



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2013/08.13.15.47-RPQ

CALIBRAÇÃO CRUZADA DE SENSORES DE OBSERVAÇÃO DA TERRA

Cibele Teixeira Pinto
Flávio Jorge Ponzoni
Ruy Morgado de Castro

Relatório de Pesquisa em Cali-
bração Radiométrica de Sensores
Eletro-ópticos.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3EL22DE>>

INPE
São José dos Campos
2013

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)

Luciana Manacero - Serviço de Informação e Documentação (SID)



Ministério da
**Ciência, Tecnologia
e Inovação**



sid.inpe.br/mtc-m19/2013/08.13.15.47-RPQ

CALIBRAÇÃO CRUZADA DE SENSORES DE OBSERVAÇÃO DA TERRA

Cibele Teixeira Pinto
Flávio Jorge Ponzoni
Ruy Morgado de Castro

Relatório de Pesquisa em Cali-
bração Radiométrica de Sensores
Eletro-ópticos.

URL do documento original:

<<http://urlib.net/8JMKD3MGP7W/3EL22DE>>

INPE
São José dos Campos
2013

RESUMO

Quando se deseja utilizar imagens de sensores orbitais ou aerotransportados na caracterização espectral de objetos, no estabelecimento de relações entre suas propriedades físico-químicas com dados contidos nessas imagens ou comparação de dados entre diferentes sensores, é fundamental a realização da calibração radiométrica, que tem como objetivo estabelecer uma relação entre os Números Digitais (*NDs*) presentes nas imagens com os valores de radiância espectral efetivamente medido pelo sensor. Vários métodos pós-lançamento de calibração radiométrica de sensores orbitais têm sido propostos. Entre eles, destacam-se dois, que são conhecidos como: calibração absoluta e calibração cruzada. A calibração absoluta é realizada de forma direta, criando-se uma relação de conversão entre o *ND* e o valor da grandeza física que chega ao sensor. A calibração cruzada envolve dois sensores, sendo que um dos sensores é calibrado em relação ao outro, que é então denominado como sensor de referência. No Brasil, as atividades de calibração de sensores têm sido focadas na calibração absoluta. Entretanto, apesar de diversos sensores orbitais terem sido calibrados pelo método de calibração cruzada em todo mundo, ele ainda foi pouco explorado no país. Assim, com o objetivo de compreender melhor o método, o presente trabalho descreve como é realizada a calibração cruzada e discute algumas fontes de incertezas e os seus valores esperados em sua execução.

EARTH OBSERVATION SENSORS CROSS CALIBRATION

ABSTRACT

When the spectral characterization of different targets from airborne or orbital data and its consequent relationship with geophysical or biophysical parameters is demanded, it is essential to perform the sensor radiometric calibration, which aims to establish a relationship between the Digital Numbers (DNs) to spectral radiance effectively measured by the sensor. Several methods of post-launch satellite sensors radiometric calibration have been proposed. This work highlights two known methods: absolute calibration and cross-calibration. The absolute calibration is performed directly, creating a conversion ratio between DN and values of a physical quantity that is effectively measured by the sensor. The cross-calibration involves two sensors. One of them is calibrated according to the other that is considered as a reference. In Brazil, sensor calibration activities have been focused on the absolute calibration. However, even several orbital sensors have been available by the international community; cross-calibration should also be improved in Brazil. This paper describes some important aspects of orbital cross-calibration and discusses some sources of uncertainties.

SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
1 INTRODUÇÃO	1
2 CALIBRAÇÃO RADIOMÉTRICA	4
3 INCERTEZAS NA CALIBRAÇÃO	6
4 CALIBRAÇÃO CRUZADA	9
4.1 Função de Resposta Espectral	11
4.2 Fator de Ajuste de Bandas	13
4.3 Superfície de Observação: Pares de Imagens	18
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	20
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	22

1 INTRODUÇÃO

Para que seja possível detectar e quantificar as mudanças no ambiente terrestre através de sensores de observação da Terra é necessário que estes sensores forneçam dados consistentes das características da superfície da Terra (CHANDER *et al.*, 2004). Para que isto ocorra, é realizada a calibração radiométrica do sensor, que tem por objetivo relacionar o Número Digital (*ND*) existente na imagem com valores físicos, como a radiância ou a reflectância. O êxito na utilização de sensores depende da frequência e da maneira como os dados de calibração são acessíveis à comunidade de usuários.

A aquisição de dados orbitais de uma forma contínua e abrangente começou com o lançamento do satélite Landsat 1 (*Land Remote Sensing Satellite*), em 1972 (MARKHAM e HELDER, 2012). No dia 11 de fevereiro de 2013 foi lançado o oitavo satélite da série, denominado Landsat 8. Este satélite é mais avançado que seus antecessores e possui dois instrumentos imageadores: o OLI (*Operational Land Imager*) e o TIRS (*Thermal InfraRed Sensor*) (IRONS *et al.*, 2012). A utilização dos dados dos sensores a bordo das plataformas da série de satélites Landsat tem sido um exemplo, pois a difusão e a assídua atualização de seus dados de calibração têm possibilitado aos usuários estabelecer correlações entre os valores radiométricos e os *NDs* encontrados nas imagens (MARKHAM e HELDER, 2012).

A inserção do Brasil dentro do grupo de países que possuem sistemas sensores espaciais de sensoriamento remoto iniciou-se com o estabelecimento do Programa CBERS – *China Brazil Earth Resources Satellite*. Este é um importante programa estabelecido entre o Brasil e a China que visa o projeto, a construção, o lançamento e a operação de satélites de Recursos Terrestres (EPIPHANIO, 2011), sendo que o CBERS-3/4 tem previsão de lançamento em agosto de 2013. A carga útil imageadora a bordo dos satélites CBERS-3/4 contém (EPIPHANIO, 2011): (a) Câmera Pancromática e Multiespectral (PAN); (b) Câmera Multiespectral Regular (MUX); (c) Imageador Multiespectral e Termal (IRS); e (d) Câmera de Campo Largo (WFI). O Brasil é

responsável pelas construções das câmeras MUX e WFI, enquanto a China é responsável pelos IRS e PAN.

Existem diversos métodos para realizar a calibração radiométrica de sensores que após o seu lançamento. Dinguirard e Slater (1999) consideram dois métodos de calibração: a absoluta e a relativa. A calibração absoluta é aquela fundamentada na utilização de uma superfície de referência em campo, onde é calculado a radiância no topo da atmosfera proveniente de uma determinada superfície e, depois é realizada a comparação com o número digital (*ND*) medido pelo sensor. Desta forma, calibração absoluta é realizada de forma direta, criando-se uma relação de conversão entre o *ND* e o valor da grandeza física que é efetivamente medida pelo sensor. Este método de calibração absoluta, que se fundamenta em superfícies de referências no solo, têm sido bastante utilizado para os sensores orbitais como o *Thematic Mapper* (TM) (SLATER *et al.*, 1987), o *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+) (THOME, 2001), o *Infrared Multispectral Scanner* (IRMSS) do CBERS-2 (PONZONI *et al.*, 2006), o *High Resolution CCD Camera* (CCD) do CBERS-2 (PONZONI *et al.*, 2008), entre outros.

A segunda categoria de métodos é chamada calibração cruzada (*cross-calibration*) e consiste em comparar medidas entre sensores quando estão expostos a um mesmo nível de radiação. Neste caso um dos sensores é adotado como referência. Diversos sensores foram calibrados tendo como referência os sensores abordo do satélite Landsat. Chander *et al.* (2004), por exemplo, realizam a calibração radiométrica do sensor *Advanced Land Imager* (ALI) abordo do *Earth Observing 1* (EO-1), tendo como referência o sensor *Enhanced Temática Mapper Plus* (ETM+) (Landsat 7). Segundo Chander *et al.* (2013c) a calibração cruzada é necessária por diversas razões:

- (a) cada vez mais os dados provenientes de vários sensores são utilizados para adquirir uma compreensão mais completa dos processos da superfície terrestre para uma variedade de escalas. No entanto, tem havido dificuldades em colocar vários sensores em uma escala radiométrica absoluta. Isto ocorre, por que na calibração absoluta são realizados trabalho de campo em áreas na superfície terrestre com equipamentos adequados, o que gera altos custos na realização

deste procedimento de calibração. Assim, a utilização da calibração cruzada traz consigo a vantagem de reduzir os custos gerais;

- (b) a continuidade dos dados exige consistência na qualidade dos dados das imagens adquiridas por diferentes sensores imageadores. A calibração cruzada é a única solução viável para colocar os sensores semelhantes e sensores diferentes em uma escala radiométrica comum, proporcionando um papel importante na continuidade de missão, interoperabilidade e de fusão de dados;
- (c) a calibração cruzada é crítica quando o sensor não possui dispositivos internos para realizar a calibração *onboard* ou onde calibrações *vicarious* (calibrações utilizando referência em campo) são limitados; e
- (d) a calibração cruzada facilita a coordenação das observações de diferentes sensores, permitindo a plena exploração de suas resoluções espaciais, amostragem temporal e conteúdos de informações de forma abrangente para acompanhar os processos da superfície em amplas escalas em termos de tempo e espaço.

No Brasil, as atividades de calibração de sensores têm focado na calibração absoluta e, lentamente, este método de calibração tem-se desenvolvido no país. Como exemplos de trabalhos realizados por brasileiros, destacam-se: Ponzoni *et al.* (2006) e Ponzoni *et al.* (2008). Entretanto, apesar de diversos sensores orbitais terem sido calibrados pelo método de calibração cruzada (CHANDER *et al.*, 2004; THOME *et al.*, 2003; TEILLET *et al.*, 2006), ele foi pouco explorado no país. Assim, com o objetivo de compreender melhor o método, para poder aplicá-lo no futuro, o presente trabalho descreve como é realizada a calibração cruzada e discute as fontes de incertezas esperadas na execução deste método. O método de calibração cruzada descrito pode ser aplicado em qualquer sistema sensor de observação da Terra. Entretanto, para melhor atender o Programa Espacial Brasileiro, em algumas ocasiões será utilizada como exemplo a Câmera Multiespectral Regular (MUX), que estará a bordo do satélite CBERS-3.

2 CALIBRAÇÃO RADIOMÉTRICA

Quando os sensores 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). Cada *ND* está associado a um nível de cinza da imagem, que indica um brilho diferente da superfície. Essa quantização do número de níveis de cinza é expressa em função do número de dígitos binários (bits) necessários para armazenar o valor do nível máximo, sendo este valor uma potência de 2 (dois). Em geral a quantização do sinal está diretamente associada à qualidade da informação gerada pelo sensor, ou seja, sistemas sensores de baixa quantização podem perder informações. Os sensores *TM* (*Thematic Mapper*) e o *ETM+* (*Enhanced Thematic Mapper Plus*), por exemplo, possuem maior resolução radiométrica quando comparado ao *MSS* (*Multispectral Scanner*), visto que o *MSS* foi quantizado em 7 bits, ou 128 níveis de cinza, e os sensores *TM* e *ETM+* foram quantizados em 8 bits, ou 256 níveis de cinza (CHANDER *et al.*, 2009).

Esses *NDs*, no entanto, não representam as unidades físicas, como por exemplo, a radiância ou a temperatura proveniente dos objetos da superfície terrestre e, portanto, o *ND* de um determinado sensor não tem relação com o *ND* de outro sensor (CHANDER *et al.*, 2013a). Quando se utiliza estes valores para caracterizações espectrais, associação de informações de sistema sensores com as propriedades físico-químicas ou a comparação de dados dos diferentes sensores, é necessária a conversão destes números digitais para valores de grandezas físicas. Para tanto, é realizada a calibração do sensor, que tem como objetivo converter os *NDs* em grandezas físicas, ou seja, consiste em obter os coeficientes que determinarão a transformação dos *NDs* em radiância. Em geral os sensores são construídos para que a relação entre *ND* e a radiância seja linear. Esta relação pode ser escrita por (TEILLET *et al.*, 2001; TEILLET *et al.*, 2006):

$$ND = G \times L + ND_0 \quad (1)$$

onde: ND é o número digital; G é o valor de ganho; L é o valor de radiância espectral na abertura do sensor [$\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$]; e ND_0 é o número digital correspondente a radiância igual a zero. Esta equação relaciona cada banda espectral do sensor com o sinal de saída.

Fazendo:

$$\Delta_{ND} = ND - ND_0 = G \times L \quad (2)$$

Então, a radiância espectral na abertura do sensor é dada por:

$$L = \frac{\Delta_{ND}}{G} \quad (3)$$

Para a transformação dos valores de radiância em valores de reflectância no topo da atmosfera (TOA) é aplicada a equação (TEILLET *et al.*, 2001; TEILLET *et al.*, 2006):

$$\rho = \frac{\pi \times L \times d^2}{E_0 \times \cos \theta} \quad (4)$$

onde: E_0 é a irradiância solar no topo da atmosfera; d é a distância Terra-Sol em unidades astronômicas no dia de ocorrência de L e de E_0 ; θ é o ângulo zenital solar.

Combinando a **Equação 3** e **4**, temos que:

$$\Delta_{ND} = \frac{\rho \times G \times E_0 \times \cos \theta}{\pi \times d^2} \quad (5)$$

3 INCERTEZAS NA CALIBRAÇÃO

Quando se divulga o resultado de uma medição de uma grandeza qualquer é imprescindível que seja dada indicação quantitativa da qualidade do resultado. Isso é necessário, pois as medidas de uma grandeza apresentam incertezas intrínsecas. Sendo assim, a expressão completa que representará o mensurando deverá estimar o valor da grandeza e estabelecer o intervalo de confiança no qual ela se encontra, ou seja, é necessário fornecer a incerteza de medição.

A incerteza final de uma medição é proveniente de combinações de várias fontes de incerteza, pois as medições são influenciadas por agentes metrológicos, tais como: método de medição, operador, condições ambientais, a amostra e o equipamento (MENDES e ROSÁRIO, 2005). Assim, a incerteza final de uma medição deve levar em consideração, além da flutuação estatística dos dados, os aspectos experimentais da medição. Com isto, as incertezas são agrupadas em duas categorias, em função do método utilizado para estimar seu valor: Tipo A, que são as incertezas avaliadas por processos estatísticos; e Tipo B as incertezas avaliadas por processos não estatísticos.

Além disso, medidas de grandezas físicas podem ser classificadas em duas categorias: medidas diretas e indiretas. A medida direta é o resultado da leitura de uma magnitude mediante a utilização de um equipamento de medição. Uma medida indireta é a que resulta da aplicação de uma relação matemática que relaciona a grandeza a ser obtida com outras grandezas.

No caso das medidas diretas, pode-se realizar N vezes uma medição. Com isto, obtém-se o valor médio e o desvio padrão na média das N medições. O valor médio é a melhor estimativa para o valor da grandeza e o desvio padrão do valor médio é a incerteza estatística (Tipo A) (ABNT e INMETRO, 2003; VUOLO, 1996).

Nas medições indiretas utiliza-se o tratamento estatístico conhecido como Incerteza Combinada (ou Propagação das Incertezas). Por exemplo, uma grandeza f pode ser obtida a partir de medidas de diversas grandezas primárias, de acordo com a função:

$$f = f(a, b, c, \dots) \quad (6)$$

onde: f é a grandeza obtida indiretamente, definida em função das grandezas a, b, c, \dots , que possuem incertezas associadas a elas.

Se existem correlações entre as grandezas primárias, ou seja, as variáveis a, b, c, \dots são dependentes, a incerteza de f é dada por (VUOLO, 1996; ABNT e INMETRO, 2003; HELENE e VANIN, 1981):

$$\sigma_f^2 = \left(\frac{\partial f}{\partial a}\right)^2 \times \sigma_a^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial b}\right)^2 \times \sigma_b^2 + \left(\frac{\partial f}{\partial c}\right)^2 \times \sigma_c^2 + \dots + COV \quad (7)$$

onde: $\frac{\partial f}{\partial a}$, $\frac{\partial f}{\partial b}$ e $\frac{\partial f}{\partial c}$ são a dependência da grandeza secundária, f , em relação as grandezas primária a, b, c, \dots , respectivamente (também chamados de coeficientes de sensibilidade); $\sigma_a, \sigma_b, \sigma_c, \dots$ são as incertezas das grandezas primárias a, b, c, \dots , respectivamente; e COV são as covariâncias, que representam as dependências entre as grandezas primárias.

No caso específico da calibração radiométrica de sensores, existem muitas fontes de incertezas, do Tipo A e do Tipo B, associadas e elas são difíceis de quantificar.

De maneira geral, entre as fontes Tipo A da incerteza que devem ser consideradas encontram-se a repetibilidade e a reprodutibilidade (INMETRO, 2012). É importante lembrar que as incertezas estatísticas (Tipo A) estão relacionadas ao desvio padrão da média, ou seja, diminuem com a raiz quadrada do número de medições. Entretanto, não se pode realizar um número muito alto de medições, pois isto tem impacto em tempo e no custo das medições e, eventualmente, correções a serem efetuadas devido às alterações das condições experimentais. Assim ao estabelecer o número de medições e testes de um mensurando (grandeza), sempre é levada em consideração a relação custo/benefício.

O conjunto de informações para a avaliação Tipo B da incerteza deve ser baseada no conhecimento geral e nas informações disponíveis sobre as possíveis variabilidades da grandeza. Deste modo, alguns testes podem ser realizados em condições especiais (típicas) e as incertezas obtidas podem ser utilizadas em situações semelhantes.

Biggar *et al.* (1994) analisaram algumas das incertezas associadas a três métodos de calibração absoluta de um sistema sensor, na região espectral situada entre 0,4 a 1,1 μm . Os resultados demonstraram que a incerteza final associada a todas as fontes de incerteza foi de aproximadamente 5%.

Pinto (2011) avaliou as incertezas no processo de avaliação da uniformidade radiométrica de uma superfície de referência para calibração de sensores. As incertezas nas medições radiométricas em campo ficaram entre 3% e 8%, na região espectral de 350 a 2500 nm, exceto nas regiões de absorção da água (em torno de 1,4 e 1,9 μm) e a região muito ruidosa (comprimentos de onda maior que 2,4 μm).

Chander *et al.* (2013b) avaliaram algumas incertezas inerentes ao processo da calibração cruzada, incluindo as contribuições de incertezas devido as diferentes respostas espectrais, resolução espectral e resoluções espaciais. As incertezas relacionadas à resolução espectral ficaram em torno de 0,25%, as incertezas devido às diferenças na Função de Resposta Espectral (ver **Seção 4.1**) ficaram em torno de 2,5% e o efeito da resolução espacial gerou incerteza de 0,1%. Segundo os mesmo autores, as incertezas totais na calibração cruzada foram: 2,03% na banda do azul (400 a 500 nm); 2,38% na banda do verde (500 a 600 nm); 0,72% na banda do vermelho (600 a 700 nm); 0,58% na banda do infravermelho próximo (700 a 900 nm); 0,48% na banda do infravermelho médio/SWIR1 (1500 a 1800 nm); e 0,75% na banda do infravermelho médio/SWIR2 (2000 a 2400 nm).

Na próxima seção é descrito como é realizada a calibração cruzada, foco deste trabalho, são listados alguns fatores importantes que precisam ser levados em consideração e são discutidas algumas fontes de incertezas esperadas na execução deste método de calibração.

4 CALIBRAÇÃO CRUZADA

A calibração cruzada consiste em comparar a resposta entre sensores quando estão expostos a um mesmo sinal de radiação. Este método, portanto, envolve a utilização de dois sensores, sendo que um deles é adotado como referência e, por isso, deve estar calibrado. Comparando os dados obtidos pelos sensores, para os mesmos alvos, pode-se estabelecer uma relação entre eles, sendo que o valor de radiância é obtido a partir do sensor calibrado. Em geral, quanto mais próximas às características dos sensores, mais rápida e fácil se tornará a intercalibração. Na **Figura 1** é possível observar o fluxograma deste método.

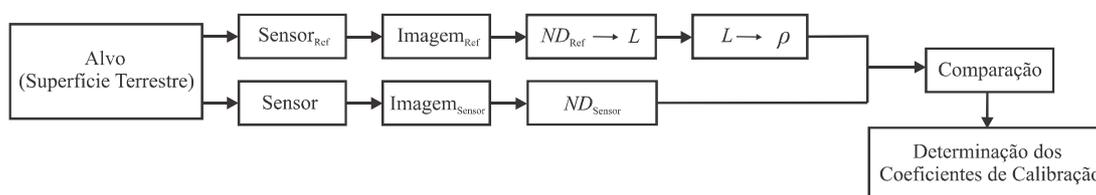


Figura 1: Fluxograma da calibração cruzada.

Na calibração cruzada são adquiridas imagens de uma mesma cena com dois sensores (o de referência e o que se deseja calibrar). Em seguida, a imagem do sensor de referência passa por duas etapas de processamento. A primeira refere-se à transformação dos ND das imagens em valores radiância, através da aplicação dos coeficientes de calibração conhecidos e específicos para cada um dos sensores (**Equação 1**). A segunda etapa refere-se conversão dos valores de radiância em reflectância, através da **Equação 4**. Após a realização destas duas etapas, é realizada a comparação entre o ND gerado pelo sensor que se deseja calibrar e os valores de reflectância do sensor de referência. Como as imagens são de uma mesma cena, isso implica que os sensores foram expostos a mesma intensidade de radiação eletromagnética, assim a comparação é possível.

Diversos sensores orbitais foram calibrados mediante a aplicação deste método. Teillet *et al.* (2001), por exemplo, utilizaram esse método para calibrar as bandas do espectro refletido do sensor TM (Landsat 5), tendo como referência o sensor ETM+ (Landsat 7). A calibração foi realizada no período em que os satélites se encontravam no modo *tandem*, com órbitas cuja aquisição das imagens é aproximadamente

simultânea. Chander *et al.* (2004) realizaram o método da calibração cruzada para calibrar radiometricamente o EO-1 (ALI) em relação ao bem calibrado *Enhanced Thematic Mapper Plus* (ETM+).

Para cada sensor, tanto para o de referência quanto para o que se deseja calibrar, pode-se escrever a **Equação 5**. Para o sensor de referência tem-se:

$$\Delta_{ND_{ref}} = \frac{\rho_{ref} \times G_{ref} \times (E_0 \times \cos \theta)_{ref}}{\pi \times d^2} \quad (8)$$

Como o sensor de referência precisa estar calibrado para realizar a calibração cruzada, as variáveis dele da **Equação 8**, $\Delta_{ND_{ref}}$, ρ_{ref} , G_{ref} e $(E_0 \times \cos \theta)_{ref}$, são conhecidas.

Para o sensor que se deseja calibrar, tem-se:

$$\Delta_{ND_{sensor}} = \frac{\rho_{sensor} \times G_{sensor} \times (E_0 \times \cos \theta)_{sensor}}{\pi \times d^2} \quad (9)$$

A variável $(E_0 \times \cos \theta)_{sensor}$ também é conhecida, sendo que E_0 é o resultado integral da irradiância pela Função de Resposta Espectral (FRE) do sensor. Por fim, o ângulo zenital solar, θ , pode ser determinado com base no dia e horário de obtenção da imagem pelo sensor.

Assim, se as funções de respostas espectrais (ver **Seção 4.1**) das bandas dos dois sensores forem, pelo menos, semelhantes, pode-se calcular a razão da **Equação 8** com a **Equação 9**, obtendo-se:

$$\frac{\Delta_{ND_{ref}}}{\Delta_{ND_{sensor}}} = \frac{\rho_{ref} \times G_{ref} \times (E_0 \times \cos \theta)_{ref}}{\rho_{sensor} \times G_{sensor} \times (E_0 \times \cos \theta)_{sensor}} \quad (10)$$

Em relação os valores de reflectância, ρ_{ref} e ρ_{sensor} , em geral, eles não são iguais devido principalmente às diferenças na Função de Resposta Espectral (FRE) das bandas dos sensores em questão. Assim, pode-se determinar um fator de ajuste das bandas espectrais (TEILLET *et al.*, 2007):

$$B = \frac{\rho_{ref}}{\rho_{sensor}} \quad (11)$$

Este fator de ajuste, B , pode ser determinado levando em consideração as duas FRE dos sensores (detalhes na **Seção 4.2**). Com isto, as variáveis que passam a ser desconhecidas da **Equação 10** são: G_{sensor} e $\Delta_{ND_{sensor}}$. Lembrando que o $\Delta_{ND_{sensor}}$ é determinado segundo a **Equação 2**, onde o ND do sensor a ser calibrado é conhecido. Portanto, as duas únicas variáveis desconhecidas da **Equação 10** são o ganho do sensor que se deseja calibrar e o número digital correspondente a radiância igual à zero, respectivamente, G_{sensor} e ND_0 . Estes por sua vez são exatamente os coeficientes de calibração do sensor que se pretende determinar, que permite transformar o ND presente na imagem em radiância (**Equação 1**).

Chander *et al.* (2013a) listam alguns fatores importantes que precisam ser levados em consideração na calibração cruzada. Neste trabalho, três fatores são descritos detalhadamente a seguir: (a) Função de Resposta Espectral; (b) Fator de Ajuste de Bandas; e (c) Superfície de Observação (Pares de Imagens).

4.1 Função de Resposta Espectral (FRE)

Os sensores de observação dos recursos naturais terrestres são construídos com diferentes bandas espectrais, sendo que cada banda têm aplicações distintas em estudos de sensoriamento remoto. Bandas que operam na faixa do espectro eletromagnético do visível (400 a 700 nm) são comuns em sensores de observação da Terra, pois possibilitam diversas aplicações. Em relação as característica espectral de um sensor existem três fatores importantes: abrangência espectral, amostragem espectral e largura espectral de banda. A abrangência espectral é a porção total do espectro eletromagnético que o sensor é capaz de cobrir. A amostragem espectral refere-se ao número de bandas em que a abrangência espectral é segmentada. A largura espectral de banda é a abrangência espectral de cada uma das bandas, ou seja, o intervalo de comprimentos de onda das bandas espectrais. Assim, geralmente, quanto mais bandas em um sensor, e

quanto menor for a largura espectral de bandas, melhor a capacidade do sensor em discriminar objetos a partir de suas propriedades espectrais.

As bandas espectrais, em geral, diferem-se significativamente entre os sensores, mesmo para as bandas construídas para operar em uma mesma região do espectro eletromagnético (CHANDER *et al.*, 2013a). Com isto, as bandas fornecem medidas substancialmente diferentes e que não são diretamente comparáveis (TEILLET *et al.*, 2007). Isto ocorre, por que cada uma das bandas dos sensores tem uma Função de Resposta Espectral (FRE). Os parâmetros importantes da FRE são: o comprimento de onda central, λ_c , ao qual o sensor é sensível, que corresponde ao comprimento de onda do máximo da curva e a largura a meia altura desta resposta (*Full Width at Half Maximum* – FWHM), que fornece uma ideia da resolução espectral da banda (PINTO *et al.*, 2009). Assim, através da FRE são obtidos os parâmetros de posicionamento e da largura de cada banda do sensor. A câmara MUX, por exemplo, vai coletar imagens separadas em 4 (quatro) *bandas espectrais, cobrindo o comprimento de onda de 450 a 890 nm* (azul até o infravermelho próximo). Já o sensor OLI tem 9 (nove) bandas espectrais (IRONS *et al.*, 2012). As bandas espectrais da câmara MUX vão operar em região do espectro eletromagnético próximas as bandas 2, 3, 4 e 5 do sensor OLI (**Tabela 1**). Apesar disto, a FRE das bandas são diferente, como pode ser observado na **Figura 2**.

Tabela 1: Bandas Espectrais dos sensores OLI e MUX.
Fonte: Irons *et al.* (2012) e Scaduto *et al.* (2009)

OLI			MUX		
#	Largura da Banda (μm)	Resolução Espacial	#	Largura da Banda (μm)	Resolução Espacial
B1	0,433 - 0,453	30			
B2	0,450 - 0,515	30	B5	0,450 - 0,520	20
B3	0,525 - 0,600	30	B6	0,520 - 0,590	20
B4	0,630 - 0,680	30	B7	0,630 - 0,690	20
B5	0,845 - 0,885	30	B8	0,770 - 0,890	20
B6	1,560 - 1,660	30			
B7	2,100 - 2,300	30			
B8	0,500 - 0,680	15			
B9	1,360 - 1,390	30			

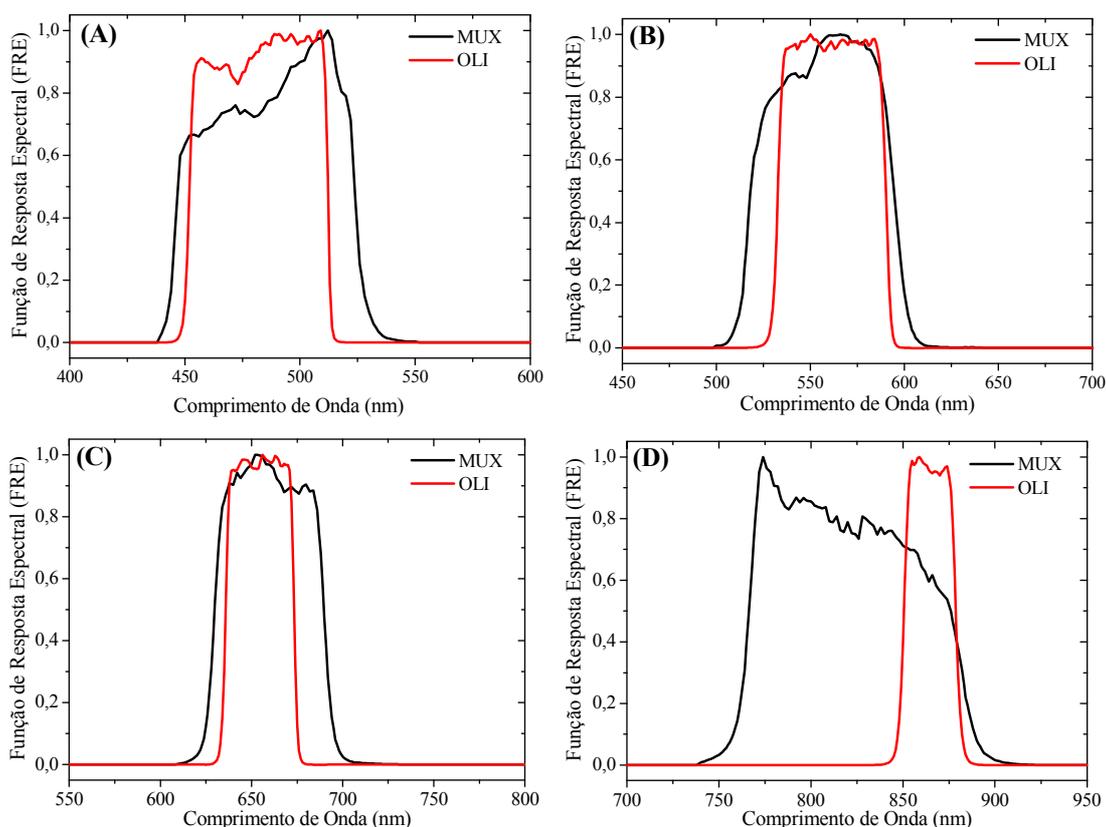


Figura 2: Função de Resposta Espectral dos sensores OLI e MUX. Em (a) banda azul; (b) banda verde; (c) banda vermelho; e (d) banda NIR.
 Fonte: NASA (2013) e Ponzoni (2013).

Como mencionado na **Seção 3**, os resultados obtidos por Chander *et al.* (2013b) indicam que a incerteza espectral é a mais dominante (aproximadamente 2,5%), em comparação com outras incertezas apresentadas em seu trabalho. Portanto, o efeito da FRE precisa ser quantificado e compensado para evitar grandes incertezas nos resultados da calibração cruzada.

4.2 Fator de Ajuste de Bandas

Quando os sistemas sensores multi-espectrais registram as intensidades da REM, eles produzem um sinal proporcional à variação da intensidade do fluxo radiante incidente no sensor, que é quantificado em um número digital (ND). Entretanto, o *ND* fornecido pelo sensor em cada banda espectral não depende apenas da quantidade de energia incidente, mas também da FRE da banda, uma vez que a radiância que chega a sua óptica é “sentida” dentro de uma região espectral segundo critério de pesos expresso

pelas próprias FREs. Desta forma, o valor do Fator de Reflectância (FR) para cada banda do sensor é proporcional ao valor do FR em todos os comprimentos de onda ponderada pela FRE desta banda, segundo a **Equação 12** (PINTO *et al.*, 2013):

$$FR_{banda} = \frac{\int_0^{\infty} FR_{\lambda} \times FRE_{\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} FRE_{\lambda} d\lambda} \quad (12)$$

onde: FR_{banda} é o FR ponderado para cada uma das bandas e FR_{λ} é o FR que incidente no sensor, em todos os comprimentos de onda (λ).

Devido a **Equação 12**, os valores de reflectância fornecidos pelas bandas espectrais de dois sensores serão diferentes, mesmo para as bandas que atuam numa mesma região do espectro eletromagnético devido a FRE desta banda. Assim, para a realização mais precisa da calibração cruzada é necessário corrigir as diferenças entre as FRE dos sensores (CHANDER *et al.*, 2013c). A metodologia utilizada por Teillet *et al.* (2001) incorpora ajustes devido às diferenças entre as bandas espectrais dos sensores Landsat (ETM+ e TM). Estas diferenças intrínsecas entre os dois sensores, causadas pelas distintas FREs (ver **Figura 2**), frequentemente, são compensadas por meio do cálculo do fator de ajuste das bandas espectrais, conforme **Equação 11**. Para determinar este fator de ajuste, é levado em consideração o perfil espectral do alvo e a FRE das bandas dos dois sensores. O perfil espectral do alvo é obtido através do conhecimento prévio do comportamento espectral do alvo. Pode-se utilizar, por exemplo, medições radiométricas de campo da superfície que serão utilizadas para realizar a calibração cruzada, conforme descrito por Teillet *et al.* (2001), que utilizaram as superfície Railroad Valley Playa e Niobrara localizadas nos Estados Unidos.

Na **Figura 3** é apresentado o gráfico do Fator de Reflectância (FR) de duas superfícies em função do comprimento de onda juntamente com suas incertezas. As duas superfícies são: (a) uma área no Brasil, constituída por solo exposto (areias quartzosas) e (b) salar Tuz Gölü na Turquia, considerada pelo CEOS (*Global Earth Observation System of Systems*) como uma área oficial para calibração de sensores. Estas medidas foram obtidas em campo com espectrorradiômetros portáteis (PINTO *et al.*, 2012). As

regiões de absorção da água (em torno de 1,4 e 1,9 μm) e a região muito ruidosa (comprimentos de onda maior que 2,4 μm) não foram apresentadas no gráfico.

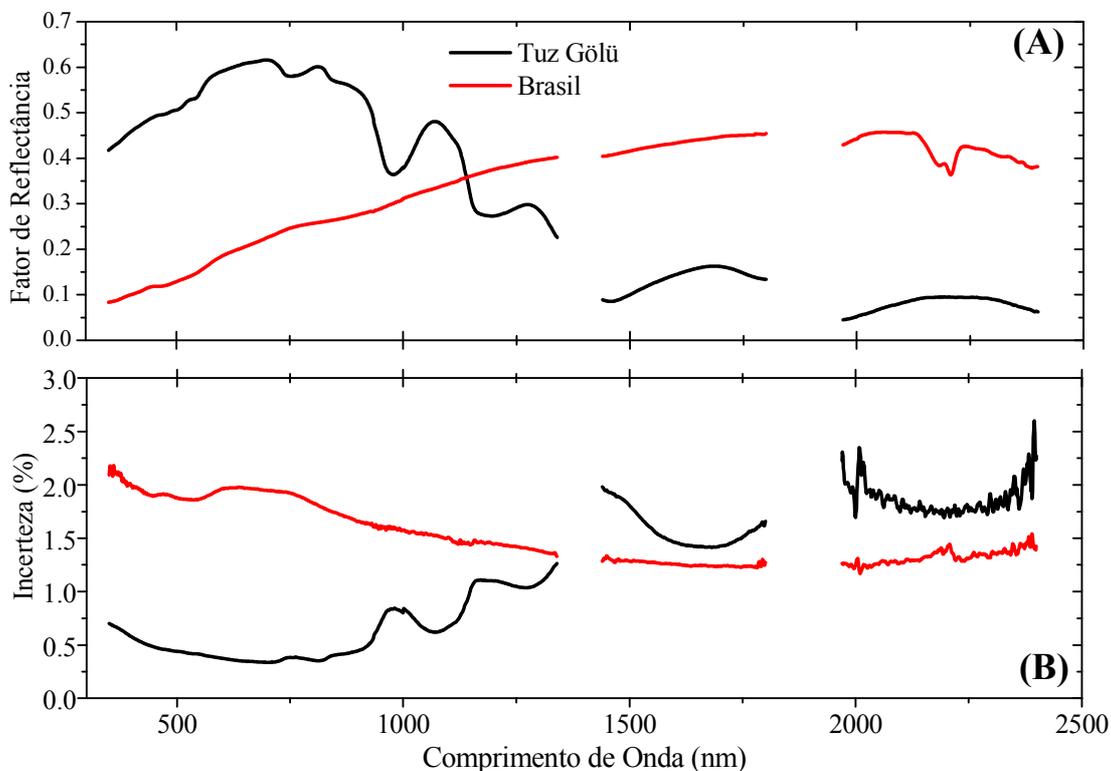


Figura 3: Em (a) Gráfico do FR da superfície médio em função do comprimento de onda. Em vermelho o FR da superfície no Brasil e em preto o FR do Tuz Gölü; em (b) as incertezas do FR médio em função do comprimento de onda das duas superfícies.

Com a FRE das bandas espectrais dos dois sensores (**Figura 2**) e as medições radiométricas do comportamento espectral dos alvos desejados (**Figura 3**) é possível simular qual o FR que cada banda espectral do sensor forneceria se eles fossem utilizados para determinar o FR do alvo, por meio da **Equação 12**. Nesta etapa de simulação é necessária muita atenção, principalmente em relação às estimativas das incertezas. A grandeza FR_{banda} (**Equação 12**), que é o valor do FR ponderado para cada uma das bandas do sensor é 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, conforme descrito na **Seção 3**. Embora a **Equação 12** 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 e INMETRO, 2003), ver **Equação 7**, é complexo. Essa complexidade se explica pela inconveniência de determinar as derivadas parciais (a dependência da grandeza secundária em relação às grandezas primárias) exigidas por este método, além das covariâncias existentes. Por este motivo Pinto *et al.* (2013) resolveram utilizar um método alternativo envolvendo simulações e a aplicação do Método de Monte Carlo.

Para fins demonstrativos, o fator de ajuste das bandas (**Equação 11**), B , foi determinado utilizando como exemplo os sensores MUX e OLI. Primeiramente foi calculado o FR_{banda} (**Equação 12**) dos sensores MUX e OLI. Para tanto, foi utilizado a FRE das bandas destes sensores (**Figura 2**) e o FR conhecido previamente de duas superfícies (**Figura 3**). Para as estimativas das incertezas do FR_{banda} foi usado o método de Simulação Monte Carlo, descrito com detalhes em Pinto *et al.* (2013). Conforme realizado por estes mesmos autores, optou-se por realizar 10000 iterações, sendo que em cada iteração foi utilizado um conjunto de variáveis gerado aleatoriamente. O resultado do histograma do fator de reflectância para a banda do verde (na faixa espectral de 500 a 600 nm) dos dois sensores e para a superfície de Tuz Gölü pode ser visualizado na **Figura 4**. Analisando esta figura pode-se verificar que os resultados para o fator de reflectância se distribuem de acordo com uma distribuição Gaussiana (Normal), sendo que dois parâmetros que caracterizam esta distribuição são: a média e o desvio padrão.

Após a obtenção do FR_{banda} e das suas incertezas foi, por fim, determinado o fator de ajuste, segundo a **Equação 11**. A incerteza deste fator é estimada através da **Equação 13** (conforme **Equação 7**). Na **Tabela 2** são apresentados os valores do FR simulados para cada uma das bandas dos sensores (MUX e OLI) e os valores de ajuste com suas respectivas incertezas absolutas e relativas, para as duas superfícies de referência (área no Brasil constituída por solo exposto e o salar Tuz Gölü na Turquia).

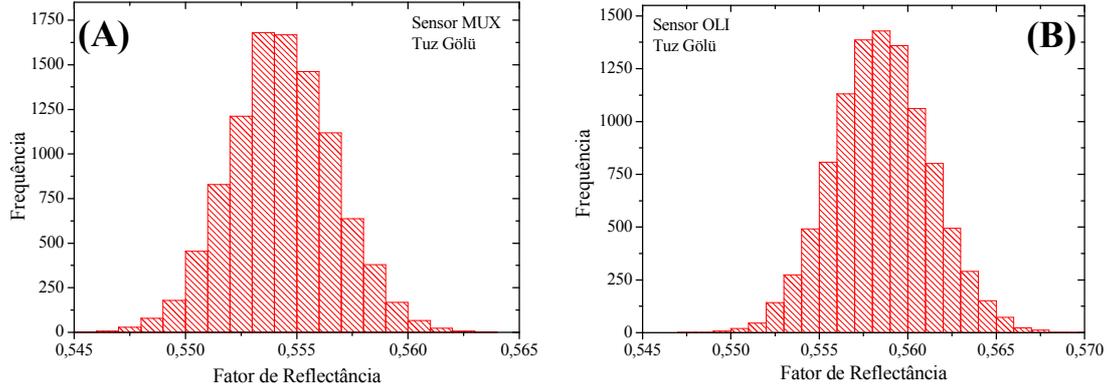


Figura 4: Histograma para o fator de reflectância na banda da região espectral do verde para o salar Tuz Gölü. Em (a) do sensor MUX; e (b) do sensor OLI.

$$\sigma_B = B \times \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\rho_{ref}}}{\rho_{ref}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{\rho_{sensor}}}{\rho_{sensor}}\right)^2} \quad (13)$$

onde: σ_B é a incerteza do fator de ajuste de bandas, B ; ρ_{ref} e ρ_{sensor} são, respectivamente, o fator de reflectância simulado do sensor de referência (OLI) e do sensor que se deseja calibrar (MUX); e $\sigma_{\rho_{ref}}$ e $\sigma_{\rho_{sensor}}$ são, respectivamente, a incerteza de ρ_{ref} e ρ_{sensor} .

Tabela 2: Simulação do FR nas bandas dos sensores MUX e OLI, junto com o fator de ajuste de bandas, B . As incertezas absolutas e relativas destas grandezas também são apresentadas.

Banda	Simulação FR _{MUX}	Incerteza (%)	Simulação FR _{OLI}	Incerteza (%)	B	Incerteza (%)
Tuz Gölü						
Azul	0,5035 ± 0,0024	0,48%	0,5006 ± 0,0027	0,54%	0,994 ± 0,007	0,70%
Verde	0,5544 ± 0,0024	0,43%	0,5585 ± 0,0028	0,50%	1,007 ± 0,007	0,70%
Vermelho	0,6090 ± 0,0025	0,41%	0,608 ± 0,003	0,49%	0,998 ± 0,006	0,60%
NIR	0,5834 ± 0,0019	0,33%	0,565 ± 0,004	0,71%	0,968 ± 0,008	0,83%
Superfície no Brasil						
Azul	0,1257 ± 0,0004	0,32%	0,1235 ± 0,0004	0,32%	0,982 ± 0,004	0,41%
Verde	0,1573 ± 0,0005	0,32%	0,1597 ± 0,0006	0,38%	1,015 ± 0,005	0,49%
Vermelho	0,2086 ± 0,0007	0,34%	0,2069 ± 0,0009	0,44%	0,992 ± 0,005	0,50%
NIR	0,2596 ± 0,0006	0,23%	0,2674 ± 0,0012	0,45%	1,030 ± 0,005	0,49%

Vale ressaltar, que neste caso foi utilizado o FR do alvo determinado em campo para estimar o fator de ajuste de banda, B . Entretanto, existem outros métodos para determinar o fator de ajuste das bandas, como realizado por Chander *et al.* (2013c), que utilizaram um sensor orbital hiperespectral, o sensor Hyperion que está a bordo do satélite *Earth Observing-1* (EO-1) para determinar o comportamento espectral do alvo.

4.3 Superfície de Observação: Pares de Imagens

Outra etapa importante no processo da calibração cruzada consiste em selecionar as imagens que contenham uma área comum para os dois sensores (THOME *et al.*, 2013) (**Figura 5**). Idealmente, os dados de ambos os sensores seriam coincidentes no tempo e no espaço e estariam sob as mesmas condições geométricas de iluminação (ângulo solar) e de observação (ângulo de visada). Entretanto, segundo Chander *et al.* (2013a) todas estas condições não ocorrem simultaneamente na realidade. Entretanto, para melhores resultados, dois fatores são importantes no momento de escolher os pares de imagens: (a) a área na superfície terrestre; e (b) diferença de tempo entre a aquisição das duas imagens (THOME *et al.*, 2003).

Para diminuir as incertezas causadas pelas diferenças entre as condições geométricas (de iluminação e observação), é aconselhável utilizar uma área uniforme e isotrópica. Diversas áreas na superfície terrestre com essas características têm sido usadas como locais de referência ou de teste para a calibração radiométrica de sensores imageadores após o seu lançamento. Chander *et al.* (2004), por exemplo utilizou Railroad Valley Playa e White Sands. No território brasileiro, os trabalhos de calibração absoluta de sensores orbitais vêm sendo conduzidas no extremo oeste do estado da Bahia. As superfícies utilizadas são constituídas por solo exposto (areias quartzosas), que atendem parcialmente os requisitos desejados para serem utilizadas em missões de calibração absoluta. Como exemplos de trabalhos realizados no Brasil, destacam-se: Ponzoni *et al.* (2006), Ponzoni *et al.* (2008) e Pinto (2011).

Outro fator que merece atenção são condições das duas medições (das duas imagens), que devem ser semelhantes e de preferência com um mínimo intervalo de tempo. Se as imagens forem adquiridas quase simultaneamente é possível assumir que a superfície e as condições atmosféricas não se alteraram durante esse tempo Chander *et al.* (2004). No trabalho de Teillet *et al.* (2001) a diferença entre as aquisições das duas imagens (do sensor TM e ETM+) foram de apenas 10 a 30 minutos e, portanto, os autores assumiram que a área e as condições atmosféricas não se alteraram significativamente.

Apesar disso, trabalhos mais atuais têm enfatizado métodos que não exigem coleta de dados dos sensores simultânea, podendo ter variação na obtenção das imagens. (THOME *et al.* 2013). Estes autores afirmam que as incertezas na calibração cruzada podem ser em torno de 1,5%, mesmo que os sensores não tenham pontos de vista coincidentes.

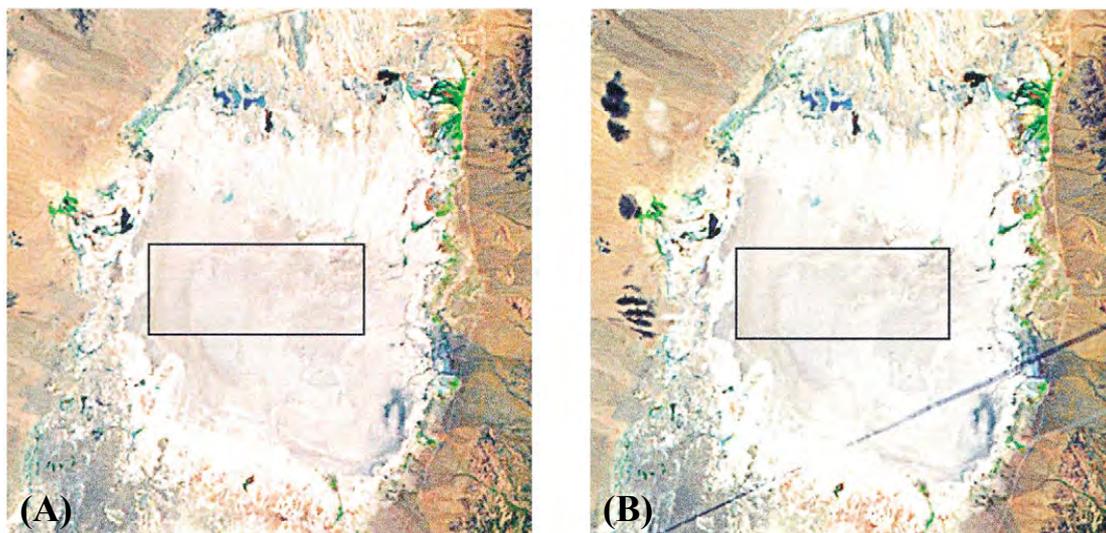


Figura 5: Dois pares de imagens do Railroad Valley Playa Nevada utilizados por Teillet *et al.* (2001) para a calibração cruzada dos sensores TM e ETM+. Em (a) imagem do sensor TM abordo do Landsat 5; em (b) imagem do sensor ETM+ abordo do Landsat 7. Os retângulos nas duas imagens representam a área efetivamente utilizada para a análise. As duas imagens foram obtidas no mesmo dia (1 de junho de 1999), como uma diferença de 10 a 30 minutos entre elas. Fonte: Teillet *et al.* (2001).

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Em diversas aplicações que utilizam imagens de sensores de observação da Terra, como a detecção e a quantificação de mudanças no ambiente da Terra, previsão do tempo, processos climáticos, compreensão e monitoramento do clima e mudanças na cobertura da terra, a calibração radiométrica surge como aspecto de fundamental relevância. Além disso, a calibração radiométrica de sensores de observação da Terra assume redobrada importância no momento em que o Brasil torna-se integrante do grupo de países que possuem sistemas sensores de sensoriamento remoto.

Existem vários métodos de calibração de sensores para verificar o comportamento linear da relação entre o *ND* presente na imagem do sensor e a radiância. Os dois métodos mais utilizados em sensores orbitais são: calibração absoluta e calibração cruzada. A calibração absoluta é realizada de forma direta, a partir da relação entre o valor da radiância que chega ao sensor e o número digital gerado por ele. Já a calibração cruzada, é realizada entre sensores, onde um deles é adotado como referencial.

No Brasil as atividades de calibração radiométrica têm sido focadas apenas na calibração absoluta. Apesar disso, é interessante incluir alternativas à calibração absoluta, visando minimizar custos com trabalhos dispendiosos em campo, maximizar a frequência da calibração de sensores do programa espacial brasileiro e sua exatidão. Além disso, é de extrema importância conhecer e entender outros métodos de calibração existentes, para poder ter embasamento no momento de escolha, ou seja, escolher com propriedade o método mais adequado.

Apesar de todas as vantagens citadas, é importante entender que, como todo método de calibração radiométrica, a calibração cruzada tem suas limitações. Vale ressaltar, por exemplo, as questões relacionadas às incertezas deste processo: a incerteza do sensor a ser calibrado sempre será maior do que o sensor de referência, pois as incertezas do sensor de referência são propagadas para o sensor que se deseja calibrar. Outra questão é que, idealmente, espera-se que os dados de ambos os sensores sejam coincidentes no tempo e no espaço e estejam sob as mesmas condições geométricas de iluminação (ângulo solar) e observação (ângulo de visada). Entretanto, na prática estas condições

são raramente atingidas simultaneamente. Apesar disso, o método é amplamente utilizado por equipes internacionais e constitui procedimento usual na calibração de sensores orbitais em todo o mundo.

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. 120p.

BIGGAR, S. F.; SLATER, P. N.; GELLMAN, D. I. Uncertainties in the in-flight calibration of sensors with reference to measured ground sites in the 0.4-1.1 mm range. **Remote Sensing of Environment**, v. 48, n. 2, p. 245-252, 1994.

CHANDER, G.; MEYER, D. J.; HELDER, D. L. Cross Calibration of the Landsat-7 ETM+ and EO-1 ALI sensor. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 42, n. 12, p. 2821–2831, 2004.

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.

CHANDER, G.; HEWISON, T.J.; FOX, N.; WU, X.; XIONG, X.; BLACKWELL, W. Overview of Intercalibration of Satellite Instruments. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing**, v.51, n.3, p. 1056-1080, 2013a.

CHANDER, G.; HELDER, D. L.; AARON, D.; MISHRA, N.; SHRESTHA, A. K. Assessment of Spectral, Misregistration, and Spatial Uncertainties Inherent in the Cross-Calibration Study. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing**, v.51, n.13, p. 1282-1296, 2013b.

CHANDER, G.; MISHRA, N.; HELDER, D. L.; AARON, D. B.; ANGAL, A; CHOI, T.; XIONG, X.; DOELLING, D. R. Applications of Spectral Band Adjustment Factors (SBAF) for Cross-Calibration. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing**, v.51, n.13, p. 1267-1281, 2013c.

DINGUIRARD, M.; SLATER, P. N. Calibration of space-multispectral imaging sensors: a review. **Remote Sensing of Environment**, v. 68, n. 3, p. 194-205, 1999.

EPIPHANIO, J. C. N. CBERS-3/4: características e potencialidades. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 15. (SBSR), 2011, Curitiba. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2011. p. 9009-9016. DVD, Internet. ISBN 978-85-17-00056-0 (Internet), 978-85-17-00057-7 (DVD). Disponível em: <<http://urlib.net/3ERPFQRTRW/3A4A6C5>>. Acesso em: 23 abr. 2013.

HELENE, O. A. M.; VANIN, V.R. **Tratamento estatístico de dados**: em física experimental. São Paulo: Edgard Blücher, 1981. 105 p.

INMETRO (Instituto Nacional de Metrologia, Qualidade e Tecnologia). **Vocabulário Internacional de Metrologia: conceitos fundamentais e gerais e termos associados**, 1. ed. Luso-Brasileira. Duque de Caxias, Rio de Janeiro: INMETRO, 2012. 95 p.

IRONS, J. R.; DWYER, J. L.; BARSİ, J. A. The next Landsat satellite: The Landsat Data Continuity Mission. **Remote Sensing of Environment**, v.122, p.11-21, 2012.

MARKHAM, B. L.; HELDER, D. L. Forty-year calibrated record of earth-reflected radiance from Landsat: A review. **Remote Sensing of Environment**, v.122, n. SI, p.30-40, 2012.

MENDES, A.; ROSÁRIO, P. P. **Metrologia e incerteza de medição**. São Paulo, SP: Editora EPSE, 2005. 128 p.

National Aeronautics and Space Administration (NASA). **Preliminary Spectral Response of the Operational Land Imager In-Band, Band-Average Relative Spectral Response**. 2013. Disponível em:

<http://ldcm.nasa.gov/spacecraft_instruments/oli_band_average.html>. Acesso em: 23 abr. 2013.

PINTO, C. T.; SILVA, M. L.; MELO, M. C.; ANDRADE, L. L.; CASTRO, R. M. Caracterização espectral parcial do sensor SISIMI. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14. (SBSR), 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 7639-7646. DVD, On-line. ISBN 978-85-17-00044-7. Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.18.32>>. Acesso em: 25 abr. 2013.

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: 23 abr. 2013.

PINTO, C.T; PONZONI, F. J.; CASTRO, R. M.; GRIFFITH, D. J. Spectral uniformity evaluation of reference surfaces for airborne and orbital sensors absolute calibration. **Brazilian Journal of Geophysics**, v.30, n.3, p.263-275, 2012.

PINTO, C.T; PONZONI, F. J.; FONSECA, L. M. G.; CASTRO, R. M. Simulação de Monte Carlo na avaliação das incertezas em parte do processo de calibração de sensores. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 16. (SBSR), 2013, Foz do Iguaçu. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2013. p. 9131-9137. Disponível em: <<http://www.dsr.inpe.br/sbsr2013/files/p0392.pdf>>. Acesso em: 23 abr. 2013.

PONZONI, F. J.; ZULLO JR., J.; LAMPARELLI, R. A. C. In-flight absolute calibration of the CBERS-2 IRMSS sensor data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n. 4, p. 799-804, 2006.

PONZONI, F. J.; JUNIOR, J. Z.; LAMPARELLI, R. A. C. **Calibração absoluta de sensores orbitais**: conceituação, principais procedimentos e aplicação. São José dos Campos, SP: Parêntese, 2007, 70 p. ISBN 978-85-60507-01-6.

PONZONI, F. J.; ZULLO JUNIOR, J.; LAMPARELLI, R. A. C. In-flight absolute calibration of the CBERS-2 CCD sensor data. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v. 80, n. 2, p. 373-380, 2008. Disponível em: <<http://urlib.net/sid.inpe.br/mtc-m17@80/2008/06.03.18.31>>. Acesso em: 02 abr. 2013.

PONZONI, F. J. **Comunicação Privada**, 2013.

SCADUTO, L. C. N.; MODUGNO, R. G.; SOARES, A. L.; CARVALHO, É. G.; YASUOKA, F. M. M.; STEFANI, M. A.; CASTRO NETO, J. C. Avaliação do desempenho do sistema óptico da Câmera Multiespectral (MUX) dos satélites CBERS 3 e 4. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 14. (SBSR), 2009, Natal. **Anais...** São José dos Campos: INPE, 2009. p. 7647-7654. DVD, On-line. ISBN 978-85-17-00044-7. Disponível em: <<http://urlib.net/dpi.inpe.br/sbsr@80/2008/11.17.19.19>>. Acesso em: 02 abr. 2013.

SLATER, P.N.; BIGGAR, S.F.; HOLM, R.G.; JACKSON, R.D.; MAO, Y.; MORAN, M.S.; PALMER, J.M.; YUAN, B. Reflectance-and radiance-based methods for the in-flight absolute calibration of multispectral sensors. **Remote Sensing of Environment**, v.22, n.1, p.11-37, 1987.

TEILLET, P. M.; BARKER, J. L.; MARKHAM, B. L.; IRISH, R. R.; FEDOSEJEVS, G.; STOREY, J. C. Radiometric cross-calibration of the Landsat-7 ETM+ and Landsat-5 TM sensors based on tandem data sets. **Remote Sensing of Environment**, v.78, n.1-2, p.39-54, 2001.

TEILLET, P.M.; MARKHAM, B.L.; IRISH, R. R. Landsat cross-calibration based on near simultaneous imaging of common ground targets. **Remote Sensing of Environment**, v.102, n.3-4, p.264-270, 2006.

TEILLET, P.M.; FEDOSEJEVS, G.; THOME, K. J; BARKER, J. L. Impacts of spectral band difference effects on radiometric cross-calibration between satellite sensors in the solar-reflective spectral domain. **Remote Sensing of Environment**, v.110, n.3, p.393-409, 2007.

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.

THOME, K. J.; BIGGAR, S. F.; WISNIEWSKI, W. Cross Comparison of EO-1 Sensors and Other Earth Resources Sensors to Landsat-7 ETM+ Using Railroad Valley Playa. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing**, v.41, n.6, p. 1180-1188, 2003.

THOME, K.; MCCORKEL, J.; CZAPLA-MYERS, J. In-Situ Transfer Standard and Coincident-View Intercomparisons for Sensor Cross-Calibration. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote sensing**, v.51, n.3, p. 1088-1097, 2013.

VUOLO, J. H. **Fundamentos da Teoria de Erros**. São Paulo: Edgard Blücher , 1996, 2 ed, 249 p.