

RESSALVA

Atendendo solicitação do(a)
autor(a), o texto completo desta tese
será disponibilizado somente a partir
de 18/05/2024.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA UNESP

CAMPUS DE JABOTICABAL

**ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X NA
CARACTERIZAÇÃO E PREDIÇÃO DE ATRIBUTOS DOS
SOLOS DO PLANALTO OCIDENTAL PAULISTA**

Milene Moara Reis Costa

Engenheira Agrônoma

2022

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA UNESP
CAMPUS DE JABOTICABAL

**ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X NA
CARACTERIZAÇÃO E PREDIÇÃO DE ATRIBUTOS DOS
SOLOS DO PLANALTO OCIDENTAL PAULISTA**

Discente: Milene Moara Reis Costa
Orientador: Dr. José Marques Junior

Tese apresentada à Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias –
Unesp, Campus de Jaboticabal,
como parte das exigências para
obtenção do título de Doutor em
Agronomia (Ciência do Solo)

2022

C837p

Costa, Milene Moara Reis

Espectrometria de fluorescência de raios x na caracterização e
predição de atributos dos solos do planalto ocidental paulista /
Milene Moara Reis costa. -- Jaboticabal, 2022
127 p. : tabs., mapas

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (Unesp),
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal
Orientador: José Marques Júnior

1. Espectrometria de fluorescência de raios x. 2.
mapeamento. 3. Random Forest. 4. Pedometria. 5.
geoestatística. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo
autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X NA CARACTERIZAÇÃO E PREDIÇÃO DE ATRIBUTOS DOS SOLOS DO PLANALTO OCIDENTAL PAULISTA

AUTORA: MILENE MOARA REIS COSTA

ORIENTADOR: JOSÉ MARQUES JUNIOR

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em Agronomia (Ciência do Solo), pela Comissão Examinadora.



Documento assinado digitalmente
DANIEL DE BORTOLI TEIXEIRA
Data: 13/10/2023 21:24:42-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. JOSÉ MARQUES JUNIOR (Participação Virtual)
Departamento de Ciências da Produção Agrícola / FCAV UNESP Jaboticabal



Documento assinado digitalmente
JOSE MARQUES JUNIOR
Data: 22/09/2023 15:16:51-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. DANIEL DE BORTOLI TEIXEIRA (Participação Virtual)
UNIMAR / Marília/SP



Documento assinado digitalmente
ZIGOMAR MENEZES DE SOUZA
Data: 02/10/2023 08:56:54-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. ZIGOMAR MENEZES DE SOUZA (Participação Virtual)
Faculdade de Engenharia Agrícola / Universidade Estadual de Campinas - UNICAMP

Dr. DIEGO SILVA SIQUEIRA (Participação Virtual)
Agrônomo Autônomo - Núcleo de Inovação Tecnológica (NIT) - Supera Parque / Ribeirão Preto/SP

Prof. Dr. THIAGO ASSIS RODRIGUES NOGUEIRA (Participação Virtual)
Faculdade de Engenharia/UNESP / Ilha Solteira/SP



Documento assinado digitalmente
DIEGO SILVA SIQUEIRA
Data: 02/10/2023 16:30:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Jaboticabal, 18 de maio de 2022



Documento assinado digitalmente
THIAGO ASSIS RODRIGUES NOGUEIRA
Data: 02/10/2023 10:28:31-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

MILENE MOARA REIS COSTA - Filha de Marlene Antonia Reis Costa e Antônio Cunha da Costa, nasceu em Capanema – PA, no dia 21 de março de 1989. Em março de 2010 ingressou no Curso de Engenharia Agrônômica pela Universidade Federal Rural da Amazônia (UFRA), Campus Belém. Foi bolsista na incubadora tecnológica de Empreendimentos Solidária de 2011 a 2012 pelo programa de pesquisa interno da UFRA e bolsista de Iniciação Científica no período de 2012 a 2014, pelo programa de Inovação Tecnológica do Centro Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). Em 2015 ingressou no Mestrado em Agronomia (Produção Vegetal), na Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal – SP, desenvolvendo o projeto de pesquisa “Mapeamento Geoquímico dos Solos do Planalto Ocidental Paulista”. Atua como membro ativo do Grupo de Pesquisa Caracterização do Solo para fins de Manejo Específico (CSME) da UNESP, Campus de Jaboticabal, desde 2015.

DEDICO

Ao(s)

Aos meus pais Antônio Cunha e Marlene Reis, que sempre me apoiaram nos meus estudos.

Aos meus avós, Maria Reis, José Ferreira, Idalina Cunha (*in memoriam*) e Carlos Reis, pela dedicação e apoio em todos os momentos da minha vida.

OFEREÇO

Ao(s)

À Deus e a Nossa Senhora de Nazaré, por sempre me conceder sabedoria nas escolhas dos melhores caminhos, coragem para acreditar, força para não desistir e proteção para me amparar.

Estranha é nossa situação aqui na Terra. Cada um de nós vem para uma curta passagem, sem saber por que, ainda que algumas vezes tentando adivinhar um propósito. Do ponto de vista da vida cotidiana, porém, de uma coisa sabemos: o homem está aqui pelo bem de outros homens - acima de tudo daqueles de cujos sorrisos e bem-estar nossa própria felicidade depende.

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

Primeiro a Deus, por conceder-me a oportunidade de aumentar meus conhecimentos, ter me dado força para a realização deste trabalho.

Aos meus pais Antônio e Marlene e minha avó Maria, pelo amor incondicional, além de me proporcionarem a oportunidade de estudar.

Ao meu orientador Prof. Dr. José Marques Junior, pela orientação e a confiança que tornaram possível a realização desse trabalho.

Aos membros da Banca de Qualificação, Prof. Dr. Marcílio Vieira Martins Filho e Prof. Dr. Daniel De Bortoli, cujas correções e sugestões contribuíram para a melhoria do presente estudo.

Aos meus avós José Ferreira e Idalina e Carlos Reis, que mesmo de longe sempre estiveram presentes ajudando e torcendo por mim.

A minha Irmã Milena e a minha prima Islanna, pelo incentivo, força e apoio incondicional.

A todos os meus amigos por participarem da minha formação, o meu eterno agradecimento, Aline Santos, Maria Pimentel, Suzane Moreira, Cristina, Ani e Netti Abreu. Muito obrigada pela amizade!

Aos amigos que fiz na Pós-graduação: Renato, Priscila e Deise. Obrigada por dividirem comigo as angústias e as alegrias. Obrigada pelas contribuições valiosas durante toda a jornada.

Aos companheiros do grupo definir (CSME). A ajuda de vocês foi essencial para esse trabalho em todos os momentos, sempre dispostos a ajudar. Vocês foram fundamentais nesses anos de trabalho, desde os pequenos até os grandes problemas.

Meu agradecimento especial ao meu melhor amigo, amor e companheiro de todas as horas, João Thiago, nos momentos mais difíceis sempre me fez acreditar que eu conseguiria chegar ao final desse trabalho. Muito obrigada!!!

Meu agradecimento ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura – (CENA/USP), e a equipe do laboratório de Instrumentação Nuclear (LIN) e ao professor Hudson Wallace Pereira de Carvalho pelos ensinamentos e apoio a essa pesquisa.

À Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, e ao Programa de Pós-graduação em Agronomia (Ciência do Solo) pela oportunidade de realização do Doutorado.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela bolsa concedida e à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP pelo financiamento da pesquisa.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

Durante esses anos, os momentos de alegria serviram para me permitir acreditar na beleza da vida e, os momentos de sofrimento, serviram para um crescimento pessoal único.

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	iv
LISTA DE TABELAS	v
LISTA DE ABREVIACÕES	vi
RESUMO	vii
CAPÍTULO 1 – Considerações Gerais	1
1.1 Introdução	1
1.2 Revisão de Literatura	4
1.2.1 Importância da caracterização do solo	4
1.2.2 Espectrometria de Fluorescência de raio X – FRX	9
1.2.3 FRX na caracterização e predição de atributos de solo	11
1.2.4 Modelagem matemática aplicada a solos	13
1.2.4.1 Random Forest- RF	13
1.2.4.2 Regressão Linear Múltipla- RLM	18
1.2.4.3 Geoestatística	19
1.3 Referências Bibliográficas	22
CAPÍTULO 2 – Espectrometria de fluorescência de raios X na caracterização do silício, alumínio e ferro dos solos do Planalto Ocidental Paulista	31
2.1 Introdução	32
2.2 Material e Métodos	34
2.2.1 Área de estudos	34
2.2.2 Análises químicas e granulométricas do solo	36
2.2.3 Fluorescência de Raios X por energia dispersiva - FRX	37
2.2.4 Análises dos dados	37
2.2.3.1 Estatística multivariada	37

2.2.3.2	Análise geoestatística	38
2.3	Resultados e Discussão	39
2.3.1	Caracterização dos solos	39
2.3.2	Espectroscopia de Fluorescência de Raios X e Ataque Sulfúrico	44
2.3.3	Concentração do conteúdo elementar obtidos por FRX nas classes de solo em função da textura do solo	47
2.3.4	Análises de componentes principais – ACP	51
2.3.5	Geoestatística: variabilidade espacial dos atributos por diferentes técnicas	56
2.4	Referências Bibliográficas	60
CAPÍTULO 3 – Espectrometria de fluorescência de raios X na predição de atributos dos solos do Planalto Ocidental Paulista		71
3.1	Introdução	72
3.2	Material e Métodos	74
3.2.1	Caracterização da área de estudo	74
3.2.2	Análises químicas e granulométricas do solo	76
3.2.3	Análises mineralógicas	77
3.2.4	Fluorescência de Raios X por energia dispersiva - FRX	77
3.2.5	Análises estatísticas	78
3.2.5.1	Estatística descritiva	78
3.2.5.2	Processamento dos dados	78
3.2.5.3	Parâmetros e padronização dos modelos	79
3.2.5.4	Avaliação do desempenho dos modelos	80
3.2.5.5	Análise geoestatística	81
3.3	Resultados e Discussão	82
3.3.1	Correlações lineares entre a textura do solo e o conteúdo elementar	84
3.3.2	Modelagem e predição da textura do solo a partir de dados FRX	88

3.3.3 Geoestatística: Variabilidade espacial dos atributos por diferentes técnicas	95
3.4 Conclusões	101
3.5 Referências Bibliográficas	102

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2 - Espectrometria de fluorescência de raios X na caracterização do silício, alumínio e ferro dos solos do Planalto Ocidental Paulista

Figura 1. Mapa de localização do Planalto Ocidental Paulista (a); Mapa geológico atualizado do Planalto Ocidental Paulista (escala de semi-detelhe 1:200.000). Fonte: Mod. de Fernandes & Magalhães-Ribeiro (2015) (b); Mapa de pontos amostrais gerais e pontos de amostras gerais e pontos de amostras estratificadas (c); e Mapa pedológico (Escala: 1:300.000). FONTE: Instituto Agronômico de Campinas (d). 35

Figura 2. Regressão linear entre teores de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 obtidos por ataque sulfúrico (AS) e teores de Fe, Al, Si dados por FRX para amostras de solos da camada 0,0 - 0,20 m do Planalto Ocidental Paulista. 45

Figura 3. Diagrama ternário de classificação das amostras de solo usadas neste estudo. As amostras são agrupadas de acordo com seu teor de Si, Al, e Fe, encontrado por fluorescência de raios-X para as classes de solo do Planalto Ocidental Paulista. 48

Figura 4. Gráfico biplot da distribuição das classes de solo (a) e da geologia (b) a partir das variáveis argila, areia, Fe, Al e Si determinada por FRX nos solos derivados do basalto e arenito no Planalto Ocidental Paulista. 53

Figura 5. Padrão espacial dos atributos (a) ferro, (b) silício e (c) alumínio e seus respectivos parâmetros de modelagem dos semivariogramas, para camada 0 – 0,20 m dos solos derivados de basalto e arenito no Planalto Ocidental Paulista. Co =; C0 + C1; A = alcance (m), GDE = grau de dependência espacial. 58

CAPÍTULO 3 - Espectrometria de fluorescência de raios X na predição de atributos dos solos do Planalto Ocidental Paulista

Figura 1. Mapa de localização do Planalto Ocidental Paulista (a); Mapa geológico atualizado do Planalto Ocidental Paulista (escala de semi-detelhe 1:200.000). Fonte: Mod. de Fernandes & Magalhães-Ribeiro (2015) (b); Mapa de pontos amostrais gerais e pontos de amostras gerais e pontos de amostras estratificadas (c); e Mapa pedológico (Escala: 1:300.000). FONTE: Instituto Agronômico de Campinas (d). 75

Figura 2. Associações lineares entre os conteúdos elementares determinados por espectrometria de fluorescência de raios-X (XRF) e os teores de areia, silte, argila, Fed, Feo, Ct/(Ct+Gb) do solo. 85

Figura 3. Relação entre os valores observados e os estimados nos modelos Fed-MLR (a), Fed-RF (b), Feo-MLR (c), Feo-RF (d), Ct/(Ct+Gb)-MLR (e), Ct/(Ct+Gb)-RF (f), Areia-MLR (g), Areia-RF (h), Silte-MLR (i), Silte-RF (j), Argila-MLR (k), Argila-RF (l). Os pontos são valores de cada amostra de solo. 94

Figura 4. Mapas de distribuição espacial dos teores de argila, silte, areia. 98

Figura 5. Mapas de distribuição espacial dos teores de Fed, Feo, Ct/(Ct+Gb). 99

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2 - Espectrometria de fluorescência de raios X na caracterização do silício, alumínio e ferro dos solos do Planalto Ocidental Paulista

Tabela 1. Estatística descritiva da granulometria e teores de SiO_2 , Fe_2O_3 e Al_2O_3 dados pelo ataque sulfúrico (AT) e de Fe, Si e Al dados por (FRX), em solos grupados por compartimentos geológicos e por classes. 40

Tabela 2. Correlação entre os atributos avaliados e as componentes extraídas da análise componentes principais (ACP). 51

CAPÍTULO 3 - Espectrometria de fluorescência de raios X na predição de atributos dos solos do Planalto Ocidental Paulista

Tabela 1. Parâmetros testados pelo GridSearch, e melhores parâmetros selecionados para as variáveis dependentes estudadas. 80

Tabela 2. Estimadores estatísticos de média, desvio padrão, coeficiente de variação, quartis da média, valores mínimo e máximo para todas as variáveis utilizadas. 83

Tabela 3. Desempenho dos modelos de Regressão Linear Múltipla (RLM) e *Random forest* (RF) na estimação das variáveis de mineralogia do solo. 88

Tabela 4. Parâmetros dos modelos ajustados aos semivariogramas dos atributos estudados. 96

LISTA DE ABREVIACÕES

ACP – Análise de Componentes Principais
CP – Componente Principal
CSME – Caracterização do Solo para fins de Manejo Específico
EDXRF - Fluorescência de Raios X por energia dispersiva
FIV – Fator de Inflação de Variância
FRX – Fluorescência de Raios X
GDE - Grau de Dependência Espacial
MAE - Mean Absolute Error
MAPE - Mean Absolute Percentage Error
MDA - Mean Decrease Accuracy
MDG – Mean Decrease Gini
ME – Mean Error
OOB – Out of Bag
FRXp – Fluorescência de Raios X portátil
POP – Planalto Ocidental Paulista
PRONASOLOS - Programa Nacional de Solos Brasileiros
pXRF – portable X Ray Fluorescence
RF – Random Forest
RLM – Regressão Linear Múltipla
RMSE – Root Mean Square Error
SG – Serra Geral
SNLCS - Serviço Nacional de Levantamento e Conservação do Solo
VIP - Variable Inflation Factor
VRP – Vale do Rio do Peixe
XRF – X Ray Fluorescence

PREDIÇÃO DE ATRIBUTOS DOS SOLOS DO PLANALTO OCIDENTAL PAULISTA POR ESPECTROSCOPIA DE REFLECTÂNCIA DIFUSA E FLUORESCÊNCIA DE RAIOS X

RESUMO — Resultados obtidos por Fluorescência de Raios-X (FRX) e a variabilidade espacial das propriedades do solo são importantes para o mapeamento de áreas de manejo específico do solo e das culturas agrícolas. Sendo assim, o estudo foi desenvolvido com o propósito de avaliar o potencial da FRX na quantificação e mapeamento de Fe, Si e Al em solos do Planalto Ocidental Paulista (POP) e na predição de atributos físicos, químicos e mineralógicos. Um total de 262 amostras de solos provenientes do intemperismo da rocha basáltica — Serra Geral (SG) e do arenito — Vale do Rio do Peixe (VRP) foram coletadas na camada 0,0–0,2 m. O conteúdo total de Fe, Si e Al foi mensurada por Fluorescência de raios-X e confrontada por método químico tradicional, a digestão sulfúrica (H_2SO_4). As medidas preditivas foram obtidas por análises de aprendizagem de máquinas — *Random Forest* e Regressão Linear Múltipla. Os resultados foram submetidos à análise estatística descritiva e geoestatística. A técnica geoestatística permitiu descrever a distribuição espacial de Fe, Si e Al como fator covariativo da variação litológica e mineralógica da área de estudo. A fluorescência de raios X permite a quantificação confiável do conteúdo total de Fe, Si e Al dos solos derivados de complexos litológicos no Planalto Ocidental Paulista. O conteúdo total de SiO_2 , Fe_2O_3 e Al_2O_3 determinado por FRX mostra-se pedoindicador seguro da composição química da rocha basalto e arenito. Os teores de Fe, Si e Al obtidos pela FRX auxiliar a identificação de diferentes compartimentos geológicos e pedológicos, podendo ser uma técnica alternativa para o desenvolvimento de mapeamento de atributos do solo para fins de manejo específico em grandes áreas. A regressão linear múltipla (RLM) e Random Forest (RF) foram testados para prever textura, mineralogia da argila e química do solo. Os modelos foram usados para representar espacialmente os atributos em toda a área. Os dados elementares de FRX forneceram previsões confiáveis das variáveis estudadas. Os modelos de RLM e RF foram sensíveis e similares na detecção da variabilidade espacial dos parâmetros químicos em solos sob as diferenças litológicas.

Palavras-chave: mapeamento, pedometria, variabilidade espacial, geoestatística.

PREDICTION OF ATTRIBUTES OF SOILS IN THE WESTERN PLANALTO OF PAULISTA BY DIFFUSE REFLECTANCE AND X-RAY FLUORESCENCE SPECTROSCOPY

ABSTRACT – Understanding and quantitative design of elements quantified by X-Ray Fluorescence (XRF) and the spatial variability of soil properties are important for the development of specific management of soil and agricultural crops. Thus, the study was developed with the purpose of evaluating the potential of XRF in the quantification and mapping of Fe, Si, and Al in soils of the Western Paulista Plateau (WPP) soils. A total of 262 soil samples from the weathering of basaltic rock — Serra Geral (SG) and sandstone — Vale do Rio do Peixe (VRP) were collected in the 0.0–0.2 m layer. The total content of Fe, Si and Al was measured by XRF and compared by the traditional chemical method, sulfur digestion (H_2SO_4). Predictive measures were obtained by machine learning analysis — *Random Forest*. The results were submitted to descriptive statistical and geostatistical analysis. The geostatistical technique allowed to describe the spatial distribution of Fe, Si and Al as a covariate factor of the lithological and mineralogical variation of the study area. Then, the maps obtained by each technique were compared to obtain the error map, that is, to assess how much a technique underestimates or overestimates the content and spatial variability of Fe, Si and Al. The X-ray fluorescence allows for quantification reliability of the total Fe, Si, and Al content of soils derived from lithological complexes in the Western Paulista Plateau. The total content of SiO_2 , Fe_2O_3 , and Al_2O_3 determined by XRF is a safe pedoindicator of the chemical composition of the Basalt and sandstone rock. The Fe, Si, and Al contents obtained by XRF help identify different geological and pedological compartments and may be an alternative technique for the development of mapping of soil attributes for specific management purposes in large areas.

Keywords: mapping, pedometrics, spatial variability, geostatistics.

CAPÍTULO 1 – Considerações Gerais

1.1 Introdução

A agricultura brasileira é uma das maiores no quesito produção de alimento no mundo. Com o avanço da tecnologia de sensores foi possível evoluir na modernização no melhoramento genético, biotecnologia, veículos não tripulados e drones, têm destacado a agricultura de precisão do Brasil (Carrer et al., 2010). Nesse mesmo alinhamento, a pedologia — *Ciência que estuda o solo*, tem inovado sobretudo na compreensão do solo no contexto espacial (Mello et al., 2020). Rastrear o padrão espacial dos atributos do solo desempenha papel significativo no planejamento, avaliação de riscos, tomada de decisão e gestão sustentável (Li e Heap, 2008). Muitos estudos já relataram a necessidade em se caracterizar os solos e seus atributos antes de gerar recomendações de manejo em escala regional (Shepherd e Walsh, 2007), bem como a necessidade de se desenvolver indicadores de impactos do uso e da ocupação do solo para planejamento estratégico local e ou estadual (Rockstrom et al., 2009; Minasny e McBratney, 2015).

Conhecer o solo em seus mínimos detalhes, isto é, na escala de DNA, tem sido a preocupação dos cientistas de solos brasileiros. Há um bom senso na comunidade científica da Ciência do Solo que, para aumentar a produção agrícola de forma racional, sem incremento no custo de produção, é necessário explorar o potencial físico, químico e biológico do solo. Desta forma, não é necessário desmatar para obter grandes produtividades. Uma alternativa para isso é manejar o solo em áreas para fins agrícolas nas chamadas zonas mínimas de manejo, ou seja, mapear

atributos do solo. Entretanto, o estudo de variabilidade espacial de atributos do solo por metodologias convencionais tem sido o principal empecilho.

Entre as dificuldades do estudo de variabilidade espacial de atributos do solo por método convencionais podem ser elencados, de acordo com Silva et al. (2020): (I) o grande número de amostras, que representem bem a área de interesse, considerando as variações da paisagem, diversidade de solo, material de origem entre outros; (II) em campo, é necessário um número grande de mão-de-obra. São profissionais com amplo conhecimento em pedologia, geologia, com habilidades em computação, estatística e geoestatística, por exemplo. Em laboratório, é necessário técnicos e especialistas em métodos analíticos e que saibam processar dados; e, (III) a necessidade de aquisição de equipamentos nos centros de pesquisa brasileiros, mas nem sempre há recurso financeiro disponível para obtê-los, ou para efetuar a manutenção ou ainda a disponibilidade de pessoas capacitadas para operá-los.

O desenvolvimento de metodologias que permitam a avaliação da mineralogia da fração argila, bem como sua correlação com os atributos do solo são necessários. Assim, a adoção de métodos indiretos de quantificação destes minerais, viabiliza a realização em um grande número de amostras com baixo custo e menor tempo de execução, possibilitando o mapeamento de atributos dos solos em grandes áreas e em escala detalhada. Uma alternativa a disposição é a utilização de métodos indiretos, dentre os avanços empreendidos nos últimos anos, destaca-se àqueles potencialmente aplicáveis na melhoria do manejo agrícola, como a utilização da fluorescência de raios X (FRX).

A eficiência destas técnicas tem sido comprovada em vários estudos, para avaliação dos atributos do solo, pois possuem custo e impactos ambientais analíticos relativamente baixos, permitindo detectar conteúdos de elementos químicos em poucos segundos e sem a produção de resíduos de amostra (Ribeiro et al., 2017; Weindorf et al., 2014). A FRX pode ser usada diretamente no campo ou em laboratório para detectar o conteúdo elementar total da Tabela Periódica em amostras de solos e outros materiais (Weindorf et al., 2014; Mcgladdery et al., 2018).

No Brasil, o emprego da FRX tem sido ainda pouco explorado (Ribeiro et al., 2017). Mesmo incipiente, cita-se os estudos de Simabuco e Nascimento Filho (1994), que utilizaram FRX em Latossolo Vermelho e Argissolo Vermelho Amarelo sob influência de vinhaça para estudo pedogeoquímico. Outras aplicações avaliaram o potencial da FRX em perfis de solo para determinar os materiais de origem e a pedogêneses (Stockmann et al., 2016a) e a variabilidade das propriedades do solo (Weindorf et al., 2015; 2016). Assim, a FRX é uma técnica descrita como rápida, que envolve pouca preparação de amostras e altamente sensível às baixíssimas concentrações elementares.

Entretanto, o atual momento que vive a agricultura brasileira, onde as tecnologias têm possibilitado o desenvolvimento de sensores mais modernos, aplicados a Ciência do Solo e com objetivo de facilitar o conhecimento das propriedades do solo, portanto, de forma rápida, às vezes instantânea, de baixo custo, de fácil operação e ambientalmente seguro, isto é, não geram, ou quando geram resíduos, são em níveis baixos ao ambiente (Weindorf e Chakraborty, 2016). Dentre esses sensores, podem ser citados de suscetibilidade magnética (Barrón et al., 2000; Camargo et al., 2016; Mello et al., 2020), espectroscopia de reflectância difusa

(Camargo et al., 2018; Silva et al., 2020) e mais recentemente a fluorescência de raios X (McGladdery et al., 2018; Pearson et al., 2017; Ribeiro et al., 2017; Weindorf et al., 2014).

Portanto, a FRX, se bem calibrada, pode ser considerada um método indireto capaz de auxiliar nos trabalhos de mapeamento de atributos do solo e, desta forma, orientar as atividades neles desenvolvidas. Entretanto, é necessário que estudos sejam realizados visando compreender quão úteis e confiáveis são os resultados obtidos na FRX, a fim de expor quaisquer limitações técnicas e indicação do potencial de uso para Ciência do Solo.

3.4 Conclusões

O contraste litológico arenito/basalto influenciaram fortemente a variabilidade espacial de Al, Ca, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Si, Ti, e Zn dos solos em grandes áreas, que por sua vez, são fortes indicadores da diversidade geológica.

A areia e a relação $Ct/(Ct+Gb)$ melhor caracterizou solos de arenito, enquanto a argila, Fe e Fe_{total} aqueles derivados do basalto. A areia, argila, Fe_d , Fe_o e a relação $Ct/(Ct+Gb)$ apresentaram comportamento espacial mais precisos, quando estimados por técnicas indiretas.

As diferentes técnicas foram sensíveis e similares na detecção da variabilidade espacial dos parâmetros químicos em solos sob as diferenças litológicas. Assim, o uso da FRX é eficiente e pode ser usada na caracterização da variabilidade espacial destes atributos em grandes áreas, mesmo sob complexidade litológica.

3.5 Referências Bibliográficas

Bahia ASRS, Marques Junior J, Siqueira DS (2015) Procedures using diffuse reflectance spectroscopy for estimating hematite and goethite in Oxisols of São Paulo, Brazil. **Geoderma regional**, 5:150-156. DOI: 10.1016/j.geodrs.2015.04.006.

Barbosa RS, Marques Junior J, Barrón V, Martins Filho MV, Siqueira DS, Peluco RG, Camargo LA, Silva LS (2019) Prediction and mapping of erodibility factors (USLE and WEPP) by magnetic susceptibility in basalt-derived soils in northeastern São Paulo state, Brazil. **Environmental earth sciences**, 78:1-12.

Barrón V, Torrent J (2013) **Iron, manganese and aluminium oxides and oxyhydroxides**. DOI: 10.1180/EMU-notes.14.9.

Benedet L, Faria WM, Silva SHG, Mancini M, Demattê JAM, Guilherme LRG, Curi N (2020a) Soil texture prediction using portable X-ray fluorescence spectrometry and visible near-infrared diffuse reflectance spectroscopy. **Geoderma**, 376:114553. DOI: 10.1016/j.geoderma.2020.114553.

Benedet L, Faria WM, Silva SHG, Mancini M, Guilherme LRG, Demattê JAM, Curi N (2020b) Soil subgroup prediction via portable X-ray fluorescence and visible near-infrared spectroscopy. **Geoderma**, 365:114212. DOI: 10.1016/j.geoderma.2020.114212.

Benites VM, Machado PL, Fidalgo EC, Coelho MR, Madari BE (2007) Pedotransfer functions for estimating soil bulk density from existing soil survey reports in Brazil. **Geoderma**, 139:90-97. DOI: 10.1016/j.geoderma.2007.01.005.

Brahim N, Bernoux M, Gallali T (2012) Pedotransfer functions to estimate soil bulk density for Northern Africa: Tunisia case. **Journal of Arid Environments**, 81:77-83. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2012.01.012.

Büchle D, Chao M, Ostermann M, Leenen M, Bald I (2019) Multivariate chemometrics as a key tool for prediction of K and Fe in a diverse German agricultural soil-set using EDXRF. **Scientific reports**, 9:1-11. DOI: 10.1038/s41598-019-53426-5.

Buckman OH, Brady NC (1989) **Tahune nature and properties of soil**. New York. Macmilan. Publishing Company.

Camargo LA, Marques Junior J, Barrón V, Alleoni LRF, Pereira GT, Teixeira DDB, de Souza Bahia ASR (2018) Predicting potentially toxic elements in tropical soils from iron oxides, magnetic susceptibility and diffuse reflectance spectra. **Catena**, 165:503-515. DOI: 10.1016/j.catena.2018.02.030.

Camargo LA, Marques Junior J, Pereira GT, Horvat RA (2008a) Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um Latossolo sob diferentes formas do relevo: II - correlação espacial entre mineralogia e agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32:2279–2288.

Camargo LA, Marques Junior J, Pereira GT, Horvat RA (2008b) Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um Latossolo sob diferentes formas de relevo: I - Mineralogia da fração argila. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 32:2269–2277.

Cambardella CA, Moorman TB, Novak JM, Parkin TB, Karlen DL, Turco RF, Konopka AE, (1994) Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil science society of America Journal**, 58:1501-1511. DOI: 10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x.

Campos MCC, Marques Junior J, Souza ZM, Siqueira DS, Pereira GT (2012) Multivariate analysis of soil attributes for the discrimination of geomorphic surfaces on a sandstone/basalt lithosequence. **Revista Ciência Agronômica**, 43:429-438. DOI: 10.1590/S1806-66902012000300003.

Carvalho CCN, Nunes FC, Antunes MAH (2013) Histórico do levantamento de solos no Brasil: da industrialização brasileira à era da informação. **Revista Brasileira de Cartografia**, 65:681-694.

Costa ACS, Bigham JM, Rhoton FE, Traina SJ (1999) Quantification and characterization of maghemite in soils derived from volcanic rocks in southern Brazil. **Clays and Clay Minerals**, 47:466–473. DOI: 10.1346/CCMN.1999.0470408.

Dinkins CP Jones C, Olson-Rutz K (2008) **Soil sampling strategies. A self-learning resource from MSU Extension**. MT200803AG New, 4(08). Disponível em: <<http://msuextension.org/publications/AgandNaturalResources/MT200803AG.pdf>>. Acesso em: 20 de Jan. 2022.

Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2016) **Programa Nacional de Solos do Brasil – PronaSolos**. Disponível em: <<https://www.embrapa.br/busca-depublicacoes/-/publicacao/1054924/programa-nacional-de-solos-do-brasilpronasolos>>. Acesso em: 26 de Jan. 2020).

Embrapa – Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária (2017) Centro Nacional de **Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo** (3. ed.) Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos. 574p.

Etchebehere MLC, Saad AR, Casado FC (2006) Análise morfoestrutural aplicada no vale do Rio do Peixe (SP): uma contribuição ao estudo da neotectônica e da morfogênese do Planalto Ocidental Paulista. **Revista Geociências-UNG-Ser**, 4:45-62.

Fernandes KL, Marques Junior J, de Souza Bahia, ASR, Dematte JAM, Ribon AA (2020) Landscape-scale spatial variability of kaolinite-gibbsite ratio in tropical soils detected by diffuse reflectance spectroscopy. **Catena**, 195:104795. DOI: 10.1016/j.catena.2020.104795.

Fernandes KL (2017) **Estimativa da caulinita e gibbsita por técnicas de difração de raios x e espectroscopia de reflectância difusa dos solos do Planalto Ocidental Paulista**. 70 f. Mestrado (Agronomia - ciência do solo) – Unesp Jaboticabal.

Fernandes LA, de Castro AB, Basilici G (2007) Seismites in continental sand sea deposits of the late Cretaceous Caiua Desert, Bauru Basin, Brazil. **Sedimentary Geology**, 199:51-64. DOI: 10.1016/j.sedgeo.2005.12.030.

Ferreira MM, Fernandes B, Curi N (1999a) Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 23:515-524. DOI: 10.1590/S0100-06831999000300004.

Ferreira MM, Fernandes B, Curi N (1999b) Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 23:507-514.

Gomes RP (2017) **Gênese, mineralogia e dinâmica do fósforo nos solos do Planalto Ocidental Paulista**. 91 f. Mestrado (Agronomia - ciência do solo) – Unesp Jaboticabal.

Gomes RP (2021) **Mapeamento de fósforo por técnicas de espectroscopia VIS-NIR e suscetibilidade magnética dos solos do Planalto Ocidental Paulista**. 95 f. Doutorado (Agronomia - ciência do solo) – Unesp Jaboticabal.

Hillel D. (1980) **Fundamentals of soil physics**. New York, Academic Press, 5-49:50-75: 147-196.

Inda Junior AV, Kämpf N (2003) Avaliação de procedimentos de procedimento dos óxidos de ferro pedogênico com ditionito-citrato-bicarbonato de enxofre. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 27:1139-1147. DOI: 10.1590/S0100-06832003000600018.

Isaaks EH, Srivastava RM (1989) **An introduction to applied geostatistics**. New York, Oxford University Press. 561p.

Kämpf N, Curi N (2000) Óxidos de ferro: indicadores de ambientes pedogênicos e geoquímicos. In: **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 107-138.

Kämpf N, Marques Junior J, Curi N (2012) Mineralogia de Solos Brasileiros. In: **Pedologia fundamentos**. SBCS, Viçosa, MG, Brasil. p. 81-146.

Khorshidi M, Lu N (2017) Quantification of exchangeable cations using soil water retention curve. **Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering**, 143:04017057. DOI: 10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001732.

Ließ M, Glaser B, Huwe B (2012) Uncertainty in the spatial prediction of soil texture: comparison of regression tree and Random Forest models. **Geoderma**, 170:70-79. DOI: 10.1016/j.geoderma.2011.10.010.

Lima TM, Weindorf DC, Curi N, Guilherme LRG, Lana RMQ, Ribeiro BT (2019) Elemental analysis of Cerrado agricultural soils via portable X-ray fluorescence spectrometry: Inferences for soil fertility assessment. **Geoderma**, 353:264-272. DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.06.045.

Lopes AS, Guilherme LRG (2016) A career perspective on soil management in the Cerrado region of Brazil. **Advances in Agronomy**, 137:1-72. Academic Press. DOI: 10.1016/bs.agron.2015.12.004.

Marques Junior J, Alleoni LRF, Teixeira DDB, Siqueira DS, Pereira GT (2015) Sampling planning of micronutrients and aluminium of the soils of São Paulo, Brazil. **Geoderma Regional**, 4:91-99. DOI: 10.1016/j.geodrs.2014.12.004.

Marques Junior J, Siqueira DS, Camargo LA, Teixeira DDB, Barrón V, Torrent J (2014) Magnetic susceptibility and diffuse reflectance spectroscopy to characterize the spatial variability of soil properties in a Brazilian Haplustalf. **Geoderma**, 219:63-71. DOI: 10.1016/j.geoderma.2013.12.007.

McGladdery C, Weindorf DC, Chakraborty S, Li B, Paulette L, Podar D, Pearson D, Kusi NYO, Duda B (2018) Elemental assessment of vegetation via portable X-ray fluorescence (PXRF) spectrometry. **Journal of Environmental Management**, 210:210-225. DOI: 10.1016/j.jenvman.2018.01.003.

Mehra OP, Jackson, ML (1960) Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. **Proceedings 7th National Conference of Clays and Clay Minerals**. Pergamon Press, New York, N.Y. 7:311-321.

Mendes WS, Demattê JAS, Benito Bonfatti BR, Resende MEB, Campos LR, Costa ACS (2021) A novel framework to estimate soil mineralogy using soil spectroscopy. *Applied Geochemistry*, 127:323–326 DOI: 10.1016/j.apgeochem.2021.104909.

Mulder VL, De Bruin S, Schaepman ME, Mayr TR (2011) The use of remote sensing in soil and terrain mapping — A review. **Geoderma**, 162:1-19. DOI: 10.1016/j.geoderma.2010.12.018.

Nanko K, Ugawa S, Hashimoto S, Imai A, Kobayashi M, Sakai H, Ishizuka S, Miura S, Tanaka N, Takahashi M, Kaneko S (2014) A pedotransfer function for estimating bulk density of forest soil in Japan affected by volcanic ash. **Geoderma**, 213:36-45. DOI: 10.1016/j.geoderma.2013.07.025.

Nasri B, Fouché O, Torri D (2015) Coupling published pedotransfer functions for the estimation of bulk density and saturated hydraulic conductivity in stony soils. **Catena**, 131:99-108. DOI: 10.1016/j.catena.2015.03.018.

Oliveira JB, Camargo MN, Rossi M, Calderano Filho B (1999) **Mapa pedológico do Estado de São Paulo**: legenda expandida. Campinas: Instituto Agrônomo/EMBRAPA Solos, v.1. 64p.

Palleiro L, Patinha C, Rodríguez-Blanco ML, Taboada-Castro MM, Taboada-Castro MT (2016) Metal fractionation in topsoils and bed sediments in the Mero River rural basin: bioavailability and relationship with soil and sediment properties. **Catena**, 144:34-44. DOI: 10.1016/j.catena.2016.04.019.

Pedrotti A, Ferreira MM, Curi N, Silva MLN, Lima JMD, Carvalho R (2003) Relação entre atributos físicos, mineralogia da fração argila e formas de alumínio no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 27:01-09.

Queiroz Neto JP, Pellerin J (1994) Solos e relevo no alto vale do rio do Peixe – Oscar Bressane (São Paulo – Brasil). **Revista do Departamento de Geografia**, 7:25-34. DOI: 10.7154/RDG.1994.0007.0002.

Rasmussen C, Dahlgren RA, Southard RJ (2010) Basalt weathering and pedogenesis across an environmental gradient in the southern Cascade Range, California, USA. **Geoderma**, 154:473-485. DOI: 10.1016/j.geoderma.2009.05.019.

Ravansari R, Lemke LD, (2018) Portable X-ray fluorescence trace metal measurement in organic rich soils: pXRF response as a function of organic matter fraction. **Geoderma**, 319:175-184. DOI: 10.1016/j.geoderma.2018.01.011.

Resende JCF, Markewitz D, Klink CA, Bustamante MMDC, Davidson EA (2011) Phosphorus cycling in a small watershed in the Brazilian Cerrado: impacts of frequent burning. **Biogeochemistry**, 105:105-118. DOI: 10.1007/s10533-010-9531-5.

Resende M, Curi N, Rezende SB, Corrêa GF, Ker JC (2014) **Pedologia**: Base para distinção de ambientes (Eds.) Lavras: Editora UFLA. 378p.

Reynaldo C (1997) **Regressão" Ridge": um metodo alternativo para o mal condicionamento da matriz das regressoras**. 121 f. Mestrado (Estatística) Universidade Estadual de Campinas.

Ribeiro BT, Silva SHG, Silva EA, Guilherme LRG (2017) Portable X-ray fluorescence (pXRF) applications in tropical Soil Science. **Ciência e Agrotecnologia**, 41:245-254. DOI: 10.1590/1413-70542017413000117.

Rodríguez-Lado L, Rial M, Taboada T, Cortizas AM (2015) A pedotransfer function to map soil bulk density from limited data. **Procedia Environmental Sciences**, 27:45-48. DOI: 10.1016/j.proenv.2015.07.112.

Rosin NA, Demattê JAM, Leite MCA, de Carvalho HWP, Costa AC, Greschuk LT, Curi N, Silva SHG (2022) The fundamental of the effects of water, organic matter, and iron forms on the pXRF information in soil analyses. **Catena**, 210:105868. DOI: 10.1016/j.catena.2021.105868.

Schaefer CEGR, Fabris JD, Ker JC (2008) Minerals in the clay fraction of Brazilian Latosols (Oxisols): a review. **Clay Minerals**, 43:137-154. DOI: 10.1180/claymin.2008.043.1.11.

Schwertmann U (1973) Use of oxalate for Fe extraction from soils. **Canadian Journal of Soil Science**, 53:244-246. DOI: 10.4141/cjss73-037.

Schwertmann U (1988) Occurrence and formation of iron oxides in various pedoenvironments. In: Stucki JW, Goodman BA, Schwertmann U (Eds.) **Iron in soils and clay minerals**, 267-308.

Schwertmann U, Schulze DG, Murad E (1982) Identification of ferrihydrite in soils by dissolution kinetics, differential x-ray diffraction, and Mössbauer spectroscopy. **Soil Science Society of America Journal**, 46:869-875. DOI: 10.2136/sssaj1982.03615995004600040040x.

Schwertmann U, Taylor RM (1989) Iron oxides. In: Dixon, JB, Weed SB (Eds.) Minerals in soil environments. **Soil Science Society of American Journal**, 1:379-438. DOI: 10.2136/sssabookser1.2ed.c8.

Sharma A, Weindorf DC, Man T, Aldabaa AAA, Chakraborty S (2014) Characterizing soils via portable X-ray fluorescence spectrometer: 3. Soil reaction (pH). **Geoderma**, 232:141-147. DOI: 10.1016/j.geoderma.2014.05.005.

Silva, L. F. V. D. (2020). Variabilidade espacial da suscetibilidade magnética para definição de áreas mínimas de manejo de fósforo adsorvido.

Silva LS, Marques Junior J, Barrón, V, Gomes RP, Teixeira DDB, Siqueira DS, Vasconcelos V (2020) Spatial variability of iron oxides in soils from Brazilian sandstone and basalt. **Catena**, 185:104258. DOI: 10.1016/j.catena.2019.104258.

Silva SHG, Ribeiro BT, Guerra MBB, de Carvalho HWP, Lopes G, Carvalho GS, Guilherme LRG, Resende M, Mancini M, Curi N, Rafael RBA, Cardelli V, Cocco S, Corti G, Chakraborty S, Li b, Weindorf DC (2021) pXRF in tropical soils: Methodology, applications, achievements and challenges. **Advances in Agronomy**, 167:1-62. DOI: 10.1016/bs.agron.2020.12.001.

Silva SHG, Silva EA, Poggere GC, Pádua Junior AL, Gonçalves MGM, Guilherme LRG, Curi N (2020a) Modeling and prediction of sulfuric acid digestion analyses data from pXRF spectrometry in tropical soils. **Scientia Agricola**, 77.

Silva SHG, Silva EA, Poggere GC, Guilherme LRG, Curi N (2018b). Tropical soils characterization at low cost and time using portable X-ray fluorescence spectrometer (pXRF): effects of different sample preparation methods. **Ciência e Agrotecnologia**, 42:80–92. DOI: 10.1590/1413-70542018421009117.

Silva SHG, Weindorf DC, Pinto LC, Faria WM, Acerbi Junior FW, Gomide LR, Mello JM, Pádua Junior AL, Souza IA, Teixeira AFS, Guilherme LRG, Curi N (2020b). Soil texture prediction in tropical soils: a portable X-ray fluorescence spectrometry approach. **Geoderma**, 362, 114136. DOI: 10.1016/j.geoderma.2019.114136.

Silvero NEQ, Siqueira DS, Coelho RM, Costa Ferreira D, Marques Junior J (2019) Protocol for the use of legacy data and magnetic signature on soil mapping of Sao Paulo Central West, Brazil. **Science of Total Environment**, 693:133–463. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2019.07.269.

Siqueira DS, Marques Junior J, Pereira GT, Teixeira DB, Vasconcelos V, Junior OC, Martins EDS (2015) Detailed mapping unit design based on soil–landscape relation and spatial variability of magnetic susceptibility and soil color. **Catena**, 135:149–162. DOI: 10.1016/j.catena.2015.07.010.

Strauss R, Brümmer GW, Barrow NJ (1997) Effects of crystallinity of goethite: II. Rates of sorption and desorption of phosphate. **European Journal of Soil Science**, 48:101–114. DOI: 10.1111/j.1365-2389.1997.tb00189.x.

Suuster E, Ritz C, Roostalu H, Reintam E, Kõlli R, Astover A (2011) Soil bulk density pedotransfer functions of the humus horizon in arable soils. **Geoderma**, 163:74–82. DOI: 10.1016/j.geoderma.2011.04.005.

Teixeira DDB, Bicalho EDS, Panosso AR, Cerri CEP, Pereira GT, Scala Junior NL (2013) Spatial variability of soil CO₂ emission in a sugarcane area characterized by secondary information. **Scientia Agricola**, 70:195–203.

Teixeira DDB, Marques Junior J, Siqueira DS, Vasconcelos V, Carvalho OA, Martins E, Pereira GT (2018) Mapping units based on spatial uncertainty of magnetic susceptibility and clay content. **Catena**, 164:79–87. DOI: 10.1016/j.catena.2017.12.038.

Vieira SR (2000) Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: Novais RF, Alvarez VH, Schaefer CEGR. (Eds.) **Tópicos em ciência do solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, 1–54.

Viscarra Rossel RA, Bui EN, de Caritat P, McKenzie NJ, (2010) Mapping iron oxides and the color of Australian soil using visible–near-infrared reflectance spectra. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface**, 115(F4). DOI: 10.1029/2009JF001645.

Warrick AW, Nielsen DR (1980) Spatial variability of soil physical properties in the field. In: Hillel D (Ed.) **Applications of soil physics**. New York, Academic Press, 350p.

Weindorf DC, Bakr N, Zhu Y (2014) Advances in portable X-ray fluorescence (PXRF) for environmental, pedological, and agronomic applications. **Advances in agronomy**, 128:1-45. DOI: 10.1016/B978-0-12-802139-2.00001-9.

Weindorf DC, Chakraborty S, Herrero J, Li B, Castañeda C, Choudhury A (2016) Simultaneous assessment of key properties of arid soil by combined PXRF and Vis–NIR data. **European Journal of Soil Science**, 67:173-183. 10.1111/ejss.12320.

Zhu Y, Weindorf DC, Zhang W (2011) Characterizing soils using a portable X-ray fluorescence spectrometer. 1. Soil texture. **Geoderma**, 167:167-177. DOI: 10.1016/j.geoderma.2011.08.010.