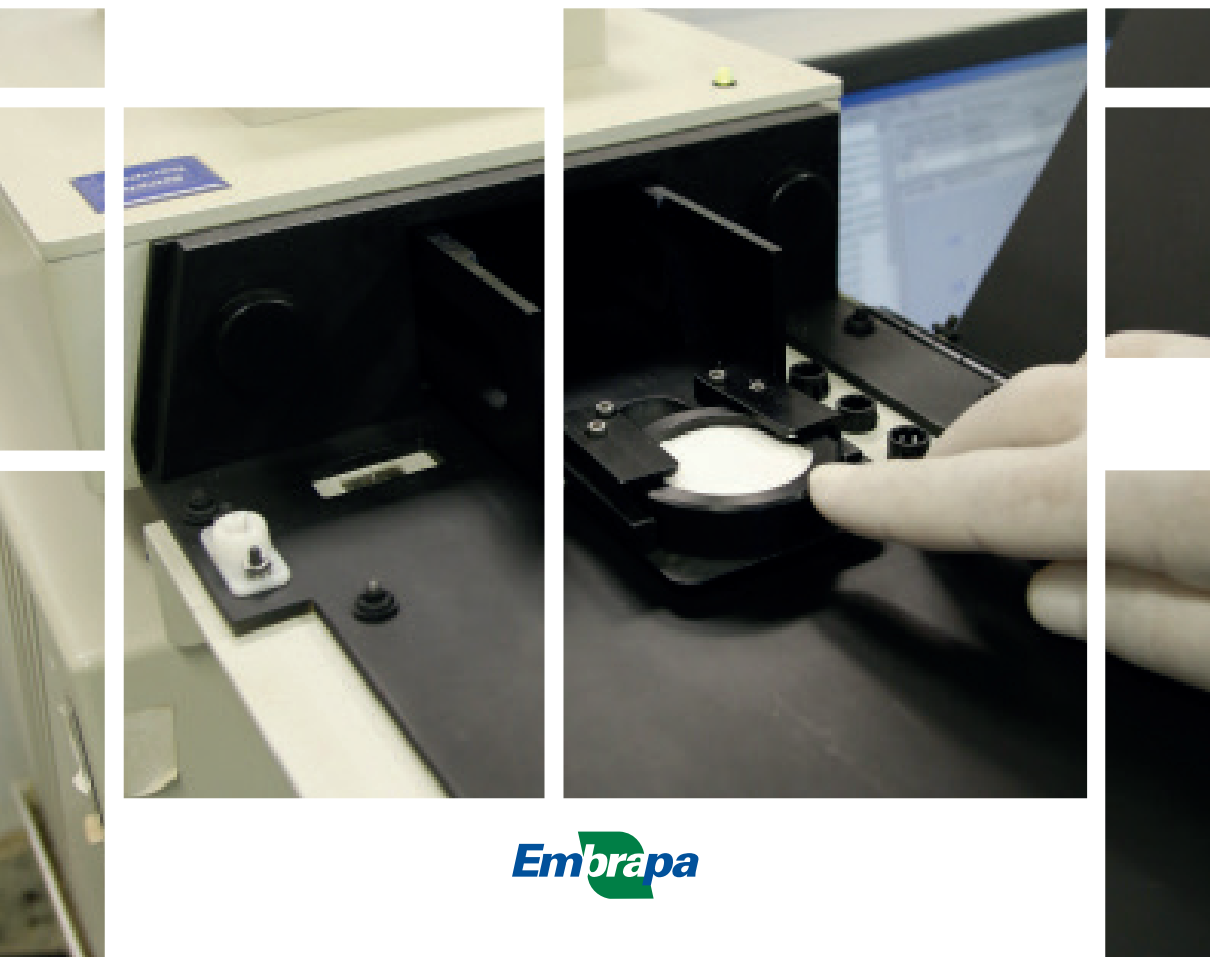


## Espectroscopia de Infravermelho Próximo na Quantificação do Carbono Orgânico em Solos do Cerrado



*Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária  
Centro de Pesquisa Agropecuária dos Cerrados  
Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento*

**BOLETIM DE PESQUISA  
E DESENVOLVIMENTO  
352**

**Espectroscopia de Infravermelho  
Próximo na Quantificação do Carbono  
Orgânico em Solos do Cerrado**

*Robélio Leandro Marchão  
Juliana Hiromi Sato  
Cícero Célio de Figueiredo  
Pedro Rodolfo Siqueira Vendrame  
Jaqueline Cazado Félix  
Beata Emoke Madari  
Edson Eyji Sano  
Karina Pulrolnik  
Thierry Becquer*

Disponível gratuitamente no link:  
<https://www.bdpa.cnptia.embrapa.br>  
(Digite o título e clique em pesquisar)

**Embrapa Cerrados**  
BR 020, Km 18, Rod. Brasília / Fortaleza  
Caixa Postal 08223  
CEP 73310-970, Planaltina, DF  
Fone: (61) 3388-9898  
Fax: (61) 3388-9879  
[embrapa.br/cerrados](http://embrapa.br/cerrados)  
[embrapa.br/fale-conosco/sac](http://embrapa.br/fale-conosco/sac)

Comitê Local de Publicações  
da Unidade

Presidente  
*Marcelo Ayres Carvalho*

Secretária-Executiva  
*Marina de Fátima Vilela*

Secretárias  
*Maria Edilva Nogueira,*  
*Alessandra S. Gelape Faleiro*

Supervisão editorial  
*Jussara Flores de Oliveira Arbues*

Revisão de texto  
*Jussara Flores de Oliveira Arbues*

Normalização bibliográfica  
*Shirley da Luz Soares Araújo (CRB 1/1948)*

Tratamento das ilustrações  
*Renato Berlim Fonseca*

Projeto gráfico da coleção  
*Carlos Eduardo Felice Barbeiro*

Editoração eletrônica  
*Renato Berlim Fonseca*

Foto da capa  
*Renato Berlim Fonseca*

**1ª edição**  
1ª impressão (2019): tiragem 30 exemplares

**Todos os direitos reservados.**

A reprodução não autorizada desta publicação, no todo ou em parte,  
constitui violação dos direitos autorais (Lei nº 9.610).

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)**  
Embrapa Cerrados

---

E77 Espectroscopia de infravermelho próximo na quantificação do carbono  
orgânico em solos do cerrado / Robélio Leandro Marchão... [et al.]. –  
Planaltina, DF : Embrapa Cerrados, 2019.

25 p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento / Embrapa Cerrados,  
ISSN 1676-918X, ISSN online 2176-509X, 352).

1. Carbono. 2. Composto orgânico. 3. Solo. I. Marchão, Robélio Leandro.  
II. Embrapa Cerrados. III. Série.

631.41 – cdd-21

## Sumário

---

Resumo .....	5
Abstract .....	6
Introdução .....	7
Material e Métodos .....	10
Resultados e Discussão .....	15
Conclusões.....	21
Agradecimentos.....	21
Referências .....	22

# Espectroscopia de Infravermelho Próximo na Quantificação do Carbono Orgânico em Solos do Cerrado

*Robélio Leandro Marchão<sup>1</sup>; Juliana Hiromi Sato<sup>2</sup>; Cícero Célio de Figueiredo<sup>3</sup> Pedro Rodolfo Siqueira Vendrame<sup>4</sup>; Jaqueline Cazado Félix<sup>5</sup>; Beata Eموke Madari<sup>6</sup>; Edson Eyji Sano<sup>7</sup>; Karina Pulrolnik<sup>8</sup>; Thierry Becquer<sup>9</sup>*

**Resumo** – O desenvolvimento de técnicas mais rápidas e eficazes para quantificar o carbono orgânico do solo em larga escala é fundamental para avaliação do impacto ambiental. O objetivo deste estudo foi investigar o uso da espectroscopia de refletância no infravermelho próximo (NIRS) na predição dos teores de carbono orgânico e classificação dos teores de matéria orgânica em Latossolos na escala do bioma Cerrado. Foram utilizados dois bancos de amostras ( $n = 122$  and  $n = 156$ ) originárias de diversos estudos regionais sob vegetação nativa, pastagens e agricultura intensiva. As amostras foram analisadas quanto aos teores de carbono orgânico por dois métodos, combustão via úmida e via seca, como referência na calibração. Os espectros na faixa do infravermelho próximo (1.100 nm – 2.500 nm) foram coletados em amostras de terra fina seca ao ar e submetidos a análises quimiométricas para calibração e validação dos modelos multivariados de predição dos teores de carbono orgânico. Um método de classificação não supervisionado, baseado na análise linear discriminante, foi aplicado visando classificar as amostras quanto às classes dos teores de matéria orgânica. Foi possível prever com boa acurácia ( $R^2 = 0,81$  e  $SEP = 3,33$ ) o teor do carbono orgânico do solo determinado com combustão via seca a partir da espectroscopia NIR, utilizando um modelo amplo na abrangência do bioma Cerrado. Não foi possível classificar adequadamente as amostras a partir dos espectros quanto às classes de interpretação do teor de matéria orgânica, uma vez que há um confundimento do teor de matéria orgânica em função das diferentes classes de textura.

**Termos para indexação:** carbono orgânico do solo, combustão via úmida, combustão via seca, espectroscopia NIR, análise discriminante.

---

<sup>1</sup> Engenheiro-agrônomo, doutor em Agronomia, pesquisador da Embrapa Cerrados, Planaltina DF.

<sup>2</sup> Engenheira-agrônoma, doutora em Produção Sustentável, bolsista da Embrapa Cerrados, Planaltina, DF.

<sup>3</sup> Engenheiro-agrônomo, doutor em Agronomia, professor associado da Universidade de Brasília, Brasília, DF.

<sup>4</sup> Engenheiro-agrônomo, doutor em Agronomia, professor adjunto da Universidade Estadual de Londrina, Londrina, PR.

<sup>5</sup> Engenheira-agrônoma, doutora em Agronomia, bolsista da Universidade Estadual de Londrina, Londrina, PR.

<sup>6</sup> Engenheira-agrônoma, Ph.D. em Soil Science, pesquisadora da Embrapa Arroz e Feijão, Santo Antônio do Goiás, GO

<sup>7</sup> Geólogo, doutor em Ciência do Solo, pesquisador da Embrapa Cerrados, Planaltina, DF.

<sup>8</sup> Engenheira Florestal, doutora em Agronomia, pesquisadora da Embrapa Cerrados, Planaltina, DF.

<sup>9</sup> Engenheiro agrônomo, doutor em Pedologia, pesquisador do Institut de Recherche Pour Le Développement, Montpellier, FR

## Near infrared spectroscopy for soil organic carbon measurement in the Brazilian savannah (Cerrado)

**Abstract** – The development of faster and more effective techniques for quantifying soil organic carbon in large-scale studies is essential for environmental impact assessment. The objective of this study was to investigate the use of near infrared reflectance spectroscopy (NIRS) in prediction of organic carbon and spectral-based classification of soil organic matter contents in Oxisols in the scope of the Cerrado biome. Two spectral libraries ( $n = 122$  and  $n = 156$ ) from several regional studies were used with soil samples from native vegetation, pasture and intensive agriculture. Soil samples were analyzed for organic carbon contents by wet and dry combustion as reference methods in the calibration. The spectra in the near infrared range (1100 - 2500 nm) were collected in air-dried samples. Spectral data was subjected to chemometric analysis for calibration and validation of the multivariate models for prediction of soil organic carbon contents. An unsupervised classification method, based on the linear discriminant analysis, was applied in order to classify samples based on the classes of the soil organic matter contents. It was possible to predict with good accuracy the soil organic carbon content when determined by the dry combustion as reference method for the NIR spectroscopy, using a wide scale model of the Cerrado biome. The linear discriminant analysis was not capable to classify samples based on the spectra as the Brazilian classes of interpretation of the soil organic matter content.

**Index terms:** soil organic carbon, wet combustion, dry combustion, NIR spectroscopy, discriminant analysis.

## Introdução

---

As savanas brasileiras, que compreendem o bioma Cerrado, têm sido amplamente utilizadas para a produção agropecuária e uma das consequências da sua incorporação pela agricultura é a perda de matéria orgânica do solo (MOS) (Resck et al., 2008; Corbeels et al., 2016). Por sua vez, a perda de MOS pela expansão agrícola, desmatamento e mudança no uso da terra, acarreta o aumento da emissão de gases de efeito estufa (GEE) (Strassburg et al., 2014), que é um dos principais problemas ambientais globais. Atualmente, há um grande esforço que busca minimizar o impacto negativo do uso da terra, principalmente em regiões de expansão da agricultura. No Brasil, um dos principais exemplos é o Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura, conhecido como Plano ABC (Brasil, 2012). O Plano ABC prevê uma série de incentivos ao uso de tecnologias na agropecuária que minimizem a perda de MOS ou promovam seu acúmulo. Os métodos de quantificação da MOS atualmente utilizados como padrão são pouco operacionais em termos de demanda de tempo e recursos financeiros. É necessário, portanto, desenvolver métodos mais rápidos, baratos e de menor impacto ambiental. Ademais, o desenvolvimento de técnicas alternativas será fundamental para monitorar em larga escala a dinâmica do carbono no solo, bem como, padronizar os valores obtidos a partir dos diferentes métodos empregados nos laboratórios de rotina.

Considera-se que a matéria orgânica do solo (MOS) contém cerca de 58% de carbono em relação a sua massa total, e, portanto, a determinação de carbono orgânico total (COT) tem sido utilizado para estimar a fração orgânica do solo (Nelson; Sommers, 1996). Atualmente, diversos métodos são utilizados para determinação do COT desde os clássicos baseados na dicromatometria (combustão via úmida) até outros que utilizam equipamentos semiautomáticos construídos com esse propósito, como por exemplo os autoanalisadores elementares (combustão via seca) (Conyers et al., 2011). Os métodos de combustão via úmida são mais acessíveis, apesar de utilizarem reagentes tóxicos (Pimentel et al., 2006). Esses métodos, além de destrutivos, são baseados na redução do dicromato ( $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ) por compostos de CO e posterior determinação do cromo não reduzido por titulação de oxirredução com  $\text{Fe}^{2+}$  ou por técnicas colorimétricas (Nelson; Sommers, 1996). O método

Walkley & Black (WB) é o mais empregado em laboratórios de análise de solo no Brasil devido a sua simplicidade e baixo custo. Entretanto, problemas analíticos devido à combustão incompleta do carbono orgânico (por exemplo material recalcitrante, como o carvão vegetal), presença de ferro, manganês e carbono inorgânico podem ser fontes de erros para os métodos baseados na oxidação e posterior titulação. Além disso, a geração de resíduos tóxicos tem incentivado o desenvolvimento de outros procedimentos (Segnini et al., 2008; Beltrame et al., 2016; Souza et al., 2016).

A utilização de aparelhos automatizados trouxe avanços nas análises. Os analisadores elementares (CHNS/O) permitem determinações rápidas e confiáveis por meio da combustão seca a alta temperatura. Esse método é recomendado também pelo painel intergovernamental sobre mudanças climáticas (IPCC 2006) para a determinação de carbono com relação aos inventários de emissão de gases de efeito estufa, sendo aceito como referência em estudos relacionados ao estoque de carbono dos solos. Contudo, o acesso a esses equipamentos por laboratórios no Brasil ainda é limitado (Segnini et al., 2008), o que restringe o emprego dessa técnica fora da pesquisa. Cada método apresenta suas vantagens e suas limitações, além de terem diferentes relações com a textura e mineralogia do solo (Sato et al., 2014).

Em todo o mundo, observa-se uma corrida na busca por técnicas alternativas que auxiliem na aquisição de dados e monitoramento de atributos de solo em larga escala e, nesse contexto, medidas indiretas, como a predição do carbono do solo por métodos espectroscópicos, têm sido um dos alvos da pesquisa (Cozzolino; Moron, 2006; MacCarty et al., 2002; Stevens et al., 2013). No Brasil, técnicas de reflectância por espectroscopia de infravermelho vêm sendo adaptadas para aplicação na ciência do solo em diversas escalas e têm se mostrado promissoras para predição de atributos químicos e físicos (Sena et al., 2000; Madari et al., 2005; Marchão et al., 2011; Vendrame et al., 2012; Ferraresi et al., 2012; Souza et al., 2012; Vendrame et al., 2015; Beltrame et al., 2016; Félix et al., 2016). De acordo com Chang et al. (2005), a espectroscopia de reflectância no infravermelho próximo (do inglês "NIRS") é uma técnica rápida, não destrutiva, que pode ser utilizada para caracterização e quantificação das propriedades de amostras sólidas.

Entre as propriedades e atributos químicos do solo mais estudados com a técnica NIRS destacam-se os teores de carbono e de nitrogênio (Reeves;



Smith 2009; Soriano-Disla et al., 2014). Em amostras de solos, as regiões de absorção para carbono e nitrogênio podem ser observadas por toda a extensão do espectro, que são determinados pelas vibrações das ligações químicas específicas dos grupos OH, CH, NH e CO em suas diferentes bandas de absorção (Pasquini, 2003).

De acordo com Sarkhot et al. (2011), o carbono orgânico nas diferentes frações da matéria orgânica pode ser determinado pelo NIRS devido a diferenças de refletância associadas as formas químicas e proporções do carbono nos compostos contidos em cada fração. Adicionalmente, a partir das ligações organominerais, podem ser indiretamente determinados outros elementos químicos, como hidrogênio, fósforo e potássio (Stenberg et al., 2010).

Embora vários estudos já tenham demonstrado o potencial da espectroscopia na determinação de alguns atributos do solo no Brasil, poucos estudos (Madari et al., 2005; Souza et al., 2012) foram realizados visando construir modelos regionais amplos, que possam ser aplicados em larga escala de forma representativa. Os Latossolos (Santos et al., 2013), também classificados como Oxisols (Soil Survey Staff 2006), são a classe de solo mais abrangente do país (Ker et al., 2012). Essa classe é a que melhor representa a expressão dos processos pedogenéticos desenvolvidos nas regiões tropicais úmidas, formados por intenso intemperismo químico cujos atributos são consequência do efeito integrado de perda de sílica e concentração de óxidos e hidróxidos de Fe e Al, processos conhecidos como dessilicação e ferralitização, respectivamente (van Breemen; Buurman, 1998).

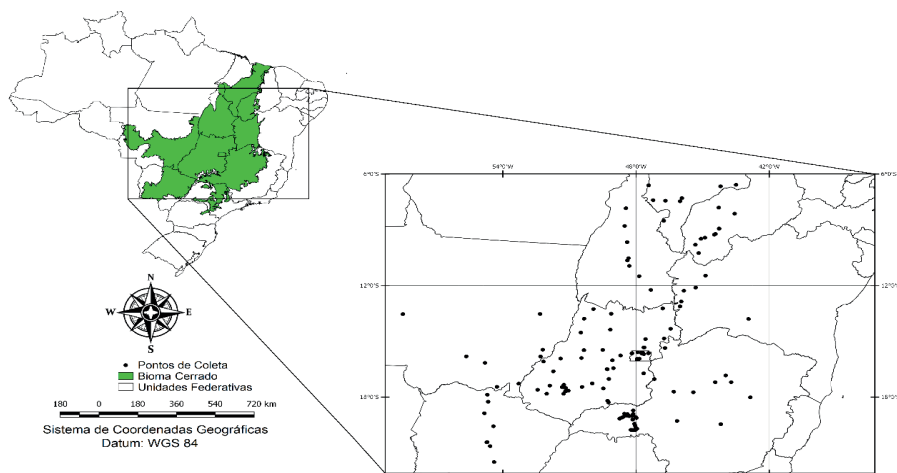
Dessa forma, o desenvolvimento de ferramentas e técnicas mais rápidas e eficazes, que facilitem o monitoramento da dinâmica do carbono orgânico do solo em larga escala, é fundamental em qualquer estudo que envolva este recurso natural. Por fim, o objetivo deste trabalho foi investigar o uso da técnica da espectroscopia de refletância no infravermelho próximo (NIRS) na predição e classificação dos teores de carbono orgânico em Latossolos na abrangência do Cerrado.

## Material e Métodos

---

### Amostragem de solo

A base de dados utilizada neste estudo compreende 184 amostras de solo coletadas na camada de 0 cm–20 cm em diferentes locais do bioma Cerrado (Figura 1). São amostras originárias de diversos estudos regionais, das quais 54 amostras de áreas sob vegetação nativa, pastagens e agricultura (Sato et al., 2014), 10 amostras de uma cronosequência de plantio direto, pastagem contínua e vegetação nativa (Corbeels et al., 2016), 92 amostras coletadas em áreas de pastagens degradadas (Groppo et al., 2015) e 28 amostras também provenientes de áreas de pastagens típicas da região central do Cerrado (Vendrame et al., 2012). Para a seleção das amostras, foram levados em consideração a classe do solo (prioritariamente Latossolos), o histórico de uso, a textura e a delimitação dentro do bioma Cerrado. O trabalho foi dividido em duas etapas: calibração e validação. A etapa de calibração dos modelos foi realizada conforme o método de referência para a determinação do carbono e considerando a disponibilidade de resultados de referência para cada conjunto, sendo o banco 1 composto por 156 amostras relativo aos resultados de carbono orgânico do solo por análise elementar (combustão via seca, COSCHNS) e o banco 2 composto por 122 amostras relativo aos resultados de carbono orgânico do solo pelo método Walkley e Black (combustão via úmida, COSWB) (Tabela 1).



**Figura 1.** Mapa do bioma Cerrado com a localização geográfica dos pontos de coleta das amostras utilizadas no estudo.

Fonte: Base Cartográfica de Unidades Federativas do Brasil - IBGE, 2015 e Base Cartográfica de Biomas - IBGE, 2015

**Tabela 1.** Descrição dos teores de carbono orgânico dos bancos de amostras dos solos do Cerrado utilizados no estudo.

Banco	Referência	Variável (g kg <sup>-1</sup> )	Min	Max	Média	Med	DP
1 (n=156)	Sato et al. 2014 (n=54)	COS <sub>CHNS</sub>	3,5	54,4	15,7	13,6	±9,4
	Corbeels et al. 2016 (n=10)						
2 (n=122)	Groppo et al. 2015 (n=92)	Argila	29,9	877	362,1	345,1	±214,5
	Sato et al. 2014 (n=54)	COS <sub>WB</sub>	2,5	47,1	13,6	12,7	±7,2
	Corbeels et al. 2016 (n=10)						
	Groppo et al. 2015 (n=30)						
Vendrame et al 2012 (n=28)	Argila						

COS<sub>CHNS</sub> = teor de carbono orgânico do solo determinado por análise elementar (combustão via seca). COS<sub>WB</sub> = teor de carbono orgânico do solo determinado pelo método Walkley & Black (combustão via úmida); Min = mínimo; Max = máximo; Med = mediana; DP = desvio padrão da média.

## **Análises de referência para carbono**

As amostras de solo foram secas ao ar e passadas em peneira de 2 mm (TFSA). Para a análise de carbono orgânico do solo pelo método de Walkley & Black (1934) (COSWB), as amostras de TFSA foram moídas e passadas em peneira de abertura de malha 0,5 mm. Foram utilizados aproximadamente 500 mL de solo por amostra e colocado em frasco erlenmeyer de 500 mL. A quantidade adequada de solo para a concentração de COS das amostras foi determinada com testes de recuperação de COS. Foram adicionados 10 mL de dicromato de potássio ( $K_2Cr_2O_7$ )  $0,167 \text{ mol L}^{-1}$  e 20 mL de ácido sulfúrico ( $H_2SO_4$ ) concentrado, agitando para garantir a mistura do solo com os reagentes. Após o repouso de 30 minutos adicionaram-se 200 mL de água destilada, 10 mL de  $H_3PO_4$  concentrado e 1 mL de difenilamina 0,16%. A titulação do excesso de dicromato após a oxidação do carbono do solo foi realizada com sulfato ferroso amoniacal [ $(NH_4)_2 Fe(SO_4)_2 \cdot 6H_2O$ ]  $1 \text{ mol L}^{-1}$  (Sal de Mohr). Não foi utilizado fator de correção (1,32) para determinar o COT das amostras.

Para a análise de carbono orgânico do solo por análise elementar via combustão seca a alta temperatura ( $COS_{CHNS}$ ), as amostras de TFSA foram moídas e maceradas, passadas em peneira de 0,149 mm. Foram pesados aproximadamente 30 mg de solo, colocadas em cápsulas de estanho e a digestão do material foi feita em câmara de combustão em temperatura de  $975 \text{ }^\circ\text{C}$ . Os gases foram detectados por um sensor de termocondutividade e convertidos em porcentagem de carbono, em um analisador automático do laboratório de análises multiusuário da Embrapa Cerrados (Vario Macro Cube, Elementar Analysensysteme GmbH, Elementar-Straße 1 63505 Langenselbold, Germany).

A análise granulométrica do solo foi realizada com o método da pipeta (Claessen, 1997).

## **Obtenção dos espectros NIRS**

As amostras foram analisadas em um espectrômetro Foss NIRSystems II 5000 (Silver Spring, MD, USA) para obtenção dos espectros de absorção na região da radiação infravermelho próximo que compreendeu os comprimentos de ondas entre 1.100 nm e 2.500 nm. As amostras de solo de aproxi-

madamente 5 g de terra fina seca ao ar (< 2 mm) foram escaneadas em uma cubeta cilíndrica de 50 mm de diâmetro com uma janela de quartzo. Os dados espectrais foram registrados no modo de reflectância (R) do equipamento para compor um espectro com 700 pontos divididos em comprimentos de onda a cada 2 nm. Os dados obtidos foram transformados em absorbância (A) pelo logaritmo do inverso da reflectância ( $A = \log [1/R]$ ).

## **Análise dos espectros e construção dos modelos de regressão multivariada**

Os espectros foram exportados do software ISIScan (v.2.85.3 ISI Software, FOSS Analytical AB, Höganäs, Sweden) e analisados no software The Unscrambler® X versão 10.5.1 (CAMO Software AS, Oslo, Norway). Uma análise de componentes principais (ACP) foi realizada a partir dos espectros de cada um dos conjuntos de amostras visando reduzir a dimensão dos dados e verificar possíveis tendências bem como presença de amostras espúrias (*outliers*). A partir da ACP também foi possível realizar a separação dos conjuntos de calibração e validação a partir do algoritmo de Kennard-Stone mantendo-se a proporção aproximada de 3/4 para o conjunto de calibração e 1/4 para validação externa conforme prevê a norma ASTM E 1655-05.

Para a construção do modelo de calibração, utilizou-se a regressão por quadrados mínimos parciais PLS (do inglês *partial least square regression*) sem nenhum tipo de pré-tratamento espectral. Em ambos os bancos de espectros, foram testados diversos tipos e combinações de pré-tratamentos com uso da primeira e da segunda derivadas de forma isolada ou em conjunto, incluindo a derivada de Savitzky-Golay com diferentes polinômios, seguimentos e número de pontos de suavização. Também foram testadas a transformação normal padrão da variância SNV (do inglês *standard normal variate*) associada ou não ao alisamento SNVD (do inglês *de-trending*), visando reduzir o efeito de variações do tamanho das partículas de cada amostra e da variação de base. A correção multiplicativa do sinal MSC (do inglês *multiplicative scatter correction*) também foi testada com o objetivo de retirar possíveis efeitos de tendência linear e curvilínea de cada espectro. Nenhum dos pré-tratamentos e combinações testadas resultou em melhorias significativas para os modelos de modo que os espectros brutos foram utilizados nas etapas seguintes. O desempenho dos modelos foi expresso pelo erro padrão da

calibração SEC (do inglês *standard error of calibration*) e pelo coeficiente de correlação do modelo ( $R^2_{cal}$ ) na etapa de calibração e na etapa de validação, pelos coeficientes de correlação ( $R^2_{val}$ ) e pelo erro padrão da predição SEP (do inglês *standard error of prediction*).

## Classificação das amostras a partir dos teores da matéria orgânica do solo

Com o objetivo de avaliar o potencial da espectroscopia (NIRS) na classificação das amostras a partir dos teores de matéria orgânica do solo (MOS), os resultados dos teores de carbono orgânico do solo do banco 2, determinados por Walkley & Black ( $COS_{WB}$ ), foram transformados em conteúdo de matéria orgânica (%) multiplicando-se os resultados por 1,724 (fator de “van Bemmelen”). Posteriormente, conforme Sousa e Lobato (2004), os teores de MOS foram classificados em função da granulometria, conforme descrito na Tabela 2. Após a classificação, somente 5 amostras das 122 foram classificadas com alto teor de MOS em que se optou por agrupá-las à classe adequada, de modo que, ao final, 38 amostras foram classificadas com alto teor de MOS, 27 com médio teor e 57 com baixo teor.

**Tabela 2.** Interpretação dos resultados da análise da matéria orgânica (%) em amostras de solos do Cerrado na camada de 0 cm a 20 cm.

Textura	Baixa	Média	Adequada	Alta
Arenosa	< 8	8 a 10	11 a 15	> 15
Média	< 16	16 a 20	21 a 30	> 30
Argilosa	< 24	24 a 30	31 a 45	> 45
Muito argilosa	< 28	28 a 35	36 a 52	> 52

Fonte: Sousa e Lobato 2004.

Para verificar o potencial de classificação dos teores a partir dos espectros, foi realizada, por meio do software The Unscrambler X v. 10.5, uma análise linear discriminante LDA (do inglês *linear discriminant analysis*), em que se desenvolve um modelo baseado em classes predefinidas nos dados. A LDA fornece uma transformação linear de vetores (ou amostras) de características n-dimensionais em um espaço m-dimensional ( $m < n$ ), de modo que as amostras pertencentes à mesma classe estejam próximas, mas amostras

de diferentes classes estão distantes entre si. A LDA é um método de classificação supervisionado, pois as categorias às quais os objetos devem ser classificados são conhecidas antes de o modelo ser criado. O objetivo da LDA é determinar os melhores parâmetros de ajuste para classificação de amostras por um dado modelo desenvolvido. O modelo pode então ser usado para classificar amostras desconhecidas.

## Resultados e Discussão

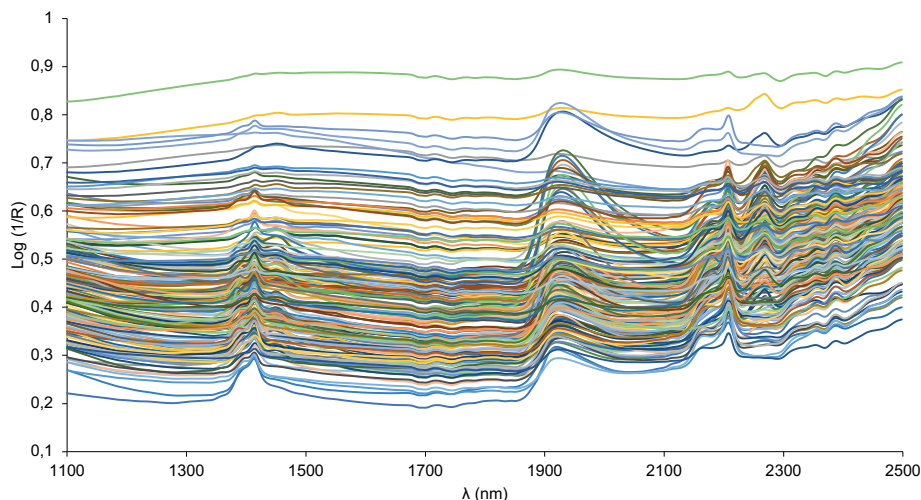
---

### Teores de carbono e relação entre os métodos e a resposta espectral

Os teores de COS obtidos pelos dois métodos para os bancos analisados foram apresentados na Tabela 1. A análise elementar ( $\text{COS}_{\text{CHNS}}$ ) promove uma combustão à mais de 900 °C, portanto, oxidando todas as formas de carbono, tanto as formas orgânicas quanto inorgânicas, sendo considerado como método padrão de referência internacional em estudos que visam quantificar os estoques de carbono em agroecossistemas (McCarty et al., 2010). As médias dos teores de carbono para os bancos de amostras avaliadas por análise elementar (banco 1  $\text{COS}_{\text{CHNS}}$ ) e Walkley & Black (banco 2  $\text{COS}_{\text{WB}}$ ) foram 15,74 g kg<sup>-1</sup> e 13,62 g kg<sup>-1</sup>, respectivamente, com valores abaixo daqueles observados em estudos anteriores envolvendo caracterização da matéria orgânica em Latossolos do Cerrado (Lopes; Cox, 1977; Gomes et al., 2004), possivelmente devido à grande proporção de solos sob pastagens degradadas nos nossos bancos utilizados.

Sabe-se que apenas entre 60% e 86% do COS é oxidado pelo método Walkley & Black e que um fator médio de correção de 1,32 é necessário para obter valores reais de carbono orgânico do solo (Walkley & Black 1934). Entretanto, essa recuperação pode variar dependendo da classe de solo, do teor de argila, do tipo de uso do solo e ainda da presença de carbono inerte na forma de carvão (Chapuis-Lardy et al., 2004). Sato et al. (2014), em estudo envolvendo 54 amostras comuns aos dois bancos de amostras aqui utilizados, com predominância de solos sob cerrado nativo, em que há grande acúmulo de carbono inerte na forma de carvão, não verificaram a interferência dessa forma estável de carbono nas relações entre os métodos.

Na Figura 2, são apresentados os espectros NIR dos dois conjuntos de amostras utilizadas para a construção dos modelos de calibração do teor de COS. Os espectros apresentaram comportamento semelhante a outros estudos com Latossolos do Cerrado (Marchão et al., 2011; Vendrame et al., 2015).



**Figura 2.** Espectros na faixa do infravermelho próximo (1.100 nm a 2.500 nm) dos bancos 1 e 2 com as 184 amostras da abrangência do bioma Cerrado.

Os primeiros trabalhos envolvendo aplicação da espectroscopia em estudos envolvendo solos foram iniciados na década de 1970. Al-Abbas et al. (1972) relataram que na faixa do infravermelho próximo, os comprimentos de onda entre 1.500 nm e 1.800 nm, 1.000 nm e 1.400 nm são, em ordem decrescente, as bandas do NIR que mais contribuíram para a predição da matéria orgânica do solo. Dalal e Henry (1986) encontraram correlação entre a resposta espectral e o teor de carbono medido por Walkley & Black nas bandas 1.744 nm, 1.870 nm e 2.052 nm. Os autores atribuíram essa correlação à resposta espectral as ligações  $C\equiv N$  na faixa de 1.870 nm e  $CONH$ ,  $CONH_2$  e grupos  $NH$  amino alifáticos na banda 2.052 nm. As absorções no comprimento de onda 2.400 nm estão relacionadas à presença de ligações  $C-O$  (Madeira Netto; Baptista, 2000). Mais especificamente, os comprimentos de onda próximos de 2.488 nm correspondem ao terceiro sobretom das moléculas  $C-H$ ,  $N-H$  e  $R-OH$  (Xiaobo et al., 2010) e aos sobretoms e combinação de vibrações de grupos orgânicos funcionais de celulose  $CHalo/CHdef$  (alo,



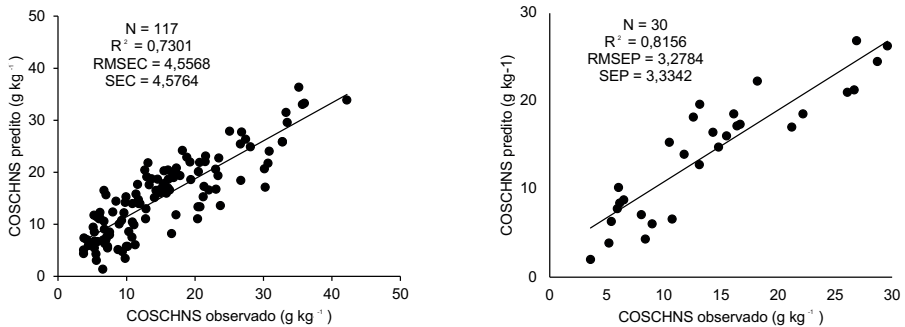
alongamento e def, deformação), próximo de 2.304 nm, e de celulose CC/CH, em 2.488 nm (Viscarra Rossel; Hicks, 2015).

Observa-se ainda a formação de picos de absorção a 1.400 nm e 1.900 nm que em geral ocorrem devido às vibrações dos grupos OH e das moléculas de água, respectivamente. Da mesma forma, os picos mais amplos observados na faixa 2.200–2.300 ocorrem em função da composição mineralógica dos Latossolos. Comparativamente a outras bandas espectrais há pouca informação nos espectros NIR dos Latossolos, estando a resposta à matéria orgânica diluída praticamente ao longo de toda a banda do NIR. Isso explica porque os modelos PLS restritos a bandas específicas normalmente apresentam resultados inferiores aos modelos que utilizando toda a banda do NIR. Neste trabalho, vários testes prévios foram realizados (dados não apresentados) no sentido de isolar as bandas que eventualmente contribuíram com maior peso no modelo. Em todos os casos, o resultado foi uma redução na qualidade da predição.

## Resultados da calibração para predição do carbono orgânico do solo por análise elementar

O resultado da calibração do modelo de regressão para predição do carbono orgânico obtido por análise elementar ( $\text{COS}_{\text{CHNS}}$ ) pode ser visualizado na Figura 3a, apresentando  $R^2 = 0,73$  e  $\text{SEC} = 4,57$  g/kg de C.

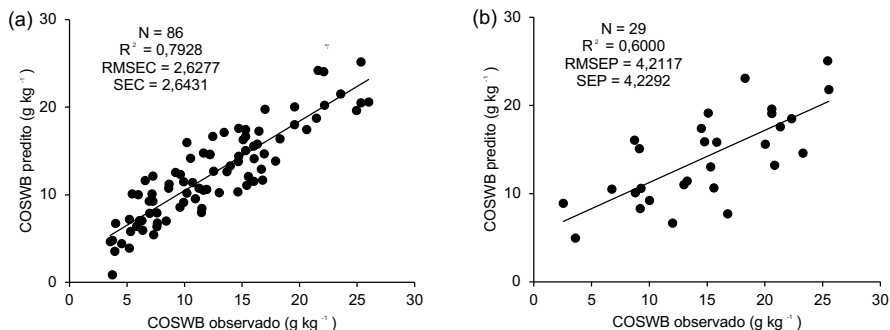
Na etapa de validação externa (Figura 3b), obteve-se  $R^2 = 0,81$  e  $\text{SEP} = 3,33$ , valores que indicam boa acurácia do modelo construído, superando os valores obtidos por Vendrame et al. (2012) na etapa de validação ( $R^2 = 0,69$  e  $\text{SEP} = 3,0$ ), que também avaliaram amostras coletadas em escala regional do bioma Cerrado, com ampla variabilidade. Entretanto, estes valores obtidos ficaram abaixo daqueles encontrados por Brunet et al. (2007), com  $R^2 = 0,86$  e  $\text{SEP} = 2,30$  na etapa de validação. Contudo, neste trabalho, foram utilizadas amostras moídas a 0,2 mm, em que normalmente há menor espalhamento da luz devido à granulometria mais homogênea. O modelo regional construído para predição do  $\text{COS}_{\text{CHNS}}$  na escala do bioma Cerrado pode ser considerado adequado uma vez que o valor obtido para o  $R^2 = 0,73$  está dentro de uma amplitude de resultados apresentados em diversos trabalhos envolvendo a construção de modelos globais de predição em larga escala, que variam de 0,6 a 0,8 (Reeves et al., 2002; Madari et al., 2005; Sørensen; Dalsgaard, 2006).



**Figura 3.** Resultados da etapa de (a) calibração e (b) validação do modelo de predição para carbono orgânico obtido por análise elemental ( $COS_{CHNS}$ ) em amostras de solos do bioma Cerrado.

## Resultados da calibração para predição do carbono orgânico do solo obtido pelo método Walkley & Black

O resultado da calibração do modelo de regressão para predição do carbono orgânico pelo método Walkley & Black (SOCWB, Figura 4a) apresentou comportamento semelhante ao modelo para análise elemental, com  $R^2 = 0,79$  e  $SEC = 2,64$  g/kg de C. Contudo, na etapa de validação externa (Figura 4b), obteve-se  $R^2 = 0,54$  e  $SEP = 4,22$ , valores que indicam baixa acurácia do modelo. Felix et al. (2016), em estudo regional com Latossolos oriundos de basalto na região sul do país, encontram  $R^2 = 0,70$   $SEP = 2,89$  na etapa de validação externa para o teor de carbono por Walkley & Black. Beltrame et al. (2016), avaliando a predição do carbono orgânico obtido pelo método Walkley & Black por espectroscopia NIR em amostras de perfis de solos localizados no Parque Estadual da Mata Seca, Minas Gerais, encontraram valores de  $R^2 = 0,87$  e  $SEP = 1,97$ . Resultados inferiores para a calibração por Walkley & Black em relação à análise elemental são reportados principalmente em estudos de larga escala, provavelmente devido à maior interação com outras propriedades do solo como textura e mineralogia (Madari et al., 2005). Dalal e Henry (1986) atribuíram o baixo rendimento de modelos de predição da matéria orgânica à alta variação na cor do solo, implicitamente relacionada à alta variabilidade pedológica. Uma hipótese para comprovar esse tipo de interferência seria a formação de grupos com características mineralógicas semelhantes, contudo, a análise exploratória realizada com os bancos de espectros não detectou qualquer agrupamento relacionado a formação de grupos de amostras com características espectrais distintas.



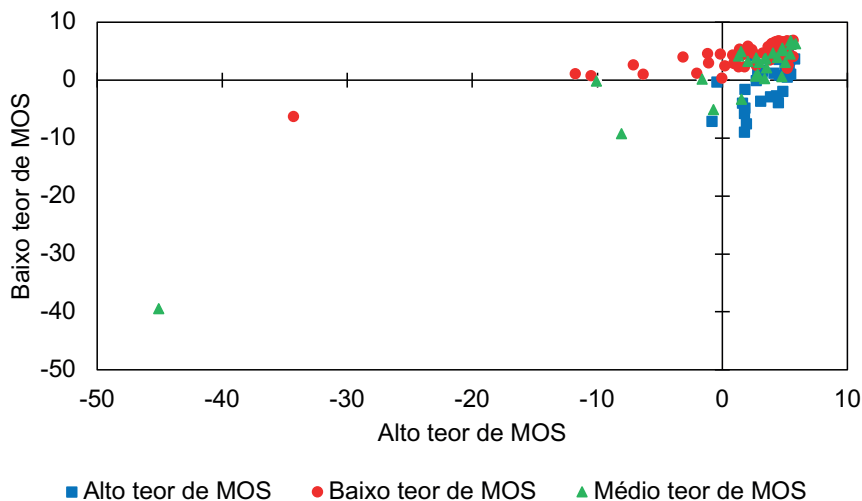
**Figura 4.** Resultados da etapa de (a) calibração e (b) validação do modelo de predição para o carbono orgânico (COS<sub>WB</sub>) em amostras de solos do bioma Cerrado.

## Classificação dos teores de matéria orgânica do solo a partir dos espectros NIR

A análise linear discriminante não apresentou resultados satisfatórios quanto à classificação dos teores de matéria orgânica do solo a partir dos espectros, não sendo possível confirmar a hipótese de que seria viável classificar as amostras em classes de teores de matéria orgânica a partir do espectro, sem necessariamente quantificar o seu teor.

A análise linear discriminante (LDA) é um método de classificação supervisionado e considerado pouco rigoroso em relação a outros métodos de classificação. A LDA, utilizando o método quadrático de ajuste do modelo, apresentou uma acurácia de 68,85% (Figura 5). Contudo, não foi eficiente na classificação das amostras uma vez que não houve uma discriminação dos grupos. Apesar de haver uma tendência de melhor separação entre as classes alta e baixa teor, a classe média de MOS apresentou maior confundimento sendo também a classe que apresentou maior erro relativo de acordo com a matriz de confusão (Tabela 3). A partir da matriz de confusão, observa-se que aproximadamente 26% e 24% das amostras na classe alta e baixa, respectivamente, não foram adequadamente classificadas. Na classe média, o resultado é ainda pior, sendo mais da metade (51%) das amostras erroneamente classificadas pelo modelo LDA. Esse resultado possivelmente está relacionado ao fato de que a classificação do teor de MOS de acordo com o sistema brasileiro de classificação de solos é resultante da interação entre a granulometria e o próprio teor de matéria orgânica (Sousa; Lobato, 2004; Santos et al., 2013). Em tese, o espectro NIR poderia também se-

parar as amostras em grupos de MOS a partir da interação com a textura predita indiretamente pela resposta do espectro à mineralogia. Sabe-se que para o NIR detectar a granulometria de uma amostra há necessidade de que a resposta espectral esteja associada a algum de seus constituintes primários, como carbono e outras moléculas orgânicas, ou mesmo na estrutura dos minerais do solo, uma vez que é considerado constituinte secundário e sem esse tipo de ligação não poderia ser identificado (Xiaobo et al., 2010)



**Figura 5.** Resultados da classificação dos modelos de alta e baixa MOS por análise linear discriminante em amostras de solos do bioma Cerrado.

**Tabela 3.** Matriz de confusão gerada a partir da análise linear discriminante para o banco de 122 amostras de solos do Bioma Cerrado de acordo com as classes de interpretação do teor de matéria orgânica.

	Alta	Baixa	Média
Alta	28	5	7
Baixa	4	43	7
Média	6	9	13

## Conclusões

---

É possível prever com boa acurácia o teor de carbono orgânico do solo determinado com análise elementar (combustão via seca a alta temperatura) a partir da espectroscopia NIR, utilizando um modelo amplo na escala do bioma Cerrado, o que permite inferir que esta técnica pode ser uma ferramenta útil para auxiliar em estudos que envolvam o monitoramento dos estoques de carbono em larga escala.

O modelo PLS gerado a partir dos teores de carbono orgânico determinados pelo método Walkley & Black (combustão via úmida) apresentou resultados satisfatórios na etapa de calibração e baixa acurácia na etapa de validação externa, revelando que esse método pode estar mais sensível a interferências por outros atributos do solo como textura e mineralogia.

Não foi possível classificar adequadamente as amostras a partir dos espectros em quanto as classes de interpretação do teor de matéria orgânica uma vez que há um confundimento do teor de matéria orgânica em função das diferentes classes texturais.

## Agradecimentos

---

Ao Projeto CAPES-COFECUB nº 823/14, intitulado “Spectrosolos” – Rede metodológica de espectrometria de solos (infravermelho visível, próximo e médio). À capes, pela concessão de bolsa (estágio pós-doutoral) ao primeiro autor. À Rede Embrapa em Espectroscopia no Infravermelho Próximo (Projeto nº 05.14.04.001.00.00). Ao Dr. Thomaz A. Rein, por ceder parte das amostras que compuseram os bancos de solos.

## Referências

---

AL-ABBAS, A. H.; SWAIN, P. H.; BAUMGARDNER, M. F. Relating organic matter and clay content to the multispectral radiance of soils. **Soil Science**, v. 114, n. 6, p. 477-485, 1972.

BELTRAME, K. K.; SOUZA, A. M.; COELHO, M. R.; WINKLER, T. C. B.; SOUZA, W. E.; VALDERRAMA, P. Soil organic carbon determination using nirs: evaluation of dichomate oxidation and dry combustion analysis as reference methods in multivariate calibration. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 27, n. 9, p. 1527-1532, 2016.

- BRASIL. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura: plano ABC** (Agricultura de Baixa Emissão de Carbono). Brasília, DF, 2012. 173 p.
- BRUNET, D.; BARTHÈS, B. G.; CHOTTE, J. L.; FELLER, C. Determination of carbon and nitrogen contents in Alfisols, Oxisols and Ultisols from Africa and Brazil using NIRS analysis: Effects of sample grinding and set heterogeneity. **Geoderma**, v. 139, p. 106-117, 2007.
- CHANG, C. W.; YOU, C. F.; HUANG, C. Y.; LEE, T. Q. Determination of chemical and physical properties in marine sediments using a near-infrared reflectance spectroscopic technique. **Applied Geochemistry**, v. 20, p. 1637-1647, 2005.
- CHAPUIS-LARDY, L.; BROSSARD, M.; ASSAD, M. L. L.; LAURENT, J. Y. Carbon and phosphorus stocks of clayey Ferralsols in Cerrado native and agroecosystems, Brazil. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 92, n. 2-3, p. 147-158, 2002.
- CLAESSEN, M. E. C. (Org.). **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. rev. e atual. Rio de Janeiro: EMBRAPA-CNPq, 1997. 212 p. (EMBRAPA-CNPq. Documentos, 1).
- CONYERS, M. K.; POILE, G. J.; OAETES, A. A.; WATERS, D.; CHAN, K. Y. Comparison of three carbon determination methods on naturally occurring substrates and the implication for the quantification of 'soil carbon'. **Soil Research**, n. 49, p. 27-33, 2011.
- CORBEELS, M.; MARCHÃO, R. L.; SIQUEIRA NETO, M.; FERREIRA, E. G.; MADARI, B. M.; SCOPE, E.; BRITO, O. R. Evidence of limited carbon sequestration in soils under no-tillage systems in the Cerrado of Brazil. **Scientific Reports**, n. 6, p. 1-8, 2016.
- COZZOLINO, D.; MORÓN, A. Potential of near-infrared reflectance spectroscopy and chemometrics to predict soil organic carbon fractions. **Soil and Tillage Research**, n. 85, p. 78-85, 2006.
- DALAL, R. C.; HENRY, R. J. Simultaneous determination of moisture, organic carbon, and total nitrogen by near infrared reflectance spectrophotometry. **Soil Science Society of America Journal**, v. 50, n. 1, p. 120-123, 1986.
- FELIX, J. C.; VENDRAME, P. R. S.; MARCHÃO, R. L.; OLIVEIRA, J. F.; GUIMARÃES, M. F.; BROSSARD, M.; BECQUER, T.; BRITO, O. R. Predição de fósforo, carbono e nitrogênio em solos de basalto, por meio de espectroscopia NIR. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1405-1416, 2016.
- FERRARESI, T. M.; SILVA, W. T. L.; MARTIN-NETO, L.; SILVEIRA, P. M.; MADARI, B. E. Espectroscopia de infravermelho na determinação da textura do solo. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 36, p. 1769-1777, 2012.
- GOMES, J. B. C.; CURTI, N.; MOTTA, P. E. F.; KER, J.; MARQUES, J. J. G. S. M.; SCHULZE, D. G. Análise de componentes principais de atributos físicos, químicos e mineralógicos de solos do bioma cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 28, p. 137-153, 2004.
- GROPPO, J. D.; LINS, S. R. M.; CAMARGO, P. B.; ASSAD, E. D.; PINTO, H. S.; MARTINS, S. C.; SALGADO, P. R.; EVANGELISTA, B.; VASCONCELLOS, E.; SANO, E. E.; PAVÃO, E.; LUNA, R.; MARTINELLI, L. A. Changes in soil carbon, nitrogen, and phosphorus due to land-use changes in Brazil. **Biogeosciences**, v. 12, n. 15, p. 4765-4780, 2015.
- INTERGOVERNMENTAL PANEL ON CLIMATE CHANGE (IPCC). **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Agriculture, Forestry and Other Land Use**. Institute for Global Environmental Strategies, Tokio, v. 4, 2006. 644 p.

KER, J. C.; CURTI, N.; SCHAEFER, C. E. G. R.; VIDAL-TORRADO, P. **Pedologia: fundamentos**. Viçosa, MG: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2012.

LOPES, A. S.; COX, F. R. A survey of the fertility status of surface soil under "Cerrado" vegetation in Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, n. 41, p. 742-747, 1977.

MADARI, B. E.; REEVES III, J. B.; COELHO, M. R.; MACHADO, P. L. O. A.; DE-POLLI, H.; BENITES, V. M.; SOUZA, L. F.; MC CARTY, G. W. Mid and near infrared spectroscopic determination of carbon in diverse set of soil from the Brazilian National Soil Collection. **Spectroscopy Letters**, n. 38, p. 721-740, 2005.

MADEIRA NETTO, J. S.; BAPTISTA, G. M. M. Reflectância espectral de solos. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2000. p. 55.

MARCHÃO, R. L.; BECQUER, T.; BRUNET, D. **Predição dos teores de carbono e nitrogênio do solo utilizando espectroscopia de infravermelho próximo**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2011. p. 21. (Embrapa Cerrados. Boletim de Pesquisa de Desenvolvimento, 304).

McCARTY, G. W.; REEVES III, J. B.; REEVES, V. B.; FOLLETT, R. F.; KIMBLE, J. M. Mid-infrared and near-infrared diffuse reflectance spectroscopy for soil carbon measurement. **Soil Science Society of America Journal**, v. 66, p. 640-646, 2002.

McCARTY, G. W.; REEVES III, J. B.; YOST, R.; DORAISWAMY, P. C.; DOUMBIA, M. Evaluation of methods for measuring soil organic carbon in West African soils. **African Journal of Agricultural Research**, v. 5, p. 2169-2177, 2010.

NELSON, D. W.; SOMMERS, L. E. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: BLACK, C. A. (Ed.). *Methods of soil analysis: chemical methods*. Madison: Soil Science of America and American Society of Agronomy, 1996. p. 961-1010. Part. 3.

PASQUINI, C. Near Infrared Spectroscopy: Fundamentals, Practical Aspects and Analytical Applications. **Journal of the Brazilian Chemical Society**, v. 14, n. 2, p. 198-219, 2003.

PIMENTEL, L. C. F.; CHAVES, C. R.; FREIRE, L. A. A.; AFONSO, J. C. O inacreditável emprego de produtos químicos perigosos no passado. **Química Nova**, n. 29, p. 1138-1149, 2006.

REEVES III, J.; McCARTY, G.; MIMMO, T. The potencial reflectance spectroscopy for the determination of carbon inventories in soils. **Environmental Pollution**, n.116, p. 277-284, 2002.

REEVES, J. B.; SMITH, D. B. The potential of mid- and near-infrared diffuse reflectance spectroscopy for determining major - and trace-element concentrations in soils from a geochemical survey of North America. **Applied Geochemistry**, v. 24, p. 1472-1481, 2009.

RESCK, D. V. S.; FERREIRA, E. A. B.; FIGUEIREDO, C. C.; ZINN, Y. L. Dinâmica da matéria orgânica no Cerrado. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. rev. atua. Porto Alegre: Metrópole, 2008. 654 p.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. rev. e ampl. Brasília, DF: Embrapa, 2013. 353 p.

SARKHOT, D. V.; GRUNWALD, S.; GE, Y.; MORGAN, C. L. S. Comparison and detection of total and available soil carbon fractions using visible/near infrared diffuse reflectance spectroscopy. **Geoderma**, n. 164, p. 22-32, 2011.

- SATO, J. H.; FIGUEIREDO, C. C.; MARCHÃO, R. L.; MADARI, B. E.; BENEDITO, L. E. C.; BUSATO, J. G.; SOUZA, D. M. Methods of soil organic carbon determination in Brazilian savannah soils. **Scientia Agricola**, v. 71, n. 4, p. 302-308, 2014.
- SENA, M. M.; POPPI, R. J.; FRIGHETTO, R. T. S.; VALARINI, P. J. Avaliação do uso de métodos quimiométricos em análise de solos. **Química Nova**, v. 23, n. 4, p. 547-556, 2000.
- SEGNINI, A.; SANTOS, L. M.; SILVA, W. T. L.; MARTIN NETO, L.; BORATO, C.; MELO, W. J.; BOLONHEZI, D. Estudo comparativo de métodos para a determinação da concentração de carbono em solos com altos teores de Fe (Latosolos). **Química Nova**, n. 31, p. 94-97, 2008.
- SOIL SURVEY STAFF. **Keys to Soil Taxonomy**. 10. ed. United States Department of Agriculture – USDA, 2006.
- SØRENSEN, L. K.; DALSGAARD, S. Spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. **Geoderma**, v. 131, p. 59-75, 2006.
- SOUSA, D. M. G., LOBATO, E. **Cerrado: correção do solo e adubação**. 2. ed. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2004.
- SOUZA, D. M.; MADARI, B. E.; GUIMARÃES, F. F. Aplicação de técnicas multivariadas e inteligência artificial na análise de espectros de infravermelho para determinação de matéria orgânica em amostras de solos. **Química Nova**, v. 35, p. 1738-1745, 2012.
- SOUZA, D. M.; MORAIS, P. A. O.; MATSUSHIGE, I.; ROSA, L. A. Development of Alternative Methods for Determining Soil Organic Matter. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 40, 2016.
- SORIANO-DISLA, J. M.; JANIK, L. J.; VISCARRA ROSSEL, R. A.; MACDONALD, L. M.; McLAUGHLIN, M. J. The Performance of Visible, Near-, Mid-Infrared Reflectance Spectroscopy for Prediction of Soil Physical, Chemical and Biological Properties. **Applied Spectroscopy Reviews**, v. 49, p. 139-186, 2014.
- STENBERG, B.; VISCARRA ROSSEL, R.A.; MOUAZEN A.M.; WETTERLIND, J. Visible and near infrared spectroscopy in soil science. In: SPARKS, D. L. (Ed.). **Advances in Agronomy**. San Diego: Academic Press. v. 107, p. 163-215, 2010.
- STEVENS, A.; NOCITA, M.; TÓTH, G.; MONTANARELLA, L.; van WESEMAEL, B. Prediction of Soil Organic Carbon at the European scale by Visible and Near InfraRed Reflectance Spectroscopy. **Plos One**, v. 3, n. 6, p. 1-13, 2013.
- STRASSBURG, B. B. N.; LATAWIEC, A. E.; BARIONI, L. G.; NOBRE, C. A.; SILVA, V. P.; VALENTIM, J. F.; VIANA, M.; ASSAD, E. D. When enough should be enough: improving the use of current agricultural lands could meet production demands and spare natural habitats in Brazil. **Global Environmental Change**, v. 28, p. 84–97, 2014.
- VAN BREEMEN, N.; BUURMAN, P. **Soil Formation**. Springer, 1998.
- VENDRAME, P. R. S.; MARCHÃO, R. L.; BRUNET, D.; BECQUER, T. The potential of NIR spectroscopy to predict soil texture and mineralogy in Cerrado Latosols. **European Journal of Soil Science**, v. 63, p.743-753, 2012.
- VENDRAME, P. R. S.; MARCHÃO, R. L.; BRITO, O. R.; MARTINS, E. S.; BECQUER, T. **Predição da granulometria e mineralogia de latossolos do Cerrado utilizando espectroscopia de infravermelho próximo**. Planaltina, DF: Embrapa Cerrados, 2015. (Embrapa Cerrados. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 326).
- VISCARRA ROSSEL, R.A.; HICKS, W.S. Soil Carbon and its fractions estimated by visible-near infrared transfer functions. **European Journal of Soil Science**, n.66, p.438-450, 2015.



WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of Degtjareff method for determining soil organic matter, and proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, n. 37, p. 29-38, 1934.

XIAOBO, Z.; JIEWEN, Z.; POVEY, M.J.W.; HOLMES, M.; HANPIN, M. Variables selection methods in near-infrared spectroscopy. **Analytica Chimica Acta**, v. 667, p. 14-32, 2010.

**Embrapa**

---

***Cerrados***

MINISTÉRIO DA  
AGRICULTURA, PECUÁRIA  
E ABASTECIMENTO



PÁTRIA AMADA  
**BRASIL**  
GOVERNO FEDERAL