

DISCRIMINAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE *Pinus* sp. EM REGENERAÇÃO NATURAL COM IMAGENS MULTIESPECTRAIS DE UAS

DISCRIMINATION AND CLASSIFICATION OF *Pinus* sp. IN NATURAL REGENERATION WITH MULTISPECTRAL UAS IMAGERY

Jordan Luis Campos Modesto Pereira¹, Caio Cesar Moraes Brandelik², Daniel Zambiazzi Miller³,
Faiman Orlando da Silva⁴, Lénia Francisco Matsinhe⁵, Ana Paula Dalla Corte⁶

¹Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil – jordan.cmodesto@gmail.com

²Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil – caiombrandelik@gmail.com

³Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil – dzmiller.ufpr@gmail.com

⁴Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil – faimandasilva366@gmail.com

⁵Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil – leniafrancisco02@gmail.com

⁶Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil – anapaulacorte@gmail.com

RESUMO

O gênero *Pinus* responde por parcela significativa das plantações florestais no mundo, mas sua expansão fora das áreas de plantio ameaça a biodiversidade em unidades de conservação, e o monitoramento convencional desses focos é oneroso e de baixa cobertura espacial. Estudos de mapeamento por UAS costumam avaliar apenas o resultado da classificação, sem relacioná-lo à separabilidade espectral entre as classes. Partiu-se da hipótese de que a resposta espectral de *Pinus* e de folhosas difere nas bandas de um sensor multiespectral embarcado em UAS de modo suficiente para sustentar a classificação automatizada. O objetivo foi caracterizar a assinatura espectral dos dois grupos e classificar *Pinus* sp. em área de regeneração natural na Fazenda Experimental do Canguiri, Pinhais, Paraná (11,14 ha), com imagens do drone DJI Mavic 3M. Foram extraídas 465 amostras de *Pinus* e 415 de folhosas por banda, além de 1.354 amostras para classificação por Random Forest em cinco classes. As folhosas apresentaram valores digitais superiores no visível e o *Pinus* predominou no infravermelho próximo; a borda do vermelho apresentou médias coincidentes. A distância de Jeffries-Matusita indicou que nenhuma banda, isoladamente, separa os grupos. A classificação alcançou acurácia global de 92,8%, Kappa de 0,892 e F-score de 0,856 para *Pinus* sp., que ocupou 1,187 ha (10,66% da área). O estudo mostra que o desempenho decorre da combinação multivariada de variáveis, e não do contraste em bandas isoladas, contribuindo com uma medida formal de separabilidade pouco explorada nesse tipo de aplicação e com evidências sobre o papel do NDRE sob baixa separabilidade espectral.

PALAVRAS-CHAVE: Espécies invasoras, Floresta Ombrófila Mista, Random Forest, Segmentação orientada a objetos.

ABSTRACT

The genus *Pinus* accounts for a significant share of forest plantations worldwide, but its spread beyond planted areas threatens biodiversity in protected areas, and conventional monitoring of these outbreaks is costly and offers limited spatial coverage. UAS-based mapping studies usually assess only the classification outcome, without relating it to the spectral separability between classes. We hypothesised that the spectral response of *Pinus* and broadleaves differs across the bands of a multispectral sensor onboard a UAS sufficiently to support automated classification. The aim was to characterise the spectral signature of both groups and to classify *Pinus* sp. in a naturally regenerating area at the Canguiri Experimental Farm, Pinhais, Paraná, Brazil (11.14 ha), using imagery from a DJI Mavic 3M drone. We extracted 465 samples of *Pinus* and 415 of broadleaves per band, plus 1,354 samples for Random Forest classification across five classes. Broadleaves showed higher digital numbers in the visible range and *Pinus* prevailed in the near infrared; the red edge showed coincident means. The Jeffries-Matusita distance indicated that no single band separates the groups. Classification reached an overall accuracy of 92.8%, a Kappa of 0.892 and an F-score of 0.856 for *Pinus* sp., which covered 1.187 ha (10.66% of the area). The study shows that performance stems from the multivariate combination of variables rather than from the contrast in isolated bands, contributing a formal separability metric that remains underused in this type of application, along with evidence on the role of NDRE under low spectral separability.

KEYWORDS: Invasive species, Mixed Ombrophilous Forest, Random Forest, Object-based segmentation.

INTRODUÇÃO

O gênero *Pinus* (Pinaceae) é responsável por 19% das plantações florestais no mundo (SFB, 2025), sendo amplamente utilizado na produção de madeira, fibras e resina, produtos de elevado valor de mercado agregado (VARNAGIRYTĖ-KABAŠINSKIENĖ & SURVILA, 2025). No Brasil, os plantios do gênero ocupam 1,9 milhões de hectares (IBÁ, 2025). Apesar dessa importância econômica, o *Pinus* tornou-se uma preocupação ambiental por sua capacidade invasora: a expansão de suas populações ocupa o espaço de espécies nativas, altera a estrutura dos ecossistemas e os processos de sucessão vegetal (LEAL-MEDINA *et al.*, 2024) e, na América do Sul, provoca acúmulo de cargas de combustível, aumento da frequência de incêndios e degradação de solos, inclusive dentro de unidades de conservação (BRAVO-VARGAS *et al.*, 2019; FIGUEIREDO *et al.*, 2024).

O monitoramento desses focos, contudo, é limitado pela complexidade do ambiente, pela extensão das áreas e pelo custo da mão de obra (MUSUNGU *et al.*, 2024). O sensoriamento remoto por sistema aéreo não tripulado (UAS) tem se destacado como alternativa, por sua alta resolução espacial e, quando equipado com sensores adequados, pela aquisição de bandas além do visível, que permitem construir índices de vegetação (APOSTOL *et al.*, 2020; MOURA *et al.*, 2021; LUAN *et al.*, 2024). Ainda assim, trabalhos recentes de mapeamento por UAS reportam a acurácia da classificação sem relacioná-la à separabilidade espectral das bandas ou índices empregados (MOURA *et al.*, 2021; GONÇALVES *et al.*, 2022; ATAÍDE *et al.*, 2024). Permanece, portanto, a lacuna de saber quais faixas do espectro efetivamente sustentam a discriminação e quais apenas acompanham o conjunto de variáveis, questão cuja resposta condiciona a escolha de sensores e de índices em programas de monitoramento.

Entre as bandas captadas por sensores embarcados, o infravermelho próximo (NIR) responde mais à estrutura interna da folha do que ao teor de pigmentos (XU & YE, 2023), enquanto a borda do vermelho varia em função do teor de clorofila foliar (EITEL *et al.*, 2011). Já as bandas do visível discriminam pigmentação foliar e atividade fotossintética, o que permite distinguir coníferas de folhosas em dosséis heterogêneos, desde que associadas a alta resolução espacial e a classificação supervisionada (ABDOLLAHNEJAD & PANAGIOTIDIS, 2020).

Abdollahnejad & Panagiotidis (2020) destacaram a aplicação dessas bandas na geração de índices de vegetação. Entre eles, o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) é amplamente empregado para avaliar

a condição da vegetação, evidenciando variações ligadas a atributos biofísicos (SHIBAYAMA *et al.*, 1999; COLE *et al.*, 2014), embora tenda a saturar em dosséis densos, nos quais a absorção no vermelho se aproxima do máximo e o índice deixa de variar com aumentos de biomassa. Nessas condições, o índice de vegetação da diferença normalizada da borda do vermelho (NDRE) pode apresentar maior sensibilidade, por operar em uma faixa onde a absorção pela clorofila ainda não é total. (AL-SHAMMARI *et al.*, 2025).

Formulou-se a hipótese de que a resposta espectral de *Pinus* e de árvores folhosas difere nas bandas do sensor multiespectral de modo suficiente para sustentar a classificação automatizada dos focos de invasão. O estudo teve por objetivos: (i) caracterizar a resposta espectral de indivíduos de *Pinus* e de árvores folhosas nas cinco bandas do sensor, a partir exclusivamente dos valores digitais; e (ii) classificar e quantificar a ocorrência de *Pinus* sp. na área de estudo por meio de índices de vegetação e métricas de textura processados por Random Forest, relacionando o desempenho obtido à separabilidade espectral identificada.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

O estudo foi realizado na Fazenda Experimental do Canguiri, gerenciada pelo Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná (UFPR), no município de Pinhais, Paraná, a 18 km ao norte de Curitiba (Figura 1). A fazenda situa-se na Área de Proteção Ambiental (APA) Estadual do Irai e abrange as zonas ZUIR (Zona de Uso Institucional Restrito) e ZCVS II (Zona de Conservação da Vida Silvestre II), prioritárias para a conservação da biodiversidade (PARANÁ, 2024).



Figura 1. Mapa de localização da área de estudo na Fazenda Experimental do Canguiri, Pinhais, Paraná.

Segundo a classificação de Köppen, o clima é temperado úmido mesotérmico (Cfb), sem estação seca, com verões frescos e geadas frequentes no inverno (ALVARES *et al.*, 2013). A precipitação média anual é de 1.436 mm (SIMEPAR, 2025) e a vegetação corresponde às unidades fitogeográficas de Floresta Ombrófila Mista e Estepe (IBGE, 1992). A área experimental localiza-se ao sudeste da fazenda e abrange um polígono de 11,14 ha em processo de regeneração natural.

Aquisição e processamento das imagens

As imagens foram adquiridas com o drone DJI Mavic 3M, cujas câmeras de 5 MP registram as bandas do verde (560 ± 16 nm), vermelho (650 ± 16 nm), borda do vermelho (730 ± 16 nm) e infravermelho próximo (860 ± 26 nm), complementadas pelo azul, obtido da câmera RGB de 20 MP. As imagens foram adquiridas em 11 de julho de 2025, por volta das 10h30. O voo foi planejado no aplicativo DJI Pilot 2, a 100 m de altura, com recobrimentos lateral e longitudinal de 75% e 85% e velocidade de $4,7 \text{ m s}^{-1}$, resultando em resolução espacial de 5,1 cm por pixel nas bandas multiespectrais. O processamento fotogramétrico foi conduzido no PIX4Dmapper 4.5.6, gerando nuvens de pontos, ortomosaico, bandas separadas e índices de vegetação.

As análises foram conduzidas sobre os números digitais (DN) registrados pelo sensor, e não sobre valores de refletância, uma vez que o processamento não gera produtos radiometricamente calibrados. Para permitir a comparação entre as bandas, os valores foram normalizados para o intervalo de 0 a 255.

Índices de vegetação

Foram calculados o índice de vegetação por diferença normalizada (NDVI) (Equação 1) e o índice de vegetação da diferença normalizada da borda do vermelho (NDRE) (Equação 2), a partir das bandas do infravermelho próximo (NIR), do vermelho (R) e da borda do vermelho (RE), pela capacidade de evidenciar variações relacionadas ao teor de clorofila, à estrutura foliar e à atividade fotossintética.

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{R}) / (\text{NIR} + \text{R}) \quad (1)$$

$$\text{NDRE} = (\text{NIR} - \text{RE}) / (\text{NIR} + \text{RE}) \quad (2)$$

Segmentação e amostragem

A segmentação foi realizada no QGIS Bratislava 3.40.14, por meio do plugin Orfeo Toolbox (OTB), com o algoritmo LargeScaleMeanShift, que agrupa pixels adjacentes de características espectrais semelhantes em objetos homogêneos, reduzindo a variabilidade intraclasses. A segmentação foi realizada no software QGIS, por meio do plugin Orfeo Toolbox (OTB), com o algoritmo LargeScaleMeanShift, que agrupa pixels adjacentes de características espectrais semelhantes em objetos homogêneos, reduzindo a variabilidade intraclasses. Adotaram-se largura espacial de 5 pixels, largura espectral de 10 e tamanho mínimo de segmento de 80 pixels, valores definidos por testes exploratórios até obter equilíbrio entre a preservação dos limites de copa e a redução de ruídos. O conjunto resultante serviu de base comum às duas etapas de análise.

Na primeira etapa, foram selecionados objetos correspondentes a copas de identificação inequívoca por interpretação visual do ortomosaico, tanto de *Pinus* quanto de folhosas, obtendo-se 465 e 415 amostras por banda, respectivamente. Para cada grupo e banda calcularam-se média, desvio-padrão, valores mínimo e máximo e coeficiente de variação. Os valores digitais médios foram representados por banda, posicionados nos respectivos comprimentos de onda centrais, com barras correspondentes a um desvio-padrão, de modo a expressar tanto a tendência central quanto a variabilidade das amostras.

A classificação supervisionada foi realizada sobre os objetos gerados na segmentação, considerando cinco classes temáticas definidas segundo sua representatividade na área de estudo: solo exposto, *Pinus* sp., vegetação nativa, vegetação morta e vegetação rasteira. Como variáveis de entrada foram utilizadas as cinco bandas espectrais (azul, verde, vermelho, borda do vermelho e infravermelho próximo), os índices de vegetação NDVI e NDRE e as métricas de textura obtidas pelo algoritmo de Haralick.

Foram selecionadas 1.354 amostras, sendo 956 (70%) destinadas ao ajuste do modelo Random Forest e 398 (30%) à validação. O Random Forest foi adotado por sua robustez com dados multiespectrais e derivados e por lidar com variáveis correlacionadas sem exigir pressupostos sobre a distribuição dos dados.

Avaliação da acurácia

A acurácia global (Equação 3) expressa a proporção de amostras corretamente classificadas. O índice Kappa (Equação 4) avalia a concordância entre a classificação e os dados de referência descontando os acertos esperados ao acaso, o que corrige o efeito do desbalanceamento entre classes. O F-score (Equação 5) combina precisão (Equação 6) e revocação (Equação 7) em média harmônica, sintetizando o desempenho por classe.

$$OA = \frac{\sum x_{ii}}{N} \quad (3)$$

$$K = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e} \quad (4)$$

$$F = 2 \times \frac{P \times R}{P + R} \quad (5)$$

$$P = \frac{VP}{VP + FP} \quad (6)$$

$$R = \frac{VP}{VP + FN} \quad (7)$$

em que: $\sum x_{ii}$ = soma dos acertos da diagonal principal da matriz de confusão; N = total de amostras; P_o = proporção de acertos reais; P_e = proporção de acertos esperada pela distribuição das classes; VP = verdadeiros positivos; FP = falsos positivos; FN = falsos negativos.

Separabilidade espectral

A separabilidade entre *Pinus* e folhosas em cada banda foi quantificada pela distância de Jeffries-Matusita (Equação 8), derivada da distância de Bhattacharyya (Equação 9), que expressa o grau de sobreposição entre as distribuições dos dois grupos. O índice varia de 0 a 2, sendo valores próximos de 2 indicativos de completa separação e valores próximos de 0 indicativos de distribuições coincidentes.

$$JM = 2(1 - e^{-B}) \quad (8)$$

$$B = \frac{1}{8}(\mu_1 - \mu_2)^2 \cdot \frac{2}{\sigma_1^2 + \sigma_2^2} + \frac{1}{2} \ln \left[\frac{\frac{\sigma_1^2 + \sigma_2^2}{2}}{\sqrt{\sigma_1^2 \sigma_2^2}} \right] \quad (9)$$

Em que: B = distância de Bhattacharyya; μ_1 e μ_2 = médias dos grupos; σ_1^2 e σ_2^2 = variâncias dos grupos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Assinatura espectral de *Pinus* e folhosas

Os valores digitais extraídos das cinco bandas revelaram diferenças consistentes entre os grupos (Tabela 1). As folhosas apresentaram médias superiores em todas as bandas do visível, com destaque para a banda verde (141,81 contra 123,31), enquanto o *Pinus* registrou os menores valores na banda azul (63,08 contra 97,44), evidenciando maior absorção nessa faixa. No infravermelho próximo a relação se inverte, com predomínio do *Pinus* (148,95 contra 134,95). Na borda do vermelho as médias foram praticamente coincidentes (115,25 e 116,56).

Tabela 1. Valores digitais (média $\pm$ desvio-padrão) por banda espectral para *Pinus* e folhosas.

Banda	<i>Pinus</i>	Folhosas
Azul (B)	63,08 $\pm$ 13,68	97,44 $\pm$ 18,55
Verde (G)	123,31 $\pm$ 22,99	141,81 $\pm$ 24,20
Vermelho (R)	97,64 $\pm$ 21,77	126,97 $\pm$ 23,87
Borda do vermelho (NIR)	115,25 $\pm$ 25,46	116,56 $\pm$ 29,93
Infravermelho próximo (RE)	148,95 $\pm$ 26,88	134,95 $\pm$ 31,13

Os valores digitais médios e sua distribuição entre as amostras estão apresentados na Figura 2. As folhosas exibiram maior dispersão nas bandas do visível, com desvios-padrão superiores aos do *Pinus* em todas elas. Os intervalos de variação sobrepõem-se integralmente em todas as bandas: no infravermelho próximo, os valores de *Pinus* variam de 67,31 a 222,35 e os de folhosas de 59,89 a 224,54.

A distância de Jeffries-Matusita entre os grupos foi de 0,878 no azul, 0,376 no vermelho, 0,149 no verde, 0,068 no infravermelho próximo e 0,014 na borda do vermelho, valores abaixo do limiar de 1,9 usualmente adotado como indicativo de boa separabilidade. Nenhuma banda, isoladamente, separa os dois grupos: a distinção manifesta-se na tendência central das distribuições, e a borda do vermelho não apresenta contraste mensurável entre eles.

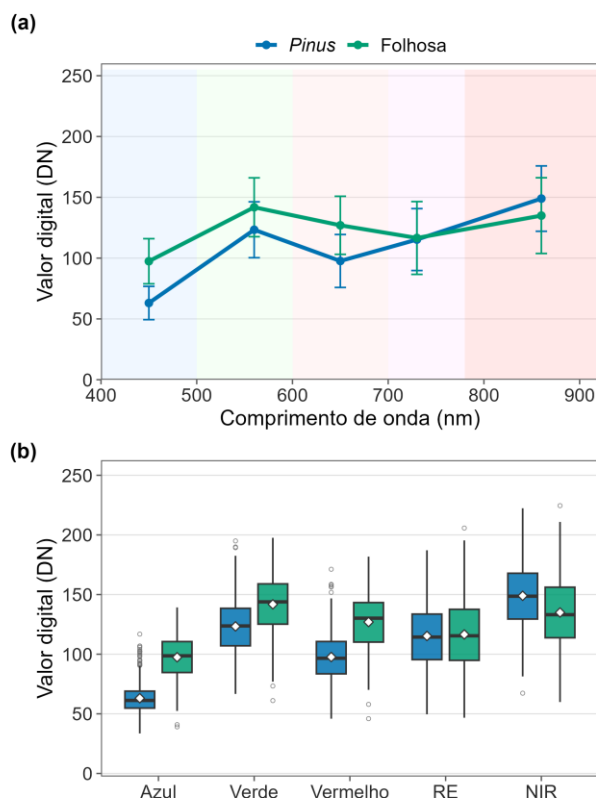


Figura 2. Valores digitais de *Pinus* e folhosas por banda: (a) média com barras de um desvio-padrão; (b) distribuição dos valores, com o losango indicando a média. RE = borda do vermelho; NIR = infravermelho próximo.

As diferenças observadas no visível podem estar relacionadas a características foliares dos dois grupos, ainda que estrutura foliar, conteúdo de pigmentos e propriedades ópticas não tenham sido medidos neste estudo. Uma interpretação possível é que os maiores valores das folhosas decorram de menor densidade da lâmina foliar e maior espaçamento intercelular, atributos associados à dispersão interna da luz (NEUWIRTHOVÁ et al., 2017; ATHERTON et al., 2017), enquanto os menores valores do *Pinus* estejam relacionados à estrutura acicular compacta, formada por múltiplas camadas celulares, que tende a reduzir a reflectância nessa faixa (RAUTIAINEN et al., 2018).

Essa interpretação, contudo, comporta ressalvas. A amostra de folhosas reúne espécies distintas da regeneração nativa, não caracterizadas individualmente, de modo que os valores representam o conjunto e não um padrão comum a todas. Os valores digitais registrados dependem ainda da arquitetura do dossel, do sombreamento entre copas e das condições de iluminação no momento do voo, fatores não controlados nesta análise e que podem contribuir para as diferenças observadas.

Classificação e quantificação das classes

Os índices de vegetação e as métricas de textura foram utilizados, junto às bandas espectrais, como variáveis de entrada na segmentação orientada a objetos e na classificação supervisionada. O NDVI variou de 0,759 a 0,902 para *Pinus* e de 0,606 a 0,863 para folhosas, enquanto o NDRE variou de 0,204 a 0,388 e de 0,147 a 0,370, respectivamente. A sobreposição entre os grupos foi menor no NDVI, cujo valor mínimo para *Pinus* superou boa parte da amplitude observada nas folhosas, ao passo que no NDRE os intervalos foram praticamente coincidentes.

A classificação indicou predominância de vegetação nativa, com 5,490 ha (49,30%), seguida da vegetação rasteira, com 3,484 ha (31,28%) — juntas, 80,6% da superfície mapeada (Tabela 2, Figura 3). A classe *Pinus* sp. corresponde a 1,187 ha (10,66%), distribuída de forma pontual. Embora menor que a das formações nativas e rasteiras, essa ocorrência não é desprezível e indica focos de invasão a serem priorizados no manejo. Em alguns trechos houve sobreposição com a vegetação nativa em estágio inicial de regeneração, atribuível à semelhança espectral entre indivíduos jovens e plântulas dos dois grupos.

Tabela 2. Áreas ocupadas por cada classe temática na classificação supervisionada.

Classe	Área (ha)	Área (%)
<i>Pinus</i> sp.	1,187	10,66
Vegetação nativa	5,490	49,30
Vegetação rasteira	3,484	31,28
Vegetação morta	0,401	3,60
Solo exposto	0,575	5,16
Total	11,140	100,00

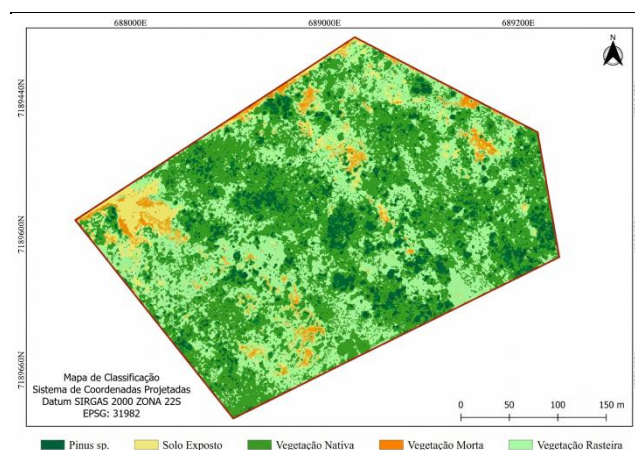


Figura 3. Classificação supervisionada por Random Forest, com destaque para a identificação de *Pinus* sp.

Acurácia e desempenho por classe

O modelo alcançou acurácia global de 92,8% e índice Kappa de 0,892, indicando elevada concordância entre a classificação e os dados de referência (Tabela 3). O F-score variou de 0,856 para *Pinus* sp. a 0,981 para vegetação rasteira, com 0,954 para vegetação nativa. Os maiores erros ocorreram entre *Pinus* sp. e vegetação nativa e entre solo exposto e vegetação morta, ou seja, justamente entre as classes de maior similaridade espectral. Esse padrão indica que a confusão decorre principalmente da resposta espectral dos alvos, e não apenas do desempenho do algoritmo.

Tabela 3. Matriz de confusão e F-score por classe da classificação supervisionada.

Ref.	SE	PI	VN	VM	VR	Total	F-score
SE	1945	0	0	298	4	2247	0,927
PI	0	1704	334	0	0	2038	0,856
VN	0	240	6111	0	0	6351	0,954
VM	3	0	0	1176	0	1179	0,884
VR	0	0	13	9	668	690	0,981

Ref. = classe de referência (linhas); colunas = classes preditas. SE = solo exposto; PI = *Pinus* sp.; VN = vegetação nativa; VM = vegetação morta; VR = vegetação rasteira. Acurácia global = 92,80%; índice Kappa = 0,892.

Da separabilidade espectral ao desempenho do classificador

A leitura conjunta das duas etapas permite relacionar o comportamento espectral dos grupos ao desempenho da classificação, ainda que de forma indireta. Nenhuma das cinco bandas, isoladamente, separa *Pinus* de folhosas: a maior distância de Jeffries-Matusita foi de 0,878, no azul, bem abaixo do limiar de 1,9 usualmente adotado como indicativo de boa separabilidade. Ainda assim, a classificação alcançou acurácia global de 92,8%, o que sugere que a discriminação decorre da combinação multivariada de bandas, índices e métricas de textura, e não do contraste em qualquer faixa isolada.

É importante ressaltar que a análise de separabilidade comparou apenas *Pinus* e folhosas, enquanto a classificação envolveu cinco classes temáticas. Por esse motivo, a correspondência entre as duas etapas deve ser considerada apenas indicativa, já que não substitui uma análise de importância de variáveis, que não foi realizada neste estudo. A confusão residual concentrou-se na classe *Pinus* sp., que apresentou o menor F-score, com objetos de referência atribuídos à vegetação nativa e o inverso

também ocorrendo. Esse resultado é coerente com a sobreposição integral dos intervalos de variação observada em todas as bandas.

A borda do vermelho ilustra essa limitação. A banda apresentou separabilidade praticamente nula ($JM = 0,014$), com médias coincidentes entre os grupos (115,25 e 116,56), mas o NDRE integrou o conjunto de variáveis de entrada. Uma hipótese é que seu eventual poder discriminante não venha da banda RE em si, e sim da razão com o infravermelho próximo: sendo a RE idêntica entre os grupos, a diferença normalizada preservaria o pouco contraste disponível no NIR e atenuaria efeitos de iluminação e sombreamento. Essa hipótese pode ser confirmada por estudos futuros, por meio de análise de importância de variáveis ou de ajustes do modelo com e sem o NDRE.

Comparação com a literatura e limitações

Alguns estudos anteriores mapearam espécies florestais com imagens RGB obtidas por UAS. Gonçalves et al. (2022) trabalharam com *Pinus* em restinga e alcançaram acurácia global de 89,56%, Kappa médio de 0,86 e F-score de 0,90 para a classe de interesse. Já Ferreira et al. (2025) obtiveram acurácia global de 77% e F-score de 0,76 em áreas úmidas do Cerrado paulista. Com sensor multiespectral, Xu et al. (2020) classificaram espécies arbóreas em floresta natural subtropical por Random Forest e chegaram a 80,20% de acurácia global na melhor combinação de métricas. Esses autores observaram que o uso isolado das métricas espectrais produziu as menores acurácias, e que acrescentar textura e dados estruturais melhorou o desempenho, o que converge com os resultados aqui obtidos. Ainda assim, a comparação direta entre todos esses valores é limitada, porque os estudos diferem quanto à área, à fisionomia vegetal, ao número de classes e ao delineamento de validação.

A principal limitação do estudo está no uso de valores digitais em vez de reflectância calibrada. Nas folhosas, os valores do canal verde superaram os do infravermelho próximo, o que contraria o padrão espectral típico da vegetação. Essa inversão é compatível com dados de sensores multiespectrais embarcados em UAS, que são sensíveis a variações de iluminação, ganho das bandas e sombreamento de copa (DI GENNARO et al., 2022). Como esses efeitos atuam de forma distinta sobre cada banda e sobre cada copa, o fato de as imagens terem sido obtidas em um único voo não os elimina. Por isso, tanto as magnitudes absolutas da Tabela 1 quanto a comparação entre bandas precisam ser interpretadas com cautela.

O estudo também foi conduzido em uma única data e em um polígono de 11,14 ha, o que restringe inferências sobre a estabilidade temporal das assinaturas e sobre a transferibilidade do modelo. Validar o modelo em outras datas e sítios, assim como incorporar dados estruturais derivados da nuvem de pontos, como o modelo de altura de dossel, são desdobramentos diretos deste trabalho e podem ajudar a reduzir a confusão observada entre *Pinus* sp. e a vegetação nativa. Como espécies do gênero estão entre as principais ameaças às áreas protegidas (DAMIANI et al., 2025), ferramentas de mapeamento como a aqui avaliada podem apoiar a definição de estratégias de controle compatíveis com a capacidade de dispersão de cada uma (ATAÍDE et al., 2024).

CONCLUSÕES

Os valores digitais registrados pelo sensor multiespectral diferem entre o *Pinus* sp. e folhosas nas bandas do visível e no infravermelho próximo. As folhosas apresentaram valores mais altos no visível e o *Pinus* sp., no infravermelho próximo, enquanto a borda do vermelho registrou médias praticamente idênticas entre os dois grupos. Nenhuma banda, isoladamente, separa os dois grupos: a distância de Jeffries-Matusita ficou abaixo de 0,9 em todas elas, com o maior valor no azul e o menor na borda do vermelho.

A combinação de bandas espectrais, índices de vegetação e métricas de textura, processada por Random Forest, classificou a área com acurácia global de 92,8% e índice Kappa de 0,892, ainda que nenhuma banda isolada apresentasse separabilidade entre os grupos. O *Pinus* sp. ocupou 1,187 ha, o equivalente a 10,66% da área analisada, distribuído de forma pontual. A classe apresentou o menor F-score entre as cinco mapeadas (0,856), com a confusão concentrada em relação à vegetação nativa.

Do ponto de vista prático, a abordagem permite localizar e quantificar a ocorrência de *Pinus* sp. em áreas de regeneração natural, o que pode subsidiar o planejamento de ações de controle em unidades de conservação.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) pela concessão de bolsa de doutorado, modalidade Demanda Social (Código de Financiamento 001), e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento

Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro à pesquisa.

REFERÊNCIAS

- ABDOLLAHNEJAD, A.; PANAGIOTIDIS, D. Tree species classification and health status assessment for a mixed broadleaf-conifer forest with UAS multispectral imaging. **Remote Sensing**, v.12, n.22, p.3722, 2020. <https://doi.org/10.3390/rs12223722>
- AL-SHAMMARI, D. et al. Assessment of red-edge based vegetation indices for crop yield prediction at the field scale across large regions in Australia. **European Journal of Agronomy**, v.164, p.127479, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2024.127479>
- ALVARES, C.A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, n.6, p.711-728, 2013. <https://doi.org/10.1127/0941-2948/2013/0507>
- APOSTOL, B. et al. Species discrimination and individual tree detection for predicting main dendrometric characteristics in mixed temperate forests by use of airborne laser scanning and ultra-high-resolution imagery. **Science of The Total Environment**, v.698, p.134074, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134074>
- ATAÍDE, M.V.R. et al. Monitoring invasive exotic grass species in ecological restoration areas of the Brazilian savanna using UAV images. **Remote Sensing Applications: Society and Environment**, v.36, p.101328, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2024.101328>
- ATHERTON, J. et al. Spatial variation of leaf optical properties in a boreal forest is influenced by species and light environment. **Frontiers in Plant Science**, v.8, p.309, 2017. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.00309>
- BRAVO-VARGAS, V. et al. Do people care about pine invasions? Visitor perceptions and willingness to pay for pine control in a protected area. **Journal of Environmental Management**, v.229, p.57-66, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.07.018>
- COLE, B. et al. Spectral monitoring of moorland plant phenology to identify a temporal window for hyperspectral remote sensing of peatland. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v.90, p.49-58, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.01.010>
- DAMIANI, M.L.; BRANCATELLI, G.I.E.; ZALBA, S.M. Detection of potential plant invaders and prevention priorities for a nature reserve in the Southern Pampas, Argentina. **Journal for Nature Conservation**, v.87, p.127006, 2025. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2025.127006>

DI GENNARO, S.F. et al. Spectral comparison of UAV-based hyper and multispectral cameras for precision viticulture. **Remote Sensing**, v.14, n.3, p.449, 2022. <https://doi.org/10.3390/rs14030449>

EITEL, J.U. et al. Broadband, red-edge information from satellites improves early stress detection in a New Mexico conifer woodland. **Remote Sensing of Environment**, v.115, n.12, p.3640-3646, 2011. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2011.09.002>

FERREIRA, G.A. et al. Solution for diagnostics of biological invasion in terrestrial ecosystems: how can deep learning help biodiversity conservation? **Journal for Nature Conservation**, v.89, 2026. <https://doi.org/10.1016/j.jnc.2025.127066>

FIGUEIREDO, A.L.C.B. et al. Baseline data and recommendations to decrease the introduction and spread of invasive non-native species in federal and state protected areas in Brazil. **Biological Invasions**, v.26, p.4283-4299, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10530-024-03446-8>

GONÇALVES, V.P.; RIBEIRO, E.A.W.; IMAI, N.N. Mapping areas invaded by Pinus sp. from Geographic Object-Based Image Analysis (GEOBIA) applied on RPAS (drone) color images. **Remote Sensing**, v.14, n.12, p.2805, 2022. <https://doi.org/10.3390/rs14122805>

IBÁ. **Relatório IBÁ 2025: ano base 2024**. Brasília: Indústria Brasileira de Árvores, 2025.

IBGE. **Manual técnico da vegetação brasileira**. Rio de Janeiro: Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1992.

LEAL-MEDINA, C. et al. Post-fire Pinus radiata invasion in a threatened biodiversity hotspot forest: a multi-scale remote sensing assessment. **Forest Ecology and Management**, v.561, p.121861, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2024.121861>

LUAN, Q. et al. Estimating canopy chlorophyll in slash pine using multitemporal vegetation indices from uncrewed aerial vehicles (UAVs). **Precision Agriculture**, v.25, n.2, p.1086-1105, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11119-023-10106-9>

MOURA, M.M. et al. Towards Amazon forest restoration: automatic detection of species from UAV imagery. **Remote Sensing**, v.13, n.13, p.2627, 2021. <https://doi.org/10.3390/rs13132627>

MUSUNGU, K. et al. Using UAV multispectral photography to discriminate plant species in a seep wetland of the Fynbos Biome. **Wetlands Ecology and Management**, v.32, n.2, p.207-227, 2024. <https://doi.org/10.1007/s11273-023-09971-y>

NEUWIRTHOVÁ, E.; LHOTÁKOVÁ, Z.; ALBRECHTOVÁ, J. The effect of leaf stacking on leaf reflectance and vegetation indices

measured by contact probe during the season. **Sensors**, v.17, n.6, p.1202, 2017. <https://doi.org/10.3390/s17061202>

PARANÁ. Decreto nº 7.854, de 6 de novembro de 2024. **Diário Oficial do Estado do Paraná**, n.11783, Curitiba, 2024.

RAUTIAINEN, M. et al. Spectral properties of coniferous forests: a review of in situ and laboratory measurements. **Remote Sensing**, v.10, n.2, p.207, 2018. <https://doi.org/10.3390/rs10020207>

SHIBAYAMA, M. et al. Detecting phenophases of subarctic shrub canopies by using automated reflectance measurements. **Remote Sensing of Environment**, v.67, n.2, p.160-180, 1999. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(98\)00082-0](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(98)00082-0)

SIMEPAR – SISTEMA DE TECNOLOGIA E MONITORAMENTO AMBIENTAL DO PARANÁ. Gráficos da Estação [Pinhais]. [Curitiba]: SIMEPAR, 2025. Disponível em: https://www.simepar.org/simepar/dados_estacoes/. Acesso em: 30/07/2026

VARNAGIRYTĖ-KABAŠINSKIENĖ, I.; SURVILA, G. Evaluation of aboveground biomass, carbon, and nutrient allocation in Pinus sylvestris stands following deep soil ploughing. **Journal of Forestry Research**, v.36, n.1, p.73, 2025. <https://doi.org/10.1007/s11676-025-01874-3>

XU, K.; YE, H. Light scattering in stacked mesophyll cells results in similarity characteristic of solar spectral reflectance and transmittance of natural leaves. **Scientific Reports**, v.13, p.4694, 2023. <https://doi.org/10.1038/s41598-023-31718-1>

XU, Z. et al. Tree species classification using UAS-based digital aerial photogrammetry point clouds and multispectral imageries in subtropical natural forests. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v.92, p.102173, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102173>