

Metodologia para obtenção de refletância em laboratório e avaliação das incertezas

Marcos Cavalcante de Melo ^{1,2}
Vitor Lopes Mendes ¹
Romero da Costa Moreira ¹
Ruy Morgado de Castro ¹

¹ Instituto de Estudos Avançados - IEAv
Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil
{cavalcante, mendes, Moreira, rmcastro }@ieav.cta.br

² Universidade Estadual Paulista Júlio Mesquita Filho – UNESP
Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá - FEG
Caixa Postal 205 – 12516-410 - Guaratinguetá - SP, Brasil.

Abstract. Currently, the access to data of hyperspectral sensors, operating in wider portions and narrower bands of the spectrum, demands a much more detailed understanding of the interactions between the electromagnetic radiation and the natural or artificial materials of interest to the respective fields of application of Remote Sensing. Systems and techniques for reflectance measurements in field and in laboratory are developed for studies of spectral behavior of targets, as well as for characterization of orbital and airborne sensor systems. This work describes the experimental arrangement and the method used for measurement of spectral reflectance factors in laboratory. It also presents some results of the evaluation of the Uncertainty of Measurement. The spectra acquisition had been carried through in the Laboratory of Radiometry and Optic Sensors Characterization (LaRaC) of the Institute for Advanced Studies (IEAv), an organization of the Brazilian Aeronautical Command hosted in São Jose dos Campos - SP. The laboratorial measurement results have been used as complement for field data and data from the airborne sensor HSS (*Hyperspectral Scanner System*).

Palavras-chave: remote sensing, radiometry, laboratory measurement, bidirectional reflectance, reflectance factor, uncertainty of measurement, sensoriamento remoto, radiometria, medição em laboratório, refletância bidirecional, fator de refletância, incerteza de medição.

1. Introdução

A disponibilização de dados de sensores hiperespectrais, operando em faixas mais amplas e em seções mais discretas do espectro, tem exigido uma compreensão muito mais detalhada das interações entre a radiação eletromagnética e os diversos tipos de materiais, naturais ou artificiais, de interesse aos respectivos campos de aplicação do SR.

Sistemas e técnicas para medições de refletância em campo e em laboratório têm sido desenvolvidos não só para estudos de comportamento espectral de alvos, como também para caracterização de sensores orbitais e aerotransportados, para predição de bandas espectrais e para configuração de visadas e horários para imageamentos, Milton (1987).

No Instituto de Estudos Avançados (IEAv), organização do Comando da Aeronáutica sediada em São José dos Campos – SP, o Laboratório de Radiometria e Caracterização de Sensores Ópticos (LaRaC) foi criado com a finalidade de realizar caracterizações radiométricas e espectrais em sensores ópticos aerotransportados, bem como elaborar uma biblioteca espectral de alvos.

A biblioteca espectral de alvos foi iniciada a partir de medições espectrais de alvos urbanos em campo, previamente escolhidos a partir da análise de imagens da cidade de São José dos Campos obtidas com o sensor aerotransportado HSS - *Hyperspectral Scanner System*, conforme Moreira et al. (2005), do Sistema de Proteção da Amazônia (SIPAM).

Para complementar os dados de campo, foram realizadas medições de reflectância no LaRaC, Moreira (2008). Os alvos escolhidos para as medições eram constituídos, em sua maioria, de materiais como alumínio, fibrocimento, argila, aço galvanizado, concreto e plástico.

De acordo com Jupp (1996), a elaboração de uma biblioteca espectral depende do registro claro do arranjo geométrico utilizado nas medições de espectros, incluindo as circunstâncias ambientais e especificações dos instrumentos, além de uma criteriosa avaliação da incerteza das medições, que permita realizar comparações entre dados de laboratório e campo.

Assim, este trabalho tem por objetivos descrever o arranjo experimental, o procedimento utilizado nas medições de espectros em laboratório e avaliar as incertezas das medições nos espectros de Reflectância Absoluta obtidos. Para exemplificar o procedimento, bem como o tratamento de dados, é apresentado o resultado da determinação da Reflectância Absoluta de uma telha cerâmica realizada no LaRaC.

2. Reflectância Absoluta

Para o estudo do comportamento espectral de alvos é necessário estabelecer e reconhecer as propriedades intrínsecas aos materiais, com o mínimo de influência das condições do meio ambiente, os dados de SR são processados em termos de Reflectância Bidirecional Espectral (RBE), pois ela é normalmente assumida como a grandeza radiométrica com maior independência das circunstâncias ambientais, conforme Jupp (1996). Entretanto a RBE não pode ser medida diretamente porque os elementos infinitesimais do ângulo sólido não incluem quantidades mensuráveis de fluxo radiante.

Na prática, para medições em campo e em laboratório, a RBE costuma ser substituída por uma grandeza equivalente, denominada de Fator de Reflectância Bidirecional Espectral (FRBE), que é a razão entre as radiâncias espectrais de uma amostra do material sob análise e de uma superfície lambertiana ideal, nas mesmas condições de iluminação e observação segundo Milton(1987), assim:

$$FBRE_{alvo}(\lambda) = \frac{L_{alvo}(\lambda)}{L_{Lamb}(\lambda)} \quad (1)$$

onde: $FBRE_{alvo}(\lambda)$ é o Fator de Reflectância Bidirecional Espectral; $L_{alvo}(\lambda)$ e $L_{Lamb}(\lambda)$ são a Radiância do alvo e da superfície lambertiana.

Entretanto, não existe uma superfície perfeitamente lambertiana. Por isso utiliza-se como referência uma placa de Spectralon, com isto:

$$FBRE_{alvo}(\lambda) = \frac{L_{alvo}(\lambda)}{L_{placa}(\lambda)} \quad (2)$$

Portanto a refletância absoluta de um alvo, conforme Moreira (2008), pode ser calculada multiplicando-se o fator de refletância bidirecional pelo fator de reflectância da placa, fornecido pelo fabricante, obtendo:

$$R_{alvo}(\lambda) = FBRE_{alvo}(\lambda) \cdot C_{placa}(\lambda) \quad (3)$$

onde: $R_{alvo}(\lambda)$ é a refletância absoluta do alvo; e $C_{placa}(\lambda)$ é a reflectância da Placa de Referência, fornecido pelo fabricante.

3. Materiais e Métodos

As medições espectrais dos alvos foram realizadas no LaRaC, que foi construído de forma a proporcionar um ambiente com certo controle ambiental, de temperatura e umidade

relativa. Não possuindo janelas e 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.

Para as medições foi definido um arranjo experimental padrão, conforme pode ser observado na Figura 1, constando de um espectrorradiômetro, um iluminador, uma placa de referência, e equipamentos auxiliares (tais como: Termohigrômetro e clinômetro).



Figura 1: (a) Visão geral do Arranjo experimental utilizado nas medições Espectrais no LaRac; (b) Visão mais detalhada do mesmo arranjo realizando a medição de uma telha de cerâmica de argila vermelha;

3.1 Arranjo Experimental

Para a obtenção de dados radiométricos de alvos as medições, de radiância, foram realizadas utilizando o espectrorradiômetro da ASD (*Analytical Spectral Devices*) FieldSpec® Pro, que é um instrumento portátil, adequado tanto para medidas de campo como em laboratório. Este equipamento apresenta os dados em intervalos de 1 nm em uma faixa espectral de 350 a 2500 nm, por meio de três radiômetros.

Para as medições foi utilizada a cabeça sensora, com o campo de visada (FOV) de 25°, do espectrorradiômetro posicionada em uma geometria de visada vertical, ao nadir, a uma altura de aproximadamente 7 cm do topo alvo, o que resulta em uma projeção da visada de aproximadamente 3 cm de diâmetro sobre a amostra.

O iluminador utilizado foi o *ASD Pro-Lamp*, que consiste de uma lâmpada halógena de tungstênio de 50 W alimentada por uma fonte de tensão de corrente contínua. Este foi fixado em um tripé, ver Figura 1, e posicionado a 25 cm de distância da amostra em uma visada oblíqua, com ângulo zenital de 45° (obtido com um clinômetro da *SmartTool* com menor divisão de 0,2°), tal valor foi adotado como padrão para este experimento de modo que a geometria de iluminação fosse semelhante à das medições em campo, realizadas em horário local entre 10 e 14 h, com ângulo zenital de aproximadamente 45°.

Como placa referência, conforme citado anteriormente, utilizou-se uma placa de Spectralon, de modelo SRT-99-120 da *Labsphere*, que possui uma reflectância próxima a 100%, de acordo com o certificado de calibração fornecido pelo fabricante, podendo ser considerada uma superfície aproximadamente Lambertiana ao longo dos comprimentos de onda utilizados.

Dados de temperatura e umidade foram coletados através de um Termohigrômetro digital da *Oregon Scientific*, a fim de obter informações da variabilidade das condições ambientais do laboratório. Em geral as medições foram realizadas com a temperatura variando entre 18 e 20 °C e com umidade relativa entre 50 e 70 %.

3.2 Procedimento Experimental

Como mencionado anteriormente, para que seja obtida a FRBE é necessário calcular a razão da Radiância do alvo pela Radiância da placa de referência, conforme equação (2). Para isso, para cada alvo estudado, foram realizadas 10 medições de radiância do alvo e 5 medições da placa de referência. Estas quantidades foram escolhidas para ter um grau de repetitividade adequado, permitindo assim uma avaliação mais criteriosa tanto da grandeza, quanto da incerteza (estatística), associada aos dados, segundo Mendes e Rosário (2005).

Deste modo, com o arranjo experimental montado, de acordo com a Figura 1, foram realizadas as medições com a placa de referência. Em seguida o alvo foi posicionado de maneira que a superfície a ser medida estivesse na mesma posição da placa de referência, tentando manter constante a configuração geométrica do sistema. Finalmente foram realizadas as medições com o alvo estudado.

Logo após, foi calculada a razão entre a radiância do alvo e a radiância da placa de referência, obtendo o fator de refletância bidirecional. Entretanto, para obter a incerteza nas medições foram levadas em consideração, além das incertezas estatísticas nas medições da radiância, as incertezas relacionadas à reprodutibilidade da geometria do arranjo experimental, conforme Mendes e Rosário (2005). A necessidade de inserir esta incerteza deve-se ao fato de se observar que ao longo das medições, pequenas modificações das condições geométricas do arranjo, tais como a altura e/ou ângulo de visada do sensor, assim como o ângulo e posicionamento do iluminador influenciam diretamente nas curvas radiométricas e, conseqüentemente, na refletância absoluta. Com isto, segundo Vuolo (1996), pode-se calcular a incerteza por:

$$\sigma_f = R_{abs} \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_{alvo}}{L_{alvo}}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{placa}}{L_{placa}}\right)^2 + 2 \cdot (\sigma_{arranjo})^2} \quad (4)$$

onde: σ_f é a incerteza final da refletância absoluta; σ_{alvo} e σ_{placa} são as incertezas estatísticas (ou seja, o desvio padrão da média) obtidas com a repetitividade das medições do alvo e da placa de Referência, respectivamente; $\sigma_{arranjo}$ é a incerteza relativa devido reprodutibilidade do arranjo experimental.

Assim a incerteza relacionada ao arranjo, equação (4), foi multiplicada por um fator dois, devido à necessidade de considerar a montagem do arranjo tanto para as medições do alvo, quanto para a placa de referência, já que poderiam ocorrer pequenas mudanças nas condições geométricas, principalmente a altura de visada do sensor, tendo em vista que as superfícies de ambas são distintas.

Para estimar as incertezas devido à reprodutibilidade do arranjo foi realizada medição de radiância da placa de referência, o mesmo procedimento de medição foi realizado 6 vezes. Para isto o arranjo envolvendo: a placa de referência; o iluminador; e o sensor, era montado e desmontado completamente a cada vez. Em que a cada repetição o iluminador foi ligado aproximadamente 10 minutos antes do início das medições.

4. Resultados e Discussão

O resultado obtido da avaliação da incerteza relativa à reprodutibilidade do arranjo para a radiância da placa de referência pode ser observado na Figura 2. Como podemos perceber as curvas possuem o mesmo comportamento, porém os valores absolutos são distintos. A partir disso, calculando o desvio padrão destas medições verifica-se que a incerteza relativa obtida é próxima de 8%, para todo o intervalo espectral estudado (350 a 2500 nm).

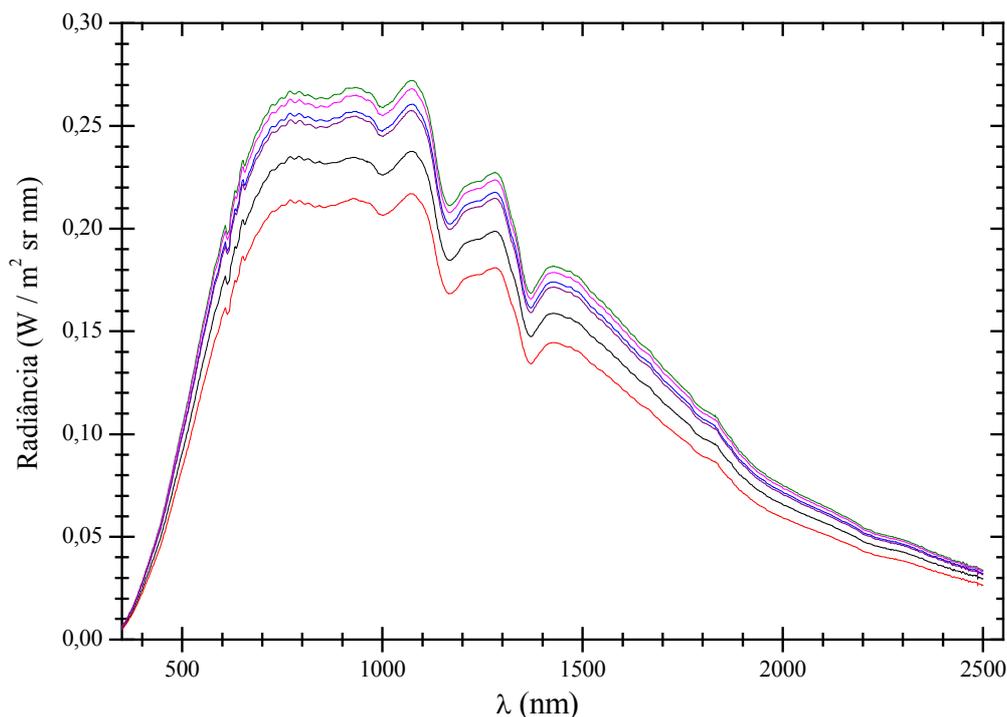


Figura 2: Resultados de 6 medições da radiância da placa de referência obtidos com a montagem e desmontagem do arranjo a fim de testar a sua reprodutibilidade.

A variação observada na amplitude pode ser explicada pela composição de dois fatores principais. O primeiro, e mais importante, é a componente geométrica relativa à posição do iluminador, sensor e alvo. O segundo pode ser relativo a eventuais variações do tempo de aquecimento da lâmpada, até o início de cada uma das seis medições, esta variação no tempo de ± 2 minutos pode ser responsável pela variação de 0,3% na radiância medida.

Tal porcentagem foi obtida através de um estudo realizado no LaRac, conforme Avelísio et al. (2008), onde mediu-se a variação da radiância de uma esfera Integradora *Labsphere USS2000* em função do tempo de aquecimento das lâmpadas localizadas no seu interior. Nesse trabalho, uma das avaliações realizadas foi com uma lâmpada de 45 W com características semelhantes a do iluminador utilizado neste trabalho. Com isso foi possível estimar a influência do tempo de aquecimento da lâmpada do iluminador na radiância medida, verificando que tal influencia foi pequena.

Outro fator que poderia ser considerado seria a das condições ambientais. Entretanto, tal possibilidade foi descartada, pois permaneceram aproximadamente constantes ao longo das medições.

Com isto o impacto de pequenas variações no arranjo experimental na incerteza final da reflectância absoluta é de aproximadamente 11%, para cada comprimento de onda. Vale ressaltar que este valor deve-se somente aos fatores de reprodução da geometria do sistema (reprodutibilidade), pois quando as medições são realizadas nas mesmas condições (repetitividade), a incerteza estatística obtida é bem pequena e o seu impacto na incerteza final é praticamente desprezível. Assim este resultado só pode ser aplicado ao arranjo experimental utilizado neste trabalho, e que não pode ser utilizado para outros arranjos.

Na figura 3, a título de exemplo do procedimento de medições, é apresentada a curva de Reflectância Absoluta de uma telha de cerâmica em função do comprimento de onda (λ). No gráfico, pode-se observar a variação máxima e mínima do valor da reflectância absoluta devido à incerteza final.

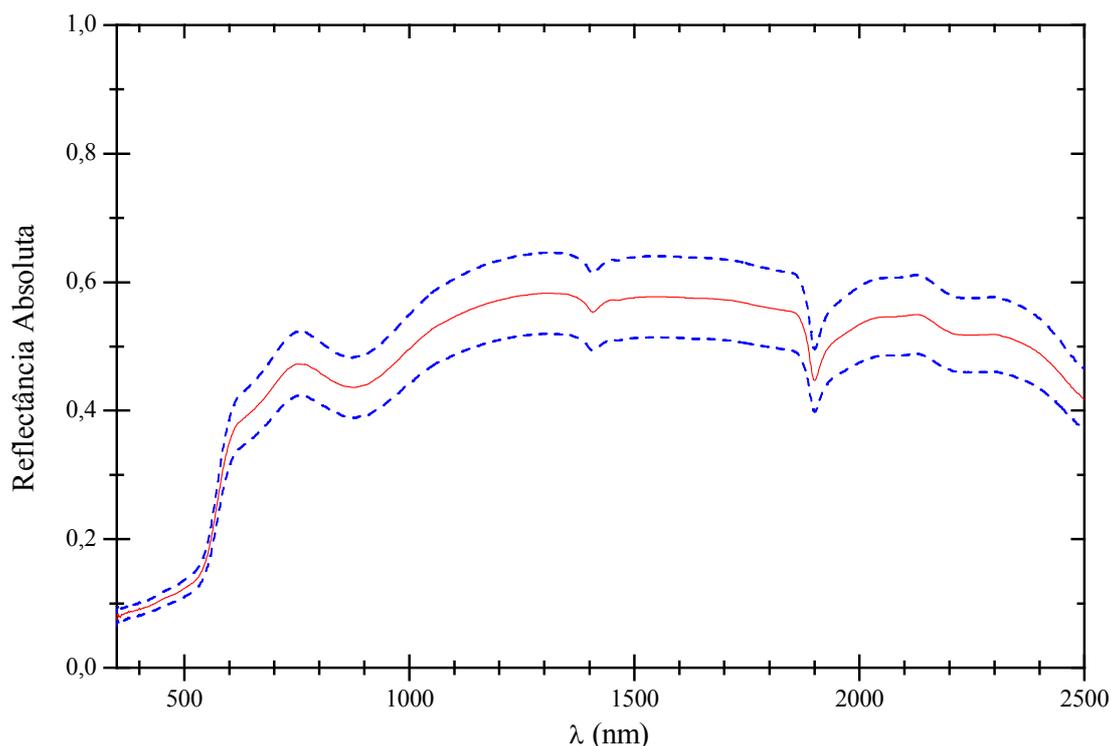


Figura 3: Exemplo do espectro de Refletância Absoluta da telha confeccionada em cerâmica, em que se pode verificar a variação máxima e mínima do espectro considerando a incerteza final calculada de aproximadamente 11%.

Na figura 3 pode-se verificar uma feição de absorção na faixa entre 670 e 870 nm, que de acordo com Moreira (2008), pode ser relacionada aos óxidos de ferro. Em geral este componente é encontrado em telhas de cerâmica de argila vermelha. Devido a incertezas, algumas feições (principalmente as menores e mais estreitas) podem não ser percebidas, ficando “mascaradas” no espectro obtido.

5. Conclusão

Neste trabalho foi descrita uma metodologia para construção de uma biblioteca espectral de alvos. Para exemplificar o procedimento adotado é apresentado o espectro de reflectância absoluta de uma telha de cerâmica.

A partir das medições realizadas no sistema, obteve-se uma incerteza relativa em torno de 11%, proveniente, principalmente, de fatores relacionados à reprodutibilidade da geometria. Verifica-se, portanto, a necessidade de registrar os parâmetros geométricos do arranjo experimental e mantê-los fixos durante todo o processo de aquisição de espectros de modo que os dados possam ser correlacionados e comparados.

Para obter dados com incertezas menores, é conveniente aperfeiçoar o arranjo experimental, efetuando algumas alterações na geometria do sistema. Para isso, deve-se construir um arranjo de maneira que os componentes: iluminador, alvo e sensor, sejam posicionados e fixados em condições pré-determinadas, com o maior grau de precisão e menor grau de variabilidade possível.

A próxima etapa deste trabalho será, portanto, desenvolver dispositivos e condições técnicas que possibilitem o aperfeiçoamento do arranjo experimental utilizado nas medições de espectros de reflectância em laboratório, com vistas a ampliar o número de alvos e elaborar uma Biblioteca Espectral mais completa.

6. Agradecimentos

Os autores agradecem a todos os membros da Divisão de Geo-Inteligência localizada no IEAV, que colaboraram diretamente ou indiretamente com este trabalho.

7. Referências

Avelísio, M. A; Silva, M. L.; Melo, M. C; Pinto, C. T; Castro, R. M.; Moreira, R.C.; Calibração Radiométrica de Sensores Eletroópticos II. In: Seminário de Iniciação Científica do IEAV (SICI), 2008;

Jupp, D. L. B. Issues in Reflectance Measurement. Discussion Draft, August 1996. CSIRO Earth Observation Centre – Australia. Disponível em: <http://www.eoc.csiro.au/millwshop/ref_cal.pdf> . Acesso em: 13 nov. 2008.

Mendes, A. ; Rosário, P. P. **Metrologia & Incerteza de Medição**. São Paulo: Editora EPSE, 2005. 102 p.

Milton, E. J. Principles of Field Spectroscopy. **International Journal of Remote Sensing**, 1987. Vol.8, no. 12, 1807-1827.

Moreira, R. C. **Estudo de alvos urbanos com imagens do sensor HSS**. 2008.124p (INPE-15339-TDI/1375). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos. 2008. Disponível em: < <http://mtc-m18.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/mtc-m18@80/2008/03.27.17.28/doc/@4primeirasPaginas2008-08-28-16-40-01.pdf>> . Acesso em: 13 nov. 2008.

Moreira, R. C. ; Castro, R. M. ; Esposito, E. S. C. ; Lucca, E. V. D. . Sensor hiperespectral HSS: sumário das características técnicas. In: XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto (XII SBSR), 2005, Goiânia, GO. **Anais** do XII SBSR INPE, 2005, 2005. p. 4517-4524. CD-ROM, On-line. Disponível em: < <http://mar.te.dpi.inpe.br/col/ltid.inpe.br/sbsr/2004/11.03.16.58/doc/4517.pdf>> . Acesso em: 13 nov. 2008.

Steffen, C. A. Técnicas Radiométricas com o Spectron SE-590. In VIII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto, 1996, Salvador, Brasil, **Anais** do VIII SBSR INPE, 1996, INPE, p. 969-975. . CD-ROM, On-line. Disponível em: < <http://mar.te.dpi.inpe.br/col/sid.inpe.br/deise/1999/02.01.11.01/doc/T177.pdf>> . Acesso em: 13 nov. 2008.

Vuolo, J. H. **Fundamentos da Teoria de Erros**. São Paulo: Editora Edgard Blücher LTDA, 1996. 117 p.