

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS
GERAIS – *CAMPUS* SÃO JOÃO EVANGELISTA
BACHARELADO EM ENGENHARIA FLORESTAL

Horny Burgarelly Junio Alves Domingues

HOMOGENEIZAÇÃO RADIOMÉTRICA DE IMAGENS RGB DE VANT

São João Evangelista

2026

HORNY BURGARELLY JUNIO ALVES DOMINGUES

HOMOGENEIZAÇÃO RADIOMÉTRICA DE IMAGENS RGB DE VANT

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia Florestal do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* São João Evangelista, como requisito parcial para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Jonathan da Rocha Miranda

São João Evangelista

2026

D671h Domingues, Horny Burgarelly Junio Alves.
Homogeneização radiométrica de imagens RGB de VANT/
Horny Burgarelly Junio Alves Domingues – 2026.
28f.: il.

Orientador: Dr. Jonathan da Rocha Miranda.
Trabalho de Conclusão de Curso (bacharelado em Engenharia
Florestal) – Instituto Federal Minas Gerais. *Campus* São João
Evangelista, 2026.

1. Correção radiométrica. 2. Casamento de histogramas. 3.
Coeficiente de Concordância de Lin. 4. Cafeicultura de precisão. I.
Domingues, Horny Burgarelly Junio Alves. II. Instituto Federal de
Minas Gerais *Campus* SJE. III. Título.

CDD 621.3678

Catálogo: Esther Soares Cunha - CRB-6/4333

Horny Burgarely Junio Alves Domingues

HOMOGENEIZAÇÃO RADIOMÉTRICA DE IMAGENS RGB DE VANT

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado ao Curso de Bacharelado em Engenharia Florestal do Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* São João Evangelista, como requisito parcial para obtenção do grau de bacharel em Engenharia Florestal.

Aprovado em: 15 / 07 / 2026 pela banca examinadora:

 Documento assinado digitalmente
JONATHAN DA ROCHA MIRANDA
Data: 15/07/2026 10:15:34-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Dr. Jonathan, da Rocha Miranda – IFMG/SJE (Orientador)

 Documento assinado digitalmente
PAULO HENRIQUE AMADOR MIRANDA
Data: 15/07/2026 10:31:21-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Paulo Henrique Amador Miranda – IFMG

 Documento assinado digitalmente
RICARDO GOMES DE OLIVEIRA
Data: 15/07/2026 10:13:37-0300
Verifique em <https://validar.itl.gov.br>

Prof. Ms. Ricardo Gomes de Oliveira – IFMG/SJE

RESUMO

A inconsistência radiométrica entre imagens obtidas por Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) em diferentes horários do dia compromete a comparabilidade de produtos do sensoriamento remoto aplicado à agricultura de precisão. Este estudo avaliou a capacidade do algoritmo de Casamento de Histogramas em promover a homogeneização radiométrica relativa de imagens RGB de VANT em uma cultura de café, comparando cenas capturadas às 09h e às 13h a uma imagem de referência obtida próximo ao zênite solar (11h). A partir de 57 pontos amostrais, calcularam-se estatística descritiva, correlação de Pearson, Coeficiente de Concordância de Lin (CCC), análise de Bland-Altman e teste de Wilcoxon pareado para as três bandas espectrais (vermelho, verde e azul). Os resultados mostraram que a equalização reduziu a dispersão ponto a ponto entre 52% e 65% em todas as bandas e horários, e elevou o CCC das bandas vermelha e verde da faixa "pobre" para "substancial" a "quase perfeita", com redução estatisticamente significativa do erro absoluto mediano ($p < 0,01$). O coeficiente de Pearson também aumentou de forma expressiva após a correção, evidenciando que o método, por ser monotônico porém não linear, não preserva a correlação de Pearson. Na banda azul, o Pearson subiu de forma semelhante, mas o CCC permaneceu modesto e não houve melhora estatisticamente significativa, revelando um viés sistemático residual. Conclui-se que o Casamento de Histogramas promove correção radiométrica eficaz nas bandas vermelha e verde, mas não corrige o viés sistemático da banda azul, possivelmente associado ao espalhamento atmosférico difuso, mais intenso nesse comprimento de onda.

Palavras-chave: VANT. Correção radiométrica. Casamento de histogramas. Coeficiente de Concordância de Lin. Cafeicultura de precisão.

ABSTRACT

Radiometric inconsistency among Unmanned Aerial Vehicle (UAV) images acquired at different times of day compromises the comparability of remote sensing products applied to precision agriculture. This study evaluated the capacity of the Histogram Matching algorithm to promote relative radiometric homogenization of UAV RGB images over a coffee crop, comparing scenes captured at 09:00 and 13:00 with a reference image acquired near solar zenith (11:00). Based on 57 sampling points, descriptive statistics, Pearson correlation, Lin's Concordance Correlation Coefficient (CCC), Bland-Altman analysis, and a paired Wilcoxon test were computed for the three spectral bands. Results showed that equalization reduced point-to-point dispersion by 52% to 65% across all bands and times, and raised the CCC of the red and green bands from the "poor" to the "substantial" to "almost perfect" range, with a statistically significant reduction in median absolute error ($p < 0.01$). Pearson's coefficient also increased markedly after correction, indicating that the method, being monotonic but non-linear, does not preserve Pearson correlation. In the blue band, Pearson increased similarly, but CCC remained modest and no statistically significant improvement was found, revealing a residual systematic bias. It is concluded that Histogram Matching provides effective radiometric correction for the red and green bands, but fails to correct the systematic bias of the blue band, possibly related to diffuse atmospheric scattering, which is more intense at that wavelength.

Keywords: UAV. Radiometric correction. Histogram matching. Lin's concordance correlation coefficient. Precision coffee farming

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	07
2 MATERIAL E MÉTODOS	10
2.1 Caracterização da área de estudo	10
2.2 Amostragem temporal e planejamento dos voos com VANT	10
2.3 Parâmetros operacionais e seleção geométrica da cena	11
2.4 Homogeneização radiométrica relativa por ajuste de histograma multicanal	11
2.5 Delimitação física da ROI e protocolo de subamostragem	12
2.6 Análise estatística e avaliação de dispersão	13
3 RESULTADOS	14
3.1 Registro fotográfico e padrão visual das cenas	14
3.2 Estatística descritiva das bandas espectrais	15
3.3 Distribuições de frequência (histogramas)	16
3.4 Correlação linear e concordância entre cenários	18
3.5 Análise de concordância por Bland-Altman	20
3.6 Significância estatística da redução do erro (teste de Wilcoxon)	22
3.7 Síntese dos resultados	23
4 DISCUSSÃO	24
5 CONCLUSÃO.....	27
REFERÊNCIAS.....	28

1 INTRODUÇÃO

A agricultura de precisão consolidou-se, nas últimas duas décadas, como um paradigma central para o manejo agrícola baseado em dados espaciais, permitindo identificar e tratar a variabilidade espacial e temporal das lavouras de forma diferenciada. Nesse contexto, os Veículos Aéreos Não Tripulados (VANT) emergiram como uma plataforma de sensoriamento remoto particularmente vantajosa em relação às imagens orbitais, por oferecerem resolução espacial muito superior, flexibilidade de programação de voo e independência em relação à cobertura de nuvens fatores que ampliaram substancialmente sua adoção em estudos de monitoramento de culturas (ZHANG; KOVACS, 2012). A cafeicultura, atividade de grande relevância econômica e social para o Brasil, tem se beneficiado dessa tecnologia desde os primeiros trabalhos pioneiros que relacionaram índices espectrais obtidos por sensores aéreos multiespectrais ao estágio de maturação dos frutos (JOHNSON *et al.*, 2004), abrindo caminho para aplicações posteriores voltadas ao monitoramento nutricional, à estimativa de produtividade e à detecção de estresses fisiológicos na cultura.

Não obstante os avanços proporcionados pelo uso de VANT, a qualidade radiométrica das imagens obtidas permanece um desafio metodológico relevante, sobretudo quando se pretende comparar ou combinar cenas capturadas em momentos distintos do dia ou em diferentes datas. A resposta espectral registrada pelo sensor não decorre exclusivamente das propriedades intrínsecas do alvo, mas também da geometria de iluminação solar no instante da captura em particular, do ângulo zenital solar e da proporção de radiação difusa incidente sobre o dossel (GILABERT; MELIÁ, 1993). Esses fatores variam de forma sistemática ao longo do dia, produzindo diferenças nos níveis de cinza (*Digital Numbers* — DN) registrados para um mesmo alvo em horários distintos, mesmo quando as condições atmosféricas permanecem estáveis. Tal inconsistência radiométrica compromete a comparabilidade de produtos derivados, como índices de vegetação, classificações espectrais e modelos de estimativa de variáveis biofísicas, e representa um obstáculo relevante para fluxos de trabalho fotogramétricos que dependem da aquisição de múltiplas imagens ao longo de uma mesma missão ou de missões repetidas (PASTUCHA *et al.*, 2022).

Diante desse problema, diversas abordagens de correção radiométrica têm sido propostas na literatura, classificadas de modo geral em métodos de normalização radiométrica absoluta que dependem de conhecimento físico prévio sobre as condições atmosféricas e de iluminação e métodos de normalização radiométrica relativa, que dispensam esse conhecimento ao padronizar estatisticamente a imagem-alvo em função de uma imagem de

referência. Dentre os métodos relativos, o Casamento de Histogramas (*Histogram Matching*) destaca-se pela simplicidade computacional e pela ausência de necessidade de painéis de calibração radiométrica em campo, características que o tornam particularmente atrativo para aplicações operacionais em VANT (PASTUCHA *et al.*, 2022). Entretanto, estudos recentes têm demonstrado que esse método, por considerar apenas a diferença global de brilho entre as imagens, pode ocasionar perda de níveis de cinza e distorção da distribuição espectral original, com desempenho inferior ao de métodos que incorporam informação adicional sobre a cena, como pontos homólogos ou alvos pseudoinvariantes (XI *et al.*, 2022).

Outra lacuna identificada na literatura consultada refere-se à forma como a eficácia desses métodos de correção costuma ser avaliada. Grande parte dos estudos reporta apenas o coeficiente de correlação linear de Pearson entre a imagem corrigida e a referência como evidência de sucesso da normalização. Contudo, esse coeficiente mede exclusivamente a associação linear entre as variáveis, sendo insensível a diferenças sistemáticas de média e de escala entre elas (LIN, 1989) o que pode levar a uma interpretação equivocada da real eficácia da correção quando o método aplicado, como o Casamento de Histogramas, constitui um mapeamento monotônico que preserva a ordenação relativa dos pixels. Métricas complementares, como o Coeficiente de Concordância de Lin e a análise de Bland-Altman historicamente consolidadas na literatura de comparação de métodos de medição (BLAND; ALTMAN, 1986), permitem decompor a concordância entre cenários em componentes de precisão e de exatidão, oferecendo uma avaliação mais robusta e criteriosa do desempenho da correção radiométrica.

Diante do exposto, o presente estudo teve como objetivo avaliar a capacidade do algoritmo de Casamento de Histogramas em promover a homogeneização radiométrica relativa de imagens RGB obtidas por VANT em uma cultura de café, comparando cenas capturadas nos horários de 09h e 13h a uma cena de referência obtida próximo ao zênite solar (11h). Especificamente, buscou-se: (i) caracterizar estatisticamente o comportamento das três bandas espectrais (R, G, B) nos cenários brutos e equalizados; (ii) avaliar o grau de concordância entre os cenários corrigidos e a referência por meio de múltiplas métricas estatísticas complementares (correlação de Pearson, Coeficiente de Concordância de Lin e análise de Bland-Altman); e (iii) testar a significância estatística da redução do erro promovida pela equalização, discriminando os resultados por banda espectral e por horário de captura. Com isso, pretende-se contribuir para uma avaliação empírica mais criteriosa da aplicabilidade do Casamento de Histogramas em condições reais de campo, fornecendo

subsídios para a escolha de estratégias de correção radiométrica em fluxos de trabalho fotogramétricos com VANT voltados à cafeicultura de precisão.

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Caracterização da área de estudo

O estudo foi conduzido na área experimental do Instituto Federal de Minas Gerais — Campus São João Evangelista, MG. O clima é classificado como Cwa (Köppen), com temperatura média anual de 20,1°C, máxima de 26,1°C, mínima de 15,0°C e precipitação média de 1.180 mm anuais (MARTINS *et al.*, 2018). A lavoura será avaliada em área de 1,5 hectares, altitude de 978 m, declividade média de 20%, espaçamento de 3,0 × 1,0 m (3.333 plantas/ha), implantada em janeiro de 2024 sob irrigação por gotejamento. As cultivares avaliadas serão Topázio MG 1190 e Catiguá MG2, ambas de *Coffea arabica* L., alocadas em talhões contíguos sob mesmas condições de solo, manejo e adubação.

2.2 Amostragem temporal e planejamento dos voos com VANT

O desenho experimental foi estruturado para avaliar e mitigar a variabilidade espaçotemporal dos níveis de cinza (DN – *Digital Numbers*) em imagens digitais, decorrente das flutuações na geometria de iluminação solar ao longo do dia. As campanhas de mapeamento aéreo foram distribuídas em três janelas temporais estratégicas, utilizando o mesmo plano de voo automatizado, de modo a assegurar a reprodutibilidade espacial e a sobreposição das amostras entre os voos:

- **Voo das 09:00 h (Período Matutino):** executado para capturar a resposta espectral sob maior inclinação dos raios solares (ângulo zenital elevado). Esse cenário caracteriza-se por incremento na componente de radiação difusa e pela projeção de sombras alongadas, decorrentes tanto da arquitetura do dossel vegetativo quanto do microrrelevo do terreno.
- **Voo das 11:00 h (próximo ao zênite solar / padrão de referência):** adotado como referência radiométrica central do experimento, por sua proximidade ao meio-dia solar local — período convencionalmente recomendado para missões aerofotogramétricas. Nessa geometria, o ângulo zenital solar é minimizado, o que maximiza a irradiância direta sobre os alvos e reduz o autossombreamento (*self-shadowing*), mitigando a ocultação de pixels foliares úteis e consolidando a base ideal para a padronização espectral.

- **Voo das 13:00 h (Período Vespertino):** realizado para registrar a dinâmica do gradiente de iluminação no início da tarde, período em que o azimuth solar ocupa posição aproximadamente simétrica à do período matutino em relação ao meio-dia, e em que variáveis ambientais térmicas atingem magnitude elevada, influenciando o comportamento óptico do sensor.

2.3 Parâmetros operacionais e seleção geométrica da cena

Para neutralizar distorções geométricas e radiométricas decorrentes de variações de escala, resolução espacial ou ângulo de visada do sensor, os três voos mantiveram parâmetros operacionais rigorosamente constantes. Adotou-se altura de voo fixa de 80 m em relação ao ponto de decolagem, garantindo um tamanho de pixel no solo (*Ground Sampling Distance* – GSD) homogêneo entre as campanhas. O sensor manteve alinhamento estrito a nadir (90° de inclinação do *gimbal*) e velocidade linear constante do vetor aéreo. As operações ocorreram sob condições de estabilidade atmosférica, com céu limpo e ausência de nebulosidade.

A amostragem radiométrica foi realizada diretamente sobre as imagens brutas (*raw data*), evitando-se o uso de mosaicos ortorretificados, de modo a impedir que algoritmos de interpolação e costura (*stitching*) inserissem artefatos nos níveis de cinza originais. Como critério de padronização amostral, selecionou-se, em cada plano de voo, a imagem correspondente à mesma posição na sequência cronológica de disparos, garantindo que o fragmento de cena avaliado correspondesse ao mesmo centro de perspectiva e à mesma projeção geométrica nas três janelas de horário.

2.4 Homogeneização radiométrica relativa por ajuste de histograma multicanal

O princípio desta pesquisa fundamenta-se na hipótese de que é possível estabilizar a escala de níveis de cinza e alcançar constância de cor dos alvos sem depender de painéis de calibração terrestres, utilizando apenas as propriedades estatísticas cumulativas e os metadados intrínsecos do sensor embarcado. Para tanto, implementou-se o algoritmo de Casamento de Histogramas (*Histogram Matching*).

Seja cada canal espectral $c = \{1, 2, 3\}$, correspondente ao sistema RGB (1 = Vermelho, 2 = Verde, 3 = Azul), definido como uma matriz digital discreta com níveis de

cinza no intervalo $r_k = [0, 255]$, para dados quantizados em 8 bits. O histograma discreto de um canal é dado pela função de probabilidade:

$$p_r(r_k) = n_k / n$$

Em que n_k representa o número de pixels com intensidade r_k , e n , o número total de pixels da imagem. As Funções de Distribuição Acumulada (CDF) da imagem-alvo, $T(r_k)$, e da imagem de referência, $G(z_q)$, são expressas, respectivamente, por:

$$T(r_k) = \sum_{j=0}^k p_r(r_j) \quad e \quad G(z_q) = \sum_{j=0}^q p_z(z_j)$$

Para homogeneizar a resposta espectral da imagem-alvo (09:00 h ou 13:00 h) em relação ao padrão das 11:00 h, o algoritmo assume a igualdade das distribuições no domínio transformado ($T(r) = G(z)$). Como o domínio discreto impede a inversão analítica exata da função, o mapeamento busca o nível de cinza corrigido $\hat{z}$ que minimize a diferença absoluta entre as probabilidades acumuladas, de forma independente para cada banda espectral (`channel_axis = -1`):

$$\hat{z} = M(r_k) = \underset{z_q}{\operatorname{argmin}} |T(r_k) - G(z_q)|$$

A matriz original de pixels da imagem-alvo, $I_{alvo}(x,y,c)$, é então remapeada, pixel a pixel, por meio da função de transferência discreta M , gerando a matriz homogeneizada $I_{corrigida}(x,y,c)$:

$$I_{corrigida}(x,y,c) = M(I_{alvo}(x,y,c))$$

Esse operador altera o brilho médio, o contraste e a assimetria das bandas dos voos extremos, aproximando suas curvas estatísticas do comportamento observado no horário de zênite solar. Os metadados de exposição contidos nos arquivos *EXIF* (velocidade do obturador, abertura do diafragma e ganho ISO) foram extraídos e indexados para monitorar as compensações automáticas aplicadas pelo hardware do sensor.

2.5 Delimitação física da ROI e protocolo de subamostragem

A validação em campo do modelo de homogeneização radiométrica foi conduzida em uma Região de Interesse (ROI) piloto, instalada na área útil da cultura do cafeeiro. A demarcação física da área foi realizada com toras de madeira de 6 m de comprimento nominal, dispostas perpendicularmente entre si, delimitando uma área superficial controlada

de aproximadamente 36 m². Essa estrutura, de alta reflectância, atuou como alvo de controle nas imagens, assegurando a ancoragem espacial da ROI entre as diferentes capturas.

A extração dos dados espectrais no interior da ROI seguiu um critério de subamostragem direcionado ao alvo vegetativo:

- Selecionaram-se 60 pontos amostrais, distribuídos sistematicamente sobre a projeção da copa das plantas de café.
- A partir do centro geométrico de cada ponto, extraíram-se automaticamente todos os pixels contidos em um raio de busca de 1 m.
- Devido ao adensamento do plantio e às dimensões da ROI (36 m²), os raios de busca individuais apresentaram sobreposição espacial parcial. Ainda assim, para preservar a representatividade e o tamanho amostral ($n = 60$), todas as subamostras foram computadas de forma independente na composição da densidade de pixels e no cálculo da média local da reflectância aparente da vegetação.

2.6 Análise estatística e avaliação de dispersão

O vetor de dados espectrais consolidado foi subdividido em cinco cenários analíticos distintos, para cada uma das três bandas RGB: (1) cenário bruto das 09:00 h; (2) cenário bruto das 11:00 h (referência); (3) cenário bruto das 13:00 h; (4) cenário equalizado das 09:00 h; e (5) cenário equalizado das 13:00 h.

O comportamento estatístico e a dispersão dos pixels foram avaliados por meio de estatística descritiva, com o cálculo da média, da variância, do desvio padrão e da amplitude interquartilica de cada distribuição. O grau de associação linear e a redução do viés radiométrico induzido pela variação horária foram quantificados por meio de diagramas de dispersão (*scatter plots*), acompanhados do coeficiente de correlação linear de Pearson (r) e da análise do desvio em relação à linha identidade (1:1). Esse arranjo estatístico permitiu validar a capacidade do algoritmo em convergir a assinatura de cor da cultura para o padrão estável do horário de zênite solar.

3 RESULTADOS

3.1 Registro fotográfico e padrão visual das cenas

A comparação visual entre as imagens padrão e as imagens equalizadas, obtidas para os três horários de voo e ancoradas pela estrutura de referência instalada na ROI, é apresentada na Figura 1. Observou-se que, em inspeção visual direta, as diferenças entre as cenas padrão e equalizadas são discretas em todos os horários, não sendo possível identificar, a olho nu, alterações evidentes de tonalidade entre as versões corrigidas e não corrigidas de uma mesma cena. Esse resultado reforça a necessidade de uma avaliação quantitativa — e não meramente visual — para a verificação da eficácia da homogeneização radiométrica, a qual é apresentada nas seções seguintes.

Figura 1 – Registro fotográfico da ROI nos três horários (imagens padrão e equalizadas)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

3.2 Estatística descritiva das bandas espectrais

A extração espectral resultou em 57 dos 60 pontos amostrais com dados completos nos cinco cenários avaliados, compondo a amostra estatística final ($n = 57$). A Tabela 1 apresenta a estatística descritiva (média, variância, desvio padrão e amplitude interquartilica) do valor médio de DN por ponto amostral, para cada uma das três bandas RGB nos cinco cenários analisados.

Tabela 1 – Estatística descritiva dos níveis de cinza médios por ponto amostral (DN) por cenário e banda espectral ($n = 57$)

Cenário	Banda	Média	Variância	Desvio padrão	IQR
Bruto 09h	R	54,33	106,23	10,31	13,97
	G	79,49	100,14	10,01	14,66
	B	31,45	40,26	6,35	7,19
Bruto 11h (Referência)	R	51,66	115,48	10,75	15,72
	G	73,69	111,59	10,56	15,64
	B	34,77	45,32	6,73	7,08
Bruto 13h	R	54,54	102,38	10,12	12,03
	G	80,83	109,50	10,46	14,72
	B	34,40	36,44	6,04	4,68
Equalizado 09h	R	51,87	125,24	11,19	16,16
	G	75,83	117,41	10,84	16,64
	B	31,31	45,27	6,73	8,20
Equalizado 13h	R	48,48	131,37	11,46	15,56
	G	72,14	131,72	11,48	18,05
	B	32,67	42,95	6,55	6,42

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

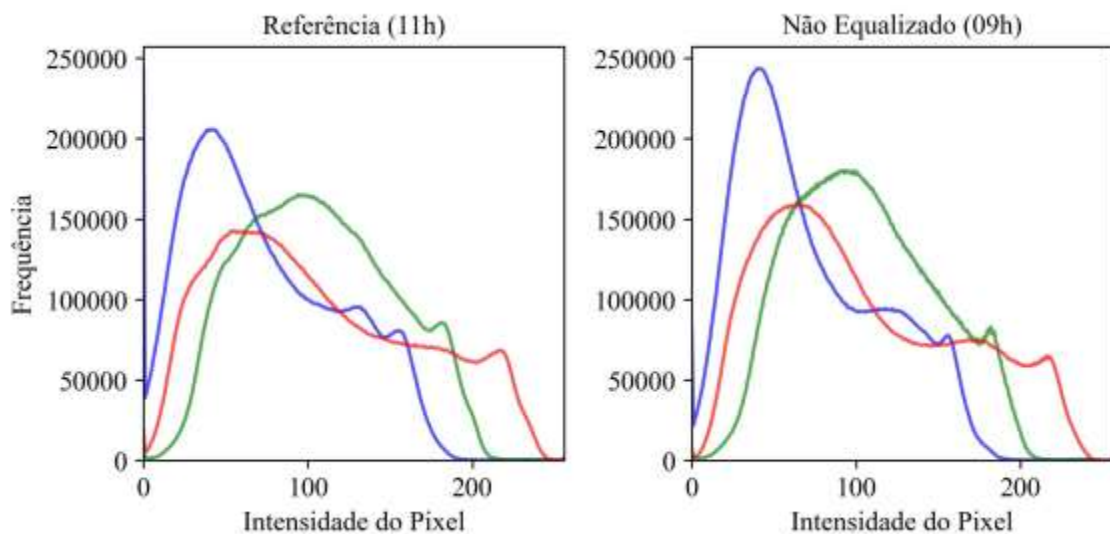
As médias por banda mantiveram-se em uma faixa relativamente estreita entre cenários (variação de até aproximadamente 8 DN em relação à referência), com a equalização aproximando os valores médios de R e G do padrão de referência em ambos os horários. Diferentemente do que seria esperado de uma correção puramente escalar, a variância entre pontos não convergiu de forma sistemática para a variância da referência em todas as combinações em algumas delas (por exemplo, banda G às 13h) a variância do cenário equalizado inclusive se afastou da referência. Esse comportamento é compatível com a natureza pixel a pixel do Casamento de Histogramas: como a correção é aplicada individualmente a cada pixel dentro da vizinhança de cada ponto amostral, e não diretamente sobre a média do ponto, seu efeito sobre a variância entre pontos não é necessariamente

monotônico, ainda que seu efeito sobre a concordância ponto a ponto com a referência tenha sido, como será demonstrado, consistentemente positivo para as bandas R e G.

3.3 Distribuições de frequência (histogramas)

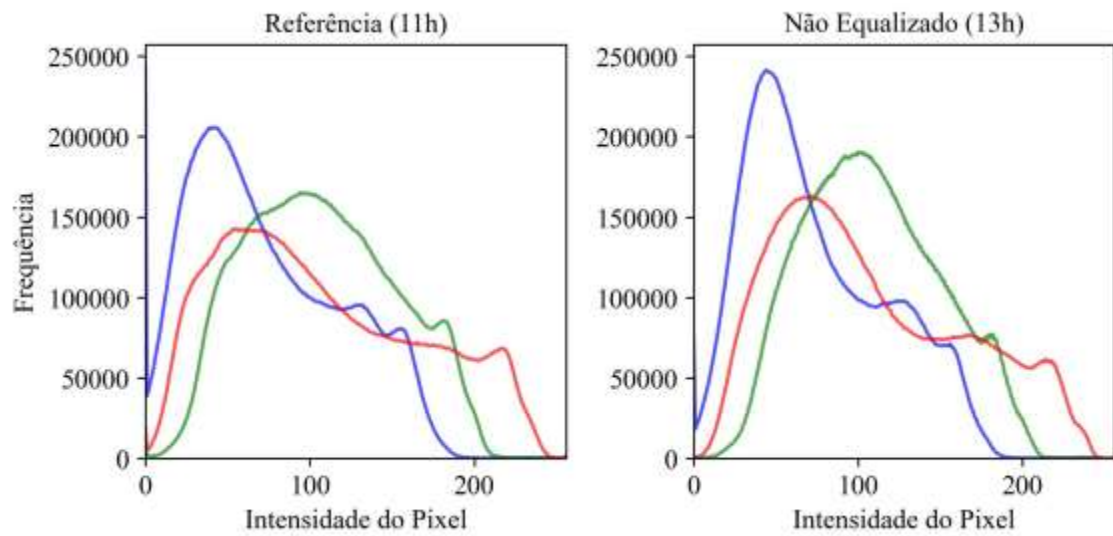
As Figuras 2 a 5 apresentam os histogramas de frequência das três bandas RGB, contrapondo a distribuição de referência (11h) às distribuições dos cenários brutos e equalizados nos horários de 09h e 13h. Nos cenários brutos (Figuras 2 e 3), observou-se maior dissonância entre os picos de frequência das bandas verde (G) e vermelha (R) em relação à referência, sobretudo na região de valores intermediários de DN (entre 100 e 160). Após a equalização (Figuras 4 e 5), as curvas das três bandas apresentaram maior similaridade de forma e de amplitude de pico em relação à distribuição de referência.

Figura 2 – Histogramas RGB: referência (11h) e não equalizado (09h)



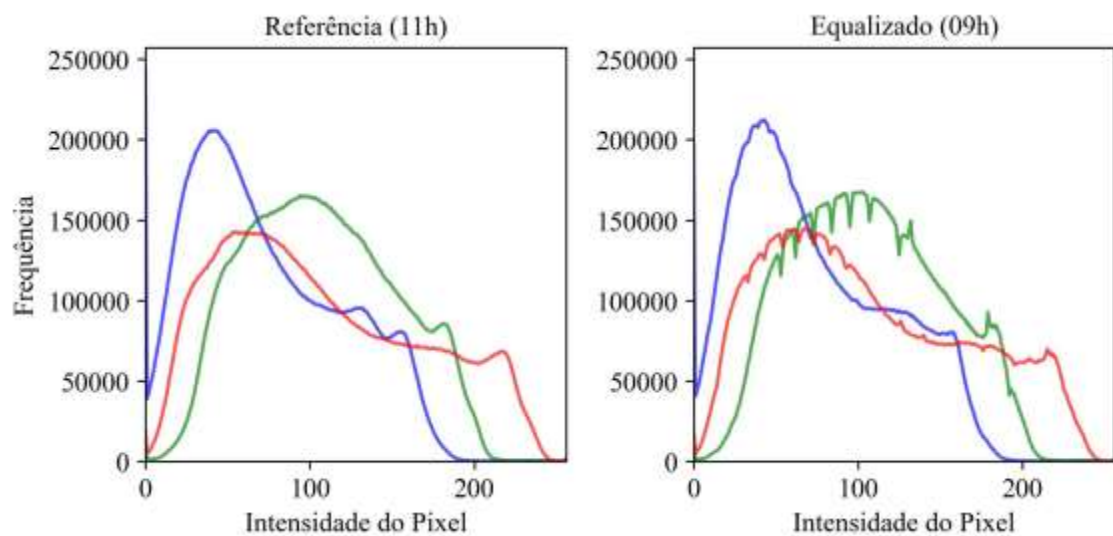
Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Figura 3 – Histogramas RGB: referência (11h) e não equalizado (13h)



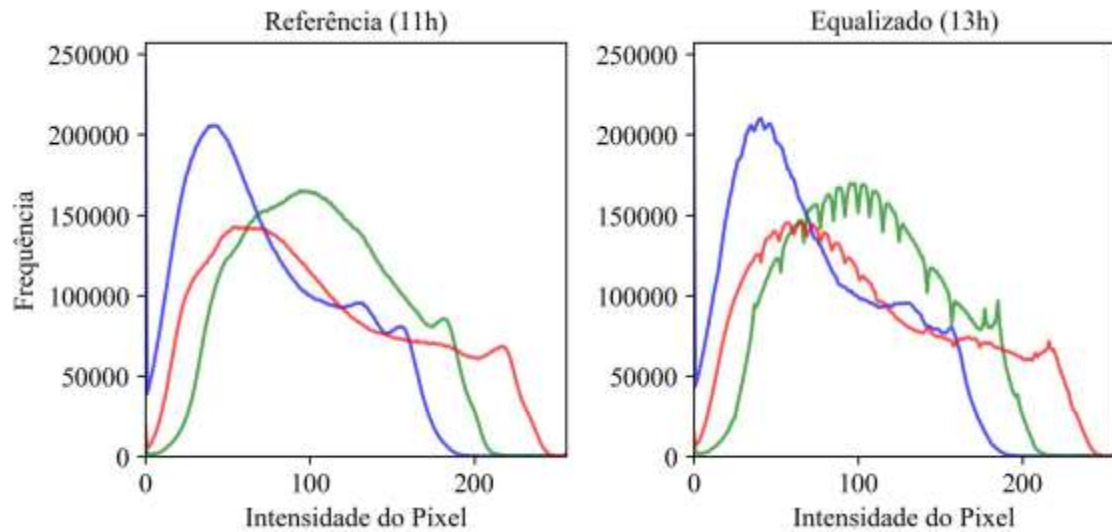
Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Figura 4 – Histogramas RGB: referência (11h) e equalizado (09h)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Figura 5 – Histogramas RGB: referência (11h) e equalizado (13h)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Verificou-se, contudo, um padrão serrilhado e repetitivo na curva do canal verde (G) nos dois histogramas equalizados (Figuras 4 e 5), ausente tanto na distribuição de referência quanto na distribuição bruta correspondente. Esse comportamento é característico de artefatos de quantização do algoritmo de Casamento de Histogramas em imagens de 8 bits: quando múltiplos níveis de cinza da imagem-alvo são mapeados para um mesmo nível da imagem de referência (ou quando níveis da referência não recebem correspondência direta), a distribuição resultante apresenta descontinuidades localizadas. Como será demonstrado na seção 3.6, a banda G foi justamente uma das bandas com ganho estatístico mais expressivo após a equalização, sugerindo que o artefato de quantização, embora visualmente perceptível na distribuição agregada de toda a cena, não comprometeu a concordância ponto a ponto da banda com a referência.

3.4 Correlação linear e concordância entre cenários

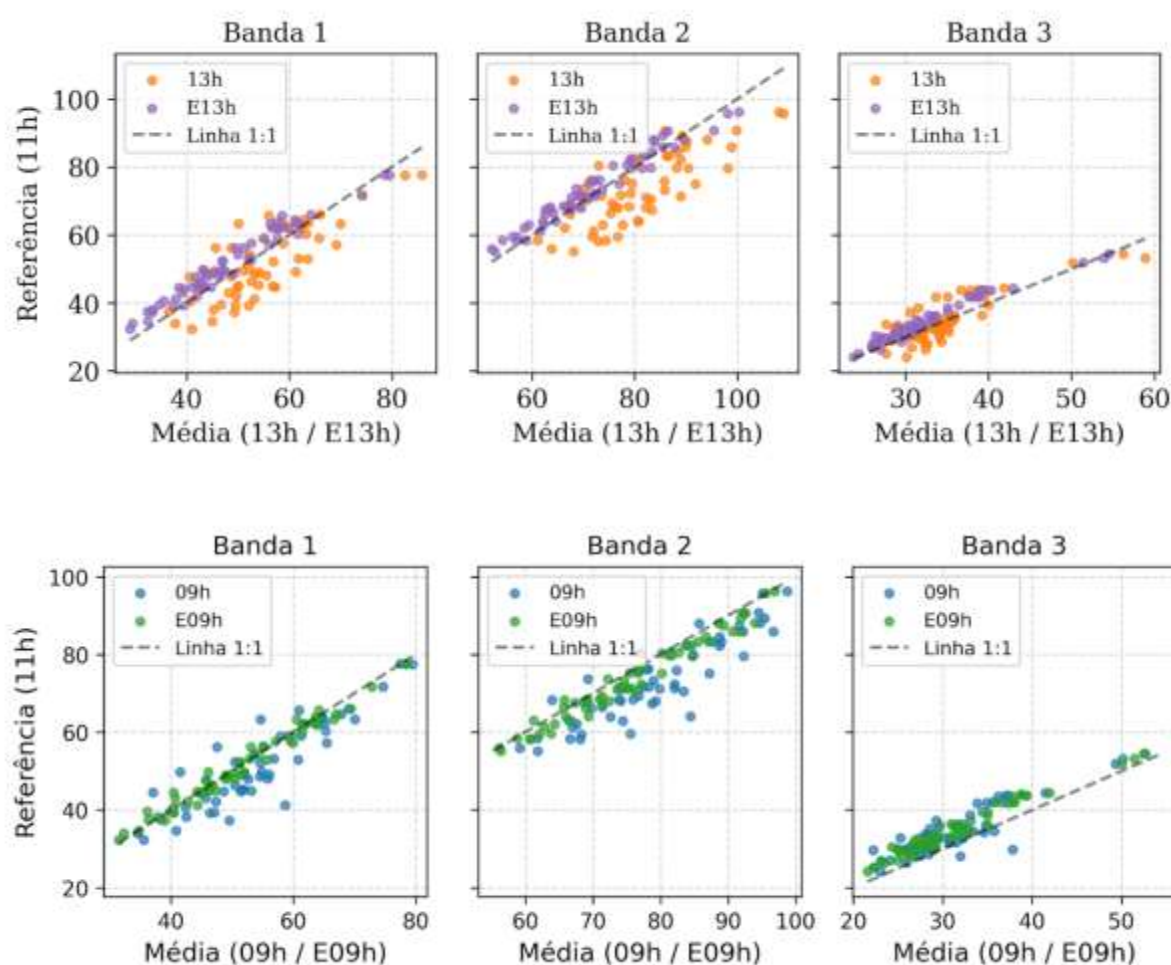
A Tabela 2 apresenta o coeficiente de correlação linear de Pearson (r) e o Coeficiente de Concordância de Lin (CCC) entre o valor médio de DN de cada ponto amostral no cenário-alvo e na referência (11h), calculados para as três bandas espectrais.

Tabela 2 – Coeficiente de correlação de Pearson e Coeficiente de Concordância de Lin (CCC) em relação à referência (11h) (n = 57)

Comparação	Banda	Pearson r	CCC
Bruto 09h vs 11h	R	0,8976	0,8683
	G	0,8959	0,7700
	B	0,9002	0,7946
Equalizado 09h vs 11h	R	0,9880	0,9870
	G	0,9836	0,9637
	B	0,9778	0,8622
Bruto 13h vs 11h	R	0,8077	0,7761
	G	0,7777	0,6296
	B	0,8431	0,8367
Equalizado 13h vs 11h	R	0,9800	0,9388
	G	0,9791	0,9661
	B	0,9794	0,9319

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Figura 6 – Diagramas de dispersão por banda espectral, com linha 1:1 (n = 57 pontos)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Os diagramas de dispersão correspondentes, com a linha identidade (1:1) sobreposta, são apresentados na Figura 6. Diferentemente do que se observaria caso o Casamento de Histogramas atuasse como uma simples transformação linear (afim) sobre os níveis de cinza — caso em que o coeficiente de Pearson permaneceria inalterado —, verificou-se aumento expressivo do coeficiente de Pearson após a equalização em todas as seis combinações banda × horário: na banda R, por exemplo, o coeficiente subiu de 0,898 para 0,988 às 09h e de 0,808 para 0,980 às 13h. Esse resultado é consistente com a natureza monotônica, porém não linear, do algoritmo de Casamento de Histogramas: como o mapeamento de níveis de cinza segue a forma da função de distribuição acumulada de cada imagem — e não uma simples equação de reta —, ele não preserva necessariamente a correlação linear de Pearson, ao contrário do que ocorreria sob uma transformação puramente afim.

O CCC acompanhou esse ganho de forma consistente nas bandas R e G, com valores finais entre 0,94 e 0,99 — classificados como “substancial” a “quase perfeito” segundo os critérios de McBride (2005) —, partindo de valores brutos entre 0,63 e 0,87 (“pobres” pelo mesmo critério). Já na banda B, observou-se um padrão distinto: embora o Pearson também tenha aumentado de forma expressiva (0,90 → 0,98 às 09h; 0,84 → 0,98 às 13h), o CCC permaneceu em patamar mais modesto (0,86 e 0,93), evidenciando que, nessa banda, persiste uma diferença sistemática de escala ou de posição entre o cenário equalizado e a referência que a correlação de Pearson, por si só, não captura.

3.5 Análise de concordância por Bland-Altman

A Tabela 3 sintetiza o viés médio e os limites de concordância ($LoA = \text{viés} \pm 1,96 \times \text{desvio padrão das diferenças}$) obtidos pela análise de Bland-Altman, cujos diagramas de dispersão (diferença × média) são apresentados na Figura 7.

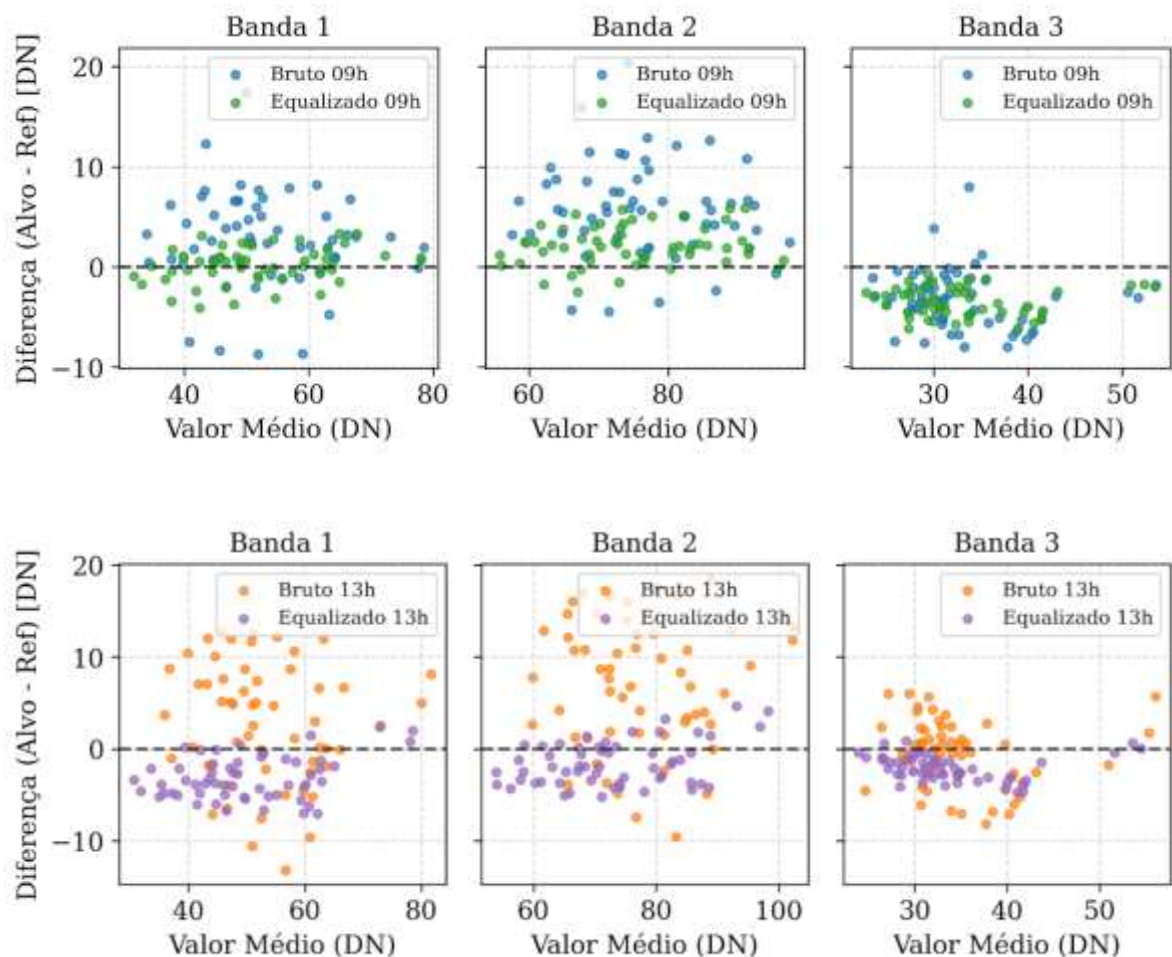
Tabela 3 – Viés e limites de concordância (LoA) da análise de Bland-Altman em relação à referência (11h) (n = 57)

Comparação	Banda	Viés	LoA inf.	LoA sup.	Largura LoA
Bruto 09h vs 11hs	R	+2,675	-6,702	+12,051	18,75
	G	+5,801	-3,460	+15,061	18,52
	B	-3,318	-9,092	+2,457	11,55
Equalizado 09h vs 11h	R	+0,209	-3,227	+3,646	6,87
	G	+2,142	-1,688	+5,971	7,66

Comparação	Banda	Viés	LoA inf.	LoA sup.	Largura LoA
Bruto 13h vs 11h	B	-3,453	-6,236	-0,671	5,56
	R	+2,885	-9,849	+15,620	25,47
	G	+7,149	-6,592	+20,890	27,48
	B	-0,364	-7,495	+6,766	14,26
Equalizado 13h vs 11h	R	-3,183	-7,750	+1,384	9,13
	G	-1,545	-6,310	+3,221	9,53
	B	-2,094	-4,762	+0,575	5,34

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

Figura 7 – Diagramas de Bland-Altman por banda espectral (n = 57 pontos)



Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A largura da LoA — que reflete a dispersão ponto a ponto das diferenças — reduziu-se substancialmente após a equalização em todas as seis combinações banda × horário, com reduções entre 52% e 65% (por exemplo, de 25,47 para 9,13 na banda R às 13h, e de 27,48 para 9,53 na banda G às 13h). O viés sistemático, por sua vez, comportou-se de forma distinta entre bandas: nas bandas R e G, o viés bruto (entre +2,7 e +7,1) foi reduzido de

forma expressiva pela equalização, aproximando-se de zero às 09h (R: +2,68 $\rightarrow$ +0,21; G: +5,80 $\rightarrow$ +2,14) e invertendo de sinal, porém com magnitude comparável ou reduzida, às 13h (R: +2,89 $\rightarrow$ -3,18; G: +7,15 $\rightarrow$ -1,55). Já na banda B, o viés bruto — já próximo de zero ou discretamente negativo (-3,32 e -0,36) — não foi corrigido pela equalização, permanecendo em magnitude semelhante ou até ligeiramente maior (-3,45 às 09h; -2,09 às 13h). Esse padrão indica que o algoritmo foi eficaz em reduzir a dispersão aleatória entre pontos em todas as bandas, mas corrigiu o deslocamento sistemático apenas nas bandas R e G, deixando um viés residual não tratado na banda B.

3.6 Significância estatística da redução do erro (teste de Wilcoxon)

Previamente à escolha do teste de significância, aplicou-se o teste de normalidade de Shapiro-Wilk sobre as distribuições de diferença (cenário-alvo menos referência) das doze combinações banda $\times$ horário $\times$ tratamento avaliadas. Como a normalidade não pôde ser confirmada para todas as combinações (por exemplo, banda R e banda B brutas às 09h, e banda G equalizada às 13h, com $p < 0,05$), optou-se pelo teste não paramétrico de Wilcoxon para amostras pareadas, aplicado ao erro absoluto ($|DN_{\text{alvo}} - DN_{\text{referência}}|$) de cada ponto amostral, comparando os cenários bruto e equalizado.

Tabela 4 – Teste de Wilcoxon pareado sobre o erro absoluto em relação à referência (11h), $\alpha = 0,05$ ($n = 57$)

Horário	Banda	Mediana erro bruto	Mediana erro equalizado	p-valor	Significativo
09h	R	3,260	1,014	$5,89 \times 10^{-9}$	Sim
	G	5,706	2,104	$8,74 \times 10^{-11}$	Sim
	B	3,530	3,644	0,307	Não
13h	R	5,143	3,694	$2,31 \times 10^{-3}$	Sim
	G	8,320	2,426	$5,87 \times 10^{-8}$	Sim
	B	2,428	2,142	0,088	Não

Fonte: Elaborado pelo autor, 2026.

A redução do erro absoluto em relação à referência mostrou-se estatisticamente significativa nas bandas vermelha (R) e verde (G), em ambos os horários avaliados, com reduções da mediana do erro absoluto entre 54% e 71%. Na banda azul (B), não houve diferença estatisticamente significativa entre o erro absoluto bruto e o equalizado em nenhum dos dois horários, resultado coerente com o viés residual identificado na análise de Bland-Altman (seção 3.5).

3.7 Síntese dos resultados

Em conjunto, os resultados indicam que o algoritmo de Casamento de Histogramas promoveu homogeneização radiométrica expressiva e estatisticamente significativa nas bandas vermelha e verde, com ganhos substanciais de correlação (Pearson e CCC), redução acentuada da dispersão ponto a ponto (largura da LoA reduzida entre 52% e 65%) e do viés sistemático, e redução estatisticamente significativa do erro absoluto mediano (teste de Wilcoxon, $p < 0,01$) em ambos os horários avaliados. Na banda azul, por outro lado, a equalização reduziu a dispersão aleatória entre pontos, mas não corrigiu o viés sistemático residual, resultando em ausência de melhoria estatisticamente significativa do erro absoluto. Esses resultados sugerem que a eficácia da correção radiométrica relativa por Casamento de Histogramas, neste estudo, foi fortemente dependente da banda espectral avaliada, com desempenho consistentemente superior nas bandas R e G em comparação à banda B, em ambos os horários de captura testados.

4 DISCUSSÃO

Os resultados obtidos demonstram que o Casamento de Histogramas (*Histogram Matching*) promoveu uma correção radiométrica relativa expressiva nas bandas R e G, com ganhos de concordância (CCC) que as elevaram da classificação “pobre” para “substancial” a “quase perfeita”, segundo os critérios de McBride (2005), e com redução estatisticamente significativa do erro absoluto mediano em ambos os horários avaliados (seção 3.6). Esse resultado colabora a validação de Pastucha *et al.* (2022), que demonstraram a robustez do Casamento de Histogramas como núcleo de um método automático de normalização radiométrica relativa para ortomosaicos RGB de VANT, e reforça a adequação metodológica da escolha do algoritmo para o problema de correção radiométrica multi-horário abordado neste estudo.

A magnitude do ganho observado reduções de 52% a 65% na largura dos limites de concordância de Bland-Altman, e aumentos de até 0,20 pontos no CCC é consistente com o potencial de correção reportado na literatura para métodos de normalização radiométrica relativa bem ajustados às condições de captura. Esse resultado contrasta com relatos de desempenho mais modesto do Casamento de Histogramas em condições de maior complexidade da cena, como o caso reportado por Xi *et al.* (2022) em ambientes com reflexão especular intensa (corpos d'água), no qual o método apresentou perda de níveis de cinza e distorção da distribuição espectral. A ausência de alvos de reflexão especular na ROI deste estudo instalada em dossel de café homogêneo, sem corpos d'água ou superfícies metálicas pode explicar, ao menos em parte, por que o método aqui avaliado alcançou desempenho superior ao relatado naquele cenário mais adverso.

O achado mais relevante deste estudo em termos de heterogeneidade espectral é a discrepância sistemática entre o comportamento das bandas R e G, nas quais a correção foi eficaz tanto na dispersão quanto no viés, e a banda B, na qual apenas a dispersão aleatória foi reduzida, permanecendo um viés sistemático residual de magnitude semelhante ou superior ao observado nos dados brutos (seção 3.5). Esse padrão sugere que a banda azul está sujeita a uma fonte de variação radiométrica que o Casamento de Histogramas, por atuar exclusivamente sobre a distribuição estatística agregada da cena, não é capaz de corrigir.

Uma explicação plausível decorre da maior sensibilidade da banda azul à radiação difusa e ao espalhamento atmosférico (*Rayleigh scattering*), fisicamente mais intenso em comprimentos de onda curtos. Como o espalhamento atmosférico difuso não decorre de uma diferença de brilho global entre as cenas, mas de um componente aditivo que se sobrepõe de

forma não uniforme à radiância refletida pelo alvo, ele não é plenamente corrigível por um mapeamento estatístico da distribuição de níveis de cinza, ainda que o mapeamento seja capaz de aproximar a forma geral da distribuição da banda entre cenários. Essa hipótese é consistente com a literatura de reflectância de dossel: Gilabert e Meliá (1993) demonstraram que a proporção de radiação difusa exerce influência mensurável sobre a reflectância medida em dossel de citros, com efeito que se manifesta de forma distinta entre regiões espectrais.

A ocorrência de um padrão serrilhado nos histogramas equalizados do canal verde (Figuras 4 e 5), ausente na banda de referência, não constitui uma anomalia isolada do conjunto de dados, mas sim uma limitação estrutural amplamente documentada na literatura de processamento digital de imagens. Coltuc, Bolon e Chassery (2006) demonstraram formalmente que, em domínios discretos de 8 bits, o Casamento de Histogramas convencional não é capaz de produzir uma correspondência exata entre a distribuição da imagem-alvo e a da imagem de referência: como múltiplos níveis de cinza da imagem original podem ser mapeados para um único nível da referência (ou vice-versa), a distribuição resultante inevitavelmente apresenta descontinuidades e concentrações artificiais de frequência o que os autores denominaram “Especificação Exata de Histograma” como método corretivo, baseado na ordenação estrita dos pixels para mitigar exatamente esse problema. É digno de nota que, apesar desse artefato visual na distribuição agregada da cena, a banda G foi justamente uma das bandas com maior ganho estatístico de concordância ponto a ponto (seção 3.4), o que sugere que o artefato de quantização, embora real, não comprometeu de forma relevante a fidelidade radiométrica média dentro de cada ponto amostral.

Um resultado metodologicamente relevante deste estudo é o aumento expressivo do coeficiente de correlação de Pearson após a equalização em todas as combinações banda $\times$ horário avaliadas incluindo a banda B, na qual, não obstante, o CCC permaneceu em patamar mais modesto. Esse padrão evidencia uma distinção estatística importante: o coeficiente de Pearson é invariante apenas a transformações lineares (afins) dos dados, e não a transformações monotônicas em geral. Como o Casamento de Histogramas realiza um mapeamento monotônico, porém não linear determinado pela forma específica da função de distribuição acumulada de cada imagem, não há garantia teórica de que a correlação de Pearson permaneça inalterada após a correção, e os resultados aqui obtidos confirmam empiricamente essa não invariância.

Esse achado reforça, por um caminho diferente do inicialmente hipotetizado, a relevância de se complementar o Pearson com métricas de concordância como o CCC (LIN, 1989): na banda B, o forte aumento do Pearson (de cerca de 0,90 para 0,98) poderia,

isoladamente, sugerir uma correção bem-sucedida; o CCC, ao incorporar os componentes de viés e de escala em sua formulação, revelou que a concordância real permaneceu limitada (0,86 a 0,93) resultado consistente com o viés sistemático residual identificado na análise de Bland-Altman (seção 3.5) e com a ausência de significância no teste de Wilcoxon (seção 3.6) para essa banda. Esse contraste demonstra, de forma direta, por que a literatura de comparação de métodos de medição recomenda o uso do CCC em vez do Pearson isoladamente (LIN, 1989; MCBRIDE, 2005): o Pearson pode ocultar exatamente o tipo de erro sistemático que mais compromete a validade de uma correção radiométrica.

Observou-se, nas bandas R e G, redução da largura da LoA ligeiramente maior às 13h (64–65%) do que às 09h (59–63%), padrão que, embora menos acentuado do que inicialmente hipotetizado, permanece qualitativamente coerente com a literatura sobre assimetria diurna da reflectância e do albedo de dosséis vegetativos. Gilabert e Meliá (1993), em dossel de citros estruturalmente semelhante ao cafeeiro avaliado neste estudo, demonstraram que a reflectância medida ao nadir varia de forma mais acentuada quando a proporção de radiação difusa é elevada, condição mais presente no período matutino (seção 2.1). De modo complementar, Song (1998) e Ripley e Redmann (1976 apud SONG, 1998) atribuíram parte da assimetria diurna do albedo de dosséis vegetativos à presença de orvalho residual nas primeiras horas do dia e à reorientação foliar induzida pelo vento fatores que constituem alterações físicas da superfície fotografada, e não apenas do regime de iluminação incidente, e que, portanto, um método puramente estatístico como o Casamento de Histogramas não tem como corrigir de forma completa.

Ainda assim, a magnitude da correção obtida neste estudo para as bandas R e G reduções de mais de 60% na dispersão ponto a ponto e ganhos de CCC de até 0,33 aproximam-se de ordens de grandeza reportadas para métodos de correção radiométrica bem ajustados na literatura, ainda que abaixo da precisão obtida por métodos que incorporam informação adicional sobre a cena, como pontos homólogos ou modelos de vinhetagem (XI *et al.*, 2022). Esse resultado sugere que, ao menos para as bandas R e G e nas condições avaliadas, o Casamento de Histogramas isolado já constitui uma correção radiométrica relativa satisfatória, restando a banda B como uma limitação específica a ser tratada por abordagens complementares como a correção do componente de radiação difusa ou o uso de alvos de reflectância conhecida em trabalhos futuros.

5 CONCLUSÃO

O Casamento de Histogramas promoveu correção radiométrica eficaz e estatisticamente significativa nas bandas vermelha e verde, mas não corrigiu o viés sistemático da banda azul, possivelmente associado à maior sensibilidade dessa banda ao espalhamento atmosférico difuso. Na prática, isso implica que o método pode ser adotado com confiança para as bandas R e G em fluxos de trabalho fotogramétricos com VANT, mas recomenda-se cautela ao utilizar a banda B sem correção complementar em análises que exijam fidelidade radiométrica em nível de pixel.

Recomenda-se, para trabalhos futuros, investigar métodos complementares de correção do componente difuso na banda azul e repetir o experimento em diferentes estações do ano, verificando a estabilidade dos padrões aqui observados.

REFERÊNCIAS

- BLAND, J. M.; ALTMAN, D. G. Statistical methods for assessing agreement between two methods of clinical measurement. **The Lancet**, v. 327, n. 8476, p. 307-310, 1986. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0140-6736\(86\)90837-8](https://doi.org/10.1016/S0140-6736(86)90837-8). Acesso em: 02 jul. 2026.
- COLTUC, D.; BOLON, P.; CHASSERY, J.-M. Exact histogram specification. **IEEE Transactions on Image Processing**, v. 15, n. 5, p. 1143-1152, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1109/TIP.2005.864170>. Acesso em: 02 jul. 2026.
- GILABERT, M. A.; MELIÁ, J. Solar angle and sky light effects on ground reflectance measurements in a citrus canopy. **Remote Sensing of Environment**, v. 45, n. 3, p. 281-293, 1993. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(93\)90100-E](https://doi.org/10.1016/0034-4257(93)90100-E). Acesso em: 02 jul. 2026.
- JOHNSON, L. F.; HERWITZ, S. R.; LOBITZ, B. M.; DUNAGAN, S. E. Feasibility of monitoring coffee field ripeness with airborne multispectral imagery. **Applied Engineering in Agriculture**, v. 20, n. 6, p. 845-849, 2004. Disponível em: <https://doi.org/10.13031/2013.17798>. Acesso em: 03 jul. 2026.
- LIN, L. I-K. A concordance correlation coefficient to evaluate reproducibility. **Biometrics**, v. 45, n. 1, p. 255-268, 1989. Disponível em: <https://doi.org/10.2307/2532051>. Acesso em: 04 jul. 2026.
- MCBRIDE, G. B. A proposal for strength-of-agreement criteria for Lin's Concordance Correlation Coefficient. Hamilton: **NIWA**, 2005. (NIWA Client Report HAM2005-062). Disponível em: <https://www.medcalc.org/download/pdf/McBride2005.pdf>. Acesso em: 05 jul. 2026.
- PASTUCHA, E.; PUNIACH, E.; GRUSZCZYŃSKI, W.; ĆWIAKAŁA, P.; MATWIJ, W.; MIDTIBY, H. S. Relative radiometric normalisation of Unmanned Aerial Vehicle photogrammetry-based RGB orthomosaics. **The Photogrammetric Record**, v. 37, n. 178, p. 228-247, 2022. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/phor.12414>. Acesso em: 05 jul. 2026.
- RIPLEY, E. A.; REDMANN, R. E. Grassland. In: MONTEITH, J. L. (Ed.). *Vegetation and the Atmosphere*. London: Academic Press, 1976 apud SONG, J. Diurnal asymmetry in surface albedo. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 92, n. 3, p. 181-189, 1998.
- SONG, J. Diurnal asymmetry in surface albedo. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 92, n. 3, p. 181-189, 1998. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0168-1923\(98\)00110-6](https://doi.org/10.1016/S0168-1923(98)00110-6). Acesso em: 05 jul. 2026.
- XI, S.; LI, Y.; GE, Y.; WU, T.; REN, M.; YUAN, X.; ZHUANG, C. Radiometric consistency correction of UAV multispectral images in strong reflective water environment. **Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering**, v. 38, n. 2, p. 192-200, 2022. Disponível em: <https://www.tcsae.org>. Acesso em: 05 jul. 2026.

ZHANG, C.; KOVACS, J. M. The application of small unmanned aerial systems for precision agriculture: a review. **Precision Agriculture**, v. 13, p. 693-712, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11119-012-9274-5>. Acesso em: 05 jul. 2026.