

Resultados Preliminares da Comparação de Metodologias de Caracterização Radiométrica de Sensores Eletro-ópticos em Campo

Thamis da Silva Salles¹, Marcelo Girão Pessoa^{1,2}, Pâmela Carvalho Molina², Marilisi Chicarone Vianna Dias², Diogo Machado Custódio³, Leidiane do Livramento Andrade², Marcus Vinnicius de Quina Santos Amorim Costa⁴, Alvaro José Damiano^{1,2} e Ruy Morgado de Castro^{2,5}

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

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

³Instituto de Aeronáutica e Espaço (IAE), São José dos Campos/SP – Brasil

⁴Comando de Preparo (COMPREP), Brasília/DF – Brasil

⁵Universidade de Taubaté (UNITAU), Taubaté/SP – Brasil

Resumo—Este trabalho apresenta resultados preliminares da comparação de duas metodologias para caracterização radiométrica em campo de um sensor eletro-óptico do tipo multiespectral. As metodologias utilizam uma câmera Parrot Sequoia e um espectrorradiômetro FieldSpec 4. A primeira metodologia baseia-se na refletância de diferentes superfícies (alvos de referência), enquanto a segunda explora a variação da irradiância solar incidente em uma Placa de Spectralon ao longo de um determinado período. Em ambas as abordagens, o arranjo experimental é mantido fixo, com aquisição simultânea de imagens pela câmera e medições de radiância espectral pelo espectrorradiômetro da superfície refletora, com posterior geração de curvas de calibração radiométrica. Os resultados comparados sugerem a viabilidade de ambas as metodologias, com coeficientes de ganho e *offset* muito semelhantes e com coeficientes de correlação linear muito próximos de 1. Neste trabalho, são discutidas as vantagens operacionais e limitações das metodologias.

Palavras-Chave—caracterização radiométrica, sensoriamento remoto, comparação de metodologias.

I. INTRODUÇÃO

Sensores eletro-ópticos são dispositivos essenciais para a produção de dados em sensoriamento remoto, sendo amplamente utilizados e empregados de forma dual (militar e civil), como vigilância, monitoramento ambiental, inteligência e mapeamento geoespacial. Para que esses dados sejam convertidos em informações confiáveis, é essencial que tais dispositivos estejam devidamente caracterizados e calibrados [1]. Para tal, é fundamental que se tenha conhecimento de suas características espectrais, radiométricas e espaciais, de forma a permitir que o operador não dependa unicamente dos dados fornecidos pelo fabricante [2].

Tradicionalmente, essas caracterizações são realizadas em ambientes laboratoriais controlados, considerando-se a facilidade de se operar equipamentos que utilizam fontes padronizadas e estáveis, além de esferas integradoras e monocromadores calibrados. Entretanto, devido à natureza de

operação desses sensores, havendo uma gama de modelos empregados em ambientes operacionais, os quais mantêm-se em um ciclo de trabalho ininterrupto, deve-se desenvolver metodologias de caracterização e calibração em campo, nas condições ambientais de uso (ou as mais próximas das reais), especialmente em casos de sensores que são embarcados em plataformas móveis, como drones e satélites [3].

Assim, entre as formas de caracterização de um sensor eletro-óptico, pode-se nominar: a caracterização espectral, que tem por objetivo obter a sensibilidade relativa do sensor em cada comprimento de onda [2]; a caracterização radiométrica, onde define-se a relação entre a radiância que sensibiliza o sensor e os números digitais gerados por essa radiância incidente [4]; e a caracterização espacial, que busca definir a resolução espacial do sensor, associando-se à melhor relação entre a distância entre o alvo e a câmera, a depender do tipo de uso do sensor, buscando determinar os menores detalhes da cena que podem ser distinguidos na imagem gerada pelo sensor [5].

Neste contexto, este trabalho propõe e compara duas abordagens metodológicas para a caracterização radiométrica em campo de uma câmera multiespectral. A primeira abordagem utiliza uma única superfície de alta refletância, aproximadamente lambertiana (Spectralon), e explora a variação da irradiância solar ao longo do dia. A segunda abordagem utiliza superfícies homogêneas, mas com diferentes refletâncias entre si.

Na segunda abordagem, deve-se destacar que medições de refletância garantem que o comportamento espectral das superfícies atenda ao critério de uniformidade radiométrica, tendo em vista que o fator de refletância deve ser estável (constante) para a faixa espectral de interesse [6].

II. CARACTERIZAÇÃO RADIOMÉTRICA

A caracterização radiométrica é definida como a relação entre a resposta de um sensor, em números digitais - ND , e a radiação eletromagnética que o sensibiliza, expressa em radiância - L [7]. Em geral, os sistemas sensores são projetados para responder a relação entre L e ND de forma linear [8]. Além disso, considerando que um sistema sensor possua algumas bandas, b , essa condição é definida em (1).

$$L_b = G_b \cdot ND_b + B_b \quad (1)$$

onde b é uma banda do sistema sensor, L_b é a radiância total da banda b , G_b é o coeficiente de ganho, ND_b é o Número Digital e B_b é o coeficiente de *bias* (ou *offset*).

A radiância L_b é obtida a partir da composição dos espectros de radiância espectral provenientes das superfícies refletoras, identificados neste trabalho como $l(\lambda)$, ponderados pela Função de Resposta Espectral (FRE) normalizada [7] da banda do sistema sensor $FRE_{sensor_{norm}}(\lambda)$ [7], conforme (2).

$$L(\lambda) = l(\lambda) \times FRE_{sensor_{norm}}(\lambda) \quad (2)$$

Assim, para se obter a radiância total na banda L_b , integra-se a radiância $L(\lambda)$, conforme explicitado em (3).

$$L_b = \int_{\lambda_1}^{\lambda_2} L(\lambda) d\lambda \quad (3)$$

Os números digitais são obtidos diretamente do sistema sensor (ou da imagem obtida com o sistema sensor). Deste modo, obtendo ND_b e L_b em dois ou mais pontos, verifica-se a dependência entre eles. Assim, se essa dependência é linear, conforme (1), a caracterização radiométrica é entendida como a determinação dos coeficientes G_b e B_b .

III. MATERIAIS UTILIZADOS

Nas medições de radiância espectral utilizou-se um espectrorradiômetro de campo, modelo FieldSpec 4 da Analytical Spectral Devices (ASD), uma câmera multiespectral Parrot Sequoia e superfícies refletoras.

A. Espectrorradiômetro de Campo – ASD FieldSpec 4

O FieldSpec 4 (Fig. 1a) é um espectrorradiômetro de campo capaz de medir a energia radiante em uma faixa espectral compreendida entre 350 e 2.500 nm. A radiação é coletada por um conjunto de 57 fibras ópticas e distribuída para três radiômetros (um operando de 350 a 1.000 nm, outro de 1.000 a 1.850 nm e o último de 1.850 a 2.500 nm). Os dados fornecidos pelo espectrorradiômetro são amostrados de 1 em 1 nm [9]. Nas medições realizadas, o conjunto de fibras do espectrorradiômetro estava acoplado a um suporte e a um limitador de ângulo sólido com campo de visada (FOV - *Field of View*) de 8°, conforme Fig. 1b.

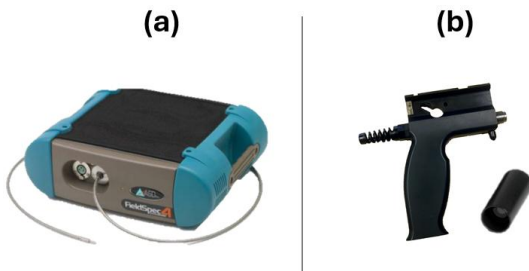


Fig. 1. Espectrorradiômetro de Campo (a) FieldSpec 4, com guia de fibras ópticas acopladas a um (b) suporte de fibra e limitador de FOV de 8°.

B. Câmera Multiespectral Parrot Sequoia

A câmera multiespectral Parrot Sequoia foi projetada para utilização em aplicações de agricultura de precisão, embarcada em drones [10]. Entretanto, no contexto deste trabalho, foi escolhida devido às suas características similares aos sensores embarcados em plataformas orbitais e câmeras de sensoriamento remoto. A câmera, conforme exposta na Fig. 2, possui quatro sensores de canais espectrais de banda estreita e um RGB (à esquerda na imagem), além de um sensor coletor de irradiância [10] denominado “*sunshine sensor*” (à direita na imagem). A resposta primária do sensor é analógica (em tensão ou corrente), e o número digital fornecido na imagem, como produto final, é resultado de uma conversão analógico-digital (por meio de um conversor ADC) realizada pela câmera. Suas principais características são apresentadas na Tabela I.



Fig. 2. Câmera Parrot Sequoia [11].

TABELA I

CARACTERÍSTICAS DA CÂMERA PARROT SEQUOIA

Sensor	Banda Espectral (nm)	Definição	Resolução Radiométrica
Green	530-570	1.280x960 (1,2MP)	10 bits
Red	640-680		
Red Edge (REG)	730-740		
NIR	770-810	16 MP	8 bits
RGB	-		

Por padrão, a câmera Parrot Sequoia foi desenvolvida para operar com configurações automáticas de ajustes, por meio da comunicação do conjunto de sensores com o *sunshine sensor*. Entretanto, utilizar ajustes automáticos de ISO e Tempo de Exposição significa ter que realizar uma caracterização radiométrica para cada combinação de ajuste. Sendo assim, utilizaram-se ajustes manuais e fixos para cada sensor monocromático, permitindo a utilização de uma caracterização radiométrica (para cada sensor) e uma dependência linear da radiância em função do número digital fornecido. Os ajustes de ISO e Tempo de exposição foram efetuados por meio de uma Interface de Programação de Aplicativos (*Application Programming Interface*, API) com o software Postman [12]. Com isto, o *sunshine sensor* não foi utilizado.

C. Superfícies Refletoras

Utilizou-se superfícies refletoras, para a radiação solar, com fatores de reflectância variando de 4% a 99%. Na metodologia de caracterização radiométrica por variação solar, utilizou-se apenas uma superfície considerada lambertiana, tendo alta isotropia e alta reflectância, composta do material

Spectralon. Para a metodologia por variação da reflectância de superfícies, foram utilizadas, além da placa de Spectralon, quatro superfícies (Fig 3), desenvolvidas por membros da equipe do Projeto de Calibração de Sensores e Imageadores Orbitais - CSIO, no Instituto de Estudos Avançados - IEAV. As superfícies (Fig. 3c) são discos de concreto de 7 cm de altura e 30 cm de diâmetro, pintados com tintas foscas para piso. Os discos foram pintados de branco, cinza claro, cinza escuro e preto.

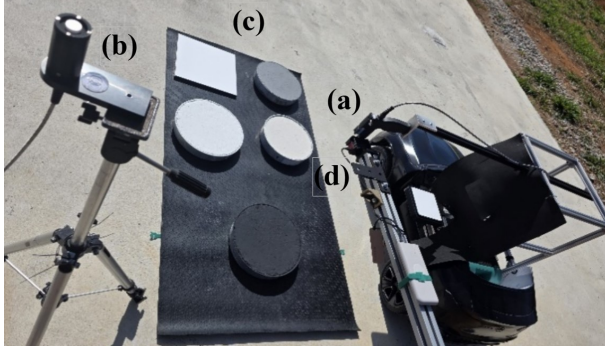


Fig. 3. Arranjo experimental para as metodologias de caracterização radiométrica em campo, com (a) um FieldSpec para medição de radiância, e (b) um FieldSpec para medição de irradiância, (c) superfícies refletoras (Spectralon; branca; cinza claro; cinza escuro; e preta), e (d) câmera Parrot Sequoia fixada ao nadir das superfícies.

IV. METODOLOGIA

A. Medições Exploratórias

Com o objetivo de garantir que não houvesse perdas de dados ou saturação das imagens obtidas com a câmera Parrot Sequoia, foram realizadas medições exploratórias para determinar os ajustes ideais de ISO e tempo de exposição da câmera. Para isso, foram capturadas imagens da Placa de Spectralon por volta de 12h do dia 04 de junho de 2025, em dois turnos de medição: no primeiro, variando o tempo de exposição (com ISO constante); e no segundo, variando o ISO (com *Exp Time* constante), conforme Tabela II.

TABELA II

SEQUÊNCIA DE CONFIGURAÇÃO MANUAL PARA A CÂMERA PARROT SEQUOIA

1º Turno	ISO	100					
	<i>Exp Time</i>	1	10	30	150	200	230
2º Turno	<i>Exp Time</i>	1					
	ISO	10	30	50	100	150	

Por meio dos testes, buscou-se um ajuste em que a média dos números digitais das imagens da placa de Spectralon se mantivesse a 80% da máxima resolução radiométrica dos sensores monocromáticos. Na Fig. 4 pode-se observar os histogramas dos números digitais das imagens de uma placa de Spectralon referentes ao 1º turno de medições, para o sensor NIR.

Na Fig. 4 observa-se que o histograma (d) possui média de ND igual a 48.947, com ND máximo em 55.040 e mínimo em 41.344, de forma que não há perda de dados, nem saturação, além da média estar o mais próxima possível de 80% da máxima resolução radiométrica (próximo a 52.000), sendo o tempo de exposição de 150 μ s definido para o sensor em análise.

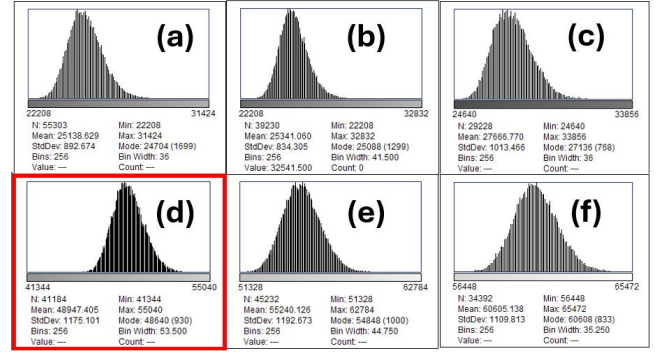


Fig. 4. Sequência de histogramas dos números digitais das imagens coletadas referentes ao 1º turno de medições, para o sensor NIR. ISO mantido em 100, e *Exp Time* (em μ s) variando de (a) a (f), conforme Tabela II.

Com base nessas medições exploratórias, definiu-se as configurações de ISO e do tempo de exposição, selecionadas para as medições de cada sensor da câmera, conforme a Tabela III.

TABELA III

AJUSTES CÂMERA PARROT SEQUOIA

Sensor	ISO	Tempo de Exposição (μ s)
Green	50	1
Red	100	10
Red Edge (reg)	100	230
Nir	100	150
RGB	100	150

B. Fator de reflectância

Na sequência, procedeu-se com a verificação da estabilidade do fator de reflectância (FR) das superfícies refletoras a serem utilizadas na caracterização radiométrica por variação de superfície. Para isso, definiu-se a amplitude espectral de interesse nesse processo, entre 500 e 850 nm, tendo em vista ser o intervalo de comprimentos de onda onde há resposta espectral dos sensores monocromáticos, conforme a Função de Resposta Espectral da câmera Parrot Sequoia [5].

Para isso, mediu-se a radiância proveniente da placa de Spectralon e das superfícies refletoras (arranjo conforme Fig. 3c) com o FieldSpec, e, por meio da razão entre os espectros, determinou-se o fator de reflectância. Na Fig. 5 são apresentados os resultados obtidos das superfícies utilizadas.

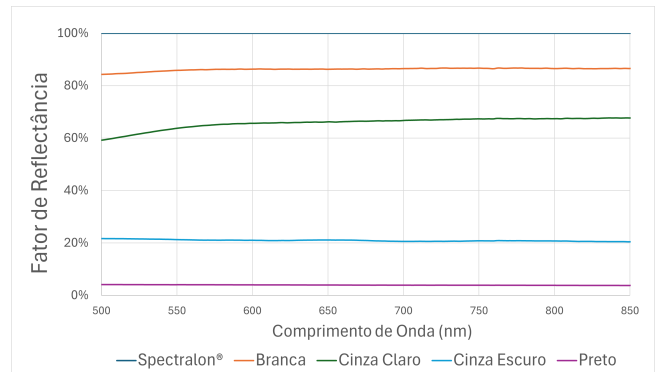


Fig. 5. Fatores de Reflectância das superfícies utilizadas.

A partir da Fig. 5 verifica-se que, para o intervalo de resposta espectral dos sensores monocromáticos da câmera,

as superfícies apresentaram boa uniformidade radiométrica, variando os fatores de reflectância, em média, entre 4% para a superfície preta e 85% para a superfície branca, considerando a Placa de Spectralon como referência (fator de reflectância igual a 100%).

Estes resultados indicam que as superfícies possuem uma reflectância uniforme e, com isto, são adequadas para a utilização na caracterização radiométrica, corroborando com estudos anteriores [13].

C. Arranjo Experimental

Nas metodologias de caracterização radiométrica, utilizou-se um arranjo experimental (Fig. 3), composto por: (a) um espectrorradiômetro FieldSpec (unidade 19146), fixado a um suporte e acoplado a um limitador de ângulo sólido com campo de visada (FOV) de 8° posicionado ao nadir das placas, coletando a radiância espectral proveniente das superfícies imageadas; (c) superfícies refletoras; (d) uma Câmera Parrot Sequoia, também posicionada ao nadir em relação à superfície imageada. As superfícies imageadas foram posicionadas no solo, na projeção do campo de visada (FOV). Assim, o FOV do FieldSpec foi completamente coberto pela superfície imageada.

Manteve-se, nas duas metodologias de caracterização radiométrica, o alinhamento “sol – superfícies imageadas – Sequoia/FieldSpec” de tal forma que não houvesse, em nenhum momento da coleta de dados, qualquer obstáculo artificial direto entre os raios solares e a superfície. Considerando a variação do ângulo zenital do sol nos dias de medição (variando entre 46,3° no início das medições e 79,3° no término), foi possível garantir a ausência de obstáculos (câmera e espectrorradiômetro) entre os raios solares e as superfícies imageadas.

A projeção do FOV do espectrorradiômetro no plano das superfícies refletoras, considerando o uso do limitador de ângulo de 8° e a distância de 59,0 cm entre o espectrorradiômetro e as placas, foi de 8,3 cm, garantindo que o FOV foi completamente preenchido pela superfície das placas.

D. Condições Ambientais

Para que as caracterizações radiométricas, em campo, sejam realizadas de maneira adequada, é importante que as condições ambientais sejam apropriadas, principalmente sem a presença de nuvens e sem que os parâmetros ambientais variem bruscamente. Por isso, devem ser escolhidos dias em que a presença de nuvens seja a menor possível e que os parâmetros ambientais possam ser acompanhados por meio de uma estação meteorológica.

E. Procedimentos de Medição - Variação da Irradiância

Na metodologia de caracterização radiométrica por variação da irradiância solar, é interessante iniciar as medições por volta de 12 h, quando se obtém o valor de máxima irradiância solar. Com isto, a caracterização radiométrica pode ser realizada considerando a variação de irradiância solar desde o ponto de máxima intensidade até um ponto de mínima intensidade radiante, próximo ao horizonte, por volta de 17 h (no período de inverno em São José dos Campos), coletando imagens da placa de Spectralon, com câmera Sequoia e

de radiância da Placa de Spectralon no espectrorradiômetro FieldSpec 4, de maneira simultânea, e a cada 15 min. A coleta dos espectros de radiância, pelo FieldSpec, e a tomada de imagens, pela Sequoia, foi feita concomitantemente, garantindo a sincronia dos resultados entre radiância e números digitais.

Desta maneira, as imagens da câmera e os espectros obtidos no espectrorradiômetro foram associados, criando assim um par de dados para um mesmo instante de medição, na forma [imagem, espectro de radiância]. Em seguida, foi realizado o tratamento dos dados, no qual é calculado: a média dos números digitais de uma determinada região da imagem, obtendo o ND_{med} ; e a radiância (ponderada pela FRE) na banda dos sensores “monocromáticos”. A partir deste conjunto de dados, é estabelecida a dependência entre a radiância e os números digitais em cada banda.

F. Procedimentos de Medição - Variação de Superfícies

Na metodologia de caracterização radiométrica utilizando as superfícies com diferentes reflectâncias, as medições com a câmera e o espectrorradiômetro (em cada superfície) ocorreram simultaneamente (um espectro de radiância e uma imagem a cada 15 seg, em média) para que a irradiância solar não variasse significativamente. Nestas medições foram coletadas amostras de cada superfície com a câmera Parrot Sequoia, e amostras de espectros de radiância, com o objetivo de se obter um conjunto de dados que permitisse um tratamento de dados adequado. Novamente, as imagens da câmera e os espectros obtidos no espectrorradiômetro foram associados, criando assim um par de dados para um mesmo instante de medição, na forma [imagem, espectro de radiância]. Em seguida, realizou-se o tratamento dos dados, no qual é calculado: a média dos números digitais de uma determinada região da imagem, obtendo o ND_{med} ; e a radiância (ponderada pela FRE) na banda dos sensores “monocromáticos”. Neste caso, para cada sensor monocromático foram obtidos 5 pares de dados, um para cada superfície (Spectralon, branca, cinza claro, cinza escuro e preto).

V. RESULTADOS OBTIDOS

Para a realização das caracterizações radiométricas em campo, passou-se a acompanhar as condições climáticas em São José dos Campos a partir de meados do mês de junho. A partir deste acompanhamento, verificou-se uma janela atmosférica sem a presença de nuvens nos dias 17 e 18 de junho, conforme Fig. 6. Com isso, a realização das caracterizações radiométricas foi planejada para esses dias.

As condições climáticas nos dias de medição permitiram coletar dados com o mínimo de interferência possível, sem nebulosidade, e com boa estabilidade dos parâmetros ambientais, conforme apresentado na Fig. 7.

Analisando os gráficos da variação da irradiância solar, verifica-se que ela variou suavemente ao longo de todo o dia 17 e no período da manhã do dia 18, indicando que, nesses períodos, a realização de medições radiométricas em campo ocorreu sem grandes interferências externas.

A. Variação da Irradiância

Na metodologia de caracterização radiométrica por variação da irradiância solar, as curvas de caracterização obtidas são apresentadas na Fig. 8.

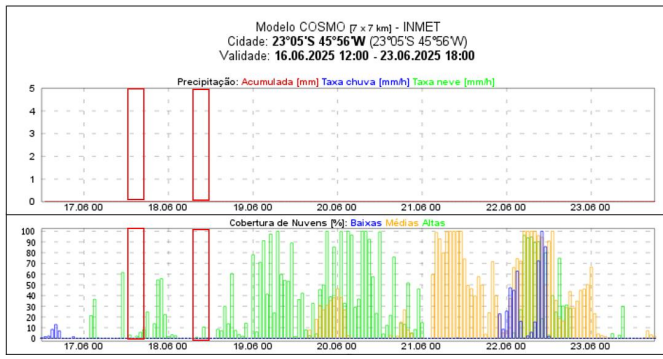


Fig. 6. Condições de precipitação e nebulosidade entre os dias 16 e 23 de junho [14].

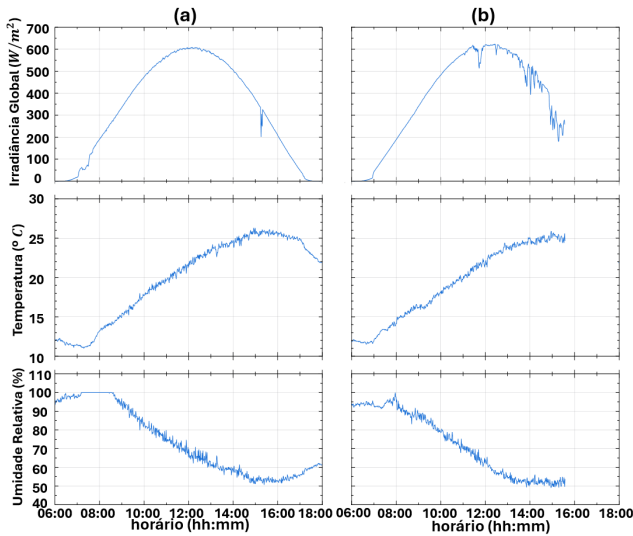


Fig. 7. Dados de radiação, temperatura e umidade relativa para os dias 17 junho (a) e 18 junho (b) de uma estação meteorológica no local das medições.

Embora ainda não tenha sido realizada uma avaliação das incertezas, pode-se dizer que os dados obtidos possuem um comportamento linear (conforme Fig. 8) já esperado [8]. Com isso, é realizada uma regressão linear para ajustar os coeficientes G_b e B_b aos dados experimentais. Os resultados da regressão linear são apresentados na Tabela IV.

Analisando a Tabela IV verifica-se que os coeficientes de ajuste linear R^2 variam entre 0,996 e 0,999, indicando bons ajustes lineares. Entretanto, ainda se faz necessária uma avaliação das incertezas.

B. Variação de Superfícies

Na metodologia de caracterização radiométrica por variação de superfície, as curvas de caracterização obtidas são apresentadas na Fig. 9.

Na Metodologia por variação das superfícies valem os mesmos comentários da metodologia de caracterização por variação da irradiância solar, ou seja, os dados possuem, visualmente, um comportamento linear, permitindo a utilização de uma regressão linear para se ajustar os coeficientes aos dados experimentais. Os resultados obtidos na regressão linear são apresentados na Tabela V.

Novamente, verifica-se que os coeficientes de ajuste linear R^2 variam entre 0,998 e 1,000, indicando bons ajustes lineares.

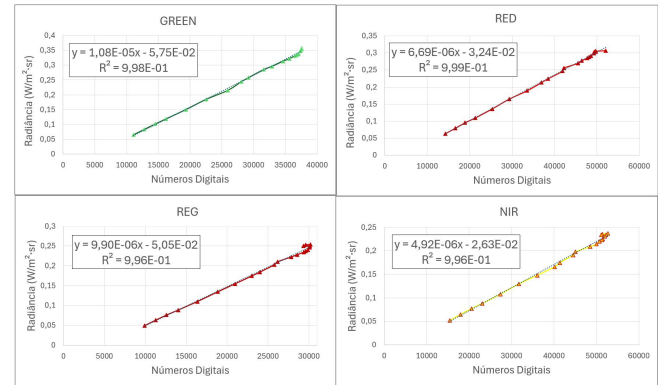


Fig. 8. Curvas de caracterização radiométrica, por sensor, para a metodologia por variação da irradiância solar.

TABELA IV
COEFICIENTES DE CARACTERIZAÇÃO RADIOMÉTRICA PARA A METODOLOGIA POR VARIAÇÃO SOLAR.

Sensor	Ganho ($\times 10^{-6} W/m^2 \cdot sr$)	Bias ($W/m^2 \cdot sr$)	R^2
Green	10,8	-0,0575	0,998
Red	6,69	-0,0324	0,999
Red Edge (reg)	9,90	-0,0505	0,996
NIR	4,92	-0,0263	0,996

C. Avaliação das metodologias

Conforme esperado (dado que ambas as metodologias empregam os mesmos equipamentos, nas mesmas configurações e na mesma geometria), os coeficientes ajustados apresentam alta similaridade. Essa convergência também se reflete nos dados coletados, como pode ser observado na Fig. 10 para o sensor *Green*.

Assim, dado que os arranjos experimentais das duas me-

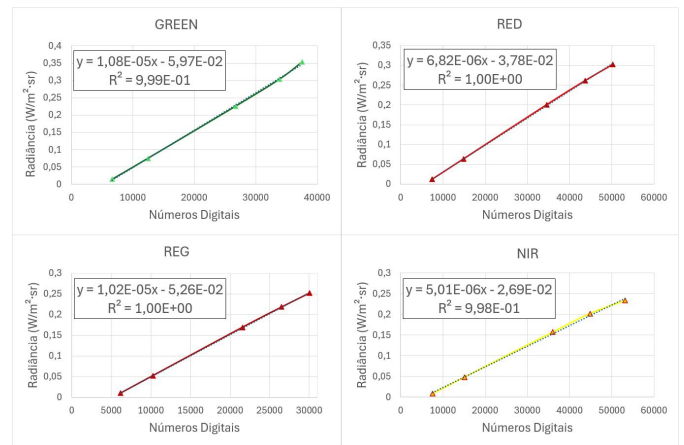


Fig. 9. Curvas de caracterização radiométrica, por sensor, para a metodologia por variação de superfície.

TABELA V
COEFICIENTES DE CARACTERIZAÇÃO RADIOMÉTRICA PARA A METODOLOGIA POR VARIAÇÃO DE SUPERFÍCIE.

Sensor	Ganho ($\times 10^{-6} W/m^2 \cdot sr$)	Bias ($W/m^2 \cdot sr$)	R^2
Green	10,8	-0,0597	0,999
Red	6,82	-0,0378	1,000
Red Edge	10,2	-0,0526	1,000
NIR	5,01	-0,0269	0,998

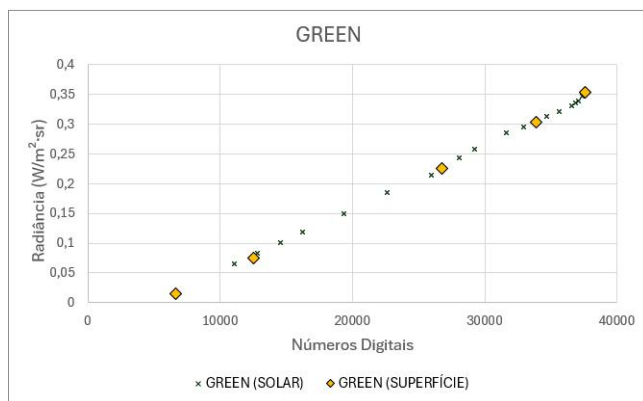


Fig. 10. Pontos das retas de caracterização radiométrica por variação solar e de superfície, sobrepostos, para o sensor *Green*.

metodologias são semelhantes, gerando dados e resultados comparáveis, a escolha entre elas deve basear-se em dois critérios: na facilidade de realização e na incerteza dos coeficientes obtidos.

Quanto à facilidade de realização, esta deve ser analisada considerando o trabalho envolvido nas fases de pré-medição, medição e pós-processamento.

Na fase de pré-medição, a metodologia por variação de superfícies demanda maior elaboração, pois exige a confecção de alvos (superfícies de referência) com características espectrorradiométricas adequadas, o que pode ser um processo demorado.

Na fase de medição, a metodologia por variação de superfícies apresenta clara vantagem nesta fase. Enquanto a medição por variação de irradiância solar consome várias horas, a metodologia por variação de superfícies é concluída em aproximadamente 20 minutos (após a montagem do arranjo experimental), exigindo também um número significativamente menor de medições.

Na fase de pós-processamento, o menor volume de dados na metodologia por variação de superfícies facilita seu tratamento e análise.

Como pode-se perceber, uma decisão final sobre qual a metodologia é a mais indicada só poderá ser tomada após a avaliação das incertezas associadas a cada metodologia.

É importante ressaltar o caráter preliminar deste estudo, considerando o estágio atual da pesquisa. Entretanto, a comparação das metodologias de caracterização será melhor avaliada após a análise e quantificação das incertezas, essencial para apresentar a convergência (ou não) dos dados obtidos.

VI. CONCLUSÃO

Neste trabalho são apresentadas duas metodologias para a realização da caracterização radiométrica em campo de sistemas sensores (câmera multiespectral) a ser embarcada em drones. Uma das metodologias está baseada na variação da irradiância solar e a outra na variação da reflectância de superfícies.

Após a aplicação das duas metodologias, é possível verificar que os dados obtidos para ambas as metodologias são consistentes entre si, visto que são utilizados os mesmos equipamentos e arranjos experimentais. Além disso, conforme esperado, o comportamento dos dados foi linear, o

que permitiu a utilização de uma regressão linear para a determinação dos coeficientes da caracterização radiométrica. Os coeficientes de ajuste linear R^2 para a caracterização de todos os sensores variam entre 0,996 e 1,0, indicando ótimo ajuste linear, independentemente da metodologia aplicada. Desta maneira, os dados e resultados obtidos demonstram a robustez dos arranjos experimentais, das medições realizadas e, consequentemente, das metodologias.

Finalmente, a escolha entre as metodologias dependerá da facilidade de execução e das incertezas dos resultados. Contudo, como as incertezas ainda não foram avaliadas, não é possível definir qual abordagem é mais adequada.

REFERÊNCIAS

- [1] C. Pinto *et al.*, "First in-flight radiometric calibration of mux and wfi on-board cbers-4," *Remote Sensing (Basel)*, vol. 8, no. 5, 2016.
- [2] M. V. Q. S. A. Costa, A. Damião, and R. M. d. Castro, "Caracterização espectral de sensor eletro-óptico em laboratório," in *Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Salvador, 2025. [Online]. Available: <https://proceedings.science/sbsr-2025/trabalhos/metodologia-para-calibracao-radiometrica-de-sensor-eletro-optico-em-laboratorio?lang=pt-br>
- [3] B. Mamaghani and C. Salvaggio, "Multispectral sensor calibration and characterization for suas remote sensing," *Sensors*, vol. 19, no. 20, 2019. [Online]. Available: <https://www.mdpi.com/1424-8220/19/20/4453>
- [4] M. V. Q. S. A. Costa, A. Damião, and R. M. d. Castro, "Calibração radiométrica de sensor eletro-óptico em laboratório," in *Simpósio de Aplicações Operacionais em Áreas de Defesa (SIGE 2024)*, 2024. [Online]. Available: https://www.sige.ita.br/edicoes-anteriores/2024/st/243413_1.pdf?x63825
- [5] M. V. d. Q. S. A. Costa, "Metodologia de caracterização espectral, radiométrica e espacial de sensor eletro-óptico de sensoriamento remoto," São José dos Campos, p. 118, 2025.
- [6] E. J. Milton, "Principles of field spectroscopy," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 8, no. 12, pp. 1807–1827, 1987.
- [7] M. V. Q. S. A. Costa, A. Damião, and R. M. d. Castro, "Metodologia para calibração radiométrica de sensor eletro-óptico em laboratório," in *Anais do XXI Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto*, Salvador, 2025. [Online]. Available: <https://proceedings.science/sbsr-2025/trabalhos/metodologia-para-calibracao-radiometrica-de-sensor-eletro-optico-em-laboratorio?lang=pt-br>
- [8] 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, pp. 837–846, 2016.
- [9] ASD Inc. PANALYTICAL, *FieldSpec® 4 User Manual*, May 2016, aSD Document 600979.
- [10] Parrot, *Parrot Sequoia User Guide*, May 2017. [Online]. Available: https://www.parrot.com/assets/s3fs-public/2021-09/sequoia-userguide-en-fr-es-de-it-pt-ar-zn-zh-jp-ko_0.pdf
- [11] M. Franzini, G. Ronchetti, G. Sona, and V. Casella, "Geometric and radiometric consistency of parrot sequoia multispectral imagery for precision agriculture applications," *Applied Sciences (Switzerland)*, vol. 9, no. 24, 2019.
- [12] Postman learning center. [Online]. Available: <https://www.learning.postman.com/docs/>
- [13] T. P. C. Americano, L. L. Andrade, and R. M. Castro, "Análises preliminares de superfícies para utilização em um sítio de calibração," in *VIII Simpósio de Ciência e Tecnologia do Instituto de Estudos Avançados*. São José dos Campos, SP: IEAv, 2019.
- [14] Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). (2025) Meteograma do instituto nacional de meteorologia. [Online]. Available: <https://meteograma.inmet.gov.br>