And Remote Sens.**, v. 35, n. 3, p. 675-686, 1997.

VIALLEFONT-ROBINET, F. Removal of aliasing effect on MTF measurement using bi-resolution images. In: MEYNART, R.; NEECK, S. P.; SHIMODA, H.; LURIE, J. B.; ATEN, M. L. (eds.). **Sensors, systems, and next-generation satellites VII**. Barcelona: SPIE, 2004. v. 5234, p. 468 - 479.

VIALLEFONT-ROBINET, F.; LÉGER, D. Improvement of the edge method for on-orbit MTF measurement. **Optics Express**, v. 18, n. 4, p. 3531-3545, 2010.

WANG, Z.; BOVIK, A.; SHEIKH, H. R. Structural similarity based image quality assessment. In: WU, H. R.; RAO, K. R. (eds.). **Digital video image quality and perceptual coding**. Vancouver, 2004. Marcel Dekker series in Signal Processing and Communications.

WANG, Z.; BOVIK, A. **Modern image quality assessment**. San Rafael, CA, USA: Morgan & Claypool, 2006.

WYANT, J. C.; CREATH, K. Basic wavefront aberration theory for optical metrology. **Applied optics and optical engineering**, v. 11, n. s 29, 1992.

YANG, G.; LIU, Q.; LIU, Q.; HUANG, W.; WANG, J. Simulation of high-resolution mid-infrared (3–5 mm) images using an atmosphere radiative transfer analytic model. **International Journal of Remote Sensing**, v. 30, n. 22, p. 6003–6022, 2009.

YONG, Z.; QIAOYAN, F.; JIANYAN, X.; WENYU, W.; FONSECA, L. M. G.; D'ALGE, J.; ERTHAL, G. J.; MATOS, J. D.; MARIA, S.; SELINGARDI, M. **Procedures for CBERS-2B radiometric and geometric quality assessment and validation**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2006. 26p. (APPL-06-2006, 1.1).

ZETIAN, Y.; XINGFA, G.; XIANLIN, L.; ZHIMIN, W. Analysis of spectral characteristics among different sensors by use of simulated RS images. **Geo-spatial Information Science**, v. 3, n. 2, p. 35-40, 2000.

APÊNDICE A

Tabela A.1 - Valores estimados no experimento com bordas ideais – *Along-track*

Referência Along Track	Estimado Along Track	Referência Along Track	Estimado Along Track	Referência Along Track	Estimado Along Track
0,79406	0,77751	0,737019	0,730039	0,802966	0,794646
0,788304	0,784306	0,845233	0,848384	0,737356	0,739824
0,793588	0,787859	0,780053	0,78614	0,785757	0,781921
0,780985	0,794979	0,767207	0,772177	0,833884	0,841064
0,74481	0,761305	0,711896	0,703131	0,792742	0,793416
0,709665	0,696622	0,743762	0,746805	0,821617	0,82093
0,819149	0,811328	0,817283	0,817084	0,728553	0,713619
0,66231	0,647585	0,809824	0,809496	0,731566	0,723066
0,646954	0,645394	0,751127	0,768194	0,709249	0,70824
0,680653	0,666843	0,750744	0,750696	0,694306	0,695779
0,735489	0,738719	0,777571	0,775122	0,826515	0,821748
0,61398	0,627951	0,870393	0,868944	0,821762	0,819049
0,696416	0,708753	0,807437	0,806939	0,739808	0,746344
0,70413	0,74205	0,703487	0,69911	0,77565	0,725535
0,796342	0,799691	0,777461	0,775038	0,827598	0,846182
0,70792	0,705823	0,739731	0,726662	0,786949	0,782126
0,836695	0,840772	0,768448	0,768183	0,612725	0,599809
0,701777	0,648556	0,737205	0,721847	0,76034	0,762174
0,695989	0,695302	0,697585	0,705072	0,646477	0,643695
0,702292	0,713745	0,739047	0,747315	0,854397	0,856759
0,807851	0,8098	0,760338	0,764771	0,722566	0,753136
0,814871	0,815585	0,691885	0,6787	0,859632	0,858347
0,704743	0,718011	0,849683	0,851326	0,855135	0,855409
0,766626	0,763707	0,754752	0,751793	0,770036	0,766111
0,752342	0,762108	0,640167	0,651537	0,748484	0,760116
0,834216	0,841369	0,85456	0,854769	0,626221	0,640776
0,833634	0,834519	0,838662	0,840792	0,801809	0,806005
0,65961	0,650846	0,718456	0,738458	0,791214	0,781007
0,79719	0,805718	0,601647	0,581502	0,770774	0,768585
0,654525	0,648803	0,731363	0,753682	0,820742	0,826015
0,714456	0,728081	0,714826	0,716923		

Tabela A.2 - Valores estimados no experimento com bordas ideais – *Across-track*

Referência Across Track	Estimado Across Track	Referência Across Track	Estimado Across Track	Referência Across Track	Estimado Across Track
0,910342	0,901039	0,894085	0,893267	0,911624	0,910174
0,911039	0,90902	0,932621	0,930589	0,896808	0,89486
0,90883	0,905235	0,906759	0,912502	0,906422	0,914692
0,907755	0,910786	0,902115	0,900385	0,925872	0,926759
0,894496	0,894521	0,88805	0,890501	0,916586	0,912563
0,876325	0,880549	0,900283	0,897327	0,924986	0,924661
0,92284	0,91859	0,920458	0,919322	0,888523	0,891992
0,846211	0,86466	0,920319	0,923504	0,885888	0,891386
0,841753	0,866777	0,905431	0,90695	0,882698	0,888907
0,858884	0,860536	0,901489	0,894874	0,88549	0,88289
0,887897	0,887131	0,904816	0,903302	0,923661	0,925337
0,820296	0,818033	0,939217	0,939952	0,922403	0,925319
0,888185	0,882255	0,917682	0,917391	0,896889	0,894382
0,879973	0,896119	0,867462	0,867669	0,906723	0,892039
0,911328	0,915908	0,909177	0,905055	0,923338	0,931925
0,875804	0,894575	0,894856	0,879812	0,914052	0,914261
0,930757	0,928572	0,899003	0,898648	0,817013	0,854171
0,868593	0,861738	0,894527	0,891341	0,906549	0,905484
0,866577	0,87967	0,886272	0,874908	0,836731	0,84468
0,878453	0,872735	0,896733	0,891766	0,934739	0,933385
0,921879	0,92308	0,906935	0,898219	0,879397	0,902313
0,918336	0,917619	0,865235	0,867531	0,937669	0,936039
0,892965	0,886299	0,93406	0,934593	0,93509	0,93637
0,902898	0,901619	0,899315	0,892309	0,901454	0,909728
0,897216	0,89451	0,852409	0,844178	0,903316	0,895503
0,930472	0,927556	0,936089	0,93585	0,841968	0,836334
0,929265	0,929766	0,931749	0,932266	0,913955	0,913011
0,855034	0,873044	0,89906	0,883878	0,915938	0,902161
0,921466	0,913058	0,814376	0,817756	0,90143	0,906938
0,855636	0,856462	0,903363	0,89142	0,927395	0,921572
0,893912	0,88331	0,894405	0,894031		

APÊNDICE B

Tabela B.1

TABELA COMPLETA DOS TESTES REALIZADOS COM TM/Landsat-5

Este Apêndice contém a Tabela B1 que apresenta o teste completo de estimação da MTF do sensor TM do satélite Landsat-5. Os testes são separados em função da Frequência de *Nyquist*, Metade da Frequência de *Nyquist*, EIFOV e EIFOV compensado. Dentro de cada uma destas quatro divisões os testes são agrupados por bandas. Também são apresentados os coeficientes de variação das MTFs estimados em *Nyquist* e na Metade de *Nyquist*, e a média dos valores de EIFOV em metros.

TM/Landsat-5																
	Nyquist								Nyquist/2							
	Along-track				Across-track				Along-track				Across-track			
	B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B4
Teste 1	0,25	0,24	0,29	0,24	0,25	0,23	0,27	0,23	0,74	0,73	0,81	0,88	0,66	0,75	0,79	0,84
Teste 1A	0,27	0,27	0,28	0,25	0,26	0,26	0,28	0,24	0,85	0,80	0,80	0,93	0,85	0,81	0,82	0,88
Teste 2	0,26	0,26	0,26	-	0,23	0,24	0,23	-	0,78	0,76	0,83	-	0,77	0,77	0,72	-
Teste 4	0,27	0,26	0,27	0,27	0,26	0,26	0,27	0,25	0,85	0,89	0,77	0,92	0,80	0,75	0,85	0,89
Teste 5	0,26	0,26	0,29	0,26	0,24	0,24	0,25	0,25	0,76	0,80	0,86	0,92	0,75	0,77	0,75	0,85
Teste 6	0,27	0,28	0,29	0,26	0,25	0,27	0,27	0,25	0,85	0,83	0,85	0,85	0,79	0,80	0,85	0,93
Teste 6A	0,25	0,27	0,24	0,23	0,24	0,26	0,24	0,23	0,72	0,81	0,78	0,85	0,85	0,81	0,89	0,88
Teste 7	0,27	0,26	0,30	-	0,27	0,25	0,28	-	0,83	0,93	0,84	-	0,84	0,82	0,88	-
Teste 7A	0,29	0,28	0,29	-	0,24	0,28	0,27	-	0,87	0,85	0,88	-	0,74	0,79	0,79	-
Teste 9	0,29	0,28	0,30	-	0,27	0,27	0,28	-	0,85	0,87	0,86	-	0,76	0,71	0,68	-
Teste 10	0,27	0,25	0,24	-	0,25	0,24	0,23	-	0,64	0,73	0,73	-	0,81	0,84	0,84	-
Teste 11	0,27	0,25	0,24	0,23	0,25	0,24	0,23	0,22	0,68	0,68	0,74	0,73	0,81	0,70	0,81	0,85
Teste 11A	0,26	0,26	0,24	0,23	0,25	0,25	0,23	0,23	0,74	0,73	0,67	0,80	0,76	0,78	0,79	0,92
	Coefficiente de Variação															
	4,76%	4,59%	8,33%	6,07%	4,60%	5,80%	7,89%	4,59%	9,23%	8,67%	7,48%	7,76%	6,43%	4,91%	7,27%	3,47%

TM/Landsat-5																
	EIFOV (m)								EIFOV Compensado (m)							
	Along-track				Across-track				Along-track				Across-track			
	B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B4	B1	B2	B3	B4
Teste 1	50,85	51,72	44,78	51,72	50,00	53,57	47,62	53,57	50,91	51,78	44,85	51,78	50,06	53,63	47,68	53,63
Teste 1A	47,62	47,62	45,45	50,00	48,39	49,18	45,45	51,72	47,68	47,68	45,52	50,06	48,45	49,24	45,52	51,78
Teste 2	49,18	48,39	49,18	-	53,57	51,72	53,57	-	49,24	48,45	49,24	-	53,63	51,78	53,63	-
Teste 4	47,62	48,39	47,62	46,88	48,39	48,39	47,62	50,00	47,68	48,45	47,68	46,94	48,45	48,45	47,68	50,06
Teste 5	48,39	49,18	44,78	48,39	51,72	51,72	50,00	50,00	48,45	49,24	44,85	48,45	51,78	51,78	50,06	50,06
Teste 6	47,62	45,45	44,12	48,39	50,00	46,88	46,88	50,00	47,68	45,52	44,19	48,45	50,06	46,94	46,94	50,06
Teste 6A	50,00	46,88	51,72	53,57	51,72	48,39	51,72	53,57	50,06	46,94	51,78	53,63	51,78	48,45	51,78	53,63
Teste 7	47,62	48,39	43,48	-	46,88	50,00	45,45	-	47,68	48,45	43,55	-	46,94	50,06	45,52	-
Teste 7A	44,12	45,45	44,78	-	51,72	45,45	46,88	-	44,19	45,52	44,85	-	51,78	45,52	46,94	-
Teste 9	44,12	45,45	42,86	-	46,88	46,88	45,45	-	44,19	45,52	42,93	-	46,94	46,94	45,52	-
Teste 10	46,88	50,00	51,72	-	50,00	51,72	53,57	-	46,94	50,06	51,78	-	50,06	51,78	53,63	-
Teste 11	46,88	50,00	51,72	53,57	50,85	52,63	53,57	55,56	46,94	50,06	51,78	53,63	50,91	52,69	53,63	55,61
Teste 11A	48,39	48,39	51,72	53,57	50,00	50,00	53,57	53,57	48,45	48,45	51,78	53,63	50,06	50,06	53,63	53,63
	Média (m)															
	47,64	48,10	47,23	50,76	50,01	49,73	49,34	52,25	47,70	48,17	47,29	50,82	50,07	49,80	49,40	52,31

Tabela B.2

TABELA COMPLETA DOS TESTES REALIZADOS COM CCD/CBERS-2B

Este Apêndice contém a Tabela B2 que apresenta o teste completo de estimação da MTF do sensor CCD do satélite CBERS-2B. Os testes são separados em função da Frequência de *Nyquist*, Metade da Frequência de *Nyquist*, EIFOV e EIFOV compensado. Dentro de cada uma destas quatro divisões os testes são agrupados por bandas. Também são apresentados os coeficientes de variação das MTFs estimados em *Nyquist* e na Metade de *Nyquist*, e a média dos valores de EIFOV em metros.

CCD/CBERS-2B												
	Nyquist						Nyquist/2					
	Along-track			Across-track			Along-track			Across-track		
	B2	B3	B4	B2	B3	B4	B2	B3	B4	B2	B3	B4
Teste 2A	0,25	0,26	0,21	0,11	0,13	0,12	0,54	0,76	0,65	0,65	0,73	0,52
Teste 3	0,25	0,27	0,23	0,13	0,14	0,12	0,55	0,46	0,66	0,52	0,51	0,40
Teste 6	0,24	0,25	0,19	0,11	0,15	0,12	0,59	0,50	0,80	0,44	0,40	0,49
Teste 6A	0,21	0,25	0,21	0,09	0,15	0,11	0,57	0,37	0,61	0,51	0,30	0,40
Teste 7	0,25	0,28	-	0,15	0,14	-	0,55	0,64	-	0,59	0,49	-
Teste 7A	0,24	0,26	-	0,13	0,13	-	0,53	0,58	-	0,49	0,44	-
Teste 9	0,24	0,28	-	0,10	0,14	-	0,53	0,42	-	0,48	0,38	-
Teste 10	0,24	0,24	-	0,13	0,15	-	0,57	0,26	-	0,35	0,38	-
Teste 11	0,27	0,23	0,24	0,10	0,14	0,12	0,58	0,51	0,53	0,27	0,42	0,29
Teste 11A	0,25	0,31	0,22	0,12	0,13	0,12	0,57	0,66	0,66	0,36	0,59	0,45
	Coefficiente de Variação											
	6,07%	8,48%	7,55%	15,49%	5,74%	4,79%	3,60%	27,37%	12,34%	23,55%	25,58%	17,35%

CCD/CBERS-2B												
	EIFOV (m)						EIFOV Compensado (m)					
	Along-track			Across-track			Along-track			Across-track		
	B2	B3	B4	B2	B3	B4	B2	B3	B4	B2	B3	B4
Teste 2A	34,48	33,33	40,00	66,67	58,82	62,50	34,57	33,43	40,08	66,71	58,88	62,55
Teste 3	33,90	32,26	37,04	58,82	55,56	62,50	33,99	32,35	37,12	58,88	55,61	62,55
Teste 6	35,71	34,48	43,48	66,67	52,63	62,50	35,80	34,57	43,55	66,71	52,69	62,55
Teste 6A	40,00	34,48	40,00	76,92	52,63	66,67	40,08	34,57	40,08	76,96	52,69	66,71
Teste 7	33,90	31,25	-	52,63	55,56	-	33,99	31,35	-	52,69	55,61	-
Teste 7A	35,09	33,33	-	58,82	58,82	-	35,18	33,43	-	58,88	58,88	-
Teste 9	35,09	31,25	-	71,43	55,56	-	35,18	31,35	-	71,47	55,61	-
Teste 10	35,71	35,71	-	58,82	52,63	-	35,80	35,80	-	58,88	52,69	-
Teste 11	32,26	36,08	35,71	71,43	55,56	59,16	32,35	36,16	35,80	71,47	55,61	59,22
Teste 11A	34,48	28,20	38,46	62,50	58,82	62,50	34,57	28,31	38,54	62,55	58,88	62,55
	Média (m)											
	35,06	33,04	39,12	64,47	55,66	62,64	35,15	33,13	39,20	64,52	55,71	62,69

Tabela B.3

TABELA COMPLETA DOS TESTES REALIZADOS COM HRC/CBERS-2B

Este Apêndice contém a Tabela B3 que apresenta o teste completo de estimação da MTF do sensor HRC do satélite CBERS-2B. Os testes são separados em função da Frequência de *Nyquist*, Metade da Frequência de *Nyquist*, EIFOV e EIFOV compensado. Dentro de cada uma destas quatro divisões, os testes são agrupados por bandas. Também são apresentados os coeficientes de variação das MTFs estimados em *Nyquist* e na Metade de *Nyquist*, e a média dos valores de EIFOV em metros.

HRC/CBERS-2B									
		Nyquist		Nyquist/2		EIFOV(m)		EIFOV Compensado (m)	
		<i>Along-track</i>	<i>Across-track</i>	<i>Along-track</i>	<i>Across-track</i>	<i>Along-track</i>	<i>Across-track</i>	<i>Along-track</i>	<i>Across-track</i>
Teste 7	WV	0,09	0,26	0,78	0,37	5,46	8,26	5,50	8,30
Teste 7	WV	0,23	0,23	0,69	0,70	5,55	8,96	5,59	9,00
Teste 7	WV	0,28	0,32	0,85	0,79	3,86	6,96	3,90	7,00
Teste 7	WV	0,26	0,37	0,99	0,75	4,80	7,86	4,84	7,90
Teste 10	QB	0,36	0,34	0,87	0,98	4,96	7,76	5,00	7,80
Teste 10	QB	0,16	0,16	0,58	0,59	5,16	7,80	5,20	7,84
Teste 10	QB	0,37	0,35	0,96	0,96	5,56	8,86	5,60	8,90
Teste 10	QB	0,35	0,34	0,93	0,88	5,66	9,36	5,70	9,40
Teste 10	QB	0,27	0,21	0,66	0,79	3,96	8,96	4,00	9,00
Teste 11	WV	0,30	0,29	0,75	0,81	5,00	9,16	5,04	9,20
Teste 11	WV	0,26	0,27	0,78	0,73	5,26	7,66	5,30	7,70
		Coefficiente de Variação				Média (m)			
		30,43%	21,88%	15,40%	21,47%	5,02	8,33	5,06	8,37

Tabela B.4

TABELA COMPLETA DOS TESTES REALIZADOS COM OLI/Landsat-8

Este Apêndice contém a Tabela B4 que apresenta o teste completo de estimação da MTF do sensor OLI do satélite Landsat-8. Os testes são separados em função da Frequência de *Nyquist*, Metade da Frequência de *Nyquist*, EIFOV e EIFOV compensado. Dentro de cada uma destas quatro divisões os testes são agrupados por bandas. Além disso, são apresentados os coeficientes de variação das MTFs estimadas em *Nyquist* e na Metade de *Nyquist*, e a média dos valores de EIFOV em metros.

OLI/Landsat 8																								
	<i>Nyquist</i>						<i>Nyquist/2</i>						<i>EIFOV</i>						<i>EIFOV Compensado</i>					
	<i>Along-track</i>			<i>Across-track</i>			<i>Along-track</i>			<i>Across-track</i>			<i>Along-track</i>			<i>Across-track</i>			<i>Along-track</i>			<i>Across-track</i>		
<i>Teste</i>	<i>B2</i>	<i>B3</i>	<i>B4</i>	<i>B2</i>	<i>B3</i>	<i>B4</i>	<i>B2</i>	<i>B3</i>	<i>B4</i>	<i>B2</i>	<i>B3</i>	<i>B4</i>	<i>B2</i>	<i>B3</i>	<i>B4</i>	<i>B2</i>	<i>B3</i>	<i>B4</i>	<i>B2</i>	<i>B3</i>	<i>B4</i>	<i>B2</i>	<i>B3</i>	<i>B4</i>
<i>Teste1</i>	0,41	0,38	0,51	0,41	0,2	0,34	0,76	0,8	0,84	0,76	0,72	0,78	34,4	34,8	31,3	34,7	42,6	36,3	35,0	35,4	31,9	35,3	43,0	36,8
<i>Teste2</i>	0,49	0,37	0,53	0,27	0,36	0,33	0,8	0,85	0,78	0,7	0,8	0,65	32,1	34,6	32,4	41,2	37,5	43,4	32,7	35,2	33,0	41,7	38,0	43,8
<i>Teste3</i>	0,38	0,38	0,53	0,48	0,26	0,38	0,78	0,77	0,82	0,74	0,74	0,76	33,4	35,1	32,7	36,9	40,1	35,3	34,0	35,7	33,3	37,4	40,6	35,8
<i>Teste4</i>	0,32	0,39	0,49	0,31	0,31	0,37	0,75	0,78	0,77	0,74	0,71	0,71	37,7	33,4	34,3	38,2	40,1	42,1	38,2	34,0	34,9	38,7	40,6	42,6
<i>Média</i>	0,40	0,38	0,52	0,37	0,28	0,36	0,77	0,80	0,80	0,74	0,74	0,73	34,40	34,48	32,68	37,75	40,08	39,2	35,0	35,0	33,3	38,3	40,6	39,8

APÊNDICE C

Procedimentos para utilização do aplicativo de estimação da MTF utilizando Polinômios de Zernike

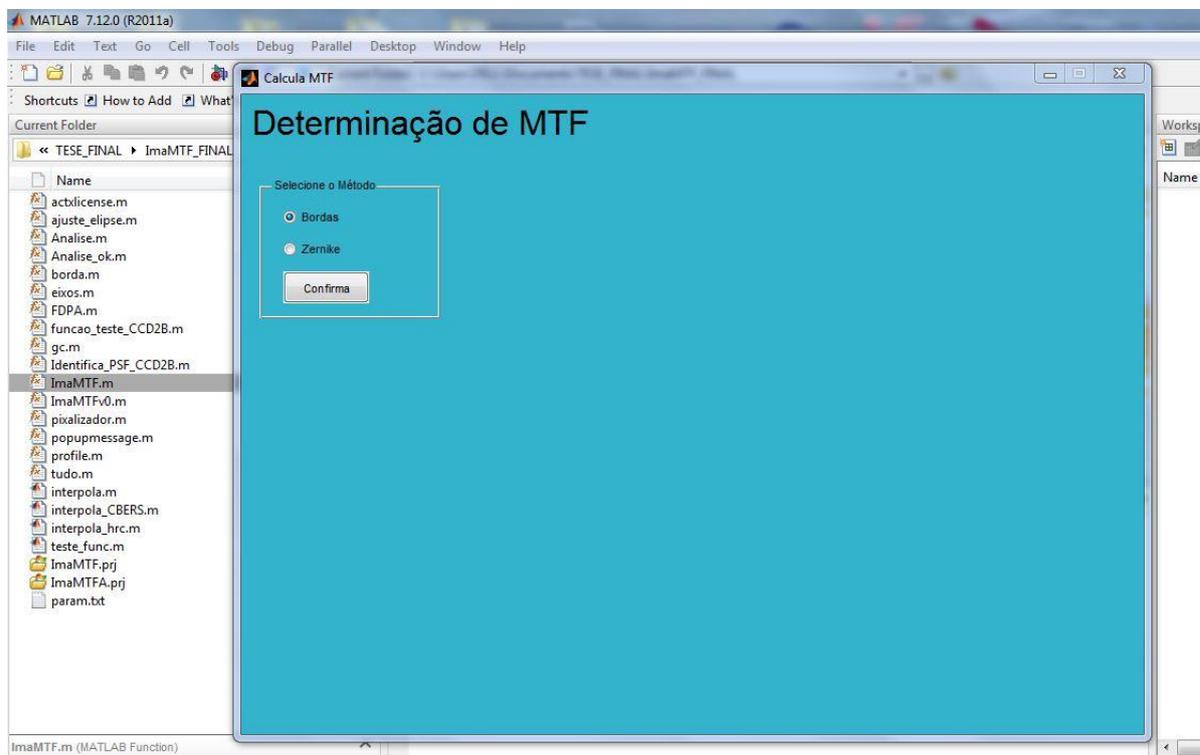
O aplicativo funciona dentro de ambiente MatLab. Os parâmetros para os sensores do qual se deseja estimar a MTF já estão inseridos no código. Cabe ao usuário apenas entrar com as imagens e escolher Sensor e Banda.

Para a utilização são necessários:

- a imagem que se deseja estimar a MTF;
- uma imagem de melhor resolução espacial (de preferência na relação mínima de 1/6, como por exemplo Landsat – 30m, e RapidEye – 5m). A imagem deve possuir a mesma banda espectral ou com ligeira variação nas extremidades do intervalo espectral, co-registrada e recortada a mesma área.
- Igualar média e variância das imagens usando a imagem que se deseja estimar a MTF como referência.

Procedimentos:

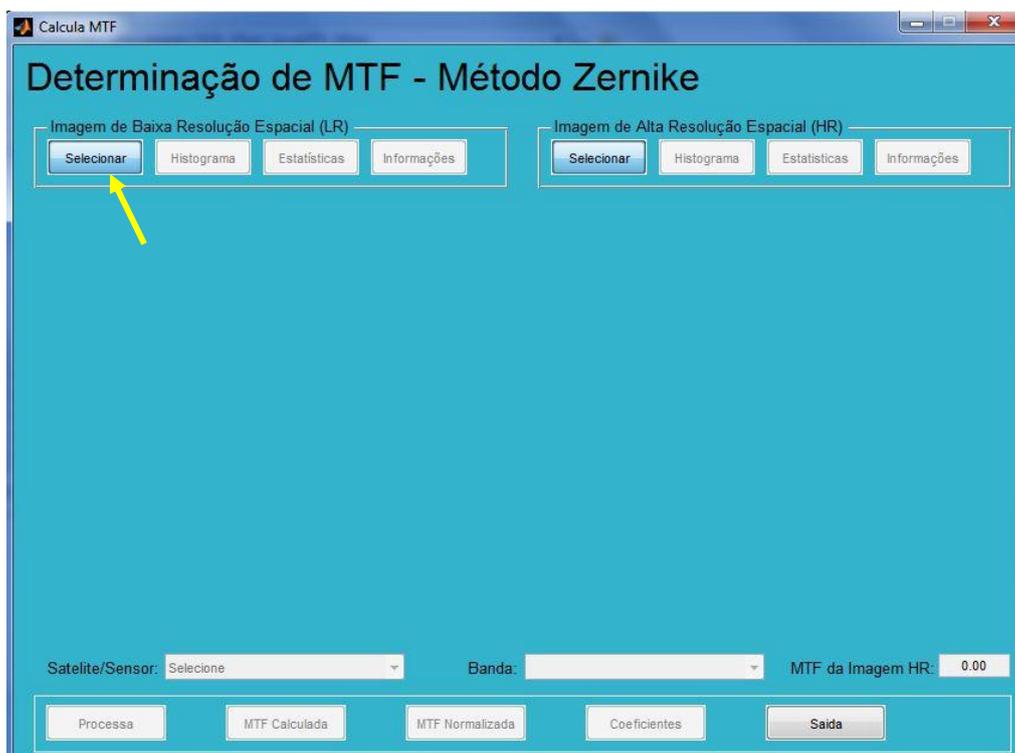
1. Dentro do ambiente MatLab, executar a função ImaMtf.m
2. O aplicativo se inicia com a seguinte tela:



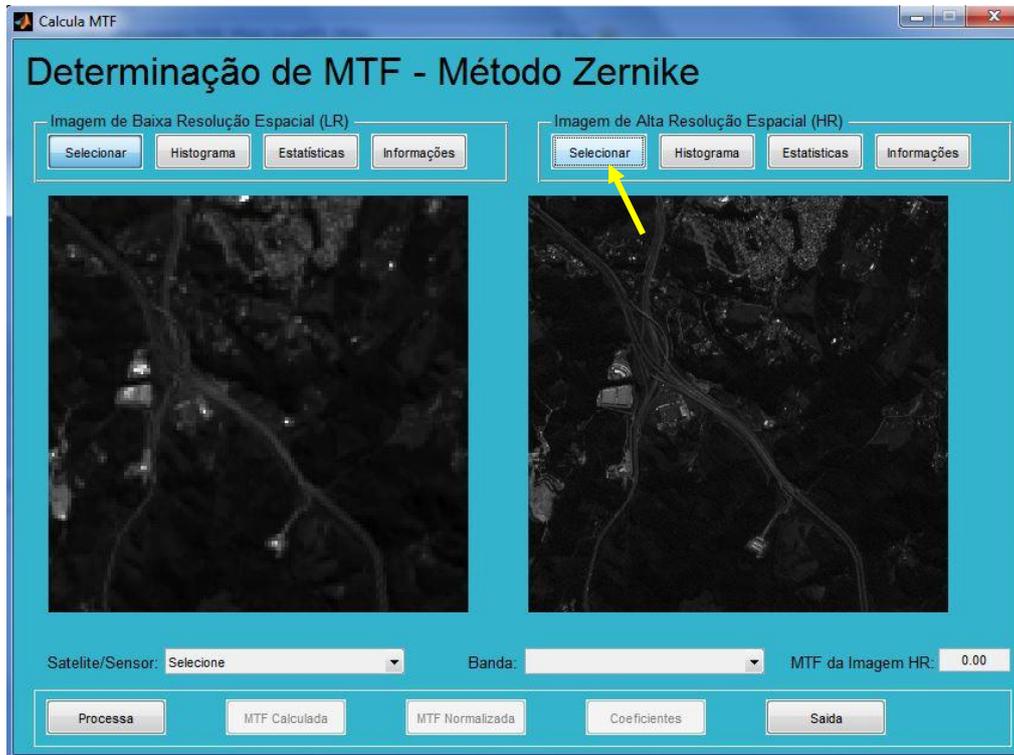
3. Nos métodos disponíveis (Bordas ou Zernike), escolher Zernike conforme a tela seguinte, e clicar em “*Confirma*”:



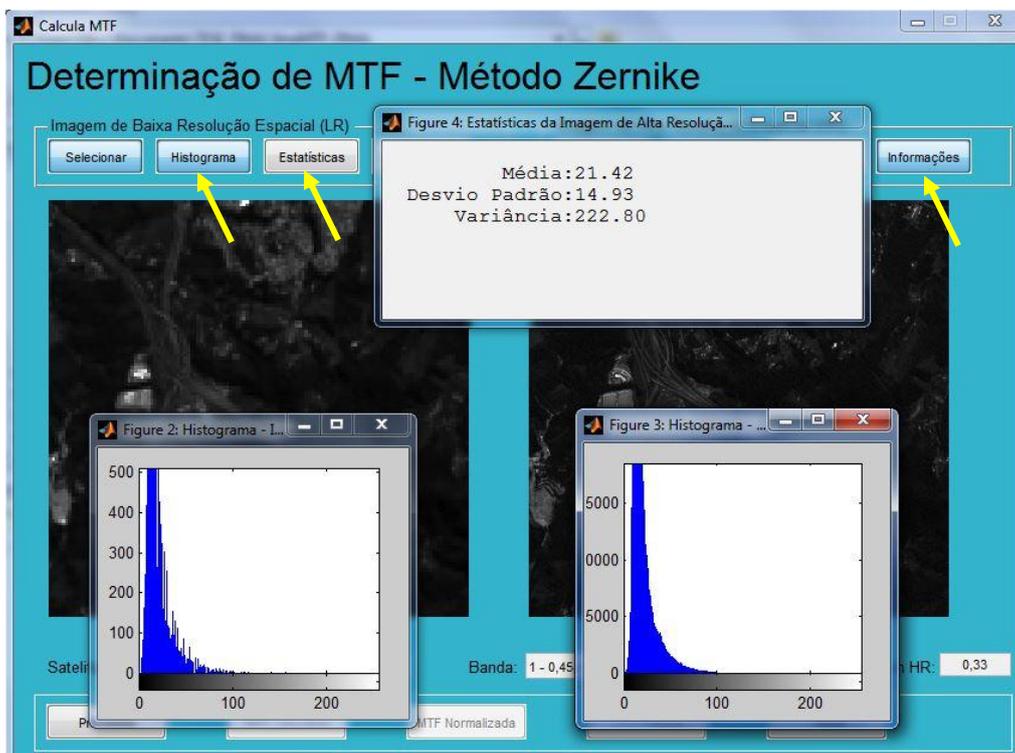
4. Escolher a imagem que se deseja estimar a MTF (neste exemplo uma imagem TM/Landsat-5 de 30m)



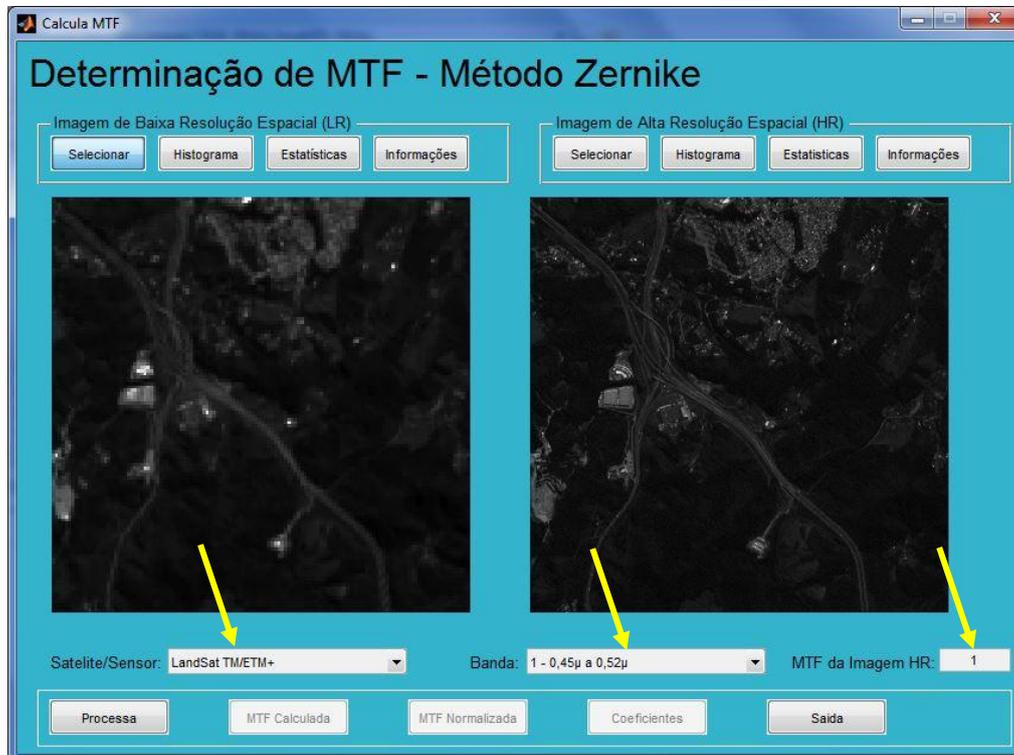
5. Escolher a imagem de melhor resolução (REFERÊNCIA) – neste exemplo uma imagem RapidEye de 5m.



6. Podem-se avaliar os histogramas e demais informações das imagens clicando nos botões correspondentes



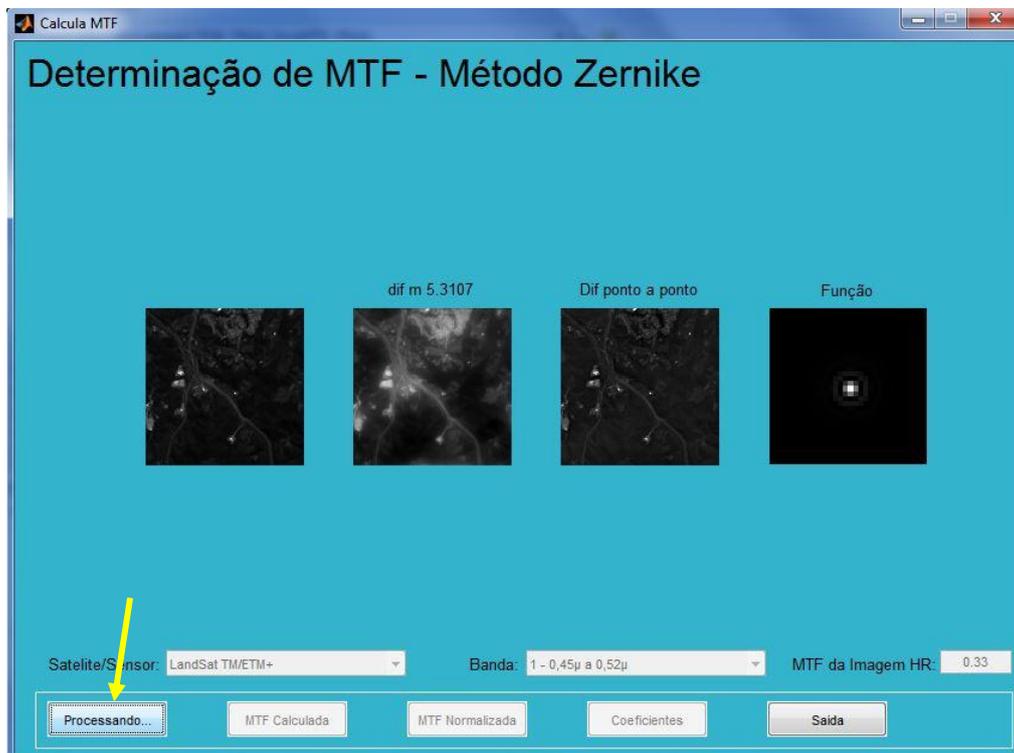
7. Selecionar o Sensor e a Banda. No item “*MTF da Imagem HR*” pode-se considerar o valor de MTF igual a 1 e neste caso assume-se que a imagem de REFERÊNCIA é perfeita.



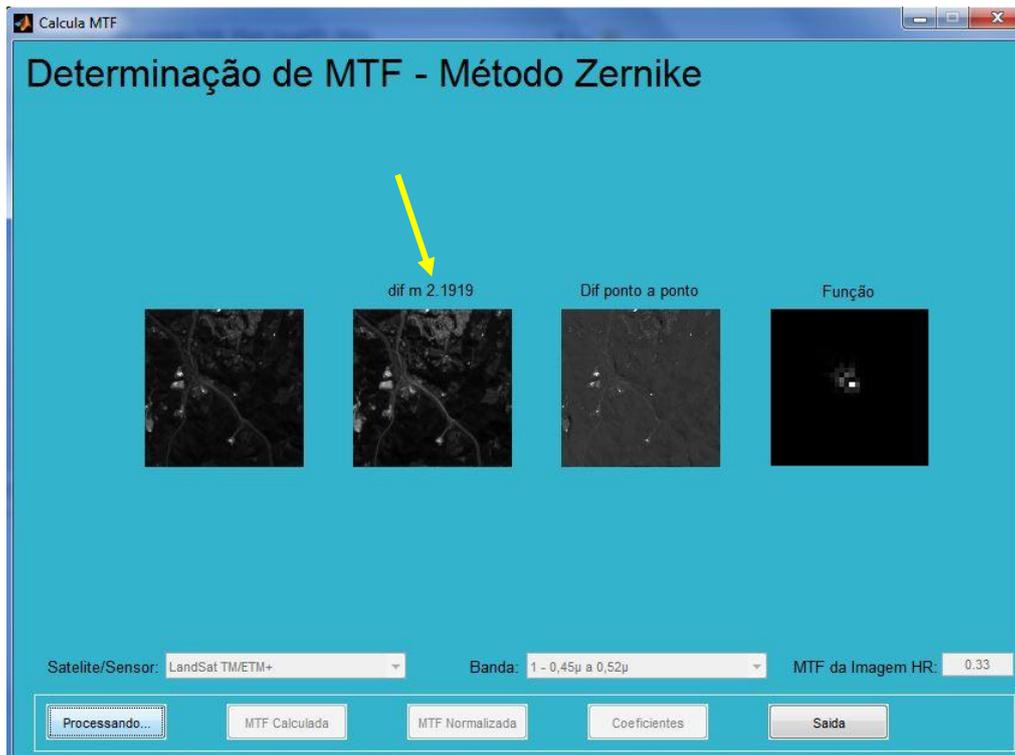
8. **Ou** pode-se entrar com o valor da MTF do sensor de REFERÊNCIA encontrado na literatura e normalizado pela frequência de amostragem.



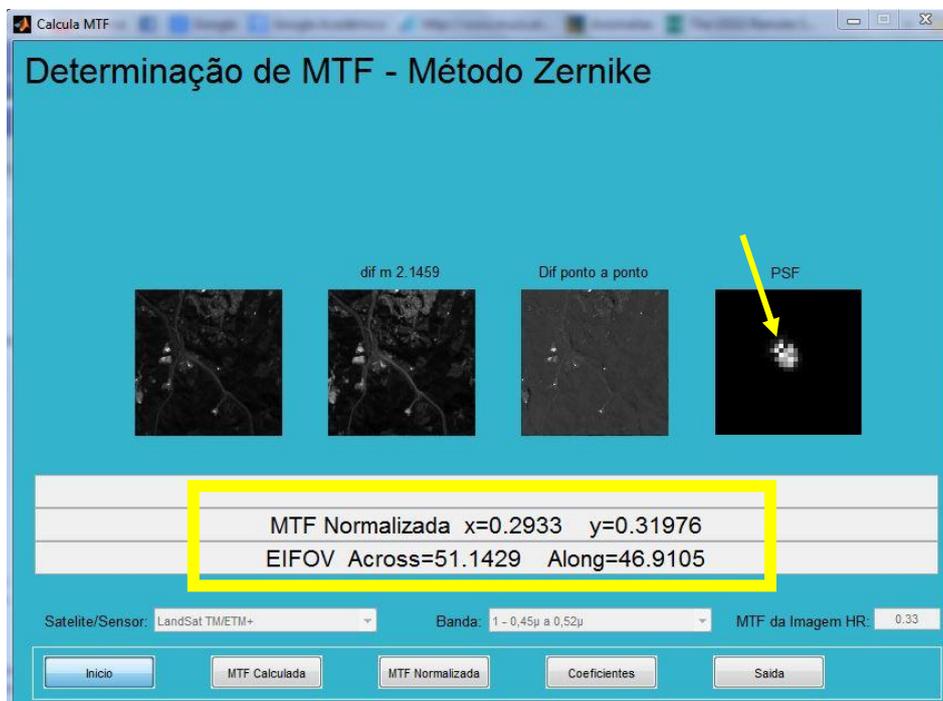
9. Selecionar o botão **“Processa”**. Inicia-se a busca dos melhores coeficientes que formam o Polinômio de Zernike.



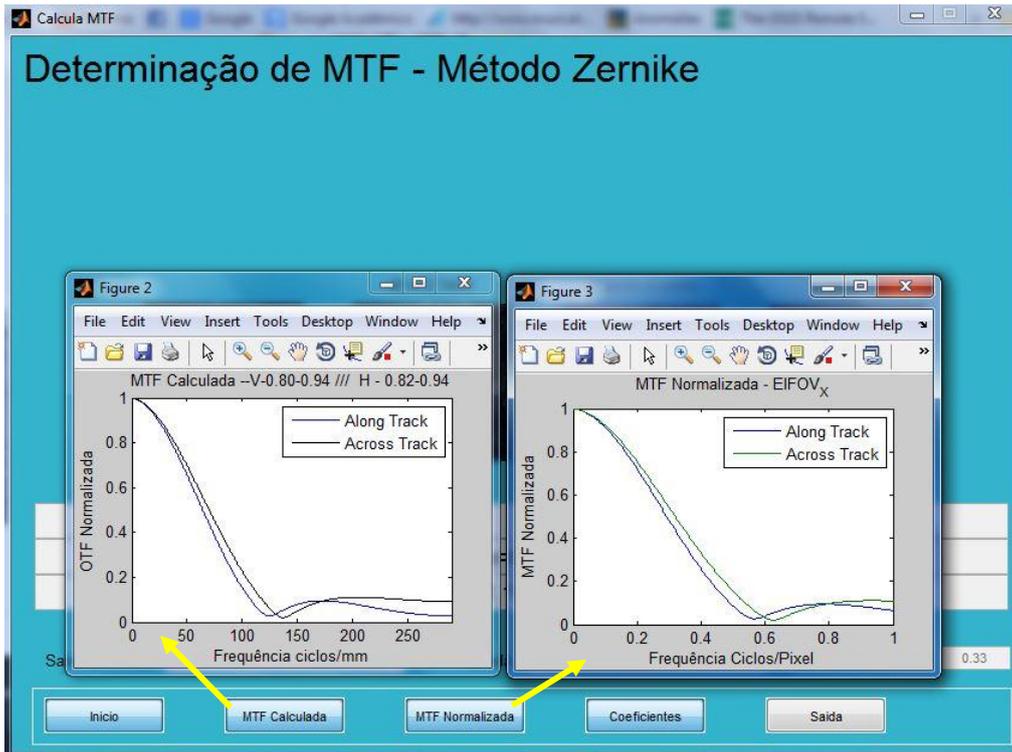
10. Observa-se que o valor da **“dif”** vai diminuindo conforme o Polinômio se ajusta.



11. No término do processo são apresentados na tela os valores de MTF estimados e normalizados com a frequência de amostragem e o valor de EIFOV (Resolução Espacial Efetiva). Também é apresentada a PSF encontrada em 2D.



12. Também é possível visualizar as curvas de MTF (linhas/mm ou ciclos/pixel), selecionando a opção correspondente, “*MTF calculada*” e “*MTF normalizada*” respectivamente.



13. Os valores dos coeficientes podem ser vistos selecionando a opção “*Coeficientes*”.



APÊNDICE D

Códigos em MATLAB do Aplicativo de Estimação da MTF utilizando Polinômios de Zernike.

Polinômios.m

```
% Função que procura pelo melhor polinomio de Zernike
function [] = Polinômios(SatSensor, BandaSel, nom_high_res,
nom_low_res)

%%%%%Variáveis globais que serão utilizadas nos codigos

global lambda samp sD sDi focal N relp ResNom T resu high_res low_res
fact_splx ArqCoef

lambdaLS = [0.00048; 0.00056; 0.00066; 0.00083; 0.00165; 0.01145;
0.002215];
lambdaCB = [0.00048; 0.00055; 0.00066; 0.00083; 0.00062];

switch SatSensor
    case 'LANDSAT'
        samp=0.01037; sD=203.167; focal=2438; sDi=0.; ResNom=30;
        lambda=lambdaLS(BandaSel);
    case 'CBERS'
        samp=0.013; sD=65; focal=520.; sDi=0.; ResNom=20;
        lambda=lambdaCB(BandaSel);
    case 'OLI'
        samp=0.018; sD=67,5; focal=8540; sDi=0.; ResNom=30;
        lambda=lambdaLS(BandaSel);
    otherwise
        lambda=0.00065; samp=0.010; sD=65; focal=3398.; sDi=0.;
ResNom=2.5;
end

% lambda = Comprimento de Onda
% samp = tamanho do detector
% sD = Semi-diametro da Lente
% sDi = Semi-Diametro Interior (Apenas para o caso Landsat - Nesse
caso, igual a zero)
% focal = distancia focal
% N = tamanho da imagem
% relp = relação do tamanho do pixel
% T = Método para cálculo da propagação da frente de onda.
% resu = nome do arquivo "run".
% high_res = imagem de alta resolução
% low_res = imagem de baixa resolução
% fact_splx = Fator que multiplica o simplex para o melhor valor de
otimização. não garante a melhora da otimização

%%%%% Entra com as imagens a serem testadas

high_res=double(imread(nom_high_res)); % Imagem de alta
resolução.
low_res=double(imread(nom_low_res)); % Imagem de Baixa
Resolução.
```

```

infoLR = imfinfo(nom_low_res);
infoHR = imfinfo(nom_high_res);
%infoLR.Width
%infoLR.Height

N = infoHR.Width;
relp = infoHR.Width / infoLR.Width;

%%%% Entra com as especificações do sensor a ser testado.

T=lambda*focal*relp/N/samp;
tF=1e-5; tX=1e-5; nmfe=2000; fact_splx=1000.; % Parametros de Busca.

%%%%Cria o arquivo "dad" que guarda a informação sobre as informações
iniciais utilizadas
c=clock;
ArqDados =
(strcat('Dados_Imagem_CCD2B',num2str(c(2)), 'd', num2str(c(3)), 'h', num2s
tr(c(4)), 'm', num2str(c(5))));

resd=fopen(ArqDados, 'w');
fprintf(resd, 'High_res:\n'); fprintf(resd, '%s\n', nom_high_res);
fprintf(resd, 'Low_res:\n'); fprintf(resd, '%s\n', nom_low_res);
fprintf(resd, 'lambda:\t, samp:\t, sD:\t, focal:\t, N:\t, relp:\t,
sDi:\t\n');
fprintf(resd, '%10.8f %8.6f %8.2f %8.1f %6.0d %4.0d
%8.2f\n', lambda, samp, sD, focal, N, relp, sDi);
fprintf(resd, 'fact_splx:\t, tolF:\t, tolX:\t, nmaxfeval:\t\n');
fprintf(resd, '%8.1f %8g %8g %8.0d', fact_splx, tF, tX, nmfe);
fclose(resd);

%%%%Cria o Arquivo "run" com o valor dos polinômios de Zernike de
cada
%%%% O ultimo valor é a função de mérito. Dentro deste arquivo também
é feita a otimização, pela função fminsearch.

ArqCoef =
(strcat('Coeficientes_Testados_CCD2B', num2str(c(2)), 'd', num2str(c(3)),
'h', num2str(c(4)), 'm', num2str(c(5))));
resu=fopen(ArqCoef, 'w');

Vi=[0 0 0 0 0 0 0 0]; % Dá apenas 8 coeficientes. O primeiro não é
enviado.
tic
Vf=fminsearch(@Identifica_PSF_CCD2B, Vi, ...

optimset('Display', 'Iter', 'TolFun', tF, 'TolX', tX, 'maxfunvals', nmfe));
toc
fclose(resu);

Analise (ArqCoef, lambda, samp, sD, focal, sDi, N, relp, ResNom,
SatSensor);
return;

```

//

Identifica_PSF.m

```
% Função que constroi a imagem de comparação

function dif_m = Identifica_PSF(V)

    global lambda samp sD sDi focal N relp T resu high_res low_res
    fact_splx scr3 scr4

    %%%%%Variáveis que serão utilizadas neste programa

    persistent x y xp yp ro th W fpup pup FPUP psf OTF HIGH_RES
    FORMADA formada captada tros

    %x = tamanho da psf criada em x
    %y = tamanho da psf criada em y
    %xp = grade em x
    %xy = grade em y
    %ro = normalização em relação ao tamanho da pupila (pup)
    %th = Arcotg de yp xp.
    %W = Polinomio de Zernike
    %fpup = função de pupila definida pelo polinomios de Zernike.
    %pup = Localização da pupila em relação ao sD e sDi.
    %FPUP = fft de fpup.
    %psf = Point Spread Function
    %OTF = fft da psf.
    %HIGH_RES = fft de high_res.
    %FORMADA = imagem degradada no domínio de fourier.
    %formada = fft de FORMADA
    %captada = formada pixelizada.
    %tros = Eliminação de Pixels para eliminar o efeito de borda da
    PSF.

    %%%%%Construção da imagem de baixa resolução

    V=V*fact_splx; % V = vetor de procura

    x=-N/2:(N/2-1); y=-N/2:(N/2-1); [xp,yp]=meshgrid(x*T,y*T); %
    Cria a grade para a construção da psf
    ro=sqrt(xp.^2+yp.^2)/sD; th=atan2(yp,xp); % normalização em
    relação ao ráio da pupila.
    pup=sDi <= sqrt(xp.^2+yp.^2) <= sD; % Posição da pupila

    % Construção dos polinômios de Zernike (V conte els Zernikes,
    excepte el primer)

    W = V(1)*ro.*cos(th) + V(2)*ro.*sin(th) + V(3)*(2*ro.^2-1) +...
        V(4)*ro.^2.*cos(2*th) + V(5)*ro.^2.*sin(2*th) + V(6)*(3*ro.^2-
        2).*ro.*cos(th)...
        + V(7)*(3*ro.^2-2).*ro.*sin(th) + V(8)*(6*ro.^4-6*ro.^2+1);

    fpup=exp(1i*2*pi* W ).* pup;
    % funcao de pupila
```

```

    FPUP=fftshift(fft2(fftshift(fpup)));
% FFT da função de pupila.
    psf=real(FPUP.*conj(FPUP));    psf=psf/sum(psf(:));
% psf do sistema
    OTF=fftshift(fft2(fftshift(psf)));
% OTF
    tros=10:118;
% corte das bordas da imagem
    HIGH_RES=fftshift(fft2(fftshift(high_res)));
% fft high_res
    FORMADA=HIGH_RES.*OTF;
% imagem no domínio de fourier
    formada=real(fftshift(iff2(fftshift(FORMADA))));
% imagem no domínio de fourier
    captada=pixalizador(formada,relp);
% Pixalização.

    dif_m=sum(sum(abs(captada(tros,tros)-
low_res(tros,tros))))/119./119.;    % Diferença entre as imagens
recortadas.

    %%%% Mostra a figura com as imagens geradas

    figure(1)

    subplot(1,4,1), imshow(low_res,[]),    subplot(1,4,2),
imshow(captada,[]);    title(['dif m ' num2str(dif_m)]);
    subplot(1,4,3), imshow(low_res-captada,[]); title('Dif ponto a
ponto');
    subplot(1,4,4), imshow(psf(N/2-15:N/2+16,N/2-15:N/2+16),[]);
title('Função');
    %Salva no arquivo "run" o novo valor dos coeficientes

    fprintf(resu,'%8.5f %8.5f %8.5f %8.5f %8.5f %8.5f %8.5f %8.5f
%12.8f \n', V, dif_m);

    return

```

//

Pixalizador.m

```

function surt = pixalizador(entra, relp)
% reduceix la mida de l'entrada en fraccio 'relp'
for m=1:floor(size(entrada,1)/relp);
    for n=1:floor(size(entrada,2)/relp);
        surt(m,n)=sum(sum(entrada(relp*(m-1)+1:relp*m,relp*(n-
1)+1:relp*n))) / relp^2;
    end
end

```

//

Analise.m

```
% função que Analisa Os polinomios de Zernike Encontrados

function [] = Analise(ArqCoef, lambda, samp, sD, focal, sDi, N, relp,
ResNom, SatSensor)
%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%
global MTFcx MTFcy MTFnx MTFny EIFOV_x EIFOV_y MTFhr

identifica='Teste'; % Data do arquivo válido
conteudoLidoArquivo=load(ArqCoef);
Ztot=conteudoLidoArquivo(end, :);

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%

% Cria um arquivo de dados da imagem de entrada

T=lambda*focal*relp/N/samp; % rel_pix
fNy=1/(2*samp); % freq Nyquist
f_number=focal/(sD*2.); % F#=4.5 del cas real
MUX
umax=(N*T/2/lambda/focal); u=0:umax/N*2:umax; % umax=valor maxim
de la MTF

% Cria o arquivo de saída da comparação

h=fopen(strcat('fin_',identifica),'w');

x=-N/2:(N/2-1);
y=-N/2:(N/2-1);
[xp,yp]=meshgrid(x*T,y*T);
pup=sDi <= sqrt(xp.^2+yp.^2) <= sD; % Fora da região da pupila
ro=sqrt(xp.^2+yp.^2).*pup/sD; theta=atan2(yp,xp); % ro a pupil.la
normalitzada a 1 a la vora
zonac=N/2-15:N/2+16; % zona central que es representara al plot
ce=N/2+1;% punt que defineix el centre de MTF

pNy=relp*8;

Zinp = (Ztot(1,1))*ro.*cos(theta) + (Ztot(1,2))*ro.*sin(theta) +
(Ztot(1,3))*(2*ro.^2-1) +...
(Ztot(1,4))*ro.^2.*cos(2*theta) +
(Ztot(1,5))*ro.^2.*sin(2*theta)...
+ (Ztot(1,6))*(3*ro.^2-2).*ro.*cos(theta) + (Ztot(1,7))*(3*ro.^2-
2).*ro.*sin(theta)...
+ (Ztot(1,8))*(6*ro.^4-6*ro.^2+1); % front d'ona INPUT

obj= exp(1i*2*pi*Zinp).*pup;
OBJ=fftshift(fft2(fftshift(obj)));
psf=real(OBJ.*conj(OBJ));
psf=psf/sum(psf(:));

imshow(psf(zonac,zonac),[],title('PSF '));
```

```

OTF=fftshift(fft2(fftshift(psf)));

MNy_v=abs(OTF(ce-pNy,ce));      % MTF a la freq Nyquist VERTICAL
MN2_v=abs(OTF(ce-pNy/2,ce));   % MTF a la freq Nyquist/2
MNy_h=abs(OTF(ce,ce-pNy));     % MTF a la freq Nyquist HORIZONTAL
MN2_h=abs(OTF(ce,ce-pNy/2));   % MTF a la freq Nyquist/2

tam=(N/2)+1;
vet1=abs(OTF(tam:-1:1,tam));
vet2=abs(OTF(tam,tam:-1:1));

qq1=interp1(vet1,u,0.5);
qq2=interp1(vet2,u,0.5);

fprintf(h,'%8.5f %8.5f %8.5f %8.5f %8.5f %8.5f %8.5f %8.5f %12.8f
%8.5f %8.5f %8.5f %8.5f \n'...
,MNy_v,MN2_v,MNy_h,MN2_h );

%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%%% Calculo Normalizado

const_sensor = 1.3;
switch SatSensor
    case 'LANDSAT'
        const_sensor = 0.65;
    case 'CBERS'
        const_sensor = 1.3;
    case 'OLI'
        const_sensor = 0.65;
end
u_65_norm_metros=u*samp*const_sensor;
vetor1=0:0.001:1;
vetor2=0:0.001:1;
vetor3=0:0.001:1;
vetor4=0:0.001:1;
r1=interp1(u_65_norm_metros,vet1, vetor1);
r2=interp1(u_65_norm_metros,vet2, vetor2);
rx1=interp1(vet1,u_65_norm_metros,vetor3);
rx2=interp1(vet2,u_65_norm_metros, vetor4);

yp = find (vetor1==0.5);
yp2= find (vetor2==0.5);
q1=r1(yp);
q2=r2(yp2);

xp = find (vetor3==0.5);
xp2= find (vetor4==0.5);
qx1=rx1(xp);
qx2=rx2(xp2);
fr=MTFhr;
MTFCx = qq1;
MTFCy = qq2;

```

```

EIFOV_x=ResNom*(1/(2*qx1));
EIFOV_y=ResNom*(1/(2*qx2));

MTFNx = q1;
MTFNy = q2;
save
('variaveis.mat','Mny_v','MN2_v','pNy','MN2_h','Mny_h','u_65_norm_metr
os','samp','MTFhr','u','psf','vet1','vet2','q1','q2','EIFOV_x','EIFOV_
y','r1','r2','qx1','qx2')
fclose(h);
return

```