

ESPECTRORRADIOMETRIA NA AGRICULTURA DE PRECISÃO: ESTUDO DE CASO EM SOLOS DE TERRAS BAIXAS, CAPÃO DO LEÃO, RS, BRASIL

José Maria Filippini
Alba
EMBRAPA

Lúcia E. C. Cruz

Jorge R. Ducati
CEPSRM/UFRGS

João Mateus M.
Domingues
UFSC

Jones O. Moraes
UFPEL

Henrique N. Cunha
UFSM

RESUMO

A espectrorradiometria de reflectância, seus princípios básicos e antecedentes, apresentam-se como potencial aplicação para agricultura de precisão. No entanto, seu uso ainda é limitado, seja pela quantidade de dados gerados ou pela natureza sofisticada da sua interpretação. Apresentou-se também um estudo de caso com amostras de solos de terras baixas, coletadas em malha regular e analisadas por métodos químicos convencionais e via espectrorradiometria. O objetivo do estudo de caso foi relacionar e simular as variáveis físico-químicas em função das bandas espectrorradiométricas. O processo estatístico multivariado aplicado envolveu várias etapas: (1) análise fatorial; (2) análise das dependências; (3) análise de agrupamentos; (4) modelos de regressão. Cinco variáveis físico-químicas (Al, Ca, K, MO e P) foram modeladas com 90% da variância explicada em cada caso, para o maior agrupamento. Um provável processo de automação poderá ser desenvolvido considerando os princípios apresentados.

Palavras-chave: Banco de Dados; Espectrorradiometria; Pedologia,
Mineração de Dados

1. INTRODUÇÃO

O primeiro projeto da Embrapa relacionado com Agricultura de Precisão (AP) data de meados da década de 1990, com a liderança da Unidade de Milho e Sorgo, Sete Lagoas – MG, orientação para mecanização e culturas de grãos. Nos 2000, houve uma mudança de rumo, com a inserção de um maior número de pesquisadores, Unidades da Embrapa e incorporação de procedimentos e instrumentos direcionados a outras culturas: cana-de-açúcar, fruticultura, silvicultura e pastagens. Nessa ocasião, a liderança foi efetivada pela Embrapa Instrumentação Agropecuária e se mantém até nossos dias. No entanto, recentemente houve uma atualização na carteira de projetos da empresa, com foco em inovação e projetos direcionados a produtos em parceria com o setor privado. Assim, surgiram três projetos menores direcionados para AP e tecnologias habilitadoras, ou seja, aquelas com capacidade para causar transformações radicais nos padrões culturais costumeiros, no contexto do portfólio “Automação”. As lideranças desses projetos localizam-se nas regiões Sudeste e Sul, no entanto com rede de pesquisa abrangendo todas as regiões do Brasil.

Na atualidade o Global Positioning System (GPS, US) é bastante popular e existem outros sistemas do tipo no mundo, como o Compass (China), Galileo (CU) e o Glonass (Rússia). Stafford (2000) aponta o GPS como a tecnologia que impulsionou o desenvolvimento do conceito de AP nos 70s; pois, com o registro de altitude, longitude e latitude, as máquinas agrícolas podem operar em locais específicos, inclusive a noite e sem motoristas, graças ao desenvolvimento do piloto automático. A disponibilização de colhedoras com GPS e sensor de produtividade demorou em chegar ao Brasil, porém não houve grande adoção por parte dos produtores, devido a dificuldade de processamento dos dados, e a falta de percepção da utilidade dos mapas de produção (Resende et al., 2010).

Filippini-Alba e Zanella (2016) analisaram várias definições da expressão Agricultura de Precisão (AP), no período 1998 a 2011, sugerindo uma tendência de evolução no tempo, do conceito de “manejo” para o de “gestão” (postura gerencial), sendo que todas as definições mencionam, de maneira direta ou indireta, a expressão “variabilidade espacial”.

Zhang et al. (2002) relacionam AP ao aprimoramento e desenvolvimento de sensores, à automação de processos e formas de monitoramento, ao gerenciamento da informação e ao uso de ferramentas de sensoriamento remoto. Esta definição avançou nos últimos anos, por meio das tecnologias habilitadoras como automação, big data, computação em nuvem, integração de sistemas, internet das coisas

e simulação, derivando na Agricultura Digital ou de Informação, E-agricultura, Fazenda inteligente ou Agricultura 4.0 (CONBAP 2018, Curitiba – PR), expressões não estritamente idênticas.

Kardeván (2007) menciona que a espectrorradiometria de reflectância (ER) é uma técnica de sensoriamento remoto, que envolve medições em campo de espectros de reflectância no intervalo de comprimentos de onda de 400 nanômetros a 2400 nanômetros, sua interpretação e processamento, considerando como alvos, águas, alimentos, metais, minerais, solos, rochas, vegetação, em fim, praticamente qualquer tipo de material industrial ou natural. Na época do artigo anterior, ainda não tinha acontecido o uso intensivo de veículos aéreos não tripulados, VANTs (Jorge; Inamasu, 2014), ou também drones, zangão em inglês, como são conhecidos aqueles veículos com várias hélices, devido a que reproduzem um som parecido ao do inseto. Já existem câmaras hiperespectrais a bordo de VANTs, mas há ainda restrições em termos de processamento de dados, custo e segurança dos equipamentos.

Analisando o desenvolvimento anterior observa-se que AP e espectrorradiometria de reflectância (ER) são temas relacionados com automação, big data e simulação. Neste capítulo se apresentam rapidamente os fundamentos da ER e alguns antecedentes das aplicações para AP, mas principalmente se expõe um método direcionado para AP, baseado no uso de ER em solos de terras baixas, na estação experimental Terras Baixas (EETB), Embrapa, Capão do Leão – RS, visando estudar a correlação das bandas espectrorradiométricas com variáveis físico-químicas na tentativa de estabelecer modelos de regressão entre ambos os tipos de variáveis e simular os teores de nutrientes no solo, com a correspondente redução da amostragem e em consequência das análises químicas. Estudos semelhantes foram compilados por Ge et al. (2007).

2. FUNDAMENTOS DA ESPECTRORRADIOMETRIA DE REFLECTÂNCIA (ER)

Segundo Kardeván (2007), expressões equivalentes a ER seriam imageamento espectrométrico, espectroscópico ou hiperespectral, porém, ele adverte que as palavras espectrometria e espectroscopia são utilizadas para definir técnicas químico-analíticas como espectrometria de massas e medições envolvendo luz, respectivamente. Por outro lado, hiperespectral relaciona-se com imagens de alta resolução espectral. Na tentativa de esclarecer os termos, é possível encontrar as definições à continuação na internet: “Espectroscopia é o estudo dos espectros luminosos” (<https://www.dicio.com.br/espectroscopia/>), por exemplo, os astrofísicos usam os espectros das es-

telas para conhecer sua composição química, pois cada elemento emite luz em bandas específicas que são registradas no espectro. Já “Espectrometria é a medição relacionada a comprimentos de onda específicos de um espectro” (<https://www.dicio.com.br/espectrometria/>), a espectrometria de absorção atômica (Amorim et al., 2008) ilustra a situação.

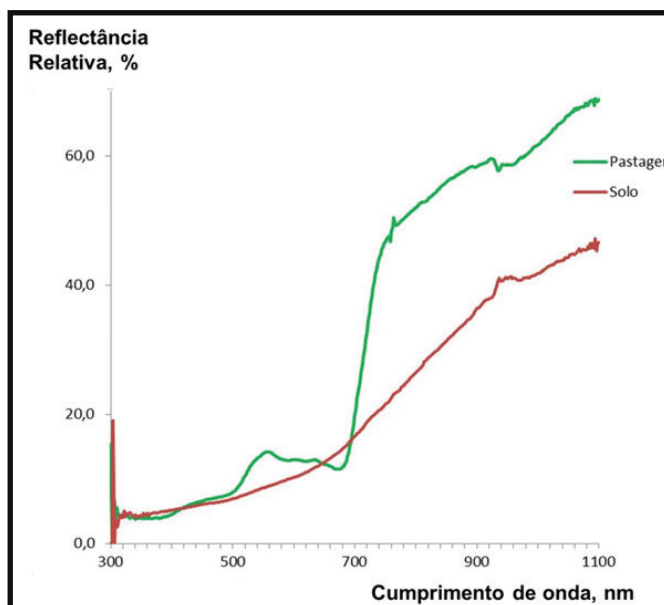
Como a ER é uma derivação do sensoriamento remoto, aplicam-se os mesmos princípios relacionados com a luz e o espectro eletromagnético, que podem ser consultados em qualquer livro de fundamentos do tema (Moreira, 2005). Considerando a luz como uma onda, ela pode ser caracterizada pelo comprimento de onda, ou seja, a distância entre duas posições equivalentes, por exemplo, dois picos consecutivos ou dois vales consecutivos. Ainda, a velocidade da luz iguala-se ao produto do comprimento de onda pela frequência, o que explica a relação inversa entre essas magnitudes, de maneira que maior energia ou frequência, menor comprimento de onda.

No que refere aos comprimentos de onda relacionados ao espectro eletromagnético, variam de 10^{-16} metros a 10^8 metros ou 10^{-6} Angströms a 10^5 quilômetros; sendo que $1 \text{ \AA} = 0,1 \text{ nm} = 10^{-4} \text{ micras} (\mu\text{m}) = 10^{-7} \text{ milímetros (mm)} = 10^{-8} \text{ centímetros (cm)} = 10^{-10} \text{ metros (m)}$. Assim, começando pelos menores comprimentos de onda, acontecem as maiores energias, que correspondem aos raios Gama, cuja transição para os raios X acontece entre 10^{-12} m (ou $0,01 \text{ \AA}$) e 10^{-10} m (ou $1 \text{ \AA}$). Existe uma regra empírica que associa o comprimento de onda com o tamanho das partículas que interagem com a respectiva energia (onda). Assim, se o núcleo atômico tem tamanho da ordem de 10^{-14} m (ou $0,0001 \text{ \AA}$), um átomo corresponde a 10^{-10} m (ou $1 \text{ \AA}$) e no caso de moléculas, como por exemplo a de ácido oleico, composto orgânico com cadeia de 18 átomos de C, cuja molécula tem comprimento de $2 \times 10^{-9} \text{ m}$ (ou $20 \text{ \AA}$), confere-se que os raios Gama interagirão com o núcleo atômico, em reações de alta energia, relacionadas aos processos de fusão e fissão nuclear, enquanto que, os raios X de alta energia interagem com os elétrons internos do átomo, aqueles mais próximos do núcleo (core atômico), sendo que na medida que acontece a transição para o ultravioleta, em 10^{-8} m (ou 10 nm), temos as interações com os elétrons externos, também conhecidos como elétrons de valência e relacionados às ligações moleculares, por isso o uso da espectroscopia ultravioleta é ligada ao estudo da estrutura molecular ou quantificação de compostos orgânicos específicos.

A partir de 400 nm inicia o espectro de luz visível, com a cor azul, e também, o intervalo de comprimentos de onda mais significativos para o sensoriamento remoto. Continuando, a cor verde em 500

nm , laranja em 600 nm , vermelho em 700 nm e então, o red-edge até 730 nm . Em 760 nm inicia o infravermelho próximo, near infrared em inglês, também conhecido pela abreviatura NIR, avançando até 2500 nm . Na Figura 1, o ombro da curva de pastagem em 550 nm corresponde a cor verde e o salto posterior a partir de 700 nm relaciona-se a resposta da vegetação sadia no NIR, em função do teor de clorofila. Observe-se a diferença de comportamento do espectro correspondente ao solo sem cobertura.

Figura 1. Espectros de “pastagem” e “solo sem cobertura” gerados no campo com um espectrorradiômetro LICOR® 1800 (401 bandas, resolução 2 nm).



No intervalo de comprimentos de onda de 2500 nm a 50000 nm ($0,5 \text{ mm}$) ocorre o infravermelho médio, de 50000 nm a 106 nm (1 mm) o infravermelho distante, de 1 mm a 1 m as micro-ondas e posteriormente as ondas de rádio. Esses intervalos de comprimentos de onda não são explorados em ER.

Rossel et al. (2006, p. 60-61) mencionam a existência de vibrações moleculares fundamentais intensas relacionadas aos componentes do solo nos comprimentos de onda de 700 nm a 2500 nm . Combinações e harmônicos fracos dessas vibrações devido a estiramento, torsão ou rotação de grupos NH, OH e CH dominam o NIR e transições eletrônicas o Visível. Esses fenômenos também podem ocorrer no infravermelho médio, em sobreposição, de maneira que a interpretação nesses intervalos de comprimentos de onda, NIR e visível, são mais complicadas. Por isso a ER precisa de técnicas estatísticas multivariadas para discriminar as respostas dos solos.

A luz do sol varia de 200 nm a 2500 nm com um pico intenso no visível, sendo que o mesmo é afetado pelos componentes da atmosfera, que tem vários intervalos de absorção, principalmente no infravermelho. Esta interferência afeta as imagens de satélite, mas

não no caso de espectrofotômetros, pois por trabalhar próximos ao alvo, a interação é insignificante.

Assim, pelo mencionado até o momento, a ER é uma técnica não destrutiva, proximal, pois trabalha em curta distância sem contato com o objeto medido, hiperespectral, que pode ser usada para analisar diferentes materiais, em estudos independentes ou como complementação de imagens de sensoriamento remoto, pois também é baseada em princípios óticos. O intervalo de medição varia de 300 nm a 2400 nm com resolução de 1 a 2 nm, assim podendo registrar entre 1050 a 2100 bandas. As medições podem ser in situ ou em laboratório e o desenvolvimento de sensores acoplados a máquinas agrícolas parece uma inovação com possibilidades no futuro próximo.

Há outros equipamentos baseados no mesmo princípio, mas de natureza multiespectral, como os medidores de índice de vegetação, que registram três bandas geralmente (vermelho, red-edge e NIR), de maneira a monitorar cultivos de grãos (Kapp Jr. et al., 2016). Ou o multiplex®, definido como sensor ótico proximal baseado em fluorescência, usado para determinar o teor de antocianinas em grãos de uva por medidas em campo (BRAMLEY et al., 2011).

Como já foi mencionado, a ER permite trabalhar com diversos materiais, plantas (Ollinger, 2011), minerais (Filippini-Alba et al., 2006) e solos (Rossel, 2006), no entanto, para ter sucesso no objetivo estabelecido, o equipamento deve ser calibrado para cada caso. Essa calibração é estabelecida por meio de amostras analisadas por uma técnica analítica convencional, com medição também por meio de ER e posterior processamento dos dados de maneira a estabelecer um algoritmo de dependências entre ambos os métodos. Assim, posteriormente a medição poderá ser executada unicamente via ER. Essa calibração é bem mais complicada e diferente da acostuada em química analítica convencional, quando a amostra problema é solubilizada, medida e comparada com amostras padrão de concentração conhecida e composição próxima a da amostra problema.

3. ANTECEDENTES DE ESPECTRORRADIOMETRIA EM AP

Estudos iniciais na área de pedologia podem ser usados como antecedentes da aplicação da ER em AP. Filippini-Alba et al. (2009) estudaram os solos de terras baixas por ER na tentativa de localizar variações significativas da composição física, química, biológica e mineralógica em distâncias curtas, com condições de relevo pouco acentuadas relacionadas a mudanças de elevação dessimétricas e declividade muito suave, como alternativa de baixo custo, substituindo um levantamento topográfico detalhado

para fins de mapeamento dos solos, que seria bem mais oneroso. O registro espectral foi realizado com o espectrorradiômetro LICOR 1800, que trabalha nos comprimentos de onda de 300 nm a 1100 nm, utilizando como referência a placa Spectralon 50% (Labsphere, SRT-50-050), por se tratar de instrumento passivo (mede a refletância relativa gerada pela luz do sol). Ambos objetos foram emprestados pela Embrapa Uva e Vinho. Muito embora a expressão AP não é mencionada, a estratégia adotada relaciona-se a esses princípios. Foram analisadas diferentes distâncias focais, as variações no tempo da placa de referência e as variações da refletância da vegetação e do solo sem cobertura em diferentes posições de relevo, conforme uma transecta de aproximadamente um quilômetro e quatro amostras separadas entre 200 m a 500 m com altitude variando de 8 m a 15 m. Os autores concluíram que, para o solo sem cobertura, a ER sugeriu ser efetiva em discriminar os locais conforme a altitude, devido às mudanças no teor de matéria orgânica, mas estudos mais detalhados deveriam ser desenvolvidos.

Lee et al. (2003) trabalharam com 270 amostras superficiais de argissolos, luvisolos e neossolos. A variância explicada pelos modelos de simulação pH, Ca, Mg and P com dados de ER foi superior a 79% no estágio de calibração. No entanto essas porcentagem caíram para menos de 50% para K e matéria orgânica. Selige et al. (2006) analisou a relação entre os conteúdos de matéria orgânica, N, argila e areia em um solo superficial usando dados aéreo hiperespectrais. O ajuste dos modelos de 0.9, 0.92, 0.71 and 0.95, para R², respectivamente. Rossel et al. (2006) fizeram um procedimento semelhante, porém, usando métodos estatísticos multivariados complexos, com regressão múltipla, aspecto também mencionado por Cohen et al. (2007), e análise em principais componentes. Características mineralógicas do espectro foram realçadas. Os conteúdos de Al, Ca e P, capacidade de troca e produtividade elétrica foram pobremente ajustados (R² < 0,5).

Ge et al. (2011) revisaram o tópico “sensoriamento remoto das propriedades do solo em AP”. Eles consideraram aproximadamente 15 parâmetros, incluindo variáveis físicas e químicas. O método que prevaleceu foi ER no intervalo visível-infravermelho com medidas em laboratório e processamento por diferentes métodos estatísticos multivariados. Analisando a perspectiva da agricultura em relação ao sensoriamento remoto, os autores mencionam que “nas últimas décadas, a produção agrícola ha evoluçionado desde a época das máquinas, para a época da informação e posteriormente para a AP, o que implica em aperfeiçoar o uso de insumos em escala detalhada de maneira a estabelecer ganhos de lucratividade e benefícios ambientais. As geotecnologias, incluindo os sistemas de informação

geográfica, os sistemas de posicionamento global orientados por satélites e o sensoriamento remoto tem sido extensivamente utilizados em AP, derivando na sua implantação em todos os aspectos da produção agrícola. Como tecnologia intensiva em computação e informação, seu sucesso dependerá significativamente, da eficiência e confiabilidade dos métodos específicos de coleta e processamento em campo. Assim, uma interação entre AP e ER se apresenta como linha de pesquisa para futuros desenvolvimentos, inclusive, menciona-se que aparentemente o grande obstáculo para desenvolvimento de um sensor comercial direcionado ao solo é a inconsistência dos modelos obtidos por diversos estudos em diferentes localidades.

Segundo Nocita et al. (2013) a ER relacionada aos níveis de C orgânico no solo é dependente da umidade do solo, de maneira não linear. Vendrame et al. (2012) trabalharam com Latossolos do Cerrado, realizando medições da textura do solo e sua mineralogia com espectrometria NIR. A variância explicada pelos modelos (R^2) foi inferior ou igual a 60% para o conteúdo de silte, areia fina, hematita e goethita.

Cruz et al. (2015) estudaram a variabilidade espacial dos parâmetros químicos do solo em área experimental na Estação Experimental Terras Baixas, Capão do Leão-RS, conforme estratégia de AP. Houve variabilidade espacial e temporal dos atributos químicos do solo. Assim, é necessário analisar a variabilidade espacial da lavoura, via geoestatística, para verificar a presença da dependência espacial e otimizar o processo de transformação das informações pontuais em superfícies contínuas, viabilizando a definição das zonas de manejo em AP.

Dematte et al. (2019) elaboraram a biblioteca espectral de solos do Brasil, trata-se de um empreendimento de vários pesquisadores na tentativa de

evoluir para a agricultura digital. O registro de espectros é fundamental para avançar no conhecimento da ER nas diversas áreas de interesse.

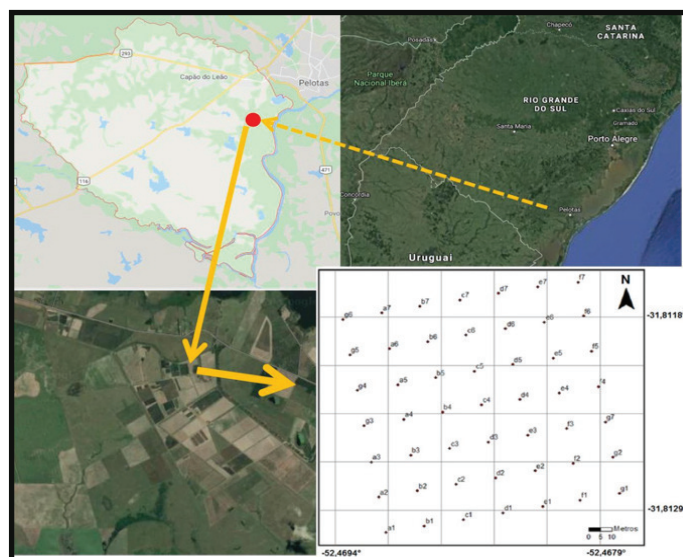
4. ESTUDO DE CASO EM TERRAS BAIXAS, CAPÃO DO LEÃO – RS

Trata-se de um estudo de simulação dos teores de nutrientes e de percentagens de textura no solo por meio de ER. Parte dos dados já foi publicada no CONBAP 2018, Curitiba – PR, mas principalmente em Filippini- Alba et al. (2019).

O estudo foi desenvolvido na Estação Experimental Terras Baixas da Embrapa Clima Temperado, Capão do Leão – RS (Figura 2). Trata-se de uma área de baixa altitude (10 m) e drenagem ruim, onde ocorre um Planossolo Háplico, o cultivo de arroz irrigado no sistema convencional se alterna com pastagens, em regime de 3 anos x 2 anos, respectivamente. O clima é subtropical úmido, Cfa conforme a classificação de Köppen (apud Wrege et al., 2012, p. 322), ou seja, mês mais frio com média de 0 °C e pelo menos um mês com temperatura média acima de 22 °C e no mínimo 4 meses com média de 10 °C; não existindo diferenças de precipitação entre estações, nem mês seco no verão.

A malha regular de amostragem de solos foi desenvolvida em Outubro de 2012 com passo de amostragem de 15m, conforme 7 transectos de 7 amostras cada um, totalizando 49 amostras. A malha foi ajustada com uma estação total e um receptor GPS topográfico. Os solos foram coletados com pá de corte em 0 – 10 cm e 10 – 20 cm em cada ponto da malha regular. Depois de secas as amostras foram peneiradas para a fração inferior a 2 mm.

Figura 2 . Localização da área do estudo de caso. Se apresenta Pelotas no estado do Rio Grande do Sul, o município de Capão do Leão – RS, a área experimental da Estação Experimental Terras Baixas e a malha regular usada. Sistema de coordenadas SIRGAS 2000 em graus decimais.



Análises químicas para Al, Ca, K, Mg, P and matéria orgânica e determinação de texturas (areia, silte e argila) foram realizadas no Laboratório de Nutrição Vegetal da Embrapa Clima Temperado, Pelotas – RS. As medições por ER realizaram-se em cooperação com o Centro Estadual de Sensoriamento Remoto e Meteorologia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul em 2013 com um equipamento FieldSpec3, em intervalo de comprimentos de onda de 350 nm a 2500 nm e resolução espectral de 1 nm.

O pacote estatístico utilizado foi o Statistical Package for Social Sciences - SPSS® e os mapas interpolados foram desenvolvidos em duas etapas: (1) Semivariogramas no GS+®; (2) Krigging no Sistema de Informação Geográfica ArcGIS®.

5. APRIMORAMENTO DO PROCESSO DE SIMULAÇÃO

Inicialmente foram criadas duas planilhas eletrônicas relacionadas às amostras de solos: (a) Dados físico-químicos; (b) Dados de ER. Ambas planilhas continham 49 registros (um por amostra) e o número de colunas suficiente para acomodar descritores das amostras, as coordenadas latitude e longitude e os dados físico-químicos ou as 2101 bandas espectrométricas. As coordenadas são a principal ligação entre os conjuntos de dados (a) e (b).

Os dados físico-químicos apresentaram variância moderada (Tabela 1), por outro lado as correlações entre eles foram pobres, o maior coeficiente de correlação foi para Al-Ca, da ordem de 0,52.

Tabela 1. Estatísticas básicas das principais variáveis físico-químicas das 49 amostras de solos.

Variable	Mean	Coefficiente de Variação
Al, cmol _c .L ⁻¹	0.8	32%
Clay, %	19.8	12%
Ca, cmol _c .L ⁻¹	1.8	15%
K, cmol _c .L ⁻¹	0.12	35%
OM, %	1.9	18%
Mg, cmol _c .L ⁻¹	0.7	16%
Na, mg.dm ⁻³	23	25%
P, mg.dm ⁻³	10	40%

Os dados (b) apresentaram forte correlação entre as 2101 bandas, principalmente as sequenciais (os coeficientes de correlação entre as bandas oscilaram no intervalo 0,8 a 0,99), com coeficientes de variação de 15 a 18%. Assim, tentativas iniciais de reduzir o número de bandas guardando somente aquelas relacionadas aos vales e picos, de maneira a diminuir a complexidade do conjunto de dados (b), não foram bem sucedidas, pois não apareceram

correlações significativas cruzadas, ou seja entre os conjuntos (a) e (b), fato reiterado para a totalidade das bandas.

Dessa forma optou-se por ensaiar um método multivariado, sendo escolhida a análise em componentes principais (JÖRESKOG et al., 1976), já que os primeiros fatores conseguiriam explicar uma significativa quantidade de variância, aprimorando seu potencial para se correlacionar com as variáveis físico-químicas. Como se tem 48 graus de liberdade devido ao número de amostras de solos, esse valor controlou a variância explicada pelos fatores e também o número de fatores extraídos.

Considerando o conjunto dos fatores como (c), se analisaram as dependências e modelos de regressão entre (a) e (c). Os coeficientes R² atingiram seu valor máximo (a unidade) para 48 fatores, conseguindo-se modelos de regressão das variáveis físico-químicas, em função dos fatores, que explicaram 100% da variância da variável simulada (Equação 1).

$$FQ = A_1 F_1 + A_2 F_2 + A_3 F_3 + \dots + A_k \quad (\text{Equação 1})$$

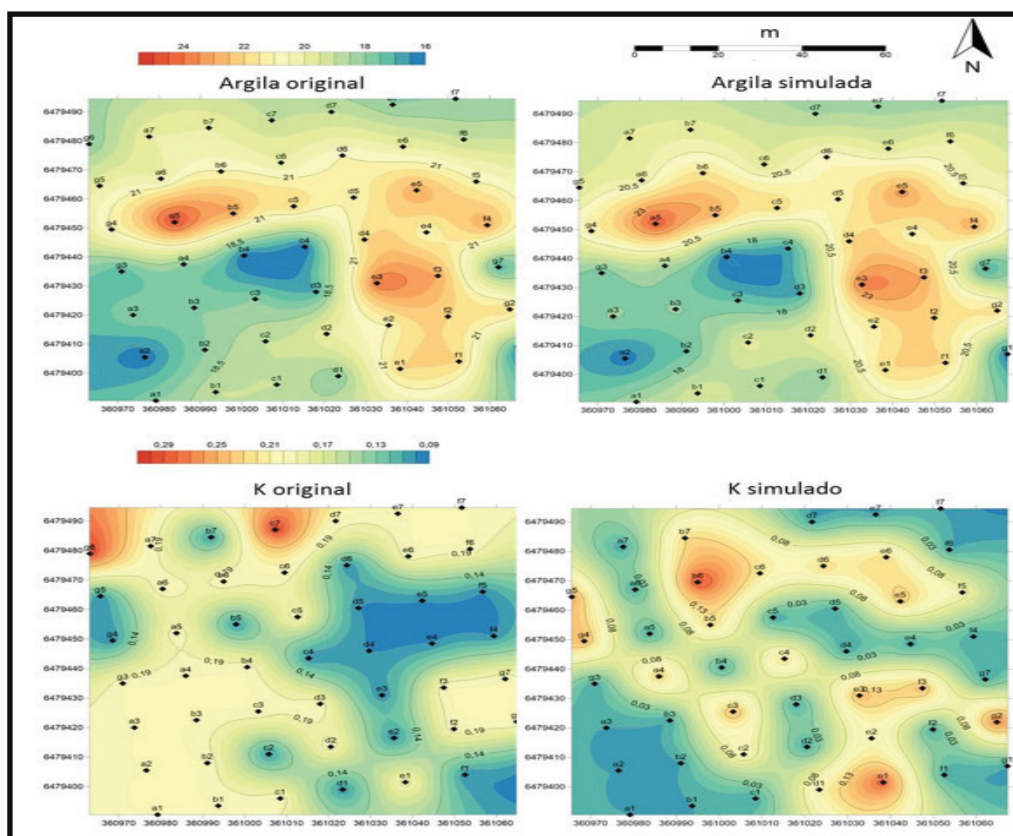
Sendo FQ uma variável físico-química genérica, A₁, A₂ A_k os coeficientes da regressão e F₁, F₂, F₃... os fatores.

Uma alternativa ao procedimento, que fora a finalmente executada, caso não exista correlação adequada entre os dados (a) e (c), é a de classificar os dados (a) em várias subpopulações via cluster análise, para então estabelecer os modelos de regressão em cada subpopulação e reproduzir os valores para cada sítio amostrado. Nesse processo duas amostras foram consideradas outliers, por isso, existiu uma leve diferença entre os mapas originais e os mapas simulados. As três subpopulações principais se diferenciaram pelo teor elevado em Na e K com argila intermediária (21 amostras), outra pelo enriquecimento em argila (20 amostras) e a terceira pelo baixo teor da mesma (6 amostras), sugerindo amostras mais argilosas ou siltosas.

6. MAPAS ORIGINAIS E SIMULADOS

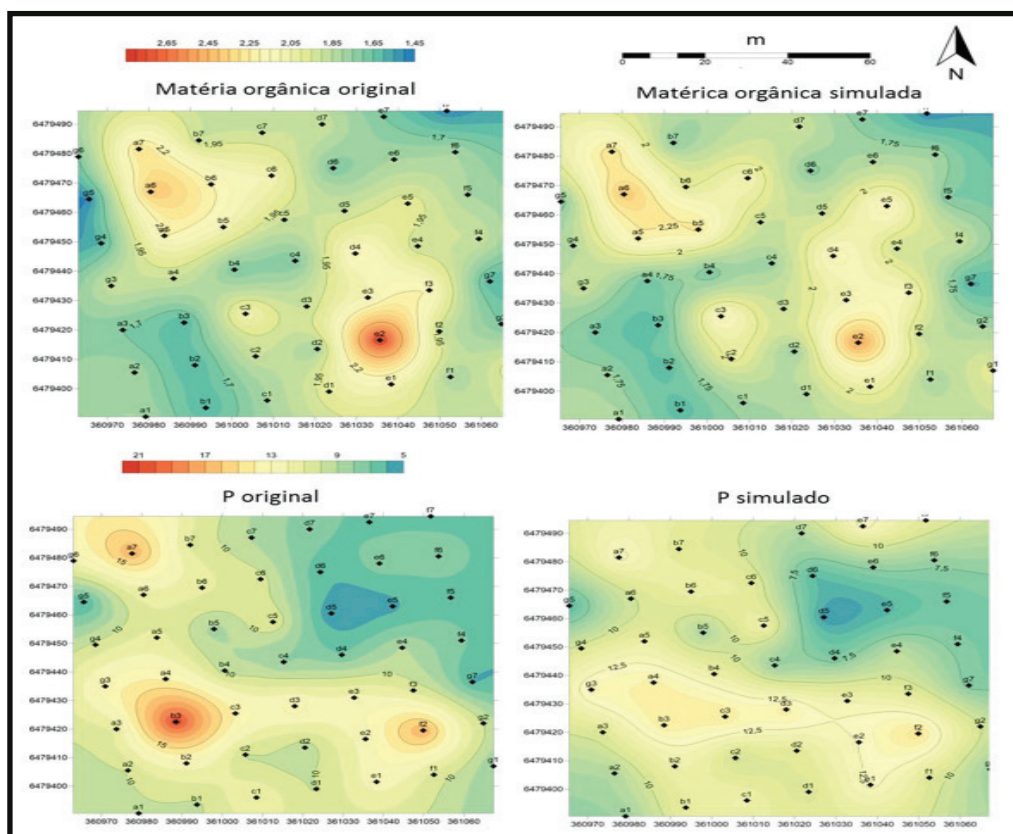
Os variogramas das variáveis mapeadas ajustaram-se aos modelos esférico ou exponencial com alcance variando entre 10 m (matéria orgânica) e 89 m (P) para os dados originais. Os mapas de argila original e simulada são muito semelhantes (Figura 3). Já o K simulado foi mais afetado.

Figura 3. Mapas derivados do processo geoestatístico para argila e K com os dados originais e simulados, respectivamente.



A matéria orgânica e o P também apresentaram boa variabilidade nos mapas simulados, com atenuação dos conhecidos “olhos de peixe”, ou seja pontos com aumento evidente de concentração em função de valores extremos.

Figura 4. Mapas derivados do processo geoestatístico para matéria orgânica e P com os dados originais e simulados, respectivamente.



7. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A Espectrorradimetria de reflectância (ER) foi analisada como técnica de suporte à Agricultura de Precisão (AP), sendo incluídos aspectos básicos da ER, uma revisão de antecedentes de aplicação em AP e um estudo de caso envolvendo solos de terras baixas na região de Pelotas – RS.

Pode-se definir a ER como uma técnica não destrutiva, proximal, possível de aplicar in situ ou em laboratório, abrangendo diversos tipos de materiais, no entanto, depende da calibração com técnica analítica diferenciada e complexa do ponto de vista de interpretação.

Alguns autores mencionam que as técnicas não destrutivas vêm ganhando espaço e no futuro poderão substituir procedimentos analíticos mais sofisticados como difração de raios X ou cromatografia de massas. Em mineralogia e geologia é comum associar bandas específicas a presença de um mineral específico (Ducart et al., 2006), porém, isso não foi possível no estudo de caso apresentado. A análise em componentes principais foi fundamental para interpretar os dados de ER no estudo de caso, técnica complementada pela análise de clusters. Poucos autores tem usado a análise de clusters para identificar subpopulações de amostras com comportamento diferenciado e assim, obter sucesso nos procedimentos de simulação.

Finalmente, cabe destacar que a ER em AP, conforme o estudo de caso apresentado neste capítulo deverá evoluir para aplicação com VANTs/drones ou ainda com sensores comerciais (multiespectrais) instalados em máquinas agrícolas. Aqui foram apresentados os princípios estatísticos que controlam o processo, transformando uma medida física em registro químico (teor de nutrientes), mas há ainda desenvolvimentos pendentes em termos de softwares e equipamentos até atingir estágio de aplicação comercial.

REFERÊNCIAS

AMORIM, F.A.C.; LOBO, I.P.; SANTOS, V.L.C.S.; FERREIRA, S.L.C. Espectrometria de absorção atômica: o caminho para determinações multi- elementares. Química Nova, v. 31, nro. 7, 2008 (<https://doi.org/10.1590/S0100-40422008000700033>)

BRAMLEY, R.G.V., LE MOIGNE, M., EVAIN, S., OUZMAN, J., FLORIN, L., FADAILI, E.M., HINZE, C.J. AND CEROVIC, Z.G. On-the go sensing of grape berry anthocyanins during

commercial harvest: development and prospect. Australian Journal of Grape and Wine Research, v.17, p.316–326, 2011.

COHEN, M.; MYLAVARAPU, R.S.; BOGREKCI, I.; LEE, W.S.; CLARK, M.W. Reflectance spectroscopy for routine soil analysis. Soil Science 172: 469 - 485, 2007.

CRUZ, L.E.C. da; FILIPPINI-ALBA, J.M.; PILLON, C.N.; PARFITT, J.M.B. Dependência espacial dos atributos químicos do solo em um agroecossistema de arroz irrigado. Pelotas: Embrapa, 2015. 26 p. (Embrapa Clima Temperado, Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 224)

DEMATTE J.A.M, DOTTO A.C., PAIVA A.F.S., SATO M.V., DALMOLIN R.S.D., ARAÚJO M.D.S.B. de, SILVA E.B. da, NANNI M.R., TENCATEN A., NORONHA N.C., LACERDA M.P.C., ARAÚJO FILHO J. de, RIZZO R., BELLINASSO H., FRANCELINO M.R., SCHAEFER C.E.G.R., VICENTE L.E., SANTOS U.J. dos, SAMPAIO E.V. de S.B., MENEZES R.S.C., SOUZA J.J.L.L. de, ABRAHÃO W.A.P., COELHO R.M., GREGO C.R., LANI J.L., FERNANDES A.R., GONÇALVES D.A.M., SILVA S.H.G., MENEZES M.D. de, CURI N COUTO E.G., ANJOS L.H.C. dos, CEDDIA M.B., PINHEIRO E.F.M., GRUNWALD S., VASQUES G.M., MARQUES JÚNIOR J., SILVA A.J. da, BARRETO M.C.D.V., NÓBREGA G.N., SILVA M.Z. da, SOUZA S.F. de, VALLADARES GS, VIANA JHM, SILVA TERRA F da, HORÁK-TERRA I, FIORIO P.R., SILVA R.C. da, FRADE JÚNIOR E.F., LIMA R.H.C., ALBA J.M.F., SOUZA JUNIOR V.S. de, BREFIN M.D.L.M.S., RUIVO M.D.L.P., FERREIRA T.O., BRAIT M.A., CAETANO N.R., BRINGHENTI I., MENDES W. de S., SAFANELLI J.L., GUIMARÃES C.C.B., POPPIEL R.R., SOUZA A.B.E.,

QUESADA C.A., COUTO H.T.Z. do. The Brazilian Soil Spectral Library (BSSL): a general view, application and challenges. Geoderma, 2019, p. 1-21. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.05.043>

DUCART, D.F.; CRÓSTA, A.P.; SOUZA FILHO, C.R. Alteration Mineralogy at the Cerro La Mina Epithermal Prospect, Patagonia, Argentina: Field Mapping, Short-Wave Infrared Spectroscopy, and ASTER Images. Economic Geology, 105(5): 981 – 992, 2006.

FILIPPINI-ALBA, J.M.; ALCOUVER NETO, A.; DOS SANTOS, H.P.; SANDRINI, W.C. Caracterização espectrorradiométrica de minerais e rochas sedimentares. Pelotas: Embrapa, 2006, 12p. (Embrapa Clima Temperado, Documentos, n. 172)

FILIPPINI-ALBA, J.M.; CRUZ, L.E.C. da; DUCATI, J.R.; CUNHA, H.N. da; DOMINGUES, J.M.M. Processing spectroradiometry data for simulation of soil physicochemical parameters. International J. of Development Research, v. 09, issue, 08, pp. 28875-28880, August, 2019

FILIPPINI-ALBA, J.M.; FLORES, C.A.; GARRASTAZÚ, M.C.; SANDRINI, W.C. Uso da Espectrorradiometria no Mapeamento de Solos: Estudo de Caso na Estação Experimental Terras Baixas. Embrapa: Embrapa, 2007, 28p. (Clima Temperado, Documentos 209).

FILIPPINI-ALBA, J. M.; ZANELLA, M.A. Revisão e processamento de informações sobre agricultura de precisão no Brasil. Pelotas: Embrapa, 2016. 20 p. (Embrapa Clima Temperado, Documentos 416).

GE, Y.; THOMASSON, A.; SUI, R. Remote sensing of soil properties in precision agriculture: A review. Frontier Earth Science, v. 5 (3), p. 229 – 238, 2011.

JÖRESKOG, K.G.; KLOVAN, J.E.; REYMENT, R.A. Geological Factor Analysis. Amsterdam: Elsevier Pub. Co., 1976, 178p.

JORGE, L. A. de C.; INAMASU, R.Y. Uso de veículos aéreos não tripulados em agricultura de precisão. In: Bernardi, A.C.de C.; Naime, J. de M.; Resende, A.V. de; Bassoi, L.H.; Inamasu, R.Y. ed. Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar. Brasília, DF: Embrapa, 2014. p. 109-134.

KAPP Jr., C.; GUIMARÃES, A.M.; CAIRES, E.F. Use of active canopy sensors to discriminate wheat response to nitrogen fertilization under no-tillage. Eng.Agríc. (Jabitucabal) v.36, no.5, Set/Oct 2016

KARDEVÁN, P. Reflectance spectroradiometer – a new tool for environmental mapping. Carpath. J. Earth Environ. Sc.,v. 2, p. 29-38, 1997.

LEE, W.S.; SANCHEZ, J.F.; MYLAVARAPU, R.S.; CHOE, J.S. Estimating

chemical properties of Florida soils using spectral reflectance. Am. Soc. Agricultural Engineers v. 46, p. 1443-1453, 2003.

MOREIRA, M.A. Fundamentos do sensoriamento remoto e metodologias de aplicação. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2005. 320 p.

NOCITA, M.; STEVENS, A.; NOON, C.; WESMAEL, B. van. Prediction of soil carbon for different levels of soil moisture using Vis-NIR spectrometry. Geoderma 199: 37-42, 2013.

OLLINGER, S.V. Sources of variability in canopy reflectance and the convergent properties of plants. New Phytologist 189: 375-394, 2011.

RESENDE, A. V.; SHIRATSUCHI, L. S.; COELHO, A. M.; CORAZZA, E. J.; VILELA, M. F.; INAMASU, R. Y.; BERNARDI, A. C. C.; BASSOI, L. H.; NAIME, J. M. Agricultura de Precisão no Brasil: Avanços, Dificuldades e Impactos no Manejo e Conservação do Solo, Segurança Alimentar e Sustentabilidade. Embrapa Milho e Sorgo. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 18., 2010, Teresina. Novos caminhos para agricultura conservacionista no Brasil: anais. Teresina: Embrapa Meio-Norte: Universidade Federal do Piauí, 2010. 1 CD-ROM.

ROSSEL, R.A.V.; WALVOORT, D.J.J.; McBRATNEY, A.B.; JANIK, L.J.; SKJEMSTAD, J.O. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. Geoderma 133:59-75, 2006.

SELIGE, T.; BÖHNER, J.; SCHMIDHALTER, U. High resolution topsoil mapping using hyperspectral image field data in multivariate regression modeling. Procedures. Geoderma 136: 235-244, 2006.

STAFFORD, J. V. Implementing precision agriculture in the 21st century. Journal of Agricultural Engineering Research, v. 76, n. 3, p. 267-275, 2000.

Zhang, N.; Wang, M.; Wang N. Precision Agriculture – a worldwide overview. Computer and Electronics in Agriculture, v. 36, issue 2-3: 113-132, 2002.

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. J. Soil Sc. 63: 743-753, 2012.

WREGE, M. S.; STEINMETZ, S.; REISSER JUNIOR, C.; ALMEIDA, I. R. de.(Ed.). Atlas climático da região Sul do Brasil: Estados do Paraná, Santa Catarina e Rio Grande do Sul. Brasília, DF: Embrapa, 2012.