

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

**MAPEAMENTO DE FÓSFORO POR TÉCNICAS DE
ESPECTROSCOPIA VIS-NIR E SUSCETIBILIDADE
MAGNÉTICA DOS SOLOS DO PLANALTO OCIDENTAL
PAULISTA**

**Romário Pimenta Gomes
Engenheiro Agrônomo**

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

**MAPEAMENTO DE FÓSFORO POR TÉCNICAS DE
ESPECTROSCOPIA VIS-NIR E SUSCETIBILIDADE
MAGNÉTICA DOS SOLOS DO PLANALTO OCIDENTAL
PAULISTA**

Romário Pimenta Gomes

Orientador: Prof. Dr. José Marques Júnior

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

G633 Gomes, Romário Pimenta
Mapeamento de fósforo por técnicas de espectroscopia VIS-NIR e
susceptibilidade magnética dos solos do Planalto Ocidental Paulista /
Romário Pimenta Gomes. -- Jaboticabal, 2021
95 p. : tabs., mapas

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

1. Espectroscopia de reflectância difusa. 2. Magnetismo. 3. P total.
4. Adsorção de P. 5. Pedometria. 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: MAPEAMENTO DE FÓSFORO POR TÉCNICAS DE ESPECTROSCOPIA Vis-NIR E SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA DOS SOLOS DO PLANALTO OCIDENTAL PAULISTA

AUTOR: ROMÁRIO PIMENTA GOMES

ORIENTADOR: JOSÉ MARQUES JUNIOR

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Doutor em AGRONOMIA (CIÊNCIA DO SOLO), pela Comissão Examinadora:

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

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

 Prof. Dr. MARCÍLIO VIEIRA MARTINS FILHO (Participação Virtual)
Departamento de Ciências da Produção Agrícola / FCAV / UNESP - Jaboticabal

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

 Prof. Dr. ROGÉRIO TEIXEIRA DE FARIA (Participação Virtual)
Departamento de Engenharia e Ciências Exatas (DECEX) / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 24 de fevereiro de 2021

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

ROMÁRIO PIMENTA GOMES – nascido no dia 26 de julho de 1994, no município de Manicoré – AM, cursou Engenharia Agrônômica pela Universidade Federal do Amazonas – Câmpus de Humaitá – AM, de 2010 a 2016. Foi bolsista de iniciação científica no período de 2011 a 2015. Fez mestrado no programa de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo) pela FCAV/UNESP Jaboticabal (Bolsista CAPES). Aluno de Doutorado do curso de Pós-Graduação em Agronomia (Ciência do Solo) pela FCAV/UNESP Jaboticabal (Bolsista CAPES). Atualmente é professor substituto do Centro de Estudos superiores de São Bento (Tecnologia em Gestão Ambiental) da Universidade Estadual do Maranhão (UEMA), Campus São Bento, MA, Brasil. Atua na área de Agronomia, com ênfase em Ciência do solo e Pedometria, trabalhando principalmente nos seguintes temas: Análise geoestatística e multivariada, zona específica de manejo, relação solo-paisagem, técnicas indiretas para determinação de atributos do solo, influência da compactação nos atributos do solo e estudos de terra preta arqueológica. Membro do grupo de pesquisa Caracterização do Solo para fins de Manejo Específico (CSME) da UNESP Câmpus de Jaboticabal.

“A tecnologia tornou possível à existência de grandes populações. Grandes populações agora tornam a tecnologia indispensável”.

Joseph Krutch – escritor

DEDICO

A Deus,
pelo dom da vida.

Aos meus pais,

Maria Helena Pimenta Gomes e Rosinei da Costa Gomes,
pela educação, valores e incentivo, a **minha família** pela fé em mim e apoio moral.

OFEREÇO

Aos meus pais Maria Helena Pimenta Gomes e Rosinei da Costa Gomes, por serem os pilares de minha caminhada na vida, por sempre lutarem pelo meu melhor, por me darem amor, carinho e incentivo, sem dúvida sendo meus exemplos de caráter, determinação e superação. Essas palavras não bastam, faltam adjetivos para expressar meu sentimento de gratidão e carinho por vocês.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus, pelas bênçãos a mim concedidas, por me proteger e me guiar em cada etapa de minha vida.

À Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, pela realização deste curso de pós-graduação.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pelo financiamento da bolsa de estudos.

Ao MCTI/CNPQ – Ministério da Ciência, Tecnologia, Inovações/Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Universal/2016 (Processo n. 402796/2016-0).

Ao meu orientador Prof. Dr. José Marques Júnior, pelos ensinamentos, orientação e confiança, durante esse período de doutorado.

Aos professores membros da Banca de Qualificação, Glauco de Souza Rolim e Diogo Mazza Barbieri, cujas correções e sugestões contribuíram, de forma significativa, para a melhoria do presente estudo.

Aos professores membros da Banca de Defesa, Marcílio Vieira Martins Filho, Rogério Teixeira de Faria, Zigomar Menezes de Souza e Daniel de Bortoli Teixeira, pela disponibilidade e contribuições para a melhoria do trabalho e o avanço profissional.

Ao meu amigo e parceiro em toda trajetória da pós-graduação Laércio Santos Silva, por todo apoio, ajuda e acompanhamento pessoal e profissional.

Agradeço a todos os integrantes do grupo Caracterização do Solo para Fins de Manejo Específico (CSME), pela troca de experiências e acompanhamento durante a pesquisa e a realização deste trabalho.

A minha família, em especial aos meus avôs e avós, pelos valores passados, confiança e amor, aos meus irmãos e irmãs pelo apoio e incentivo.

Aos amigos que fiz em Jaboticabal e durante a pós-graduação.

A todas as escolas por onde passei e tive a honra de estudar, bem como aos professores (as), pelos ensinamentos: Escola Municipal Dr. Edmundo Juarez (Tiro de guerra); Escola Estadual Nossa Senhora das Graças (Educandário) e a Universidade Federal do Amazonas (UFAM).

A todos os que, verdadeiramente, torceram por mim e que de forma direta ou indireta contribuíram para a conclusão deste curso de doutorado.

Muito obrigado!

SUMÁRIO

RESUMO.....	xi
ABSTRACT.....	xii
LISTA DE ABREVIATURAS.....	xiii
LISTA DE FIGURAS	xv
LISTA DE TABELAS	xvii
CAPÍTULO 1 – CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	1
1.1 Introdução	1
1.2 Revisão de Literatura	3
1.2.1 Importância do manejo de fósforo	3
1.2.2 Planalto Ocidental Paulista: geologia e dissecação da paisagem	5
1.2.3 Influência dos atributos do solo na adsorção de P	8
1.2.4 Técnicas indiretas na predição de P	11
1.2.4.1 Espectroscopia de reflectância difusa.....	11
1.2.4.2 suscetibilidade magnética	13
1.2.5 Modelagem matemática aplicada a solos.....	15
1.2.5.1 Geoestatística	15
1.2.5.2 “Random Forest”	18
1.3 Referências	19
CAPÍTULO 2 – VARIABILIDADE ESPACIAL DO FÓSFORO DO SOLO POR ESPECTROSCOPIA NO VIS-NIR EM DIFERENTES LITOLOGIAS E DISSECAÇÃO DE PAISAGEM	35
2.1 Introdução	36
2.2 Material e Métodos.....	37
2.2.1 Caracterização da área de estudo	37
2.2.2 Amostragem de solo	40
2.2.3 Análises química e granulométrica do solo	40
2.2.4 Análises mineralógicas.....	42
2.2.5 Espectroscopia de reflectância difusa (ERD) e regressão de mínimo quadrado parcial (PLSR).....	42
2.2.6 Fósforo: total, adsorvido e disponível.....	43
2.2.7 Análise estatística.	44

2.2.8 Estatística multivariada.	44
2.2.9 Análise geoestatística.	44
2.3 Resultados e Discussão	45
2.4 Conclusões.....	57
2.5 Referências	57
CAPÍTULO 3 – MAGNETISMO E COR NA PREDIÇÃO DE FÓSFORO ADSORVIDO USANDO “RANDOM FOREST” EM SOLOS BRASILEIROS.....	66
3.1 Introdução	67
3.2 Material e Métodos.....	68
3.2.1 Caracterização da área de estudo	68
3.2.2 Análise geomorfométrica	70
3.2.3 Planejamento amostral	71
3.2.4 Métodos de laboratório	71
3.2.4.1 Análise de solo	71
3.2.4.2 Suscetibilidade magnética (SM)	74
3.2.4.3 Índice de avermelhamento (IAV) por espectroscopia de reflectância difusa.....	74
3.2.4.4 Análise de Pads no solo	75
3.2.5 Análise de dados.	75
3.2.5.1 Estatística descritiva	75
3.2.5.2 Estatística multivariada.....	75
3.2.5.3 “Random forest”	75
3.2.5.4 Análise geoestatística.	76
3.3 Resultados e Discussão	77
3.4 Conclusões.....	87
3.5 Referências	87
CAPÍTULO 4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	95

MAPEAMENTO DE FÓSFORO POR TÉCNICAS DE ESPECTROSCOPIA VIS-NIR E SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA DOS SOLOS DO PLANALTO OCIDENTAL PAULISTA

Resumo – Mapas precisos de fósforo (P) do solo, em todo noroeste do estado de São Paulo, tornam-se praticamente inviáveis por métodos laboratoriais convencionais. A suscetibilidade magnética (SM), a espectroscopia de reflectância difusa (ERD) e a cor do solo, aliados a modelos matemáticos, possibilitam o mapeamento do padrão espacial do fósforo no solo, permitindo melhorar a gestão de P, tanto do ponto de vista agrícola, quanto ambiental. Desse modo, objetivou-se nesse estudo, avaliar a capacidade da ERD, SM e a cor do solo no mapeamento de P em solos de diferentes litologias e grau de dissecação da paisagem em grandes áreas. Foram coletadas 200 amostras de solo de arenito e basalto na profundidade de 0,0 – 0,2 m, em três estágios de dissecação da paisagem, representativas da variabilidade fisiográfica do Planalto Ocidental Paulista (POP). O P_{total} , $P_{adsorvido}$ (P_{ads}) e o $P_{disponível}$ foram obtidos por método químico convencional e estimados por ERD com calibração quimiométrica por análise de regressão de mínimos quadrados parciais (PLSR). O P_{ads} também foi obtido por “Random Forest” (RF) usando a SM e o índice de avermelhamento (IAV) como variáveis preditoras. Os resultados foram submetidos à análise estatística descritiva, multivariada e o padrão espacial por análise geoestatística. A distribuição espacial do fósforo é influenciada pela geologia e pelo grau de dissecação da paisagem, sendo os óxidos de ferro (goethita e hematita) os mais importantes indicadores de ambientes com maiores e menores potenciais de adsorção e teores de fósforo. A caracterização das curvas espectrais permite diferenciar o conteúdo de fósforo do solo com base nos óxidos de ferro. A análise por regressão de PLSR dos dados espectrais na região do visível e infravermelho próximo (VIS-NIR) possibilita a predição de P_{total} e P_{ads} do solo, sendo semelhante ao obtido por método convencional. Análise de aprendizagem de máquina como “random forest” são modelos matemáticos eficientes na predição e caracterização de ambientes com ampla variação de P_{ads} no contexto solo-paisagem. As correlações entre P_{ads} e SM ($R^2 = 0,75$; $p < 0,001$), IAV ($R^2 = 0,68$; $p < 0,005$) e a análise de “Random Forest” ($R^2 = 0,90$ e $RMSE = 61$) indicam o sinal magnético e a cor do solo como marcadores sensíveis da variação de P_{ads} , e fortes atributos preditores na caracterização espacial de P_{ads} do solo em grandes áreas sob complexidade litológica e grau de dissecação da paisagem. A variabilidade espacial do P no solo estimada por ERD e SM valida o uso das técnicas no mapeamento de atributos do solo em grandes áreas. Podendo ser usado como base para desenvolver um inventário de dados de P do solo, bem como monitorar possíveis consequências do uso e manejo do solo.

Palavras-chave: espectroscopia de reflectância difusa, magnetismo, P total, adsorção de P, pedometria.

PHOSPHORUS MAPPING BY TECHNIQUES SPECTROSCOPY VIS-NIR AND MAGNETIC SUSCETIBILITY OF SOILS OF THE WESTERN PAULISTA PLATEAU

Abstract – Accurate maps of phosphorus (P) of the soil, throughout the northwest of the state of São Paulo, become practically unviable by conventional laboratory methods. Magnetic susceptibility (MS), diffuse reflectance spectroscopy (DRS) and soil color, combined with mathematical models, make it possible to map the spatial pattern of phosphorus in the soil, allowing to improve P management, both from an agricultural point of view, as for environmental. Thus, the objective of this study was to evaluate the capacity of DRS, MS and soil color in the mapping of P in soils of different lithologies and degree of dissection of the landscape in large areas. 200 samples of sandstone and basalt soil were collected at a depth of 0.0 - 0.2 m, in three stages of landscape dissection, representative of the physiographic variability of the São Paulo Western Plateau (WPP). P_{total}, P_{ads} (P_{ads}) and P_{available} were obtained by conventional chemical method and estimated by DRS with chemometric calibration by partial least squares regression analysis (PLSR). P_{ads} were also obtained by “Random Forest” (RF) using MS and the reddening index (IAV) as predictor variables. The results were subjected to descriptive, multivariate statistical analysis and the spatial pattern by geostatistical analysis. The spatial distribution of phosphorus is influenced by geology and the degree of dissection of the landscape, with iron oxides (goethite and hematite) being the most important indicators of environments with greater and lesser potential for adsorption and phosphorus contents. The characterization of the spectral curves allows to differentiate the phosphorus content of the soil based on iron oxides. PLSR regression analysis of spectral data in the visible and near infrared region (VIS-NIR) allows the prediction of P_{total} and P_{ads} of the soil, being similar to that obtained by conventional method. Machine learning analysis like “random forest” are efficient mathematical models in the prediction and characterization of environments with wide variation of P_{ads} in the soil-landscape context. Correlations between P_{ads} and MS ($R^2 = 0.75$; $p < 0.001$), IAV ($R^2 = 0.68$; $p < 0.005$) and the “Random Forest” analysis ($R^2 = 0.90$ and RMSE = 61) indicate the sign magnetic and soil color as sensitive markers of P_{ads} variation, and strong predictive attributes in the spatial characterization of soil P_{ads} in large areas under lithological complexity and degree of landscape dissection. The spatial variability of P in the soil estimated by DRS and MS validates the use of techniques in the mapping of soil attributes in large areas. It can be used as a basis to develop an inventory of soil P data, as well as to monitor possible consequences of land use and management.

Keywords: diffuse reflectance spectroscopy, magnetism, total P, P adsorption, pedometry.

LISTA DE ABREVIATURAS

Ad	Altamente dissecado
a	Alcance
ASE	Área de superfície específica
CP	Componentes principais
CSME	Caracterização de solos para fins de manejo específico
Ct	Caulinita
$C_0 + C_1$	Patamar
C_0	Efeito pepita
ERD	Espectroscopia de reflectância difusa
Fed	Ferro ditionito (óxidos de ferro pedogênicos referentes à forma cristalina)
Feo	Ferro oxalato (óxidos de ferro de baixa cristalinidade)
Fe_2O_3	Óxidos de ferro totais
Gb	Gibbsita
GDE	Grau de dependência espacial
Gt	Goethita
Hm	Hematita
IAV	Índice de avermelhamento
Ki	Relações moleculares sílica/alumínio
Kr	Relações moleculares sílica/óxidos de ferro e alumínio
Md	Moderadamente dissecado
Mh	Maghemita
ML	“Machine learning”
MO	Matéria orgânica
Mt	Magnetita
NIR	Infravermelho próximo
P_{ads}	P adsorvido
Pd	Pouco dissecado
P_{disp}	P disponível
PLSR	Regressão de mínimos quadrados parciais
POP	Planalto Ocidental Paulista
R^2	Coeficiente de determinação
RF	“Random Forest”

RPD	Desvio residual da predição
RMSE	Raiz quadrada do erro médio da validação
SDE	Desvio padrão da distribuição do erro
SG	Serra Geral
SM	Susceptibilidade magnética
TFSA	Terra fina seca ao ar
VIP	Índice de importância das variáveis
VIS	Visível
VRP	Vale do Rio do Peixe

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 (Capítulo 1) – Status atual das variáveis de controle para sete dos limites planetários (STEFFEN et al., 2015)..	4
Figura 2 (Capítulo 1) – a) Mapa do Brasil; b) mapa do Estado de São Paulo; c) unidade morfoescultural, e d) modelo litoestratigráfico da Bacia Bauru proposto por Fernandes e Coimbra (2000)...	6
Figura 3 (Capítulo 1) – Ilustração do modelo de evolução da paisagem (geomorfogênese) no Planalto Ocidental Paulista. Adaptado do Projeto CNPQ (Proc.nº 402796/2016-0)...	7
Figura 4 (Capítulo 1) – Formas de fósforo no sistema solo-planta; interdependências e equilíbrios, adaptado de (NOVAIS et al., 2007).	10
Figura 5 (Capítulo 1) – (a) Esquema de funcionamento do equipamento espectrofotômetro Lambda 950 UV/Vis/NIR acoplado com uma esfera integradora de 150 mm de diâmetro e (b) o espectro gerado na faixa dos VIS-NIR. Adaptado de Barrón, UCO.....	12
Figura 6 (Capítulo 1) – Diagrama do princípio de funcionamento do sensor de suscetibilidade magnética. Adaptado de Siqueira (2013).....	14
Figura 7 (Capítulo 1) – Ilustração de um semivariograma experimental..	16
Figura 8 (Capítulo 1) – Modelos de semivariogramas comumente utilizados..	17
Figura 1 (Capítulo 2) – a) Mapa do Brasil, b) mapa do estado de São Paulo, c) mapa geológico atualizado do Planalto Ocidental Paulista (escala 1:200.000, adaptado de Fernandes e Coimbra (2000), d) unidades de dissecação da paisagem proposto a partir do mapa da intensidade de formas do terreno pela assinatura geomorfométrica (adaptado de VASCONCELOS et al., 2012), e) mapa de pontos amostrais.....	39
Figura 2 (Capítulo 2) – Análise de componentes principais (CP) dos atributos nas diferentes geologias e dissecações da paisagem.	47
Figura 3 (Capítulo 2) – Espectros de reflectância difusa (ERD) representativos dos compartimentos geológicos: Formações Serra Geral (SG) e Vale do Rio do Peixe (VRP) do Planalto Ocidental Paulista. Grau de dissecação da paisagem: pouco dissecada (Pd), mediamente dissecada (Md) e altamente dissecada (Ad). Teores médios de óxidos de ferro totais (Fe_2O_3), fósforo: total, adsorvido e disponível..	49
Figura 4 (Capítulo 2) – Gráfico de dispersão de valores observados versus previstos com base na validação cruzada de regressão de mínimos quadrados parciais (PLSR) (a, c) e os gráficos de importância variável para projeção (VIP) dos atributos de destino (b, d) para o P total e P adsorvido (Pads) utilizando espectros no visível e infravermelho próximo (VIS-NIR). R^2 = coeficiente de determinação; RMSE = raiz do erro quadrático médio; SDE = desvio padrão da distribuição do erro; RPD = desvio residual da predição.....	51

Figura 5 (Capítulo 2) – Semivariogramas do teor de argila, óxidos de ferro, matéria orgânica e de fósforo observado e predito por Vis-NIR dos solos. C_0 = efeito pepita, $C_0 + C_1$ = patamar, a = alcance e GDE = grau de dependência espacial.53

Figura 6 (Capítulo 2) – Mapas de distribuição espacial do teor de argila (a), Fe_2O_3 (b), MO (c), fósforo observado: P_{total} (d), P_{ads} (e), $P_{disponível}$ (f) e predito: $P_{total(VIS-NIR)}$ (g), $P_{ads(VIS-NIR)}$ (h).55

Figura 1 (Capítulo 3) – Mapas de geologia (a) (FERNANDES et al., 2007), (b) de altitude e (c) dissecação da paisagem (SILVA et al., 2020) do Planalto Ocidental Paulista (POP). SG = Serra Geral, VRP = Vale do Rio do Peixe.69

Figura 2 (Capítulo 3) – Análise de componentes principais (CP) (a) e correlação entre cada CP (b) dos atributos nas diferentes geologias e dissecações da paisagem.79

Figura 3 (Capítulo 3) – Correlação entre o P adsorvido (P_{ads}) e os atributos do solo basalto-arenito na camada 0,00 – 0,20 m no POP. Óxidos de alumínio, ferro e silício (Al_2O_3 , Fe_2O_3 , SiO_2), K_i e K_r = índices de intemperismo, Ct = caulinita, Mh = maghemita, Hm = hematita, Gt = goethita, Gb = gibbsita, χ_{BF} = susceptibilidade magnética e IAV = índice de avermelhamento. *significativo a 1% e sem asterisco: significativo a 5% de probabilidade.80

Figura 4 (Capítulo 3) – Regressão entre P adsorvido convencional (Obs) e predito por análise “Random Forest” (Pred RF) para os solos de contraste litológico basalto-arenito na camada 0,0 – 0,20 m no POP. RMSE = Raiz quadrada do erro-médio, RPD = desvio de previsão residual e ME = Erro médio.82

Figura 5 (Capítulo 3) – Semivariogramas dos atributos estudados, no noroeste de São Paulo. χ_{BF} = susceptibilidade magnética; IAV = índice de avermelhamento; RF = “random forest”. C_0 = efeito pepita; C_0+C_1 = patamar; a = alcance e GDE = grau de dependência espacial.84

Figura 6 (Capítulo 3) – Padrão espacial da (a) argila, (b) areia, (c) suscetibilidade magnética em baixa frequência, (d) fósforo adsorvido, (e) índice de avermelhamento, (f) fósforo adsorvido estimado por “random forest” e (g) validação entre as técnicas na camada 0,0 – 0,20 do POP.85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 (Capítulo 2) – Estatística descritiva dos atributos químicos e granulométricos dos pontos selecionados nos solos do Planalto Ocidental Paulista, profundidade 0,00 - 0,20 m.....	41
Tabela 2 (Capítulo 2) – Médias dos atributos de solos em unidades pouco (Pd), moderada (Md) e altamente dissecada (Ad) das unidades de formação Serra Geral (SG) e Vale do Rio Peixe (VRP).....	45
Tabela 3 (Capítulo 2) – Coeficiente de correlação de Pearson entre P e atributos do solo.....	48
Tabela 1 (Capítulo 3) – Descrição dos ambientes das principais classes de solo do Planalto Ocidental Paulista (POP).....	73
Tabela 2 (Capítulo 3) – Médias e estatísticas descritiva dos atributos de solos em unidades pouco (Pd), moderada (Md) e altamente dissecadas (Ad) das unidades de formação Serra Geral (SG) e Vale do Rio Peixe (VRP).....	78
Tabela 3 (Capítulo 3) – Estatística descritiva entre os métodos: P adsorvido convencional (Obs) e predito por análise “Random Forest” (Pred RF).....	83

CAPÍTULO 1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS

1.1 Introdução

O Fósforo (P) é um nutriente indispensável para todas as criaturas neste planeta (VANCE, 2001; KRUSE et al., 2015). Procedente de minerais na litosfera é liberado pelo intemperismo e quimicamente transformado dentro da pedosfera para finalmente entrar na cadeia alimentar em uma forma dissolvida, absorvida pelas raízes das plantas (EMSLEY, 2000; KRUSE et al., 2015; WEIHRAUCH; OPP, 2018).

O P aumentou o nível global de produção de alimentos entre 1960 e 2000 de 1,8 a 3,5 bilhões de toneladas de rendimentos em colheita por ano (VANCE, 2001). O uso intensivo institucionalizado de fertilizantes minerais contendo P atualmente ajuda a sustentar um nível de produção agrícola grande o suficiente para as demandas modernas (CORDELL et al., 2009; VACCARI; STRIGUL, 2011). No entanto, o fosfato de rocha, que é a matéria-prima desses fertilizantes, é um recurso finito e está se tornando cada vez mais escasso (CORDELL; WHITE, 2013; SCHOLZ et al., 2013).

Ciente dessa problemática envolvendo a escassez do P. O conhecimento dos aspectos geológicos nos quais o solo foi, ou ainda está sendo desenvolvido. Bem como sua relação com o grau de dissecação da paisagem (relação pedogênese e morfogênese) e/ou formas da paisagem. Visto que a geomorfologia influencia o tipo e a forma dos minerais formados e, por conseguinte, a distribuição espacial dos atributos do solo (CUNHA et al., 2005; CAMPOS et al., 2007) dentre eles o P (ROLIM NETO et al., 2004; BARBIERI et al., 2009; CAMARGO et al., 2015; FINK et al., 2016).

Nos solos tropicais, os minerais mais abundantes são os óxidos de ferro, especificamente hematita (Hm) e goethita (Gt) (SCHWERTMANN; TAYLOR, 1989). Esses óxidos são produtos da dissolução de minerais primários (litogênicos) e secundários (pedogênicos) que contêm ferro (Fe^{+2}) em sua estrutura cristalina (CORNELL; SCHWERTMANN, 1996).

Embora esses óxidos sejam formados a partir de íons de ferro e normalmente coexistindo no solo, a ocorrência de um é em detrimento do outro (SCHWERTMANN; TAYLOR, 1989; KÄMPF; CURI, 2000). Entretanto, a Gt apresenta maior potencial de adsorção quando comparada à Hm, sendo atribuído a sua maior área de superfície específica. Segundo Mesquita Filho e Torrent (1993) e

Torrent et al. (1994), esses óxidos adsorvem fortemente P a sua estrutura por meio de ligações com alta energia de adsorção de P.

A Gt e a Hm foram considerados os principais minerais responsáveis pela adsorção de P no solo (TORRENT et al. 1990; FINK et al., 2016). No entanto, os materiais principais com alto teor de ferro (Fe), como rochas máficas e ultramáficas podem formar solos com níveis consideráveis de maghemita (Mh) (CURI; FRANZMEIER, 1987; COSTA et al., 1999; POGGERE et al., 2018), o que nos leva a pensar qual a real contribuição da Mh para a adsorção de P no solo, podendo este mineral ter um papel maior na retenção de P em solo.

Todavia, a determinação dos óxidos de ferro por metodologias convencionais, inviabiliza a quantificação em grandes áreas, devido à necessidade de um grande número de amostras, tornando o trabalho oneroso e moroso no processamento das análises (BAHIA et al., 2015; SILVA et al., 2020). Ao contrário disso, a espectroscopia de reflectância difusa (ERD) tem sido proposta na identificação e na quantificação indireta dos minerais, sobretudo da Hm e Gt, os quais são fortemente associados à cor do solo. Por exemplo, solos mais amarelados (2,5Y e 7,5RY) indicam Gt, enquanto Hm impinge coloração mais avermelhada (5R e 2,5YR) e Mh com matiz variando de 2,5YR a 5YR (COSTA; BIGHAM, 2009).

Outra técnica interessante é a susceptibilidade magnética (SM), que também tem sido utilizada para auxiliar no entendimento das rotas de transformação de minerais de óxidos de ferro nas regiões temperada e tropical (TORRENT et al., 2010; SIQUEIRA et al., 2015; CAMARGO et al., 2016). A SM é uma característica dos minerais presentes nas rochas e no solo, principalmente óxidos ferrimagnéticos (magnetita e maghemita), sendo ideal para estudos com grandes quantidades de amostras de solo.

As técnicas ERD e SM permitem a caracterização simultânea de muitos atributos do solo com relevância agrônômica e ambiental (McBRATNEY et al., 2002, 2006; VISCARRA ROSSEL et al., 2010), além de serem adaptáveis para uso em campo (VISCARRA ROSSEL; McBRATNEY, 1998). Aliado a isso, o uso de ferramentas matemáticas para predição, como a função de pedotransferência (BOUMA, 1989; McBRATNEY et al., 2002) e “random forest” (MACHADO et al., 2019; FATHIZAD et al., 2020; PAHLAVAN-RAD et al., 2020) bem como no mapeamento da variabilidade espacial, utilizando a geoestatística (TEIXEIRA et al.,

2018; SILVA et al., 2020) são fundamentais no monitoramento de áreas mínimas de manejo e para governança de solos.

A grande extensão territorial a ser investigada e monitorada, necessita do uso de técnicas indiretas aliadas à modelagem matemática para otimização do manejo de P. Tendo em perspectiva o alto número amostral, custo elevado, variação espacial e uma proeminente escassez mundial no fornecimento de adubo fosfatado. Deste modo, objetivou-se avaliar a variabilidade espacial do fósforo no solo por espectroscopia de reflectância difusa e suscetibilidade magnética em diferentes litologias e grau de dissecação da paisagem nos solos do Planalto Ocidental Paulista.

1.2 Revisão de Literatura

1.2.1 Importância do manejo de fósforo

A crescente demanda por alimentos e a crescente pressão por uma agricultura sustentável e proteção ao meio ambiente, aumentaram a necessidade de gerir cuidadosamente a adubação de fósforo (P), bem como compreender melhor as propriedades do solo envolvidas com esse elemento (ROY et al., 2016; WITHERS et al., 2018).

A principal fonte de P no globo terrestre é o fosfato de rocha, mas este é um recurso finito e não renovável cada vez mais escasso e caro (CORDELL; WHITE, 2013; SCHOLZ et al., 2013). As reservas são estimadas em 10×10^{15} g de P, mal distribuídas dentro do globo e concentradas em pequenas regiões dos Estados Unidos, Norte da África (principalmente Marrocos e Argélia), China, Rússia e Oriente Médio (USGS, 2016).

Sete limites globais, visando operacionalidade e segurança para humanidade foram atualizados por Steffen et al. (2015). Um desses limites pertencente ao P, baseado nas condições oceânicas (ROCKSTROM et al., 2009a,b) e em limites regionais de bacias hidrográficas influenciadas quase inteiramente por fertilizantes (STEFFEN et al., 2015), podendo se aplicar essas fronteiras de níveis regionais as áreas de cultivo no mundo. Que segundo Steffen et al. (2015), algumas regiões agrícolas com taxas de aplicação de P muito altas, são os principais contribuintes para a transgressão desse limite global (Figura 1).



Figura 1. Status atual das variáveis de controle para sete dos limites planetários (STEFFEN et al., 2015).

De acordo com alguns cientistas, estima-se que os suprimentos globais de P se esgotem neste século (CORDELL; WHITE, 2011, 2013). Espera-se que esta chamada "crise P" (ABELSON, 1999) traga fome generalizada e graves conflitos geopolíticos em escala global (SYERS et al., 2008; CORDELL; WHITE, 2013), aumentando o interesse na pesquisa de P (WEIHRAUCH; OPP, 2018). Isso é especialmente verdadeiro para a ciência do solo, porque é do solo a porta de entrada de P na cadeia alimentar.

Previsões de Cordell et al. (2009) estimaram que, em 15 ou 20 anos, a demanda de P superará a oferta. Contudo, mesmo que o prazo exato seja incerto, não possuímos ainda fontes alternativas de P no mercado que possam substituir a atual produção dos países do globo. Gerando 20 milhões de toneladas de P, obtidas do minério de rochas fosfatadas, o que causa maior preocupação e urgência em relação a necessidade do manejo eficiente de P.

No Brasil, a agricultura é praticada predominantemente em solos que se encontram em estado degradado e, também, em outros casos, em estágio avançado de alteração intempérica, com predominância de óxidos de ferro e alumínio. Visando alcançar elevados níveis de produção e produtividade, milhares de toneladas de

fertilizantes industriais de alta solubilidade são aplicados exageradamente aos solos brasileiros, causando desperdícios anuais de um produto essencial para agricultura em nosso país.

A compreensão da distribuição espacial do fósforo no solo é fundamental para o gerenciamento eficiente dos nutrientes e para o projeto de amostragem do solo (WILSON et al., 2016). Com esse entendimento em várias escalas é possível ajudar a melhorar os ambientes das culturas, a utilização de fertilizantes e o controle da poluição não pontual da fonte agrícola (HUANG et al., 2013; YU et al., 2014).

Os métodos que podem auxiliar na elucidação da distribuição de P, incluem descrição clássica, geoestatística (WANG et al., 2009) e previsão espacial (LIU et al., 2018) por meio de modelos matemáticos. Informações sobre a variabilidade espacial em pequena escala de P podem ajudar os agricultores a otimizar práticas de fertilização (GRANGER et al., 2017). Levantamentos em larga escala podem fornecer fundamentos teóricos para ajudar os tomadores de decisão a elaborar diretrizes ou regulamentos para o uso regionalmente equilibrado de fertilizantes.

1.2.2 Planalto Ocidental Paulista: geologia e dissecação da paisagem

O território nacional tem predomínio de Latossolos e Argissolos (aproximadamente 58% da área total) estando muito presentes no uso agrícola (SANTOS et al., 2018). Isso se repete no noroeste do estado de São Paulo, especificamente no Planalto Ocidental Paulista (POP) (Figura 2), compreendendo aproximadamente uma área de 126.000 km², (50% do Estado de São Paulo), com altitude variando de 300 a 900 metros. Caracterizado por vales pouco profundos com encostas de inclinações suaves (10 a 20%), proporcionando um relevo ligeiramente ondulado, com topos aplainados, influenciando a densidade de drenagem e favorecendo as atividades agrícolas (ALMEIDA, 1964).

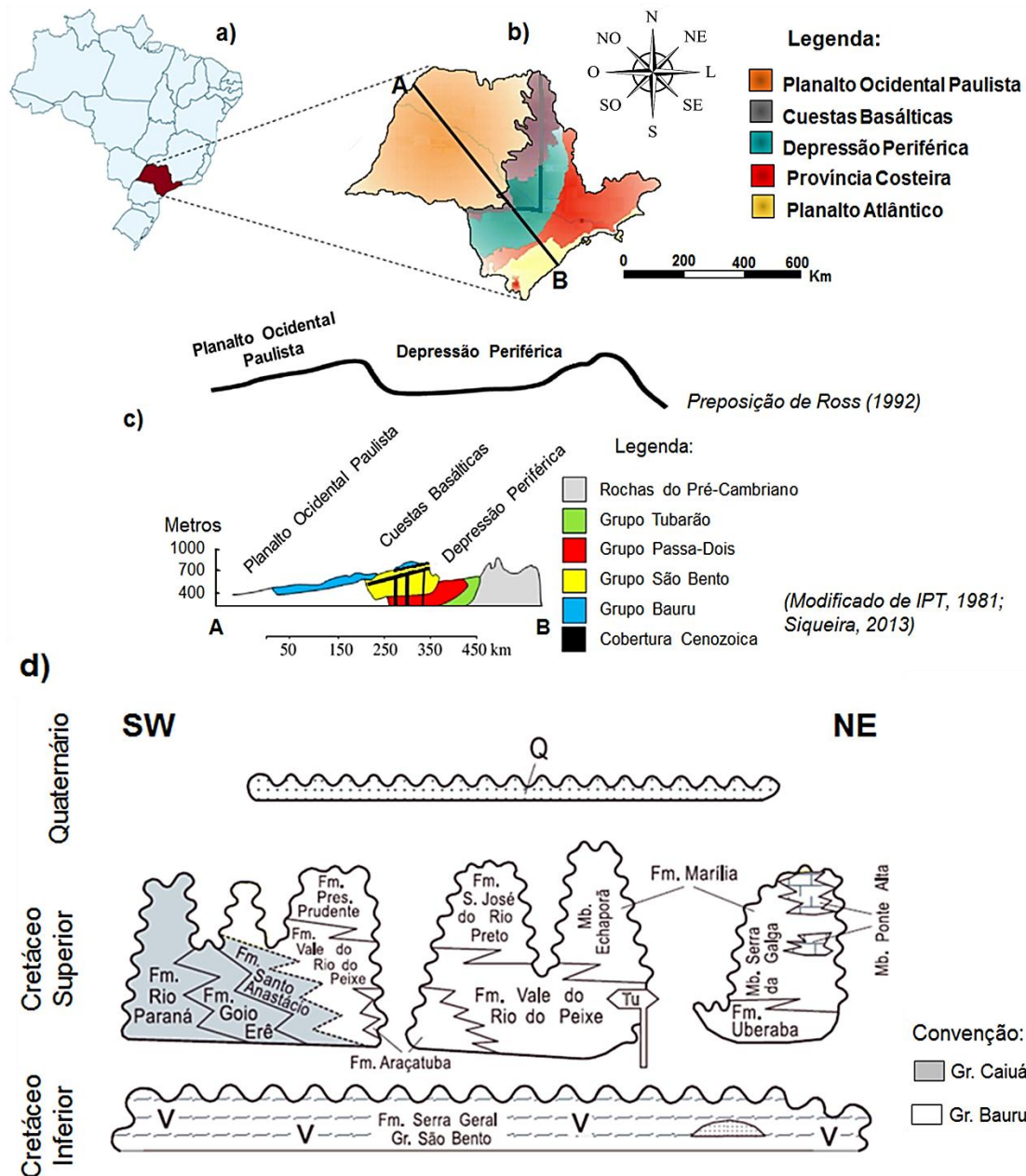


Figura 2. a) Mapa do Brasil; b) mapa do Estado de São Paulo; c) unidade morfoescultural, e d) modelo litoestratigráfico da Bacia Bauru proposto por Fernandes e Coimbra (2000).

Há duas formações geológicas predominantes na região do POP, a maior é o Vale do Rio do Peixe (Fm. VRP) (57,1% da região do planalto) situada sobre rochas do Grupo Bauru, que é constituído por diversas formações predominantemente de rochas areníticas, estando composta por camadas de espessura submétrica, com estruturação tabular típica e arenitos intercalados com siltitos ou lamitos arenosos e assenta-se diretamente sobre basaltos. A outra formação é Serra Geral (Fm. SG) constituindo cerca de 15,5% da região do planalto ocidental (RENNE et al., 1992),

sendo assim um importante compartimento geológico na região, tendo como substrato rochas vulcânicas (IPT, 1981). Além disso, os dados geoquímicos dos basaltos demonstram que eles não são homogêneos.

Dentro das formações geológicas existem compartimentos geomorfológicos (dissecações da paisagem) (VASCONCELOS et al., 2012; SILVA et al., 2020). À medida que o relevo altera o material de origem, o tempo de remoção e a deposição de material, escoamento superficial e regime do lençol freático, ele também é modificado (BUOL et al., 1980; BOCKHEIM et al., 2005). Por essa isocronicidade, Jenny (1941) atribuiu ao relevo a função mais de agente de remoção e de distribuição do solo do que de formação.

A influência da geomorfologia é representada pelo grau de dissecação da paisagem (Figura 3), que pode ser compreendida como o balanço entre a pedogênese (formação do solo) e a geomorfogênese (esculpimento da paisagem). Em ambientes onde a pedogênese é mais atuante que a morfogênese, há um favorecimento à formação e ao aumento da espessura do solo (ambientes pouco dissecados). Em contrapartida, ambientes onde a morfogênese é mais ativa, o processo atua no sentido de esculpir a paisagem, sendo classificados como altamente dissecados.

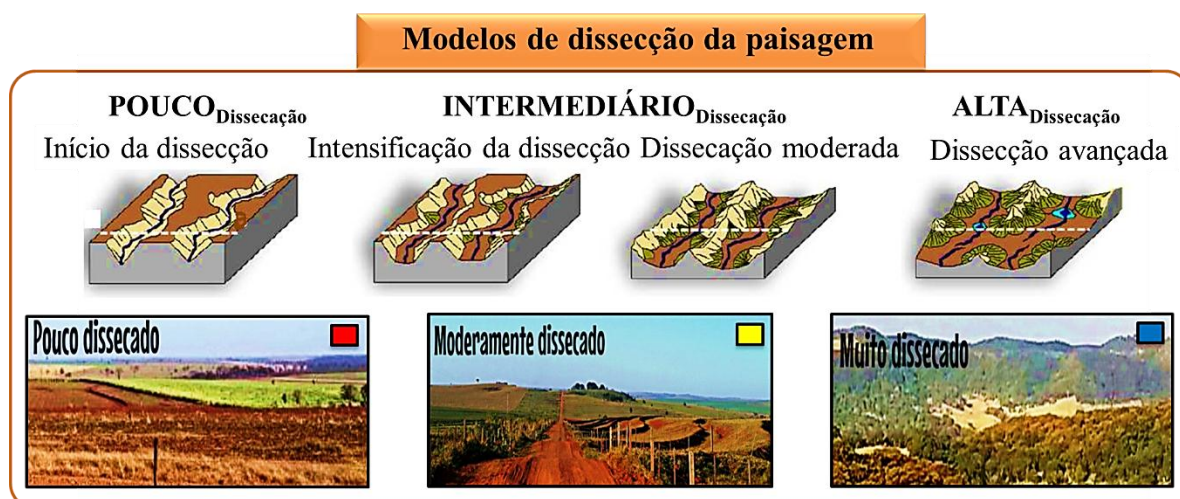


Figura 3. Ilustração do modelo de evolução da paisagem (geomorfogênese) no Planalto Ocidental Paulista. Adaptado do Projeto CNPQ (Proc.nº 402796/2016-0).

Em relação aos óxidos de ferro, seguindo a evolução do solo, a Hm é favorecida nas partes mais altas do relevo, nas pedoformas lineares, convexas e

pouco dissecadas (COVENTRY et al, 1983; WILLIAMS; COVENTRY, 1979; SILVA, 2016). Isto porque, na cota mais alta do relevo, o solo normalmente é mais bem drenado, com temperaturas mais elevadas e alto teor de ferro (no caso, solos oriundos de rochas básicas) (SILVA et al., 2020) e com facilidade de desidratação da ferridrita (BUOL et al., 1997; KÄMPF; CURI, 2000). Já nas pedoformas côncavas, os solos normalmente estão sob condições redutoras, uma vez que permanecem úmidos por mais tempo, características ambientais que proporcionam a formação da Gt (SCHWERTMANN, 1985; CAMARGO et al., 2008).

Alguns estudos apresentaram a influência da paisagem também na formação da Gibbsita (Gb) e da Caulinita (Ct) (SILVA et al., 2001). De acordo com Ghidin et al. (2006) e Camargo et al. (2008a), a Ct tem formação e ocorrência preferencial em solos localizados na posição de baixada da paisagem, principalmente quando esta apresenta formas côncavas. Curi e Franzmeier (1984), no Planalto Central do Brasil, concluíram que a predominância de Gb no topo de uma topossequência decorre do processo intenso de dessilicatização, com remoção de silício para posições mais baixas da vertente.

A influência do relevo e do material parental relacionados, originam informações importantes na compreensão da variabilidade dos solos ao longo da paisagem, assim como oferecem elementos de predição dos atributos físicos, químicos e mineralógicos do solo (RESENDE et al., 2007), auxiliando também em trabalhos de mapeamento de solos (LACERDA; BARBOSA, 2012).

1.2.3 Influência dos atributos do solo na adsorção de P

Vários são os atributos do solo que podem influenciar a adsorção de P, sendo um dos principais, o tipo e teor de argila (NOVAIS; SMITH, 1999). Muitos estudos têm relacionado à capacidade de adsorção de P dos solos com o teor de argila e superfície específica (JUO; FOX, 1977; ROLIM NETO et al., 2004).

Nos solos tropicais e subtropicais em condições de reação ácida a moderadamente ácida. Os óxidos de ferro e alumínio apresentam-se preferencialmente com cargas positivas, sendo assim capazes de reter em sua superfície vários tipos de ânions (VALLADARES et al., 2003). O ânion P é adsorvido preferencialmente por grupos de superfícies hidroxiladas dos óxidos de ferro (SPOSITO, 2008). Trocando de ligantes como OH_2^+ e OH^- da superfície desses

compostos, pelos fosfatos da solução e pela incorporação desse ânion na estrutura interna dos argilominerais (SHARPLEY et al., 2005).

Em estudos realizados por Barrón et al. (1988) e Torrent et al. (1994) a adsorção de P pelos óxidos de ferro é influenciada pelo tamanho, pela morfologia e pelo grau de substituição do Al na estrutura do cristal. Embora a adsorção média de P por unidade de área de superfície seja semelhante para Gt e Hm, a Gt, tipicamente, adsorve mais P como resultado de sua área de superfície específica (ASE) maior em relação a Hm (TORRENT et al., 1994).

Há também reações de adsorção de fosfato por minerais de argila que apresentam grupos OH expostos, tal como a caulinita (McBRIDE, 1994). Contudo, Ker (1995) estudando a adsorção de P em diversos Latossolos do Brasil, observou que o aumento do caráter caulinítico dos solos implica na redução da capacidade de adsorção de P, levando a entender que o papel da caulinita parece secundário em comparação com os constituintes oxídicos.

Outro óxido de Fe que tem se mostrado comum em vários solos, é a maghemita (Mh), principalmente naqueles derivados de rochas vulcânicas básicas, como o basalto (COSTA et al., 1999), podendo gerar níveis consideráveis de Mh (COSTA et al., 1999; POGGERE et al., 2018), causando reflexão sobre a participação da Mh para a adsorção de P no solo.

Além da qualidade da fração argila e dos óxidos de Fe, outro atributo importante é a cor do solo, que expressa os processos de formação (RESENDE, 1976; VISCARRA-ROSSEL et al., 2010) e reflete as propriedades físicas, químicas e mineralógicas do solo (FERNANDEZ; SCHULZE, 1992; SCHAETZL; ANDERSON, 2005). Em regiões no noroeste do estado a cor do solo também foi utilizada para auxiliar no mapeamento do P adsorvido, por meio do índice de avermelhamento do solo (IAV) (PELUCO et al., 2015) e por parâmetros da cor (red e green) (CARMO, 2018). Estes resultados são devidos ao fato de a cor ser um produto da variação dos minerais (BARRÓN; MELLO; TORRENT, 2000).

Deve-se mencionar também a matéria orgânica (MO) do solo, que tem certa influência no processo de retenção de P (ANDRADE et al., 2003; ANTELO et al., 2007), pois os grupos funcionais carboxílicos e fenólicos presentes na MO são responsáveis pelo bloqueio dos sítios de carga positiva dos óxidos de Fe e Al e alteram a forma cristalina dos minerais reduzindo a adsorção do P (HUE, 1991; FINK et al., 2016).

No solo, o P pode ser adsorvido ou dessorvido, dependendo da concentração, cristalinidade, área de superfície específica e grupos hidroxila na superfície dos óxidos de ferro (FINK et al., 2016). Estes fatores, por sua vez, são afetados pelo material de origem, pela intensidade do intemperismo e pelas condições de drenagem (BARRÓN; TORRENT, 1996; INDA JÚNIOR; KAMPF, 2005; SCHAEFER et al., 2008).

O suprimento de P da solução (fator intensidade - I), à medida que o fósforo é absorvido, é mantido pelo fator quantidade (Q) (P-Lábil), quantitativamente maior que o fator I, ou seja, quando o P-solução vai sendo exaurido pela absorção (ou retrodegradação, imobilização e/ou perdas), o estoque de “P-trocável” (P-Lábil) irá recompor o P-solução pelo menos parcialmente, num novo equilíbrio para um sistema-solo menos rico em P do que o anterior (Figura 4).

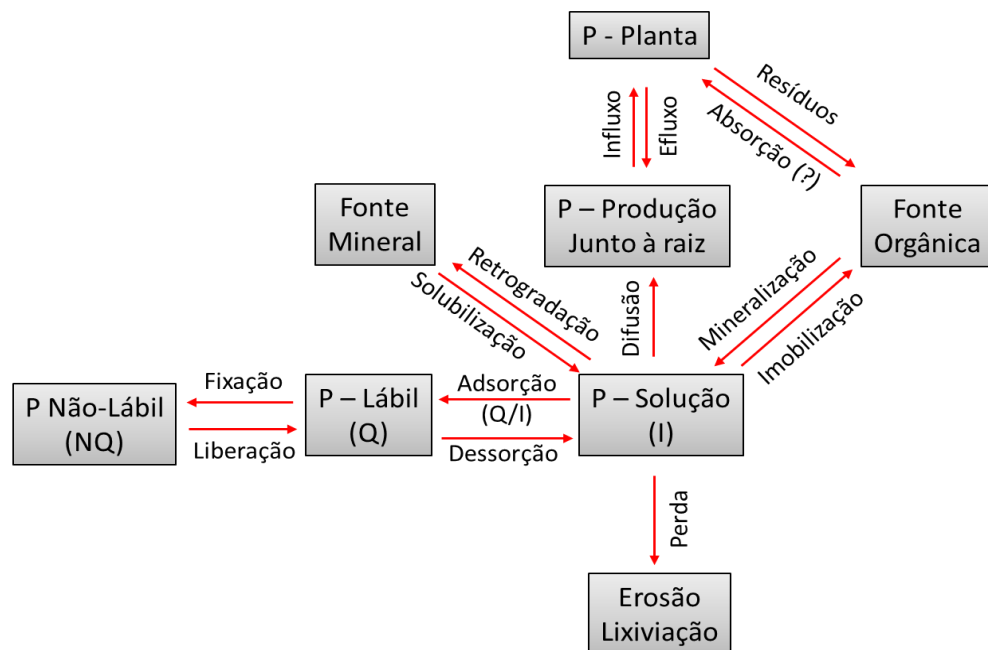


Figura 4. Formas de fósforo no sistema solo-planta; interdependências e equilíbrios, adaptado de (NOVAIS et al., 2007).

A resistência do solo pode mudar o P-Lábil, como consequências de mudanças no P-solução ou vice versa, denomina-se (fator capacidade de P do solo - FCP). Solos com maior FCP, como os mais intemperizados e argilosos (solos-drenos), mantêm mais constante o valor de P-solução (I) quando submetidos a adição ou a retirada de P, bem como a relação Q/I será maior do que em solos com menor adsorção, como nos arenosos e, se argilosos, menos intemperizados.

Cabe mencionar que o teor natural de P presente no solo é insatisfatório ao adequado crescimento de plantas. Apesar de seu teor total no solo variar de 100 a 3.000 mg kg⁻¹ (BRADY; WEIL, 1996; NOVAIS; SMYTH, 1999), menos de 0,1 % desse total está na solução do solo, cujos valores variam entre 0,002 e 2,0 mg L⁻¹ (FARDEAU, 1996). Estima-se que 5% a 25% do fósforo solúvel adicionado ao solo, como adubo, sejam aproveitados pela cultura, e que 95% a 75% dele sejam adsorvidos aos solos (FALCÃO; SILVA, 2004).

No atual contexto da agricultura, necessita-se de ferramentas e tecnologias que auxiliem na compreensão da dinâmica do P no solo. Existem métodos indiretos que contribuem na identificação, classificação e quantificação de determinados atributos do solo, possibilitando gerar informações em um curto espaço de tempo, assim como facilita o estudo das relações entre os atributos de interesse agronômico.

1.2.4 Técnicas indiretas na predição de P

1.2.4.1 Espectroscopia de reflectância difusa

Visando atender a crescente demanda de informações detalhadas dos solos tropicais, especialmente de atributos do solo, cada vez mais tem sido empregado técnicas indiretas, de modo a complementar os métodos convencionais de análise do solo (MADARI et al., 2006; VISCARRA ROSSEL et al., 2009a,b).

Na Austrália a assinatura espectral obtida por sensores orbitais foi utilizada para construir o mapa de Hm e Gt de toda federação (769.902.400 ha) (VISCARRA ROSSEL et al., 2010). No Brasil, estudos incipientes já foram desenvolvidos usando métodos indiretos na caracterização de óxidos de ferro por ERD em pequenas áreas (BAHIA et al., 2015; CAMARGO et al., 2015) e em grandes áreas (SILVA et al., 2020). Cabe agora, aplicar esse conhecimento em novas informações, pois agora conhecendo os princípios das relações de causa e efeito do solo e observando isso em grandes áreas, essa ferramenta possibilita nova perspectiva no gerenciamento específico em grandes compartimentos do solo, que necessita de um grande banco de dados, podendo ser adquirido em um curto espaço de tempo e com menor custo (CAMARGO et al., 2015).

A ERD tem seu princípio baseado na cor emitida quando o fluxo radiante incide sobre a matéria (Figura 5), no caso deste estudo, o solo, ou seja, a influência das propriedades do solo sobre a absorção e a reflexão da energia medida permite

relacionar bandas espectrais (diferentes comprimentos de onda) (BARRÓN et al., 2000); no caso, a faixa do visível (VIS) e infravermelho próximo (NIR) com os atributos do solo, e assim quantificá-los de maneira indireta.

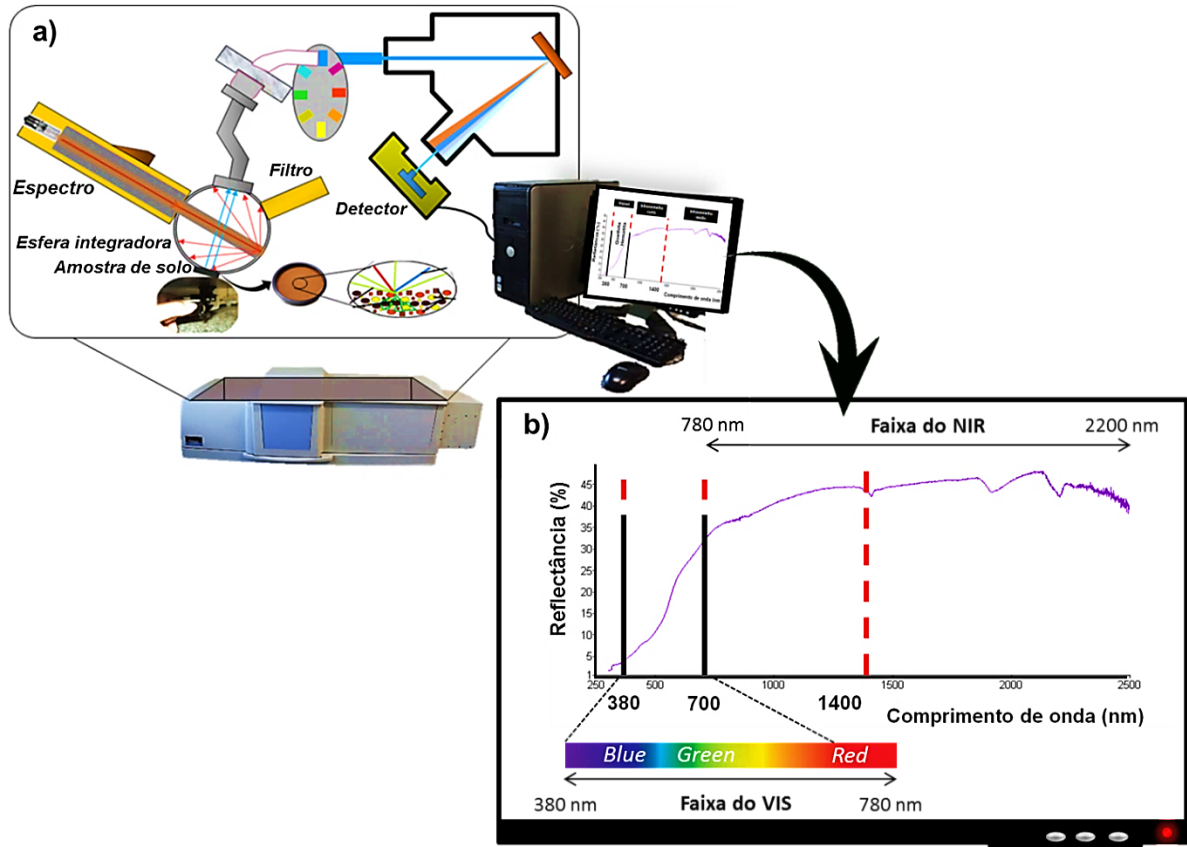


Figura 5. (a) Esquema de funcionamento do equipamento espectrofotômetro Lambda 950 UV/Vis/NIR acoplado com uma esfera integradora de 150 mm de diâmetro e (b) o espectro gerado na faixa dos VIS-NIR. Adaptado de Barrón, UCO.

Quanto mais escura e intensa a cor do solo (características de solos que têm como constituintes a Hm, Mh e a presença de MO), menos energia é refletida, ocorrendo o rebaixamento da curva em função do comprimento de onda (SILVA, 2016). Entretanto, quando a amostra de solo apresenta minerais de cores claras, como Gt e, com menor intensidade, ocorre a elevação da curva de reflectância, pois a maior parte da energia incidida na amostra foi refletida. Portanto, a cor do solo é um indicador seguro da presença de óxidos de Fe e de outras importantes propriedades do solo que covariam com ela (TORRENT; BARRÓN, 1993).

Várias técnicas de calibração, baseadas nos espectros VIS-NIR, foram utilizadas no desenvolvimento de modelos para estimar propriedades do solo,

considerando a vantagem de evitar a colinearidade (ZHANG, 2010; ZHANG et al., 2011; XU; XIE, 2012). O programa Parles (VISCARRA ROSSEL, 2008) implementa a regressão de mínimos quadrados parciais (PLSR), que é comumente desenvolvida com uma ampla gama de largura de banda espectral para obter alta precisão de previsão em função da calibração de modelos. Vale ressaltar que esse método também usa correlações entre o elemento solo e seus constituintes, como: óxidos de ferro e minerais de argila (BARTHOLOMEUS et al., 2008). Afinal, a mineralogia do solo é um dos principais indicadores da variação dos processos pedogenéticos (CAMARGO et al., 2012), e a assinatura espectral por ERD é produto da variação dos minerais presentes no solo (BARRÓN et al., 2000).

1.2.4.2 suscetibilidade magnética

Outra ferramenta utilizada na avaliação indireta dos atributos do solo é a suscetibilidade magnética (SM) (Figura 6), que pode ser definida como o grau de magnetização de um material em resposta a um campo magnético aplicado (VEROSUB; ROBERTS, 1995). A SM resulta da translação e rotação dos elétrons que constituem alguns minerais presentes nos solos, nos sedimentos e nas rochas (CRAIK, 1995; LUQUE, 2008).

No ambiente natural, existem minerais de diferentes espécies e formatos, e nesse sentido o que é estimado na verdade é a SM resultante, que representa o mineral de maior expressão naquele ambiente. Portanto, a presença de minerais magnéticos no solo é identificada por medidas de SM (COSTA et al., 1999; TORRENT et al., 2010; JORDANOVA et al., 2016). Pois esta é uma característica dos minerais presentes nas rochas e no solo.

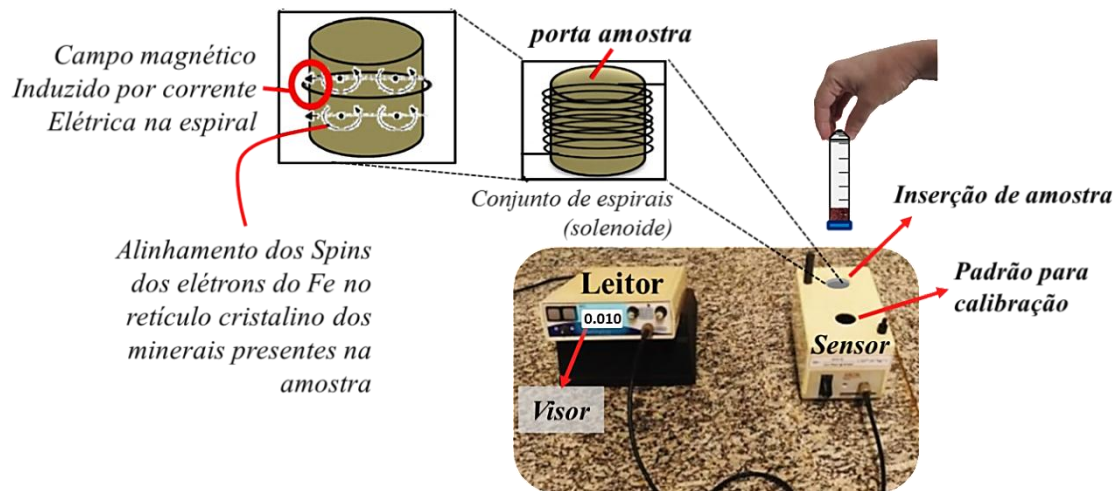


Figura 6. Diagrama do princípio de funcionamento do sensor de suscetibilidade magnética. Adaptado de Siqueira (2013).

A SM é produzida pela indução de um campo magnético terrestre durante a cristalização do mineral presente na rocha ou no solo, originado das propriedades de rotação de elétrons (LUQUE, 2008). E juntamente com a mineralogia da fração argila, tem potencial para prever atributos covariativos, sendo uma importante característica na caracterização e mapeamento de atributos do solo.

A aplicação da SM para fins de mapeamento vem se destacando nos últimos anos (SIQUEIRA et al., 2015; PELUCO et al., 2015; 2020; SILVERO et al., 2019; RAMOM et al., 2020). Sabendo disso, o uso desta ferramenta é importante para a compreensão dos atributos do solo na caracterização e diferenciação de ambientes, de forma viável por ser econômica, segura, simples e rápida (PELUCO et al., 2020).

De acordo com Dearing et al. (1996), a aplicação da SM é ideal para a realização de estudos que requerem avaliação de grande quantidade de amostras de solo. Assim, pesquisadores têm apontado a SM (MARQUES JUNIOR et al., 2014; SIQUEIRA et al., 2015; BARBOSA et al., 2019; PELUCO et al., 2020) como um atributo importante para a quantificação indireta de propriedades químicas, físicas e mineralógicas do solo.

Por em prática esses métodos de quantificação indireta em áreas de grande escala, tornará viável o monitoramento espacial de atributos correlatos, principalmente o P. Contudo, trabalhar um banco de dados robusto, requer a utilização de ferramentas matemáticas que possibilitem a modelagem e predição desses dados em áreas não amostradas.

1.2.5 Modelagem matemática aplicada a solos

1.2.5.1 Geoestatística

A necessidade de conhecimento da variabilidade espacial das características do ambiente agrícola, visando o uso adequado, faz-se cada vez mais necessário. Nesse segmento, a modelagem geoespacial permite a descrição quantitativa da variabilidade espacial dos atributos do solo e, ainda, a estimativa não tendenciosa da variância mínima de valores desses atributos em locais não amostrados. Podendo ser uma importante ferramenta na caracterização e mapeamento de atributos dos solos (KUMAR et al., 2012) em áreas extensas de complexidade litológica e geomorfológica de solos tropicais.

A incorporação de procedimentos geoestatísticos em SIG's (Sistemas de Informações Geográficas), baseados em técnicas de krigagem, é importante, porque essa associação melhora os procedimentos tradicionais de tais sistemas devido à qualidade do estimador e, principalmente, pela informação de acurácia fornecida nesse modelo inferencial (CAMARGO, 1998).

O que diferencia a krigagem de outros métodos de interpolação é a estimação de uma matriz de covariância espacial que determina os pesos atribuídos às diferentes amostras, o tratamento da redundância dos dados, a vizinhança a ser considerada no procedimento inferencial e o erro associado ao valor estimado (CAMARGO, 1998). Além disso, a krigagem também fornece estimadores exatos com propriedades de não tendenciosidade e eficiência.

Vale mencionar que o variograma é uma ferramenta básica de suporte às técnicas de krigagem, permitindo representar quantitativamente a variação de um fenômeno regionalizado no espaço (HUIJBREGTS, 1975). Exemplificando um semivariograma experimental com características muito próximas do ideal. Espera-se que observações mais próximas geograficamente tenham um comportamento mais semelhante entre si do que aquelas separadas por maiores distâncias. Desta maneira, é esperado que $\gamma(h)$ aumente com a distância h (Figura 7).

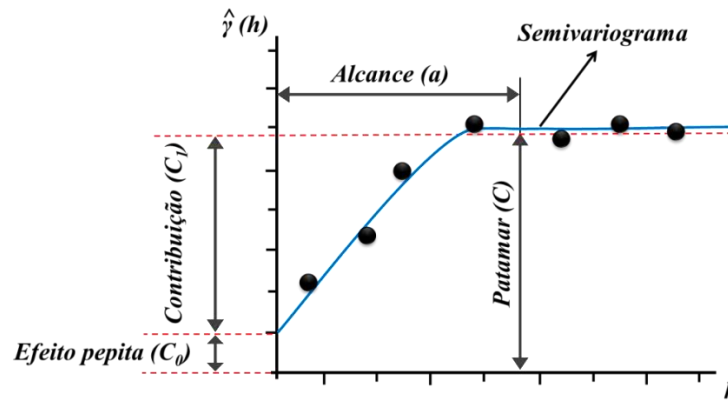


Figura 7. Ilustração de um semivariograma experimental.

Os principais parâmetros do semivariograma são o alcance (a): distância dentro da qual as amostras apresentam-se correlacionadas espacialmente, patamar (C): é o valor do semivariograma correspondente ao seu alcance (a). (deste ponto em diante, considera-se que não existe mais dependência espacial entre as amostras, porque a variância da diferença entre pares de amostras torna-se invariante com a distância), efeito pepita (C_0): revela a descontinuidade do semivariograma para distâncias menores do que a menor distância entre as amostras (parte desta descontinuidade pode ser também devida a erros de medição ou microvariações não captadas pela amostragem (ISAACS; SRIVASTAVA, 1989)) e por fim a contribuição (C_1): é a diferença entre o patamar (C) e o efeito pepita (C_0). O semivariograma é um gráfico da função semivariância versus distância, representado pela seguinte equação [1]:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2$$

Em que: $\gamma(h)$ = valor da semivariância estimada para uma distância h , $N(h)$ = número de pares envolvidos no cálculo da semivariância, $Z(x_i)$ = valor do atributo Z na posição x_i ; $Z(x_i+h)$ - valor do atributo Z separado por uma distância h da posição x_i .

Dentre os diversos modelos matemáticos, três são largamente utilizados nas ciências agrárias, sendo os seguintes: modelo gaussiano, exponencial e esférico (Figura 8). Cabe ressaltar principalmente estes dois últimos citados, pois os modelos exponenciais e esféricos apresentam-se como os modelos teóricos mais comuns aos atributos do solo (McBRATNEY; WEBSTER 1986). Os modelos exponenciais descrevem os fenômenos mais erráticos na pequena escala, enquanto os modelos

esféricos descrevem propriedades com alta continuidade espacial, ou menos erráticos na curta distância (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989).

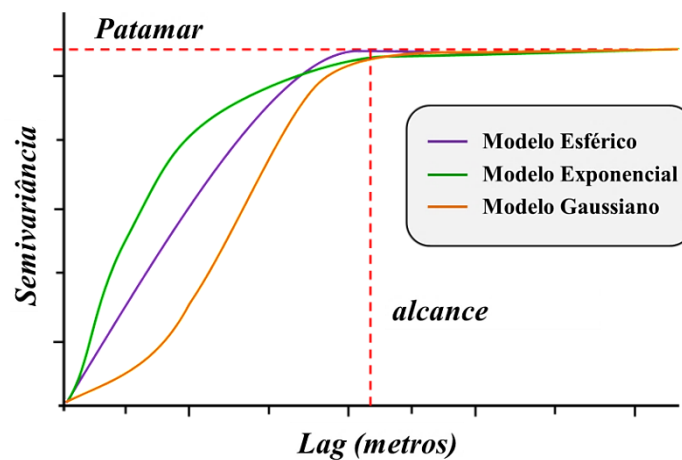


Figura 8. Modelos de semivariogramas comumente utilizados.

O mapeamento do solo em áreas agrícolas utilizando a geoestatística vem sendo utilizado pelo grupo CSME (Caracterização de solos para fins de manejo específico) há pelo menos 20 anos. Exemplificando os estudos em relação ao P, tem-se os de Camargo et al. (2008ab; 2012; 2015) em áreas de 1 e 500 ha respectivamente, Barbieri et al. (2009; 2013) em áreas de 1 ha e Peluco et al. (2015) em 380 ha, que mapearam a variabilidade espacial em escala local (pequena escala) da ocorrência de Hm, Gt, SM, cor do solo e variáveis covariativas, como o Pads e Pdisp.

O grande desafio é aplicar a modelagem geoestatística em todo o Noroeste do estado de São Paulo. Para isso, é necessária uma malha amostral capaz de refletir as variações dos atributos estudados. Assim sendo, o espaçamento utilizado neste estudo está de acordo com a variação do espaçamento relatado por Liu et al. (2013) (8-84 ha) na província chinesa de 530.000 ha usando 1247 pontos e Viscarra-Rossel et al. (2010) na Austrália com 4406 pontos e espaçamento de 20 a 1425 km. A semelhança de nossos resultados com os intervalos encontrados pelos demais autores está relacionada à semelhança dos agentes causadores da variabilidade, principalmente geologia, forma da paisagem e intensidade do intemperismo desses locais.

1.2.5.2 “Random Forest” (RF)

A agricultura cada vez mais vem necessitando da estimativa de dados a partir de modelos matemáticos. Tendo em vista essa problemática, a utilização de algoritmos computacionais para avaliação e previsão de atributos, vem sendo disseminado (WAN et al., 2020). O aprendizado de máquina (“Machine Learning”, ML) é uma subárea da inteligência artificial, a qual os algoritmos aprendem de forma automática a estimar, classificar, selecionar melhores modelos e reduzir dimensionalidade de problemas (LIAKOS et al., 2018). Nesse contexto, a “random forest” (RF) (BREIMAN, 2001) é uma das técnicas mais promissoras disponíveis (CHAGAS et al., 2016; SOUZA et al., 2016; HEUNG et al., 2017).

A RF é um meta-estimador que se encaixa em várias árvores de decisão classificadoras, em subamostras do conjunto de dados e usa a média para melhorar a precisão preditiva e controlar o ajuste excessivo, resistindo ao overfitting. A RF gera uma grande quantidade de árvores de decisão para fora do subconjunto de dados a partir de um treinamento único definido.

A RF em particular mostra maior capacidade de aprendizado e precisão preditiva do que os modelos tradicionais de árvore única (BREIMAN, 2001), podendo lidar com tipos de dados contínuos e categóricos, ausentes e extremos (SKURICHINA; DUIN, 2002), exige poucos parâmetros para ser implementado (CUTLER; STEVENS, 2012), classifica a importância de fatores selecionados (JANITZA et al., 2016) e avalia o ajuste final do modelo.

O algoritmo de RF é bastante robusto ao ruído em preditores e, portanto, não requer uma pré-seleção de variáveis (DIAZ-URIATE; ANDRES, 2006). Como apenas um número aleatório limitado de preditores é usado para procurar a melhor divisão em cada nó, a diversidade da floresta é aumentada (baixa correlação de árvores individuais) e a carga computacional é reduzida. O algoritmo é robusto para sobreajuste, pois cada árvore é treinada em uma subamostra de auto inicialização única dos dados (ARUN; LANGMEAD, 2006).

Contudo, uma desvantagem da RF é a limitada interpretação dos resultados, já que as relações entre os preditores e as respostas não podem ser examinadas individualmente, para cada árvore na floresta, e são, por essa razão, frequentemente chamadas de “abordagem caixa-preta” (GRIMM et al., 2008).

Os parâmetros comumente usados na RF são o $n_estimators$ (NSE), que se refere ao número de árvores na floresta, max_depth (MD) que compreende a

profundidade máxima da árvore na floresta, caso não havendo nenhuma, os nós serão expandidos até que todas as folhas estejam puras e se obtenha a *min impurity decrease* (MNID), ou seja, a mínima impureza.

A utilização de modelos gerados por RF, com diferentes combinações de covariáveis preditoras, obteve êxito em diversos trabalhos na predição espacial do carbono orgânico do solo (VISCARRA ROSSEL; BEHRENS, 2010; GUO et al., 2015; VAYSSE; LAGACHERIE, 2015; NABIOLLAHI et al., 2019), na predição da composição granulométrica (VISCARRA ROSSEL; BEHRENS, 2010; VAYSSE; LAGACHERIE, 2015), na previsão espacial desses dois atributos (carbono orgânico, teor de argila), na região central do Irã (ZERAATPISHEH, 2018), e na estimativa da distribuição espacial de metais pesados em uma província na China (TAN et al., 2020). Levando em conta essas vantagens e a aplicação bem-sucedida da RF em outros estudos aqui citados, é promissor combinar com outras variáveis do solo para prever a distribuição espacial em larga escala (GUO et al., 2020) em escala de estado.

1.3 Referências

ABELSON, P. H. A Potential Phosphate Crisis. **Science**, v.283(5410), p.2015–2015, 1999. doi:10.1126/science.283.5410.2015

ALMEIDA, F. F. M. **Fundamentos geológicos do relevo paulista**. Boletim do Instituto Geográfico e Geológico. v.41, p.169-263, 1964.

ANDRADE, F. V.; MENDONÇA, E. S.; ALVAREZ V, V. H.; NOVAIS, R. F. Adição de ácidos orgânicos e húmicos em Latossolos e adsorção de fosfato. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, p.1.003-1.011, 2003.

ANTELO, J.; ARCE, F.; AVENA, M.; FIOL, S.; LÓPEZ, R.; MACÍAS, F. Adsorption of soil humic acid the surface of goethite and its competitive interaction with phosphate. **Geoderma**, Amsterdam, v.138, p.12-19, 2007.

ARUN, K.; LANGMEAD, C. J. **Structure based chemical shift prediction using random forests nonlinear regression**, 4th Asia-Pacific Bioinformatics Conference, Taiwan, p.317–326, 2006.

BAHIA, A. S. R. S.; MARQUES JÚNIOR, J.; SIQUEIRA, D. S. Procedures using diffuse reflectance spectroscopy for estimating hematite and goethite in Oxisols of São Paulo, Brazil. **Geoderma Regional**, Amsterdam, v.5, p.150–156, 2015.

BARBIERI, D. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA JÚNIOR, N.; SIQUEIRA, D. S.; PANOSSO, A. R. Comportamento dos óxidos de ferro da fração argila e do fósforo adsorvido, em diferentes sistemas de colheita de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.37, p.1.557-1.568, 2013. doi: 10.1590/S0100-06832013000600012.

BARBIERI, D. M.; MARQUES JÚNIOR, J.; ALLEONI, L. R. F.; GARBUIO, F. J.; CAMARGO, L. A. Hillslope curvature, clay mineralogy, and phosphorus adsorption in an Alfisol cultivated with sugarcane. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.66, n.6, p. 819-826, 2009.

BARRÓN, V.; MELLO, J. W. V.; TORRENT, J. Caracterização de óxidos de ferro em solos por espectroscopia de Reflectância Difusa. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R., eds. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000, v.1, p.139-162.

BARRÓN, V.; TORRENT, J. Surface hydroxyl configuration of various crystal faces of hematite and goethite. **Journal of Colloid and Interface Science**, v.177, p.407-410, 1996.

BARRÓN, V.; HERRUZO, M.; TORRENT, J. Phosphate adsorption by aluminous hematites of different shapes. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.52, p.647-651, 1988.

BARTHOLOMEUS, H. M. et al. Spectral reflectance based indices for soil organic carbon quantification. **Geoderma**, Amsterdam, v. 145, n. 1-2, p. 28-36, 2008.

BARBOSA, R. S.; MARQUES JÚNIOR, J.; BARRÓN, V.; MARTINS FILHO, M. V.; SIQUEIRA, D. S.; PELUCO, R. G.; CAMARGO, L. A.; SILVA, L. S. (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**, v.78, p.1-12. doi:10.1007/s12665-018-8015-0

BOUMA, J. Using soil survey data for quantitative land evaluation. **Advances in Soil Science**, New York, v.9, p.177-213, 1989.

BOCKHEIM, J. G.; GENNADIYEV, A. N.; HAMMER, R. D.; TANDARICH, J. P. Historical development of key concepts in pedology. **Geoderma**, Amsterdam, v.124, p.23-36, 2005.

BREIMAN, L. 2001. "Random forests", machine learning, v.45(1), p.5-32. doi: <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>

BRADY, N. C.; WEIL, R. R. **The nature and properties of soils**. 11.ed. New Jersey, Prentice Hall, 1996. 727p.

BUOL, S. W.; SOUTHARD, R. J.; GRAHAM, R. C.; McDANIEL, P. A. **Soil genesis and classification**. 4.ed. Iowa: Blackwell, 1997. 527p.

BUOL, S. W.; HOLE, F. D.; McCracken, R. J. **Soil genesis and classification**. Ames, Iowa State University Press, 1980. 404p.

CAMARGO, L. A.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G. T.; ALLEONI, L. R. F.; BAHIA, A. S. R. Pedotransfer functions to assess adsorbed phosphate using iron oxide content and magnetic susceptibility in an Oxisol. **Soil Use and Management**, Oxford, v.32, n.2, p.172–182, 2016.

CAMARGO, L. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; BARRÓN, V.; ALLEONI, L. R. F.; BARBOSA, R. S.; PEREIRA, G. T. Mapping of clay, iron oxide and adsorbed phosphate in Oxisols using diffuse reflectance spectroscopy. **Geoderma**, Amsterdam, v.251/252, p.124-132, 2015. doi: 10.1016/j.geoderma.2015.03.027.

CAMARGO, L. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; ALLEONI, L. R. F. Spatial correlation between the composition of the clay fraction and contents of available phosphorus of an Oxisol at hillslope scale. **Catena**, Cremlingen, v.100, p.100-106, 2012.

CAMARGO, L. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; HORVAT, R. A. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um Latossolo sob diferentes formas do relevo. I - Mineralogia da fração argila. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.2.269-2.277, 2008a.

CAMARGO, L. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; HORVAT, R. A. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um Latossolo sob diferentes formas de relevo II- Correlação espacial entre mineralogia e agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.2.279-2.288, 2008b.

CAMARGO, E. C. G. **Geoestatística: fundamentos e aplicações**. In: CÂMARA, G. & MEDEIROS, J.S. eds. Geoprocessamento para projetos ambientais. São José dos Campos: INPE, 1998. Disponível em: http://www.dpi.inpe.br/gilberto/tutoriais/gis_ambiente/5geoest.pdf.

CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; MONTANARI, R.; CAMARGO, L. A. Relações solo-paisagem em uma litossequência arenito-basalto na região de Pereira Barreto-SP. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.3, p.519–529, 2007.

CARMO, D. A. B. **Dados espectrais dos solos do Centro-Oeste Paulista por meio de sensores próximos**. 2018. 107 f. Tese (Doutorado em Agronomia Produção Vegetal) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2018.

CHAGAS, C. D. S., JUNIOR, W. D. C., BHERING, S. B., FILHO, B. C. Spatial prediction of soil surface texture in a semiarid region using random forest and multiple linear regressions. **Catena**, Amsterdam, v.139, p.232–240, 2016.

CORDELL, D.; WHITE, S. Sustainable phosphorus measures: strategies and technologies for achieving phosphorus security. **Agronomy**, v.3(1), p.86–116, 2013. doi.org/10.3390/agronomy3010086

CORDELL, D.; WHITE, S. Peak Phosphorus: Clarifying the Key Issues of a Vigorous Debate about Long-Term Phosphorus Security. **Sustainability**, v.2011(3), p.2027–2049, 2011.

CORDELL, D.; DRANGERT, J. O.; WHITE, S. The story of phosphorus: Global food security and food for thought. **Global Environmental Change**. v.19, p.292-305, 2009.

CORNELL, R. M.; SCHWERTMANN, U. **The iron oxides. Structure, properties, reactions, occurrence and uses**. Weinheim: Wiley VHC; 1996. 573p.

COSTA, A. C. S.; BIGHAM, J. M. Óxidos de ferro. In: MELO, V. F.; ALLEONI, R. F. (Eds.). **Química e mineralogia do solo**. Viçosa: SBCS, 2009. Parte 1

COSTA, A. C. S.; BIGHAM, J. M.; RHOTON, F. E.; TRAINA, S. J. Quantification and characterization of maghemite in soils derived from volcanic rocks in southern Brazil. **Clays and Clay Minerals**, Aurora, v.47, n.4, p.466–473, 1999.

COVENTRY, R. J.; TAYLOR, R.; FITZPATRICK, R. W. Pedological significance of the gravel in some red and grey earth of central North Queensland. **Australian Journal of Soil Research**, Clayton, v.21, p.219–240, 1983.

CRAIK, D. **Magnetism, principles and applications**. Lisboa: John Wiley and Sons, 1995. 459 p.

CURI, N.; FRANZMEIER, D. P. Effect of parent rocks on chemical and mineralogical properties of some Oxisols in Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.51, p.153-158, 1987.

CUNHA, P.; MARQUES JÚNIOR, J.; CURI, N.; PEREIRA, G. T.; LEPSCH, I. F. Superfícies geomórficas e atributos de Latossolos em uma sequência arenítico-basáltica da região de Jaboticabal (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, p.81-90, 2005.

CURI, N.; FRANZMEIER, D. P. Toposequence of Oxisols from the Central Plateau of Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.48, n.2, p.341–346, 1984.

CUTLER, A.; CUTLER, D. R.; STEVENS, J. R. Random Forests. In: ZHANG, C.; MA, Y. Q., Eds., **Ensemble Machine Learning**, Springer, New York, p.157-175, 2012. http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4419-9326-7_5

DEARING, J. A.; DANN, R. J. L.; HAY, K.; LEES, J. A.; LOVELAND, P. J.; MAHER, B. A.; O'GRADY, K. Frequency-dependent susceptibility measurements of environmental materials. **Geophysical Journal International**, Oxford, v.124, p.228–240, 1996.

DÍAZ-URIARTE, R.; ANDRÉS, S. A. Gene selection and classification of microarray data using random forest. **BMC Bioinformatics**, v.7, 2006. <https://doi.org/10.1186/1471-2105-7-3>

EMSLEY, J., 2000. The 13th Element: The Sordid Tale of Murder, Fire, and Phosphorus. John Wiley & Sons, New York. p. 327, ISBN: 0-471-39455-6.

FALCÃO, N. P. S.; SILVA, J. R. A. Características de adsorção de fósforo em alguns solos da Amazônia Central. **Acta Amazônica**, Manaus, v.34, n.3, p.337-342, 2004.

FARDEAU, J. C. Dynamics of phosphate in soils. An isotopic outlook. **Fertilizer Research**, v.45, p.91-100, 1996.

FATHIZAD, H.; ARDAKANI, M. A. H.; SODAIEZADEH, H.; KERRY, R.; TAGHIZADEH-MEHRJARDI, R. Investigation of the spatial and temporal variation of soil salinity using random forest in the central desert of Iran. **Geoderma**, Amsterdam, v.365, p.114233, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114233>

FERNANDES, L. A.; COIMBRA, A. M. The Late Cretaceous Caiuá Desert (Bauru Basin, Brazil). In: INTERNATIONAL GEOLOGY CONGRESS, 31, 2000, Rio de Janeiro (Brazil). **Proceedings...** Rio de Janeiro (Brazil): IUGS, 2000. (CD-ROM, General Symposia, 3.6).

FERNANDEZ, R. N.; SCHULZE, D. G. Munsell colors of soils simulated by mixtures of goethite and hematite with kaolinite. **Zeitschrift Pflanzenernähr Bodenk**, Weinheim, v.155, n.5, 1992. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1002/jpln.19921550520>.

FINK, J. R.; INDA, A. V.; TIECHER, T.; BARRÓN, V. Iron oxides and organic matter on soil phosphorus availability. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v.40, n.4, p.369-379, 2016.

GHIDIN, A. A.; MELO, V. F.; LIMA, V. C.; LIMA, J. M. J. C. Topossequências de Latossolos originados de rochas basálticas no Paraná. I - Mineralogia da fração argila. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v.30, n.2, p.293–306, 2006

GRANGER, S. J.; HEATON, T. H. E.; PFAHLER, V.; BLACKWELL, M. S. A.; YUAN, H.; COLLINS, A. L. The oxygen isotopic composition of phosphate in river water and its potential sources in the Upper River Taw catchment, UK. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v.574, p.680-690, 2017. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.09.007>

GRIMM, R.; BEHRENS, T.; MÄRKER, M.; ELSENBEEER, H. Soil organic carbon concentrations and stocks on Barro Colorado Island — Digital soil mapping using Random Forests analysis. **Geoderma**, Amsterdam, v.146(1-2), p.102–113, 2008.

GUO, X.; BIAN, Z.; WANG, S.; WANG, Q.; ZHANG, Y.; ZHOU, J.; LIN, L. Prediction of the spatial distribution of soil arthropods using a random forest model: A case study in Changtu County, Northeast China. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.292, p.106818, 2020. doi:10.1016/j.agee.2020.106818

GUO, P. T.; LI, M. F.; LUO, W.; TANG, Q. F.; LIU, Z. W.; LIN, Z. M. Digital mapping of soil organic matter for rubber plantation at regional scale: an application of random forest plus residuals kriging approach. **Geoderma**, Amsterdam, v.237, p.49–59, 2015.

HEUNG, B.; HODÚL, M.; SCHMIDT, M. G. Comparing the use of training data derived from legacy soil pits and soil survey polygons for mapping soil classes. **Geoderma**, Amsterdam, v.290, p.51-68, 2017.

HUANG, L. D.; WANG, H. Y.; LI, Y. X.; LU, S. G. Spatial distribution and risk assessment of phosphorus loss potential in urban-suburban soil of Lishui, China. **Catena**, Cremlingen, v.100, p.42–49, 2013.

HUE, N. V. Effects of organic acids/anions on phosphorus sorption and phytoavailability in soils with different mineralogies. **Soil Science**, Baltimore, v.152, p.463-471, 1991.

HUIJBREGTS, C. J. Regionalized variables and quantitative analysis of spatial data. In: DAVIS, J. C.; McCULLAGH, M. J. (Eds.). **Display and analysis of spatial data**. New York: J. Wiley, 1975. p.38-53.

INDA JÚNIOR, A. V.; KÄMPF, N. Variabilidade de goethita e hematita via dissolução redutiva em solos de região tropical e subtropical. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, n.29, p.851-866, 2005.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO (IPT). **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo**, 94p, 1981.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **Applied geostatistics**. Nova York: Oxford University Press, 1989. 561p.

JANITZA, S.; TUTZ, G.; BOULESTEIX, A. Random forest for ordinal responses: prediction and variable selection. **Computational Statistics & Data Analysis**. v.96, p.57–73, 2016.

JENNY, H. **Factors of soil formation**: A system of quantitative. New York, McGraw-Hill, 1941. 271p.

JORDANOVA, N.; JORDANOVA, D.; PETROV, P. Soil magnetic properties in Bulgaria at a national scale – challenges and benefits **Global and Planetary Change**, v.137, pp.107-122, 2016. doi:10.1016/j.gloplacha.2015.12.015

JUO, A. S. R.; FOX, R. L. Phosphate sorption characteristics of some bech-mark soils of west Africa. **Soil Science**, Baltimore, v.124, p.370-376, 1977.

KÄMPF, N.; CURTI, N. Óxidos de ferro: Indicadores de ambientes pedogênicos e geoquímicos. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ V.; V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Eds.). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p.107–138

KER, J. C. **Mineralogia, sorção e dessorção de fosfato, magnetização e elementos traços de Latossolos do Brasil**. 1995. 181f. Tese – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1995.

KRUSE, J.; ABRAHAM, M.; AMELUNG, W.; BAUM, C.; BOL, R.; KÜHN, O.; LEWANDOWSKI, H.; NIEDERBERGER, J.; OELMANN, Y.; RÜGER, C.; SANTNER, J.; SIEBERS, M.; SIEBERS, N.; SPOHN, M.; VESTERGREN, J.; VOGTS, A.; LEINWEBER, P. Innovative methods in soil phosphorus research: A review. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, v.178(1), p.43–88, 2015.

KUMAR, S. V.; REICHLE, R. H.; HARRISON, K. W.; PETERS-LIDARD, C. D.; YATHEENDRADAS, S.; SANTANELLO, J. A. A comparison of methods for a priori bias correction in soil moisture data assimilation. **Water Resources Research**, v.48, W03515, 2012. doi:10.1029/2010WR010261

LACERDA, M. P. C.; BARBOSA, I. O. Relações pedomorfogeológicas e distribuição de pedoformas na estação ecológica de águas emendadas, Distrito Federal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v.36, p.709-721, 2012.

LIAKOS, K.; BUSATO, P.; MOSHOU, D.; PEARSON, S.; BOCHTIS, D. Machine Learning in Agriculture: A Review. **Sensors**, v.18(8), 2674, 2018. doi:10.3390/s18082674

LIU, Y.; LI, Y. F.; HARRIS, P.; CARDENAS, L. M.; DUNN, R. M.; SINT, H., et al. Modelling field scale spatial variation in water run-off, soil moisture, N(2)O emissions and herbage biomass of a grazed pasture using the SPACSYS model. **Geoderma**, Amsterdam, v.315, p.49–58, 2018.

LUQUE, E. C. L. **Propiedades magnéticas de los óxidos de hierro en suelos mediterráneos**. 2008. 179f. Tese (Doutorado) - Escola Técnica Superior de Ingenieros Agrónomos y de Montes, Universidad de Córdoba, Córdoba, 2008.

MACHADO, D. F. T., SILVA, S. H. G., CURI, N., MENEZES, M. D. Soil type spatial prediction from Random Forest: different training datasets, transferability, accuracy and uncertainty assessment. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.76, p.243-254, 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/1678-992X-2017-0300>

MADARI, B. E.; REEVES, J. B.; MACHADO, P. O. A.; GUIMARÃES, C. M.; TORRES, E.; McCARTY, G. W. Mid and near-infrared spectroscopic assessment of soil compositional parameters and structural indices in two Ferrasols. **Geoderma**, Amsterdam, v.136, p.1-15, 2006.

MARQUES JÚNIOR, J.; SIQUEIRA, D. S.; CAMARGO, L. A.; TEIXEIRA, D. D. B.; BARRÓN, V.; TORRENT, J. Magnetic susceptibility and diffuse reflectance spectroscopy to characterize the spatial variability of soil properties in a Brazilian Haplustalf. **Geoderma**. Amsterdam, v.219, p.63-71, 2014.

McBRATNEY, A. B.; MINASNY, B.; VISCARRA ROSSEL, R. A. Spectral soil analysis and inference systems: a powerful combination for solving the soil data crisis. **Geoderma**. Amsterdam, v.136, p.272–278, 2006.

McBRATNEY, A. B.; MINASNY, B.; CATTLE, S. R.; VERVOORT, R. W. From pedotransfer functions to soil inference systems. **Geoderma**. Amsterdam, n.109, p.41-73, 2002.

McBRATNEY, A. B.; WEBSTER, R. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.37(4), p.617-639, 1986.

McBRIDE, M. B. Environmental chemistry of soils. New York, Oxford University Press, 1994. 406p.

MESQUITA FILHO, M. V.; TORRENT, J. Phosphate sorption as related to mineralogy of a hydrosequence of soils from Cerrado Region (Brazil). **Geoderma**, Amsterdam, v.58, n.1–2, p.107–123, 1993.

NABIOLLAHI, K.; ESKANDARI, S.; TAGHIZADEH-MEHRJARDI, R.; KERRY, R.; TRIANTAFALIS, J. Assessing soil organic carbon stocks under land-use change

scenarios using random forest models. **Carbon Management**, p.1–15, 2019. doi:10.1080/17583004.2018.1553434

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J.; NUNES, F. N. VIII Fósforo. In: NOVAIS, R. F.; V. H. ALVAREZ V.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. Fertilidade do solo. Viçosa: **Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, 2007, p. 1017p.

NOVAIS, R. F.; SMYTH, T. J. **Fósforo em solo e planta em condições tropicais**. Viçosa: UFV, DPS, 1999. 399p.

PAHLAVAN-RAD, M. R.; DAHMARDEH, K.; HADIZADEH, M.; KEYKHA, G.; MOHAMMADNIA, N.; GANGALI, M.; KEIKHA, M., DAVATGAR, N., BRUNGARD, C. 2020. Prediction of soil water infiltration using multiple linear regression and random forest in a dry flood plain, eastern Iran. **Catena**, Cremlingen, 194, 104715. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104715>

PELUCO, R. G.; MARQUES JÚNIOR, J.; SIQUEIRA, D. S.; SILVA, L. S.; GOMES, R. P. Soil magnetic signature for identification of areas with different sorption potentials of imazaquin. **Crop Protection**, v.137, 105295, 2020. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cropro.2020.105295>

PELUCO, R. G.; MARQUES JÚNIOR, J.; SIQUEIRA, D. S.; PEREIRA, G. S.; BARBOSA, R. S.; TEIXEIRA, D. B. Mapeamento do fósforo adsorvido por meio da cor e da susceptibilidade magnética do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.50, n.3, p.259-266, 2015. doi: 10.1590/S0100-204X2015000300010

POGGERE, G. C.; INDA, A. V.; BARRÓN, V.; KÄMPF, N.; BRITO, A. D. B.; BARBOSA, J. Z.; CURI, N. Maghemite quantification and magnetic signature of Brazilian soils with contrasting parent materials. **Applied Clay Science**, Amsterdam, v.161, p.385–394, 2018. doi:10.1016/j.clay.2018.05.014

RAMON, R.; EVRARD, O.; LACEBY, J. P.; CANER, L.; INDA, A. V.; BARROS, C. A. P.; MINELLA, J. P. G.; TIECHER, T. Combining spectroscopy and magnetism with geochemical tracers to improve the discrimination of sediment sources in a homogeneous subtropical catchment. **Catena**, Cremlingen, v.195, 104800, 2020. doi:10.1016/j.catena.2020.104800

RENNE, P.; ERNESTO, M.; PACCA, I. G.; COE, R. S.; GLEN, J. M.; PREVÓT, M.; PERRIN, M. The Age of Paraná Flood Volcanism, Rifting of Gondwanaland, and the Jurassic-Cretaceous Boundary. **Science**, v.258, p.975-979, 1992.

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B. D.; CORRÊA, G. F. **Pedologia**: Base para distinção de ambientes. Viçosa, MG, NEPUT, 2007. 304p.

RESENDE, M. **Mineralogy, chemistry, morphology and geomorphology of some soils of Central Plateau of Brazil**. 237f. Tese (Doutorado) – Purdue University, West Lafayette, 1976.

ROCKSTROM, J.; STEFFEN, W.; NOONE, K.; PERSSON, A.; CHAPIN III, F. S.; LAMBIN, E. F.; LENTON, T.M.; SCHEFFER, M.; FOLKE, C.; SCHELLNHUBER, H.J.; NYKVIST, B.; WIT, C.A.; HUGHES, T.; VAN DER LEEUW, S.; RODHE, H.; SÖRLIN, S.; SNYDER, P.K.; COSTANZA, R.; SVEDIN, U.; FALKENMARK, M.; KARLBERG, L.; CORELL, R.W.; FABRY, V.J.; HANSEN, J.; WALKER, B.; LIVERMAN, D.; RICHARDSON, K.; CRUTZEN, P.; FOLEY, J.A. A safe operating space for humanity. **Nature**, Reino Unido, v.461, p.472-475, 2009a. doi:10.1038/461472a.

ROCKSTROM, J.; STEFFEN, W.; NOONE, K.; PERSSON, A.; CHAPIN III, T.; LAMBIN, E. F.; LENTON, T. M.; SCHEFFER, M.; FOLKE, C.; SCHELLNHUBER, H. J.; NYKVIST, B.; WIT, D. A.; HUGHES, T.; VAN DER LEEUW, S.; RODHE, H.; SÖRLIN, S.; SNYDER, P. K.; COSTANZA, R.; SVEDIN, U.; FALKENMARK, M.; KARLBERG, L.; CORELL, R. W.; FABRY, V. J.; HANSEN, J.; WALKER, B.; LIVERMAN, D.; RICHARDSON, K.; CRUTZEN, P.; FOLEY, J. A. A safe operating space for humanity. **Nature**, Reino Unido, v.461, p.23, 2009b. Available at: <http://www.nature.com/nature/journal/v461/n7263/full/461472a.html> (last accessed January 2012).

ROLIM NETO, F. C.; SCHAEFER, C. E. G. R.; COSTA, L. M.; CORRÊA, M. M.; FERNANDES FILHO, E. I.; IBRAIMO, M. M. Adsorção de fósforo, superfície específica e atributos mineralógicos em solos desenvolvidos de rochas vulcânicas do Alto Paranaíba (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, p.953-964, 2004. doi: 10.1590/S0100-06832004000600003.

ROY, E. D.; RICHARDS, P. D.; MARTINELLI, L. A.; COLETTA, L. D.; LINS, S. R. M.; VAZQUEZ, F. F.; WILLIG, E.; SPERA, S. A.; VANWEY, L. K.; PORDER, S. The phosphorus cost of agricultural intensification in the tropics. **Nature Plants**, v.2, 16043, 2016.

SCHAEFER, C. E. G. R.; FABRIS, J. D.; KER, J. C. Minerals in the clay fraction of Brazilian latosols (oxisols): a review. **Clays Minerals**. Twickenham, v.43, n.1, p.137-154, 2008.

SCHAETZL, R.; ANDERSON, S. **Soils: genesis and geomorphology**. Cambridge University Press, 2005. 833p.

SCHOLZ, R. W.; ULRICH, A. E.; EILITTÄ, M.; ROY, A. Sustainable Use of Phosphorus: A Finite Resource. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v.461 – 462 (September 2013), p.799–803, 2013.

SCHWERTMANN, U.; TAYLOR, R. M., 1989. Iron oxides. In: DIXON, J.B.; WEED, S.B. (Eds.), Minerals in Soil Environments. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, p.379-438.

SCHWERTMANN, U. The effect of environments on iron oxide minerals. **Advances in Soil Science**, New York, v.1, p.172-200, 1985.

SHARPLEY, A. N.; PIERZYNSKI, G. M.; WESTERMANN, D. T.; CABRERA, M. L.; POWELL, J. M.; DANIEL, T. C. Phosphorus. Agriculture and the Environment. **American Society of Agronomy**. p.53-86, 2005.

SILVA, L. S.; MARQUES JÚNIOR, J.; BARRÓN, V.; GOMES, R. P.; TEIXEIRA, D. D. B.; SIQUEIRA, D. S.; VASCONCELOS, V. Spatial variability of iron oxides in soils from Brazilian sandstone and basalt. **Catena**, Cremlingen, v.185, p.104258, 2020.

SILVA, L. S. **Mineralogia da fração argila dos solos do Planalto Ocidental Paulista**. 2016. 83 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia Ciência do Solo) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2016.

SILVA, M. B.; ANJOS, L. H. C.; PEREIRA, M. G.; NASCIMENTO, R. A. M. Estudo de topossequência da baixada litorânea fluminense: efeitos do material de origem e posição topográfica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.4, p.965–976, 2001.

SILVERO, N. E. Q.; SIQUEIRA, D. S.; COELHO, R. M.; COSTA FERREIRA, D.; MARQUES JÚNIOR, J. Protocol for the use of legacy data and magnetic signature on soil mapping of Sao Paulo Central West, Brazil. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v.693, 133463, 2019. doi:10.1016/j.scitotenv.2019.07.269

SIQUEIRA, D. S. **Mapeamento de atributos e planejamento amostral para Latossolos utilizando suscetibilidade magnética, cor e relação solo-paisagem**. 2013. 109f. Tese (Doutorado em Agronomia/Produção Vegetal) - Faculdade de

Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2013.

SIQUEIRA, D. S.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G. T.; TEIXEIRA, D. D. B.; VASCONCELOS, V.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; MARTINS, E. S. Detailed mapping unit design based on soil– landscape relation and spatial variability of magnetic susceptibility and soil color. **Catena**, Cremlingen, v.135, p.149–162, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2015.07.010>.

SKURICHINA, M.; DUIN, R. P. W. Bagging, boosting and the random subspace method for linear classifiers. **Pattern Analysis and Applications**, v.5 (2), p.121–135, 2002.

SOUZA, E.; FERNANDES FILHO, E. I.; SCHAEFER, C. E. G. R.; BATJES, N. H.; SANTOS, G. R.; PONTES, L. M. Pedotransfer functions to estimate bulk density from soil properties and environmental covariates: Rio Doce basin. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.73, p.525-534, 2016.

SPOSITO, G. **The chemistry of soils**. New York: Oxford University Press. 2008. 321p.

STEFFEN, W.; RICHARDSON, K.; ROCKSTROM, J.; CORNELL, S. E.; FETZER, I., BENNETT, E. M.; ... SORLIN, S. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. **Science**, v.347(6223), p.1259855–1259855, 2015. doi:10.1126/science.1259855

SYERS, J. K.; JOHNSTON, A. E.; CURTIN, D. Efficiency of soil and fertilizer phosphorus use. **FAO Fertilizer and Plant Nutrition Bulletin** 18. Rome, Italy, 2008.

TAN, K.; WANG, H.; CHEN, L.; DU, Q.; DU, P.; PAN, C. Estimation the spatial distribution of heavy metal in agricultural soils using airborne hyperspectral imaging and random forest. **Journal of Hazardous Materials**. v.382, 120987, 2020. doi:10.1016/j.jhazmat.2019.120987

TEIXEIRA, D. D. B.; MARQUES JR., J.; SIQUEIRA, D. S.; VASCONCELOS, V.; CARVALHO, O. A.; MARTINS, É. S.; PEREIRA, G. T. Mapping units based on spatial uncertainty of magnetic susceptibility and clay content. **Catena**, Cremlingen, v.164, p.79–87, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.12.038>.

TORRENT, J.; LIU, Q. S.; BARRON, V. Magnetic susceptibility changes in relation to pedogenesis in a Xeralf chronosequence in northwestern Spain. **European Journal**

of Soil Science, Oxford, v.61, p.161-73, 2010. doi:10.1111/j.1365-2389.2009.01216.x

TORRENT, J.; SCHWERTMANN, U.; BARRÓN, V. Phosphate sorption by natural hematites. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.45, p.45- 51, 1994.

TORRENT, J.; BARRÓN, V. Laboratory measurements of soil color: theory and practice. In: BIGHAM, J. M.; CIOLKOSZ, E. J. (Ed) Soil Color. **Soil Science Society of America, Special Publication**, 1993. p.21-33.

TORRENT, J.; BARRÓN, V.; SCHWERTMANN, U. Phosphate adsorption and desorption by goethites differing in crystal morphology. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.54, p.1.007-1.012, 1990.

U.S. GEOLOGICAL SURVEY, 2016, **Mineral commodity summaries 2016**: U.S. Geological Survey, 202p., <http://dx.doi.org/10.3133/70140094>.

VACCARI, D. A.; STRIGUL, N. Extrapolating phosphorus production to estimate resource reserves. **Chemosphere**, v.84(6), p.792–797, 2011. doi: 10.1016/j.chemosphere.2011.01.052

VALLADARES, G. S.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C. Adsorção de fósforo em solos de argila de atividade baixa. **Bragantia**, Campinas, v.62, p.111-118, 2003.

VANCE, C. P. Symbiotic Nitrogen Fixation and Phosphorus Acquisition. Plant Nutrition in a World of Declining Renewable Resources. **Plant Physiology**, v.127, p.390–397, 2001.

VASCONCELOS, V.; CARVALHO JÚNIOR, A. O.; MARTINS, E. S.; COUTO JÚNIOR, A. F.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T. Sistema de classificação geomorfométrica baseada em uma arquitetura sequencial em duas etapas: árvore de decisão e classificador espectral, no Parque Nacional da Serra da Canastra. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Brasília, v.13, p.171-186, 2012.

VAYSSE, K.; LAGACHERIE, P. Evaluating digital soil mapping approaches for mapping Global Soil Map soil properties from legacy data in Languedoc-Roussillon (France). **Geoderma Regional**, Amsterdam, v.4, p.20–30, 2015.

VEROSUB, K. L.; ROBERTS, A. P. Environmental magnetism: past, present and future. **Journal of Geophysical Research**, Hoboken, v.100, n.b2, p.2175–2192, 1995.

VISCARRA ROSSEL, R. A.; BEHRENS, T. Using data mining to model and interpret soil diffuse reflectance spectra. **Geoderma**, Amsterdam, v.158(1–2), p.46-54, 2010.

VISCARRA ROSSEL, R. A.; BUI, E. N.; CARITAT, P.; MCKENZIE, N. J. Mapping iron oxides and the color of Australian soil using visible–near-infrared reflectance spectra. **Journal of Geophysical Research**, v.115, n.F04031, p.1–13, 2010.

VISCARRA ROSSEL, R. A.; CATTLE, S. R.; ORTEGA, A.; FOUAD, Y. In situ measurements of soil colour, mineral composition and clay content by Vis–NIR spectroscopy. **Geoderma**, Amsterdam, v.150, p.253-266, 2009a.

VISCARRA ROSSEL, R. A. The Soil Spectroscopy Group and the development of a global soil spectral library. **NIR News**. 20 (4), p.14-15, 2009b.

VISCARRA ROSSEL, R. A. **Parles**: software for chemometric analysis of spectroscopic data. *Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems* v.90, p.72-83, 2008.

VISCARRA ROSSEL, R. A.; McBRATNEY, A. B. Soil chemical analytical accuracy and costs: implications from precision agriculture. **Australian Journal of Experimental Agriculture**. v.38, p.765-775, 1998.

WAN, S.; KIM, J.; WON, K. J. SHARP: hyper-fast and accurate processing of single-cell RNA-seq data via ensemble random projection. **Genome Research**, gr.254557.119, 2020. doi:10.1101/gr.254557.119

WANG, L.; WU, J. P.; LIU, Y. X.; HUANG, H. Q.; FANG, Q. F. Spatial variability of micronutrients in rice grain and Paddy Soil. **Pedosphere**, Nanjing, v.19, p.748-755, 2009.

WEIHRAUCH, C.; OPP, C. Ecologically relevant phosphorus pools in soils and their dynamics: the story so far. **Geoderma**, Amsterdam, v.325, p.183–194, 2018.

WILLIAMS, J.; COVENTRY, R. J. The contrasting hydrology of red and yellow earths in a landscape of low relief. In: SYMPOSIUM INTERNATIONAL HYDROLOGY OF

AREAS OF LOW PRECIPITATION, 128. 1979, Canberra. **Proceedings...** Canberra: International Association of Hydrological Science, 1979. p.385-395.

WILSON, H. F.; SATCHITHANANTHAM, S.; MOULIN, A. P.; GLENN, A. J. Soil phosphorus spatial variability due to landform, tillage, and input management: A case study of small watersheds in southwestern Manitoba. **Geoderma**, Amsterdam, v.280, p.14–21, 2016. doi:10.1016/j.geoderma.2016.06.009

WITHERS, P. J. A.; RODRIGUES, M.; SOLTANGHEISI, A.; DE CARVALHO, T. S.; GUIL-HERME, L. R. G., et al. Transitions to sustainable management of phosphorus in Brazilian agriculture. **Scientific Reports**, v.8, 2537, 2018.

XU, L. H.; XIE, D. L. Prediction of total nitrogen and total phosphorus concentrations using hyperspectral remote se... **Journal Agricultural Mechanical Research**. (4), p.119-122, 2012

YU, G. Q.; ZHANG, M. S.; LI, Z. B.; LI, P.; ZHANG, X.; CHENG, S. D. 2014. Piecewise prediction model for watershed-scale erosion and sediment yield of individual rainfall events on the Loess Plateau, China. **Hydrological Processes**, v.28, p.5322–5336, 2014.

ZHANG, J. J.; TIAN, Y. C.; YAO, X.; CAO, W. X.; MA, X. M.; ZHU, Y. Estimating soil total nitrogen content based on hyperspectral analysis technology. **Journal of Natural Resources**. v.26, (5), p.881-890, 2011.

ZHANG, T. T. Partial Least Squares Modeling of Hyperspectral Remote Sensing for Mapping Agriculture Soil P...School of Earth Sciences, Jilin University, Jilin (2010).

ZERAATPISHEH, M.; AYOUBI, S.; JAFARI, A.; TAJIK, S.; FINKE, P. Digital mapping of soil properties using multiple machine learning in a semi-arid region, central Iran. **Geoderma**, Amsterdam, 2018. doi:10.1016/j.geoderma.2018.09.006

CAPÍTULO 2 – Variabilidade espacial do fósforo do solo por espectroscopia no VIS-NIR em diferentes litologias e dissecação de paisagem

Resumo – Mapas precisos do teor de fósforo (P) do solo, em grandes áreas, são altamente dispendiosos por métodos laboratoriais convencionais. A Espectroscopia de Reflectância Difusa (ERD) no visível e infravermelho próximo (VIS – NIR) pode auxiliar os métodos convencionais de determinação de P do solo. Por ser um método rápido, menos oneroso, não destrutivo e sustentável, a ERD possibilita aumentar a densidade amostral e reduzir as análises laboratoriais convencionais necessárias, permitindo elaborar mapas detalhados. Por esses motivos, avaliou-se a eficiência da espectroscopia VIS-NIR no mapeamento de P_{total} , P_{ads} e $P_{disponível}$ em solos de diferentes litologias e dissecação da paisagem no Planalto Ocidental Paulista (POP), São Paulo, Brasil. Foram coletadas 200 amostras de solo de arenito e basalto na profundidade de 0,0 – 0,2 m, em três estágios de dissecação da paisagem no POP. O P_{total} , P_{ads} e o $P_{disponível}$ foram obtidos por método químico convencional e estimados por ERD com calibração quimiométrica por análise de regressão de mínimos quadrados parciais (PLSR). Os resultados foram submetidos a análise estatística descritiva, multivariada e geoestatística. A distribuição espacial do fósforo é influenciada pela geologia e pelo grau de dissecação da paisagem, sendo os óxidos de ferro (goethita e hematita) os mais importantes indicadores de ambientes com maiores e menores potenciais de adsorção e teores de fósforo. A caracterização das curvas espectrais permite diferenciar o conteúdo de fósforo do solo com base nos óxidos de ferro. A análise por regressão de PLSR dos dados espectrais na região do visível e infravermelho próximo (VIS-NIR) possibilita a predição de P_{total} e P_{ads} do solo, sendo semelhante ao obtido por método convencional. A variabilidade espacial do P no solo estimada por ERD (VIS-NIR) valida o uso da técnica no mapeamento de atributos do solo em grandes áreas. Ela pode ser utilizada como base para desenvolver um inventário de dados de P do solo, bem como monitorar possíveis consequências do uso e manejo do solo.

Palavras-chave: espectroscopia de reflectância difusa, P total, adsorção de P, PLSR, mapeamento.

2.1 Introdução

Os fatores ambientais intrínsecos ao solo (material de parental, topografia do relevo, tipo de solo) e extrínsecos (uso e manejo do solo) coordenam a variabilidade do fósforo (P) nos solos em diferentes escalas e regiões (LI et al., 2016; GAO et al., 2019). A diversidade do material parental aliada à paisagem (WANG et al., 2001; BALKCOM et al., 2005) por vezes é o fator determinante da variabilidade espacial de P. A dissecação da paisagem, compreendida como um balanço morfogênese/pedogênese (SILVA et al., 2020), pode contribuir para variabilidade de P, visto que os minerais oxihidróxidos [goethita (Gt), hematita (Hm), maghemita (Mh), gibbsita (Gb)] responsáveis pela variabilidade do P, têm seu padrão espacial coordenados pela diversidade litológica e da dissecação da paisagem (COVENTRY; WILLIAMS, 1984; CAMARGO et al., 2012; 2016; SILVA et al., 2020).

O material de origem do solo determina a quantidade inicial de P, que é liberado pelo intemperismo e depois retido em solos por atuação de vários processos químicos e biológicos ou perdidos por lixiviação e erosão (YAN et al., 2013). Portanto, reconhecer a variabilidade espacial do P torna-se substancial na otimização e planejamento de aplicação de doses variáveis, reduzindo custo e impactos ambientais (CAMARGO et al., 2016). Com o domínio da geoestatística o gerenciamento das aplicações de fertilizantes fosfatados foi possível reconhecer zonas mínimas de manejo de P (PELUCO et al., 2015; CAMARGO et al., 2018). Todavia, a necessidade de um grande número de amostras para as determinações laboratoriais convencionais dificulta o mapeamento em grandes áreas, considerando a complexidade de solo, litologia e da paisagem. Assim, métodos ecológicos, menos onerosos e dispendiosos para a caracterização espacial de atributos, são primordiais para o diagnóstico rápido e preciso de grandes áreas em nível detalhado.

Uma alternativa é a espectroscopia de reflectância difusa (ERD), que como base na cor, permite a caracterização simultânea de muitos atributos do solo (MOUAZEN et al., 2010; KODAIRA; SHIBUSAWA, 2013; CAMARGO et al., 2015). As respostas espectrais na faixa do VIS – NIR de uma dada amostra do solo é um pedoindicador segura da presença de óxidos de Fe, matéria orgânica e outros atributos do solo (VISCARRA ROSSEL et al., 2010). Trata-se de uma ferramenta que possui inúmeros ganhos se comparado aos métodos tradicionais laboratoriais (MOUAZEN et al., 2010) por ser uma técnica não dispendiosa, não destrutiva, de

fácil execução, podendo ser bastante assertiva na determinação de alguns atributos devido ao desenvolvimento de modelos de calibração nas propriedades do solo.

A ERD tem sido utilizada nos estudos voltados a mapear atributos dos solos por superar as restrições de tempo e orçamento, associadas a densidades de amostragem adequadas para mapeamento de solo (RAMIREZ-LOPEZ et al., 2018). Se considerar que a agricultura brasileira paga um preço caro por não conhecer melhor o solo, é de senso comum na comunidade científica (CAMARGO et al., 2015; SILVA et al., 2020) que a ERD viabiliza o mapeamento em escala detalhada. Determinando um grande volume de amostras por dia, reduzindo assim o tempo de análise, se comparado aos métodos tradicionais de quantificação de atributos do solo. É primordial que se faça avaliação comparativa com os procedimentos convencionais, a fim de conhecer quaisquer limitações da técnica (SILVA et al., 2020).

Por esses motivos, avaliou-se a eficiência da espectroscopia do VIS-NIR no mapeamento de P_{total} , P_{ads} e $P_{disponível}$ em solos de diferentes litologias e dissecação da paisagem no Planalto Ocidental Paulista (POP), São Paulo, Brasil.

2.2 Material e métodos

2.2.1 Caracterização da área de estudo

O estudo foi realizado na área do POP, de aproximadamente 13 milhões de hectares, que ocupa 48% da área total do estado de São Paulo (Figura 1b). Com aproximadamente 2 milhões de hectares ocupados pelo basalto da formação da Serra Geral (15,5%), sendo 7,4 milhões de hectares pelo arenito da formação do Vale do Rio do Peixe (57,1%) e 3,6 milhões de hectares por outras formações sedimentares (27,5%) (FERNANDES et al., 2007). O clima predominante na região norte e noroeste é do tipo tropical com estação seca de inverno (Aw) e verão quente (Cwa) (ALVARES et al., 2013). As principais classes de solo são os Latossolos (Oxisols) e Argissolos (Ultisols) (SANTOS et al., 2018; SOIL SURVEY STAFF, 2010).

O mapa de intensidade de formas do terreno foi elaborado segundo o método proposto por Vasconcelos et al. (2012), baseado em assinatura geomorfométrica composta por curvaturas longitudinal, cross-sectional, mínima e máxima (WOOD, 1996). Tal método permite classificar mudanças sutis nas formas de terreno, diminuindo a subjetividade da identificação de compartimentos pelos modelos

conceituais de paisagem (TROEH, 1965; DALRYMPLE et al., 1968; DANIELS et al., 1971). O relevo caracteriza-se por ser levemente ondulado com predomínio de colinas amplas e baixas com topos aplanados e altitude de 357 a 610 m (IPT, 1981). De acordo com Silva et al. (2020), no POP tem reconhecidos três estágios de dissecação da paisagem: *pouco dissecado (Pd)*, *moderadamente dissecado (Md)* e *altamente dissecado (Ad)* (Figura 1d).

As unidades de dissecação compreendem a taxa de formação do solo (pedogênese) e a esculturação das feições da paisagem (geomorfogênese). Nas unidades Pd as paisagens são mais estáveis, relevo suave ondulado e plano, formas de terreno lineares, convexas e lineares-convexas, ocorrendo no topo da paisagem, com altitude de 450 a 610 m, e os solos são mais desenvolvidos e com boa drenagem interna, correspondendo a uma área de 2.036.500 ha. Md são encontradas nas altitudes de 431 a 529 m, com solos em processo de evolução e paisagem dominante com extensão de 9.220.900 ha. Ad são áreas deprimidas localizadas nas nascentes da escassa rede de drenagem e com ocorrência de solos menos intemperizados. Com altitude variando de 250 a 550 m, relevo íngreme, vales entalhados em “V” (encostas côncava-convexas), às vezes com presença de várzeas estreitas, lençol freático próximo à superfície, representando uma área de 2.162.900 ha.

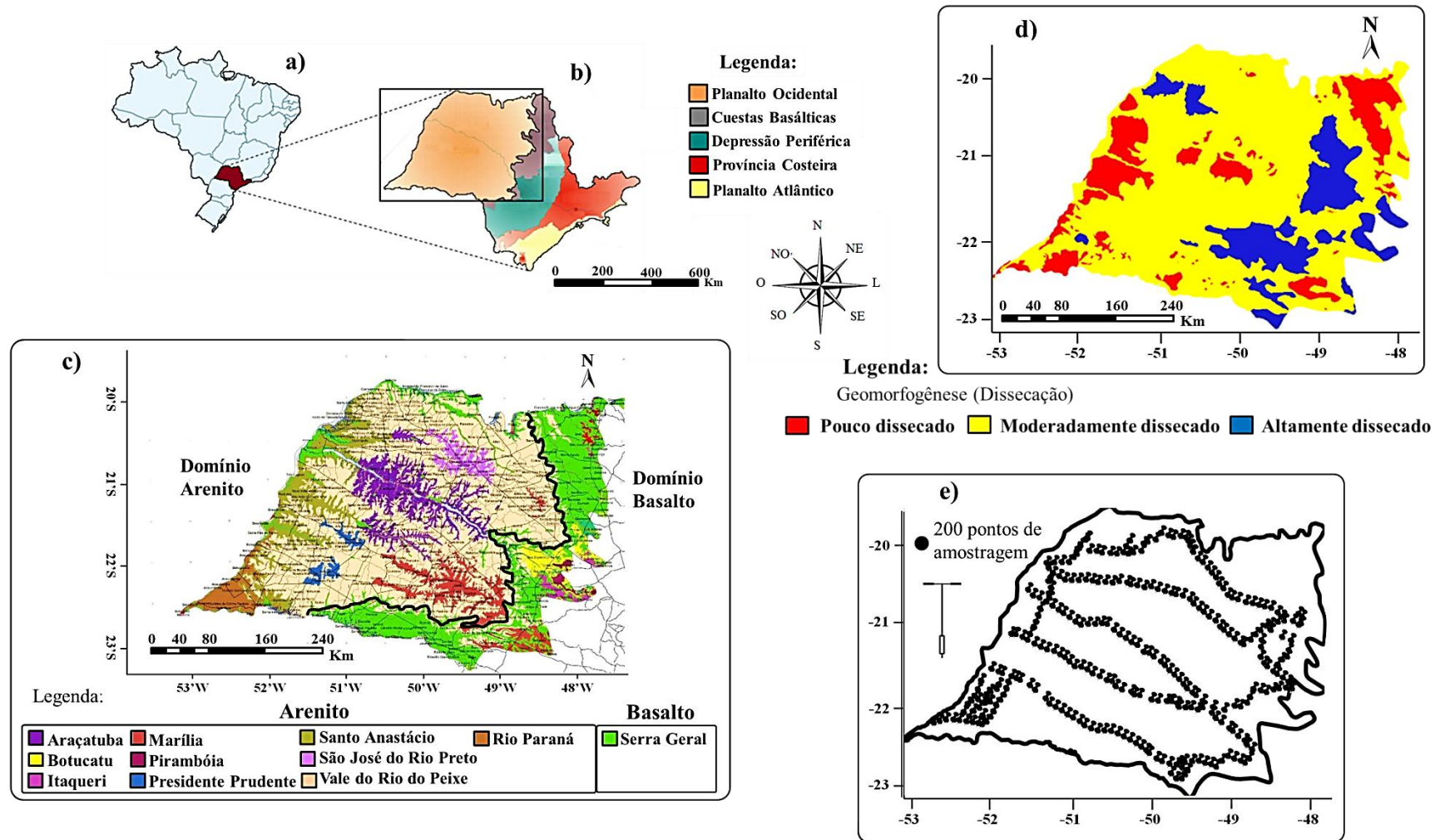


Figura 1. **a)** Mapa do Brasil, **b)** mapa do estado de São Paulo, **c)** mapa geológico atualizado do Planalto Ocidental Paulista (escala 1:200.000, adaptado de Fernandes e Coimbra (2000), **d)** unidades de dissecção da paisagem proposto a partir do mapa da intensidade de formas do terreno pela assinatura geomorfométrica (adaptado de VASCONCELOS et al., 2012), **e)** mapa de pontos amostrais.

2.2.2 Amostragem de solo

Com base no arquivo de rodovias do Estado, fornecido pelo Departamento de Estradas e Rodagem, foi elaborado o plano de amostragem utilizando a ferramenta ET GeoWizards no ArcView 9.3. Um total de 200 amostras foram coletadas na profundidade 0.0 – 0.20 m (Figura 1e), ao longo das rodovias do Estado em locais representativos com mínima interferência antrópica e espaçamento mínimo entre as amostras de 10 km e máximo de 60 km. A amostragem foi fundamentada nas informações geológicas (Figura 1c), unidades de dissecação da paisagem (Figura 1d) e na experiência adquirida em estudos anteriores realizados no POP utilizando a técnica geoestatística (MARQUES JÚNIOR et al., 2015; TEIXEIRA et al., 2018).

2.2.3. Análises química e granulométrica do solo

A caracterização química e granulométrica (GEE; OR, 2002) do solo estudado é apresentada na tabela 1. O solo foi submetido à dissolução sulfúrica (TEIXEIRA et al., 2017). O extrato resultante foi usado para determinar o conteúdo de SiO_2 , Al_2O_3 e Fe_2O_3 , e em seguida calculou-se os índices Ki e Kr (TEIXEIRA et al., 2017). Os óxidos de ferro pedogênicos referentes à forma cristalina (Fed) foram extraídos com solução de ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB – MEHRA; JACKSON, 1960) e as de baixa cristalinidade (Feo) extraídas com oxalato de amônio (SCHWERTMANN, 1964), sendo determinados por absorvância no espectrofotômetro a 518 nm. O pH foi determinado potenciometricamente utilizando-se relação solo: solução (CaCl_2) de 1:2,5 (TEIXEIRA et al., 2017). O teor de matéria orgânica obtido de acordo com o método de Teixeira et al. (2017). A soma de bases (SB) e a capacidade de troca de cátions do solo (CTC) foram calculadas a partir da soma de bases e $\text{H}+\text{Al}$.

Tabela 1. Estatística descritiva dos atributos químicos e granulométricos dos pontos selecionados nos solos do Planalto Ocidental Paulista, profundidade 0,00 - 0,20 m.

	Al ₂ O ₃	SiO ₂	TiO ₂	Fe ₂ O ₃	<i>Ki</i>	<i>Kr</i>	Areia	Silte	Argila	pH	MO	SB	CTC
	g kg ⁻¹						g kg ⁻¹			CaCl ₂	g kg ⁻¹	mmol _c dm ⁻³	
Basalto (Serra Geral - SG)													
(N = 79)													
Média	242	208	52	218	1,8	1,2	468	175	357	5,0	28	58	92
Mediana	260	199	51	189	1,3	0,9	449	150	395	4,9	29	53	88
Mínimo	94	102	35	74	0,5	0,3	57	32	42	3,8	10	12	27
Máximo	368	338	82	420	6,1	4	856	491	677	6,9	58	164	186
CV (%)	29	31	21	50	70,3	74,7	51	61	47	13,9	38	59	38
Arenito (Vale do Rio do Peixe – VRP)													
(N = 121)													
Média	136	303	39	91	4,2	2,9	748	124	129	4,9	16	45	67
Mediana	123	312	39	81	4,4	3,1	776	105	114	4,9	14	35	58
Mínimo	90	147	35	62	0,8	0,5	103	20	49	3,6	6	7	23
Máximo	306	347	53	328	6,4	4,3	920	744	562	7,4	44	349	358
CV (%)	32	12	10	50	32	29	18	78	59	13,8	44	100	64

N = pontos amostrais, CV = coeficiente de variação. Teores de óxidos totais no extrato sulfúrico (Al₂O₃, Fe₂O₃, TiO₂ e SiO₂), Ki = relações moleculares sílica/alumínio (Ki = SiO₂/Al₂O₃×1,75), Kr = relações moleculares sílica/óxidos de ferro e alumínio (Kr = SiO₂/Al₂O₃ + Fe₂O₃); MO = matéria orgânica; SB = soma de bases; CTC = capacidade de troca catiônica.

2.2.4. Análises mineralógicas

Os óxidos de hematita (Hm), goethita (Gt) foram obtidos por difratometria de raios X pelo método do pó, após a concentração dos óxidos de ferro com NaOH (NORRISH; TAYLOR, 1961) e caulinita (Ct) e gibbsita (Gb) na argila desferrificação (MEHRA; JACKSON, 1960). As amostras foram difratadas com velocidade de varredura de $1^\circ 2\theta \text{ min}^{-1}$ utilizando Mini-Flex Rigaku II (20mA, 30 kV), equipado com radiação Cu K α . A razão Hm/(Gt+Hm) foi estimada comparando as áreas dos picos obtidos dos dois óxidos com suas proporções nos padrões mistos Gt-Hm. As porcentagens de Hm e Gt foram calculadas por alocação da diferença entre Fed e Feo a estes óxidos. As porcentagens de Ct e Gb foram obtidas a partir da razão Ct/(Ct+Gb) das áreas dos picos dos reflexos Gb (002) e Ct (001).

2.2.5. Espectroscopia de reflectância difusa (ERD) e regressão de mínimo quadrado parcial (PLSR)

Para a obtenção dos espectros de reflectância difusa, foram utilizadas 6 amostras representantes dos compartimentos geomorfológicos. Estas foram maceradas, aproximadamente 1 g de solo (TFSA – terra fina seca ao ar) em almofariz de ágata até obtenção de coloração constante, sendo o conteúdo resultante colocado em porta-amostras com espaço cilíndrico de 16 mm de diâmetro. Os valores de reflectância foram determinados em espectrofotômetro Lambda 950 UV/Vis/NIR acoplado com uma esfera integradora de 150 mm de diâmetro. Os espectros foram registrados em intervalos de 0,5 nm, com tempo de integração de $2,43 \text{ nm s}^{-1}$ ao longo do intervalo de 250 a 2500 nm que compreende a faixa do visível e o infravermelho próximo (VIS-NIR). Halon (PTFE) em pó foi utilizado como padrão branco. Para a identificação da Gt, foram utilizados os intervalos mínimos de 415-425 nm e máximos de 440-450 nm, e para a Hm, intervalos mínimos de 530-545 nm e máximos de 575-590 nm. A partir da segunda derivada da função Kubelka-Munk (KUBELKA; MUNK, 1931) foram calculados os teores de Gt nos intervalos mínimos de 415-425 nm e máximos de 440-450 nm, e Hm nos intervalos mínimos de 530-545 nm e máximos de 575-590 nm.

A faixa espectral relacionada com o P total e adsorvido foi obtida pela calibração quimiométrica regressão de mínimos quadrados parciais (PLSR) (GELADI; KOWASKI,

1986) utilizando o procedimento de cross-validação ("leave-one-out"). O pré-tratamento empregado para os espectros Vis-NIR foi o SNV (standard normal variate) (BARNES et al., 1989) e a centralização da média. A análise PLSR foi realizada no software ParleS® (VISCARRA ROSSEL, 2008). A acurácia da calibração foi avaliada pelo coeficiente de determinação (R^2), desvio padrão do erro de distribuição da validação cruzada (SDE), desvio residual da predição (RPD), e raiz quadrada do erro médio da validação (RMSE). Valores de RPD > 2 indica que possui boas previsões, RPD entre 1,4 - 2 indica previsões confiáveis e RPD < 1,4 indica que possui previsões pouco confiáveis (CHANG et al., 2001).

Quando se utiliza a regressão PLSR, a importância de uma determinada variável na predição de outra é dada pelo índice de importância das variáveis (VIP – Importância da variável na projeção) (YAN et al., 2013). Assim sendo, as variáveis identificadas como sendo as mais relevantes para explicar a quantificação do P serão as correspondentes com os picos de maior intensidade no gráfico de VIP.

2.2.6. Fósforo: total, adsorvido e disponível.

Para determinação do P_{total}, pesou-se em papel manteiga 0,5 g de solo (100 mesh) com precisão, para transferência no tubo de micro-ondas de 250 mL. Feito isso se adicionou 1 mL de peróxido de hidrogênio (30%) e esperou-se 30 minutos, posteriormente foi adicionado 5 mL de água ultrapura, 9 mL de HNO₃ e 3 mL de ácido fluorídrico (HF). A digestão do material em microondas (Mars Xpress, CEM Corporation) foi realizada segundo o método EPA 3052, por 15 minutos a 150 °C, após o material resfriar foi neutralizado o HF remanescente com 5 mL de H₃BO₃ (3%), sendo posteriormente filtrado e transferido para o balão de 100 mL, completando o volume com água ultrapura. Foi feita a leitura do extrato utilizando um espectrofotômetro de emissão atômica com plasma de argônio acoplado (ICP-AES) Thermo Scientific iCAP 6000 Series Emission Spectrometers.

O P adsorvido (P_{ads}) foi determinado de acordo com Fassbender e Igue (1967), em que 2 g de solo seco ao ar foram agitados a 25 °C com 20 mL de 0,01 M de CaCl₂ contendo KH₂PO₄ a uma concentração de 100 mg de P L⁻¹. Depois de 16 h, a suspensão foi centrifugada e o sobrenadante foi coletado para a determinação da

concentração de fósforo em equilíbrio por meio de espectrofotômetro. O fósforo disponível do solo foi extraído pelo método da resina trocadora de íons e determinado por colorimetria (RAIJ et al., 2001).

2.2.7. *Análise estatística*

Os dados foram previamente analisados por meio de cálculo da média, mínimo, mediana, máximo e coeficiente de variação (CV). Foi realizada uma matriz de correlação dos atributos do solo com o Ptotal, Pads e Pdisponível.

2.2.8. *Estatística multivariada*

Inicialmente foi realizada a padronização dos atributos com média nula e variância unitária como auxílio do programa Statistica 7.0. Em seguida foi feita a análise de componentes principais (CP) para discriminar as amostras de solo com propriedades específicas em planos bidimensionais construídos por CPs gerados dos autovalores da matriz de covariância obtida das variáveis originais (HAIR et al., 2005). Foram considerados apenas os autovalores superiores à unidade, de acordo com critério proposto por Kaiser (1958).

2.2.9. *Análise geoestatística*

A variabilidade espacial do fósforo foi estimada por meio da análise geoestatística, sendo o variograma experimental estimado segundo a equação 1:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \dots\dots\dots(1)$$

sendo: $\gamma(h)$ - valor da semivariância para uma distância h ; $N(h)$ - número de pares envolvidos no cálculo da semivariância; $Z(x_i)$ - valor do atributo Z na posição x_i ; $Z(x_i+h)$ - valor do atributo Z separado por uma distância h da posição x_i .

Os modelos matemáticos foram ajustados aos variogramas com base no número de pares envolvidos na estimativa da semivariância, na soma do quadrado dos resíduos (SQR), na presença do patamar (BURROUGH; McDONNEL, 2000) e no coeficiente de determinação (R^2). O grau de dependência espacial (GDE) obtido a partir da razão do efeito pepita (C_0) e o patamar do variograma (C_0+C_1). A estimativa dos valores dos

pontos não amostrados foi obtida por meio da krigagem ordinária, para produzir mapas de padrões espaciais utilizando o programa Surfer (Surfer for Windows 1999).

2.3. Resultados e Discussão

A estatística descritiva mostrou a variação dos atributos do solo, refletindo à composição distinta dos materiais de origem dos solos, basalto - Serra Geral (SG) e arenito - Vale do Rio do Peixe (VRP), bem como das unidades de dissecação da paisagem (Tabela 2), com médias significativamente diferentes ($p < 0,05$).

Tabela 2. Médias dos atributos de solos em unidades pouco (Pd), moderada (Md) e altamente dissecada (Ad) das unidades de formação Serra Geral (SG) e Vale do Rio Peixe (VRP).

	Fed	Feo	Hm	Gt	P _{total}	P _{ads}	P _{disponível}
	g kg ⁻¹				mg kg ⁻¹		
<i>Basalto (Serra Geral - SG)</i>							
SG_Ad	61,0b	1,3b	58,0c	34,1b	928b	680b	8,5b
SG_Md	74,4b	2,1a	65,5b	43,0a	1253a	775a	19a
SG_Pd	90,9a	2,0a	70,9a	49,9a	1329a	827a	20a
Média SG	75,4	1,8	64,8	42,3	1170	760	16
Mín - Máx	20 - 156	0,2 – 5,7	11 - 188	8 - 151	305 - 1850	326 - 997	3 – 62
CV (%)	34	64	52	57	34	27	73
<i>Arenito (Vale do Rio do Peixe - VRP)</i>							
VRP_Ad	21,6b	0,5b	15,8b	6,2b	197b	164b	8,1a
VRP_Md	26,5a	0,7a	21,9a	22,5a	421a	317a	10a
VRP_Pd	27,6a	0,56b	13,8b	19,1a	451a	370a	12a
Média VRP	25,2	0,58	17,8	15,9	356	283	10
Mín - Máx	8 - 103	0,02 – 2,7	2 - 88	3 - 93	152 - 1200	124 - 670	1 – 48
CV (%)	42	65	76	64	53	30	81

As médias seguidas pela mesma letra minúscula, não foram significativamente diferentes a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey. Mín = mínimo; Máx = máximo, CV = coeficiente de variação; Fe_d = ferro extraído por ditionito-citrato-bicarbonato, Fe_o = ferro extraído por oxalato ácido de amônio, Gt = goethita, Hm = hematita, P_{ads} = P adsorvido.

A amplitude dos teores de Fed (8 – 156 g kg⁻¹), Feo (0,02 – 5,7 g kg⁻¹), Hm (2 – 188 g kg⁻¹), Gt (3 – 151 g kg⁻¹) e fósforo [P_{total}, P_{ads} e P_{disponível} (197 – 1850; 124 – 997; 1 – 62 mg kg⁻¹) respectivamente] foram semelhantes aos de outros estudos desenvolvidos

na região (MONTANARI et al., 2010; CAMARGO et al., 2015). O conteúdo médio de Fed superior ao de Feo revelou a abundância dos óxidos-Fe na forma cristalina, uma condição típica de solos desenvolvidos e com boa drenagem vertical (SCHAEFER et al., 2008).

Os atributos do solo apresentaram CV (coeficiente de variação) alto ($CV > 24\%$) de acordo com Warrick e Nielsen (1980). Esses valores altos de CV são compreensíveis, por se tratar de uma área com 13 milhões de hectares, contudo a análise da variabilidade espacial por geoestatística pode ajudar na compreensão desta amplitude de variação.

Os materiais de origem dos solos e as unidades de dissecação da paisagem influenciaram os teores de P_{total} , P_{ads} e $P_{disponível}$ nos solos, com diferença significativa ($p < 0,05$) entre esses compartimentos (Tabela 2). O enriquecimento de P_{total} e de óxidos-Fe e Al nas unidades pouco dissecadas (Pd), acarretou os maiores teores de P_{ads} (370 e 827 $mg\ kg^{-1}$; arenito e basalto, respectivamente). Simpson et al. (2011) encontraram grande parcela de P extraída dos óxidos-Fe cristalino (Gt e Hm) e de alumínio (Gb).

O uso da estatística multivariada, no caso a análise de componentes principais (CP) apontou de maneira eficiente os ambientes mais distintos, no caso, as geologias SG e VRP e as dissecações Pd e altamente dissecadas (Ad) (Figura 2). A CP foi capaz de explicar 95,5% (sendo 79,5% na CP1 e 16% na CP2), da variância total dos dados. O compartimento Pd e moderadamente dissecado (Md) dentro do SG apresentou maior relação com o teor de argila, Gt, Hm, P_{total} , P_{ads} e o P_{disp} , em contrapartida o compartimento Pd e Md no VRP foi mais associado a areia. Estando de acordo com a ideia dos óxidos de ferro, que expressam a cor do solo e estão relacionados ao P, serem influenciados pelo tipo de material parental e dissecação da paisagem.

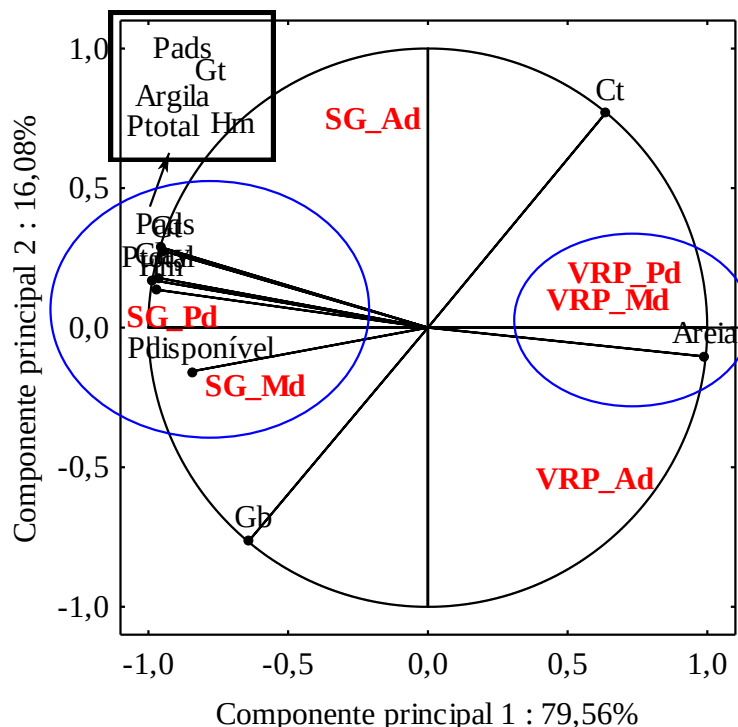


Figura 2. Análise de componentes principais (CP) dos atributos nas diferentes geologias e dissecções da paisagem.

A tabela 3 expressa a correlação linear inversa do Pads com os atributos $Ct/(Ct+Gb)$ ($r = -0,68$), SiO_2 ($r = -0,66$), areia ($r = -0,68$) e Gb ($r = -0,66$), assim como a correlação positiva com Hm e Gt ($r = 0,49$ e $0,39$ respectivamente), Ct ($r = 0,67$), $Ptotal$ e $Pdisp$ ($r = 0,50$ e $0,14$ respectivamente), relação $Hm/(Hm+Gt)$ ($r = 0,08$), MO ($r = 0,39$), Fed e Feo ($r = 0,57$ e $0,54$ respectivamente), argila ($r = 0,63$), Fe_2O_3 , Al_2O_3 e TiO_2 ($r = 0,68$; $0,64$ e $0,56$ respectivamente), sendo evidenciado a influência das características do material de origem e do solo nas interações com a dinâmica de adsorção de P.

Essas correlações dos atributos do solo com o Pads se repetem para o conteúdo de P total (Tabela 3) em relação à $Ct/(Ct+Gb)$ ($r = -0,80$), SiO_2 ($r = -0,81$), areia ($r = -0,78$), Gb ($r = -0,81$), de maneira inversa, mas também direta, com Hm e Gt ($r = 0,60$ e $0,56$), Ct ($r = 0,82$), $Pads$ e $Pdisp$ ($r = 0,49$ e $0,32$), relação $Hm/(Hm+Gt)$ ($r = 0,06$), MO ($r = 0,55$), Fed e Feo ($r = 0,75$ e $0,73$), argila ($r = 0,76$), Fe_2O_3 , Al_2O_3 e TiO_2 ($r = 0,79$; $0,82$ e $0,78$). As correlações diretas e inversas, entre os atributos físico-químicos e mineralógicos com o P do solo, demonstraram que o conteúdo total e o mecanismo de

adsorção de P têm grande relação com os tipos de minerais da fração argila e óxidos de ferro.

O P_{disp} apresentou comportamento semelhante as outras formas de P (Tabela 3), apesar da alta variação, as correlações com os atributos foram as seguintes: relação à Ct/(Ct+Gb) ($r = -0,25$), SiO₂ ($r = -0,26$), areia ($r = -0,25$), Gb ($r = -0,26$), de maneira inversa mas também direta, como: Hm e Gt ($r = 0,30$ e $0,10$), Ct ($r = 0,28$), P_{total} e P_{ads} ($r = 0,32$ e $0,14$), relação Hm/(Hm+Gt) ($r = 0,10$), MO ($r = 0,17$), Fed e Feo ($r = 0,25$ e $0,24$), argila ($r = 0,26$), Fe₂O₃, Al₂O₃ e TiO₂ ($r = 0,25$; $0,28$ e $0,25$). Sugerindo certa influência da quantidade e principalmente qualidade da fração argila no conteúdo de P da solução do solo.

Tabela 3. Coeficiente de correlação de Pearson entre P e atributos do solo.

	P _{adsorvido}	P _{total}	P _{disponível}
Fe ₂ O ₃	0,68	0,79	0,25
Al ₂ O ₃	0,64	0,82	0,28
SiO ₂	-0,66	-0,81	-0,26
TiO ₂	0,56	0,78	0,25
Matéria orgânica	0,39	0,55	0,17
Argila	0,63	0,76	0,26
Areia	-0,68	-0,78	-0,25
Fed	0,57	0,75	0,25
Feo	0,54	0,73	0,24
Hematita	0,49	0,60	0,30
Goethita	0,39	0,56	0,10
Caulinita	0,67	0,82	0,28
Gibbsita	-0,66	-0,81	-0,26
Hm/(Hm+Gt)	0,08	0,06	0,10
Ct/(Ct+Gb)	-0,68	-0,80	-0,25
P _{adsorvido}	1,00	0,49	0,14
P _{total}	0,50	1,00	0,32
P _{disponível}	0,14	0,32	1,00

Teor total de óxido de alumínio, ferro, silício e titânio no extrato sulfúrico (Al₂O₃, Fe₂O₃, SiO₂ e TiO₂), Hm = hematita, Gt = goethita, Ct = Caulinita, Gb = gibbsita, Feo = ferro oxalato e Fed = ferro ditionito.

Isto indica que uma grande parcela de P foi extraída dos óxidos de ferro cristalino de Gt e Hm (SIMPSON et al., 2011). Resultado concordante com Almeida et al. (2003), que encontraram a maior parcela do P associada a forma cristalina de óxidos de ferro (Fed), constituindo, em média, 72 %, das formas de P oclusas a Gt e Hm. Ainda, de acordo com Gálvez et al. (1999), uma das rotas de formação da Hm dá-se na presença de fosfato citrato, onde a ferrihidrita (Fh) é transformada a ferrihidrita ferrimagnética originando a Hm.

Na Figura 3 são apresentadas as curvas espectrais representativas dos solos por compartimentos litológicos e dissecação da paisagem. As distintas reflectâncias

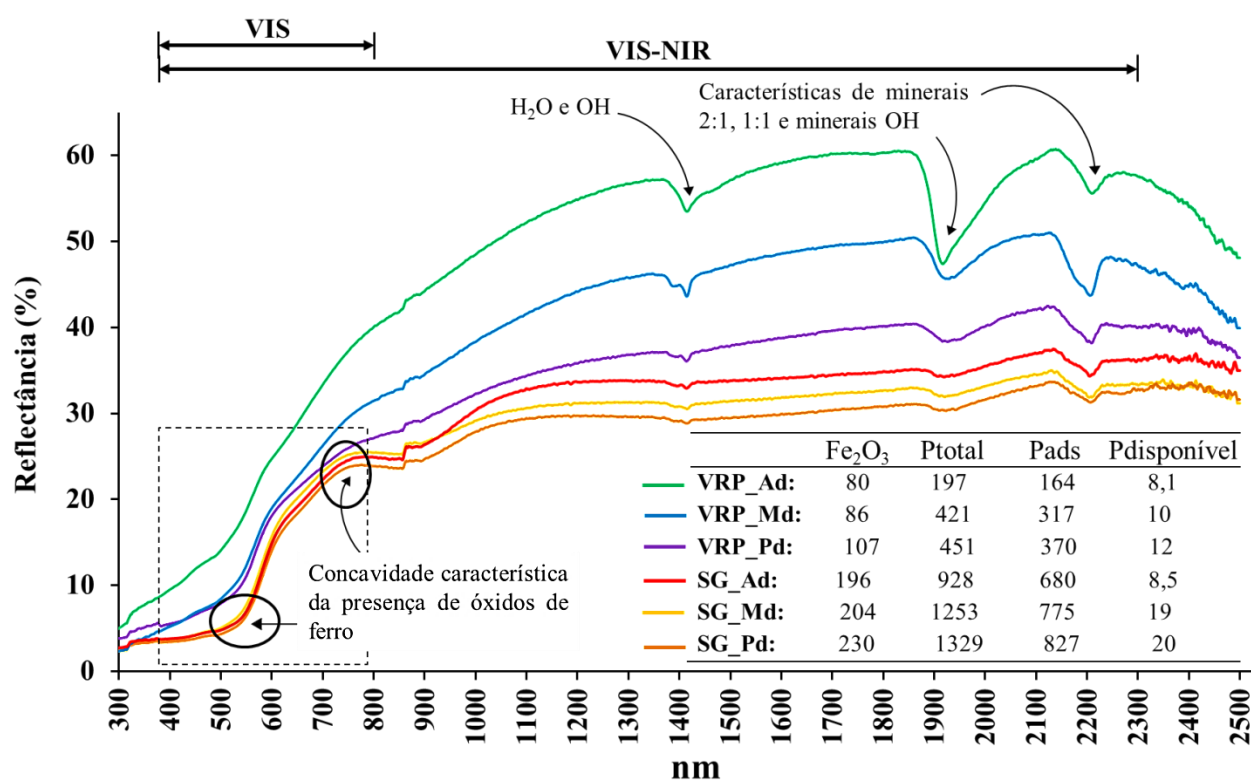


Figura 3. Espectros de reflectância difusa (ERD) representativos dos compartimentos geológicos: Formações Serra Geral (SG) e Vale do Rio do Peixe (VRP) do Planalto Ocidental Paulista. Grau de dissecação da paisagem: pouco dissecada (Pd), mediamente dissecada (Md) e altamente dissecada (Ad). Teores médios de óxidos de ferro totais (Fe₂O₃), fósforo: total, adsorvido e disponível.

assinalaram pedoambientes diferenciados, principalmente no controle dos arenitos VRP na região característica dos óxidos-Fe (450 – 900 nm) (VISCARRA ROSSEL et al., 2009; MARQUES JÚNIOR et al., 2014; SILVA et al., 2020), por curvas espectrais mais espaçadas e diferentes entre si.

De modo geral, a intensidade de reflectância aumentou com a redução do Fe_2O_3 , atributo dos solos fortemente dependente do material de origem (CARVALHO FILHO et al., 2015; POGGERE et al., 2018), o que permitiu separar os solos por material de origem e unidades de dissecação da paisagem (SILVA et al., 2020).

Os solos basálticos do SG são ambientes de reserva de P_{total} , quanto às unidades Pd caracterizam-se por mais adsorção de P (Tabela 2). Isto é atribuído ao expressivo teor de óxido-Fe, que coincidem com as baixas reflectâncias seguidas por curvaturas mais acentuadas no intervalo de 480–500 nm (Figura 3). Essa zona é típica dos óxidos de ferro: Gt e Hm (FONTES; CARVALHO, 2005; SILVA et al., 2020), que, por sua vez, foram marcantes nos solos do SG e nas unidades Pd. Portanto, a interpretação do comportamento espectral (VIS – NIR) do solo é possível obter informações sobre P_{total} e P_{ads} do solo nos distintos contextos solo-paisagem.

O P adsorvido apresentou melhores valores dos parâmetros da validação cruzada ($R^2 = 0,80$; RMSE = 13,9 e RPD = 2,1) que o P total ($R^2 = 0,72$; RMSE = 29,3 e RPD = 1,9) (Figura 4ac). Contudo as estimativas de P ads e P total apresentaram altos valores de R^2 e RPD e baixos valores de RMSE (indicando baixa superestimava). Esses parâmetros forneceram maior precisão para descrever o modelo calibrado no presente estudo do que aqueles calibrados na faixa VIS-NIR por Maleki et al. (2006), estimando P disponível em solos com diferentes teores de argila na Bélgica utilizando PLS. A qualidade da estimativa de P apresentada neste trabalho está de acordo com os estudos de Kodaira e Shibusawa (2013), nos quais poderia ser apresentado um $\text{RPD} > 2$ para calibração do modelo de predição.

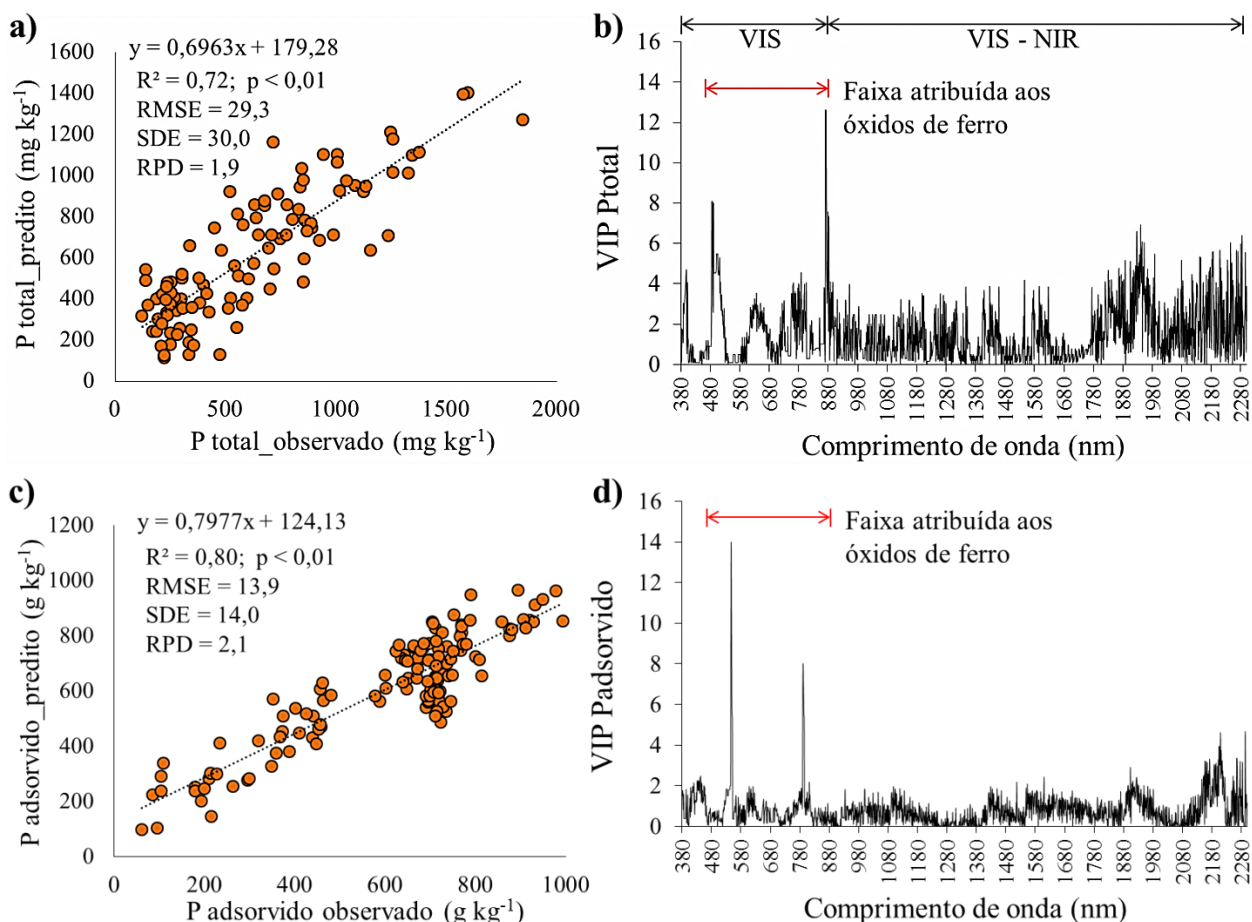


Figura 4. Gráficos de dispersão dos valores observados versus previstos com base na validação cruzada de regressão de mínimos quadrados parciais (PLSR) (a, c) e os gráficos de importância variável para projeção (VIP) dos atributos de destino (b, d) para o P total e P adsorvido (Pads) utilizando espectros no visível e infravermelho próximo (VIS-NIR). R^2 = coeficiente de determinação; RMSE = raiz do erro quadrático médio; SDE = desvio padrão da distribuição do erro; RPD = desvio residual da predição.

Na Figura 4bd, foram apresentadas as variáveis de importância para projeção (VIP) obtida por regressão de mínimos quadrados parciais (PLSR) (VISCARRA ROSSEL, 2008). A VIP indica as regiões espectrais mais relevantes com o P (GOMEZ et al., 2008; CAMARGO et al., 2015). O P total e Pads mostraram-se melhor associado aos comprimentos de onda 485 – 870 nm e 547 – 790 nm, sucessivamente, fato indicado pelos picos mais intensos e definidos da VIP na região do visível. Essas regiões espectrais são atribuídas aos óxidos-Fe cristalinos, principalmente Gt e Hm (BARRÓN; TORRENT, 1986; SILVA et al., 2020). Similar ao resultado aqui reportado foi

encontrado por Camargo et al. (2015) para o P adsorvido em Oxisols do Brasil, inclusive no domínio do POP.

A relação do P_{total} com a Hm apresentado na VIP (Figura 4b) pode ter sido proveniente da abundância de Hm nos solos do POP e existência de P ocluso durante a pedogênese. De acordo com Gálvez et al. (1999) uma possível rota da formação da Hm no solo, dá-se na presença de citrato/fósforo no solo. Muljadi et al. (1966) mencionaram a participação do fosfato nas cadeias inter-lamelares ou das estruturas de baixa cristalinidade dos óxidos. Os estudos de Gálvez et al. (1999) e Muljadi et al. (1966) justificam os notáveis picos da VIP associada a P_{total} e P_{ads} na região do VIS – NIR (Figura 4bd), devido a interação de fosfato com os grupos funcionais dos óxidos-Fe. A Gt é o principal óxido-Fe a adsorver P nos solos de ambas formações geológicas, interpretação tomada pela existência de picos mais intenso e definidos no intervalo de 480 – 580 nm (Figura 4d).

O modelo de semivariograma pode ser usado para indicar a proporção em que fatores extrínsecos induzem espacialmente a variabilidade (CAMBARDELLA et al., 1994; LIU et al., 2013; GAO et al., 2016). Avaliando os semivariogramas dos atributos do solo, todos apresentaram dependência espacial explicada pelo modelo esférico (Figura 5). Este modelo é recorrente nas investigações dos fenômenos do solo, principalmente quando se trata de mudanças abruptas no ambiente (VIEIRA, 2000; OLIVER; WEBSTER, 2014). O modelo esférico é bastante usual em trabalhos na região, como os de Siqueira et al. (2015) e Camargo et al. (2012; 2015) realizados em áreas piloto neste mesmo contexto solo relevo. Outros estudos desenvolvidos com intuito de captar e caracterizar a dependência espacial em grandes áreas, como na Austrália (VISCARRA ROSSEL et al., 2010; 2016), no Brasil (MARQUES JÚNIOR et al., 2014) e na Europa (HEUVELINK et al., 2016) também apresentam uso deste modelo de semivariância.

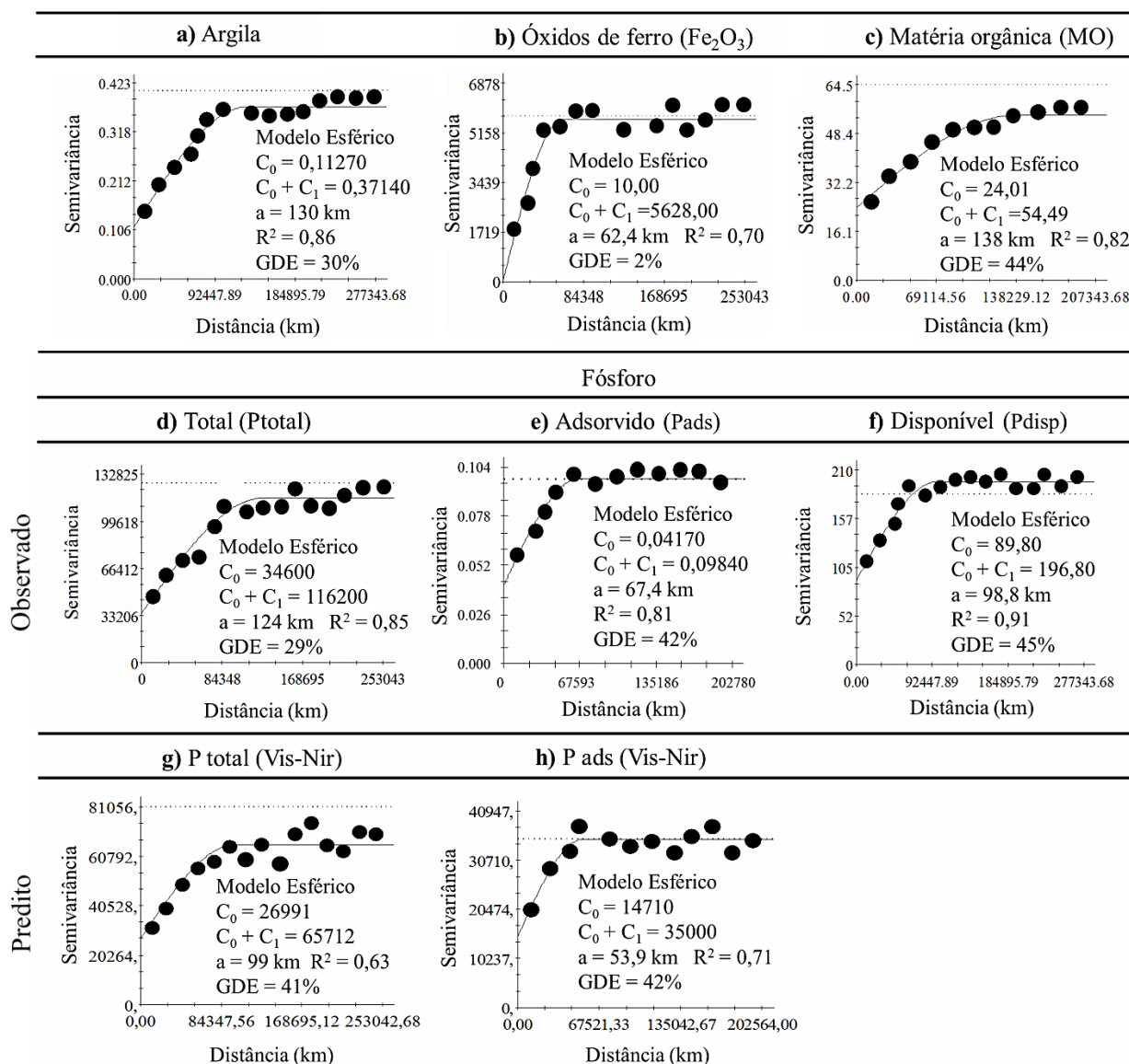


Figura 5. Semivariogramas do teor de argila, óxidos de ferro, matéria orgânica e de fósforo observado e predito por Vis-NIR dos solos. C_0 = efeito pepita, $C_0 + C_1$ = patamar; a = alcance; GDE = grau de dependência espacial.

Os valores de efeito pepita (C_0) representam erros experimentais indetectáveis e variação de campo dentro do espaço amostral mínimo (WANG et al., 2009), em contrapartida o patamar ($C_0 + C_1$) representa a variação espacial total explicada pelo modelo. Cientes disso, os valores de patamar foram superiores aos de efeito pepita, revelando que os semivariogramas explicam a maior parte da variância dos dados (VIEIRA, 2000). De modo geral, o grau de dependência espacial (GDE) foi classificado

como moderado [$C_0/(C_0+C_1)$ entre 25 e 75 %] para os modelos ajustados. Este resultado é ocasionado em parte pela extensão da área e pela variabilidade ser controlada majoritariamente por fatores intrínsecos como geologia, teor de argila, formas da paisagem (WANG et al., 2009; FU et al., 2014).

O ajuste dos modelos foram determinados com base nos maiores R^2 , com valores bem acima ou próximos de 0,70 (Figura 5). Os teores de P que apresentaram continuidade espacial foram expressos pelos valores de alcance (a), que representa a distância mínima dentro da qual a variável apresenta-se correlacionada espacialmente (TABI; OGUNKUNLE, 2007). Os valores de alcance obtidos seguem a respectiva ordem, partindo do menor para a maior variabilidade (MO – 138 km, argila – 130 km, Ptotal - 124 km, Ptotal_{VIS-NIR} - 99 km, Pdisp. – 98,8 km, Pads – 67,4 km, Fe₂O₃ - 62,4 km e Pads_{VIS-NIR} – 53,9 km), respectivamente. Em estudos anteriores de relação solo-paisagem de solos com diferentes litologias em áreas menores, o Pads (CAMARGO et al., 2015) e o Pdisp (CAMARGO et al., 2012; SIQUEIRA et al., 2015) também apresentaram dependência espacial, o que reverbera em toda escala regional deste estudo.

Na Figura 6 é possível observar o padrão espacial de todos os atributos, com nítida separação litológica do basalto SG nas bordas, principalmente na fronteira com as cuestas basálticas (Figura 1b) e arenito VRP dominando todo o centro da região do POP. As isolinhas mais estreitas no domínio do basalto indicaram maior variabilidade dos atributos.

Os mapas de isolinhas para o P_{total} e P_{ads} convencionais (Figura 6d,e) e obtidos por ERD (Figura 6g,h), apresentaram comportamento espacial, regido pela dualidade litológica basalto e arenito, ficando nítida essa influência no mapa de Ptotal do solo, por esse estar mais ligado a riqueza do material que deu origem ao solo. O mesmo fenômeno foi observado por Gao et al. (2019) na China.

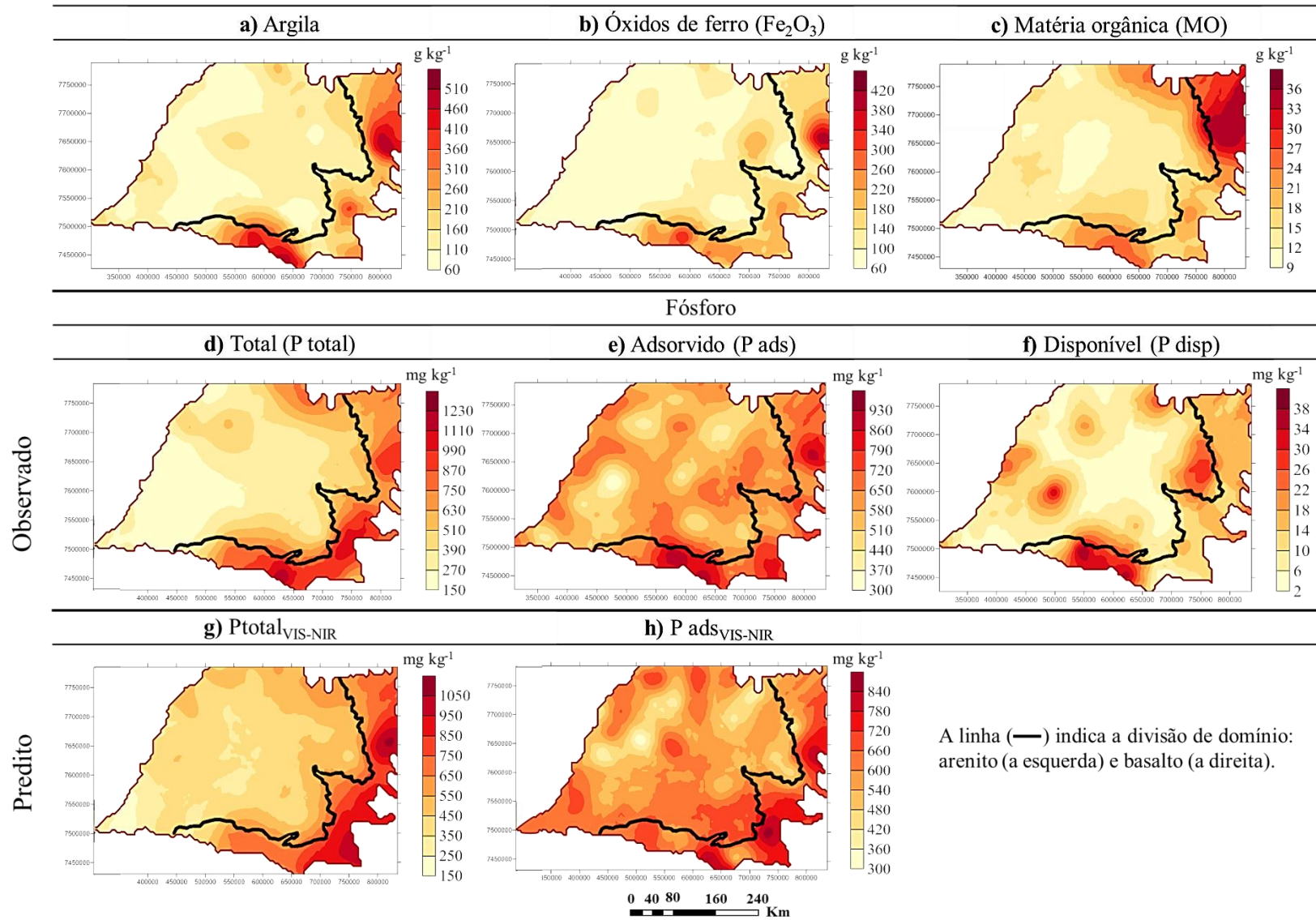


Figura 6. Mapas de distribuição espacial do teor de argila (a), Fe_2O_3 (b), MO (c), fósforo observado: P_{total} (d), P_{ads} (e), $P_{\text{disponível}}$ (f) e predito: $P_{\text{total}}^{\text{VIS-NIR}}$ (g), $P_{\text{ads}}^{\text{VIS-NIR}}$ (h).

O teor argila, Fe_2O_3 e MO (Figura 6a,b,c) apresentaram mapas com isolinhas mais distantes e menos sinuosas, expressando melhor a influência do controle basalto-arenito na variabilidade do P_{total} . Analisando a disponibilidade de P no solo (Figura 6f), observou-se algumas manchas de elevada escala de $P_{\text{disponível}}$ no arenito. O que é possível, pois teores disponíveis de elementos no solo sofrem influência de outros fatores, todavia as maiores escalas predominam no basalto. Camargo et al. (2013) trabalhando em Latossolos no noroeste do estado de São Paulo, observaram que a distribuição espacial dos teores de P disponíveis e MO, apresentaram semelhança ao padrão espacial da cristalinidade dos óxidos de Fe e Al.

Obtido por método convencional, o padrão espacial do $P_{\text{disponível}}$ (Figura 6f) demonstrou maior disponibilidade de P nos solos basálticos em relação aos areníticos no centro do POP, evidenciando a escassez de P_{total} do material de origem, portanto, o resultado é condizente. Contudo não foi possível prever o $P_{\text{disponível}}$ no VIS – NIR, tentativa frustrada também reportada por Souza et al. (2020), em que os modelos não foram satisfatórios para a predição de $P_{\text{disponível}}$, em solos tropicais. Presume-se que o $P_{\text{disponível}}$ esteja subordinada mais a fatores como pH e MO do solo, do que a própria composição mineral, motivo pela qual limitou sua predição na região espectral intrínseca aos óxidos-Fe.

A espacialização das formas de P permite inferir que o comportamento deste elemento está intimamente associado às variações litológicas e das unidades de dissecações, os quais são fatores naturais responsáveis pela variabilidade de atributos do solo, inclusive teor de argila e óxidos de ferro (SILVA et al., 2020). Além disso, deve-se considerar que atributos químicos e físicos do solo, são subordinados a dinâmicas dos óxidos de Fe, podendo ser rastreados indiretamente por espectros baseados na intensidade de cor do solo, principalmente em regiões de clima tropical (MARQUES JÚNIOR et al., 2014; CAMARGO et al., 2015).

A análise por ERD gera resultados rápidos, menos onerosos, não precisa de tratamento químico das amostras de solo, assim, não compromete o meio ambiente. Razões que potencializam a aplicação da ERD no estudo de fósforo total e adsorvidos em grandes áreas e com diferenças geomorfológicas, a exemplo do Planalto Ocidental Paulista.

2.4. Conclusões

A distribuição espacial do fósforo é influenciada pela geologia e pelo grau de dissecação da paisagem, sendo os óxidos de ferro (goethita e hematita) os mais importantes indicadores de ambientes com maiores e menores potenciais de adsorção e teores de fósforo.

A caracterização das curvas espectrais permite diferenciar o conteúdo de fósforo do solo com base nos óxidos de ferro. A análise por regressão de mínimos quadrados parciais (PLSR) dos dados espectrais na região do visível e infravermelho próximo (VIS-NIR) possibilita a predição de P_{total} e P_{ads} do solo, sendo semelhante ao obtido por método convencional.

A variabilidade espacial do P no solo estimada por ERD (VIS-NIR) valida o uso da técnica no mapeamento de atributos do solo em grandes áreas. Ela pode ser utilizada como base para desenvolver um inventário de dados de P do solo, bem como monitorar possíveis consequências do uso e manejo do solo.

2.5. Referências

ALMEIDA, J. A.; TORRENT, J.; BARRÓN, V. Cor de solo, formas do fósforo e adsorção de fosfatos em Latossolos desenvolvidos de basalto do extremo-sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, p.985-1002, 2003. doi: 10.1590/ S0100-06832003000600003.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, p.711-728, 2013.

BALKCOM, K. S.; TERRA, J. A.; SHAW, J. N.; REEVES, D. W.; RAPER, R. L. Soil management system and landscape position interactions on nutrient distribution in a coastal plain field. **Journal of Soil & Water Conservation**, v.60, p.431-437, 2005.

BARNES, R. J.; DHANOA, M. S.; LISTER, S. J. Standard normal variate transformation and detrending of near infrared diffuse reflectance. **Applied Spectroscopy**, v.43, p.772-777, 1989. <https://doi.org/10.1366/0003702894202201>

BARRÓN, V.; TORRENT J. Use of the Kubelka-Munk theory to study the influence of iron oxides on soil color. **Journal Soil Science**, Oxford, v.37, p.499-510, 1986.

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A. **Principles of Geographical Information Systems; Spatial Information Systems and Geostatistics**. Oxford University Press, Oxford, 2000, 333 p.

CAMARGO, L. A.; MARQUES JR, J.; BARRÓN, V.; ALLEONI, L. R. F.; PEREIRA, G. T.; TEIXEIRA, D. B., BAHIA, A. S. R. S. Predicting potentially toxic elements in tropical soils from iron oxides, magnetic susceptibility and diffuse reflectance spectra. **Catena**, Cremlingen, v.165, p.503–515, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.02.030>

CAMARGO, L. A.; MARQUES, JR, J.; PEREIRA, G. T.; ALLEONI, L. R. F.; BAHIA, A. S. R. S.; TEIXEIRA, D. D. B. Pedotransfer functions to assess adsorbed phosphate using iron oxide content and magnetic susceptibility in an Oxisol. **Soil Use Management**, Oxford, v.32, p.172–182, 2016.

CAMARGO, L. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; BARRÓN, V.; ALLEONI, L. R. F.; BARBOSA, R. S.; PEREIRA, G. T. Mapping of clay, iron oxide and adsorbed phosphate in Oxisols using diffuse reflectance spectroscopy. **Geoderma**, Amsterdam, v.251-252, p.124-132, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.03.027>

CAMARGO, L. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; ALLEONI, L. R. F. Spatial correlation between the composition of the clay fraction and contents of available phosphorus of an Oxisol at hillslope scale. **Catena**, Cremlingen, v.100, p.100–106, 2013.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58 (5), p.1501–1511, 1994. <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj1994.03615995005800050033x>

CARVALHO FILHO, A.; INDA, A. V.; FINK, J. R.; CURI, N. Iron oxides in soils of different lithological origins in Ferriferous Quadrilateral (Minas Gerais, Brazil). **Applied Clay Science**, Amsterdam, v.118, p.1-7, 2015.

CHANG, C. W.; LAIRD, D. A.; MAUSBACH, M. J.; HURBURGH, C. R. Near-infrared reflectance spectroscopy–principal components regression analyses of soil properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.65, p.480-490, 2001. <https://doi.org/10.2136/sssaj2001.652480x>

COVENTRY, R. J.; WILLIAMS, J. Quantitative relationships between morphology and current soil hidrology in some Alfisols in semiarid tropical Australia. **Geoderma**, Amsterdam, v.33, p.191-218, 1984.

DALRYMPLE, J. B.; BLONG, R. J.; CONACHER, A. J. A hipothetical nine unit land a surface model. **Geomorphology**, v.12, p.60–76, 1968.
DANIELS, R. B.; GAMBLE, E. F.; CADY, J. G. The relation between geomorphology and soil morphology and genesis. **Advances in Agronomy**. v.23, p.51–87, 1971.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. Rio de Janeiro, 1997, 212p.

ENVIRONMENT PROTECTION AGENCY - EPA. SW-846. Method 3052 – Microwave assisted acid digestion of siliceous and organically based matrices.

FASSBENDER, H.; IGUE, Y. Comparación de radiométricos y colorimétricos em estudios sobre retención y transformación de fosfatos em el suelo. Turrialba, v.17, p.284-287, 1967.

FERNANDES, L. A.; CASTRO, A. B.; BASILICI, G. Seismites in continental sand sea deposits of the Late Cretaceous Caiuá Desert, Bauru Basin, Brazil. **Sedimentary Geology**. V.199, p.51-64, 2007. <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2005.12.030>

FERNANDES, L. A.; COIMBRA, A. M. Revisão estratigráfica da parte oriental da Bacia Bauru (Neocretáceo). **Revista Brasileira de Geociências**, v.30, n.4, p.717-728, 2000.

FONTES, M. P. F.; CARVALHO JR., I. A. Color attributes and mineralogical characteristics, evaluated by radiometry, of highly weathered tropical soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.69, p.1162-1172, 2005.

FU, W.; JIANG, P.; ZHAO, K.; ZHOU, G.; LI, Y.; WU, J.; DU, H. The carbon storage in moso bamboo plantation and its spatial variation in Anji County of southeastern China. **Journal of Soils and Sediments**. v.14, p.320–329, 2014.

GÁLVEZ, N.; BARRÓN, V.; TORRENT, J. Effect of phosphate on the crystallization of hematite, goethite, and lepidocrocite from ferrihydrite. **Clays and Clay Minerals**, Aurora, v.47, p.304-311, 1999.

GAO, X.; XIAO, Y.; DENG, L.; LI, Q.; WANG, C.; LI, B.; DENG, O.; ZENG, M. Spatial variability of soil total nitrogen, phosphorus and potassium in Renshou County of Sichuan Basin, China. **Journal of Integrative Agriculture**, v.18(2), p.279–289, 2019. doi:10.1016/s2095-3119(18)62069-6

GAO, Q.; DAI, B.; LUO, C.; LIU, L.; MA, D.; ZHANG, C. Spatial heterogeneity of soil physical properties in *Phyllostachys heterocycla* cv *pubescens* forest, South Sichuan Bamboo Sea. **Acta Ecologica Sinica**, v.36, p.2255–2263, 2016. (in Chinese with English abstract).

GEE, G. W.; OR, D. Particle size analysis, in: DANE, J. H., TOPP, G. C. (Eds.). Methods of soil analysis. Physical methods. **Soil Science Society of America**, Madison, CT, USA, 2002, pp. 255-293.

GELADI, P.; KOWALSKI, B. R. Partial least-squares regression: a tutorial. **Anal. Chimica Acta**, v.185, p.1-17, 1986.

GOMEZ, C.; VISCARRA-ROSSEL, R. A.; MCBRATNEY, A. B. Soil organic carbon prediction by hyperspectral remote sensing and field Vis-NIR spectroscopy: An Australian case study. **Geoderma**, Amsterdam, v.146, n.3-4, p.403-411, 2008.

HAIR J. R.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. **Análise multivariada de dados**. Porto Alegre. 2005, 211p.

HEUVELINK, G. B. M.; KROS, J.; REINDS, G. J.; DE VRIES, W. I. M. Geostatistical prediction and simulation of European soil property maps. **Geoderma Regional**, Amsterdam, v.7, p.201–215, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geodrs.2016.04.002>

IPT – INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO, 1981. Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo: mapas. IPT Publicação, 1183 / IPT Monografia, 5, São Paulo.

KAISER, H. F. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. **Psychometrika**, v.23, p.187-200, 1958.

KODAIRA, M.; SHIBUSAWA, S. Using a mobile real-time soil visible-near infrared sensor for high resolution soil property mapping. **Geoderma**, Amsterdam, v.199, p.64-79, 2013. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2012.09.007>

KUBELKA, P.; MUNK, F. Ein beitrage zur optic der farbanstriche. **Z. Technical Physics**, v.12, p.593-620, 1931.

LI, Q. Q.; LUO, Y. L.; WANG, C. Q.; LI, B.; ZHANG, X.; YUAN, D. G.; GAO, X. S.; ZHANG, H. Spatiotemporal variations and factors affecting soil nitrogen in the purple hilly area of Southwest China during the 1980s and the 2010s. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v.547, p.173–181, 2016.

LIU, Z.; SHAO, M. A.; WANG, Y. Spatial patterns of soil total nitrogen and soil total phosphorus across the entire Loess Plateau region of China. **Geoderma**, Amsterdam, v.197-198, p.67–78, 2013.

MALEKI, M. R.; VAN HOLM, L.; RAMON, H.; MERCKX, R. D. E.; BAERDEMAEKER, J.; MOUAZEN, A. M. Phosphorus sensing for fresh soils using visible and near infrared spectroscopy. **Biosystems Engineering**, v.95, p.425-436, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2006.07.015>

MARQUES JÚNIOR, J.; ALLEONI, L. R. F.; TEIXEIRA, D. D. B.; SIQUEIRA, D. S.; PEREIRA, G. T. Sampling planning of micronutrients and aluminium of the soils of São Paulo, Brazil. **Geoderma Regional**, Amsterdam, v.4, p.91–99, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2014.12.004>

MARQUES JÚNIOR., J.; SIQUEIRA, D. S.; CAMARGO, L. A.; TEIXEIRA, D. D. B.; BARRÓN, V.; TORRENT, J. Magnetic susceptibility and diffuse reflectance spectroscopy to characterize the spatial variability of soil properties in a Brazilian Haplustalf. **Geoderma**, Amsterdam, v.219-220, p.63-71, 2014. doi: 10.1016/j.geoderma.2013.12.007

MEHRA, O. P.; JACKSON, M. L. Iron oxide removed from soils and clays by dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. **Clays Clay Minerals**, v.7, p.1317-327, 1960. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-009235-5.50026-7>

MONTANARI, R.; MARQUES JÚNIOR, J.; CAMPOS, M. C. C.; SOUZA, Z. M.; CAMARGO, L. A. Caracterização mineralógica de Latossolos em diferentes feições do relevo na região de Jaboticabal, SP. **Revista Ciência Agronômica**, Ceará, v.41, p.191–199, 2010.

MOUAZEN, A. M.; KUANG, B.; BAERDEMAEKER, J.; RAMON, H. Comparison among principal component, partial least squares and back propagation neural network analyses for accuracy of measurement of selected soil properties with visible and near infrared spectroscopy. **Geoderma**, Amsterdam, v.158, p.23–31, 2010. doi:10.1016/j.geoderma.2010.03.001

MULJADI, D.; POSNER, A. M.; QUIRK, J. P. The mechanism of phosphate adsorption by kaolinite, gibbsite and pseudoboehmite. Part I: The isotherms and effect of pH on adsorption. **Journal Soil Science**, Oxford, v.17, p.212-229, 1966.

NORRISH, K.; TAYLOR, R. M. The isomorphous replacement of iron by aluminum in soil goethites. **Journal Soil Science**, Oxford, v.12, p.294-306, 1961. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1961.tb00919.x>

OLIVER, M. A.; WEBSTER, R. A tutorial guide to geostatistics: Computing and modelling variograms and kriging. **Catena**, Cremlingen, v.113, p.56–69, 2014. doi:10.1016/j.catena.2013.09.006

PELUCO, R. G.; MARQUES JÚNIOR, J.; SIQUEIRA, D. S.; PEREIRA, G. T.; BARBOSA, R. S.; TEIXEIRA, D. B. Mapeamento do fósforo adsorvido por meio da cor e da suscetibilidade magnética do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.50, p.259-266, 2015. doi: 10.1590/S0100-204X2015000300010.

POGGERE, G. C.; INDA, A. V.; BARRÓN, V.; KÄMPF, N.; DE BRITO, A. D. B.; BARBOSA, J. Z.; CURI, N. Maghemite quantification and magnetic signature of Brazilian soils with contrasting parent materials. **Applied Clay Science**, Amsterdam, 161, 385–394, 2018.

RAIJ, B. V.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas, Instituto Agronômico de Campinas, 2001. 285p.

RAMIREZ-LOPEZ, L.; WADOUX, A. M. J. C.; FRANCESCHINI, M. H. D.; TERRA, F. S.; MARQUES, K. P. P.; SAYÃO, V. M.; DEMATTÊ, J. A. M. Robust soil mapping at the farm scale with VIS-NIR spectroscopy. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.70, p.378-393, 2018.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5ª Ed. Revista e Ampliada, Brasília: Embrapa, 2018, 353 p.

SCHAEFER, C. E. G. R.; FABRIS, J. D.; KER, J. C. Minerals in the clay fraction of Brazilian Latosols (Oxisols): A review. **Clay Minerals**, v.43, p.137–154, 2008.

SCHWERTMANN, U. The differentiation of iron oxide in soil by a photochemical extraction with acid ammonium oxalate. **Z. Pflanzenernähr. Dung. Bodenkd.** v.105, p.104-201, 1964.

SILVA, L. S.; MARQUES JÚNIOR, J.; BARRÓN, V.; GOMES, R. P.; TEIXEIRA, D. B.; SIQUEIRA, D. S.; VASCONCELOS, V. Spatial variability of iron oxides in soils from Brazilian sandstone and basalt. **Catena**. Cremlingen, v.185, p.104-258, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104258>

SILVERO, N. E. Q.; SIQUEIRA, D. S.; COELHO, R. M.; COSTA FERREIRA, D.; MARQUES, J. Protocol for the use of legacy data and magnetic signature on soil mapping of São Paulo Central West, Brazil. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v.693, 33463, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.269>

SIMPSON, D. J.; THILAGAM, A.; CAVALLARO, G. P.; KAPLUN, K.; GERSON, A. R. SiO₂ coated pure and doped titania pigments: Low temperature CVD deposition and quantum chemical study. **Physical Chemistry Chemical Physics**, v.13, p.21132-21138, 2011. <http://dx.doi.org/10.1039/c1cp22681a>

SIQUEIRA, D. S.; MARQUES JR., J.; PEREIRA, G. T.; TEIXEIRA, D. D. B.; VASCONCELLOS, V.; CARVALHO JR, O.; MARTINS, E. Detailed mapping unit design based on soil-landscape relation and spatial variability of magnetic susceptibility and soil color. **Catena**, Cremlingen, v.135, p.149–162, 2015. <http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2015.07.010>.

SOIL SURVEY STAFF, 2010. **Keys to Soil Taxonomy**, 11th ed. USDA-Natural Resources Conservation Service, Washington.

SOUZA, M. F.; FRANCO, H. C. J.; AMARAL, L. R. Estimation of soil phosphorus availability via visible and near-infrared spectroscopy. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.77(5), 2020. e20180295.

SURFER, S., 1999. 7.0. **Contouring and 3D Surface Mapping for Scientist's Engineers**. User's Guide. Golden software Inc, New York.

TABI, F. O.; OGUNKUNLE, A. O. Spatial variation of some soil physico-chemical properties of an alfisol in Southwestern Nigeria. **Nigerian Journal of Soil and Environmental Research**, v.7, p.82-91, 2007. <http://dx.doi.org/10.4314/njser.v7i1.28421>

TEIXEIRA, D. B.; MARQUES JR, J.; SIQUEIRA, D. S.; VASCONCELOS, V.; CARVALHO JR, O. A.; MARTINS, É. S.; PEREIRA, G. T. Mapping units based on spatial uncertainty of magnetic susceptibility and clay content. **Catena**, Cremlingen, v.164, p.79–87, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.12.038>

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solos**. 3ª Ed. Revista e Ampliada, Brasília: Embrapa, 2017, 573p.

TROEH, F. R. Landform equations fitted to contour maps. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.263, p.616–627, 1965.

VASCONCELOS, V.; CARVALHO JÚNIOR, A. O.; MARTINS, E. S.; COUTO JÚNIOR, A. F.; GUIMARAES, R. F.; GOMES, R. A. T. Sistema de classificação geomorfométrica baseada em uma arquitetura sequencial em duas etapas: árvore de decisão e classificador espectral, no Parque Nacional da Serra da Canastra. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.13, p.171-186, 2012.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F., ALVAREZ, V. H., SCHAEFER, G.R. (Eds.), **Tópicos em ciência do solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa, 2000, pp.1–54.

VISCARRA ROSSEL, R. A.; BUI, E. N. A new detailed map of total phosphorus stocks in Australian soil. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v.542, p.1040–1049, 2016.

VISCARRA ROSSEL, R. A.; BUI, E. N.; CARITAT, P.; MCKENZIE, N. J. Mapping iron oxides and the color of Australian soil using visible–near-infrared reflectance spectra. **Journal Geophysical Research**, v.115, F04031, 2010. doi:10.1029/2009JF001645

VISCARRA ROSSEL, R. A.; CATTLE, S. R.; ORTEGA, A.; FOUAD, Y. In situ measurements of soil colour, mineral composition and clay content by Vis–NIR spectroscopy. **Geoderma**, Amsterdam, v.150, p.253-266, 2009.

VISCARRA ROSSEL, R. A. ParLeS: software for chemometric analysis of spectroscopic data. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems**, v.90, p.72–83, 2008. <https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2007.06.006>

WANG, Y. Q.; ZHANG, X. C.; ZHANG, J. L.; LI, S. J. Spatial variability of soil organic carbon in a watershed on the Loess Plateau. **Pedosphere**, v.19, p.486–495, 2009.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic, 1980. Cap.2, p.319-344.

WOOD, J. **The Geomorphological Characterisation of Digital Elevation Models**.1996. 184 f. Thesis (PhD in Science Information) – Science Information Department, University of Leicester, Leicester.

YAN, B.; FANG, N. F.; ZHANG, P. C.; SHI, Z. H. Impacts of land use change on watershed streamflow and sediment yield: an assessment using hydrologic modelling and partial least squares regression. **Journal Hydrology**, v.484, p.26–37, 2013.

CAPÍTULO 3 – Magnetismo e cor na predição de fósforo adsorvido usando “random forest” em solos brasileiros

Resumo – A suscetibilidade magnética (SM), a espectroscopia de reflectância difusa (ERD) e modelos matemáticos, são úteis no reconhecimento do padrão espacial do fósforo adsorvido (Pads) para o gerenciamento das aplicações de fósforo em áreas agrícolas. Todavia, é necessário aferir a confiabilidade dessas técnicas em grandes áreas. O estudo avaliou o potencial da SM e o índice de avermelhamento do solo (IAV) como variáveis preditoras de Pads utilizando o método de aprendizagem de máquina de “random forest” (RF). Amostras de solo foram coletadas em três estágios de dissecação da paisagem de ambientes basalto-arenito no Planalto Ocidental Paulista (POP), Brasil. Foram mensuradas a SM, o IAV por ERD e por método convencional determinou-se o Pads. A predição de Pads foi obtida por RF usando a SM e o IAV como variáveis preditoras. Os resultados foram submetidos à análise estatística descritiva, multivariada e o padrão espacial por análise geoestatística. O contraste litológico controla o teor e a variabilidade espacial dos atributos, assumindo as dissecações da paisagem com participação secundária. Os padrões espaciais da areia, argila e SM melhor definem o contraste basalto-arenito, enquanto o IAV e o Pads sofrem maior influência das dissecações da paisagem. Análise de aprendizagem de máquina como “random forest” são modelos matemáticos eficientes na predição e caracterização de ambientes com ampla variação de Pads no contexto solo-paisagem. As correlações entre Pads e SM ($R^2 = 0,75$; $p < 0,001$), IAV ($R^2 = 0,68$; $p < 0,005$) e a análise de “Random Forest” ($R^2 = 0,90$ e RMSE = 61) indicam o sinal magnético e a cor do solo como marcadores sensíveis da variação de Pads, e fortes atributos preditores na caracterização espacial de Pads do solo em grandes áreas sob complexidade litológica e grau de dissecação da paisagem.

Palavras-chave: aprendizagem de máquina, susceptibilidade magnética, pedometria, geoestatística.

3.1 Introdução

O padrão espacial do fósforo (P) no solo é fundamental no gerenciamento de áreas mínimas de manejo das adubações fosfatadas e alocação do padrão produtivo das lavouras (WILSON et al., 2016), por ser um macronutriente limitante à máxima produtividade econômica (OLIVEIRA et al., 2018). O avanço tecnológico de sensores na agricultura de precisão combinado com modelagem matemática, GIS, modelos da paisagem (VASCONCELOS et al., 2012) no contexto solo-relevo (CAMARGO et al., 2015), possibilita o manejo agrícola mais assertivo.

Entre os sensores existentes, a suscetibilidade magnética – SM (MELLO et al., 2020; HU et al., 2019) e a cor representada pelo índice de avermelhamento (IAV) do solo, obtida por espectroscopia de refletância difusa – ERD, são técnicas indiretas promissoras para auxiliar os métodos convencionais, visando a caracterização espacial de atributos do solo para definição de manejo específico e decisões de governanças de solo.

A SM e cor do solo expressam a presença de óxidos de hematita (Hm), goethita (Gt), maghemita (Mh) e magnetita (Mt) do solo, com concentração no solo dependente do material de origem, com maiores registros em solos de rochas máficas e ultramáficas (CARVALHO FILHO et al. 2015; POGGERE et al. 2018; AYOUBI; ADMAN, 2019). Gt, Hm e Mh se tornam altamente reativos por grupos fosfatos (POGGERE et al., 2020), limitando à disponibilidade de P às plantas. Estudos clássicos apontaram que solos amarelos, essencialmente goethíticos, fixavam maiores teores de P do que em solos vermelhos, hematíticos (CURI; FRANZMEIER, 1984; TORRENT et al., 1994). Assim, o P adsorvido (P_{ads}) covariativo dos óxidos-Fe pode apresentar variabilidade espacial da cor e da SM, sendo esses marcadores sensíveis, fáceis, rápidos, de baixo custo e não destrutivo para predição espacial de P_{ads} em grandes áreas (CAMARGO et al., 2015; PELUCO et al., 2015).

Compreender a variabilidade espacial de atributos do solo em grandes áreas nem sempre é possível por métodos tradicionais, pois o custo, tempo, mão-de-obra e análises laboratoriais delicadas são imposições limitantes (SILVA et al., 2020). A pedometria quantitativa mostra-se uma alternativa (TEIXEIRA et al., 2018; SILVERO et al., 2019) viável para predição de atributos com determinação onerosa e complexa, utilizando atributos covariativos de fácil quantificação e de baixo custo, por função de pedotransferência (McBRATNEY et al., 2002). Aliás, reconhecer o melhor atributo preditor é decisivo na obtenção de predições mais precisas, o que às

vezes não é algo fácil, sobretudo em grandes áreas com diversidade litológica, pedológica, morfológica, e de minerais do solo. É nesse cenário que a SM e o IAV podem ser atributos promissores para esses fins.

A SM e o IAV possibilitam reconhecer o padrão espacial de atributos do solo em tempo hábil e onerando menos os cofres públicos (MARQUES JÚNIOR et al., 2014; CAMARGO et al., 2015; PELUCO et al., 2015). Além disso, modelos matemáticos baseados em “machine learning”, em especial o “Random Forest” (RF) tem ganhado espaço na tomada de decisão de dimensões complexas (WOZNICKI et al., 2019) e na predição de atributos do solo quando inúmeros fatores ambientais estão envolvidos (MACHADO et al., 2019; FATHIZAD et al., 2020; PAHLAVAN-RAD et al., 2020; TAN et al., 2020). As predições podem ser usadas para compreender o padrão espacial de P_{ads} por análises geoestatística, possibilitado a elaboração de mapas temáticos que auxiliem nas tomadas de decisões táticas e operacionais das atividades agrícolas.

Diante do exposto, a adoção de métodos menos onerosos, que forneçam resultados rápidos e acurados, como a SM e o IAV dos solos é necessário. Porém, o uso desses métodos requer que sua confiabilidade seja aferida, a fim de elucidar qualquer limitação, principalmente em grandes áreas, com ampla variação no teor e tipo de óxidos-Fe. Portanto, o estudo avaliou o potencial da suscetibilidade magnética e do índice de avermelhamento como variáveis preditoras da adsorção de fósforo usando “random forest” em solos basalto-arenito e diferentes unidades de dissecação da paisagem.

3.2. Material e métodos

3.2.1 Caracterização da área de estudo

O Planalto Ocidental Paulista (POP) corresponde a aproximadamente 13 milhões de hectares (~ 48% do Estado de São Paulo, Brasil). O relevo da região varia nas altitudes de 250 a 800 m (Figura 1b) e, segundo a classificação de Köppen (ALVARES et al., 2013) o clima é do tipo tropical com estação seca de inverno (Aw) e verão quente (Cwa). A vegetação natural de Mata Atlântica na região Oeste e Cerrado na região Leste e Sudoeste.

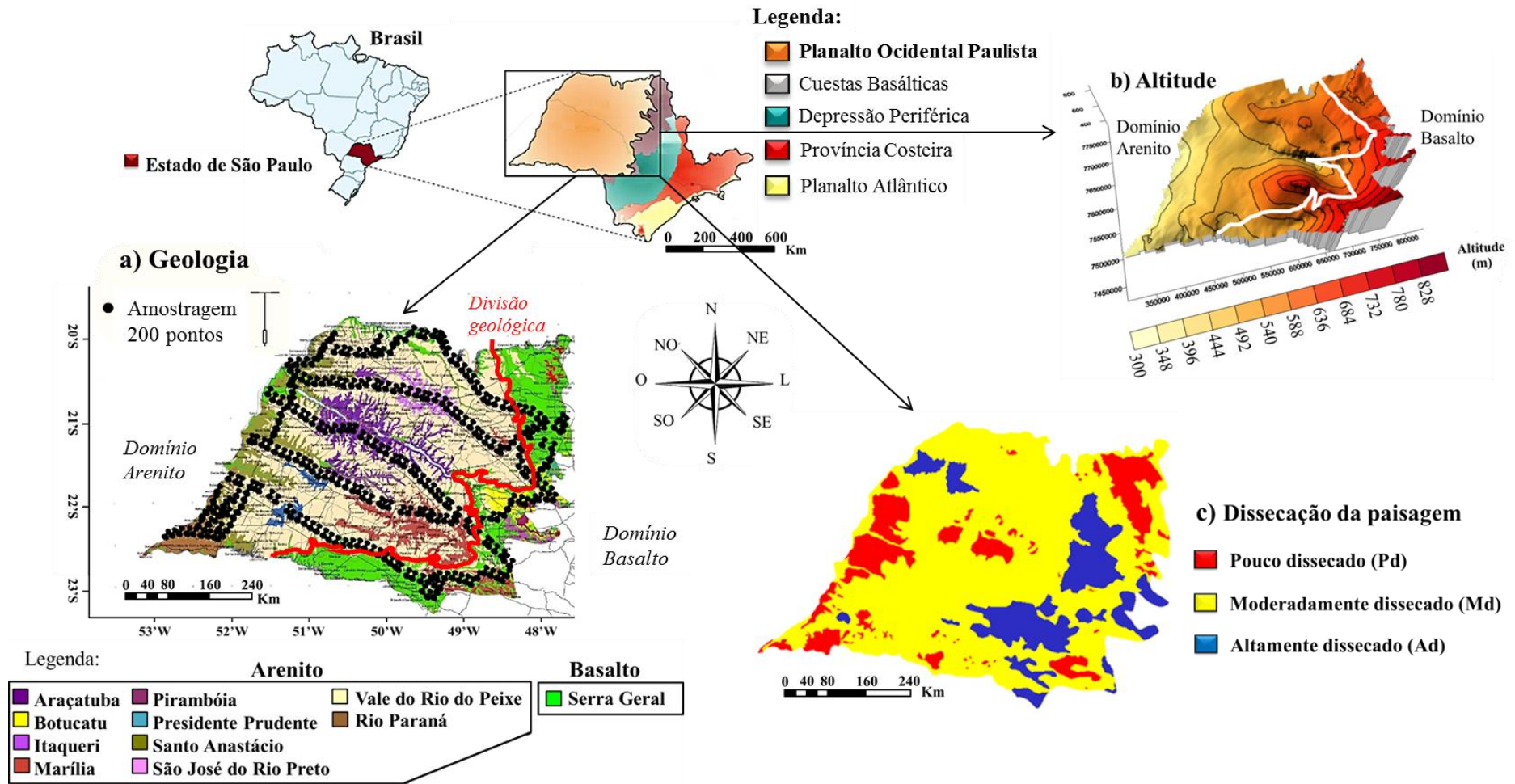


Figura 1. Mapas de geologia (a) (FERNANDES et al., 2007), (b) de altitude e (c) dissecação da paisagem (SILVA et al., 2020) do Planalto Ocidental Paulista (POP). SG = Serra Geral, VRP = Vale do Rio do Peixe.

Com datação no período Cretáceo Superior (de 88 a 65 milhões de anos), a geologia (Figura 1a) é essencialmente moldada por rochas areníticas (57%) da Formação Vale do Rio do Peixe (VRP), pertencente ao Grupo Bauru, subjacente aos derrames basálticos (15 %) da Formação Serra Geral (SG) e, outras formações sedimentares (27 %) (FERNANDES et al., 2007). Da decomposição desses substratos litológicos originaram-se as principais classes de solo, os Latossolos (Oxisols) e Argissolos (Ultisols) (SANTOS et al., 2018; SOIL SURVEY STAFF, 2010). Atualmente, explorados pelo cultivo de cana-de-açúcar e pastagem, principal prática agrícola da região.

3.2.2. *Análise geomorfométrica*

O mapa de intensidade de formas do terreno foi elaborado segundo o método proposto por Vasconcelos et al. (2012), baseado em assinatura geomorfométrica composta por curvaturas longitudinal, cross-sectional, mínima e máxima (WOOD, 1996). Tal método permite classificar mudanças sutis nas formas de terreno, diminuindo a subjetividade da identificação de compartimentos pelos modelos conceituais de paisagem (TROEH, 1965; DALRYMPLE et al., 1968; DANIELS et al., 1971).

Para a elaboração das assinaturas geomorfométricas foram utilizadas as informações da Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), onde foram gerados dados topográficos de 80% da superfície terrestre (entre as latitudes 60°N e 57°S), no período de 11 dias no ano 2000, com uso de dois radares de abertura sintética relativos à banda C (5,6 cm; C-RADAR) e à banda X (3,1cm; X-RADAR). O modelo digital de elevação (MDE) da SRTM é uma grade regular com resolução espacial de 03 arcsec (~90 metros) e precisão vertical de 15 metros (SMITH; SANDWELL, 2003).

A partir da interpretação do mapa de intensidade de formas do terreno (VASCONCELOS et al., 2012; SILVA et al., 2020) e do mapa geológico (FERNANDES et al., 2007) do POP, aliados as excursões de campo. O meio físico foi caracterizado em três estágios de dissecação da paisagem (Figura 1c): Pouco dissecadas (Pd) – paisagens mais estáveis, relevo suave ondulado e plano, formas de terreno lineares, convexas e lineares-convexas, predominando o topo da paisagem com altitude de 450 a 810 m. Apresenta o solo mais desenvolvimento e com boa drenagem interna, ocupando a extensão de 2.036.500 ha. Moderadamente

dissecadas (Md) – paisagens com solos em processos incipientes de evolução, dominando as altitudes de 431 a 529 m e possui extensão de 9.220.900 ha. Altamente dissecadas (Ad) – paisagens deprimidas, com rede de drenagem, solos menos intemperizados, relevo íngreme, escarpado e festonado com vales entalhados em “V”, cuja altitude varia de 250 a 550 m. Às vezes com presença de várzeas estreitas, lençol freático próximo à superfície. Correspondendo a uma área de 2.162.900 ha.

3.2.3. Planejamento amostral

Com base no arquivo de rodovias do Estado, fornecido pelo Departamento de Estradas e Rodagem, foi elaborado o plano de amostragem utilizando a ferramenta ET GeoWizards no ArcView 9.3. Um total de 200 amostras foram coletadas dentro do POP na profundidade 0,0 – 0,20 m, utilizando as rodovias do estado para facilitar a logística de coleta, selecionando locais representativos com mínima interferência antrópica e espaçamento mínimo entre as amostras de 10 km e máximo de 60 km. Houve boa distribuição espacial dos pontos planejados, garantindo a representatividade das litologias (Figura 1a) e unidades de dissecção da paisagem (Figura 1c). A definição do número de pontos foi fundamentada na experiência adquirida em estudos anteriores realizados no POP utilizando a técnica geoestatística (TEIXEIRA et al., 2018).

3.2.4 Métodos de laboratório

3.2.4.1 Análise do solo

Quanto a granulometria dos solos, determinou-se a fração argila pelo método da pipeta utilizando solução de NaOH 0,1 mol L⁻¹ como dispersante. A areia determinada por tamisação e a fração silte calculada por diferença (TEIXEIRA et al., 2017).

O solo foi submetido à dissolução sulfúrica (TEIXEIRA et al., 2017). O extrato resultante foi usado para determinar o conteúdo de óxidos de silício, alumínio e ferro (SiO₂, Al₂O₃ e Fe₂O₃), e em seguida calculou-se índices Ki e Kr (TEIXEIRA et al., 2017). Os óxidos de ferro pedogênicos referentes à forma cristalina (Fed) foram extraídos com solução de ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB – MEHRA; JACKSON, 1960) e as de baixa cristalinidade (Feo) extraídas com oxalato de

amônio (SCHWERTMANN, 1964), sendo determinados por absorbância no espectrofotômetro a 518 nm.

Os teores de Hm, Gt e Mh foram determinadas a partir da argila concentrada em óxido no solo com NaOH (NORRISH; TAYLOR, 1961), enquanto caulinita (Ct) e gibbsita (Gb) foram estimadas após a remoção dos óxidos de ferro da fração argila (MEHRA; JACKSON, 1960). As amostras foram difratadas em um instrumento Bruker D8 Advance usando radiação Cu K α . As proporções de Gt, Hm e Mh no concentrado de óxido de ferro foram calculadas a partir das áreas dos picos (110), (012) e (220) (SCHWERTMANN; MURAD, 1983; SCHWERTMANN; LATHAM, 1986), respectivamente, também como a diferença Fed-Feo. As áreas para os picos (012) e (220) foram multiplicadas por um fator de 3,5. A área total foi considerada como a combinação de (110), 3,5 vezes (012) e 3,5 vezes (220).

Tabela 1. Descrição dos ambientes das principais classes de solo do Planalto Ocidental Paulista (POP).

n°	Rocha	Paisagem	*Solo	Altitude	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	Intemperismo		Composição mineral					
								Ki	Kr	Ct	Mt	Mh	Hm	Gt	Gb
								g kg ⁻¹							
Formação Serra Geral															
22	Basalto	Pouco	LVef	625	130	360	211	0,61	0,45	670	13	31	71	49	330
29	Basalto	Mediamente	LVef	610	172	355	204	0,82	0,60	647	8	15	65	43	353
3	Basalto	Alta	LVef	530	242	278	196	1,48	1,02	925	16	9	58	34	75
Formação Vale do Rio do Peixe															
51	Arenito	Pouco	PVA	450	290	142	107	1,72	1,20	977	nd	1	16	19	3
60	Arenito	Mediamente	LVd	431	298	148	86	2,37	1,40	946	2	3	21	22	54
35	Arenito	Alta	LVd	357	312	125	80	1,92	1,50	704	1	3	14	6	296

Nº de pontos amostrais = 200. *Santos et al. (2018): LVef = Latossolo Vermelho Eutroférico, LVd = Latossolo Vermelho Distrófico, PVA = Argilossolo Vermelho-Amarelo. Teores de óxidos totais no extrato sulfúrico (Al₂O₃, Fe₂O₃, SiO₂); nd: não identificado; índices de intemperismo: Ki = $1,7 \times \% \text{SiO}_2 / \% \text{Al}_2\text{O}_3$; Kr = $1,7 \times \% \text{SiO}_2 / [\% \text{Al}_2\text{O}_3 + (0,6325 \times \% \text{Fe}_2\text{O}_3)]$. Ct = caulinita, Mt = magnetita, Mh = maghemita, Hm = hematita, Gt = goethita, Gb = gibbsita. *Informações cedidas por comunicação pessoal e adaptadas de Silva et al. (2020).*

3.2.4.2 Suscetibilidade magnética (SM)

Em 10 g da Terra Fina Seca ao Ar (TFSA) foi medida a suscetibilidade magnética (SM) no equipamento Bartington MS2, acoplado ao sensor Bartington MS2B. A avaliação foi feita em baixa frequência (SM_{BF}) (L_f : 0,47 kHz) em alta frequência ($SM_{AF} = 4,7$ kHz) (DEARING, 1994; COSTA et al., 1999). Para obtenção de resultados mais precisos em uma única leitura foi considerado o uso da baixa frequência.

As medições de dupla frequência devem ser utilizado em estudo de caráter qualitativo para indicar a presença de minerais magnéticos litogênicos (Mt [Fe_3O_4]), pedogênicos (Mh [γ - Fe_2O_3]). Na determinação de Mt e Mh amostras foram submetidas ao tratamento DBC por 16 horas (MEHRA; JACKSON, 1960) e posteriormente, centrifugadas, removendo o sobrenadante e lavando com água deionizada, sendo repetidos três vezes por um tempo de 10 min a 3000 rpm. No resíduo centrifugado foi medido SM_{BF} , portanto a diferença entre SM_{BF} antes e após o tratamento com DBC correspondeu a χ para Mh. Atribuindo um valor de $763 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$, foi estimado Mh em g kg^{-1} (PETERS; DEKKERS, 2003) [Eq. 1]. O mesmo procedimento foi usado para quantificar Mt (McKEAGNE; DAY, 1966), sendo estimado a partir do valor remanescente * SM_{BF} presente nas frações de resíduos (areia + silte), assumindo um valor igual a $1000 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$, portanto denominado Mt [Eq. 2].

$$Mh = \left(\frac{SM_{Lf} - *SM_{Lf}}{763 \times 10^{-6}} \right) \times 100 \quad [1]$$

$$Mt = \left(\frac{*SM_{Lf} \times 100}{1000 \times 10^{-6}} \right) \times 100 \quad [2]$$

Sendo, SM_{Lf} é SM determinado em baixa frequência, * SM_{Lf} = SM determinado em baixa frequência após o tratamento com DBC.

3.2.4.3. Índice de avermelhamento (IAV) por espectroscopia de reflectância difusa

Para a obtenção dos espectros de reflectância difusa utilizou-se o sensor Lambda 950 UV/VIS/NIR. Usou-se aproximadamente 0,5 g de TFSA, moída em almofariz de ágata até a obtenção de coloração constante. Os valores de reflectância foram determinados a cada 0,5 nm na faixa do visível, no intervalo de 380 a 780 nm (TORRENT; BARRÓN, 2008). Após obtenção dos espectros de reflectância das amostras de solo, determinou-se os valores triestímulo XYZ,

definidos pela Comisión Internacional de L'Eclairage - CIE (WYSZECKI; STILES, 1982) e, em seguida deduziu os valores de matiz (H), croma (C) e valor (V) de Munsell referentes pelo programa Munsell Conversion, versão 6.4. Os valores de H, C e V foram utilizados no cálculo do índice de avermelhamento (IAV) do solo [Eq. 3].

$$IAV = \frac{(10 - H) * C}{V} \quad [3]$$

sendo: V = valor Munsell; C = valor numérico do croma; H = valor numérico que corresponde ao matiz.

3.2.4.4 *Análise de P_{ads} no solo*

Foi determinado de acordo com Fassbender e Igue (1967), em que 2 g de solo seco ao ar foram agitados a 25 °C com 20 mL de 0,01 M de CaCl_2 contendo KH_2PO_4 a uma concentração de 100 mg de P L^{-1} . Depois de 16 h, a suspensão foi centrifugada e o sobrenadante foi coletado para a determinação da concentração de fósforo em equilíbrio por meio de espectrofotômetro.

3.2.5 **Análise de dados**

3.2.5.1 *Estatística descritiva*

Os dados foram previamente analisados por média, mínimo, mediana, máximo, desvio padrão, coeficiente de variação (CV) e análise de correlação linear. O teste de Tukey a 5% de probabilidade foi usado para comparação das médias.

3.2.5.2 *Estatística multivariada*

Inicialmente foi realizada uma padronização dos atributos com média nula e variância unitária como auxílio do programa Statistica 7.0. Em seguida foi feita a análise de componentes principais (CP) para discriminar as amostras de solo com propriedades específicas em planos bidimensionais construídos por CPs gerados dos autovalores da matriz de covariância obtida das variáveis originais (HAIR et al., 2005). Foram considerados apenas os autovalores superiores à unidade, de acordo com critério proposto por Kaiser (1958).

3.2.5.3 *“Random Forest”*

A predição do conteúdo de Pads foi obtida por técnica de ML, “Random Forest” Regressor (RF) conforme proposto por Breiman (2001) e Geurts et al.

(2006), a partir de dados da χ_{BF} e IAV, que foram padronizados (média nula e variância constante). O algoritmo baseado na RF ajusta várias árvores de decisão a partir de várias subamostras do conjunto de dados e usou uma árvore média para melhorar a precisão preditiva e controlar o ajuste excessivo. Determinou-se um conjunto de valores aleatórios, para os hiperparâmetros: max depth (MD) que compreende a profundidade máxima da árvore na floresta, n-estimators (NE) representando o número máximo de árvores na floresta e min impurity decrease (MNID), para execução do algoritmo gridsearchCV, que realiza a pesquisa em grade para obtenção do melhor conjunto de hiperparâmetros. O ajuste que retornou o melhor resultado para as métricas [(md = 10, 15, 20, 22, 25, 29, 30 e 35), (nsm = 2, 3, 7, 9, 10, 12, 15, 18, 19 e 20) e (mnid = 0,1) foi, MD = 15, NE = 19 e MNID = 1.

Os demais parâmetros que compõe o modelo RF foram ajustados para o modo 'default' da biblioteca scikit-learn (versão 0.21), que opera com as melhores configurações gerais para predição dos resultados. O desempenho do modelo foi avaliado por meio da validação cruzada, utilizado o algoritmo Cross-validate da biblioteca Scikit-Learn, já incorporado ao gridsearchCV, que utiliza o algoritmo k-fold, onde o conjunto de dados é dividido em k conjuntos menores. A medida de desempenho relatada pela validação cruzada é então a média dos valores de desempenho calculados no loop (PEDREGOSA et al, 2011).

O grau de ajuste dos dados foi obtido por coeficiente de determinação (R^2), ajuste do modelo avaliado pela raiz quadrada do erro-médio (RMSE - Root Mean Square Error), erro médio (ME – Error Mean), desvio padrão do erro (SDE – Standart deviation Error) e desvio de previsão residual (RPD). Os valores de RPD foram classificados de acordo com Chang et al. (2001) como excelente ($RPD > 2$), aceitável ($1,4 < RPD < 2$) ou não confiável ($RPD < 1,4$). Geralmente, modelos precisos têm altos valores de R^2 e RPD, mas baixos valores de RMSE e SDE. Esses parâmetros foram calculados de acordo com Viscarra Rossel et al. (2006).

3.2.5.4 Análise geoestatística

A variabilidade espacial do P_{ads} foi estimada por meio da análise geoestatística, sendo o variograma experimental estimado segundo a equação 4:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad [4]$$

sendo: $\gamma(h)$ - valor da semivariância para uma distância h ; $N(h)$ - número de pares envolvidos no cálculo da semivariância; $Z(x_i)$ - valor do atributo Z na posição x_i ; $Z(x_i+h)$ - valor do atributo Z separado por uma distância h da posição x_i .

Os ajustes dos semivariogramas foram decididos com base no número de pares envolvidos na estimativa da semivariância, na soma do quadrado dos resíduos (SQR), na presença do patamar (BURROUGH; MCDONNEL, 2000) e coeficiente de determinação (R^2). O grau de dependência espacial (GDE) foi obtido pela razão do efeito pepita (C_0) e o patamar do variograma (C_0+C_1) (CAMBARDELLA et al., 1994). Por meio da krigagem ordinária foram estimados valores dos pontos não amostrados, utilizando o programa Surfer (Surfer for Windows, 1999).

Os padrões espaciais de P_{ads} (convencional) com aquele estimado por análise “random forest” (alimentado por IAV e χ_{BF}) foi comparado por meio do cruzamento de suas informações pontuais. Em seguida, foi estimada a variação percentual local entre os valores de ambos os métodos. Neste estudo, considerou-se adequada uma variação pontual de até 10% nos valores determinados por análise convencional [Eq. 5].

$$\Delta(\%) = \frac{P_{ads} \text{ RF} - P_{ads} \text{ (convencional)}}{P_{ads} \text{ (convencional)}} \times 100 \quad [5]$$

Sendo, que valores positivos indicaram superestimativas do P_{ads} por RF e negativos subestimativas do mesmo. Essa razão permitiu avaliar onde as estimativas do P_{ads} poderão ser consideradas adequadas ou aceitáveis.

3.3. Resultados e discussão

A caracterização dos atributos e estatística descritiva está apresentada na tabela 2. Os atributos SM_{BF} , IAV e P_{ads} foram influenciados pelo grau de dissecação da paisagem, com menores valores no sentido das unidades Ad. Com base no teste- t ($p = 0,05$), as unidades Pd e Md foram mais semelhantes quanto à argila, SM_{BF} , IAV e P_{ads} , não diferindo significativamente dada as condições pedoambientais similares. Segundo Coventry e Williams (1984) e Silva et al. (2020), nas unidades Pd do basalto predominam solos mais velhos, oxídicos, com boas condições de drenagem interna favoráveis à formação e persistência de minerais cromóforos do solo, como hematita (Tabela 1). O que justifica afinidade com o IAV devido ao acúmulo de óxidos, sobretudo de Hm. Havendo também maior formação de Mh

(mineral pedogênico) (Tabela 1) que gera expressão magnética no solo, ou seja, alta SM_{BF} .

Tabela 2. Médias e estatística descritiva dos atributos de solos em unidades pouco (Pd), moderada (Md) e altamente dissecada (Ad) das unidades de formação Serra Geral (SG) e Vale do Rio Peixe (VRP).

	Argila $g\ kg^{-1}$	Areia $g\ kg^{-1}$	SM_{BF} $10^{-6}\ m^3\ kg^{-1}$	IAV	Pads $mg\ kg^{-1}$
Basalto- Serra Geral					
SG_Pd	409 a	398 c	36 a	9,2 a	827 a
SG_Md	356 b	453 b	19 b	9 a	775 a
SG_Ad	340 b	541 a	18 b	8,6 b	680 b
Média SG	368	464	24	8,9	760
Mín-Máx	41 – 677	57 – 838	1 – 76	2,7 – 13	326 – 997
CV	45	52	81	22	27
Arenito – Vale do Rio do Peixe					
VRP_Pd	131 ab	767 a	1,5 b	6,5 a	370 a
VRP_Md	150 a	724 b	3 a	5,9 a	317 a
VRP_Ad	120 b	779 a	1,3 b	5,0 b	164 b
Média VRP	134	757	2	5,8	283
Mín-Máx	49 – 562	103 – 927	0,22 - 47	1,44 - 11	124 – 670
CV	53	16	110	40	30

Nº = 200. SM_{BF} = susceptibilidade magnética em baixa frequência, IAV = índice de avermelhamento e Pads = fósforo adsorvido. Mín = mínimo, Máx = máximo, CV = coeficiente de variação (%).

Os valores de mínimo e máximo para argila (min = 41 e máx = 667 $g\ kg^{-1}$), areia (min = 57 e máx = 927 $g\ kg^{-1}$) SM_{BF} (min = 0,2 e máx = $76 \times 10^{-6}\ m^3\ kg^{-1}$), IAV (min = 1,4 e máx = 13) e Pads (min = 124 e máx = 997 $mg\ kg^{-1}$) expressaram a amplitude desses teores em solos de basalto e arenito (CAMARGO et al., 2015; PELUCO et al., 2015; SILVA et al., 2020) na área de estudo (Tabela 2). O coeficiente de variação (CV; WARRICK; NIELSEN, 1980) dos atributos estudados, foram classificados majoritariamente de média (entre 12 e 24%) para alta variação (CV acima de 24%).

O uso da estatística multivariada, no caso a análise de componentes principais (CP) mostrou-se eficiente na distinção de ambientes, no caso das geologias e dissecções da paisagem (Figura 2). Com o compartimento SG, principalmente o Pd e Md mais relacionado ao IAV, argila, Pads e SM_{BF} , dada as condições pedoambientais similares, enquanto o VRP nas suas diferentes

dissecações mais associado a areia. Reforçando que mesmo em condição de solos altamente intemperizados, o material parental e a paisagem controlam a variação do sinal magnético e cor do solo, por sua vez, atributos covariativos (PELUCO et al., 2015; SILVA et al., 2020).

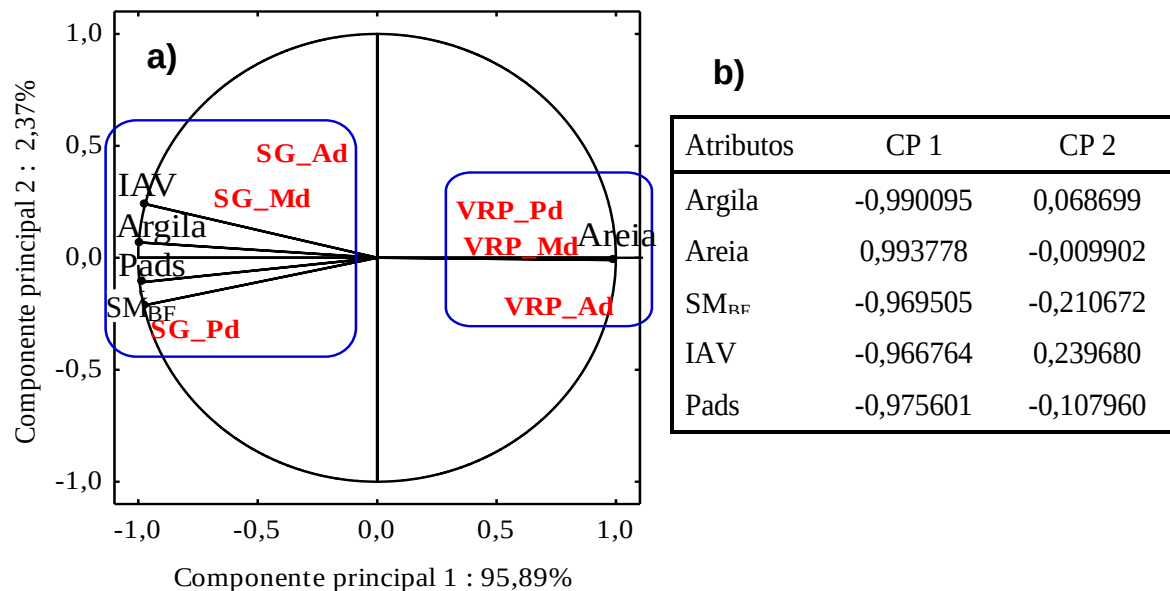


Figura 2. Análise de componentes principais (CP) (a); correlação entre cada CP (b) dos atributos nas diferentes geologias e dissecações da paisagem.

A CP foi capaz de explicar 98,23% (sendo 95,89% na CP1 e 2,37% na CP2), da variância total dos dados. Verifica-se que todos os atributos contribuíram para a variância total dos dados somente na CP1 (Figura 2a). Os autovetores são considerados como uma medida da relativa importância de cada variável, em relação às componentes principais (Figura 2b), com os sinais, positivo ou negativo, indicadores de relações diretamente ou inversamente proporcionais. Tendo assim na sequência o teor de argila, areia, Pads, SM_{BF} e IAV, como os atributos que melhor colaboraram na CP1, enquanto que nenhum dos atributos colaborou na CP2.

A correlação positiva entre o P_{ads} e os atributos que contém Fe (Fe_2O_3 ; $r = 0,65$; $p < 0,001$) e Al (Al_2O_3 ; $r = 0,71$; $p < 0,01$) deve-se à forte afinidade de Hm ($r = 0,39$; $p < 0,05$), Gt ($r = 0,45$; $p < 0,001$) e Mh ($r = 0,6$; $p = 0,001$) com grupos aniônicos do solo (Figura 3) (CAMARGO et al., 2015; FINK et al., 2016; POGGERE et al., 2020). Por esta razão, a SM_{BF} que é um marcador de Fe (TORRENT et al., 2010), foi a variável sensível do solo correlacionado ao P_{ads} ($r = 0,50$; $p < 0,001$), mais bem correlacionada em relação ao próprio IAV ($r = 0,40$; $p < 0,005$),

propriedade morfológica segura da existência e do tipo de óxidos-Fe (TORRENT; BARRÓN, 2002) e atributos covariativos. Este caso típico de rochas ferromagnesianas culminou em teores maiores de P_{ads} nos solos basálticos (Tabela 2).

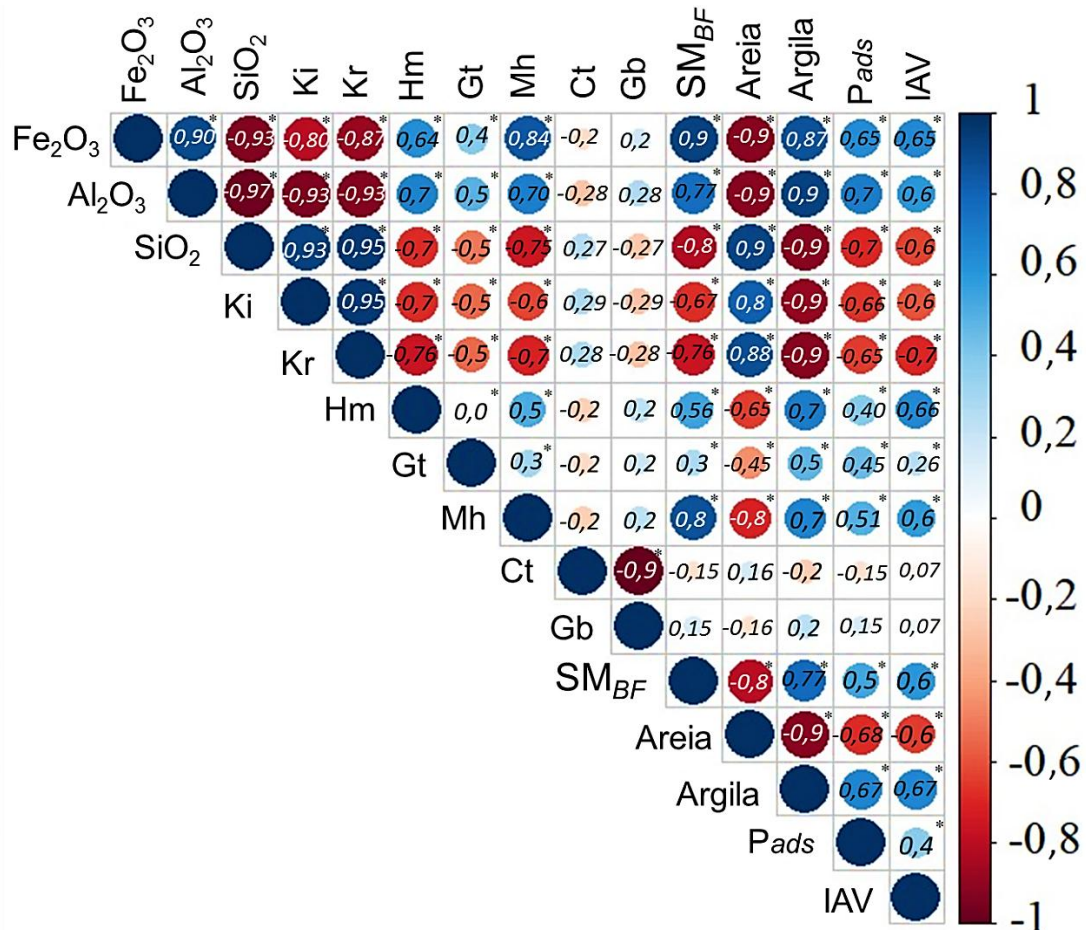


Figura 3. Correlação entre o P adsorvido (P_{ads}) e os atributos do solo basalto-arenito na camada 0,0 – 0,20 m no POP. Óxidos de alumínio, ferro e silício (Al₂O₃, Fe₂O₃, SiO₂), Ki e Kr = índices de intemperismo, Ct = caulinita, Mh = maghemita, Hm = hematita, Gt = goethita, Gb = gibbsita, SM_{BF} = susceptibilidade magnética; IAV = índice de avermelhamento. *Significativo a 1% e sem asterisco, significativo a 5% de probabilidade.

No VRP a abundância de areia e SiO₂ atenuam a capacidade de fixação de P (Tabela 1 e 2). Queiroz Neto e Pellerin (1994) afirmam que os horizontes B do Latossolo Vermelho Eutroférico (LVef) e Argilossolo Vermelho-Amarelo (PVA) do VRP são dominados por Ct, fato comprovado nesse estudo (Tabela 1). As correlações negativas entre P_{ads} e SiO₂ ($r = -0,69$; $p < 0,01$), areia ($r = -0,68$; $p = 0,001$) e Ct ($r = -0,15$; $p = ns$) elucidam menores teores de P_{ads}. O caráter inerte da

fração areia, isto é, ausência de carga reativa de superfície somada a área de superfície específica reduzida da caulinita (PENN et al., 2005) tipificam a reduzida capacidade dos solos areníticos em adsorver fosfato.

As altas correlações do P_{ads} com Gt ($r = 0,45$; $p < 0,001$), Hm ($r = 0,39$; $p < 0,05$) e IAV ($r = 0,40$; $p < 0,005$) são capazes de explicar 38% do P_{ads} , consistente com os 40% nos estudos de Almeida et al. (2003). Porém, contrário as evidências de Peluco et al. (2015), com 4% de explicação, os autores citaram o IAV inviável na estimativa do P_{ads} . Essas controversas podem ser atribuídas à dimensão da área, diversidade de solo, paisagem e intemperismo, aspectos ambientais decisivos na cor, substituição isomórfica e superfície específica, propriedades mineralógicas importantes no fenômeno de adsorção (ROLIM NETO et al., 2004).

A relação existente entre dissecação da paisagem e intemperismo (SILVA et al., 2020) esclarece as correlações entre P_{ads} e os índices de intemperismo do solo (Figura 3). Negativamente correlacionados, o P_{ads} com o Ki ($r = -0,66$; $p < 0,01$) e Kr ($r = -0,65$; $p < 0,01$) validam a teoria de superfície geomórfica (RUHE, 1956; DANIELS et al., 1971) em grandes áreas. O enriquecimento do solo por minerais oxídicos ocorrido da paisagem de Ad para Pd (Tabela 1) revelou os pedoambientes Pd a superfície geomórfica cronologicamente mais velha, o que se mostra de acordo com os menores valores de Ki e Kr típicos dos L_{Vef}, independente do compartimento litológico. Por esta razão, a dissecação da paisagem por si só é capaz de direcionar pedoambientes distintos de adsorção de fosfato (CAMARGO et al., 2015).

Os resultados da Figura 3 sugerem que o mecanismo de adsorção de P depende mais da qualidade da fração argila [Hm ($r = 0,40$; $p < 0,05$), Gt ($r = 0,45$; $p < 0,001$), Mh ($r = 0,51$; $p = 0,001$); Ct ($r = -0,15$; $p = ^{ns}$) e Gb ($r = 0,15$; $p = ^{ns}$)] do que a quantidade de argila ($r = 0,67$; $p < 0,001$). Em razão disso, as recomendações de adubos fosfatados baseado unicamente no teor de argila pode acarretar decisões equivocadas, subestimando ou superestimando a necessidade P no solo. Uma alternativa seria considerar a composição mineral do solo visando aplicações mais assertivas.

Na Figura 4 está o comparativo métrico entre P_{ads} (convencional) e obtido pela predição por análise “random forest” ($R^2 = 0,90$, RMSE = 61, RPD = 9,4 e EM = 3,9) com altos valores de R^2 e RPD e baixos valores de RMSE e EM (valor positivo, indicando superestimativa baixa), classificados segundo Chang et al. (2001) como

excelentes. Os parâmetros revelaram ótima acurácia do modelo calibrado, demonstrando que os preditores selecionados (SM e IAV) na RF foram fortemente associados e representativos da variação do P_{ads} dos ambientes basalto-arenito. As previsões de P_{ads} por RF foram fortemente confiáveis, com porcentual 90% de similaridade com os dados reais. Portanto, o desempenho da predição indicou o aproveitamento seguro das estimativas nos levantamentos detalhados de P_{ads} em grandes áreas terrestres.

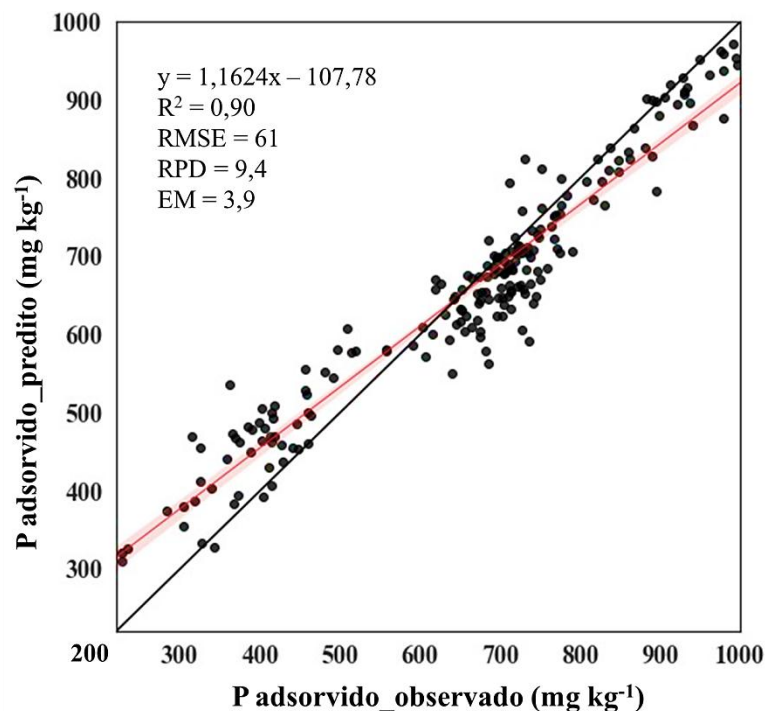


Figura 4. Regressão entre P adsorvido convencional (Obs) e predito por análise “Random Forest” (Pred RF) para os solos de contraste litológico basalto-arenito na camada 0,0 – 0,20 m no POP. RMSE = Raiz quadrada do erro-médio, RPD = desvio de previsão residual e ME = Erro médio.

No comparativo dos resultados observado (convencional) e predito por RF os valores de média e mediana foram aproximados, não havendo diferença significativa entre as médias, com valores de CV próximos do limite de variação média (24%) (Tabela 3). Esse diagnóstico descritivo reforça a precisão da modelagem por RF. Outros pesquisadores na China (TAN et al., 2020) na Índia (SREENIVAS et al., 2016), no Brasil (MACHADO et al., 2019) e no Irã (FATHIZAD et al., 2020; PAHLAVAN-RAD et al., 2020) confirmaram a precisão do modelo de floresta aleatória no mapeamento de diferentes atributos do solo, assim com os resultados deste estudo.

Tabela 3. Estatística descritiva entre os métodos: P adsorvido convencional (Obs) e predito por análise “Random Forest” (Pred RF).

	Método	Média*	Mínimo	Mediana	Máximo	CV
		mg kg ⁻¹				%
Pads	Convencional	643 a	154	696	996	30
	Predito RF	646 a	247	661	980	25

*As médias seguidas pela mesma letra não foram significativamente diferentes a 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Os óxidos-Fe condicionadores da cor e do sinal magnético do solo são encontrados nas frações areia e argila do solo, sendo tais frações importantes na compreensão do padrão espacial da SM e IAV. Os atributos e as estimativas de P_{ads} apresentaram dependência espacial descrita pelo modelo esférico (Figuras 5a-f). Registros científicos apontam o modelo esférico sensível na descrição de atributos com mudanças ambientais abruptas (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989; HU et al., 2019), sendo este modelo coerente com as mudanças abruptas litológicas e das unidades de dissecação da paisagem da área de estudo. O grau de dependência espacial (GDE [argila = 30%; areia = 48%; SM_{BF} = 37%; IAV = 40%; P_{ads} = 42%]) foi classificado como médio [$25 < GDE \leq 75\%$; (CAMBARDELLA et al., 1994)] e o R^2 apresentou valores entre 0,73 e 0,86, indicando que os ajustes dos semivariogramas experimentais explicaram parte da variância dos dados (VIEIRA, 2000), capazes de elucidar no mínimo 70% da variabilidade dos atributos no ambiente de estudo.

Os valores de alcance (a) marcou a distância mínima dentro da qual a variável apresenta-se correlacionada espacialmente (TABI; OGUNKUNLE, 2007), apresentando valores de 130, 95, 88, 74, 67 km para argila, areia, IAV, SM_{BF} , respectivamente (Figuras 5abdc). O menor alcance atestou maior variabilidade espacial para P_{ads} , embora cerca de 57% do POP seja de sedimentos areníticos (SILVA et al., 2020), a variabilidade espacial menor para argila pode ter sido proporcionada pelo intemperismo avançado dos solos, pois quanto mais velho o solo, mais homogêneos são seus atributos (VIDAL-TORRADO; LEPSCH, 1999). Os valores de alcance muito próximos do IAV, SM_{BF} e P_{ads} fortalece a escolha desses atributos na predição espacial do P_{ads} , e reiteraram o potencial morfológico da cor e

do sinal magnético do solo na predição de P_{ads} , em grandes áreas com diversidade lito-pedomorfológica.

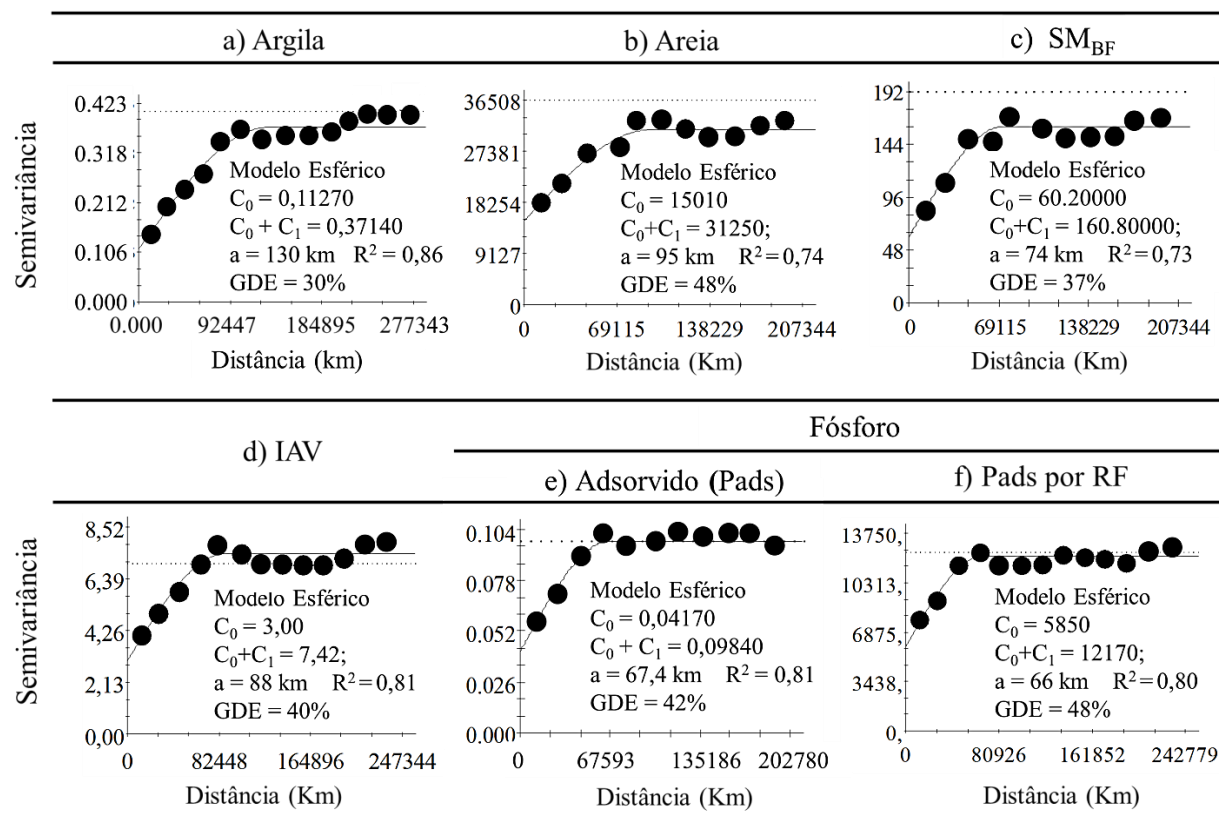


Figura 5. Semivariogramas dos atributos estudados, no noroeste de São Paulo. SM_{BF} = susceptibilidade magnética; IAV = índice de avermelhamento; RF = “random forest”. C_0 = efeito pepita; $C_0 + C_1$ = patamar; a = alcance e GDE = grau de dependência espacial.

A Figura 6 mostrou o padrão espacial de todos os atributos, com nítida separação litológica do basalto SG nas bordas e arenito VRP dominando todo o centro da região. As isolinhas mais estreitas no domínio do basalto indicaram os ambientes de maior variabilidade dos atributos. Observação consistente com os de Silva et al. (2020) ao caracterizar a variabilidade espacial de óxidos-Fe no POP. Os derrames basálticos entrelaçados com sedimentos areníticos provocaram misturas de solo basalto-arenito (FERNANDES et al., 2007) e esculpimento da paisagem em diferentes intensidades (QUEIROZ NETO; PELLERIN, 1994) são fortes condicionadores naturais da maior variabilidade espacial nos ambientes Serra Geral.

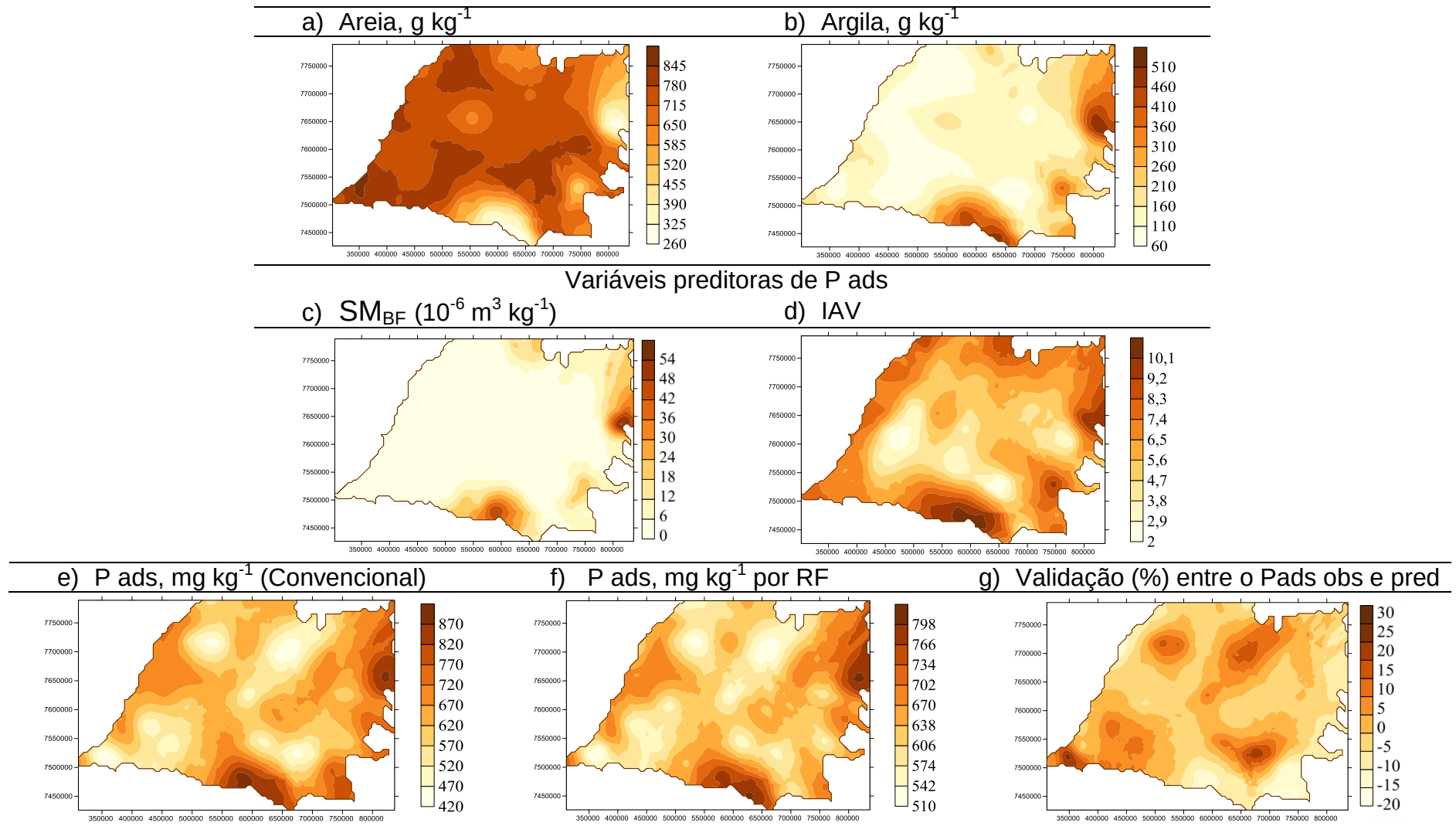


Figura 6. Padrão espacial da (a) argila, (b) areia, (c) suscetibilidade magnética em baixa frequência, (d) fósforo adsorvido, (e) índice de avermelhamento, (f) fósforo adsorvido estimado por “random forest”, (g) validação entre as técnicas na camada 0,0 – 0,20 do POP.

Os teores elevados de areia (Figura 6a) alastraram a região central, ilustrando a expressividade do arenito VRP. De modo semelhante, os valores de SM e o IAV baixos nos solos areníticos são indicativos da escassez de óxidos-Fe. Realmente, assumindo valores baixos ($0 \text{ a } 6 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$) de χ sinalizaram a escassez de minerais ferrimagnéticos litogênicos, como magnetita e ilmenita. A presença de minerais antiferromagnéticos como goethita e hematita resultou em discreto sinal magnético nos solos areníticos, comum por conferir valores de χ nessa magnitude (PETERS; DEKKERS, 2003). Contudo, com base nas evidências de Silva et al. (2020) e os resultados obtidos nesse estudo (Tabela 1), referente aos solos basálticos, justificaram os teores elevados de hematita concentrarem nas bordas da SG, ratificando o vermelho intenso e, por conseguinte, elevados IAV.

O padrão mais suave dos atributos areia, argila e SM_{BF} , verificado pelas isolinhas mais distantes e menos sinuosas, expressaram melhor a influência do controle basalto-arenito na variabilidade do P_{ads} . Por outro lado, o padrão espacial do IAV e P_{ads} por RF similares ao P_{ads} observado (Figura 6e), possivelmente, tanto a cor do solo como P_{ads} sofrem mais com as unidades de dissecação da paisagem, como revelado pela maior heterogeneidade na região central, sob domínio do arenito VRP. Essa interpretação é possível, uma vez que os atributos na camada superficial, como é o caso do presente estudo, sofrem mais as variações das unidades de dissecação (SILVA et al., 2020). A paisagem do arenito VRP é marcada por vales escarpados tipo “V” e relevos mais acidentados (QUEIROZ NETO; PELLERIN, 1994), intensificando ainda mais a variação no teor de P_{ads} e tonalidade da cor do solo (Figuras 6d,e), embora as dissecações da paisagem não sejam o fator determinante da variabilidade espacial no estudo em questão.

Devido a sensibilidade e complexidade da análise “random forest” foi obtido o mapa de semelhança, que indica a similaridade existente com o mapa convencional de P_{ads} (Figuras 6e,g). Assumindo um erro de 5% como aceitável, o padrão espacial do P_{ads} por RF (Figura 6g) manteve uma similaridade correspondente a uma área de 10.458.000 ha, isso representa 83% do POP. Logo, se considerar o tamanho da área de estudo, a diversidade de solo, intemperismo e material de origem, o erro de 5% aceitável, replicada em áreas agrícolas pode orientar nas decisões táticas e operacionais de aplicações mais eficientes das adubações fosfatadas e direcionar melhor os ambientes de produção com base na variabilidade do P adsorvido do solo.

3.4. Conclusões

O contraste litológico controla o teor e a variabilidade espacial dos atributos, assumindo as dissecações da paisagem participação secundária. Os padrões espaciais da areia, argila e SM definem melhor o contraste basalto-arenito, enquanto o IAV e o P adsorvido sofrem maior influência das dissecações da paisagem.

Análises de aprendizagem de máquinas como “Random Forest” são modelos matemáticos eficientes na predição e caracterização de ambientes com ampla variação de P_{ads} no contexto solo-paisagem. As correlações entre P_{ads} e SM ($R^2 = 0,75$; $p < 0,001$), IAV ($R^2 = 0,68$; $p < 0,005$) e o P_{ads} por RF ($R^2 = 0,90$ e RMSE = 61) indicam o sinal magnético e a cor do solo como marcadores sensíveis da variação de P_{ads} , e fortes atributos preditores na caracterização espacial de P_{ads} do solo em grandes áreas sob complexidade litológica e grau de dissecação da paisagem.

3.5. Referencias

ALMEIDA, J. A.; TORRENT, J.; BARRÓN, V. Cor de solo, formas do fósforo e adsorção de fosfatos em Latossolos desenvolvidos de basalto do extremo-sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, p.985-1002, 2003. <http://doi.org/10.1590/S0100-06832003000600003>.

ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v.22, p.711-728, 2013.

AYOUBI, S.; ADMAN, V. Iron mineralogy and magnetic susceptibility of soils developed on various rocks in western Iran. **Clays and Clay Minerals**, Aurora, v.67, p.217–227, 2019. doi:10.1007/s42860-019-00020-5

BREIMAN, L. “Random forests”, machine learning, v.45, p.5-32, 2001. doi: <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>

BURROUGH, P. A.; MCDONNELL, R. A. **Principles of geographical systems**. New York: Oxford University Press, 2000.

CAMARGO, L. A.; MARQUES JÚNIOR, J.; BARRÓN, V.; ALLEONI, L. R. F.; BARBOSA, R. S.; PEREIRA, G. T. Mapping of clay, iron oxide and adsorbed phosphate in Oxisols using diffuse reflectance spectroscopy. **Geoderma**, Amsterdam, v.251-252, p.124-132, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.03.027>

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soil. **Soil Science Society America Journal**. Madison, v.58, p.1501–1508, 1994.

CARVALHO FILHO, A.; INDA, A. V.; FINK, J. R.; CURI, N. Iron of different lithological origin in ferriferous quadrilateral (Minas Gerais, Brazil). **Applied Clay Science**, Amsterdam, v.118, p.1–7, 2015. doi:10.1016/j.clay.2015.08.037

CHANG, C. W.; LAIRD, D. A.; MAUSBACH, M. J.; HURBURGH, C. R. Near-infrared reflectance spectroscopy-principal components regression analyses of soil properties. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.65, p.480–490, 2001. <https://doi.org/10.2136/sssaj2001.652480x>.

COSTA, A. C. S., BIGHAM, J. M., RHOTON, F. E., TRAINA, S. J. Quantification and characterization of maghemite in soils derived from volcanic rocks in southern Brazil. **Clays Clay Minerals**, New York, v.47, p.466-473, 1999.

COVENTRY, R. J.; WILLIAMS, J. Quantitative relationships between morphology and the current soil hydrology, in some Alfisols in semi-arid tropical Australia. **Geoderma**, Amsterdam, v.33, p.191–218, 1984.

CURI, N.; FRANZMEIER, D. P. Toposequence of Oxisols from the central plateau of Brazil. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v.48, p.341-346, 1984.

DALRYMPLE, J. B.; BLONG, R. J.; CONACHER, A. J. A hypothetical nine unit land a surface model. **Geomorphology**, v.12, p.60–76, 1968.

DANIELS, R. B.; GAMBLE, E. F.; CADY, J. G. The relation between geomorphology and soil morphology and genesis. **Advances in Agronomy**, Maryland Heights, v.23, p.51–87, 1971.

DEARING, J. A. **Environmental magnetic susceptibility**. Using the Bartington MS2 system. England: British Library, 1994. 104p.

FASSBENDER, H.; IGUE, Y. Comparación de radiométricos y colorimétricos em estudos sobre retenção y transformación de fosfatos em el suelo. **Turrialba: Revista Interamericana de Ciências Agrícolas**, v.17, p.284-287, 1967.

FATHIZAD, H.; ARDAKANI, M. A. H.; SODAIEZADEH, H.; KERRY, R.; TAGHIZADEH-MEHRJARDI, R. Investigation of the spatial and temporal variation of soil salinity using random forest in the central desert of Iran. **Geoderma**, Amsterdam, v.365, 114233, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114233>

FERNANDES, L. A.; CASTRO, A. B.; BASILICI, G. Seismites in continental sand sea deposits of the Late Cretaceous Caiuá Desert, Bauru Basin, Brazil. **Sedimentary Geology**. v.199, p.51–64, 2007.

FINK, J. R.; INDA, A. V.; BAVARESCO, J.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; BAYER, C. Adsorption and desorption of phosphorus in subtropical. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.155, p.62–68, 2016.

GEURTS, P.; ERNST, D.; WEHENKEL, L. “Extremely randomized trees”, machine learning, v.63 (1), p.3-42, 2006. doi: 10.1007/s10994-006-6226-1.

HAIR, J. R.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. **Análise multivariada de dados**. Porto Alegre. 211p, 2005.

HU, P.; HESLOP, D.; VISCARRA ROSSEL, R. A.; ROBERTS, A. P.; ZHAO, X. Continental scale magnetic properties of surficial Australian soils. **Earth-Science Reviews**, 2019. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.103028>

KAISER, H. F. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. *Psychometrika*. v.23, p.187-200, 1958.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An introduction to applied geostatistics**. New York, Oxford University Press. 561p, 1989.

MACHADO, D. F. T.; SILVA, S. H. G.; CURI, N.; MENEZES, M. D. Soil type spatial prediction from Random Forest: different training datasets, transferability, accuracy and uncertainty assessment. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.76, p.243-254, 2019. <http://dx.doi.org/10.1590/1678-992X-2017-0300>

MARQUES JÚNIOR., J; SIQUEIRA, D. S.; CAMARGO, L. A.; TEIXEIRA, D. D. B.; BARRÓN, V.; TORRENT, J. Magnetic susceptibility and diffuse reflectance spectroscopy to characterize the spatial variability of soil properties in a Brazilian Haplustalf. **Geoderma**, Amsterdam, v.219-220, p.63-71, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.12.007>.

McBRATNEY, A. B.; MINASNY, B.; CATTLE, S. R.; VERVOORT, R. W. From pedotranfer functions to soil inference systems. **Geoderma**, Amsterdam, v.109, p.41-73, 2002.

McKEAGNE, J. A.; DAY, J. H., 1966. Dithionite and oxalate-extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soils. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.46, p.13–22, 1966. <https://doi.org/10.4141/cjss66-003>.

MEHRA, O. P.; JACKSON, M. L. Iron oxide removed from soils and clays by dithionitecitrate system buffered with sodium bicarbonate. **Clays and Clay Minerals**, Aurora, v.7, p.1317-1327, 1960.

MELLO, D. C.; DEMATTÊ, J. A. M.; SILVERO, N. E. Q.; DI RAIMO, L. A. D. L.; POPPIEL, R. R.; MELLO, F. A. O.; SOUZA, A. B.; SAFANELLI, J. L.; RESENDE, M. E. B.; RIZZO, R. Soil magnetic susceptibility and its relationship with naturally occurring processes and soil attributes in pedosphere, in a tropical environment. **Geoderma**, Amsterdam, v.372, 114364, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2020.114364>

NORRISH, K.; TAYLOR, R. M. The isomorphous replacement of iron by aluminum in soil goethites. **Journal Soil Science**, Oxford, v.12, p.294-306, 1961.

OLIVEIRA, R.; SILVA, L. S.; SOUZA, N. F.; PIETROSKI, M.; CAIONE, G.; SEBEN JÚNIOR, G. F.; FERBONINK, G. F.; GOMES, R. P.; MARQUES JÚNIOR, J.; SANTOS, G. A. A.; CAMPOS, M. C. C. Mineralogy and maximum phosphorus adsorption capacity in soybean development. **Journal of Agricultural Science**, v.10, p.242-257, 2018. <https://doi.org/10.5539/jas.v10n7p242>

PAHLAVAN-RAD, M. R.; DAHMARDEH, K.; HADIZADEH, M.; KEYKHA, G.; MOHAMMADNIA, N.; GANGALI, M.; KEIKHA, M.; DAVATGAR, N.; BRUNGARD, C. Prediction of soil water infiltration using multiple linear regression and random forest in a dry flood plain, eastern Iran. **Catena**, Cremlingen, v.194, 104715, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104715>

PEDREGOSA, F.; VAROQUAUX, G.; GRAMFORT, A.; MICHEL, V.; THIRION, B.; GRISEL, O.; VANDERPLAS, J. Scikit-learn: Machine learning in Python. **Journal of Machine Learning Research**, v.12, p.2825-2830, 2011.

PELUCO, R. G.; MARQUES JÚNIOR, J.; SIQUEIRA, D. S.; PEREIRA, G. T.; BARBOSA, R. S. TEIXEIRA, D.B. Mapeamento do fósforo adsorvido por meio da cor

e da suscetibilidade magnética do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.50, p.259-266, 2015. <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2015000300010>.

PENN, C. J.; MULLINS, G. L.; ZELAZNY, L. W. Mineralogy in relation to phosphorus sorption and dissolved phosphorus losses in runoff. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.69, p.1532-1540, 2005.

POGGERE, G. C.; BARRÓN, V.; INDA, A. V.; BARBOSA, J. Z.; BRITO, A. D. B.; CURI, N. Linking phosphorus sorption and magnetic susceptibility in clays and tropical soils. **Soil Research**, 2020. <https://doi.org/10.1071/SR20099>

POGGERE, G. C.; INDA, A. V.; BARRÓN, V.; KÄMPF, N.; BRITO, A. D. B.; BARBOSA, J. Z.; CURI, N. Maghemite quantification and magnetic signature of Brazilian soils with contrasting parent materials. **Applied Clay Science**, Amsterdam, v.161, p.385–394, 2018. doi:10.1016/j.clay.2018.05.014

PETERS, C.; DEKKERS, M. Selected room temperature magnetic parameters as a function of mineralogy concentration and grain size. **Physics and Chemistry of the Earth**, v.28, p.659-667, 2003.

QUEIROZ NETO, J. P.; PELLERIN, J. Solos e relevo no alto vale do rio do Peixe – Oscar Bressane (S. Paulo, Brasil). **Revista do Departamento de Geografia**. v.777, p.25-34, 1994.

ROLIM NETO, F. C.; SCHAEFER, C. E. G. R.; COSTA, L. M. Phosphorus adsorption, specific surface, and mineralogical attributes of soils developed from volcanic rocks from the Upper Paranaíba, MG (Brazil). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, p.953-964, 2004.

RUHE, R. V. Geomorphic surfaces and the nature of soils. **Soil Science**, Baltimore, v.82, p.441-445, 1956.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; ARAUJO FILHO, J. C.; OLIVEIRA, J. B.; CUNHA, T. J. F. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 5ª Ed. Revista e Ampliada, Brasília: Embrapa, 2018, 353 p.

SCHWERTMANN, U.; LATHAM, M. Properties of iron oxides in some New Caledonian Oxisols. **Geoderma**, Amsterdam, v.39, p.105–123, 1986.

SCHWERTMANN, U.; MURAD, E. Effect of pH on the formation of goethite and hematite from ferrihydrite. **Clays Clay Minerals**, New York, v.31, p.277-284, 1983.
 SCHWERTMANN, U. The differentiation of iron oxide in soil by a photochemical extraction with acid ammonium oxalate. **Z. Pflanzenernähr Dung**. Bodenkd. v.105, p.104-201, 1964.

SILVA, L. S.; MARQUES JÚNIOR, J.; BARRÓN, V.; GOMES, R. P.; TEIXEIRA, D. B., SIQUEIRA, D. S.; VASCONCELOS, V. Spatial variability of iron oxides in soils from Brazilian sandstone and basalt. **Catena**, Cremlingen, v.185, p.104-258, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104258>

SILVERO, N. E. Q.; SIQUEIRA, D. S.; COELHO, R. M.; FERREIRA JÚNIOR, D. C.; MARQUES JÚNIOR, J. Protocol for the use of legacy data and magnetic signature on soil mapping of Sao Paulo Central West, Brazil. **Science of The Total Environment**, Amsterdam, v.693, 133463, 2019. [doi:10.1016/j.scitotenv.2019.07.269](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.269)

SMITH, B.; SANDWELL, D. Accuracy and resolution of Shuttle Radar Topography Mission data. **Geophysical Research Letters**, Washington, v.30, p.20–24, 2003. <https://doi.org/10.1029/2002GL016643>.

SOIL SURVEY STAFF. Keys to Soil Taxonomy, 11th Ed. Washington: USDA-Natural Resources Conservation Service, 2010.

SREENIVAS, K.; DADHWAL, V. K.; KUMAR, S.; HARSHA, G. S.; MITRAN, T.; SUJATHA, G. G.; SURESH, J. R.; FYZEE, M. A.; RAVISANKAR, T. Digital mapping of soil organic and inorganic carbon status in India. **Geoderma**, Amsterdam, v.269, p.160–173, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2016.02.002>

SURFER, S. 7.0. Contouring and 3D Surface Mapping for Scientist's Engineers. User's Guide. New York: Golden software Inc, 1999.

TABI, F.O.; OGUNKUNLE, A. O. Spatial variation of some soil physico-chemical properties of an alfisol in Southwestern Nigeria. **Nigerian Journal of Soil and Environmental Research**, v.7, p.82-91, 2007. <http://dx.doi.org/10.4314/njser.v7i1.28421>

TAN, K.; WANG, H.; CHEN, L.; DU, Q.; DU, P.; PAN, C. Estimation the spatial distribution of heavy metal in agricultural soils using airborne hyperspectral imaging and random forest. **Journal of Hazardous Materials**, v.382, 120987, 2020. [doi:10.1016/j.jhazmat.2019.120987](https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2019.120987)

TEIXEIRA, D. B.; MARQUES JÚNIOR, J.; SIQUEIRA, D. S.; VASCONCELOS, V.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; MARTINS, É. S.; PEREIRA, G. T. Mapping units based on spatial uncertainty of magnetic susceptibility and clay content. **Catena**, Cremlingen, v.164, p.79–87, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.12.038>

TEIXEIRA, P. C.; DONAGEMMA, G. K.; FONTANA, A.; TEIXEIRA, W. G. **Manual de Métodos de Análise de Solos**. 3ª Ed. Revista e Ampliada, Brasília: Embrapa, 2017, 573p.

TORRENT, J.; BARRON, V.; LIU, Q. S. Magnetic susceptibility changes in relation to pedogenesis in a Xeralf chronosequence in northwestern Spain. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.61, p.161-73, 2010.

TORRENT, J.; BARRÓN, V. Diffuse Reflectance Spectroscopy. In: Ulery, A.L., Drees, L.R. (Eds.), *Methods of Soil Analysis – Part 5. Mineralogical Methods*. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, pp.367–385, 2008.

TORRENT, J.; BARRÓN, V. Diffuse reflectance spectroscopy of iron oxides. **Encyclopedia of Surface and Colloid Science**, p.1438-1, 2002.

TORRENT, J.; SCHWERTMANN, U.; BARRÓN, V. Phosphate sorption by natural hematites. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.45, p.45-51, 1994.

TROEH, F. R. Landform equations fitted to contour maps. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.263, p.616–627, 1965.

VASCONCELOS, V.; CARVALHO JÚNIOR, A.O.; MARTINS, E. S.; COUTO JÚNIOR, A. F.; GUIMARAES, R. F.; GOMES, R. A. T. Sistema de classificação geomorfométrica baseada em uma arquitetura sequencial em duas etapas: árvore de decisão e classificador espectral, no Parque Nacional da Serra da Canastra. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.13, p.171-186, 2012.

VIDAL-TORRADO, P.; LEPSCH, I. F. Relações material de origem/solo e pedogênese em uma sequência de solos predominantemente argilosos e latossólicos sobre psamitos na Depressão Periférica Paulista. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, p.357-369, 1999.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F., ALVAREZ, V. H., Schaefer, G.R., (Ed.) **Tópicos em Ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. v.1, p.1-54, 2000.

VISCARRA ROSSEL, R. A.; McGLYNN, R. N.; McBRATNEY, A. B. Determining the composition of mineral-organic mixes using UV-Vis-NIR diffuse reflectance spectroscopy. **Geoderma**, Amsterdam, v.137, p.70–82, 2006. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.07.004>.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D., ed. **Applications of soil physics**. New York, Academic Press. 350p, 1980. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-69162012000100007>.

WILSON, H. F.; SATCHITHANANTHAM, S.; MOULIN, A. P.; GLENN, A. J. Soil phosphorus spatial variability due to landform, tillage, and input management: A case study of small watersheds in southwestern Manitoba. **Geoderma**, Amsterdam, v.280, p.14–21, 2016. doi:10.1016/j.geoderma.2016.06.009

WOOD, J. **The Geomorphological Characterisation of Digital Elevation Models**.1996. 184f. Thesis (PhD in Science Information) – Science Information Department, University of Leicester, Leicester.

WOZNICKI, S. A.; BAYNES, J.; PANLASIGUI, S.; MEHAFFEY, M.; NEALE, A. Development of a spatially complete floodplain map of the conterminous United States using random forest. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v.647, p.942-953, 2019.

WYSZECKI, G.; STILES, W. S. Color science: concepts and methods, quantitative data and formulae. 2.ed. New York: John Wiley & Sons. 968p, 1982.

CAPÍTULO 4. Considerações Finais

Os panoramas mundiais da sociedade, da agricultura e da ciência do solo demonstra a necessidade da realização de mapeamento para o delineamento de unidades de manejo detalhado do solo, visando a otimização dos recursos aplicados no campo e a conscientização dos impactos ao ambiente. Grande parte da carência desses protocolos de mapeamento dá-se pela inviabilidade de execução por métodos convencionais.

Propriedades do solo de fácil e rápida determinação, menos dispendiosas e não destrutivas por espectroscopia de reflectância difusa, suscetibilidade magnética e índice de avermelhamento, podem auxiliar na caracterização e espacialização da reserva e adsorção de P em grandes áreas com dimensões complexas de material de origem, solo, paisagem e intemperismo.

Métodos de regressão de mínimos quadrados parciais e “random forest” são modelos matemáticos eficientes na predição de atributos do solo, permitindo mapear P em áreas que equivalem a estados ou até mesmo países. Incluir as unidades de dissecações da paisagem permite maior precisão de áreas mínimas de manejo de aplicação de P, visto que a mineralogia em solos tropicais são coordenadores do mecanismo de adsorção e tem sua presença e proporções gerenciadas pela paisagem.