

Estudo de métodos de calibração radiométrica de sensores ópticos orbitais

Marcus Vinnicius de Q. S. A. Costa¹, Alvaro José Damião², Ruy Morgado de Castro²

¹Instituto Tecnológico de Aeronáutica (ITA/DCTA), São José dos Campos/SP – Brasil

²Instituto de Estudos Avançados (IEAv/DCTA), São José dos Campos/SP – Brasil

Resumo – A missão de Inteligência, Vigilância e Reconhecimento (IVR) é fundamental para as Forças Armadas no contexto de paz ou de guerra, pois permite a obtenção de informações cruciais para o planejamento e condução das operações militares. Nesse contexto, os satélites de sensoriamento remoto óptico cumprem papel importante na missão IVR por permitirem coleta de informação em praticamente qualquer lugar do planeta. Entretanto, para que haja confiabilidade na coleta das informações, é fundamental que os sensores embarcados em tais satélites estejam permanentemente calibrados. Dessa forma, este artigo tem como objetivo realizar um estudo sobre os métodos atualmente empregados de calibração radiométrica de sensores ópticos orbitais em voo, que consiste na fase mais desafiadora para a manutenção da calibração dos sensores. É apresentada uma descrição de cada método e uma análise comparativa entre eles, destacando-se ao final os principais pontos negativos e positivos de cada um.

Palavras-Chave – Sensoriamento remoto, sensores orbitais, imageamento óptico.

I. INTRODUÇÃO

Satélites de sensoriamento remoto são capazes de coletar informações detalhadas de áreas e objetos de interesse militar dentro e fora do território nacional. Tais informações auxiliam no planejamento, acompanhamento, condução e avaliação das operações militares. Dessa forma, ao permitirem uma observação sistemática da superfície terrestre, sem as limitações impostas por fronteiras e pelo alcance dos sensores a bordo de aeronaves, essas plataformas espaciais ampliam sobremaneira as capacidades das Forças Armadas na Tarefa de Inteligência, Vigilância e Reconhecimento (IVR) [1].

Nesse contexto, destaca-se que o sucesso de um programa de sensoriamento remoto óptico depende do conhecimento das características radiométricas, espectrais e de resolução espacial dos sistemas sensores embarcados utilizados, assim como ocorre por exemplo na série de satélites Landsat, cujos sensores têm suas características radiométricas continuamente avaliadas e atualizadas. Assim, a calibração radiométrica, desde a fase pré-lançamento até o final da missão, é um procedimento fundamental que permite aos usuários aplicarem os dados quantitativamente de maneira fidedigna nos seus estudos [2].

No que diz respeito a sensores embarcados em satélites, a manutenção de sua calibração é um grande desafio, dada a inviabilidade do recolhimento do equipamento para uma análise e calibração laboratorial. Dessa forma, esse artigo apresenta uma análise comparativa dos principais métodos de calibração em voo de sensores imageadores ópticos orbitais. Para tanto, na seção II são discutidos aspectos teóricos relativos à radiometria no imageamento óptico orbital. Na seção III apresentam-se os principais métodos de calibração em voo de sensores orbitais. Na seção IV é realizada uma

análise comparativa entre os métodos. Na seção V é apresentada uma breve discussão sobre o histórico e a situação atual no Brasil no que diz respeito à calibração radiométrica de satélite, finalizando-se com as principais conclusões na seção VI.

II. RADIOMETRIA NO IMAGEAMENTO ÓPTICO ORBITAL

Um imageador óptico orbital consiste em um sistema com sensores eletro-ópticos, embarcado em um satélite, capaz de receber a radiância (fluxo de radiação por área e ângulo sólido) oriunda de objetos na superfície terrestre. A Fig. 1 ilustra um sensor óptico orbital. Nesta figura podemos observar que a radiação proveniente do Sol chega à Terra, atravessa a atmosfera e é refletida por uma superfície ou objeto (chamados de alvo). A radiação refletida no alvo, bem como aquela espalhada na atmosfera e refletida por outros alvos, atravessa a atmosfera e chega ao sistema sensor. Desta maneira, a grandeza L_0 corresponde à totalidade da radiância recebida pelo sensor e recebe o nome de radiância no topo da atmosfera (TOA – *Top of Atmosphere*). Como é possível perceber, L_0 é a soma de radiação oriunda de diversas fontes, não somente do alvo de interesse, devido a efeitos de refração, difração e reflexão na interação da radiação com a atmosfera e a superfície terrestre.

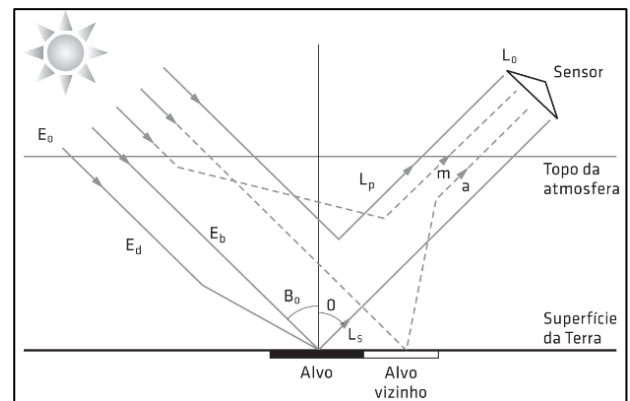


Fig. 1. Radiância recebida por um sensor orbital [3]

Outra grandeza importante de se destacar é E_0 , que diz respeito à irradiância proveniente do Sol no topo da atmosfera. Essa grandeza é função da distância média entre Terra e Sol (D) e do ângulo zenital solar (θ_0), variando, portanto, de acordo com o dia do ano, horário do dia e região do globo terrestre, conforme (1), onde E_{sol} é a irradiância do Sol [3]:

$$E_0 = \frac{E_{sol} \cdot \cos \theta_0}{D^2} \quad (1)$$

Na faixa do espectro de 400 a 1100 nm (visível e infravermelho próximo), a principal fonte de radiação oriunda dos objetos imageados corresponde à radiação refletida do Sol, já que é insignificante a radiação devida à emissão própria dos corpos nessa faixa do espectro, para as temperaturas típicas da superfície terrestre. Dessa forma, além da Radiância (L_0), outra grandeza muito importante para as análises radiométricas é a reflectância (ρ). Como ambas as grandezas são espectrais, ou seja, variam de acordo com o comprimento de onda, passaremos a tratá-las com o subscrito λ .

De maneira simplificada, a reflectância é dada por (2), como uma razão adimensional da radiação emitida pelo objeto após a reflexão da luz solar (L_λ) e a radiação do Sol ($E_{sol\lambda}$), além dos outros fatores que envolvem a geometria entre o alvo, o Sol e o sensor [4].

$$\rho_\lambda = \frac{\pi \cdot L_\lambda \cdot D^2}{E_{sol\lambda} \cdot \cos \theta_0} \quad (2)$$

Além dos objetos analisados possuírem características de radiância e reflectância espectrais, os sensores que os observam também possuem uma Função de Resposta Espectral ou *Spectral Response Function* (SRF), que determina a sensibilidade do detector em cada comprimento de onda. A Fig. 2 ilustra a comparação gráfica da SRF de quatro diferentes sensores ópticos orbitais que equipam os satélites CBERS-4, Landsat-7 e Landsat-8 [2], onde fica evidente que mesmo trabalhando em bandas semelhantes, as respostas espectrais possuem diferenças.

Cabe destacar que os sistemas sensores mais comuns, também chamados de multiespectrais, são geralmente projetados para operarem em 5 bandas, representadas por B1, B2, B3, B4 e B5, que correspondem às faixas vermelha, verde e azul do RGB (*Red, Green and Blue*), infravermelho próximo (NIR – *Near infrared*) e a pancromática, que engloba praticamente toda a faixa do visível [3].

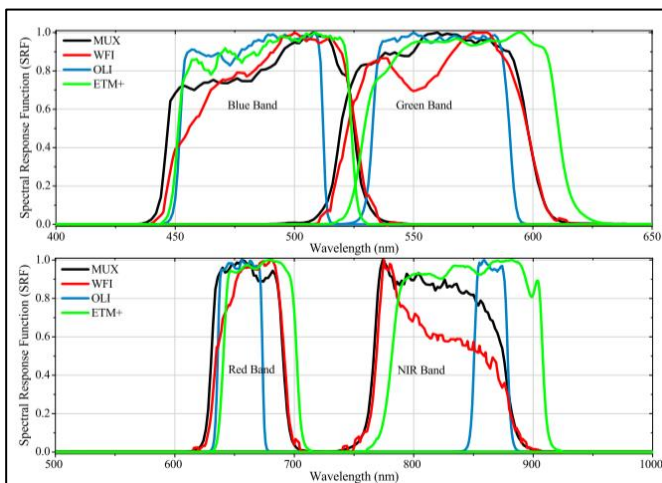


Fig. 2. Função de Resposta Espectral de quatro diferentes sensores ópticos orbitais [2].

Os dados radiométricos coletados pelos sensores permitem a formação de imagens representativas da área de interesse. Um exemplo muito utilizado deste tipo de sistema são as

câmeras CCD (*charge coupled devices*), que possuem matrizes de detectores [3]. Os detectores internos aos sensores transformam a energia recebida em um sinal elétrico que é convertido em um número digital (ND) que está dentro de um intervalo associado à resolução radiométrica do sensor. Essa resolução é definida pelo número de bits (n) que corresponde a uma potência de 2 (2^n) que define a capacidade de discretização da energia recebida [3].

Os dados brutos de ND fornecidos pelo sensor podem ser convertidos em radiância de acordo com uma relação linear dada por (3) [5]:

$$L_i = G_i \cdot ND_i + B_i \quad (3)$$

Em (3), o coeficiente G_i corresponde ao ganho na banda i , e B_i é conhecido como coeficiente de *bias* ou *offset* também na banda i . O coeficiente B representa a chamada corrente escura do detector, ou seja, a resposta do mesmo na ausência de radiação recebida [3].

Dessa forma, a partir de (2) e (3) é possível obter tanto a radiância espectral (L_λ) quanto a reflectância (ρ_λ) do alvo de interesse. Deve-se destacar ainda o efeito da interação entre a radiação e a atmosfera terrestre, conhecida como transmitância atmosférica, que pode afetar fortemente as quantidades de radiação recebidas pelo sensor. A transmitância atmosférica deve, portanto, ser levada em consideração quando na realização de medições.

III. CALIBRAÇÃO DE SENSORES ORBITAIS

A calibração de um sensor consiste em estimar os valores dos coeficientes de ganho G e offset B apresentados em (3). Na fase pré-lançamento do satélite eles são determinados em condições controladas, em laboratório. Entretanto, durante seu voo em órbita o sensor vai passando por processos de degradação devido a tensões mecânicas, radiação cósmica e ultravioleta e ação de gases que vão impactando a calibração radiométrica pré-lançamento. Com isso, para se manter medições consistentes e acuradas, é fundamental que seja mantido um monitoramento contínuo da calibração [6].

A calibração com o sensor em operação em órbita apresenta grande desafio, devido à impossibilidade de se recolher ou acessar o equipamento. Com isso, nesta seção são apresentados os principais métodos de calibração em voo de sensores ópticos embarcados em satélites, quais sejam, a calibração por instrumentos a bordo do satélite, calibração vicária e calibração cruzada.

A. Instrumentos a bordo do satélite

Uma das possibilidades de se realizar uma calibração em voo é com instrumentos instalados a bordo do próprio satélite, com lâmpadas de radiância conhecida posicionadas estrategicamente para permitir constante avaliação das sensibilidades dos detectores [3]. Além das lâmpadas, esses tipos de dispositivos, chamados de calibradores internos (*On-board Calibrator* - OBC), podem também dispor de difusores solares para direcionar diretamente para o sensor sinais de referência conhecidos para a constante calibração em voo [6].

Como exemplos de sensores que utilizam esse método de calibração, podemos citar o MSS (*Multispectral Scanner*) a bordo dos satélites Landsat 1, 2 e 3. Cada sensor MSS incorpora um sistema calibrador interno (*Internal Calibrator – IC*) que possui um par de lâmpadas. Já o sensor TM (*Thematic Mapper*), embarcado nos Landsat 4 e 5, possui um IC com três lâmpadas (para calibração das bandas reflexivas) e um corpo negro de cavidade (para calibração das bandas termais). O ETM+ (*Enhanced Thematic Mapper*) equipa o Landsat 7 e possui três dispositivos distintos de calibração a bordo, sendo dois para calibração a partir de difusores solares e um IC semelhante aos anteriores. Por fim, o sensor ALI (*Advanced Land Imager*), a bordo do Earth Observer -1 (EO-1), possui dois dispositivos internos de calibração, sendo um com difusor solar e outro com uma lâmpada. Além disso, o ALI tem ainda a capacidade de coletar observações lunares e estelares para fins de calibração [4].

B. Calibração vicária

Este tipo de calibração utiliza como referência medições *in situ* da reflectância ou radiância de superfícies terrestres, que são usadas como verdade de campo. As medições no solo devem ser feitas simultaneamente à passagem do satélite sobre a localidade. Além disso, é fundamental fazer a caracterização atmosférica no momento das aferições para se estimar a transmitância atmosférica. Com isso, é possível então estimar, a partir da verdade de campo medida, o valor de radiância/reflectância no topo da atmosfera, ou seja, a radiação que está atingindo o sensor do satélite. Este valor é então comparado com o ND fornecido pelo sensor no momento do imageamento da localidade, para se estimar os coeficientes de calibração G e B [2].

A Fig. 3 ilustra esquematicamente o procedimento descrito, onde $L_{\lambda sup}$ é a medida de radiância feita em solo pelo radiômetro e $L_{\lambda apa}$ é a radiância aparente no topo da atmosfera, que, presumidamente, será recebida pelo sensor no satélite. Deve-se destacar aqui que, na calibração absoluta, objeto de estudo desse trabalho, a radiação no topo da atmosfera é chamada de “aparente” uma vez que não diz respeito apenas à radiação oriunda exclusivamente do alvo de referência no terreno, mas a diversas outras interações, conforme apresentado na Fig. 1 [3].

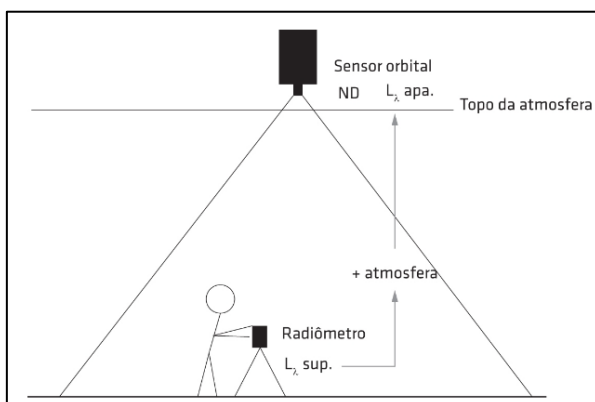


Fig. 3. Esquema ilustrativo da calibração vicária [3].

Para a realização desse procedimento, são utilizadas localidades específicas na superfície terrestres com reflectâncias estáveis e previsíveis, conhecidas como *Pseudo-Invariant Calibration Sites* (PICS) [6]. Tais superfícies devem possuir algumas características importantes [3]:

- reflexão isotrópica, com variações de radiância inferiores a 5% para diversas condições geométricas de iluminação e visada (ângulos zenitais e azimutais da fonte de iluminação e do sensor, respectivamente);
- homogeneidade, com variações de radiância inferiores a 5% ao longo de toda sua extensão em um mesmo intervalo de tempo;
- possuir valores de reflectância superiores a 30% na faixa espectral analisada;
- altitude superior a 1000 m, para reduzir a concentração de aerossóis;
- possuir uniformidade espacial;
- não apresentar variações sazonais de brilho; e
- serem de fácil acesso.

A definição de homogeneidade e isotropia é uma tarefa árdua que envolve a caracterização radiométrica de diversos pontos no terreno em um curto tempo, de modo a evitar variações consideráveis nas condições meteorológicas e no ângulo de zênite solar no decorrer das medições [7].

No ano de 2010, Pinto, C. T. et al realizaram a caracterização das regiões de Correntina-BA (Brasil) e Tuz Gölü (Turquia) [8]. A Fig. 4 apresenta a grande quantidade de pontos de coleta de dados utilizadas nessas medições. Após a coleta de dados foi feita uma análise estatística para estimar a homogeneidade das duas áreas avaliadas.

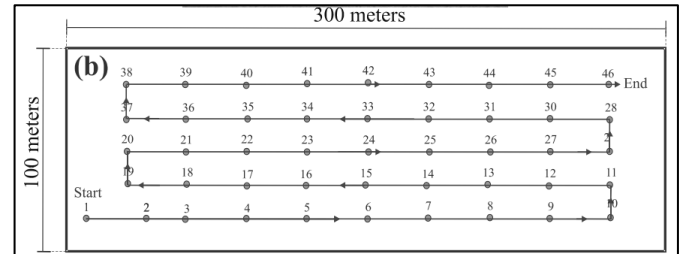


Fig. 4. Amostras de pontos de coletas de dados radiométricos na região de Tuz Gölü (Turquia) [8].

O tamanho das áreas escolhidas deve estar relacionado com a resolução espacial do sensor a ser calibrado, de forma que a área avaliada seja compatível com o tamanho do pixel do sensor orbital [2].

Para a medição *in situ*, deve ser escolhido adequadamente o radiômetro ou espectrorradiômetro de acordo com algumas características importantes [3]:

- o equipamento deve atuar com amplitude espectral igual ou maior do que a do sensor a ser calibrado;
- as faixas espectrais de operação devem ser coincidentes;
- é importante conhecer também a Função de Resposta Espectral (SRF) do equipamento, buscando-se opções que tenham tais funções com a maior coincidência possível em relação ao sensor a ser

calibrado (observar como exemplo as SRF apresentadas na Fig. 2);

- d) devido à necessidade de a coleta de dados ser feita concomitante à passagem do sensor orbital pela região, é necessário que o equipamento de solo tenha um período de integração rápido, para permitir uma rápida coleta dos dados;
- e) o equipamento de solo deve estar calibrado com uma referência padrão.

Para o cálculo da reflectância da superfície de referência é utilizado um painel de referência aproximadamente lambertiano com difusão perfeita, colocado sob as mesmas condições de iluminação e geometria de visada da superfície avaliada. O fator de reflectância do alvo (FR_{Alvo}) é calculado por (4), onde L_{Alvo} é a radiância medida do objeto (superfície), L_{Painel} é a radiância medida do painel lambertiano de referência, com reflexão supostamente perfeita, e k é um fator de correção do painel lambertiano, usualmente fornecido pelo seu fabricante [2].

$$FR_{alvo} = \frac{L_{alvo}}{L_{painel}} \cdot k \quad (4)$$

C. Calibração cruzada

A calibração cruzada ou *cross-calibration* é um método no qual a resposta de um sensor é comparada com a resposta de outro sensor radiometricamente bem caracterizado e com acurácia de calibração bem conhecida [2]. No caso de sensores orbitais, idealmente, ambos os sensores devem realizar um imageamento praticamente simultâneo de um alvo em comum no solo e com a mesma geometria de visada, de forma que a calibração do sensor de referência seja então transferida para o sensor a ser calibrado [5], [6].

Com relação ao ângulo de visada, é muito raro que dois satélites observem o mesmo alvo ao mesmo tempo e com a mesma geometria. Dessa forma, as diferenças angulares devem ser corrigidas para a realização da calibração [6].

Além disso, muitas vezes o imageamento exatamente simultâneo também não é possível de ser realizado, de forma que é importante que os alvos utilizados sejam o mais estáveis possível tanto em questão espacial, como temporal e espectral [6]. Para tanto, para a calibração cruzada, idealmente devem ser utilizados os *Pseudo-Invariant Calibration Sites* (PICS), conforme características descritas na Seção III.B deste trabalho.

Na comparação de ambos os sensores é fundamental ter em mente que suas respostas espectrais podem diferir significativamente, mesmo para sensores projetados para operarem nas mesmas bandas. Dessa forma, medidas realizadas na mesma região espectral de ambos os sensores podem não ser diretamente comparáveis, uma vez que suas Funções de Resposta Espectral (SRF) são diferentes [5], conforme exemplo apresentado na Fig. 2. Apesar dos sensores operarem, teoricamente, nas mesmas quatro bandas espectrais (azul, verde, vermelho e infravermelho próximo), as

sensibilidades de cada um diferem significativamente em cada banda.

Dessa forma, utiliza-se o *Spectral Band Adjustment Factor* (SBAF) para quantificar e compensar essas diferenças nas respostas espectrais, de forma a evitar grandes incertezas nos resultados da calibração cruzada [5]. O SBAF é, portanto, um fator que permite que as reflectâncias medidas por ambos os sensores possam ser comparadas adequadamente [6].

O SBAF é calculado como uma razão entre as reflectâncias no topo da atmosfera (TOA) do sensor de referência pelo sensor a ser calibrado [5], conforme (5):

$$SBAF = \frac{\rho_{\lambda,ref}}{\rho_{\lambda,cal}} = \frac{\int_0^{\infty} \rho_{\lambda,ref} \cdot SRF_{\lambda,ref} \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} SRF_{\lambda,ref} \cdot d\lambda} \cdot \frac{\int_0^{\infty} \rho_{\lambda,cal} \cdot SRF_{\lambda,cal} \cdot d\lambda}{\int_0^{\infty} SRF_{\lambda,cal} \cdot d\lambda} \quad (5)$$

IV. COMPARAÇÃO DOS MÉTODOS DE CALIBRAÇÃO

Na seção III foram descritos os procedimentos e principais características de três métodos de calibração em voo de sensores ópticos orbitais. Nesta seção IV é apresentada uma análise comparativa com os principais pontos positivos e negativos de cada um dos métodos. Para tal serão analisados os aspectos referentes à logística e à acurácia de cada método:

A. Instrumentos a bordo do satélite

1) *Logística*: Nem todos os sensores orbitais estão equipados com instrumentação a bordo para calibração (OBC) [6]. Porém, quando estes estão presentes, o processo de calibração, no que se refere à logística para obtenção e análise dos dados, é o mais favorável dentre os três aqui analisados, visto que não depende de praticamente nenhuma estrutura para coleta de dados, os quais são enviados diretamente pelo próprio satélite. Além disso, esse método também não exige a coleta de dados atmosféricos para cálculo da transmitância atmosférica, visto que a calibração é feita no interior do próprio satélite. Com isso, esse método permite uma calibração com uma periodicidade bastante favorável, com calibrações frequentes do sensor.

2) *Acurácia*: Os calibradores internos precisam de constante monitoramento para a checagem de sua acurácia [6], visto que não é possível validar a radiância das lâmpadas de calibração uma vez que estas já estejam em órbita. Os algoritmos de calibração dos OBC assumem que a calibração das lâmpadas permanece inalterada desde o lançamento do satélite, atribuindo qualquer variação nas respostas como sendo devido a mudanças no sensor, e não à possibilidade de variações na própria lâmpada de calibração [4]. Entretanto, avaliação de lâmpadas do sensor TM dos satélites Landsat 4 e 5, mostraram que elas não são particularmente estáveis [4]. Nesse sentido, os calibradores internos que dispõem de difusores para calibração a partir da luz solar ou até mesmo da Lua e estrelas [4], podem minimizar as incertezas relativas à fonte de iluminação para a calibração. Dadas as incertezas

envolvidas, é importante que as calibrações realizadas por OBC sejam periodicamente validadas por outros métodos.

B. Calibração vicária

1) *Logística*: Com relação aos aspectos logísticos, esse método é o mais complexo, uma vez que exige a coleta de dados *in situ* em regiões da superfície terrestre geralmente remotas e com diversos equipamentos complexos necessários para as medições. Além disso, é necessário que as medições sejam realizadas de maneira praticamente simultânea à passagem do satélite pela região e que isso ainda aconteça em um momento com meteorologia favorável, com pouca ou nenhuma cobertura de nuvens. Soma-se a isso a necessidade de coletar dados em diversos pontos no terreno (Fig. 4), e de coletar dados atmosféricos para o cálculo da transmitância atmosférica, o que dificulta ainda mais a fase de coleta e de análise dos dados.

2) *Acurácia*: Considerando que as medições da superfície de referência são realizadas *in situ* e com condições bem controladas de instrumentação, esse método tenta apresentar uma boa acurácia no que diz respeito aos valores de radiância/refletância de referência. Entretanto, nesse método de calibração existem várias fontes de propagação de erros, quais sejam, o radiômetro/espectroradiômetro, o painel lambertiano de referência, a transmitância atmosférica e a superfície de referência (PICS). Contudo, a maioria dessas fontes têm seus dados e calibrações bem conhecidos e controlados, reduzindo bastante a incerteza associada. Com relação às PICS, nem sempre sua homogeneidade e isotropia são perfeitas, como sugere por exemplo o trabalho de Pinto, C. T. et al (2012) [8], onde as regiões avaliadas de Correntina-BA (Brasil) e Tuz Gölü (Turquia) foram consideradas como não uniformes espectralmente. Dessa forma, não é possível garantir que a região imageada seja exatamente coincidente com a região de referência medida no solo e, portanto, pode haver diferenças na radiância de ambas as áreas.

C. Calibração cruzada

1) *Logística*: Este método também apresenta uma logística simplificada pois os dados de calibração são obtidos diretamente dos próprios satélites envolvidos. Entretanto, é necessário coletar um número adequado de pares de cenas dos dois sensores para uma calibração efetiva e com baixas incertezas [6]. Além disso, para que os pares de cenas sejam aproximadamente iguais eles devem cobrir uma mesma área da superfície, com uma geometria de visada praticamente igual e quase simultaneamente. Visto que cada satélite tem seu próprio ciclo de revisita da região imageada e que no momento da coleta dos dados é necessário que a meteorologia esteja favorável (sem cobertura de nuvens), torna-se muito difícil a coincidência de todos esses fatores, de ambos os satélites passarem simultaneamente sobre o alvo, com meteorologia favorável, e, portanto, é comum que sejam necessários anos para a coleta da quantidade suficiente de dados [6]. Como exemplos, têm-se a calibração cruzada dos sensores ETM+ e MODIS que precisou de cinco anos para coletar nove pares de cenas coincidentes (com 30 minutos de defasagem) e a

calibração cruzada dos sensores OLI e MSI que precisou de três anos para obter oito pares de cenas [6]. Para contornar esse problema, é possível utilizar as *Extended Pseudo-Invariant Calibration Sites* (EPICS), que consistem em PICS muito maiores, que permitem que muitos sensores realizem o imageamento de alguma porção do EPICS quase diariamente, possibilitando uma avaliação do desempenho dos sensores com uma frequência muito maior. Com isso, é possível a avaliação de tendência no desempenho dos sensores, possibilitando a detecção de diferenças entre eles em um tempo muito menor [6]. A utilização dessa nova técnica apresentou resultados similares aos obtidos com as abordagens tradicionais de PICS, com a calibração cruzada entre os sensores dos satélites Landsat7/8 e Sentinel 2A/B atingindo uma diferença média de 2,5% com uma incerteza de 8% [6].

2) *Acurácia*: Primeiramente, deve-se considerar que as condições idealizadas para a coleta dos pares de imagens são praticamente impossíveis de serem obtidas, de forma que é necessário proceder correções, por exemplo, na geometria de visada, que dificilmente será idêntica. Pode haver incertezas associadas também à falta de homogeneidade absoluta da PICS escolhida como referência e à calibração do sensor de referência. É importante destacar a necessidade de se aplicar corretamente o fator de correção SBAF descrito na letra C da seção III deste artigo, como forma de minimizar as incertezas devidas às diferenças nas respostas espectrais dos sensores comparados. Por fim, o método pode ser considerado como eficaz, como pode-se observar pela validação da calibração dos sensores MUX e WFI do satélite CBERS-4. Estes sensores foram calibrados utilizando a calibração vicária, a partir da qual foram obtidos os valores dos coeficientes de calibração. A partir dos coeficientes obtidos, foi realizada uma calibração cruzada com o sensor ETM+ do satélite Landsat 7, o qual possui caracterização e calibração bem conhecidas e aceitas como referência. Os resultados indicaram uma boa concordância entre os sensores, com diferença média 2,2% após a aplicação do fator de correção SBAF [2].

V. DISCUSSÕES

A calibração radiométrica de sensores ópticos a bordo de plataformas orbitais no Brasil teve início, de maneira mais consistente, com o lançamento e operação dos primeiros satélites do Projeto CBERS [9], em 2000. Entretanto, somente no trabalho de Pinto et al [2] é que foi realizada uma calibração radiométrica vicária completa, levando em consideração as incertezas experimentais nos sensores MUX e WFI a bordo do CBERS 4. Mesmo assim, até agora, não existe no Brasil uma equipe dedicada à calibração sistemática de sensores ópticos orbitais.

Atualmente a calibração radiométrica passa por vários desafios. Um destes desafios está relacionado com a calibração de sensores de alta resolução espacial e que possuem visada oblíqua. Diferentemente dos sensores a bordo do Landsat e do CBERS, que possuem baixa resolução espacial (com pixel em torno de 20 m) e visada ao nadir, para os quais os métodos de calibração radiométrica descritos foram desenvolvidos, a calibração radiométrica destes novos sensores (com pixel em torno de 1 m) vai exigir, pelo menos, adaptações nas

metodologias e a diminuição das incertezas experimentais em alguns procedimentos, para compensar o sinal mais ruidoso destes sensores.

VI. CONCLUSÕES

Os sensores orbitais são fundamentais para a atividade de Inteligência, Vigilância e Reconhecimento (IVR) das Forças Armadas, por permitirem a obtenção de informações de interesse militar em praticamente todo o globo terrestre. Entretanto, para que haja confiabilidade nos dados fornecidos, é fundamental que os sensores permaneçam calibrados durante toda sua operação. Contudo, a calibração de sensores orbitais em voo é uma tarefa desafiadora, dada a impossibilidade de acesso aos mesmos para uma avaliação e calibração laboratorial.

Este artigo teve como objetivo apresentar três métodos de calibração de sensores ópticos orbitais na fase de voo, e realizar uma análise comparativa dos quesitos logística e acurácia.

Pôde-se observar que todos são eficazes no que diz respeito à obtenção adequada dos coeficientes de calibração, tendo cada um deles suas vantagens e desvantagens nos quesitos avaliados.

Com relação à logística, o procedimento de calibração com instrumentação a bordo do satélite se mostrou como o mais favorável, especialmente por permitir uma calibração frequente dos sensores. Dessa forma, conclui-se que, idealmente, é importante que haja calibradores internos no projeto dos sensores orbitais, de preferência com utilização de difusores solares e/ou calibração pela luz da Lua e estrelas, além das lâmpadas de calibração. Porém, periodicamente as condições de calibradores internos devem ser validadas por um dos outros dois métodos.

A calibração vicária tende a apresentar uma boa acurácia, uma vez que os dados da superfície de referência são coletados *in situ* em condições bem controladas, tendo como desvantagem principal a complexa logística necessária.

A calibração cruzada por vezes pode necessitar de um longo tempo para ser concluída, porém uma nova abordagem propostas, com utilização de superfícies de referência bem maiores (EPICS), possibilita a redução do tempo necessário, mantendo resultados adequados similares ao método tradicional. Além disso, resultados mostram grande aderência dos resultados obtidos por esse método quando validando os coeficientes obtidos pela calibração vicária.

REFERÊNCIAS

- [1] BRASIL. Comando da Aeronáutica. Portaria nº 1.225/GC-3, de 10 de novembro de 2020. Aprova a edição da Doutrina Básica da Força Aérea Brasileira (DCA 1-1) – Volume 2. Boletim do Comando da Aeronáutica, Brasília, n. 205, 12 nov. 2020.
- [2] C. Pinto *et al.*, “First in-flight radiometric calibration of MUX and WFI on-board CBERS-4”, *Remote Sens (Basel)*, vol. 8, nº 5, 2016, doi: 10.3390/rs8050405.
- [3] F. J. Ponzoni, C. T. Pinto, R. A. C. Lamparelli, J. Z. Junior e M. A. H. Antunes, “*Calibração de Sensores Orbitais*”. São Paulo: Oficina de Textos, 2015. Consult. 2023-07-18. [Em linha]. Disponível: <https://play.google.com/books/reader?id=IBDkBWAAQBAJ&pg=GBS.PT2.w.0.0.0.3&hl=pt>
- [4] G. Chander, B. L. Markham, e D. L. Helder, “Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors”, *Remote Sens Environ*, vol. 113, nº 5, p. 893–903, maio 2009, doi: 10.1016/j.rse.2009.01.007.
- [5] C. T. Pinto *et al.*, “Evaluation of the uncertainty in the spectral band adjustment factor (SBAF) for cross-calibration using Monte Carlo simulation”, *Remote Sensing Letters*, vol. 7, nº 9, p. 837–846, set. 2016, doi: 10.1080/2150704X.2016.1190474.
- [6] P. Khakurel, L. Leigh, M. Kaewmanee, e C. T. Pinto, “Extended pseudo invariant site-based trend-to-trend cross-calibration of optical satellite sensors”, *Remote Sens (Basel)*, vol. 13, nº 8, abr. 2021, doi: 10.3390/rs13081545.
- [7] C. Teixeira Pinto, “Avaliação das Incertezas na Caracterização de Superfícies de Referência para Calibração Absoluta de Sensores Eletro-ópticos”, 2011.
- [8] C. T. Pinto, F. J. Ponzoni, R. Morgado De Castro, e D. J. Griffith, “Spectral Uniformity Evaluation of Reference Surfaces for Airborne and Orbital Sensors Absolute Calibration”, 2012. [Online]. Disponível em: www.scielo.br/rbg
- [9] BRASIL, INPE. “História do Programa CBERS”. Disponível em: <http://www.cbbers.inpe.br/sobre/historia.php>, acesso em: 20 de julho de 2023.