

Avanços na observação e no conhecimento do solo via o sensoriamento próximo do solo

Alexandre ten Caten¹, Ricardo Simão Diniz Dalmolin², Elisângela Benedet da Silva³,
Taciara Zborowski Horst Heinen⁴ e José Lucas Safanelli⁵

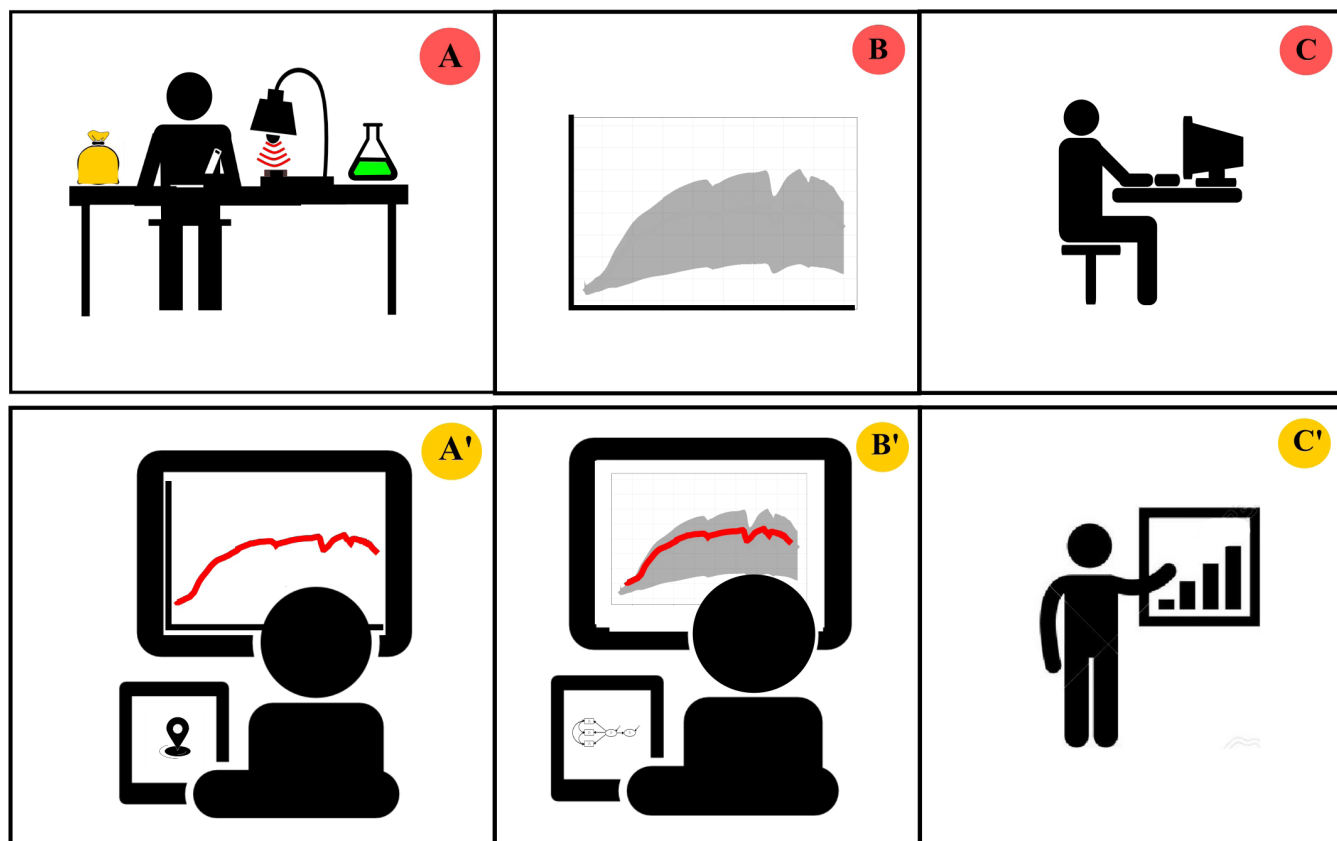


Figura 1S. Etapas da espectroscopia de reflectância. Fase de calibração: A) obtenção de dados espectrais e laboratoriais de referência; B) construção de uma biblioteca espectral; C) tratamento e modelagem matemática. Fase de aplicação: A') obtenção da leitura espectral; B') aplicação no modelo calibrado; C') obtenção do resultado

Autora: Taciara Z. H. Heinen

Figure 1S. Phases of reflectance spectroscopy. Calibration phase: A) obtaining spectral and laboratory reference data; B) proposing a spectral library; C) treatment and mathematical modeling. Application phase: A') obtaining spectral reading; B') application in the calibrated model; C') getting results

Author: Taciara Z. H. Heinen

Recebido em 24/8/2020. Aceito para publicação em 8/1/2021.

¹ Engenheiro-agrônomo, Dr., Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC) Campus Curitibanos, Rodovia Ulysses Gabaordi, km3, Caixa Postal 101, 89520-000 Curitibanos, SC, fone: (49) 3241 6355, e-mail: ten.caten@ufsc.br.

² Engenheiro-agrônomo, Dr., Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), Departamento de Solos, Av. Roraima, 1000, 97105-900 Santa Maria, RS, e-mail: dalmolin@ufsm.br.

³ Engenheira-agrônoma, Dr^a., Empresa de Pesquisa Agropecuária e Extensão Rural de Santa Catarina (EPAGRI) / Centro de Informações de Recursos Ambientais e de Hidrometeorologia de Santa Catarina (CIRAM), Rod. Admar Gonzaga, 1347, Itacorubi, Caixa Postal 502, 88034-901 Florianópolis, SC, e-mail: elisangelasilva@epagri.sc.gov.br.

⁴ Engenheira Florestal, MSc., UFSM, Departamento de Solos, Av. Roraima, 1000, 97105-900 Santa Maria, RS, e-mail: tacihorst@gmail.com.

⁵ Engenheiro-agrônomo, Dr., Universidade de São Paulo (USP) / Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" (ESALQ), Av. Pádua Dias, 11, Caixa Postal 09, 13416-900 Piracicaba, SP, e-mail: jose.lucas.safanelli@usp.br.

Tabela 1S. Características de diferentes métodos proximais de detecção do solo. Fonte: adaptado de Viscarra-rossel et al. (2011) e Vicarra-rossel et al. (2016)

Table 1S. Characteristics of different proximal soil sensing methods. Source: Adapted from Viscarra-rossel et al. (2011) e Vicarra-rossel et al. (2016)

Técnica	Medida	Energia	Operação	Inferência	
	Invasivo (In) /não invasivo (N)	Ativo (A) /passivo (P)	Fixo (F) /móvel (M)	Direta (D) /indireta (I)	
Fluorescência de raio X (XRF)	Descrição	N	A	F/M	D
	O que é	Técnica que utiliza a medida de raio X fluorescente (ou secundário) emitida a partir de uma amostra quando esta é excitada por uma fonte primária de raios X			
	Como funciona	Quando os raios X atingem a superfície das partículas do solo, os elétrons dos constituintes do solo se movem e liberam energia na forma de fluorescência. Como cada elemento é único, a intensidade da energia é proporcional à concentração do elemento no material. Por isso, o valor característico da energia emitida é usado para identificação do elemento de acordo com a literatura, e a intensidade da fluorescência permite a sua quantificação			
	Aplicações práticas	Essa técnica já foi utilizada para análise de metais pesados no solo (ROUILLON & TAYLOR, 2016), análise do teor de ferro do solo (RIBEIRO et al., 2017), identificar do material de origem e grau de pedogênese (STOCKMANN et al., 2016), estimar propriedades químicas do solo (ANDRADE et al., 2020; TEIXEIRA et al., 2020) e determinar a textura (SILVA et al., 2019)			
Espectroscopia de raio gama	Descrição	In (<i>in/ex situ</i>)	A/P	F/M	D/I
	O que é	Técnica que utiliza a medida de raios gama emitida por isótopos emissores de raios gama (elementos radioativos)			
	Como funciona	Emissões de raios gama de uma amostra são capturadas por um detector e convertidas em sinais elétricos, amplificadas e processadas por um sistema eletrônico que gera um espectro de contagens de emissões em função da energia de emissões. A partir deste espectro é possível inferir quais são os elementos presentes em uma amostra e suas respectivas concentrações.			
	Aplicações práticas	Essa técnica já foi utilizada para determinar a retenção de água no solo (PIRES et al., 2005), densidade (PIRES et al., 2009), porosidade do solo (Ferreira & Pires, 2016), distinguir rochas básicas de ácidas (MODENA et al., 2016), além de identificar camadas compactadas no solo (BAMBERG et al., 2009)			
Espectroscopia de reflectância (ERD) Vis-NIR/MIR	Descrição	N	A/P	F/M	D/I
	O que é	Técnica que utiliza a medida de reflectância/absorbância de uma amostra advinda de vibrações fundamentais e sobretons de elétrons quando esta é excitada por uma fonte primária de energia			
	Como funciona	Espectros de reflectância ou absorbância são obtidos a partir da interação do solo com a radiação eletromagnética. Os espectros são então relacionados a informações prévias de solo usando funções empíricas e estas funções são usadas para prever características para novas amostras onde apenas a curva espectral é necessária			
	Aplicações práticas	Essa técnica já foi utilizada para quantificar o conteúdo de carbono orgânico do solo (DOTTO et al., 2018; MOURA-BUENO et al., 2020), para prever a textura (DOTTO et al., 2016) e o teor de argila e areia do solo (Silva et al., 2019), além de ajudar a rastrear fontes de sedimentos (TIECHER et al., 2017)			

(continua)

(continuação)

Técnica	Medida	Energia	Operação	Inferência	
	Invasivo (In) / não invasivo (N)	Ativo (A) / passivo (P)	Fixo (F) / móvel (M)	Direta (D) / indireta (I)	
Radar de penetração no solo	Descrição	N	A	F/M	D
	O que é	Técnica que utiliza a medida da amplitude de energia refletida quando pulsos curtos de energia de alta frequência são aplicados ao solo			
	Como funciona	Os radares que possuem antenas transmissoras e receptoras são utilizados para medir a constante dielétrica do solo. A partir de contrastes entre constantes dielétricas é possível identificar a relação entre água, ar e minerais do solo			
	Aplicações práticas	Essa técnica já foi utilizada para medir a umidade do solo (KLOTZSCHE et al., 2018), identificar mudanças verticais bruscas e contrastantes como camadas compactadas (MUÑIZ et al., 2016) e acúmulo iluvial de material orgânico (WINKELBAUER et al., 2011)			
Indução eletromagnética	Descrição	N	A	M	I
	O que é	Medida da corrente elétrica do solo. É chamada condutividade elétrica aparente do solo (CEa), que comumente é expressa em unidades de milisemens por metro (mS/m)			
	Como funciona	Uma corrente elétrica conhecida é induzida e, ao ser aplicada em contato direto com o solo, gera um campo eletromagnético que é recebido por uma bobina. O sinal produzido por essa corrente induzida na amostra nos dá a correspondente medida de condutividade elétrica do solo			
	Aplicações práticas	Pode ser utilizada para medir a umidade do solo (HUTH & POULTON, 2007) concentração de íons em solução, textura do solo (KELLEY et al., 2017), teor de argila do solo (TRIANTAFILIS & LESCH, 2005)			
Potenciometria íon-seletiva	Descrição	In (<i>in/ex situ</i>)	P	F/M	D
	O que é	Sistema eletroquímico de medida da atividade iônica de um elemento na solução do solo			
	Como funciona	Os sistemas são formados por membranas seletivas a íons específicos e um eletrodo de referência. A diferença potencial dada em milivolt (mV) entre a membrana seletiva e a membrana de referência é mensurada e convertida em atividade do íon específico na solução			
	Aplicações práticas	Pode ser utilizada para medir o pH do solo (ADAMCHUK et al., 2007), K, NO ₃ (BROUDER et al., 2003; ADAMCHUK et al., 2005; SETHURAMASAMYRAJA et al., 2008)			
Susceptibilidade magnética	Descrição	In (<i>in/ex situ</i>)	A	F/M	D
	O que é	Medida do grau em que um material pode ser magnetizado quando sujeito a um campo magnético aplicado			
	Como funciona	O solo pode ser considerado conforme seu comportamento magnético e a interação entre o ímã e os minerais com expressão magnética presentes na amostra de solo que em uma balança geram uma força-peso. Esta força é, então, convertida em susceptibilidade magnética, utilizando-se uma curva-padrão			
	Aplicações práticas	Pode ser utilizada para inferir o grau de pedogênese (CERVI et al., 2019), posição da encosta, classe de drenagem do solo, textura, composição mineralógica (SOUZA JUNIOR et al., 2010)			

Referências

- ADAMCHUK, V.I.; LUND, E.D.; REED, T.M.; FERGUSON, R.B. Evaluation of an on-the-go technology for soil pH mapping. **Precision Agriculture**, n.8, p.139-149, 2007.
- ADAMCHUK, V. I., LUND, E. D., SETHURAMASAMYRAJA, B., MORGAN, M. T., DOBERMANN, A., & MARX, D. B. Direct measurement of soil chemical properties on-the-go using ion-selective electrodes. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 48, n. 3, p. 272-294, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2005.05.001>.
- ANDRADE, R.; SILVA, S.H.G.; WEINDORF, D.C.; CHAKRABORTY, S.; FARIA, W.M.; MESQUITA, L. F.; CURI, N. Assessing models for prediction of some soil chemical properties from portable X-ray fluorescence (pXRF) spectrometry data in Brazilian Coastal Plains. **Geoderma**, v.357, 113957, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.113957>.
- BAMBERG, A. L., PAULETTO, E. A., GOMES, A. D. S., TIMM, L. C., PINTO, L. F. S., LIMA, A. C. R. D., & SILVA, T. R. D. Densidade de um Planossolo sob sistemas de cultivo avaliada por meio da tomografia computadorizada de raios gama. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, n. 5, p. 1079-1086, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000500001>.
- Brouder, S.M.; Thom, M.; Adamchuck, V.I.; Morgan, M.T. Potential Uses of
- Ion-Selective Potassium Electrodes in Soil Fertility Management. **Communications in soil science and plant analysis**, v.34, p.2699-2726, 2003.
- CERVI, E. C.; MAHER, B.; POLISELI, P. C.; DE SOUZA JUNIOR, I. G.; DA COSTA, A. C. S. Magnetic susceptibility as a pedogenic proxy for grouping of geochemical transects in landscapes. **Journal of Applied Geophysics**, v. 169, p. 109-117, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jappgeo.2019.06.017>.
- Dotto, A.C.; Dalmolin, R.S.D.; Caten, A.T.; Moura-Bueno, J.M. Potential of spectroradiometry to classify soil clay content. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.40, e0151105, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1590/18069657rbcS20151105>.
- Ferreira, T.R.; Pires, L.F. Soil porosity distribution representative elementary area analyzed through gamma-ray computed tomography. **International agrophysics**, v.30, p.447-456, 2016.
- HUTH, N. I.; POULTON, P. L. An electromagnetic induction method for monitoring variation in soil moisture in agroforestry systems. **Soil Research**, v. 45, n. 1, p. 63-72, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1071/SR06093>.
- KELLEY, J.; HIGGINS, C. W.; PAHLOW, M.; NOLLER, J. Mapping soil texture by electromagnetic induction: a case for regional data coordination. **Soil Science Society of America Journal**, v. 81, n. 4, p. 923-931, 2017. DOI: <https://doi.org/10.2136/sssaj2016.12.0432>.
- KLOTZSCHE, A.; JONARD, F.; LOOMS, M.C.; VAN DER KRUK, J.; HUISMAN, J.A. Measuring soil water content with ground penetrating radar: A decade of progress. **Vadose Zone Journal**, v.17, 180052, 2018. DOI: <https://doi.org/10.2136/vzj2018.03.0052>.
- MODENA, R.C.C.; HOFF, R.; FARIAS, A.R.; VIEL, J.A.; COELHO, O.G.W. Gamma-ray Spectrometry for Distinguishing Acid and Basic Rocks of The Serra Geral Formation, In the Serra Gaúcha Wine Region, Brazil. **Brazilian Journal of Geophysics**, v.34, p.455-467, 2016.
- MUÑIZ, E.; SHAW, R.K.; GIMENEZ, D.; WILLIAMS, C.A.; KENNY, L. Use of ground-penetrating radar to determine depth to compacted layer in soils under pasture. In: HARTEMINK A., MINASNY B. (Ed.). **Digital Soil Morphometrics**. Progress in Soil Science. Springer, 2016, p. 411-421.
- PIRES, L.F.; BACCHI, O.O.; REICHARDT, K. Soil water retention curve determined by gamma-ray beam attenuation. **Soil and Tillage Research**, v.82, p. 89-97, 2005.
- PIRES, L.F.; ROSA, J.A.; PEREIRA, A.B.; ARTHUR, R.C.J.; BACCHI, O.O.S. Gamma-ray attenuation method as an efficient tool to investigate soil bulk density spatial variability. **Annals of Nuclear Energy**, v.36, p.1734-1739, 2009.
- RIBEIRO, B.T.; SILVA, S.H.G.; SILVA, E.A.; GUILHERME, L.R.G. Aplicações da fluorescência de raios-X portátil (pXRF) na Ciência do Solo tropical. **Ciência e Agrotecnologia**, v.41, p.245-254, 2017.
- ROUILLON, M.; TAYLOR, M.P. Can field portable X-ray fluorescence (pXRF) produce high quality data for application in environmental contamination research? **Environmental Pollution**, v.214, p.255-264, 2016.
- SETHURAMASAMYRAJA, B.; ADAMCHUK, V.I.; DOBERMANN, A.; MARX, D.B.; JONES, D.D.; MEYER, G.E. Agitated soil measurement method for integrated on-the-go mapping of soil pH, potassium and nitrate contents. **Computers and electronics in agriculture**, v.60, p.212-225, 2008.
- SOUZA JUNIOR, I.G.D.; COSTA, A.C.S.D.; VILAR, C.C.; HOEPERS, A. Mineralogia e susceptibilidade magnética dos óxidos de ferro do horizonte B de solos do Estado do Paraná. **Ciência Rural**, v.40, p.513-519, 2010.
- STOCKMANN, U.; CATTLE, S.R.; MINASNY, B.; MCBRATNEY, A.B. Utilizing portable X-ray fluorescence spectrometry for in-field investigation of pedogenesis. **Catena**, v. 139, p.220-231, 2016.
- TEIXEIRA, A. F. S.; PELEGRINO, M. H. P.; FARIA, W. M.; SILVA, S. H. G.; GONÇALVES, M. G. M.; JÚNIOR, F. W. A.; WEINDORF, D. C. Tropical soil pH and sorption complex prediction via portable X-ray fluorescence spectrometry. **Geoderma**, v. 361, p. 114132, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.114132>.
- TIECHER, T.; CANER, L.; MINELLA, J.P.G.; EVRARD, O.; MONDAMERT, L.; LABANOWSKI, J.; RHEINHEIMER, D.D.S. Tracing sediment sources using mid-infrared spectroscopy in Arvorezinha Catchment, Southern Brazil. **Land Degradation & Development**, v.28, p.1603-1614, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1002/ldr.2690>.
- TRIANTAFILIS, J.; LESCH, S. M. Mapping clay content variation using electromagnetic induction techniques. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 46, n. 1-3, p. 203-237, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2004.11.006>.
- WINKELBAUER, J.; VÖLKELE, J.; LEOPOLD, M.; BERNT, N. Methods of surveying the thickness of humous horizons using ground penetrating radar (GPR): an example from the Garmisch-Partenkirchen area of the Northern Alps. **European journal of forest research**, v. 130, n. 5, p. 799-812, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10342-010-0472-2>. ■