USO DE SENSORES HIPERESPECTRAIS NA MODELAGEM DE PREDIÇÃO DE CARBONO ORGÂNICO DO SOLO: A NÍVEL ORBITAL E TERRESTRE

Dheynne Heyre Silva de Matos (PIBIC/CNPq/FA/UEM), Marcelo Luiz Chicati (Orientador). E-mail: mlchicati@uem.br

Universidade Estadual de Maringá, Centro de Ciências Agrárias, Maringá, PR.

Área e subárea do conhecimento: Agronomia / Sensoriamento Remoto.

Palavras-chave: Espectroscopia de reflectância; Aprendizado de máquina; Transferibilidade espectral.

RESUMO

A matéria orgânica do solo (MOS) é indicador central da qualidade e da fertilidade dos solos agrícolas, e a espectroscopia de reflectância com sensores hiperespectrais é uma alternativa rápida e não destrutiva à análise química convencional. Este trabalho teve como objetivo calibrar modelos de aprendizado de máquina para predição da MOS a partir de espectros do sensor aerotransportado AisaFENIX e avaliar a transferência dessa calibração para o satélite orbital PRISMA. O estudo foi conduzido em experimento de longa duração na fazenda experimental da COAMO, em Campo Mourão-PR, com 384 amostras (MOS entre 23 e 43 g kg^{-1}) coletadas em oito profundidades de 0 a 40 cm. Os espectros VIS-NIR-SWIR, pré-processados por Standard Normal Variate (SNV), alimentaram seis modelos (Random Forest, PLSR, SVR, PCR, Ridge e Elastic Net), validados por parcela para evitar pseudorreplicação. O melhor desempenho foi do Random Forest (R^2 = 0,549; RMSE = 4,23 g kg^{-1}; RPD = 1,49). Conclui-se que a calibração da MOS com dados do AisaFENIX é viável, mas sua transferência direta para o PRISMA ainda não é confiável, evidenciando a necessidade de harmonização radiométrica entre os níveis de aquisição antes de aplicações operacionais em sensoriamento remoto orbital.

INTRODUÇÃO

O monitoramento da matéria orgânica do solo (MOS) é fundamental para o manejo sustentável de sistemas agrícolas, influenciando atributos químicos, físicos e biológicos do solo (Frare et al., 2023). Sua quantificação tradicional (calcinação, Walkley-Black, análise elementar) é precisa, porém cara, demorada e geradora de resíduos tóxicos. Técnicas espectroscópicas surgem como alternativa rápida, de baixo custo e não destrutiva, capaz de caracterizar múltiplas propriedades do solo simultaneamente (Lima et al., 2025).

O sensor hiperespectral aerotransportado AisaFENIX (SPECIM) cobre 624 bandas entre 380–2500 nm (VIS-NIR-SWIR) e é amplamente usado na calibração de modelos preditivos de atributos do solo (Furlanetto et al., 2017). Sensores orbitais como o PRISMA ampliam a escala de aplicação, mas diferenças de resolução espectral, geometria de aquisição e condições atmosféricas podem comprometer a compatibilidade direta com dados aéreos (Vicente et al., 2023), permanecendo

incerto se um modelo calibrado com AisaFENIX pode ser aplicado a espectros PRISMA sem harmonização radiométrica adicional.

Assim, este trabalho teve como objetivo calibrar e comparar modelos de aprendizado de máquina para predição da MOS a partir de espectros do AisaFENIX, avaliando a viabilidade da transferência direta dessa calibração para o sensor orbital PRISMA.

MATERIAIS E MÉTODOS

A coleta foi realizada na fazenda experimental da COAMO Cooperativa Agroindustrial, em Campo Mourão-PR (24°05'41,6"S; 52°21'31,5"W), em Latossolo Vermelho Distroférrico de textura argilosa (EMBRAPA, 2018).

As amostras integram um experimento de longa duração entre a Embrapa e a COAMO, instalado em 1985, com 12 tratamentos de sucessão de culturas na sequência inverno/verão e quatro ciclos experimentais entre 2009 e 2020. A coleta ocorreu no ciclo 3 (março/2019), antes do plantio de inverno, com trado calador, em oito profundidades estratificadas de 5 em 5 cm (0-40 cm), resultando em n=384 (12 tratamentos x 4 repetições x 8 profundidades).

Análises químicas

O material passou por beneficiamento físico (secagem, moagem, peneiramento em 2 mm) e foi dividido em duas partes: sensoriamento espectral e química. O Carbono Orgânico foi quantificado por colorimetria (Raij et al., 2001; filtro de 650 nm), e a MOS (%) obtida pelo fator de Van Bemmelen (1,724).

Análise espectral

O processamento radiométrico foi realizado no ENVI Classic 5.3, com algoritmos do fabricante AisaFENIX, convertendo os dados brutos em radiância (arquivos .cal, .hdr e .LUT) e em reflectância via Scan Normalization. Foram delimitadas 48 ROIs elípticas sobre cada placa de Petri (aprox. 1.500 pixels cada), com a assinatura espectral de cada amostra obtida pela média aritmética dos pixels. Para a comparação orbital, foram extraídos os espectros correspondentes do PRISMA (VIS-NIR-SWIR) nas mesmas áreas amostrais.

Pré-processamento e modelagem

Os espectros foram pré-processados por Standard Normal Variate (SNV). Foram calibrados seis modelos: Random Forest, PLSR (referência), SVR (RBF), PCR+regressão linear, Ridge e Elastic Net (Tabela 1), validados por parcela (bandeja+tratamento) para evitar pseudorreplicação. O desempenho foi avaliado por R^2, RMSE e RPD, e o sobreajuste pela diferença entre R^2 de treino e de validação (Tabela 1). Por fim, os modelos calibrados no AisaFENIX foram aplicados à assinatura espectral do PRISMA, testando a transferibilidade entre sensores (Tabela 2).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Comparação espectral entre AisaFENIX e PRISMA

As curvas espectrais médias dos dois sensores (Figura 1a) seguem o mesmo padrão geral de resposta do solo, com bandas de absorção da água próximas de 950, 1150, 1400 e 1900 nm. A reflectância do PRISMA é, porém, sistematicamente superior à do AisaFENIX em quase toda a faixa, sobretudo entre 700-1300 nm,

indicando diferenças de calibração radiométrica, resolução espectral e/ou correção atmosférica entre plataformas.

A dispersão ponto a ponto (Figura 1b) confirma isso: a reta ajustada (y = 1,8827x - 0,0009) mostra que o PRISMA reflete, em média, quase o dobro do AisaFENIX, e o R^2 = 0,4839 indica correlação apenas moderada. O padrão em laço, sobretudo acima de 0,14, evidencia relação não linear, dificultando a correção direta banda a banda.

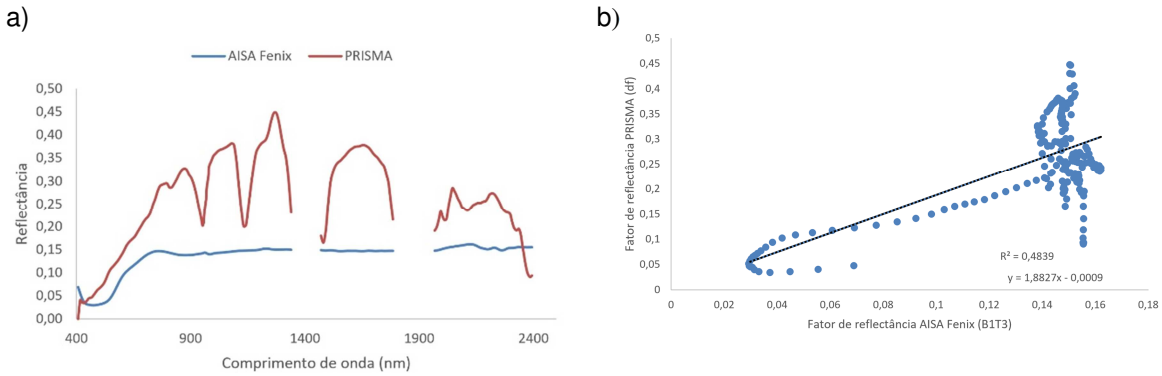


Figura 1. a) Curvas médias de reflectância dos sensores AISA Fenix (B1T3) e PRISMA (df) no VIS-NIR-SWIR. b) Dispersão entre os fatores de reflectância dos dois sensores, com reta de ajuste e R^2.

Desempenho dos modelos de predição da MOS

Os seis modelos calibrados com dados do AisaFENIX apresentaram desempenho semelhante na validação por parcela, com R^2 entre 0,491 e 0,549 e RPD entre 1,40 e 1,49 (Tabela 2). O Random Forest teve o melhor ajuste (0,549), porém o maior sobreajuste (0,392; Tabela 1), enquanto o PLSR obteve desempenho muito próximo com sobreajuste bem menor (0,076), sendo alternativa mais parcimoniosa. RPD entre 1,4 e 1,5 indica capacidade preditiva apenas aproximada, suficiente para distinguir classes gerais de MOS.

Tabela 1. Modelos avaliados, hiperparâmetros otimizados e grau de sobreajuste (overfitting) na predição da matéria orgânica do solo.

Modelo	Hiperparâmetros	Overfitting[1]
Random Forest	max_depth=None; max_features=sqrt	0,392
PLSR (ref.)	n_components=8	0,076
SVR (RBF)	C=100; ε=0,1; γ=0,001	0,104
PCR + Reg. Linear	n_components=12	0,052
Ridge	α=1,0	0,159
Elastic Net	α=0,001; l1_ratio=0,2	0,203

[1]Overfitting = R^2 treino − R^2 validação por parcela (maior valor = maior memorização das amostras de treino).

Tabela 2. Parâmetros de desempenho dos modelos e valores previstos para a mesma curva espectral do PRISMA.

Modelo	R^2 (parcela)[2]	RMSE (g kg^{-1})	RPD	Predição PRISMA[3] (g kg^{-1})
Random Forest	0,549	4,23	1,49	31,0
PLSR (ref.)	0,528	4,33	1,46	-16,6
SVR (RBF)	0,527	4,33	1,46	33,7
PCR + Reg. Linear	0,525	4,35	1,45	-26,4
Ridge	0,505	4,44	1,42	-52,7
Elastic Net	0,491	4,50	1,40	-160,3

[2]Validação por grupo (parcela). [3]MOS (g kg^{-1}) estimada pelo modelo do AISA aplicado à curva do PRISMA; valores negativos são impossíveis.

Transferência da calibração AisaFENIX→PRISMA

A aplicação dos modelos calibrados no AisaFENIX à curva espectral do PRISMA gerou predições implausíveis, inclusive negativas (Tabela 2). Como a reflectância do PRISMA é sistematicamente maior e não linear em relação à do AisaFENIX, os modelos interpretam esse deslocamento como variação real de matéria orgânica. Os modelos lineares com muitos coeficientes (Elastic Net, Ridge) foram os mais sensíveis; o Random Forest, por usar limiares, ficou mais próximo da faixa plausível, sem ser confiável. Isso mostra que a calibração de um sensor aerotransportado não pode ser transferida a um orbital sem harmonização radiométrica prévia (Francos et al., 2023).

CONCLUSÕES

A calibração de modelos de aprendizado de máquina para predição da MOS a partir de espectros do AisaFENIX mostrou-se viável ($R^2 \approx 0,5$; RPD ≈ 1,5), destacando-se o PLSR como alternativa mais estável e menos sujeita a sobreajuste que o Random Forest. Já a transferência direta para o PRISMA não se mostrou confiável: a baixa compatibilidade radiométrica gerou predições fora da faixa real de MOS, incluindo valores negativos. Recomenda-se harmonizar radiometricamente as plataformas aérea e orbital antes do uso operacional do PRISMA na predição de atributos do solo.

AGRADECIMENTOS

Ao PIBIC/CNPq-FA-UEM e à Fundação Araucária, pelo financiamento da bolsa; à Universidade Estadual de Maringá e ao Departamento de Agronomia, pela infraestrutura; e ao grupo de pesquisa GALeS, pelo apoio.

REFERÊNCIAS

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA (EMBRAPA). Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 5. ed. Brasília, DF: Embrapa, 2018.

RAIJ, B. van et al. Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas: Instituto Agronômico, 2001.

LIMA, A. A. J. et al. Soil organic carbon assessment using remote-sensing data and machine learning: a systematic literature review. Remote Sensing, v. 17, n. 5, p. 882, 2025.

VICENTE, L. E. et al. Imagens hiperespectrais do sensor PRISMA na detecção de argilominerais em solos tropicais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 20., 2023, Florianópolis. Anais [...]. [S. l.]: INPE, 2023.

FURLANETTO, R. H. et al. Comportamento espectral de diferentes tipos de vegetações obtido pelo sensor hiperespectral AisaFENIX em aerolevantamento. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 18. (SBSR), 2017, Santos. Anais... Santos: INPE, 2017. p. 2876-2883.

FRANCOS, N. et al. A spectral transfer function to harmonize existing soil spectral libraries generated by different protocols. Applied and Environmental Soil Science, v.

2023, art. 4155390, 2023. DOI: 10.1155/2023/4155390.