

RESSALVA

Atendendo solicitação do autor,
o texto completo desta tese será
disponibilizado somente a partir
de 13/03/2026.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**ESTIMATIVA DE ATRIBUTOS QUÍMICOS E NECESSIDADE
DE CALAGEM POR ESPECTROMETRIA DE
FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X EM SOLOS DO PLANALTO
OCIDENTAL PAULISTA**

**João de Deus Ferreira e Silva
Mestre em Ciência do Solo**

2024

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA – UNESP
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**ESTIMATIVA DE ATRIBUTOS QUÍMICOS E NECESSIDADE
DE CALAGEM POR ESPECTROMETRIA DE
FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X EM SOLOS DO PLANALTO
OCIDENTAL PAULISTA**

João de Deus Ferreira e Silva

Orientador: Prof. Dr. José Marques Júnior

Coorientadora: Dr^a. Kathleen Fernandes Braz

Tese apresentada à Faculdade de
Ciências Agrárias e Veterinárias – Unesp,
Câmpus de Jaboticabal, como parte das
exigências para a obtenção de título de
Doutor em Agronomia (Produção Vegetal).

2024

S586e Silva, João de Deus Ferreira
Estimativa de atributos químicos e necessidade de calagem por espectrometria de fluorescência de raios-X em solos do Planalto Ocidental Paulista / João de Deus Ferreira Silva. -- Jaboticabal, 2024
130 p. : il., tabs., mapas

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal
Orientador: José Marques Júnior
Coorientadora: Kathleen Fernandes Braz

1. Atributos do solo. 2. Sensores proximais. 3. Aprendizado de máquina. 4. Variabilidade espacial. 5. Pedometria. I. Título.

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

Essa ficha não pode ser modificada.

Impacto potencial desta pesquisa

Esta pesquisa buscou encontrar soluções inovadoras para o reconhecimento do padrão espacial dos atributos químicos do solo por meio de aplicações pedométricas, aliando sensores proximais e inteligência artificial. Os resultados obtidos possibilitam a geração de modelos para estimativa e mapeamento destes atributos, possibilitando economia nas análises laboratoriais, gerando avanços para o aumento da produção mundial de alimentos, levando em consideração a preservação ambiental.

Potential impact of this research

This research sought to find innovative solutions for recognizing the spatial pattern of soil chemical attributes through pedometric applications, combining proximal sensors and artificial intelligence. The results obtained enable the generation of regional models for estimating and mapping attributes, enabling savings in laboratory analyses, generating advances in increasing global food production, and considering environmental preservation.



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: ESTIMATIVA DE ATRIBUTOS QUÍMICOS E NECESSIDADE DE CALAGEM POR ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X EM SOLOS DO PLANALTO OCIDENTAL PAULISTA

AUTOR: JOÃO DE DEUS FERREIRA E SILVA

ORIENTADOR: JOSE MARQUES JUNIOR

COORDINADORA: KATHLEEN FERNANDES BRAZ

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em Agronomia (Produção Vegetal), pela Comissão Examinadora:

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



Documento assinado digitalmente
JOSE MARQUES JUNIOR
Data: 21/08/2024 08:14:18-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. LUÍS REYNALDO FERRACCIÚ ALLEONI (Participação Virtual)
Ciência do Solo / Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz



Documento assinado digitalmente
ZIGOMAR MENEZES DE SOUZA
Data: 21/08/2024 08:37:35-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. ZIGOMAR MENEZES DE SOUZA (Participação Virtual)
Departamento de Água e Solo / Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) - Campinas/SP



Documento assinado digitalmente
LUIS REYNALDO FERRACCIU ALLEONI
Data: 21/08/2024 10:47:52-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. GLAUCO DE SOUZA ROLIM (Participação Presencial)
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas / FCAV UNESP Jaboticabal



Documento assinado digitalmente
GLAUCO DE SOUZA ROLIM
Data: 21/08/2024 17:09:33-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Prof. Dr. THIAGO ASSIS RODRIGUES NOGUEIRA (Participação Presencial)
Departamento de Ciência do Solo / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - UNESP



Documento assinado digitalmente
THIAGO ASSIS RODRIGUES NOGUEIRA
Data: 22/08/2024 15:35:45-0300
Verifique em <https://validar.it.gov.br>

Jaboticabal, 13 de março de 2024

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

João de Deus Ferreira e Silva - Nascido em Colônia do Piauí – PI em 18 de novembro de 1994. Coursou o ensino médio integrado ao Técnico em Agropecuária no Colégio Agrícola de Floriano – CAF (2011-2013). Gradou-se em Engenharia Agrônômica pela Universidade Federal do Piauí, Câmpus de Bom Jesus – PI (2014–2018). Durante a graduação foi bolsista de iniciação científica em três projetos de pesquisa (Iniciação Científica Voluntária e Bolsista CNPq). Em março de 2019 ingressou no mestrado pelo Programa de Pós-graduação em Agronomia (Ciência do solo) pela Universidade Estadual Paulista - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV) - Câmpus de Jaboticabal – SP, tendo bolsa de estudos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) (01/03/2019 – 01/08/2020 – 18 meses). Para obtenção do título de mestrado desenvolveu a dissertação intitulada: *“Suscetibilidade magnética na predição espacial de metais potencialmente tóxicos em solos originados de basalto e arenito no estado de São Paulo”*. Em agosto de 2020, ingressou no doutorado pelo Programa de Pós-graduação em Agronomia (Produção Vegetal) pela UNESP/FCAV - Câmpus de Jaboticabal – SP, tendo bolsa de estudos da CAPES. Para obtenção do título de doutorado desenvolveu a tese intitulada: *“Estimativa de atributos químicos e necessidade de calagem por espectrometria de fluorescência de raios-X” em solos do Planalto Ocidental Paulista*. É membro do grupo de pesquisa Caracterização do solo para fins de manejo específico – CSME da Unesp - Câmpus de Jaboticabal, atuando como pós-graduando e em atividades de pesquisa e ensino na graduação.

Epígrafe

“Tenha coragem, Vá em frente!

Determinação, coragem e autoconfiança são fatores decisivos para o sucesso. Não importa quais sejam os obstáculos e as dificuldades. Se estamos possuídos de uma inabalável determinação, conseguiremos superá-los independentemente das circunstâncias, devemos ser sempre **humildes, recatados e despidos de orgulho.**

DALAI LAMA

DEDICATÓRIA

A Deus, por estar sempre presente em minha vida, por todo cuidado mesmo quando eu não percebi e por me permitir está vencendo tantos desafios. A minha mãe Isabel Galdino Ferreira por tanto esforço dado para sua família e por acreditar que seríamos capazes de estudar e sermos bons cidadãos. Te amo Mãe! A meu Pai, Manoel Francisco Avelino da Silva (*in memoriam*) por ter me dado a vida. A meus irmãos, Franciel Ferreira e Silva, Isael Ferreira e Silva, Izaelma Ferreira e Silva, Israel Ferreira e Silva, por sempre me apoiarem com incentivos e conversas sinceras ao longo do caminho. Amo vocês!!!

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, pela minha saúde, pela sua proteção, sempre ouvindo minhas orações e me fazendo alcançar lugares distantes na minha realidade.

À minha mãe Izabel Galdino Ferreira e Silva, por me apoiar incansavelmente em todas as fases da minha vida e por sempre me dar força, apesar da distância física.

Aos meus irmãos, Franciel Ferreira e Silva, Isael Ferreira e Silva, Izaelma Ferreira e Silva e Israel Ferreira e Silva, e minhas cunhadas Flávia e Leomaria e cunhado Tiago, por permanecerem sempre ao meu lado e estarem sempre dispostos a me ajudar durante essa longa caminhada.

À Ellen Cristina Nabiça Rodrigues por ajudar nessa etapa tão importante da minha vida, pelo companheirismo, compreensão e entendimento nos momentos que precisei de você.

Ao orientador Prof. Dr. José Marques Júnior e à minha coorientadora Dra. Kathleen Fernandes, pelos ensinamentos que contribuíram para o meu crescimento profissional pessoal e profissional.

Aos professores da banca de qualificação: Prof. Dr. Alan Rodrigo Panosso e Prof. Dr. Thiago Assis Rodrigues Nogueira, por suas sugestões e questionamentos contribuíram muito para a evolução desse trabalho.

Aos professores da banca de defesa de tese: Prof. Dr. Luis Reynaldo Ferracciú Alleoni, Prof. Dr. Zigomar Menezes de Souza, Prof. Dr. Glauco de Souza Rolim, Prof. Dr. Thiago Assis Rodrigues Nogueira, pelas correções e sugestões para a melhoria do trabalho.

À Universidade Estadual Paulista - UNESP - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal – FCAV.

Todos os integrantes do grupo de pesquisa “Caracterização do solo para fins de manejo específico”.

Ao Hagabo Paulo pela recepção no apartamento e pela paciência e compreensão nos momentos difíceis durante o mestrado e ao Romário por compartilhar o convívio durante o período do doutorado e pela paciência e empatia em me ouvir. Grato a vida de vocês.

Aos integrantes do grupo de pesquisa SOLOCER-UFPI representados pelo Professor Dr. Ronny Sobreira Barbosa, por terem me dado o apoio de base fundamental para que eu chegasse até aqui.

Aos integrantes da minha turma de mestrado e doutorado por todas as conversas de apoio e momentos de descontração durante esse período. Muito Obrigado.

A todos os meus amigos, de fora e dentro da Universidade que fazem parte de minhas pequenas conquistas, de minhas dificuldades, de minhas superações, eu agradeço.

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

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	iv
ABSTRACT	v
LISTA DE TABELAS	vi
LISTA DE FIGURAS	viii
CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1.1 Introdução geral	1
1.2. Revisão de literatura	4
1.2.1. Pedometria.....	4
1.2.2 Espectrometria de fluorescência de raios-X (EFRx) na Ciência do solo..	6
1.2.3 Mapeamento de atributos químicos do solo	9
1.2.4 Calagem nos solos tropicais úmidos	11
1.2.5 Aprendizado de máquina na Ciência do solo	13
1.2.6 Referências	15
CAPÍTULO 2 – ESTIMATIVA DE ATRIBUTOS QUÍMICOS DO SOLO DO PLANALTO OCIDENTAL PAULISTA POR FUSÃO DE ESPECTROS DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X.....	30
RESUMO.....	30
1.INTRODUÇÃO	32
2.Material e métodos.....	33
2.1 Localização e caracterização da área de estudo.....	33
2.2 Planejamento amostral.....	35
2.3 Análises laboratoriais	36
2.3.1 Granulometria	36
2.3.2 Análises químicas.....	36
2.3.3 Espectrometria de fluorescência de raios-X (EFRx).....	36
2.4 Processamento e análise de dados.....	37
2.4.1 Estatística descritiva	37
2.4.2 Pré-processamento das curvas espectrais	37
2.4.3 Aprendizado de máquina	40
2.4.4 Análise geoestatística	42

3.Resultados e Discussão.....	43
3.1 Estatística descritiva dos atributos do solo	43
3.2 Correlação entre os atributos do solo	45
3.3 Estimativa dos atributos químicos do solo	46
3.4 Mapeamento dos atributos químicos obtidos e estimados pelo aprendizado de máquina com os algoritmos Cubista e XGBoost	50
4. Conclusões	54
5. Referências Bibliográficas	55
CAPÍTULO 3: DETERMINAÇÃO DE ZONAS ESPECÍFICAS DE MANEJO PARA CALAGEM EM SOLOS TROPICAIS ÚMIDOS UTILIZANDO A ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X.....	65
RESUMO.....	65
1 - Introdução.....	67
2. Material e métodos	69
2.1 Localização e caracterização da área de estudo.....	69
2.2 Planejamento amostral.....	71
2.3 Análises laboratoriais	71
2.3.1 Granulometria	71
2.3.2 Análises químicas.....	72
2.3.3 Espectrometria de fluorescência de raio-X	72
2.3.4 Análises mineralógicas	73
2.4 Cálculo da necessidade de calagem	74
2.5 Análise de dados.....	74
2.5.1 Estatística descritiva	74
2.5.2 Aprendizagem de máquina	75
2.5.3 Análise geoestatística	76
3. Resultados e discussão	77
3.1 Estatística descritiva dos atributos do solo	77
3.2 Correlação entre os atributos do solo	80
3.3 Estimativa da soma de base, capacidade de troca catiônica e saturação por bases	83

3.4 Mapeamento para soma de base, capacidade de troca catiónica, saturação por bases e necessidade de calagem	87
4. Conclusões	90
5. Referências	91
CAPÍTULO 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	107

ESTIMATIVA DE ATRIBUTOS QUÍMICOS E NECESSIDADE DE CALAGEM POR ESPECTROMETRIA DE FLUORESCÊNCIA DE RAIOS-X EM SOLOS DO PLANALTO OCIDENTAL PAULISTA

RESUMO - O monitoramento dos atributos químicos do solo é importante para otimização das práticas de manejo agrícola que visam manter o solo em boas condições para alcançar altas produtividades. No entanto, os métodos tradicionais são onerosos, demandam tempo e possuem entraves quanto ao grande uso de produtos laboratoriais e seu descarte, favorecendo o emprego de métodos alternativos com o uso de técnicas pedométricas e aplicando-se sensores para estimativa dos atributos do solo. Diante desse panorama, tem-se a hipótese que a espectrometria de fluorescência de raios-x (EFRx) permitirá estimar e mapear atributos químicos do solo e a necessidade da calagem em áreas de dimensão regional com ampla variação pedológica e geomorfológica. Nesse contexto, objetivou-se com a presente pesquisa estabelecer as relações existentes entre os dados obtidos a partir da EFRx e os atributos químicos do solo do Planalto Ocidental Paulista (POP) que possui ampla variação pedológica e geomorfológica, para fins de delimitar zonas específicas de manejo para tomada de decisão mais assertiva. A área de estudo possui aproximadamente 13 milhões de hectares com solos originados em sua maioria de rochas sedimentares (arenito) e magmáticas (basalto). Foram utilizadas 226 amostras de solo georreferenciadas no POP para o estudo da variabilidade espacial dos atributos mineralógicos, físicos e químicos. Foram realizadas análises: físicas, químicas, mineralógicas e de EFRx. Foi calculada a necessidade de calagem para as amostras da área de estudo. Os dados foram analisados por meio de estatística descritiva e correlação entre os atributos do solo. Foi realizada a estimativa dos atributos químicos do solo utilizando dados espectrais e elementos totais obtidos pelo sensor de EFRx com auxílio de técnicas de aprendizado de máquina. Após a estimativa dos atributos químicos foi realizado o mapeamento dos dados observados e preditos utilizando a geoestatística. Os atributos granulométricos (areia, silte e argila), químicos (MO, Ca, Mg, SB, V%, CTC) e os elementos obtidos pelo sensor de EFRx (Al, Ca, Mg, K, Si, Ti, Mn, Fe, Cu, Zn) apresentaram maiores teores para os solos originados a partir do material de origem basalto. Os espectros e os elementos obtidos pelo sensor de EFRx associados a técnicas de aprendizado de máquina foram eficientes para estimativa e mapeamento dos atributos químicos do POP. A elaboração de mapas detalhados usando sensores proximais são capazes de auxiliar no entendimento da variabilidade dos atributos do solo em áreas de dimensão regional, reduzindo o uso de insumos, a degradação dos solos e proporcionando o manejo mais sustentável.

Palavras-chave: Atributos do solo, Sensores proximais, Inteligência artificial, Variabilidade espacial, Pedometria.

ESTIMATION OF CHEMICAL ATTRIBUTES AND NEED FOR LIMING BY X-RAY FLUORESCENCE SPECTROMETRY IN SOILS OF THE WESTERN PLANALTO OF PAULISTA

ABSTRACT - Monitoring soil chemical attributes is important for optimizing agricultural management practices that aim to maintain soil in good condition to achieve high productivity. However, traditional methods are costly, time-consuming, and have obstacles regarding the large use of laboratory products and their disposal; favoring the use of alternative methods with the use of pedometric techniques and the application of sensors to estimate soil attributes. Given this scenario, it is hypothesized that X-ray fluorescence spectrometry xRFS will allow estimating and mapping soil chemical attributes and the need for liming in regional areas with wide pedological and geomorphological variation. The objective of this research was to establish the relationships between data obtained from xRFS and the chemical attributes of the soil of the Planalto Oeste Paulista (POP), which has wide pedological and geomorphological variation, to purposes of delimiting specific management zones for more assertive decision-making. The study area has approximately 13 million hectares with soils mostly originating from sedimentary rocks (sandstone) and magmatic rocks (basalt). 226 soil samples georeferenced in the POP were used to study the spatial variability of mineralogical, physical and chemical attributes. Analyzes were carried out: physical, chemical, mineralogical and x-RFS. The need for liming was calculated for samples from the study area. The data were analyzed using descriptive statistics and correlation between soil attributes. The chemical attributes of the soil were estimated using spectral data and total elements obtained by the x-RFS sensor with the aid of machine learning techniques. After estimating the chemical attributes, the observed and predicted data were mapped using geostatistics. The granulometric attributes (sand, silt and clay), chemicals (MO, Ca, Mg, SB, V%, CTC) and the elements obtained by the x-RFS sensor (Al, Ca, Mg, K, Si, Ti, Mn, Fe, Cu, Zn) presented higher levels for soils originating from basalt source material. The spectra and elements obtained by the x-RFS sensor associated with machine learning techniques were efficient for estimating and mapping the chemical attributes of POP. The creation of detailed maps using proximal sensors can help understand the variability of soil attributes in regional areas, reducing the use of inputs, soil degradation and more sustainable management.

Keywords: Soil attributes, Proximal sensors, Artificial intelligence, Spatial variability, Pedometrics.

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2: Fusão de espectros de fluorescência de raios-X para a estimativa de atributos da fertilidade dos solos do Planalto Ocidental Paulista

Tabela 1. Parâmetros e valores testados para calibração dos algoritmos.....	40
Tabela 2. Estatística descritiva dos atributos estudados do planalto ocidental paulista na profundidade de 0-20 cm.....	44
Tabela 3. Métricas de avaliação dos modelos cubista e extreme gradient boosting (XGBoost) e para os atributos químicos do solo.	47
Tabela 4. Métricas geoestatísticas para os atributos químicos obtidos e estimados profundidade de 0,00 - 0,20 m, para os solos do Planalto Ocidental Paulista.	51

CAPÍTULO 3: Espectrometria de fluorescência de raios-x na delimitação de zonas específicas de manejo para calagem em solos tropicais.

Tabela 1. Parâmetros e valores testados para calibração dos algoritmos.....	72
Tabela 2. Estatística descritiva para atributos granulométricos, mineralógicos e químicos os obtidos por metodologias convencionais para os solos do Planalto Ocidental Paulista (POP).	74
Tabela 3. Estatística descritiva para os atributos obtidos pela espectrometria de fluorescência de raio-X para solos do Planalto Ocidental Paulista (POP).....	76
Tabela 4. Métricas de avaliação dos modelos de Random Forest para estimativa da soma de bases (SB), capacidade de troca catiônica (CTC) e saturação por bases (V) na profundidade de 0,00–0,20 m, para solos do Planalto Ocidental Paulista.	840
Tabela 5. Métricas geoestatísticas para soma de base (SB), capacidade de troca	

catiônica (CTC), saturação por bases (V) e necessidade da calagem (NC) na profundidade de 0,00–0,20 m, para os solos do Planalto Ocidental Paulista.....87

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 1 – Considerações gerais

Figura 1. O mecanismo de espectrometria fluorescência de raios-X de um átomo ...7

CAPÍTULO 2: Fusão de espectros de fluorescência de raios-X para a estimativa de atributos da fertilidade dos solos do Planalto Ocidental Paulista

Figura 1. a) Mapa pedológico do Planalto Ocidental Paulista. (Fonte: Instituto Agrônomo de Campinas (equivalência ao soil taxonomy). b) Mapa geológico do Planalto Ocidental Paulista c) Mapa de dissecação do Planalto Ocidental Paulista..34

Figura 2: Espectros da Fluorescência de raios-X concatenados.....36

Figura 3: Espectros da Fluorescência de raios-X concatenados após remoção das colunas de baixo sinal espectral.....37

Figura 4: Espectros da Fluorescência transformados em absorbância.....37

Figura 5: Espectros da Fluorescência após aplicação da técnica de reamostragem.38

Figura 6: Espectros após centralização.38

Figura 7: Espectros após remoção de ruído.....39

Figura 8: Correlação entre os atributos granulométricos e químicos do solo. MO: Matéria Orgânica; Ca: Cálcio; Mg: Magnésio; K: Potássio; SB: Soma de bases; CTC: Capacidade de troca de cátions; V%: Saturação por bases.44

Figura 9. Regressão do desempenho do modelo cubista para os atributos químicos: (A) Soma de Bases; (B) Capacidade de Troca Catiônica; (C) Saturação por bases; (D)

Matéria Orgânica; (E) Cálcio; (F) Magnésio.47

Figura 10. Regressão do desempenho Extreme Gradient Boosting (XGBoost) para os atributos químicos: (A) Soma de Bases; (B) Capacidade de Troca Catiônica; (C) Saturação por bases; (D) Matéria Orgânica; (E) Cálcio; (F) Magnésio.48

Figura 11. Mapas de variabilidade espacial (A) Cálcio, (B) Magnésio, (C) Soma de Bases, (D) Saturação por bases, (E) Capacidade de Troca Catiônica, (F) Matéria Orgânica observados e estimados pelos modelos cubista e XGboost para os solos do Planalto Ocidental Paulista.....51

CAPÍTULO 3: Espectrometria de fluorescência de raios-x na delimitação de zonas específicas de manejo para calagem em solos tropicais.

Figura 1: Mapa pedológico do Planalto Ocidental Paulista (A). (Fonte: Instituto Agrônomo de Campinas: Entre parênteses equivalência ao soil taxonomy). Mapa geológico do Planalto Ocidental Paulista (B) (Fernandes et al., 2007, Fernandes, 2004). Mapa de dissecação do Planalto Ocidental Paulista (C).....67

Figura 2: Matriz de correlação de Spearman para os atributos dos solos do Planalto Ocidental Paulista. Hm: Hematita; Gt: Goethita; CtGb: relação caulinita sobre gibbsita; pH: potencial hidrogeniônico; H+Al: Acidez potencial; MO: Matéria Orgânica; Caq: Cálcio; Mgq: Magnésio; Kq: potássio; SB: Soma de bases; CTC: Capacidade de troca de cátions; V: Saturação por bases; NC: Necessidade de calagem; Al: Alumínio, Si: Silício; K: Potássio; Ca: Cálcio; Ti: Titânio; Mn: Mangânes; Fe: Ferro; Cu: Cobre; Zn: Zinco; Mg: Magnésio obtidos pelo sensor de fluorescência de raio x - ** e * - Significativo a 1 e 5%.....78

Figura 3: Regressão do desempenho dos modelos e importância das variáveis para estimativa: (A) Soma de Bases (SB), (B) Capacidade de Troca Catiônica (CTC), (C) Saturação por bases (V) para os solos do Planalto Ocidental Paulista.....82

Figura 4. Mapas de variabilidade espacial para soma de base (SB - A), capacidade de troca catiónica (CTC - B), saturação por bases (V% - C) e necessidade de calagem (NC - D) observados e estimados por random forest e seus respectivos mapas de erro, para os solos do Planalto Ocidental Paulista.85

CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS

1.1 INTRODUÇÃO GERAL

O avanço no estudo do solo e suas interfaces atualmente estão no centro do paradigma da sustentabilidade ambiental para a manutenção da vida na Terra (FAO, 2015). É reconhecido o importante papel do solo para a redução das mudanças climáticas e da escassez de água, conservação da biodiversidade global e a produção de alimentos para a população mundial que alcançará em torno de 10 bilhões de pessoas até 2050 (FAO; ITPS, 2015; EASAC, 2018).

A Ciência do solo é fundamental para alcançar os Objetivos de Desenvolvimento Sustentável (ODS) das Nações Unidas (ONU, 2015; 2020). Bouma et al. (2019) discutem que pelo menos nove dos objetivos estão associados diretamente ao sistema biofísico terrestre, no qual o solo está no centro por meio das funções ecossistêmicas. O solo é o responsável por regular processos que ocorrem constantemente e são base para alcançar de forma satisfatória os serviços ecossistêmicos, tais como o potencial primário de produtividade, ciclos biogeoquímicos, conservação dos recursos hídricos e conservação da biodiversidade e a ciclagem dos nutrientes (Schulte et al., 2014; EC, 2019).

Com o intuito de alcançar o patamar de sustentabilidade desejado, é necessário a cooperação de todas as subáreas da Ciência do solo visando alavancar os conhecimentos científicos de forma transdisciplinar e fornecer soluções adequadas para a produção sustentável (Bouma, 2015). Somado ao que foi dito, deve-se considerar para o manejo adequado o conhecimento dos fatores limites para o uso dos solos, tendo como base as características locais do recurso natural para aplicação de práticas conservacionistas mais direcionadas (Keesstra et al., 2016).

Com a crescente demanda por informações sobre o solo, os mapas convencionais não atendem por completo o conhecimento exigido da Ciência do solo Global, que busca entender as relações de causa e efeito que ocorrem para aprimorar seu manejo (Minasny e Mcbratney, 2016; Mestanza-Ramón et al., 2022). Porém, com o avanço da tecnologia da informação e o surgimento da pedometria,

sendo essa última definida como a aplicação de métodos matemáticos e estatísticos no estudo da distribuição, caracterização e gênese dos solos, possibilitaram a aquisição de uma grande quantidade de informações sobre o solo e o aumento do conhecimento espacial dos seus atributos (Roudier et al., 2016; Rossiter, 2018).

Os métodos pedométricos utilizados para a aquisição das informações de solos trazem muitos avanços em relação aos métodos tradicionais, pois fornecem estimativas quantitativas dos atributos do solo ligado a suas incertezas, são dados reproduzíveis e de possível atualização, são considerados métodos econômicos e rápidos e permitem quantificar a importância das informações que controlam a distribuição dos atributos do solo (Malone et al., 2017; Arrouays et al., 2020).

Um dos grandes aliados para a geração de dados dos atributos do solo tem sido a aplicação de sensores proximais. Estes sensores geram informações em uma ampla faixa do espectro eletromagnético (Viscarra Rossel et al., 2016). Os sensores têm sido aplicados com sucesso na Ciência do solo por que suas medidas retornam informações simultâneas de suas características físicas, químicas e mineralógicas (Adamchuk et al., 2018). Em adição, a grande quantidade de dados gerados pelos sensores tem sido base fundamental para o mapeamento pedométrico das características do solo resultando no seu monitoramento e uso mais assertivo (Teng et al., 2018, Leue et al., 2019).

Tendo em vista o número elevado de informações geradas pelos sensores pedométricos, as técnicas atuais de aprendizado de máquina se tornaram uma grande ferramenta nesse campo de estudo, por transformar as medidas inespecíficas obtidas pelos sensores em valores numéricos para estimar os atributos do solo (Wadoux et al., 2019). Os algoritmos de aprendizado de máquina têm sido utilizados com sucesso na Ciência do solo pela capacidade do reconhecimento dos padrões não lineares que são encontrados nos corpos naturais, como o solo (Lagacherie et al., 2020; Wadoux e McBratney, 2021). Tais técnicas não são dependentes de suposições estatísticas tradicionais e possuem o potencial de processar e encontrar relações de uma quantidade elevada de preditores com uma única variável alvo, fato que eleva sua aplicação nos últimos anos nos estudos do mapeamento digital do solo (Hengl et al., 2018).

Entre os sensores atuais aplicados a estudos pedométricos, a espectrometria de fluorescência de raios-X (EFRx) tem sido aplicada com sucesso por permitir a obtenção de informações qualitativas e quantitativas de diversos elementos da tabela periódica, situados com números atômicos maiores que o magnésio e menores que o urânio (Weindorf et al., 2014; Ribeiro et al., 2017). Tal sensor permite a obtenção dos comprimentos de onda dos elementos no material irradiado, como cada elemento possui linhas espectrais características e sua intensidade está relacionada a concentração do elemento é possível caracterizar com sucesso as amostras de solo (Horta et al., 2015; Lemièrre, 2018). Visto o potencial, esse sensor tem sido utilizado em estudos de predição de classes de solos (Hartemink et al., 2020), atributos físicos (Chakraborty et al., 2019), biológicos (Teixeira et al., 2021) e fertilidade do solo (Santos et al., 2022).

Vários estudos têm evidenciado o potencial da EFRx para estimativa de atributos químicos em regiões do mundo. Entre os atributos estimados temos: concentração de gesso em solos de regiões áridas, pH do solo e a capacidade de troca de catiônica em solos na América do Norte (Weindorf et al., 2013; Sharma et al., 2014, 2015). Solos tropicais úmidos, como o Brasil, já se tem investigações acerca da estimativa da granulometria do solo, carbono orgânico, macronutrientes e micronutrientes (Lima et al., 2018; Benedet et al., 2021).

Com base no exposto, tem-se como hipótese que a EFRx permitirá estimar e mapear atributos químicos do solo e a necessidade da calagem em áreas de dimensão regional com ampla variação pedológica e geomorfológica. Logo, objetivou-se neste estudo, estabelecer as relações existentes entre os dados obtidos por meio de EFRx e os atributos químicos do solo para fins de delimitar zonas específicas de manejo para aplicações mais eficientes de corretivos agrícolas.

1.2. REVISÃO DE LITERATURA

1.2.1. Pedometria

O termo pedometria foi citado pela primeira vez pelo cientista do solo Alex McBratney no final dos anos 1980, que faz referência ao neologismo derivado das raízes gregas “pedon” que significa solo e “metron” medição. De forma geral, a pedometria é conceituada como a área do conhecimento da Ciência do solo que utiliza métodos quantitativos para o estudo da gênese e distribuição do solo por meio de métodos matemáticos determinísticos ou estocásticos para obtenção do conhecimento sobre os processos e propriedades do solo (Webster, 2015; Wadoux et al., 2021).

Apesar do termo pedometria ser estabelecido apenas na década dos anos 1980, as ideias iniciais dessa ciência datam de meados do século XIX (McBratney et al., 2019). Dentre os trabalhos pioneiros fundamentais para criar a pedometria, pode-se citar exemplos como: Forbes (1946) medindo a temperatura do solo em diferentes profundidades; Haines e Keen (1925) quando estudaram a uniformidade do solo com auxílio de um penetrômetro e um arado, no qual construíram o primeiro mapa de solo de alta resolução, demonstrando a importância da variação espacial do solo; Youden e Mehlich, (1937) estudando métodos de amostragem eficientes para estudo de solos e Kristof et al. (1973) que utilizaram valores obtidos da matéria orgânica do solo para calibrar dados multiespectrais analisados em computador e coletados por um scanner aerotransportado; entre outros.

Muitos textos associam o sucesso do avanço e evolução da pedometria a chegada e popularização dos computadores pessoais que se tornaram acessíveis na década de 1970, tornando o gerenciamento e análise de dados de solos mais rápidos. Aliado a isso, as informações e mapas de solos passaram a ser disponibilizados de forma automatizada, possibilitando análises mais complexas como técnicas multivariadas, modelagem via regressão e avaliação de tendência dos atributos na superfície do solo (Webster, 2015; McBratney et al., 2019).

Com o advento da exploração da tecnologia, as ferramentas de computação e processamento de dados associados a pedometria ficaram cada vez mais evidentes e de fácil acesso. Fato facilitado com os computadores velozes e as

técnicas estatísticas de mineração de dados e algoritmos de aprendizado de máquina associados aos sistemas de posicionamento global (Behrens et al., 2014; Odgers et al., 2014). Somado ao fato da crescente demanda dos dados de solos buscado por governos e empresas privadas que reconheceram seu papel no controle da degradação ambiental e das mudanças climáticas (Hartemink e Minasny, 2014; Stockmann et al., 2015).

Com a crescente demanda de informações espaciais sobre o solo, a fim de reconhecer as explicações sobre a causa e o efeito da distribuição espacial dos solos, das suas propriedades e das funções ecossistêmicas a eles associados, Mcbratney et al. (2003) propuseram a modificação da função criada por Jenny (1941) sobre os fatores de formação dos solos, passando a ser chamado de SCORPAN e usada para a previsão dos fatores de formação do solo, aos invés de buscar explicar apenas a formação dos tipos de solo (McBratney et al., 2003), na qual: $S = f(s, c, o, r, p, a, n)$. Sendo que: S = tipo de solo ou atributo; s = solo; c = clima; o = organismos; r = topografia ou atributos da paisagem; p = material de origem; a = idade e/ou fator tempo; n = espaço, posição espacial.

A pedometria surgiu sustentada na incorporação de novos campos de estudo que foram inseridos dentro da Ciência do solo, visando buscar suas inter-relações para a obtenção de informações acuradas sobre seus atributos no espaço e no tempo. A Geoestatística é considerada o primeiro campo da ciência aliada a pedometria, e é considerada parte essencial para seu surgimento, pois como as propriedades do solo geralmente variam continuamente, o solo é um meio ideal para desenvolver novas técnicas Geoestatística (Minasny e McBratney, 2016).

O estabelecimento da importância do mapeamento digital de solos popularizou a pedometria. Há grande demanda dos dados de solos para o manejo assertivo das práticas agrícolas reconhecida dentro e fora do âmbito acadêmico. Isso desperta a atenção dos governos e empresas para a conexão entre a Ciência do solo e a redução dos efeitos das mudanças climáticas, aumentando o interesse global por alternativas sustentáveis para a produção de alimentos e combustíveis limpos (Finke, 2012; Minasny e McBratney, 2014).

Assim, a pedometria tem sido utilizada como ramo da Ciência do solo aliada para monitorar a capacidade dos solos no auxílio do entendimento das demandas

ambientais globais. Somado a isso, tem sido fundamental no mapeamento de aspectos relacionados a segurança do solo e a identificação de áreas com maior necessidade de proteção (McBratney et al., 2019).

1.2.2 Espectrometria de fluorescência de raios-X (EFRx) na Ciência do solo

A análise de EFRx tem sido utilizada em diversas áreas do conhecimento, como em ciências ambientais, geologia, química, arqueologia e nos diferentes ramos da agronomia (Elango et al., 2021; Li et al., 2022; Ng et al., 2023; Manhas et al., 2024). A grande expansão do uso dos equipamentos que usam como técnica fundamental a fluorescência de raios-X diz respeito a capacidade de análise de amostras sólidas de forma não destrutiva, avaliação de vários elementos de forma simultânea, facilidade no uso, velocidade na preparação, precisão e custo baixo, quando se leva em consideração a quantidade simultânea de dados fornecidos (Johnson et al., 2021; Bai et al., 2024).

As medidas fornecidas pelos equipamentos de EFRx são caracterizadas pela energia e a intensidade da radiação fluorescente. Cada elemento presente no material analisado possui energia e intensidades específicas. A análise é, portanto, qualitativa, para identificação dos elementos presentes, e de forma quantitativa para mensurar as suas concentrações (Kobylarz et al., 2023). González et al. (2024) reportam que as energias da maioria dos raios-X são semelhantes às energias da ligação dos elétrons do núcleo dos átomos, assim, eles são fortemente influenciados pelo seu número atômico. Dessa forma, pode-se fazer a identificação e quantificação dos elementos específicos presentes em um material analisado (Figura 1).

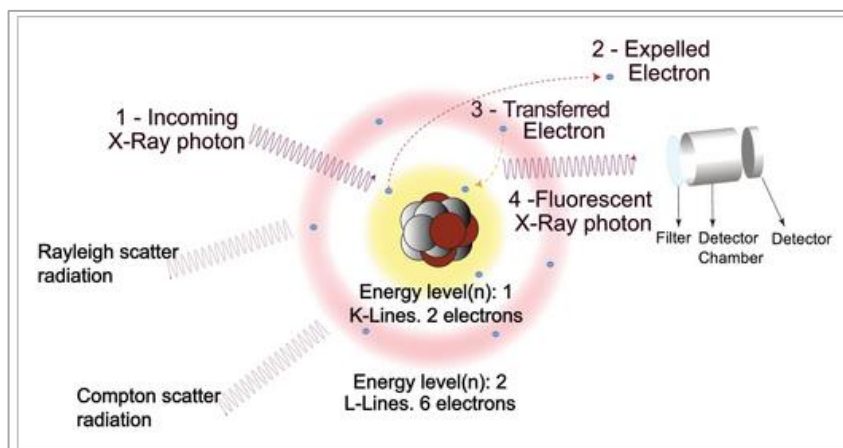


Figura 1. O mecanismo de fluorescência de raios-X de um átomo (Fonte: González et al., 2024).

Após seu surgimento, ao longo de muitas décadas as análises de EFRx foram limitadas a equipamentos presentes em laboratório. Porém, com os avanços da indústria, a EFRx está presente em equipamentos portáteis, passíveis de serem utilizados à campo, se tornando úteis para as diversas aplicações em pesquisas agrônômicas e ambientais (Melquiades et al., 2024; Chen et al., 2024), tornando mais acessível análises que anteriormente eram realizadas tradicionalmente por técnicas analíticas de laboratório como espectrometria de absorção atômica (EAA) ou espectrometria de emissão atômica com plasma acoplado indutivamente (ICP OES). Técnicas consideradas mais demoradas e perigosas por usar uma gama de reagentes fortes para a digestão das amostras de solos ou material vegetal.

Visto a grande facilidade da obtenção das medidas realizadas pelo EFRx, vários estudos vêm sendo realizados com esse sensor. Os estudos surgem como objetivo de entender as relações entre as medidas obtidas pelo EFRx e as análises tradicionais feitas nas amostras do solo. As investigações cercam temas sobre gênese do solo e classificação, caracterização de propriedades físico-químicas modelagem e previsão de classes de solo, propriedades e materiais de origem, análises espaciais, avaliação da qualidade ambiental para fins agrônômicos e geoquímica do solo (Lima et al., 2018; Hartemink et al., 2020; Santos et al., 2022).

Para as regiões tropicais úmidas os estudos estão focados principalmente na estimativa dos atributos físicos e químicos do solo por meio dos da EFRx utilizando desde métodos matemáticos tradicionais como a regressão linear até algoritmos robustos de aprendizado de máquina (Benedet et al., 2020; Teixeira et al., 2020). A

vantagem dos modelos gerados a partir dos dados de EFRx é a possibilidade de serem utilizados em amostras de solos em que as análises convencionais não foram realizadas por limitações financeiras ou laboratoriais. No entanto, os dados obtidos pelo sensor de EFRx podem ser inseridos em modelos desenvolvidos e os atributos do solo podem ser estimados de forma rápida e com precisão aceitável (Silva et al., 2018; Sun et al., 2020).

Um dos campos de estudo que a EFRx vem sendo empregada é para a comparação dos elementos totais obtidos em suas medidas com os resultados fornecidos por análises convencionais da química úmida para determinação dos teores totais ou semi-totais, buscando estabelecer correlações matemáticas entre os métodos de análise (Weindorf et al., 2014). Goff et al. (2020) em estudo desenvolvido em solos dos Estados Unidos utilizaram métodos de preparo de amostras lidas pela EFRx para a quantificação geoquímica de perfis de solos. Os autores alcançaram resultados promissores para os óxidos estudados (Si, Ti, Al, Mn, K, Fe e Ca), nos quais obtiveram equações com R^2 acima de 0,60 para os elementos analisados. No Brasil, Silva et al. (2019) compararam dados geoquímicos obtidos de amostras de solos após digestão semitotal, no qual relataram resultados acurados para a maioria dos elementos químicos analisados (Ca, Cu, Fe, Mn, Cr, Ni e V) com altos coeficientes de determinação.

Outra área de aplicação da EFRx é para o reconhecimento do comportamento espacial das classes de solos e seus atributos. Tal fato surge da possibilidade da avaliação de uma maior quantidade de amostras dentro da mesma área de interesse a ser mapeada (Meneses et al., 2020; Mukhopadhyay et al., 2020). Kebonye et al. (2021) utilizaram os dados de EFRx para estimar e realizar o mapeamento dos teores de As em solos da República Tcheca, obtendo um comportamento espacial semelhante entre as duas técnicas analisadas. Em solos agrícolas brasileiros, utilizando informações geológicas, do relevo e de EFRx, foi realizado o mapeamento dos teores de Fe, Cu, Zn e Mn (Pelegriño et al., 2018)

A EFRx aplicada a gênese e classificação dos solos está ajudado a elucidar o grau de intemperismo de perfis de solos e a distribuição interna dos elementos químicos importantes para caracterização das classes de solos (Chakraborty et al., 2019, Hartemink et al., 2020). Em solos turcos, foi caracterizada uma catena com

quatro perfis de solos com o auxílio da EFRx para identificar as variações físicas, químicas e geoquímicas (Gozukara et al., 2021). Para solos com horizontes podzólicos, pode-se concluir que Al e o Fe obtidos pela EFRx são úteis no delineamento dos horizontes de forma quantitativa (Huang et al., 2023).

1.2.3 Mapeamento de atributos químicos do solo

O conhecimento sobre a qualidade do solo tem sido constantemente investigado com objetivo de mantê-lo preservado, com potencial para produção adequadas das culturas. Visto isso, a qualidade do solo é conceituada como a capacidade de uma classe de solo exercer suas funções, dentro dos limites naturais ou manejados do ecossistema, limites estes que visam sustentar a produtividade vegetal e animal, manter e melhorar a qualidade da água e do ar, visando manter condições básicas para a saúde e habitação humana (Lal, 2016; Brevik et al., 2017).

A qualidade do solo é representada pelo conjunto de indicadores, sejam eles físicos, químicos ou biológicos que atuam de forma integrada e equilibrada para a manutenção dos serviços ecossistêmicos do solo (Wood et al., 2018). Portanto, como os demais indicadores, os químicos são importantes e estão correlacionados à capacidade do fornecimento de nutrientes para as plantas e à retenção de elementos ou compostos químicos prejudiciais ao ambiente e ao crescimento vegetal (Abdul Khalil et al., 2015).

Sabendo da importância dos atributos do solo, somado ao conhecimento de que estes apresentam distribuição espacial em escala de campo (Liu et al., 2017) é levantada a importância do conhecimento da variabilidade detalhada, que muitas vezes não são consideradas nos mapeamentos tradicionais por limitações inerentes a recursos financeiros e de amostragem para o levantamento correto das informações do solo (McBratney et al., 2006). Porém, apesar das dificuldades de aquisição das informações quantitativas, sabe-se de sua importância para o uso sustentável do solo, manejo de zonas específicas para aplicação de nutrientes e planejamento de uso da terra baseados nas potencialidades do solo (McBratney et al., 2014; Moshia et al., 2014).

A aquisição dos valores quantitativos dos atributos químicos do solo é realizada tradicionalmente por meio de sua determinação usando a química úmida em

laboratório (Mishra e Riley, 2015). Tais análises, fazem aumentar a dificuldade de levarmos em consideração a variabilidade espacial, que resultam em manejos ineficientes com excesso ou falta de insumos em locais específicos de uma área agrícola (Hyytiäinen et al., 2011). O manejo ineficiente realizado pela aquisição de poucas amostras analisadas pode levar ao manejo localizado inadequado levando a utilização de insumos acima ou abaixo dos valores ideais para a manutenção dos teores dos atributos químicos. Níveis elevados podem levar a contaminação do solo e da água ou ainda níveis baixos podem causar redução de produtividade nas culturas agrícolas (Nawar et al., 2017).

Visto a grande demanda por informações detalhadas para o manejo eficiente dos atributos químicos, a busca por alternativas para aumentar o detalhamento das informações do solo sem necessariamente realizar análises tradicionais tem aumentado (Viscarra Rossel e Bouma, 2016). Uma das alternativas que vem sendo utilizada de forma massiva é o uso de sensores para estimativa dos atributos. O surgimento desses equipamentos impulsiona novas tecnologias aplicadas para caracterizar a variabilidade dos atributos químicos (Brevik et al., 2016; Nawar et al., 2019).

Estudos que buscam alternativas para mapear os atributos químicos estimados por meio de medidas obtidas por sensores, tem aumentado, pois possui como pontos positivos, a rapidez e a facilidade na obtenção de uma ampla quantidade de dados que podem ser usados para estimativa dos atributos químicos com boa acurácia (Zhu et al., 2011; Sharma et al., 2014). Dentre os sensores utilizados para estimar e mapear os atributos químicos dos solos está a EFRx (Rawal et al., 2019; Andrade et al., 2020).

Em solos da região Sudeste do Brasil, foi utilizado a EFRx no mapeamento da matéria orgânica e dos atributos SB, CTC e V%, sendo encontrado resultados satisfatórios para a variabilidade da matéria orgânica e da capacidade de troca de cátions em uma área de aproximadamente 100 ha (Fontenelli et al., 2021). A EFRx também apresentou resultados promissores para o mapeamento dos teores de C e N em uma catena de solos desenvolvidos sobre clima temperado (Duda et al., 2017). Tais resultados reforçam a aplicação desse sensor em mapeamentos dos atributos químicos, que pode favorecer estudos que são direcionados a áreas em escalas com dimensões estaduais ou nacionais.

1.2.4 Calagem nos solos tropicais úmidos

A conservação do solo de maneira que ele consiga manter todas as suas funções ecossistêmicas (sequestro de carbono, armazenamento de nutrientes e água, produção de alimentos e biomassa) é essencial para a humanidade em rumo a segurança alimentar mundial e alcançar níveis desejáveis de sustentabilidade agrícola (Holland et al., 2018). Com o avanço da agricultura mundial e a grande exigência pelos recursos advindos do solo, as preocupações com sua degradação têm sido constantes, aliados a redução da qualidade do solo por processos de salinização, erosão, contaminação e acidificação natural ou antropogênica (FAO, 2015).

A prática da calagem e os pontos positivos da sua utilização são conhecidos há séculos, desde o início do seu estabelecimento como prática agrícola (Dodgshon, 1978). Como as demais práticas adotadas, a calagem primariamente foi adotada focada no aumento da produção das culturas. No entanto, o objetivo atual tem sido compreender seu impacto na melhoria da saúde do solo e conservação do meio ambiente (Gibbons et al., 2014).

A aplicação de materiais corretivos da acidez do solo tem como objetivo primário a elevação do pH do solo, e conseqüentemente, a redução da sua acidificação. A acidez dos solos é causada por processos naturais ou antrópicos, sendo os naturais causados pela ciclagem biogeoquímica do C, N ou S, material de origem e decomposição da matéria orgânica (Clair e Hindar, 2005; Kirk et al., 2010). Já as fontes antropogênicas podem ser representadas pelas aplicações de produtos fertilizantes acidificantes utilizados nas práticas agrícolas ou pela extração dos cátions devido a agricultura intensiva (Guo et al., 2010; Kunhikrishnan et al., 2016).

A propriedade do solo que é indicadora direta da necessidade da aplicação de calcário é o nível atual da saturação por bases do solo. Outra propriedade que influencia na aplicação de corretivos agrícolas é a textura do solo, pois solos argilosos exigem maiores doses de calcário para sua correção. No entanto, solos arenosos reduzem a necessidade de doses elevadas para sua correção. Em adição, além da textura, os teores de matéria orgânica também alteram a exigências de correção do

solo, quanto maior o teor de matéria orgânica, menor será a necessidade da calagem (Lemire et al., 2006; Sinclair et al., 2014).

O uso dos corretivos da acidez por meio da prática da calagem tem como função alterar positivamente os atributos do solo, por meio de materiais que contêm cátions benéficos com o Ca^{2+} e Mg^{2+} . A reação entre o material aplicado na neutralização da acidez forma gás carbônico e água, resultando no aumento do pH do solo. Ao modificar sua acidez, o solo atua de maneira significativa nos ciclos biogeoquímicos do C, N e do S, que são ciclos fundamentais para as atividades agrícolas e a manutenção da vida humana na Terra (Helyar, 1976).

A correção do solo também é uma prática agrícola que altera os processos biológicos do solo, por tanto, influencia na quantidade e tipos de organismos presentes no mesmo, podendo aumentar a proporção de bactérias e fungos nos solos (Bothe, 2015). O aumento do pH do solo influencia positivamente na colonização das raízes das plantas pelos microrganismos, que se estabelecem melhor em condições de acidez intermediária com pH do solo entre 5 e 6 (Castillo et al., 2014). Os níveis de fixação de N_2 também aumentam devido à maior presença de espécies associativas de leguminosas, aumento da população dos microrganismos e redução de fatores inibidores na rizosfera das ações entre os microrganismos e as plantas (Zhalnina et al., 2013; Gomes et al., 2015).

As práticas de correções dos solos tropicais úmidos são responsáveis pelo comportamento e disponibilidade dos elementos essenciais, benéficos e tóxicos, por ditarem as reações de adsorção, precipitação e absorção dos elementos pelas plantas (Fageria e Baligar, 2008). Com níveis mais elevados do pH do solo, macronutrientes como N, P, K e S aumentam seus teores devido ao favorecimento da mineralização do material orgânico (Higgins et al., 2012). Para os nutrientes Ca e Mg, a maior influência da correção da acidez para esses elementos está no fato destes fazerem parte da composição dos materiais corretivos da acidez do solo.

A calagem também impacta positivamente nos atributos físicos. No manejo dos solos, produtos corretivos de acidez trazem benefícios físicos, pois favorecem a agregação do solo e a formação de micro agregados, facilitando o fluxo da água ao longo do perfil (Valzano et al., 2001). Por meio do aumento da atividade biológica, a calagem aumenta a estabilidade dos agregados e da porosidade total dos solos,

sendo que a frequência do manejo dos solos com a aplicação de corretivos é um ponto fundamental no manejo estrutural dos solos (Aye et al., 2016).

Conforme discutido anteriormente, a calagem aplicada nos solos que possuem acidez elevada é fundamental para a expansão de novas áreas nas regiões tropicais e resultados satisfatórios de produtividade. Portanto, as pesquisas que investigam o papel da calagem na variabilidade do comportamento físico e químico dos solos ainda são consideradas um desafio (Edwards et al., 2016; Alkan et al., 2022; Joshi et al., 2023). Considerar estudos da calagem e sua influência nos serviços ecossistêmicos regionais e nacionais nos trópicos é fundamental para aplicação de ações de melhoria da qualidade dos solos (Emmett et al., 2016).

1.2.5 Aprendizado de máquina na Ciência do solo

O aumento do uso dos algoritmos de aprendizado de máquina nas últimas duas décadas é notável em diversos campos da pesquisa mundial. Não diferente, o aprendizado de máquina tem sido utilizado constantemente nas diferentes áreas de estudo da agronomia. Na Ciência do solo, ou mais precisamente nas pesquisas dentro da pedometria e mapeamento digital de solos, o aprendizado de máquina é usado para desenvolver modelos estatísticos usados para buscar e encontrar padrões de dados do solo por meio das variáveis ambientais que são intrínsecas a sua formação (McBratney et al., 2019; Padarian et al., 2019).

Diversos motivos podem ser atribuídos ao avanço da aplicação do aprendizado de máquina para pesquisas em Ciência do solo, no qual, alguns estão relacionados a questões globais como a crescente demanda por informações para mitigar a degradação, ou ainda motivos diretamente relacionados ao aumento da disponibilidade de dados obtidos de forma tradicional ou pedométrica (sensores), somado a evolução e disponibilidade das técnicas de inteligência artificial disponíveis de forma gratuita para utilização nos mais diversos campos de pesquisa.

O aprendizado de máquina pode ser caracterizado como a obtenção de informações úteis a partir de dados que são modelados por meio de algoritmos que buscam atingir resultados acurados e replicáveis dos padrões dentro dos dados fornecidos (Russell e Norving, 2016). Por isso, o aprendizado de máquina possui

como um dos aliados principais a estatística para análise de dados (Mohri e Rostamizadeh, 2012; Misilmani et al., 2019).

O incremento do uso do aprendizado de máquina para estudo dos atributos do solo está relacionado ao aumento do poder da computação e sua acessibilidade pelos pesquisadores para a manipulação de dados agronômicos, somado as diferentes técnicas de sensoriamento remoto para obtenção de dados, com o crescente números de cientistas do solo com conhecimento sobre processamento e ciência de dados (Ware e Mabe, 2015; Jordan e Mitchell, 2015).

Diversas áreas têm utilizado o aprendizado de máquina para aplicações em estudos sobre atributos do solo e aplicações pedométricas (Padarian et al., 2019). No campo do sensoriamento remoto a utilização de dados de satélite e aprendizado de máquina tem sido aplicado, Xu et al. (2017) utilizaram bandas espectrais obtidas remotamente para estimar o N total e K trocável usando o algoritmo de floresta aleatória. Para o mapeamento e monitoramento da salinidade do solo, Khadim et al. (2019) usaram o algoritmo de árvores de decisão em seu estudo.

O estudo das dinâmicas do estoque do C do solo também tem sido amplamente investigado, Liu et al. (2018) estudando o estoque de C em solos da China buscaram compreender a variação espaço-temporal desse atributo e sua estimativa por meio de índices de vegetação e climáticos utilizando redes neurais e floresta aleatória. Para o mapeamento do estoque de C, Wang et al. (2018) utilizaram dados topográficos e radiométricos em solos australianos comparando os algoritmos de floresta aleatória e árvores de regressão aprimoradas.

No campo do estudo ambiental, os algoritmos têm sido usados para a predição de elementos potencialmente tóxicos do solo por meio de medidas de sensores proximais. Costa et al. (2017) utilizaram modelos lineares (regressão linear múltipla) e não lineares para a predição dos metais Cd, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn. Reeves et al. (2018) estimaram teores de elementos potencialmente tóxicos por meio de sensores remotos em solos da América do Norte com sucesso.

Os algoritmos ainda têm sido aplicados para estudar a erosão do solo, material de origem, modelagem de dados espectroscópicos, atributos físicos do solo e mapeamento de variáveis contínuas, como classes de solos. Tais pesquisas reforçam a ampla gama dos algoritmos de aprendizado de máquina para estudos de

mapeamento digital de solos (Geisen et al., 2007; Poggio et al., 2016; Martinez et al., 2017; Heggemann et al., 2017; Gao et al., 2018).

1.2.6 Referências

Adamchuk V, Ji W, Rossel RV, Gebbers R, Tremblay N (2018) Proximal soil and plant sensing. **Precision agriculture basics** 119-140.

Andrade R, Faria WM, Silva SHG, Chakraborty S, Weindorf DC, Mesquita LF, Curi N (2020) Prediction of soil fertility via portable X-ray fluorescence (pXRF) spectrometry and soil texture in the Brazilian Coastal Plains. **Geoderma** 357, 113960.

Arrouays D, Poggio L, Guerrero OAS, Mulder VL (2020) Digital soil mapping and GlobalSoilMap: Main advances and ways forward. **Geoderma Regional** 21, e00265.

Aye NS, Sale PW, Tang C (2016) The impact of long-term liming on soil organic carbon and aggregate stability in low-input acid soils. **Biology and Fertility of Soils** 52, 697-709.

Barrow NJ (2017) The effects of pH on phosphate uptake from the soil. **Plant Soil** 410, 401–410.

Behrens T, Schmidt K, Ramirez-Lopez L, Gallant J, Zhu AX, Scholten T (2014) Hyper-scale digital soil mapping and soil formation analysis. **Geoderma** 213, 578–588.

Benedet L, Acuña-Guzman SF, Faria WM, Silva SHG, Mancini M, Santos TAF, Curi N (2021) Rapid soil fertility prediction using X-ray fluorescence data and machine learning algorithms. **Catena** 197, 105003.

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

Bolan NS, Adriano DC, Curtin D (2003) Soil acidification and liming interactions with nutrient and heavy metal transformation and bioavailability. **Advances in agronomy** 215-272.

Bothe H (2015) The lime–silicate question. **Soil Biology and Biochemistry** 89, 172-183.

Bouma J, Kwakernaak C, Bonfante A, Stoorvogel JJ, Dekker LW (2015) Soil science input in transdisciplinary projects in the Netherlands and Italy. **Geoderma Regional**, 5, 96–105.

Bouma J, Montanarella L, Evanylo G (2019). The challenge for the soil science community to contribute to the implementation of the UN Sustainable Development Goals. **Soil Use and Management**, 35(4), 538-546.

Brevik EC, Calzolari C, Miller BA, Pereira P, Kabala C, Baumgarten A, Jordán A (2016) Soil mapping, classification, and pedologic modeling: History and future directions. **Geoderma** 264: 256-274.

Brevik EC, Steffan JJ, Burgess LC, Cerdà A (2017) Links between soil security and the influence of soil on human health. **Global soil security** 261-274.

Castillo C, Fredericksen C, Koch R, Sieverding E (2014) Effect of seed treatment with natural products on early arbuscular mycorrhizal colonization of wheat by *Claroideoglomus claroideum*. **Journal of Applied Botany and Food Quality** 87.

Chakraborty S, Li B, Weindorf DC, Deb S, Acree A, De P, Panda P (2019) Use of portable X-ray fluorescence spectrometry for classifying soils from different land use land cover systems in India. **Geoderma** 338, 5-13.

Chakraborty S, Li B, Weindorf DC, Deb S, Acree A, De P, Panda P (2019) Use of portable X-ray fluorescence spectrometry for classifying soils from different land use land cover systems in India. **Geoderma** 338, 5-13.

Clair TA, Hindar A (2005) Liming for the mitigation of acid rain effects in freshwaters: a review of recent results. **Environmental Reviews** 13(3), 91-128.

Dodgshon RA (1978) Land improvement in Scottish farming: marl and lime in Roxburghshire and Berwickshire in the eighteenth century. **The Agricultural History Review** 26(1), 1-14.

Duda BM, Weindorf DC, Chakraborty S, Li B, Man T, Paulette L, Deb S (2017) Soil characterization across catenas via advanced proximal sensors. **Geoderma** 298, 78-91.

EASAC (2018) **Opportunities for soil sustainability in Europe**. EASAC Policy report 36 German National Academy of Sciences Leopoldina. Halle, Germany: EASAC.

EC (2019) **Reflection paper: Towards a sustainable Europe by 2030**. EC.COM (2019) 22. Brussels.

Edwards AC, Sinclair AH, Coull M, Crooks W, Rees RM, Lumsdon DG (2016) Regional trends in Scottish advisory soil acidity and phosphorus results: significance of management history, land use and soil attributes. **Soil Use and Management** 32, 44-53.

El Misilmani, HM, Naous T (2019) **Machine learning in antenna design: An overview on machine learning concept and algorithms**. In 2019 International Conference on High Performance Computing & Simulation (HPCS) pp. 600-607.

Elango, D, Kanatti, A, Wang, W, Devi, AR, Ramachandran, M, Jabeen, A (2021) Analytical methods for iron and zinc quantification in plant samples. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, 52(10), 1069-1075.

Emmett BA, Cooper D, Smart S, Jackson B, Thomas A, Cosby B, Evans C, Glanville H, McDonald JE, Malham SK (2016). Spatial patterns and environmental constraints on ecosystem services at a catchment scale. **Science of the Total Environment** 572, 1586-1600.

Fageria NK (2009) **The Use of Nutrients in Crop Plants**. CRC press, Boca Raton, Florida, USA.

FAO (2015) **Agriculture Organization: Status of the World's Soil Resources (SWSR)–Main Report**. Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils, Rome, Italy.

FAO (2015) Status of the World's Soil Resources (SWSR)–Main Report. **Food and Agriculture Organization of the United Nations and Intergovernmental Technical Panel on Soils**, Rome, Italy. 650.

Finke PA (2012) On digital soil assessment with models and the Pedometrics agenda. **Geoderma** 171, 3-15.

Fontenelli JV, Adamchuk VI, Ferreira MM, Amaral LR, Guimarães CC, Demattê JA, Magalhães PS (2021) Evaluating the synergy of three soil spectrometers for improving the prediction and mapping of soil properties in a high anthropic management area: A case of study from Southeast Brazil. **Geoderma** 402, 115347.

Forbes JD (1846) XVIII—Account of some Experiments on the Temperature of the Earth at different Depths, and in different Soils, near Edinburgh. **Earth and Environmental Science Transactions of The Royal Society of Edinburgh** 16(2), 189-236.

Gao M, Li HY, Liu D, Tang J, Chen X, Chen X, Leung LR (2018) Identifying the dominant controls on macropore flow velocity in soils: A meta-analysis. **Journal of Hydrology** 567, 590-604.

Gates WP (2006) X-ray absorption spectroscopy. **Developments in clay science** 1, 789-864.

Geissen V, Kampichler C, López L.J.J.J, Galindo-Acántara A (2007) Superficial and subterranean soil erosion in Tabasco, tropical Mexico: development of a decision tree modeling approach. **Geoderma** 139(3-4), 277-287.

Gibbons JM, Williamson JC, Williams AP, Withers PJ, Hockley N, Harris IM, Hughes JW, Taylor RL, Jones DL, Healey JR (2014) Sustainable nutrient management at field, farm and regional level: Soil testing, nutrient budgets and the trade-off between lime application and greenhouse gas emissions. **Agriculture, ecosystems & environment** 188, 48-56.

Goff K, Schaetzl RJ, Chakraborty S, Weindorf DC, Kasmerchak C, Bettis III E. A. (2020) Impact of sample preparation methods for characterizing the geochemistry of soils and sediments by portable X-ray fluorescence. **Soil Science Society of America Journal** 84(1), 131-143.

Gomes EA, Oliveira CA, Lana UG, Noda RW, Marriel IE, Souza FA (2015) Arbuscular Mycorrhizal Fungal Communities in the Roots of Maize Lines Contrasting for Al Tolerance Grown in Limed and Non-Limed Brazilian Oxisoil. **Journal of microbiology and biotechnology** 25(7), 978-987.

Goulding KWT (2016) Soil acidification and the importance of liming agricultural soils with particular reference to the United Kingdom. **Soil use and management** 32(3), 390-399.

Gozukara G, Zhang Y, Hartemink AE, Altunbas S, Mustafa SARI (2021) Soil chronosequence and biosequence on old lake sediments of the Burdur Lake in Turkey. **Pedosphere** 31(6), 882-891.

Guo JH, Liu XJ, Zhang Y, Shen JL, Han WX, Zhang WF, Christie P, Goulding KWT, Vitousek PM, Zhang FS (2010) Significant acidification in major Chinese croplands. **Science** 327, 1008–1010

Haines WB, Keen BA (1925) Studies in soil cultivation. II. A test of soil uniformity by means of dynamometer and plough. **The Journal of Agricultural Science** 15(3), 387-394.

Hartemink AE, Minasny B (2014) Towards digital soil morphometrics. **Geoderma** 230, 305-317.

Hartemink AE, Zhang Y, Bockheim JG, Curi N, Silva SHG, Grauer-Gray J, Krasilnikov P (2020) Soil horizon variation: A review. **Advances in Agronomy** 160(1), 125-185.

Heggemann T, Welp G, Amelung W, Angst G, Franz SO, Koszinski S, Pätzold S (2017) Proximal gamma-ray spectrometry for site-independent in situ prediction of soil texture on ten heterogeneous fields in Germany using support vector machines. **Soil and Tillage Research** 168, 99-109.

Helyar K (1976) Nitrogen cycling and soil acidification. **The Journal of the Australian Institute of Agricultural Science**, 217-221.

Hengl T, Nussbaum M, Wright MN, Heuvelink GB, Gräler B (2018) Random forest as a generic framework for predictive modeling of spatial and spatio-temporal variables. **PeerJ** 6, e5518.

Higgins S, Morrison S, Watson CJ (2012) Effect of annual applications of pelletized dolomitic lime on soil chemical properties and grass productivity. **Soil use and Management** 28(1), 62-69.

Holland JE, Bennett AE, Newton AC, White PJ, McKenzie BM, George TS, Hayes R C (2018) Liming impacts on soils, crops and biodiversity in the UK: A review. **Science of the Total Environment** 610, 316-332.

Horta A, Malone B, Stockmann U, Minasny B, Bishop TFA, McBratney AB, Pozza L (2015) Potential of integrated field spectroscopy and spatial analysis for enhanced assessment of soil contamination: A prospective review. **Geoderma** 241, 180-209.

Huang YC, Huang CY, Minasny B, Chen ZS, Hseu ZY (2023) Using pXRF and Vis-NIR for characterizing diagnostic horizons of fine-textured podzolic soils in subtropical forests. **Geoderma** 437, 116582.

Hyytiäinen K, Niemi JK, Koikkalainen K, Palosuo T, Salo T (2011) Adaptive optimization of crop production and nitrogen leaching abatement under yield uncertainty. **Agricultural Systems** 104(8): 634-644.

IPCC - Intergovernmental Panel on Climate Change: Guidelines for National Green House Gas Inventories. Prepared by the National Greenhouse Gas Inventories Programme. Japan: IGES, 2006. chapter 11.

Jenny H (1994) **Factors of soil formation: a system of quantitative pedology**. Courier Corporation.

Johnson, LRM, Ferguson, JR, Freund, KP, Drake, L, Duke, D (2021) Evaluating obsidian calibration sets with portable X-Ray fluorescence (ED-XRF)

instruments. **Journal of Archaeological Science: Reports**, 39, 103126.

Jordan MI, Mitchell TM (2015). Machine learning: Trends, perspectives, and prospects. **Science** 349(6245), 255-260.

Kalnicky DJ, Singhvi R (2001) Field portable XRF analysis of environmental samples. **Journal of hazardous materials** 83(1-2), 93-122.

Kaniu MI, Angeyo KH, Mwala AK, Mangala MJ (2012) Direct rapid analysis of trace bioavailable soil macronutrients by chemometrics-assisted energy dispersive X-ray fluorescence and scattering spectrometry. **Analytica Chimica Acta** 729, 21-25.

Kebonye NM, John K, Chakraborty S, Agyeman PC, Ahado SK, Eze PN, Borůvka L (2021) Comparison of multivariate methods for arsenic estimation and mapping in floodplain soil via portable X-ray fluorescence spectroscopy. **Geoderma** 384, 114792.

Keesstra SD, Bouma J, Wallinga J, Tiftonell P, Smith P, Cerdà A, Fresco LO (2016) The significance of soils and soil science towards realization of the United Nations sustainable development goals, **soil**, 2, 111–128.

Khadim FK, Su H, Xu L, Tian J (2019). Soil salinity mapping in Everglades National Park using remote sensing techniques and vegetation salt tolerance. **Physics and Chemistry of the Earth Parts A/B/C**, 110, 31-50.

Khalil HA, Hossain MS, Rosamah E, Azli NA, Saddon N, Davoudpoura Y, Dungani R (2015) The role of soil properties and it's interaction towards quality plant fiber: A review. **Renewable and Sustainable Energy Reviews** 43, 1006-1015.

Kirk GJ, Bellamy PH, Lark RM (2010) Changes in soil pH across England and Wales in response to decreased acid deposition. **Global Change Biology** 16(11), 3111-3119.

Kristof S, Baumgardner M, Johannsen C (1973) Spectral Mapping of Soil Organic Matter. **LARS Technical Reports** pp. 26.

Kunhikrishnan A, Thangarajan R, Bolan N, Xu Y, Mandal S, Gleeson D, Seshadri B, Zaman M, Barton L, Tang C (2016) Functional relationships of soil acidification, liming, and greenhouse gas flux. **Advances in agronomy** 139, 1-71.

Lagacherie P, Arrouays D, Bourennane H, Gomez C, Nkuba-Kasanda L (2020) Analysing the impact of soil spatial sampling on the performances of Digital Soil Mapping models and their evaluation: A numerical experiment on Quantile Random Forest using clay contents obtained from Vis-NIR-SWIR hyperspectral imagery. **Geoderma** 375, 114503.

Lal R (2016) Soil health and carbon management. **Food Energy Security** 5: 212–222.

Lemiere B (2018) A review of pXRF (field portable X-ray fluorescence) applications for applied geochemistry. **Journal of Geochemical Exploration** 188, 350-363.

Lemire E, Taillon KM, Hendershot WH (2006) Using pH-dependent CEC to determine lime requirement. *Canadian journal of soil science*, 86(1), 133-139.

Leue M, Hoffmann C, Hierold W, Sommer M (2019) In-situ multi-sensor characterization of soil cores along an erosion-deposition gradient. **Catena** 182, 104140.

Li, F, Zhang, X, Lu, A, Xu, L, Ren, D, You, T (2022) Estimation of metal elements content in soil using x-ray fluorescence based on multilayer perceptron. **Environmental monitoring and assessment**, 194(2), 95.

Lima TM, Weindorf DC, Curi N, Guilherme LR, Lana RM, Ribeiro BT (2019) Elemental analysis of Cerrado agricultural soils via portable X-ray fluorescence spectrometry: Inferences for soil fertility assessment. **Geoderma** 353, 264-272.

Liu M, Xu X, Sun AY, Wang K (2017) Decreasing spatial variability of drought in southwest China during 1959–2013. **International journal of climatology** 37(13), 4610-4619.

Liu S, Yang Y, Shen H, Hu H, Zhao X, Li H, Fang J (2018) No significant changes in topsoil carbon in the grasslands of northern China between the 1980s and 2000s. **Science of the total environment** 624, 1478-1487.

Malone BP, Styc Q, Minasny B, McBratney AB (2017) Digital soil mapping of soil carbon at the farm scale: A spatial downscaling approach in consideration of measured and uncertain data. **Geoderma** 290, 91-99.

Manhas, M, Tomar, A, Tiwari, M, Sharma, S (2024) **Application of X-ray fluorescence in forensic archeology: A review**. X-Ray Spectrometry.

Martinez G, Weltz M, Pierson FB, Spaeth KE, Pachepsky Y (2017) Scale effects on runoff and soil erosion in rangelands: Observations and estimations with predictors of different availability. **Catena** 151, 161-173.

McBratney A, Gruijter J, Bryce A (2019) Pedometrics timeline. **Geoderma** 338, 568-575.

McBratney AB, Minasny B, Rossel RV (2006) Spectral soil analysis and inference systems: A powerful combination for solving the soil data crisis. **Geoderma** 136(1-2), 272-278.

McBratney AB, Santos MM, Minasny B (2003) On digital soil mapping. **Geoderma** 117(1-2), 3-52.

McBratney AB, Stockmann U, Angers DA., Minasny B, Field DJ (2014) Challenges for soil organic carbon research. **Soil carbon** 3-16.

Menezes MD, Bispo FHA, Faria WM, Gonçalves MGM, Curi N, Guilherme LRG (2020) Modeling arsenic content in Brazilian soils: What is relevant ?. **Science of the Total Environment** 712, 136511.

Mestanza-Ramón C, Cuenca-Cumbicus J, D'Orio G, Flores-Toala J, Segovia-Cáceres S, Bonilla-Bonilla A, Straface S (2022) Gold mining in the Amazon Region of Ecuador: History and a review of its socio-environmental impacts. **Land**, 11(2), 221.

- Minasny B, McBratney AB (2016) Digital soil mapping: A brief history and some lessons. **Geoderma** 264, 301-311.
- Mishra U, Riley WJ, (2015) Scaling impacts on environmental controls and spatial heterogeneity of soil organic carbon stocks. **Biogeosciences** 12, 3993–4004
- Mohri M, Rostamizadeh A, Talwalkar A (2012) **Foundations of Machine Learning**. Adaptive Computation and Machine Learning.
- Moshia ME, Khosla R, Longchamps L, Reich R, Davis JG, Westfall DG (2014) Precision manure management across site-specific management zones: Grain yield and economic analysis. **Agronomy Journal** 106(6), 2146-2156.
- Mukhopadhyay S, Chakraborty S, Bhadoria PBS, Li B, Weindorf DC (2020) Assessment of heavy metal and soil organic carbon by portable X-ray fluorescence spectrometry and NixPro™ sensor in landfill soils of India. **Geoderma Regional** 20, e00249.
- Nawar S, Corstanje R, Halcro G, Mulla D, Mouazen AM (2017) Delineation of soil management zones for variable-rate fertilization: A review. **Advances in agronomy** 143: 175-245.
- Nawar S, Delbecq N, Declercq Y, Smedt P, Finke P, Verdoodt A, Meirvenne MV, Mouazen AM (2019) Can spectral analyses improve measurement of key soil fertility parameters with X-ray fluorescence spectrometry?. **Geoderma** 350: 29-39.
- Odgers N, McBratney A, Minasny B, Sun W, Clifford D (2014) DSMART: an algorithm to spatially disaggregate soil map units. In: GlobalSoilMap: Basis of the Global Spatial Soil Information System - **Proceedings of the 1st GlobalSoilMap** Conference pp. 261–266.
- Padarian J, Minasny B, McBratney AB (2020) Machine learning and soil sciences: a review aided by machine learning tools. **Soil** 6(1), 35-35.
- Pelegriño MHP, Silva SHG, Faria ÁJG, Mancini M, Teixeira AFDS, Chakraborty S, Curi N (2022) Prediction of soil nutrient content via pXRF spectrometry and its spatial

variation in a highly variable tropical area. **Precision Agriculture** 23(1), 18-34.

Poggio L, Gimona A, Spezia L, Brewer MJ (2016) Bayesian spatial modelling of soil properties and their uncertainty: The example of soil organic matter in Scotland using R-INLA. **Geoderma** 277, 69-82.

Rawal A, Chakraborty S, Li B, Lewis K, Godoy M, Paulette L, Weindorf DC (2019) Determination of base saturation percentage in agricultural soils via portable X-ray fluorescence spectrometer. **Geoderma** 338, 375-382.

Reeves MK, Perdue M, Munk LA, Hagedorn B (2018) Predicting risk of trace element pollution from municipal roads using site-specific soil samples and remotely sensed data. **Science of the Total Environment** 630, 578-586.

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.

Rossel RV, Behrens T, Ben-Dor E, Brown DJ, Demattê, JAM, Shepherd KD, Ji W (2016) A global spectral library to characterize the world's soil. **Earth-Science Reviews** 155, 198-230.

Rossiter DG, Bouma J (2018) A new look at soil phenoforms—Definition, identification, mapping. **Geoderma** 314, 113-121.

Roudier P, Manderson A, Hedley C (2016) Advances towards quantitative assessments of soil profile properties. **Digital soil morphometrics** 113-132.

Russell SJ, Norvig P (2016) **Artificial intelligence: a modern approach**. Malaysia; Pearson Education Limited.

Santos TAF, Andrade R, Mancini M, Silva SHG, Weindorf DC, Chakraborty S, Curi N (2022) Proximal sensor data fusion for tropical soil property prediction: Soil fertility properties. **Journal of South American Earth Sciences** 116, 103873.

Santos TAF, Pelegrino MHP, Faria WM, Silva SHG, Gonçalves MGM, Júnior FWA, Curi N (2020) Tropical soil pH and sorption complex prediction via portable X-ray fluorescence spectrometry. **Geoderma** 361, 114132.

Schulte RPO, Creamer RE, Donnellan T, Farrelly N, Fealy R, O'Donoghue C, O'HUallachain D (2014). Functional land management: A framework for managing soil-based ecosystem services for the sustainable intensification of agriculture. **Environmental Science and Policy**, 38, 45–58.

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.

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.

Sharma A, Weindorf DC, Wang D, Chakraborty S (2015) Characterizing soils via portable X-ray fluorescence spectrometer: 4. Cation exchange capacity (CEC). **Geoderma** 239, 130-134.

Silva JGD (2015) **Revised World Soil Charter**. Rome, FAO.

Silva SHG, Silva EA, Poggere GC, Guilherme LRG, Curi N (2018) 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.

Sinclair A, Crooks B, Coull M (2014) **Soils Information, Texture and Liming Recommendations**, Technical Note TN656. SRUC, Aberdeen.

Stockmann U, Malone B, McBratney A, Minasny B (2015) Landscape-scale exploratory radiometric mapping using proximal soil sensing. **Geoderma** 239, 115–129.

Sun F, Bakr N, Dang T, Pham V, Weindorf DC, Jiang Z, Wang QB (2020) Enhanced soil profile visualization using portable X-ray fluorescence (PXRF) spectrometry. **Geoderma** 358, 113997.

Teixeira AFDS, Weindorf, DC, Silva SHG, Guilherme LRG, Curi N (2018) Portable X-ray fluorescence (pXRF) spectrometry applied to the prediction of chemical attributes in Inceptisols under different land uses. **Ciência e Agrotecnologia** 42, 501-512.

Teng H, Rossel RAV, Shi Z, Behrens T (2018) Updating a national soil classification with spectroscopic predictions and digital soil mapping. **Catena** 164, 125-134.

UN (2015) **Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development**. Resolution adopted by the General Assembly on 25 September 2015. United Nations.

Valzano FP, Murphy BW, Greene RSB (2001) The long-term effects of lime (CaCO_3), gypsum ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$), and tillage on the physical and chemical properties of a sodic red-brown earth. **Soil Research** 39(6), 1307-1331.

Viscarra Rossel RA, Bouma J (2016) Soil sensing: A new paradigm for agriculture. **Agricultural Systems** 148: 71-74.

Wadoux AMC, Heuvelink GB, Lark RM, Lagacherie P, Bouma J, Mulder VL, McBratney AB (2021) Ten challenges for the future of pedometrics. **Geoderma** 401, 115155.

Wadoux AMC, McBratney AB (2021) Digital soil science and beyond. **Soil Science Society of America Journal** 85(5), 1313-1331.

Wadoux AMC, Padarian J, Minasny B (2019) Multi-source data integration for soil mapping using deep learning. **Soil** 5(1), 107-119.

Wang B, Waters C, Orgill S, Gray J, Cowie A, Clark A, Li Liu D (2018) High resolution mapping of soil organic carbon stocks using remote sensing variables in the semi-arid rangelands of eastern Australia. **Science of the Total Environment** 630, 367-378.

Ware M, Mabe M (2015) **The STM report: An overview of scientific and scholarly journal publishing.**

Webster R (2015) Technological developments for spatial prediction of soil properties, and Danie Krige's influence on it. **Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy** 115(2), 165-172.

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.

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.

Weindorf DC, Herrero J, Castañeda C, Bakr N, Swanhart S (2013) Direct soil gypsum quantification via portable x-ray fluorescence spectrometry. **Soil Science Society of America Journal** 77(6), 2071–2077

Weindorf DC, Herrero J, Castañeda C, Bakr N, Swanhart S (2013) Direct soil gypsum quantification via portable x-ray fluorescence spectrometry. **Soil Science Society of America Journal** 77(6), 2071-2077.

Weindorf DC, Zhu Y, Haggard B, Lofton J, Chakraborty S, Bakr N, Legoria M (2012) Enhanced pedon horizonation using portable X-ray fluorescence spectrometry. **Soil Science Society of America Journal** 76(2), 522-531.

Wood SA, Gilbert JA, Leff JW, Fierer N, D'Angelo H, Bateman C, McGuire KL (2017) Consequences of tropical forest conversion to oil palm on soil bacterial community and network structure. **Soil Biology and Biochemistry** 112, 258-268.

Xu Y, Smith SE, Grunwald S, Abd-Elrahman A, Wani SP (2017) Incorporation of satellite remote sensing pan-sharpened imagery into digital soil prediction and mapping models to characterize soil property variability in small agricultural fields. **ISPRS journal of photogrammetry and remote sensing** 123, 1-19.

Youden WJ, Mehlich A (1937) **Selection of efficient methods for soil sampling.** In: Contributions of the Boyce Thompson Institute for Plant Research. vol. 9. pp. 59–70.

Zhalnina K, Quadros PD, Gano KA, Davis-Richardson A, Fagen JR, Brown CT, Triplett EW (2013) Ca. Nitrososphaera and Bradyrhizobium are inversely correlated and related to agricultural practices in long-term field experiments. **Frontiers in microbiology** 4, 104.

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

CAPÍTULO 4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com o crescimento da população mundial, tem-se a necessidade do aumento da produção de alimentos e as informações sobre o solo tem sido fundamentais para aumento na eficiência dessa produção. O conhecimento sobre os atributos mineralógicos, físicos e químicos são fundamentais para a otimização de produção e aquisição das melhores estratégias de conservação do solo.

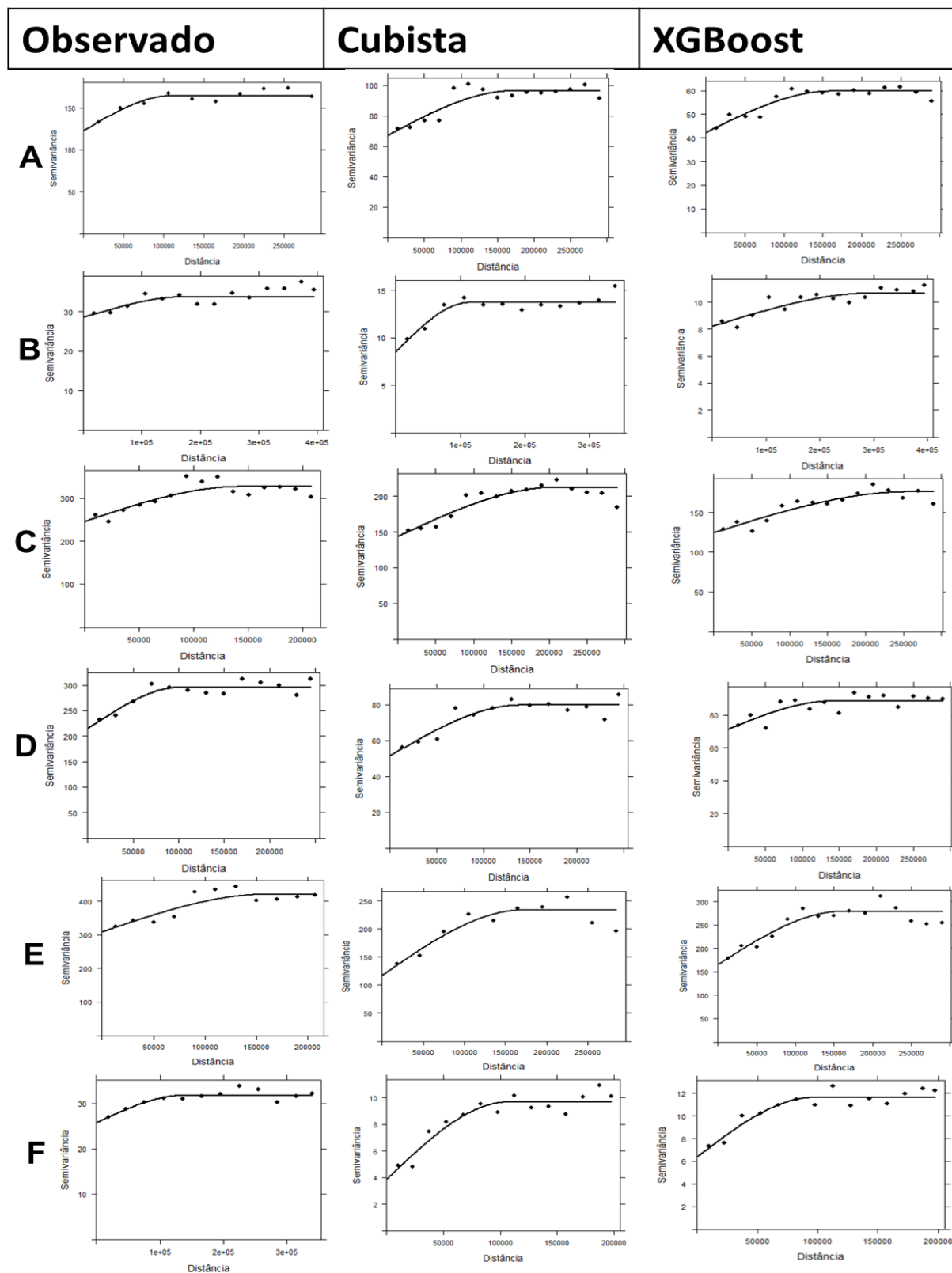
Os atributos químicos são indicadores fundamentais para a avaliação da sua qualidade do solo. Portanto, o conhecimento do teor desses atributos é importante para a produção, e deve ser monitorada a cada ciclo de produção. Surge assim, as técnicas alternativas que auxiliam na avaliação desses atributos de forma mais econômica, levando em consideração a possibilidade de dados que são gerados.

A pedometria surgiu aliada a evolução tecnológica com a implementação dos sensores e do aprendizado de máquina. Os sensores fazem parte das alternativas para a estimativa dos atributos do solo, com foco em gerar zonas específicas de manejo. Dentre os sensores utilizados para a estimativa dos atributos do solo, está a espectrometria de fluorescência de raios-X (EFRx) que é um sensor que vem sendo bastante utilizado na Ciência do solo atual pela comprovada relação e eficiência na estimativa desses atributos.

Este trabalho trouxe como desafio estudar as relações entre as medidas da EFRx e os atributos químicos do solo do planalto ocidental paulista, que apresenta 48% da área territorial agrícola do estado de São Paulo, que apresenta ampla variação pedologia e geológica. Os resultados aqui obtidos representam um avanço de informações acerca da utilização do sensor de EFRx em áreas de grande dimensão, fornecendo informações importantes para o desenvolvimento de trabalhos futuros em áreas com as mesmas características.

APÊNDICES

Apêndice A: Semivariogramas do artigo 1: (A) Cálcio, (B) Magnésio, (C) Soma de Bases, (D) Saturação por bases, (E) Capacidade de Troca Catiônica, (F) Matéria Orgânica observados e estimados pelos modelos cubista e XGboost para os solos do Planalto Ocidental Paulista.



Apêndice B: Semivariogramas do artigo 2: soma de base (SB - A), capacidade de troca catiônica (CTC - B), saturação por bases (V% - C) e necessidade de calagem (NC - D) observados e estimados por random forest e seus respectivos mapas de erro, para os solos do Planalto Ocidental Paulista.

