Simulação de Monte Carlo na avaliação das incertezas em parte do processo de calibração de sensores

Cibele Teixeira Pinto [1,2]
Flávio Jorge Ponzoni [1]
Leila Maria Garcia Fonseca [1]
Ruy Morgado de Castro [2,3]

[1] Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{cibele, flavio, leila}@dsr.inpe.br
[2]Instituto de Estudos Avançados - IEAv/CTA
Caixa Postal 6044 - 12.231-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{cibele, rmcastro}@ieav.cta.br
[3]Universidade de Taubaté – UNITAU
Caixa Postal 515 - 12201-970 - Taubaté - SP, Brasil
rmcastro@unitau.br

Abstract. The airborne or satellite sensors absolute calibration is based on the relationship between Digital Numbers and top-of-atmosphere (TOA) radiance from a reference surface located on the Earth. This reference surface has been spectrally characterized by radiometers or spectrometers. The Digital Number generated by the sensor in each spectral band depends not only on the amount of incident energy, but also on the spectral response function at each band. Therefore, before comparing the Digital Number from the orbital imagery to the spectral data collected from spectroradiometers it is necessary to weigh them taking into account the spectral response function of each sensor band. To calculate the uncertainties of both the measurement process and weighting it was applied the Monte Carlo simulation. This method uses a random number sequence to perform a simulation. The TM sensor onboard of the Landsat 5 satellite was used to test the proposed methodology. Results showed that the standard uncertainty for each sensor bands TM ranging from 0.30% to 0.93%.

Palavras-chave: calibração, incerteza, Monte Carlo, calibration, uncertainty, Monte Carlo

1. Introdução

Grande parte do sucesso da utilização dos dados de um sensor imageador colocado a bordo de plataformas aerotransportadas ou orbitais é atribuída ao conhecimento das propriedades radiométricas do mesmo. Este conhecimento é alcançado com a realização da calibração absoluta. Vários métodos de calibração absoluta após o lançamento do sensor têm sido propostos. Os métodos que se baseiam em superfícies de referências no solo têm sido utilizados em sensores orbitais. Neste método é realizada, por meio de espectrorradiômetros portáteis que atuam em faixas estreitas do espectro eletromagnético, a caracterização espectral de uma superfície de referência localizada na superfície da Terra. Estas medidas são realizadas concomitantes à passagem do sensor sobre a superfície de referência para realizar a comparação dos dados oriundos desta superfície com o Número Digital (ND) registrado pelo sensor que se deseja calibrar (Ponzoni et al., 2007). Esta comparação permite calcular os coeficientes de calibração, utilizados para transformar os NDs presentes nas imagens em grandeza física, que é o principal objetivo da calibração radiométrica (Pinto, 2011).

Uma questão importante que merece atenção é que o ND fornecido pelo sensor em cada banda espectral não depende apenas da quantidade de energia incidente, mas também da Função de Resposta Espectral (FRE) da banda, uma vez que a radiância que chega ao sistema óptico é sentida dentro de uma região espectral segundo critério de pesos expresso pelas próprias FREs.

Assim, antes de comparar o ND com o valor obtido pela caracterização espectral da superfície, deve-se ponderar este valor pela FRE da banda do sensor. Embora a equação

utilizada para fazer esta ponderação não seja complicada, o cálculo das incertezas pelo método clássico de propagação de incertezas descrito no Guia para a Expressão da Incerteza de Medição da *ISO* (*International Organization for Standardization*) (ABNT; INMETRO, 2003) é complexo, pois é inconveniente determinar as derivadas parciais (a dependência da grandeza secundária em relação às grandezas primárias) exigidas por este método, além das covariâncias existentes.

Portanto, este trabalho utilizou um método alternativo para a avaliação das incertezas: a simulação pelo Método de Monte Carlo JCGM (2008). Este método baseia-se na geração de números aleatórios para cada uma das grandezas primárias, segundo seu tipo de distribuição de probabilidade, e propagadas através da função de medição. A simulação por Monte Carlo utiliza informações prévias ao evento, a partir das quais as informações posteriores são obtidas. Este método utiliza o conceito de propagação das distribuições de probabilidade das grandezas de entrada (informações prévias). Esta propagação consiste, primeiramente, em assumir distribuições para as grandezas de entrada (distribuição uniforme, normal ou triangular, por exemplo). Em seguida, estas distribuições são propagadas *M* vezes (onde *M* é o número de iterações), através da equação de medição, e uma nova distribuição é gerada como resultado. No final, é possível determinar os parâmetros que caracterizam a distribuição de saída (resultados).

2. Função de Resposta Espectral

Os sistemas sensores multi-espectrais de sensoriamento remoto, como por exemplo, o sensor Thematic Mapper (*TM*) abordo do satélite Landsat 5, registram a energia refletida ou emitida de um determinado alvo em múltiplas bandas do espectro eletromagnético (Chander et al., 2009). A Figura 1 mostra a função de resposta espectral relativa normaliza do sensor *TM5*.

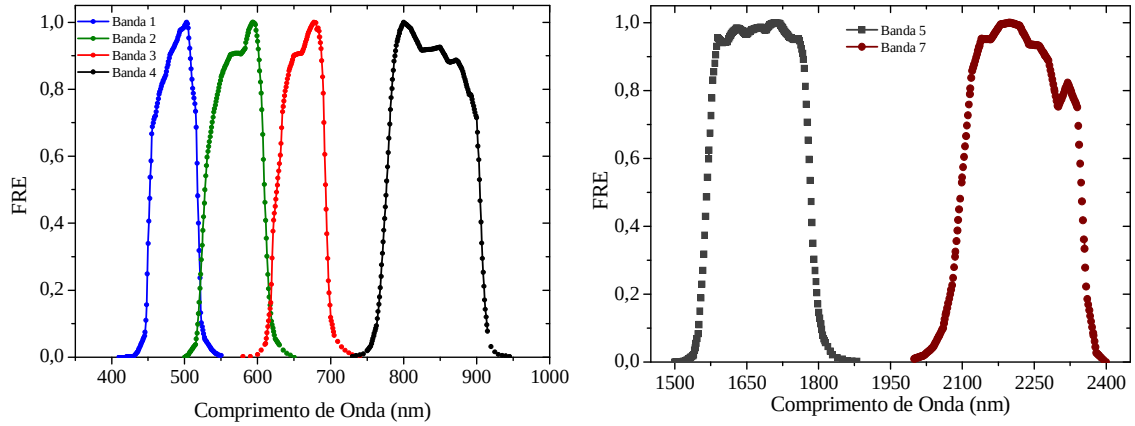

Figura 1. Função de Resposta Espectral das bandas espectrais do sensor *TM* (Landsat 5). Em (a) das bandas 1 a 4; e (b) das bandas 5 e 7.
Fonte: NASA (2012)

3. Propagação das Incertezas

Quando os sensores orbitais registram as intensidades da radiação eletromagnética (REM) produzem um sinal proporcional à variação da intensidade do fluxo radiante incidente no sistema sensor, que é então quantificado em valores discretos inteiros, denominado número digital (ND) (Ponzoni et al., 2007). Entretanto, o ND gerado pelo sensor não é calculado como uma simples média aritmética de todas as radiâncias medidas dentro da faixa espectral da banda, mas sim uma média ponderada pela FRE da banda. Desta forma, o valor do Fator de Reflectância (FR) para uma determinada banda do sensor é proporcional ao valor do FR em todos os comprimentos de onda ponderada pela FRE desta banda, segundo a equação:

$$FR_{banda} = \frac{\int_0^{\infty} FR_{\lambda} \times FRE_{\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} FRE_{\lambda} d\lambda} \quad (1)$$

onde: FR_{banda} é o FR ponderado para cada uma das bandas e FR_{λ} é o FR que incidente na no sensor.

A grandeza FR_{banda} (Equação 1), que é o valor do FR ponderado para cada uma das bandas do sensor é, portanto, determinada de maneira indireta, ou seja, é calculada como função de outras grandezas (no caso, em função do valor de FR e das FREs das bandas do sensor). Nesse caso, para determinar a incerteza deve-se estimar a influência das incertezas das grandezas primárias e combiná-las adequadamente (Pinto, 2011). Neste trabalho, a incerteza da grandeza FR_{banda} foi estimada pelo método de simulação de Monte Carlo.

4. Metodologia

Em 18 de agosto de 2010, uma missão de coleta de dados foi realizada em Tuz Gölü, um lago de sal na Turquia, que é considerado uma área oficial para calibração de sensores pelo Comitê de Satélites de Observação da Terra (*Committee on Earth Observation Satellites - CEOS*) (CEOS, 2009). Estes dados foram utilizados nesta pesquisa. No mesmo dia o sensor *TM* a bordo do satélite Landsat 5 realizou o imageamento desta superfície, e por isso os dados deste sensor foram usados para testar a metodologia proposta.

A ferramenta computacional escolhida para implementar o método de Monte Carlo foi o software MatLab. O fluxograma do programa é ilustrado na Figura 2.

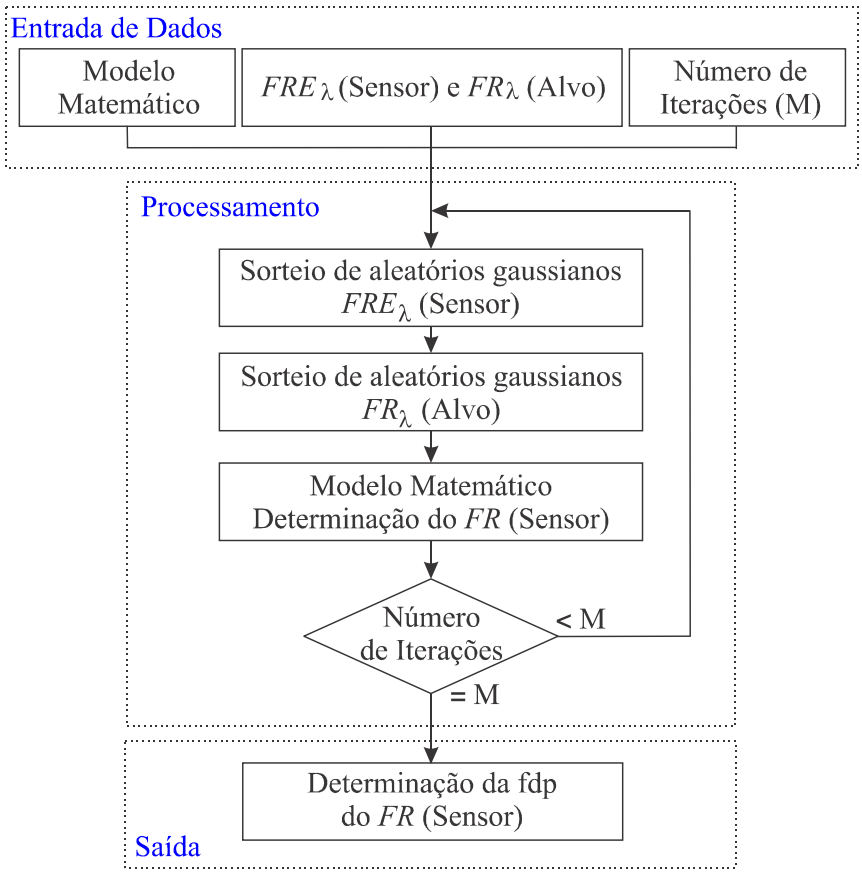

Figura 2. Fluxograma da avaliação de incerteza de medição utilizando a Simulação de Monte Carlo.

O programa desenvolvido pode ser dividido em três etapas: entrada de dados, processamento e saída de dados. Os dados de entrada são: (a) modelo matemático; (b) as funções densidade de probabilidade, correspondentes a cada fonte de entrada; e (c) a seleção do número de iterações.

O modelo matemático utilizado é representado pela Equação 1. Esta equação de medição relaciona as grandezas de entradas com o mensurando (FR_{banda}). As fontes de entrada são a FRE e FR. Para a FRE do sensor *TM* (Figura 1) considerou-se uma função densidade de probabilidade (fdp) normal para cada comprimento de onda.

Para obter o Fator de Reflectância de superfície (Figura 3) em campo utilizou-se um espectrorradiômetro FieldSpec da Analytical Spectral Devices (ASD) (ASD, 1999), que atua em uma faixa espectral compreendida de 350 a 2500 nm. Na simulação do FR, para cada comprimento de onda, a fdp foi modelada como normal. Para as duas grandezas de entrada, os dados foram considerados independentes com as seguintes exceções: (a) da diagonal principal da matriz correlação, onde a correlação é igual a 1 (um); e (b) das duas "sub-diagonais", contíguas a diagonal principal, onde a correlação considerada foi igual a 0,5. Na Figura 4 é possível observar os valores gerados para as duas fontes de entrada (FRE e do FR) no comprimento de onda de 570 nm, em 10000 iterações do método.

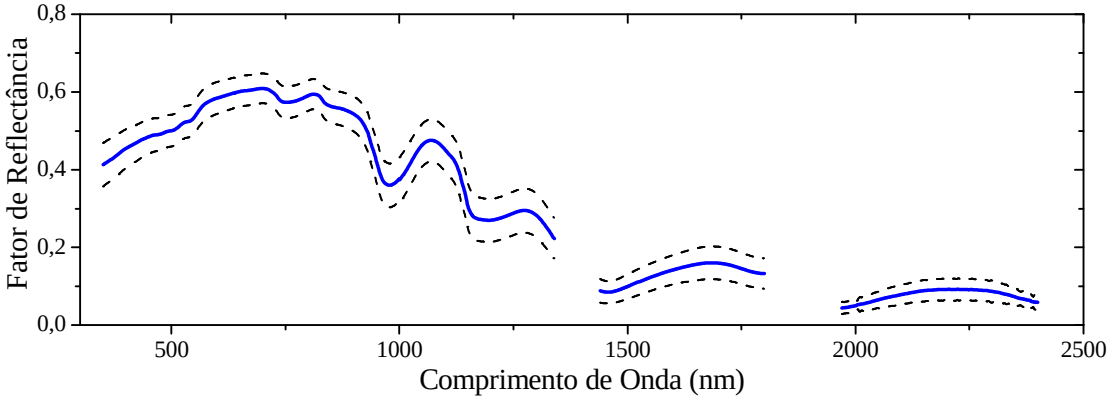

Figura 3. Fator de Reflectância Médio da superfície de referência (Tuz Gölü) e a variação da incerteza máxima e mínima do espectro (linha tracejada).

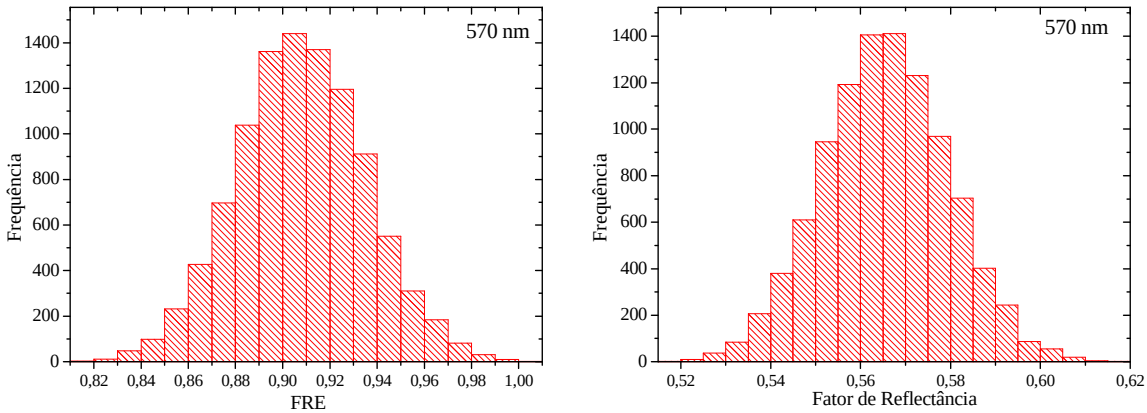

Figura 4. Histograma de frequência da geração de números aleatórios. Em (a) para a FRE da banda 2 do sensor *TM* e comprimento de onda 570 nm; e em (b) para o FR da superfície no comprimento de onda 570 nm.

O número de iterações influencia na exatidão dos resultados obtidos pela Simulação de Monte Carlo, por isso é necessário cuidado ao defini-lo. Assim, alguns testes foram realizados para avaliar as variações dos resultados em relação ao número de iterações executadas. Com este estudo, optou-se por realizar 10000 iterações em cada variável gerada aleatoriamente.

Durante o processamento da Simulação por Monte Carlo é realizada a propagação das funções de probabilidade de entrada (Figura 3 e 4) por meio do modelo matemático da medição (Equação 1), fornecendo como resultado (saída) outra distribuição de probabilidade que descreve os valores do mensurando consistente com os dados de entrada.

Lembrando que o conhecimento das grandezas de entrada (FRE e FR) é expresso por uma fdp. A propagação destas distribuições por meio da equação de medição traz como resultado uma fdp para o mensurando. Na avaliação da incerteza baseada no método Monte Carlo o objetivo é realizar *M* amostras da fdp das grandezas de entrada e propagar esses valores por meio da equação de medição de tal forma que se obtém *M* amostras da grandeza de saída. Com isto, é construída uma fdp amostral para a grandeza de saída na qual representa uma estimativa da fdp do mensurando.

5. Resultados Preliminares

O resultado do histograma do fator de reflectância para as banda 2 e 5 do sensor *TM*, FR_{banda} (grandeza de saída), pode ser visualizado na Figura 5. Os valores do FR na banda 2 (Figura 5a) estão concentrados entre 0,558 e 0,560. Já os valores do FR na banda 5 (Figura 5b) estão concentrados entre 0,147 e 0,149.

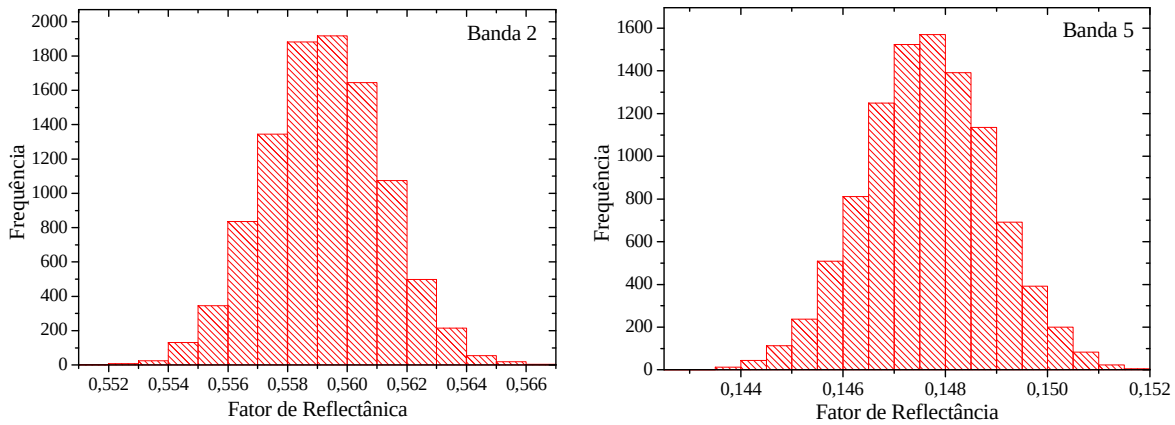

Figura 5. Histograma de Frequência para o fator de reflectância (grandeza de saída). Em (a) na banda 2 do sensor *TM*; e em (b) na banda 5 do sensor *TM*.

O comportamento dos dados pode ser determinado por meio dos histogramas de saída obtidos para cada uma das bandas do sensor *TM*5, que permite determinar a fdp do mensurando. Analisando a Figura 5 pode-se verificar, visualmente, que os resultados para o fator de reflectância se distribuem de acordo com uma distribuição Gaussiana (Normal), sendo que dois parâmetros caracterizam esta distribuição: a média e o desvio padrão. A avaliação e estimativa destes dois parâmetros, para cada banda do sensor, são apresentadas na Tabela 1.

Como mencionado anteriormente, o FR de superfície (Figura 3) foi obtido usando o FieldSpec ASD, que atua em uma faixa espectral de 350 a 2500 nm. Dessa maneira, não foi possível realizar os tratamentos de dados para a banda 6 do sensor *TM* (faixa espectral de 10,45 a 12,42 μm).

Tabela1. Média e Incerteza do FR para cada uma das bandas do sensor *TM*5.

Banda	Média	Incerteza			
		(1σ) 68,3% de confiança		(3σ) 99,7% de confiança	
		Absoluta	Relativa (%)	Absoluta	Relativa (%)
1	0,4969	0,0022	0,44	0,007	1,4
2	0,5592	0,0020	0,36	0,006	1,1
3	0,6022	0,0021	0,35	0,006	1,0
4	0,5713	0,0017	0,30	0,005	0,9
5	0,1476	0,0013	0,88	0,004	2,7
7	0,0864	0,0008	0,93	0,0024	2,8

A incerteza padrão é a incerteza do resultado expressa com um desvio padrão (1σ). Já a incerteza expandida é obtida multiplicando-se a incerteza padrão pelo fator de abrangência. Esta multiplicação da incerteza padrão por uma constante não fornece uma informação adicional, é apenas uma maneira de representar a incerteza final associada a um nível de confiança. Em uma distribuição gaussiana pode-se determinar a quantidade de dados, expressos por uma probabilidade, contidos em um intervalo do histograma. Esta probabilidade é chamada de nível de confiança. Por exemplo, o nível de confiança para obter um dos dados contidos no intervalo de $\bar{x}-1\sigma$ e $\bar{x}+1\sigma$ é de aproximadamente 68,3%.

Segundo a Tabela 1, tem-se 68,3% de confiança de que o FR na banda 7 do sensor *TM* esteja entre 0,0856 e 0,0872. Se quisermos utilizar um nível de confiança mais alto, então, pode-se afirmar que o FR na banda 7 do sensor *TM* está entre 0,0840 e 0,0888 com 99,7% de confiança.

6. Conclusão

Neste trabalho, o método de simulação de Monte Carlo foi utilizado para avaliar e estimar as incertezas em parte do processo de calibração absoluta de sensores. Os dados do sensor *TM*5 e das medidas coletadas na missão em Tuz Gölü, um lago de sal na Turquia, foram usados para validar a metodologia proposta. Os resultados mostraram que a incerteza padrão para cada uma das bandas do sensor *TM*5 variaram de 0,30% a 0,93%, com a exceção da banda 6, que não tinha dados de campo com o espectrorradiômetro.

É importante comentar que os dados do Fator de Reflectância utilizados neste trabalho são de superfície. Então, antes de comparar os resultados obtidos neste trabalho (FR em cada banda do sensor *TM* com sua respectiva incerteza) com o Número Digital gerado pelo sensor, deve-se aplicar algum modelo de transferência radiativa (como por exemplo, o 6S), de tal maneira que transforme/converta os valores de FR de superfície em FR no topo da atmosfera. Apenas depois desta "correção" é feita a comparação com o ND, onde é obtido o Coeficiente de Calibração, que é principal objetivo da calibração radiométrica.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro (processo 560253/2010-9).

Referências Bibliográficas

Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT)/Instituto Nacional de Metrologia (INMETRO). **Guia para a expressão da incerteza de medição:** terceira edição brasileira. 3. ed. Rio de Janeiro: ABNT, INMETRO, 2003. 120 p.

Chander , G.; Markham, B. L.; Helder, D. L. Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. **Remote Sensing of Environment**, v.113, n.5, p.893-903, 2009.

Committee on Earth oOservation Satellites **(**CEOS**). Name of site:** Tuz Gölü. 2009. Disponível em: <http://calval.cr.usgs.gov/PDF/QA4EO-WGCV-IVO-CSP-008_TG.pdf >. Acesso em: 13 nov. 2012.

Joint Committee for Guides in Metrology (JCGM). **Evaluation of measurement data – Supplement 1 to the "Guide to the expression of uncertainty in measurement" – Propagation of distributions using a Monte Carlo method**. JCGM 101:2008. 1. ed. 2008. Disponível em: **<**http://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_101_2008_E.pdf> Acesso em: 22 out. 2012.

National Aeronautics and Space Administration (NASA). **Spectral Characterization.** 2012. Disponível em: < http://landsathandbook.gsfc.nasa.gov/inst_cal/prog_sect8_2.html>.Acesso em: 22 out. 2012.

Pinto, C. T. **Avaliação das incertezas na caracterização de superfícies de referência para calibração absoluta de sensores eletroópticos**. 2011. 167 p. (sid.inpe.br/mtc-m19/2011/03.30.18.09-TDI). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2011. Disponível em: <http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/39E3LH2>. Acesso em: 22 out. 2012.

Ponzoni, F. J.; Junior, J. Z.; Lamparelli, R. A. C. **Calibração absoluta de sensores orbitais:** conceituação, principais procedimentos e aplicação. São José dos Campos: Parente, 2007. 64 p.