MAPEAMENTO DE CAMPOS NATIVOS ATRAVÉS DA CLASSIFICAÇÃO DE IMAGENS SENTINEL UTILIZANDO *SUPPORT VECTOR MACHINE*

Regina Luiza Gouvea [1]
Carlos Antonio Oliveira Vieira [2]
Kleber Trabaquini[3]

[1] Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI); Florianópolis, Santa Catarina – E-mail: reginagouvea@epagri.sc.gov.br ORCID: https://orcid.org/orcid-search/search?searchQuery=0000-0002-9110-2146
[2] Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC); Florianópolis, Santa Catarina – E-mail: carlos.vieira@ufsc.br ORCID: https://orcid.org/orcid-search/search?searchQuery=0000-0003-4047-8466
[3] Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI); Florianópolis, Santa Catarina – E-mail: klebertrabaquini@epagri.sc.gov.br ORCID: https://orcid.org/orcid-search/search?searchQuery=0000-0003-4902-4735

RESUMO EXPANDIDO

A discriminação entre pastagens nativas e cultivadas representa um desafio em estudos de uso e cobertura da terra, devido à elevada similaridade espectral entre essas formações ao longo do ano. No entanto, evidências empíricas obtidas no âmbito do projeto 'Sensoriamento Remoto Aplicado ao Mapeamento e Monitoramento da Pastagem Catarinense para Identificação de Níveis de Biomassa e Degradação indicam', mostram maior separabilidade sazonal, especialmente no inverno. Além disso, a recorrente cobertura de nuvens limita o uso de dados ópticos em determinados períodos, como na estação de verão no Planalto Sul catarinense, dificultando análises contínuas da vegetação. Nesse contexto, a integração de dados *Synthetic Aperture Radar* (SAR), Sentinel-1 e dados ópiticos do Sentinel-2 pode se mostrar uma alternativa eficiente para melhorar a discriminação de classes de cobertura da terra.

O Sentinel-1, operando na banda C apresenta a vantagem de operar independente das condições atmosféricas, por ser um sensor ativo (Jesus e Kuplich, 2021), enquanto o Sentinel-2 fornece informações espectrais detalhadas relacionadas às propriedades biofísicas e espectrais da vegetação (Soubry e Guo, 2021). Estudos demonstram que a combinação desses sensores apresenta o potencial para melhorar o desempenho da classificação em ambientes, especialmente onde há alta similaridade espectral entre classes e onde a interferência atmosférica causada pela cobertura de nuvens pode resultar em confusão espectral e diminuição da usabilidade dos dados multiespectrais (Felegari et al., 2021; Silva et al., 2021; Nabil et al., 2022; Pratama et al., 2024).

O uso de dados SAR em estudos de uso e cobertura da terra é bem documentado, sendo sua aplicação relevante em ambientes com cobertura frequente de nuvens. A evolução do imageamento SAR para mapeamento de uso e cobertura vem apresentando resultados promissores por não possuir

influência direta da atmosfera e da cobertura de nuvens, favorecendo a análise de mudança ao longo do tempo (Barbosa, 2021). No entanto, a interpretação dos sinais de radar pode ser complexa devido à interação entre a radiação eletromagnética e as características estruturais da vegetação e do terreno, o que ainda representa um desafio metodológico (Caballero et al., 2023).

A utilização de métricas estatísticas de separabilidade, como a distância de Jeffries–Matusita, aliada a algoritmos de aprendizado de máquina, permite avaliar o potencial discriminatório entre classes de cobertura da terra de forma mais robusta (Crabbe et al., 2020). Dessa forma, este estudo tem como objetivo identificar a janela temporal com maior potencial de separabilidade espectral para discriminação de campos nativos no Planalto Sul catarinense e avaliar o desempenho de classificadores SVM utilizando bandas espectrais, índices de vegetação e integração entre dados ópticos e SAR derivados dos sensores Sentinel-1 e Sentinel-2.

MATERIAIS E MÉTODOS

ÁREA DE ESTUDO

O Planalto Sul catarinense, está localizado na porção centro-sul do estado de Santa Catarina (Figura 1). Os campos nativos de Santa Catarina estão localizados no domínio da Estepe localizado entre o Cerrado e Pampas sul-americanos (IBGE, 2012). De acordo com Andrade et al., (2016), os campos de altitude do Planalto Sul Catarinense integram o sistema de *highland grasslands* do sul do Brasil, situando-se no extremo meridional do bioma Mata Atlântica e apresentando distribuição fragmentada associada a condições altitudinais, climáticas e edáficas específicas, sendo considerados ecossistemas naturais e antigos.

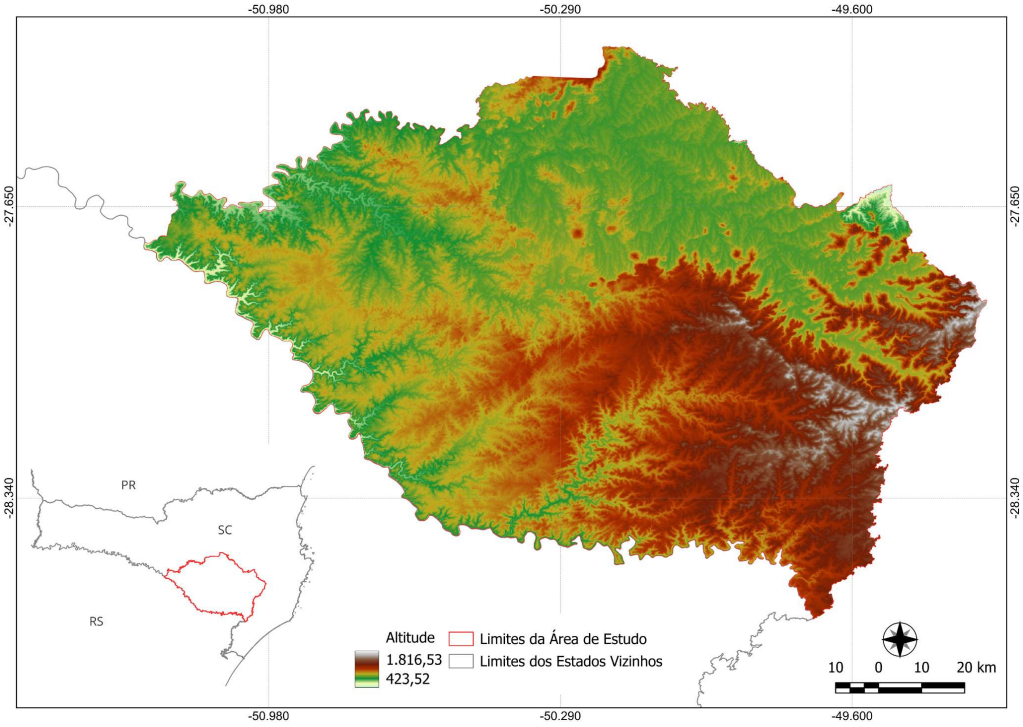


Figura 1. Mapa de localização da área de estudo. Fonte: Autores (2026)

Separabilidade Espectral

Para superar limitações de disponibilidade de imagens ópticas devido à cobertura de nuvens, foi realizado um estudo sazonal de separabilidade espectral entre pastagens nativas e cultivadas. A análise teve como objetivo identificar os períodos com maior distinção espectral entre as classes, considerando a variabilidade fenológica da vegetação. Segundo Crabbe et al., (2020), a combinação entre métricas estatísticas de separabilidade e desempenho de classificação permite uma avaliação mais consistente da distinção entre classes, sendo amplamente utilizada em estudos de análise de uso e cobertura da terra.

A separabilidade foi quantificada por meio da distância de Jeffries–Matusita, baseada nas médias e variâncias das classes analisadas. Complementarmente, foi utilizado o classificador *Random Forest* com validação cruzada do tipo *k*-fold (k = 5), com 50 árvores no *ensemble*, para avaliar o desempenho da discriminação entre classes em diferentes períodos.

Teste de Signifiância

A significância estatística da classificação foi avaliada por meio do *teste Z* estatístico aplicado aos coeficientes Kappa (K_1), individualmente, assumindo a hipótese nula H_0: $K_1 = 0$, e a hipótese alternativa H_1: $K_1 \neq 0$. O valor calculado de Z (Z_{cal}) foi comparado ao valor crítico do teste Z bicaudal (Z_{tab}). Para um nível de confiança de 95%, o valor crítico tabelado é de 1,96. Assim, quando $Z_{cal} \geq 1{,}96$, rejeita-se H_0, indicando que a classificação é estatisticamente significativa e apresenta desempenho superior a uma classificação aleatória. O *teste Z* estatístico também pode ser aplicado para comparar diferentes classificadores Kappa (K_1) e Kappa (K_2) assumindo a hipótese nula H_0: $K_1 - K_2 = 0$, e a hipótese alternativa H_1: $K_1 - K_2 \neq 0$. Neste caso, quando $Z_{cal} \geq 1{,}96$, rejeita-se H_0, indicando que a classificação apresenta uma performance estatisticamente diferente, optando pela classificação com maior Kappa, ou aceita H_0 e assume-se que as classificações não se diferenciam estatisticamente.

Aquisição e Processaemnto de Dados

Foram utilizados 50 polígonos por classe, definidos por interpretação visual, com geração de pontos amostrais aleatórios para treinamento e validação.

Para discriminar pastagem nativa, pastagem cultivada e vegetação densa, foram utilizadas imagens Sentinel-2 e Sentinel-1 referentes ao mês de julho e agosto de 2025. A tabela 1 apresenta as classes de interesse, código correspondente e descrição.

Tabela 1. Classes de uso e cobertura da terra definidas para o treinamento e classificação supervisionada.

Classe	*Código*	*Descrição*
Pastagem Cultivada	0	Áreas de cultivos de verão e inverno, incluindo, associadas ou não às forrageiras para pastoreio.
Pastagem Nativa	1	Áreas de pastagens, naturais ou melhoradas, vinculadas ou não à atividade agropecuária.
Vegetação Densa	2	Áreas de florestas nativas ou plantadas e cultivo perene.

As imagens Sentinel-2 foram processadas com composição mediana e filtragem de nuvens, enquanto os dados Sentinel-1 foram utilizados nas polarizações VV e VH, no modo IW e métrica de textura. Além das bandas espectrais e SAR, foram incorporados índices espectrais e variáveis derivadas, incluindo NDVI, NDWI, NDBI, MNDWI, EVI, SAVI, BSI, NDRE e GCI.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados da análise sazonal indicaram variação na separabilidade entre pastagens nativas e cultivadas ao longo do ano. Observa-se maior distinção espectral durante o inverno, enquanto no verão ocorre maior sobreposição entre as classes, dificultando a discriminação, conforme mostra Figura 2.

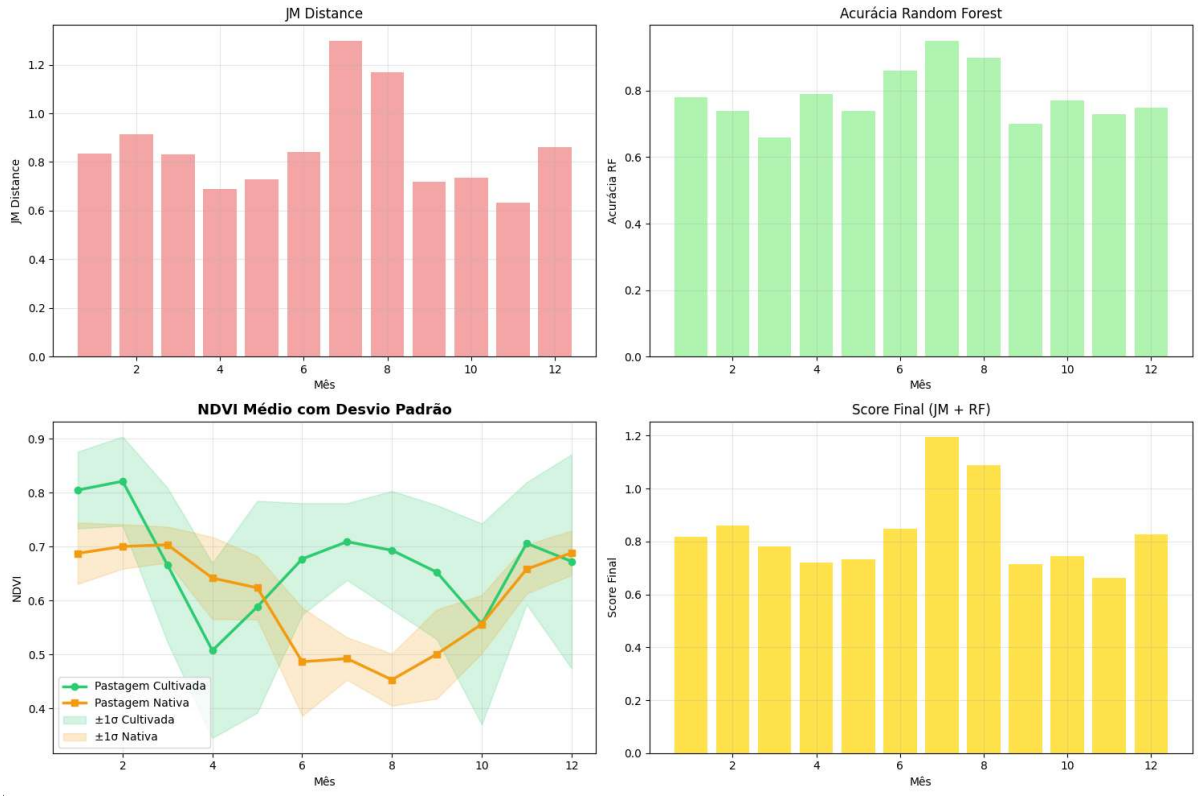


Figura 2. Avaliação sazonal da separabilidade entre pastagens nativas e cultivadas utilizando distância Jeffries-Matusita, acurácia Random Forest e NDVI.

A estação do inverno apresenta maior capacidade de discriminação entre pastagens nativas e cultivadas em imagens ópticas do Sentinel-2, em função da maior distinção espectral entre essas formações nesse período. No entanto, os resultados obtidos a partir da distância de Jeffries–Matusita (JM) e da acurácia do classificador Random Forest demonstram que a identificação de janelas temporais ótimas permite refinar a separação entre as classes ao longo do ano, mesmo fora do período sazonal mais favorável.

Com base nesses resultados, o mês de julho de 2025, seguido do mês de agosto de 2025, foram selecionados como a melhor janela temporal para a classificação de pastagens nativas e cultivadas.

A Tabela 2 apresenta a Matriz de Significância, comparando o desempenho das classificações supervisionadas de pastagens nativas e cultivadas, com diferentes combinações de variáveis preditoras. Essa matriz de significância também apresenta os valores de Kappa e sua variância, para cada estratégia de classificação.

Tabela 1. Matriz de Significância

Classificadores	***Apenas Sentinel-2***	***S2 + Índices de Vegetação***	***S2 + Sentinel-1 (SAR)***
Kappa	0.490400	0.522700	0.541000
VAR	0.001840	0.001917	0.001877
Apenas Sentinel-2	11.433		
S2 + Índices de Vegetação	0.527	11.938	
S2 + Sentinel-1 (SAR)	0.830	0.297	12.487

Crabbe, Lamb e Edwards (2020) avaliaram diferentes classificadores para analisar a eficácia das características dos sensores Sentinel-1 e Sentinel-2, isoladamente e em combinação, na discriminação de diferentes tipos de composição de pastagens. Os resultados deste estudo indicam diferenças de desempenho entre os cenários de classificação, evidenciando que a integração entre dados ópticos (Sentinel-2) e SAR (Sentinel-1) resulta em maior acurácia na discriminação entre pastagens nativas e cultivadas.

Segundo Barbosa et al. (2021), abordagens baseadas apenas em dados ópticos podem ser limitadas em determinadas condições ambientais, reforçando a importância da integração com dados SAR. Neste estudo, a incorporação de índices de vegetação e dados Sentinel-1 (SAR) resultou em aumentos nos coeficientes Kappa em relação ao uso exclusivo das bandas Sentinel-2. O maior desempenho foi observado no classificador que combinou dados ópticos e SAR (κ=0,5410), seguido pelo modelo com índices de vegetação (κ=0,5227) e pelo modelo utilizando apenas Sentinel-2 (κ=0,4904). Contudo, embora esta seja uma abordagem utilizada para mitigar limitações associadas à cobertura de nuvens, garantindo maior consistência na classificação e ampliando a disponibilidade de dados, os resultados da matriz de significância mostram que os classificadores não possuem performances estatisticamente diferentes entre si. Isso pode ser observado nos resultados do teste de significância em que os valores da diagonal, valores Z_{cal}, foram utilizados para verificar se cada classificador individualmente é melhor do que uma classificação ao acaso (aleatória). Como todos os classificadores apresentaram valores de Z_{cal} maiores do que o Z_{tab} = 1,96, os resultados são estatisticamente significantes e melhores do que uma classificação aleatória.

Os valores fora da diagonal, representam os valores de Z_{cal} da comparação entre pares de classificadores, a fim de avaliar se um classificador realmente apresentou um desempenho melhor

do que o outro. Embora pareça natural concluir que o uso de imagens do Sentinel-2 integrados aos dados SAR, apresentou o melhor resultado individualmente, o teste Z estatístico mostra que não existem diferenças estatisticamente significantes em relação às performances dos classificadores utilizados.

CONCLUSÕES

A análise conjunta de respostas espectrais e informações relacionadas à estrutura da vegetação, por meio de métricas de separabilidade espectral, mostrou potencial para o aprimoramento da discriminação de pastagens nativas no Planalto Sul catarinense. Os resultados da distância de Jeffries–Matusita e da análise por Random Forest permitiram identificar a janela temporal com maior potencial discriminatório entre as classes avaliadas, evidenciando a importância da sazonalidade na resposta espectral da vegetação. Além disso, a incorporação de índices de vegetação e dados SAR do Sentinel-1 contribuiu para o aumento dos coeficientes Kappa em relação ao uso exclusivo das bandas ópticas do Sentinel-2, com melhor desempenho observado na integração entre dados ópticos e SAR. Contudo, apesar dos ganhos observados, o teste estatístico Z indicou que não houve diferenças estatisticamente significativas entre os classificadores avaliados. Ainda assim, em regiões ou períodos com elevada cobertura de nuvens, a integração de dados ópticos e SAR representa uma alternativa relevante para ampliar a disponibilidade de dados e apoiar aplicações em sensoriamento remoto.

PALAVRAS-CHAVE

Sensoriamento remoto; Separabilidade espectral; Support Vector Machine; Sentinel-1; Sentinel-2

AGRADECIMENTOS

O presente trabalho foi desenvolvido com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC), que financiou a pesquisa e concedeu bolsa de estudo a um dos autores. Os autores também agradecem à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) e à Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI) pelo suporte institucional, orientação científica e infraestrutura disponibilizada para a execução dos projetos.

REFERÊNCIAS

Andrade, B. O., Bonilha, C. L., BOLDRINI, I. I., & Overbeck, G. E. (2016). Highland grasslands at the southern tip of the Atlantic Forest biome: management options and conservation challenges. Oecologia Australis.

Barbosa, F. L. R., Guimarães, R. F., Carvalho Júnior, O. A. D., & Gomes, R. A. T. (2021). Classificação do uso e cobertura da terra utilizando imagens SAR/Sentinel 1 no Distrito Federal, Brasil. *Sociedade & Natureza*, 33.

Caballero, G., Pezzola, A., Winschel, C., Sanchez Angonova, P., Casella, A., Orden, L., ... & Verrelst, J. (2023). Synergy of Sentinel-1 and Sentinel-2 time series for cloud-free

vegetation water content mapping with multi-output Gaussian processes. *Remote Sensing*, 15(7), 1822.

Crabbe, R. A., Lamb, D., & Edwards, C. (2020). Discrimination of species composition types of a grazed pasture landscape using Sentinel-1 and Sentinel-2 data. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 84, 101978.

Felegari, S., Sharifi, A., Moravej, K., Amin, M., Golchin, A., Muzirafuti, A., ... & Zhao, N. (2021). Integration of Sentinel 1 and Sentinel 2 satellite images for crop mapping. *Applied Sciences*, 11(21), 10104.

IBGE. Manual técnico da vegetação brasileira: sistema fitogeográfico, inventário das formações florestais e campestres, técnicas e manejo de coleções botânicas, procedimentos para mapeamentos. 2. ed. rev. e ampl. Rio de Janeiro: IBGE, 2012. 272 p.

Jesus, J. B. D., & Kuplich, T. M. (2021). Utilização de imagens SAR na classificação de formações florestais brasileiras. *Ciência Florestal*, 31(3), 1547-1568.

Nabil, M., Farg, E., Arafat, S. M., Aboelghar, M., Afify, N. M., & Elsharkawy, M. M. (2022). Tree-fruits crop type mapping from Sentinel-1 and Sentinel-2 data integration in Egypt's New Delta project. Remote Sensing Applications: *Society and Environment*, 27, 100776.

Pratama, B. A. S., Danoedoro, P., & Arjasakusuma, S. (2024). Exploring optimal integration schemes for Sentinel-1 SAR and Sentinel-2 multispectral data in land cover mapping across different atmospheric conditions. Remote Sensing Applications: *Society and Environment*, 34, 101185.

Soubry, I., & Guo, X. (2021). Identification of the optimal season and spectral regions for shrub cover estimation in grasslands. *Sensors*, 21(9), 3098.