

Calibração absoluta do radiômetro portátil CIMEL/CE313 em laboratório e avaliação das incertezas

Cibele Teixeira Pinto^{1,2}
Ruy Morgado de Castro^{2,3}
Flávio Jorge Ponzoni¹

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE
Caixa Postal 515 - 12227-010 - São José dos Campos - SP, Brasil
{cibele, flavio}@ltid.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. Absolute calibration is required when the focus is the use of reliable quantitative data from sensors. This process determines the relation between the incident radiant flux and the digital number provided by the sensor. In this work we describe a methodology to perform laboratory absolute calibration of a sensor system, also presenting its uncertainty of measurement. The methodology was tested with the use of a portable radiometer CIMEL/CE313, without previous calibration information. This work represents a cross-calibration, involving two sensors: one of them used as reference. Thus, the radiometer CIMEL/CE313 was calibrated in relation to the ASD *FieldSpec Pro* spectroradiometer, recently calibrated by the manufacturer. The ASD *FieldSpec Pro* was considered the standard reference. Results showed that the relation of radiance values and digital numbers is linear. Based on this, we determined the radiometric calibration coefficients, gain and offset, which allow the conversion of digital number into radiance values. Moreover, the parameters offset, for bands 2, 3 and 4 of radiometer CIMEL/CE313, were consistent with zero value, when considering the uncertainties. So, only the gain parameter allows the conversion of digital number, generated by the radiometer into radiance values for these bands.

Palavras-chave: remote sensing, calibration, radiometer, laboratory measurement, uncertainty of measurement, sensoriamento remoto, calibração, radiômetro, medição em laboratório, incerteza de medição.

1. Introdução

Sensores utilizados para coletar dados radiométricos em nível terrestre, seja em campo e/ou laboratório, desempenham diferentes funções no âmbito das técnicas de sensoriamento remoto. Por exemplo, em campo, eles podem ser utilizados na calibração de sistemas sensores orbitais como procederam Lamparelli *et al.* (2003) e Ponzoni *et al.* (2007), para realizar a caracterização espectral de diferentes objetos e para viabilizar a validação da aplicação de outros dados radiométricos coletados em diferentes níveis de aquisição.

Especialmente em estudos que incluem abordagens quantitativas, como estimativas de parâmetros biofísicos ou geofísicos a partir de dados radiométricos coletados por estes sensores, a calibração absoluta do sensor deve ser realizada de forma a garantir confiabilidade aos dados gerados, segundo critérios descritos e aceitos internacionalmente. O objetivo da calibração absoluta é determinar a relação funcional entre o fluxo radiante incidente e a grandeza fornecida pelo sensor.

Alguns sensores, como os radiômetros portáteis, são distribuídos pelos fabricantes sem muitas informações adicionais que permitam relacionar os valores de número digital (*ND*) com a potência (radiância) efetivamente medida. Nestes casos, os usuários são obrigados a conduzirem seus próprios experimentos de calibração absoluta que são dependentes não só de equipamento e ambiente específicos, como também de pessoal capacitado.

Assim, este trabalho tem como objetivo descrever uma metodologia para realizar a calibração absoluta de um sensor portátil em laboratório, e avaliar as incertezas envolvidas no processo. Para testar esta metodologia foi utilizado o radiômetro CIMEL/CE313, do qual não se dispunha de informações pregressas de calibração.

2. Calibração Absoluta de Sensores em Laboratório

Quando detectores, semicondutores, são expostos a radiação eletromagnética eles produzem uma corrente/tensão proporcional a esta radiação, que se associado a um sistema eletrônico, fornece um sinal mensurável e proporcional à variação do fluxo radiante incidente. A partir deste fato, pode-se construir sistemas sensores, com vários detectores, que quantificam este sinal em valores discretos inteiros por meio de um número digital (ND). No entanto, o ND não é uma grandeza física, mas está correlacionado à radiância proveniente dos objetos. A calibração absoluta de um sensor tem então 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 (Chen, 1997):

$$ND_b = G \times L_b + offset \quad (1)$$

onde: ND_b é número digital em uma determinada banda b ; L_b é radiância espectral na banda b ; G é o valor de ganho; e $offset$ é o ND correspondente a radiância igual a zero. Esta equação relaciona cada banda com o sinal de saída.

Assim, a primeira etapa na calibração absoluta de um sensor é verificar o comportamento linear desta relação. Para isto pode-se utilizar como padrão radiométrico uma esfera integradora (EI), que forneça várias intensidades de radiância (estável e uniforme em sua abertura). Se a relação for linear, os valores de ganho e o $offset$ de cada banda podem ser obtidos por meio dos coeficientes da reta.

A calibração utilizando a EI 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. Entretanto, existe outra estratégia possível para realizar a calibração do sensor, conhecida como “calibração cruzada” (Teillet *et al.*, 2001), qual consiste em comparar a resposta entre sensores quando estão expostos a um mesmo sinal de radiação. Neste caso um dos sensores é adotado como referência.

3. Metodologia de Trabalho

O experimento foi realizado no Laboratório de Radiometria e Caracterização de Sensores Eletroópticos (LaRaC) do Instituto de Estudos Avançados (IEAv). O LaRaC foi construído de forma a proporcionar um ambiente com controle ambiental, de temperatura e umidade relativa. O laboratório não possui janelas, suas paredes e teto são pintados com tinta preta fosca, de modo a evitar reflexões. Além disso, os equipamentos são alimentados por uma fonte de tensão estabilizada.

Nesse trabalho foi realizada a calibração cruzada. Esse método de calibração envolve dois sensores, sendo que um deles é utilizado como referência e, por isso, deve estar calibrado. Desse modo, o radiômetro CIMEL/CE313 foi calibrado em relação a um espectrorradiômetro da ASD (*Analytical Spectral Devices*) *FieldSpec Pro* (ASD, 1999), pertencente ao LaRaC, que foi recentemente calibrado junto ao fabricante, sendo considerado como padrão de referência.

O radiômetro CIMEL/CE313 é um equipamento portátil adequado tanto para medidas de campo como em laboratório. Possui uma unidade óptica com campo de visada (FOV) de aproximadamente 10°. O radiômetro atua em 5 (cinco) bandas espectrais: Banda 1 de 746 a 928 nm, Banda 2 de 595 a 701 nm, Banda 3 de 464 a 634 nm, Banda 4 de 410 a 490 nm e

Banda 5 de 1475 a 1805 nm (Lamparelli *et al.*, 2003). A Função de Resposta Espectral (FRE) de cada banda do radiômetro pode ser observada na Figura 1.

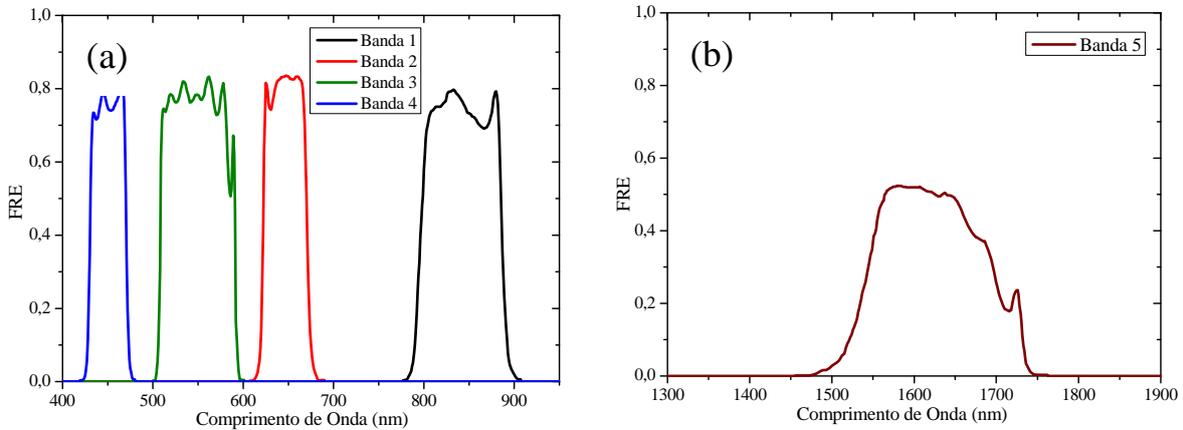


Figura 1. Função de Resposta Espectral (FRE) das bandas do radiômetro CIMEL/CE313. Em (a) das bandas 1, 2, 3 e 4; e (b) da banda 5.
Fonte: Lamparelli *et al.* (2003)

O espectrorradiômetro ASD *FieldSpec Pro* atua em uma faixa espectral de 350 a 2500 nm, com resolução espectral média de 3 nm para as regiões do visível e infravermelho próximo (aproximadamente entre 350 e 1000 nm) e resolução espectral média de 10 nm na região do infravermelho de ondas curtas (aproximadamente de 1000 a 2500 nm). O ASD *FieldSpec Pro* fornece os dados em valores absolutos de radiância.

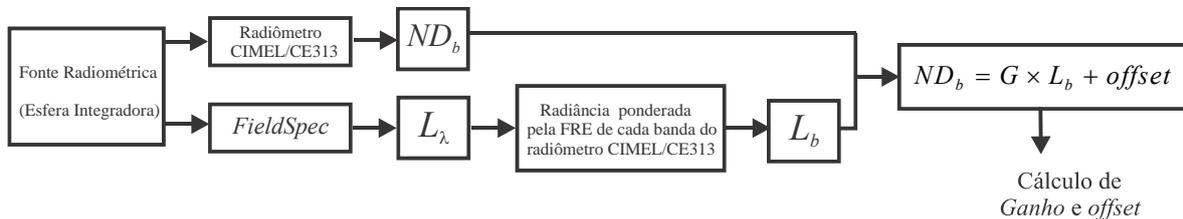


Figura 2. Fluxograma da metodologia adotada no trabalho.

A metodologia adotada neste trabalho pode ser visualizada no fluxograma apresentado na Figura 2. Neste caso, os dois sensores foram expostos a uma mesma intensidade de radiação eletromagnética, e o ND_b que o radiômetro CIMEL/CE313 gerou em cada banda foi comparado com o valor de radiância gerado pelo ASD *FieldSpec Pro*. 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 de ND de cada banda do radiômetro é proporcional ao valor de radiância ponderada pela FRE, segundo a Equação 2:

$$L_b = \frac{\int_0^{\infty} L_{\lambda} \times FRE_{\lambda} d\lambda}{\int_0^{\infty} FRE_{\lambda} d\lambda} \quad (2)$$

onde: L_b é a radiância ponderada para cada uma das bandas e L_{λ} é a radiância que incidente na óptica do radiômetro.

Com os valores de ND_b e L_b , e utilizando a Equação 1, foi possível estimar os coeficientes de calibração G (ganho) e $offset$, para cada uma das bandas.

3.1 Configuração do experimento

A configuração do experimento consistiu, além dos dois sensores (o radiômetro CIMEL/CE313 e o espectrorradiômetro ASD *FieldSpec Pro*), de uma esfera integradora (EI) USS2000 da *LabSphere* (LabSphere, 2005). A EI permite a utilização de quatro lâmpadas de tungstênio, sendo duas de 45 W, uma de 100 W e outra de 150 W de potência. A lâmpada de 100 W está localizada em um iluminador que permite o ajuste da intensidade da radiação eletromagnética que penetra na EI. Além disso, o sistema também é composto por quatro fontes de tensão, que estabilizam a tensão e a corrente de cada lâmpada. Assim, a radiância fornecida pela EI pode ser alterada para alguns valores discretos, ligando ou desligando as lâmpadas, de maneira independente. A esfera possui um diâmetro interno de 50 cm e uma abertura circular com diâmetro de aproximadamente 20 cm.

Durante as medições radiométricas, os sensores foram posicionados no eixo de simetria da esfera, em geometria de visada vertical (perpendicularmente à abertura da esfera), a uma altura de 10 cm da abertura da EI.

Informações de temperatura e umidade foram coletadas para obter dados sobre as condições ambientais do laboratório. Em geral as medições foram realizadas com a temperatura variando entre 18 e 21 °C e com umidade relativa entre 50 e 70 %.

3.2 Procedimento Experimental

Os níveis de radiância na saída da EI são determinados de acordo com a combinação das lâmpadas no interior da esfera. Neste trabalho foram utilizadas três configurações: (a) com as lâmpadas de 150, 100 e 45 W ligadas; (b) com as lâmpadas de 150 e 45 W ligadas; e (c) com apenas a lâmpada de 45 W ligada. Essas três configurações de lâmpadas geraram três diferentes intensidades de radiância na abertura da EI.

O experimento foi dividido em duas etapas. Primeiramente foram realizadas medições da esfera com o espectrorradiômetro ASD *FieldSpec Pro*, que era ligado, bem como as lâmpadas de 150, 100 e 45 W (configuração a), e esperava meia hora até o início das medições, conforme recomendado pelos fabricantes, para garantir que o sistema estivesse estabilizado. Com o ASD *FieldSpec Pro* efetuava medições sucessivas da radiância da esfera, a cada minuto, durante 10 minutos (contabilizando 10 medições). Após o término da medição nesta configuração, desligava-se a lâmpada de 100 W, o que originava a combinação das lâmpadas de 150 e 45 W (configuração b), e o mesmo procedimento era repetido. Em seguida, a lâmpada de 150 W era desligada, realizando a configuração c, com a apenas a lâmpada 45W ligada.

Posteriormente, o radiômetro CIMEL/CE313 foi submetido à mesma sequência de medições em substituição ao espectrorradiômetro ASD *FieldSpec Pro*, diferenciando-se no número de medições que neste caso foi de 16 medições, com um intervalo de tempo de aproximadamente 1,5 minutos entre elas (contabilizando 24 minutos de medição para cada configuração com as lâmpadas), da radiância da esfera.

3.3 Tratamento Estatístico dos Dados

Quando realizamos uma medição direta de uma determinada grandeza é necessário relatar o resultado de uma maneira quantitativa e formal (ABNT e INMETRO, 2003), indicando seu valor e sua respectiva incerteza. O valor do mensurando pode ser obtido: (a) pela indicação do instrumento, quando é realizada apenas uma medição; ou (b) por meio da média (se os dados não forem tendenciosos), quando é realizada uma série de medições. Já as incertezas de uma medição são provenientes de combinações de várias fontes, tais como: método de medição, operador, condições ambientais, a amostra e o equipamento (Mendes e Rosário, 2005). Assim, a incerteza deve levar em consideração, além da flutuação estatística dos dados, os aspectos

experimentais da medição. Com isto, estas incertezas são agrupadas em duas categorias: Tipo A, que são as incertezas avaliadas por processos estatísticos; e Tipo B as incertezas avaliadas por processos não estatísticos.

As grandezas ND e L_λ foram obtidas com medições diretas, e suas incertezas foram estimadas a partir da repetitividade das medições. Assim, o número de medições realizadas com o *FieldSpec Pro* e o radiômetro CIMEL/CE313 foram escolhidos para ter um grau de repetitividade adequando, permitindo assim uma avaliação mais criteriosa tanto da grandeza, quanto da incerteza (estatística).

Quando a medição é repetida N vezes, exatamente nas mesmas condições, a melhor estimativa para o valor da grandeza é a média, e a melhor estimativa não tendenciosa para a incerteza devido à flutuação estatística dos dados é dada pelo desvio padrão do valor médio (σ_m) (ABNT e INMETRO, 2003), que estabelece a dispersão dos valores médios em relação ao valor verdadeiro. A incerteza estatística (σ_{TipoA}) está, portanto, associada ao desvio padrão da média de uma série de medições:

$$\sigma_{TipoA} = \sigma_m = \frac{\sigma_p}{\sqrt{N}} \quad (3)$$

onde: σ_p é desvio padrão amostral, que quantifica a dispersão estatística de uma série de medições, mas não corresponde à incerteza do valor mais provável (valor médio).

Já a avaliação Tipo B da incerteza, resumiu-se basicamente as incertezas instrumentais dos equipamentos utilizados. Como estas incertezas são muito menores que as incertezas estatísticas, seu impacto no resultado na incerteza final é praticamente desprezível.

Já a grandeza L_b , radiância ponderada para cada uma das bandas do radiômetro CIMEL/CE313, foi determinada de maneira indireta, ou seja, é calculada como função de outras grandezas (no caso, em função do valor de L_λ e das FREs das bandas do radiômetro). Nesse caso, para determinar a incerteza, deve-se estimar a influência das incertezas das grandezas primárias e combiná-las adequadamente. Os cálculos foram realizados conforme Vuolo (1996). Como os valores de L_b dependem da determinação de uma mesma FRE, as incertezas obtidas para as radiâncias nesta banda são correlacionadas e, portanto, é necessário levar em consideração esta dependência no tratamento dos dados.

Para verificar se os dados possuem comportamento linear, foi construído um gráfico do ND em função da radiância. Se, a partir do gráfico, for possível perceber o comportamento linear, então, pode-se encontrar a reta que melhor se ajusta este conjunto de dados experimentais. Para tanto, utilizou-se o Método dos Mínimos Quadrados (MMQ) em especial na sua forma matricial (Helene, 2006), que é um método preciso e que leva em consideração as incertezas obtidas e suas correlações. Este método permite determinar os parâmetros da função de ajuste, no caso do ajuste linear, os melhores valores para os coeficientes angular e linear, com suas respectivas incertezas e correlações. Lembrando que os coeficientes da reta são os coeficientes de calibração (ganho e *offset*). O MMQ não trabalha com incertezas no eixo x . Entretanto, essa limitação foi compensada utilizando um procedimento (Helene, 2006 e Vuolo, 1996) que faz a propagação da incerteza do eixo x para o eixo y .

Por fim, é sempre importante avaliar a qualidade do ajuste, ou seja, verificar se a função ajustada é verossímil (determinar o grau de semelhança da função ajustada em relação ao conjunto dos dados experimentais). Para tanto, utilizou como critério o valor de χ^2 (qui-quadrado) (Drosg, 2007) que indica o quanto a função ajustada se distancia dos dados experimentais, levando em consideração as incertezas. Entretanto, a quantidade de χ^2 é fortemente afetada pelo valor do número de pontos (n). Assim, ao invés de utilizar χ^2 , que não é um referencial adequado, pode usar χ_{red}^2 (qui-quadrado reduzido):

$$\chi_{red}^2 = \frac{\chi^2}{\nu} \quad (4)$$

onde: ν é o número de graus de liberdade do ajuste. Se n é o número de pontos e p é o número de parâmetros a ser ajustados, então, $\nu = n - p$.

O valor de χ_{red}^2 é uma quantidade útil e adequada para avaliar a qualidade de um ajuste, pois é pouco dependente do número n de ponto e do número p de parâmetros ajustados (Vuolo, 1996). Com isto a avaliação da qualidade dos resultados obtidos torna-se mais fácil. Uma interpretação mais detalhada dos valores de χ_{red}^2 pode ser obtida em (Drosg, 2007). De uma maneira geral, espera-se que um bom ajuste forneça um χ_{red}^2 próximo a 1. Entretanto, para realizar a avaliação da qualidade de um ajuste, deve-se estabelecer um intervalo de confiança que depende do número de graus de liberdade do ajuste.

4. Resultados e Discussão

O resultado das medições para as três intensidades de radiação com a EI e os dois sensores (radiômetro CIMEL/CE313 e o espectrorradiômetro ASD *FieldSpec Pro*) podem ser visualizados na Figura 3. Os valores de ND referentes à banda 1 do radiômetro (região espectral de 746 a 928 nm) saturaram para dois níveis de radiação estudadas (para as configurações a e b). Dessa maneira, não foi possível realizar os tratamentos de dados para esta banda.

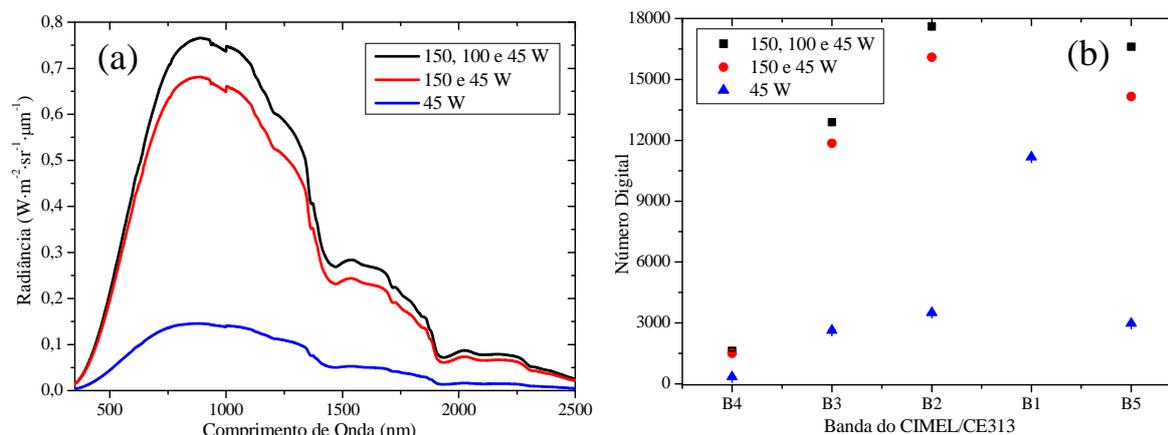


Figura 3. (a) Gráfico da radiação em função do comprimento de onda do ASD *FieldSpec Pro* para as três configurações de lâmpadas na esfera; e (b) gráfico do número digital obtido nas medições em função das bandas do radiômetro CIMEL/CE313 para as três configurações de lâmpadas. As incertezas obtidas são muito pequenas e, portanto, não foram apresentadas.

Com os dados de radiação obtidos com o ASD *FieldSpec Pro*, ver Figura 3a, as FREs de cada banda do CIMEL/CE313 (Figura 1) e utilizando a Equação 2, pode-se determinar a radiação em cada uma das bandas do radiômetro CIMEL/CE313, para os três níveis de radiação. Assim, com o valor da radiação ponderada e o valor do ND obtido nas medições do radiômetro (Figura 3b), para cada uma das configurações de medida, pode-se construir o gráfico do ND em função da radiação, ou seja, pode-se determinar os parâmetros de calibração para cada banda do radiômetro CIMEL/CE313, ver Figura 4, exceto para a banda 1.

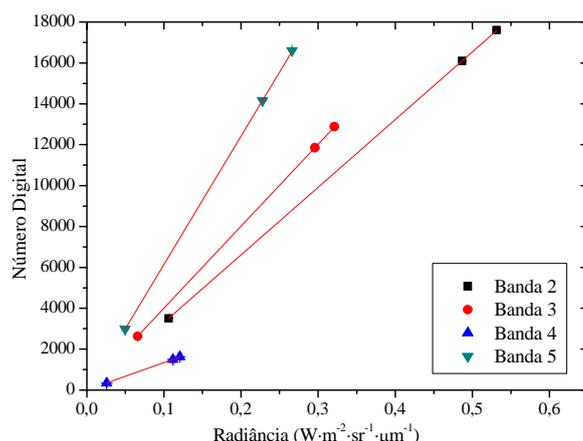


Figura 4. Função linear de calibração para cada banda do radiômetro CIMEL/CE313. As incertezas obtidas são muito pequenas, comparáveis as dimensões do ponto no gráfico.

De acordo com a Figura 4, sugere-se que os dados da radiância em função do ND possuem comportamento linear, conforme esperado pela Equação 1. Como comentado anteriormente, utilizou-se o MMQ para encontrar a melhor reta que se ajusta aos dados experimentais. Com este método, foram determinados os coeficientes da reta (angular e linear) que foram assumidos como correspondentes aos coeficientes de calibração (ganho e *offset*). A Tabela 1 apresenta os coeficientes de calibração estimados para cada banda do radiômetro, com suas respectivas incertezas, junto com o valor de χ_{red}^2 .

Tabela 1. Coeficientes de calibração (ganho e *Offset*) de cada uma das bandas do radiômetro CIMEL/CE313 com suas respectivas incertezas, e o valor de χ_{red}^2 .

Banda	Ganho [$10^3 \cdot W^{-1} \cdot m^2 \cdot sr \cdot \mu m$]	$\sigma_{relativa}$	Offset	$\sigma_{relativa}$	χ_{red}^2
2	$33,13 \pm 0,23$	0,69%	-16 ± 12	75%	0,22
3	$40,14 \pm 0,19$	0,47%	-13 ± 6	46%	0,24
4	$13,46 \pm 0,08$	0,59%	$-1,7 \pm 1,0$	59%	0,64
5	$62,8 \pm 0,6$	0,96%	-131 ± 15	11 %	0,62

Para verificar a qualidade do ajuste, como mencionado, foi utilizado o valor de χ_{red}^2 . Analisando a Tabela 1, pode-se verificar que os valores de χ_{red}^2 estimados foram pequenos. Nesse caso, existem duas hipóteses que explicam valores de χ_{red}^2 pequenos: (a) a função de ajuste é inadequada, com a utilização de muito mais parâmetros que o necessário; ou (b) as incertezas foram superestimadas. Como é muito provável que a função de ajuste seja realmente uma reta, então, as incertezas podem ter sido superestimadas. Entretanto, como o grau de liberdade é igual 1 (um), o valor de χ^2 -reduzido não está completamente fora da faixa de valores aceitáveis, portanto, o ajuste pode ser considerado bom.

Verificando as incertezas na Tabela 1 os resultados obtidos mostram que, quando se leva em consideração as incertezas envolvidas, os valores de *offset* para as bandas 2, 3 e 4 são compatíveis com o valor zero. Este fato não é válido para a banda 5, onde o *offset* foi estimado em -131 ± 15 (com intervalo de confiança de 68,3%). Se considerarmos um nível de confiança de 99,7%, o valor estimado de *offset* nessa banda seria: $-131 \pm (3 \times 15)$, isso por que a distribuição é do tipo Normal. Ou seja, o *offset* para esta banda é incompatível com zero.

Assim, para converter os valores obtidos com o radiômetro CIMEL/CE313 em valores de radiância, para as bandas 2, 3 e 4, pode-se utilizar a Equação 1 apenas com o coeficiente angular (ganho).

5. Conclusão

Para que os dados de sensores possam ser utilizados quantitativamente é necessário ter um alto grau de confiabilidade no mesmo, e isto só pode ser obtido se o sensor estiver devidamente calibrado. Neste trabalho foi descrito e realizada uma metodologia de calibração absoluta radiométrica de sensores em laboratório, e estimado as incertezas envolvidas. Para testar a metodologia foi empregado o radiômetro portátil CIMEL/CE313, do qual não se tinha informações pregressas de calibração.

Os resultados obtidos mostraram-se concordantes com o esperado, ou seja, os valores de *ND* fornecidos pelo radiômetro são diretamente proporcionais aos valores de radiância. Além disso, os parâmetros de *offset*, para as bandas 2, 3 e 4, mostraram-se compatíveis com o valor zero, quando consideradas as incertezas. Com isto, apenas o parâmetro de calibração radiométrica, ganho, permite a conversão do número digital gerado pelo sensor em valores de radiância, e vice-versa. Como os valores de *ND* da banda 1 saturaram para dois níveis de radiância estudadas, não foi possível determinar os coeficientes de calibração para esta banda.

Vale lembrar que os coeficientes radiométricos estimados nesse trabalho foram obtidos em laboratório, onde as condições são conhecidas e específicas (de temperatura, umidade, tensão, etc). Entretanto, a condição de uso do sensor em campo é diferente da encontrada no laboratório, e por isso é importante verificar durante a aquisição em condições de campo se os coeficientes radiométricos continuam válidos.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer a CAPES pela bolsa da Sra. Cibele T. Pinto, e a UNICAMP pela utilização do radiômetro CIMEL/CE313.

Referências

- ABNT; INMETRO. **Guia para a Expressão da Incerteza de Medição**: terceira edição brasileira. 3. ed. Rio de Janeiro: ABNT, INMETRO, 2003. 120 p.
- Analytical Spectral Devices, Inc. (ASD). **Technical guide**. 3. ed. Boulder: Analytical Spectral Devices, 1999. 136 p.
- Chen, H. S. **Remote sensing calibration systems**: an introduction. Hampton, Virginia, USA: A. Deepak Publishing, 1997, 238 p.
- Drosg, M. **Dealing with Uncertainties**: a guide to error analysis. Berlin: Springer, 2007, 190p.
- Helene, O. A. M. **Método dos mínimos quadrados com formalismo matricial**. Editora Livraria da Física, 2006.
- LabSphere, **USS-2000 Integrating Sphere Manual**, 2005.
- Lamparelli, R. A. C.; Ponzoni, F. J.; Zullo JR., J.; Pellegrino, G. Q.; Arnaud, Y. Characterization of the salar de uyuni for in-orbit satellite calibration. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 41, n. 6, p. 1461-1468, 2003.
- Mendes, A. ; Rosário, P. P. **Metrologia & Incerteza de Medição**. São Paulo: Editora EPSE, 2005. 102 p.
- Ponzoni, F. J.; Zullo JR., J.; Lamparelli, R. A. C. **Calibração absoluta de sensores orbitais**: conceituação, principais procedimentos e aplicação. São José dos Campos: Parêntese, 2007. v. 1, 64 p.
- 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**, vol. 78, n.1-2, p. 39-54, 2001.
- Vuolo, J. H. **Fundamentos da Teoria de Erros**. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 1996. 117 p.