

## **Estabelecimento de zonas de manejo a partir da resposta espectral do solo relacionada ao teor de matéria orgânica**

José Lucas Safanelli<sup>1</sup>  
Bruno Felipe Bottega Boesing<sup>1</sup>  
Eduardo Leonel Bottega<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC, campus Curitibanos/SC  
Caixa Postal 101 - 895206-000 - Curitibanos - SC, Brasil  
zecojs@gmail.com, brunofellipebb@gmail.com, eduardo.bottega@ufsc.br

**Abstract.** The spectral response of the soil is associated with their constituents, among which stands out the organic matter content. This constituent is considered an indicator of the quality of the soil, and the variation in their levels can be used for identifying the spatial variability. The aim of this study was to investigate the potential of diffuse reflectance spectroscopy of soil as a tool for delineation of site-specific management zones, based on organic matter content. In a cropping area located in Curitibanos-SC, 50 georeferenced soil sample points spaced in 50 m were collected for granulometry, chemical and radiometric determination. Soil organic matter and soil radiometric data were analyzed using descriptive statistics, Pearson's correlation and analysis of spatial variability for delineation of site-specific management zones. The kappa coefficient was used to assess the agreement between the maps of site-specific management zones using wavelength intervals of soil reflectance and the soil organic matter content. The organic matter had a masking effect of the soil's albedo. The wavelength range of 700-720 nm showed a significant correlation ( $p < 0,01$ ) with organic matter content (-0.395), also obtaining a kappa coefficient of 0.46 when established two site-specific management zones. This region of the electromagnetic spectrum had a considerable relation to soil organic matter.

**Palavras-chave:** diffuse reflectance spectroscopy, site-specific management zone, precision agriculture, espectroscopia de reflectância difusa, zonas de manejo específico, agricultura de precisão.

## 1. Introdução

As análises de atributos do solo são cada vez mais relevantes e demandados nos sistemas de produção agropecuários. A demanda crescente por informação faz com que o tempo de obtenção de dados e o custo sejam fatores determinantes na escolha do método de análise. Por isso, a busca por métodos mais rápidos e menos onerosos é essencial (Cezar et al., 2013), principalmente nos sistemas de agricultura de precisão, os quais requerem uma enorme quantidade de dados temporais e espaciais. Métodos de análise que consideram a resposta espectral do solo têm sido propostos por fornecerem resultados adequados pela agilidade e precisão (Pirie et al., 2005).

O método que utiliza a reflectância do solo como parâmetro de obtenção de dados se chama Espectroscopia de Reflectância Difusa (ERD). Com base no comprimento de onda do visível, infravermelho próximo e infravermelho médio, é gerada a assinatura espectral do solo. Essa assinatura corresponde a variação de absorção e reflectância de energia eletromagnética por parte dos componentes do solo em diferentes faixas do espectro (Nanni e Demattê, 2006). A ERD permite determinar indiretamente diversas características químicas e físicas do solo, como granulometria, pH, óxidos de ferro, carbono orgânico, etc, utilizando modelagem radiométrica (Cezar et al., 2013; Pirie et al., 2005). Além disso, a variação na resposta espectral do solo está associada com os constituintes do solo, como a matéria orgânica, óxidos de ferro, argilominerais, granulometria e umidade (Dalmolin et al., 2005), os quais podem ser utilizados na identificação da variabilidade espacial por métodos geoestatísticos.

Dentro da agricultura de precisão, as zonas de manejo ou sítios de manejo específicos possibilitam distinguir locais por suas propriedades, onde cada zona apresenta comportamento e manejo específico à sua condição. A definição da zona pode ser feita com diferentes critérios, com o uso de atributos do solo ou parâmetros produtivos das culturas. No estudo de Santos et al. (2003), os autores utilizaram, ao invés de parâmetros individuais, uma combinação de padrões solo-planta-clima, sendo que essa adoção mostrou-se adequada no reconhecimento e agrupamento das propriedades do solo.

Dessa forma, o objetivo desse trabalho foi de verificar o potencial da ERD como ferramenta para delimitação de zonas de manejo baseadas no teor de matéria orgânica do solo.

## 2. Metodologia de Trabalho

O trabalho foi realizado no município de Curitiba, estado de Santa Catarina, em uma área comercial destinada ao cultivo rotacionado de soja, trigo, cebola e alho, totalizando 13 hectares. Foi estabelecida uma malha amostral composta por 50 pontos, georreferenciados, com espaçamento de 50 x 50 metros, que serviram de base para coleta de solo (Figura 1).

Para coleta de solo utilizou-se um trado holandês. A coleta foi realizada na profundidade de 0,0-0,2 m. As amostras foram particionadas em dois volumes por ponto. Um volume foi destinado a um laboratório de rotina para quantificação do teor de matéria orgânica via método convencional estabelecido pela Embrapa, enquanto a outra parte das amostras foi utilizada para a mensuração da reflectância.

Para a mensuração da reflectância, o solo foi seco ao ar por 48 h, moído e peneirado em malha de 2 mm com o intuito de homogeneizar as amostras. Cada amostra foi acondicionada em placa de petri de 90 x 15 mm para ser colocada individualmente em uma câmara escura. Dentro dela, foi colocada uma lâmpada halógena de 50W que emitia um feixe não colimado de energia sobre a placa de petri. Com isso, só se teve a incidência de radiação controlada, visto que a câmara apresentava-se vedada.

Para a mensuração das leituras espectrais, foi utilizado um espectrorradiômetro, modelo FieldSpec® HandHeld 2TM ASD Inc., que atua no intervalo de comprimento de onda entre 300 e

1100 nm e resolução espectral de 1 nm. Foram feitas quatro leituras por amostra, sendo que no final de cada leitura, a placa de petri foi deslocada a 90° da posição original. Com isso, calculou-se a média aritmética das quatro leituras para cada amostra. Cabe salientar que o espectrorradiômetro foi calibrado a cada 20 min utilizando uma placa Spectralon® (Nanni e Demattê, 2006; Martins et al., 2014).

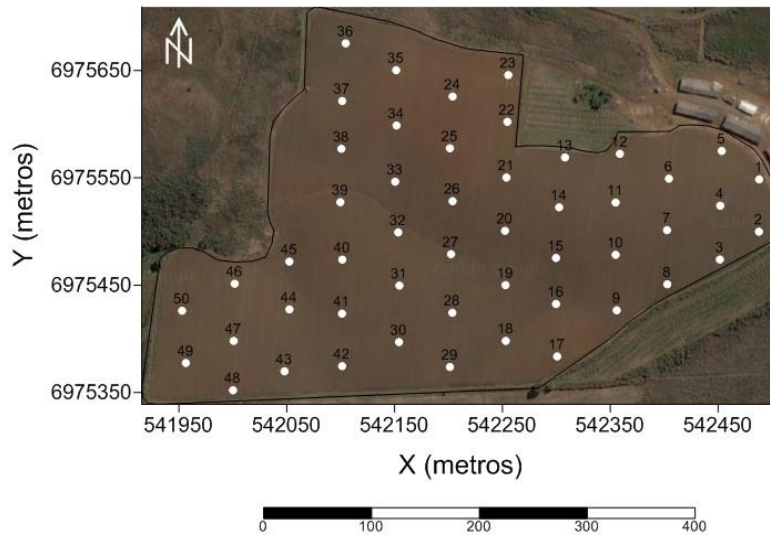


Figura 1. Mapa de localização e espacialização dos pontos amostrais utilizados como referência na coleta de dados. Sistema UTM, zona 22J, datum SIRGAS2000.

Os dados radiométricos alimentaram uma planilha que serviu de banco de dados para posteriores análises. Os intervalos espectrais estudados foram: 460-480; 545-565; 620-670; 700-720; 840-880 e 950-1000 nm. Empregou-se análise estatística descritiva dos dados, calculando-se a média, mediana, valor mínimo, valor máximo, desvio padrão e coeficiente de variação, a fim de caracterizar a distribuição dos dados. A normalidade dos dados foi avaliada pelo teste de Shapiro-Wilk's ( $p < 0,05$ ) e a correlação entre os valores médios dos intervalos espectrais com o teor de matéria orgânica do solo (MO), estimada pelo cálculo do coeficiente de correlação de Pearson.

Foi realizada análise de dependência espacial apenas para os intervalos de comprimentos de onda que apresentaram coeficiente de correlação de Pearson significativo. A dependência espacial foi avaliada pelo ajuste de variogramas, pressupondo a estacionaridade da hipótese intrínseca. Foram testados os modelos: linear com patamar, gaussiano, esférico e exponencial. Selecionou-se o modelo que apresentou a menor soma dos quadrados do resíduo (SQR). Após a escolha do modelo, foram determinados os parâmetros: efeito pepita ( $C_0$ ), patamar ( $C_0 + C$ ) e alcance (A). O índice de dependência espacial (IDE) foi calculado e classificado, segundo proposta de Zimback (2001), assumindo os seguintes intervalos: dependência espacial baixa para  $IDE < 25\%$ , moderada para  $25\% \leq IDE \leq 75\%$  e forte para  $IDE > 75\%$ .

A análise da variabilidade espacial, a geração de zonas de manejo, o cálculo do coeficiente de concordância Kappa, bem como o teste Z ( $p < 0,05$ ) entre os coeficientes calculados, foram realizados utilizando o programa computacional KrigMe, desenvolvido por Valente (2010). O programa utiliza o algoritmo de classificação *fuzzy k-means* na análise de agrupamento dos dados e geração das zonas de manejo. O valor do coeficiente Kappa é um indicativo de quão semelhantes são os mapas gerados com o mapa de referência. Valores de Kappa iguais a zero indicam que os mapas são totalmente diferentes, a semelhança entre os mapas tende a aumentar

na medida em que o coeficiente Kappa tende ao valor um, representativo de mapas exatamente iguais. Após o cálculo do coeficiente de concordância Kappa, produziu-se os mapas de zonas de manejo para o teor de matéria orgânica do solo e para os comprimentos de ondas que apresentaram maior coeficiente de concordância Kappa.

### 3. Resultados e Discussão

O teor de matéria orgânica (MO) e os intervalos de comprimento de onda apresentaram distribuição normal de acordo com o teste de Shapiro-Wilk ( $p < 0,05$ ). A área estudada apresentou teor médio de MO de  $35,60 \text{ g dm}^{-3}$ , com coeficiente de variação inferior a 10%, semelhante aos intervalos espectrais. Os demais parâmetros descritivos estão apresentados na Tabela 1.

Os intervalos utilizados abrangeram diferentes regiões do espectro eletromagnético do visível e infravermelho próximo. Foi possível, assim, diagnosticar as regiões que possuíam maior correlação com o teor de MO (Tabela 2). A reflectância média para os intervalos de 620-670 nm, como também para o intervalo de 700-720 nm, apresentaram correlação significativa e negativa com o teor de MO, evidenciando baixa reflectância conforme o aumento do teor de MO. O coeficiente de correlação para o intervalo de 620-670 nm foi de -0,360, significativa à 5 % de probabilidade de erro, enquanto que o intervalo de 700-720 nm obteve coeficiente de -0,395, significativo à 1% de probabilidade de erro.

Tabela 1. Estatística descritiva e teste de normalidade das variáveis estudadas.

Variáveis	Média	Mediana	Mínimo	Máximo	$s^{(1)}$	C.V.(%)	$w^{(2)}$ ( $p < 0,05$ )
460-480 <sup>(3)</sup>	0,04	0,04	0,03	0,04	0,00	6,36	0,98 <sup>ns</sup>
545-565	0,07	0,07	0,05	0,08	0,01	7,98	0,98 <sup>ns</sup>
620-670	0,10	0,10	0,08	0,12	0,01	9,57	0,97 <sup>ns</sup>
700-720	0,11	0,12	0,09	0,13	0,01	9,22	0,97 <sup>ns</sup>
840-880	0,12	0,12	0,10	0,14	0,01	7,56	0,99 <sup>ns</sup>
950-1000	0,12	0,12	0,11	0,14	0,01	7,30	0,98 <sup>ns</sup>
M.O. <sup>(4)</sup>	35,60	36,00	28,00	43,00	3,50	9,83	0,97 <sup>ns</sup>

<sup>(1)</sup>Desvio padrão; <sup>(2)</sup>Teste Shapiro-Wilk; <sup>(3)</sup>Intervalo de comprimento de onda (nm); <sup>(4)</sup> Matéria Orgânica ( $\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$ ).

A matéria orgânica é um fator constituinte da coloração do solo, a qual influencia na forma e albedo da curva espectral ao longo de todo o espectro óptico. A MO mascara as feições de absorção dos outros constituintes do solo, ocasionando também o decréscimo na resposta espectral (Dalmolin et al., 2005).

Tabela 2. Correlação de Pearson entre os intervalos de comprimento de onda do espectro eletromagnético de reflectância do solo (nm) e o teor de matéria orgânica (M.O.;  $\text{g} \cdot \text{dm}^{-3}$ ).

Variáveis	Intervalos de comprimento de onda (nm)					
	460-480	545-565	620-670	700-720	840-880	950-1000
M.O.	-0,049	-0,087	<b>-0,360*</b>	<b>-0,395**</b>	-0,207	-0,148

\*Significância ao nível de 5% de probabilidade, \*\*Significância ao nível de 1% de probabilidade.

Os intervalos de 620-670 e 700-720 nm, juntamente com o teor MO, foram submetidos à modelagem da dependência espacial. As três variáveis apresentaram modelo teórico ajustado do tipo esférico, com índice de dependência espacial forte (Tabela 3). Para os modelos ajustados, o teor da MO teve o melhor coeficiente de determinação. No entanto, quando submetidos à análise de validação cruzada, os intervalos espectrais apresentaram coeficiente de determinação superior, sendo o maior observado para validação cruzada do intervalo de 620-670 nm (0,49).

Tabela 3. Parâmetros dos semivariogramas teóricos e da análise de validação cruzada referente a modelagem da dependência espacial das variáveis estudadas.

Variáveis	Parâmetros geoestatísticos						
	Modelo	a <sup>(1)</sup>	C <sub>0</sub> +C <sup>(2)</sup>	C <sub>0</sub> <sup>(3)</sup>	IDE <sup>(4)</sup>	SQR <sup>(5)</sup>	R <sup>2(6)</sup>
620-670	Esférico	116,40	8E <sup>-5</sup>	0,00	FORTE	6,84E <sup>-11</sup>	0,91
700-720	Esférico	238,60	12E <sup>-5</sup>	0,00	FORTE	1,48E <sup>-10</sup>	0,89
M.O. <sup>(7)</sup>	Esférico	146,90	12,86	1,66	FORTE	0,39	0,98
Parâmetros da análise de validação cruzada							
	Coeficiente de Regressão	Intercepto (Y)	Erro padrão de predição	R <sup>2</sup>			
620-670	0,96	0,08	0,007	0,49			
700-720	0,93	0,09	0,009	0,24			
M.O.	0,88	4,24	2,887	0,22			

<sup>(1)</sup>Alcance (m); <sup>(2)</sup>Patamar; <sup>(3)</sup>Efeito pepita; <sup>(4)</sup>Índice de dependência espacial; <sup>(5)</sup>Soma de quadrados do resíduo; <sup>(6)</sup>Coeficiente de determinação; <sup>(7)</sup>Teor de matéria orgânica (g dm<sup>-3</sup>).

Após detectada variabilidade espacial, utilizou-se o método de interpolação da krigagem para confecção dos mapas temáticos de distribuição espacial, sendo que o arquivo contendo os valores interpolados serviu de base para a geração das zonas de manejo empregando-se o algoritmo *fuzzy k-means*. Os valores interpolados de 620-670 e 700-720 foram organizados de duas a cinco zonas de manejo, evidenciando que, quando organizados em duas zonas, maior foi a concordância observada destes com o mapa de zonas de manejo gerados a partir do teor de MO (Tabela 4). O maior coeficiente de concordância Kappa foi de 0,46, obtido para o intervalo de 700-720 nm. Isso indica que nessa região do espectro eletromagnético, a resposta espectral do solo é capaz de estar associada razoavelmente com o teor da MO, permitindo a distinção de duas classes de manejo.

Tabela 4. Coeficiente de concordância Kappa entre os mapas de zonas de manejo estabelecidos em função do teor de matéria orgânica (M.O.; g dm<sup>-3</sup>) e dos intervalos de comprimento de onda do espectro eletromagnético de reflectância do solo (nm).

Mapas de zonas de manejo	Número de zonas de manejo			
	2	3	4	5
M.O. x 620-670	<b>0,37</b> Ab	0,09 Db	0,23 Ba	0,18 Ca
M.O. x 700-720	<b>0,46</b> Aa	0,31 Ba	0,17 Cb	0,19 Ca

Valores seguidos por letras iguais maiúsculas na linha e minúsculas na coluna indicam valores de Kappa iguais entre as zonas de manejo, pelo teste Z ao nível de 5% de probabilidade.

A definição de zonas de manejo com base no teor de MO foi empregada em função deste atributo estar relacionado à qualidade do solo. A MO influencia positivamente nos atributos físicos e químicos de solos agrícolas, tais como densidade, estabilidade de agregados, capacidade de troca de cátions e disponibilidade de nutrientes, principalmente em áreas com sistema de

plântio direto (Corsini e Ferraud, 1999; Ciotta et al., 2003). A agricultura de precisão é uma ferramenta que possibilita identificar a heterogeneidade das áreas, possuindo ainda a capacidade de gerar informações espaciais e temporais bastante detalhadas quando utilizados métodos de análises apropriados.

Cabe salientar que a propriedade espectral não é única e exclusivamente definida pelo teor de matéria orgânica, como demonstrado por Dalmolin et al. (2005). Mesmo assim, o índice de conformidade Kappa evidenciou que a matéria orgânica apresenta-se consideravelmente relacionada com parte da resposta espectral do solo estabelecida por duas zonas de manejo.

O uso de zonas de manejo é uma alternativa interessante em sistemas de agricultura de precisão, pois permite otimizar os esforços na busca da eficiência produtiva da área com a redução dos custos, associado ainda com a facilidade de manejo (Valente, 2010). Nesse estudo, pressupõe-se que cada zona apresenta-se homogênea em relação ao teor de matéria orgânica. Por influenciar diretamente em propriedades físicas e químicas do solo e conseqüentemente no desempenho produtivo das culturas, o manejo adotado a partir desse atributo deve ser diferenciado, buscando alternativas para homogeneizá-las ou manejá-las especificamente às suas condições intrínsecas.

A ERD mostrou-se relativamente capaz de diferenciar as zonas de manejos, sendo que seus benefícios se sobressaem com a praticidade em obter informações espaciais e temporais do sistema agrícola. Na Figura 2 são apresentados os mapas de zonas de manejo confeccionados em função do teor de matéria orgânica e dos intervalos espectrais que se correlacionaram significativamente com este atributo.

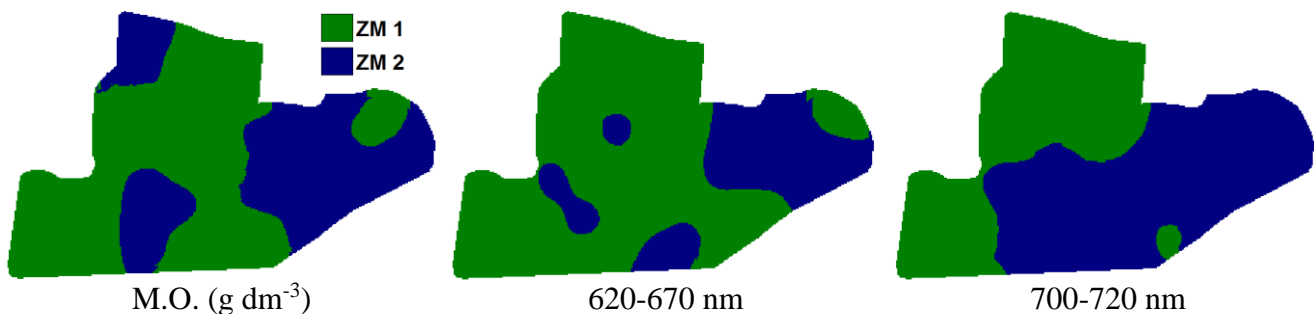


Figura 2. Mapas de zonas de manejo (ZM) gerados a partir do teor de matéria orgânica (M.O.) e intervalos de comprimento de onda do espectro eletromagnético de reflectância do solo (nm) que apresentaram maior coeficiente de concordância Kappa.

#### 4. Conclusões

O intervalo de comprimento de onda de 700-720 nm foi o que apresentou maior correlação significativa com os teores de matéria orgânica da área de estudo (-0,395).

A maior concordância entre mapas de zonas de manejo foi observada entre os mapas confeccionados com base no teor de matéria orgânica e no intervalo de comprimento de onda de 700-720 nm.

## **Agradecimentos**

À Fundação AGRISUS pelo financiamento deste estudo; à Fundação de Amparo à Pesquisa e Inovação do Estado de Santa Catarina (FAPESC) pelo financiamento do espectrorradiômetro; ao produtor rural Sr. Kaoru Antonio Haramoto, pela disponibilização da área e de toda logística utilizada na realização deste estudo; ao CNPq pela concessão de bolsas de iniciação científica.

## **Referências Bibliográficas**

Cezar, E.; Nanni, M. R.; Demattê, J. A. M.; Chicati, M. L. C.; Oliveira, R. B. Estimativa de atributos do solo por meio de espectrorradiometria difusa. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 37, n. 4, 2013.

Ciotta, M. N.; Bayer, C.; Fontoura, S. M. V.; Ernani, P. R.; Albuquerque, J. A. Matéria orgânica e aumento da capacidade de troca de cátions em solo com argila de atividade baixa sob plantio direto. **Ciência Rural**, v. 33, n. 6, p. 1161-1164, 2003.

Corsini, P. C.; Ferraudo, A. S. Efeito de sistemas de cultivo na densidade e macroporosidade do solo e no desenvolvimento radicular do milho em latossolo roxo. **Pesq. Agropec. Bras.**, v. 34, n. 2, p. 289-298, 1999.

Dalmolin, R. S. D.; Golçalves, C. N.; Klamt, E.; Dick, D. P. Relação entre os constituintes do solo e seu comportamento espectral. **Ciência Rural**, v. 35, n. 2, p. 481-489, 2005.

Martins, J. A.; Fiorio, P. R.; Demattê, J. A. M.; Miranda, J. H.; Lelis Neto, J. A. Sensoriamento remoto na determinação de atributos de um nitossolo sob aplicação de vinhaça. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 38, n. 3, 2014.

Nanni, M.R.; Demattê, J.A.M. Comportamento da linha do solo obtida por espectrorradiometria laboratorial para diferentes classes de solo. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, v. 30, p. 1031-1038, 2006.

Pirie, A.; Singh, B.; Islam, K. Ultra-violet, visible, nearinfrared, and mid-infrared diffuse reflectance spectroscopic techniques to predict several soil properties. **Aust. J. Soil. Res.**, v. 43, p. 713-721, 2005.

Santos, A. O.; Pallone Filho, W. J.; Ungaro, M. R. G.; Lino, A. C. L.; Radin, B. Prospecção de zonas potenciais para manejo diferenciado em agricultura de precisão utilizando-se padrões de solo-planta-clima. **Agriambi**, v. 7, n. 3, p. 463-468, 2003.

Valente, D.S.M. **Desenvolvimento de um sistema de apoio à decisão para definir zonas de manejo em cafeicultura de precisão**. 2010. 122 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Viçosa. Viçosa, 2010.

Zimback, C.R.L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade do solo**. 2001. 114 f. Tese (Livre-Docência) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.