UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA -UNESP

CÂMPUS JABOTICABAL

MAPEAMENTO DE C E P COM BASE NA MINERALOGIA ESTIMADA POR Vis-NIR-SWIR

Kathleen Fernandes Braz

Mestre em Ciência do Solo

2021

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA -UNESP

CÂMPUS JABOTICABAL

MAPEAMENTO DE C E P COM BASE NA MINERALOGIA ESTIMADA POR Vis-NIR-SWIR

Discente: Kathleen Fernandes Braz

Orientador: Prof. Dr. José Marques Júnior

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

2021

B827m

Braz, Kathleen Fernandes
Mapeamento de C e P com base na mineralogia estimada por Vis-NIR-SWIR / Kathleen Fernandes Braz. -- Jaboticabal, 2021
145 f. : il., tabs., mapas

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

1. Ciência do Solo. 2. Mineralogia de argila. 3. Ciclos biogeoquímicos. 4. Segurança Alimentar. 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).

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: MAPEAMENTO DE C E P COM BASE NA MINERALOGIA ESTIMADA POR Vis-NIR-SWIR

AUTORA: KATHLEEN FERNANDES BRAZ
ORIENTADOR: JOSÉ MARQUES JUNIOR

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

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

Profa. Dra. ADRIANA APARECIDA RIBON (Participação Virtual)
Departamento de Ciências dos Solos / UEG - Câmpus Palmeiras de Goiás

Prof. Dr. JOSÉ ALEXANDRE MELO DEMATTÊ (Participação Virtual)
ESALQ/USP / Piracicaba/SP

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

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

Jaboticabal, 10 de março de 2021

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

KATHLEEN FERNANDES BRAZ – Filha de Sandra Lourenço de Lima Fernandes e Carlos Roberto Fernandes Nogueira, nasceu em Goiás – GO, no dia 14 de setembro de 1992. Em março de 2010 ingressou no Curso de Engenharia Agronômica pela Universidade Estadual de Goiás (UEG), Campus Palmeiras de Goiás. Foi bolsista de Iniciação Científica no período de 2011 a 2013, pelo programa de pesquisa interno da UEG, e bolsista de Inovação Tecnológica do Centro Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) no ano de 2014. Em 2015 ingressou no Mestrado em Agronomia (Ciência do Solo), na Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal – SP, desenvolvendo o projeto de pesquisa "Caracterização da Caulinita e Gibbsita dos Solos no Planalto Ocidental Paulista" (FAPESP Proc. nº 2015/20692-0). Em 2017 ingressou no Doutorado em Agronomia (Ciência do Solo), na Universidade Estadual Paulista – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – Campus de Jaboticabal – SP, desenvolvendo o projeto de pesquisa "Minerais Caulinita e Gibbsita na Caracterização e Mapeamento de Estoque de C E P nos Solos do Planalto Ocidental Paulista" (FAPESP Proc. nº 2017/05477-0). Atua como membro ativo do Grupo de Pesquisa Caracterização do Solo para fins de Manejo Específico (CSME) da UNESP, Campus de Jaboticabal, desde 2015.

A mãe e a mulher

Na vida há certas coisas que são da mãe outras da mulher.
A mãe tem um filho. A mulher tem um parto.
A mãe quer presenciar todo pequeno e grande momento. A mulher pode, muitas vezes, desejar dar continuidade a carreira, aos estudos, a projetos pessoais.
A mãe quer colocar a cria debaixo do braço e parar o mundo p/ protegê-lá. A mulher ainda carrega sonhos individuais. De aprendizado, de conquistas, de novas experiências.
A mãe pode até́ anunciar que está completa. A mulher quer mais. Quer muito mais. Quer saber de outros assuntos, quer mais jantares românticos (seja lá o que isso significa pra ela), quer mais surpresas interessantes e mais surpresas de tirar o ar.
Você̂ compreende?
A mãe e a mulher coexistem e se misturam. Não dá pra tirar uma da outra.
No espaço onde habita o coração de uma mãe, já existia, muito antes, a alma de uma mulher.
E é importante que as pessoas entendam que ela não foi, não irá e não precisa ir embora. “

Rafaela Carvalho

E a paz de Deus, para a qual também fostes chamados em um corpo, domine em vossos corações; e sede agradecidos.
A palavra de Cristo habite em vós abundantemente, em toda a sabedoria, ensinando-vos e admoestando-vos uns aos outros, com salmos, hinos e cânticos espirituais, cantando ao Senhor com graça em vosso coração.
E, quanto fizerdes por palavras ou por obras, fazei tudo em nome do Senhor Jesus, dando por ele graças a Deus Pai.

Colossenses 3:15-17

DEDICO

A minha pequena Ester que se tornou o maior amor de minha vida e minha força diária.

Ao meu esposo pela sua dedicação, amor, paciência e cuidado comigo.

A minha mãe que nunca mediu esforços para que eu conquistasse todos os meus sonhos.

Eu amo vocês!

OFEREÇO

A Deus, porque é bom o tempo todo.

AGRADECIMENTOS

À Deus, porque mesmo sem eu merecer sempre cuida de cada detalhe.

Aos meus pais, Sandra Lourenço de Lima Fernandes e Carlos Roberto Fernandes Nogueira, por todo amor, apoio e incentivo.

Ao meu esposo, Vansni Wel, por sempre acreditar em mim, me apoiar e me incentivar em todos os momentos.

Aos meus familiares, em especial meu tio Wester Ferreira de Souza, ao meu sobrinho de coração Davi Araújo e minhas primas Maresa Bueno e Ludmila Martins por toda ajuda, companheirismo e amizade mesmo à distância.

Aos meus sogros, Silvana e Márcio da Silva, e ao meu cunhado Esli Wel pela ajuda nos últimos anos.

As minhas amigas e companheiras de laboratório Priscila, Simone e Deise, pelas risadas e distrações.

A Gabriela Mourão que se tornou em pouco tempo uma amiga e companheira de trabalho, pronta em todos os momentos.

Ao Professor Dr. José Marques Junior pelo voto de confiança e pelos ensinamentos.

Aos amigos que passaram pelo CSME, Angélica Santo Rabelo de Souza Bahia e Diego Silva Siqueira, pela confiança e ajuda.

Aos membros da Banca do Exame Geral de Qualificação, Professor Dr. Marcílio Vieira Martins Filho e ao Professor Dr. Alan Rodrigo Panosso que ofereceram sugestões e críticas significativas para a melhoria do presente trabalho.

Aos membros da banca de defesa, professores Dr. José Alexandre Melo Demattê, Dr. Zigomar Menezes de Souza, Dr. Diego Silva Siqueira e Drª. Adriana Ribon, por se disponibilizarem prontamente em contribuir para a melhoria deste estudo e para meu crescimento profissional.

Aos funcionários e amigos da Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, em especial do Departamento de Solos e Adubos e da seção de Pós-graduação, que auxiliaram para todo andamento desta pesquisa.

A minha ex-orientadora e mãe científica Professora Doutora Adriana Aparecida Ribon, por sempre acreditar em mim, me incentivar e me apoiar desde a graduação.

A Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias – UNESP, e ao programa de pós-graduação em Ciência do Solo pela oportunidade de realização do mestrado.

As agências de financiamento. O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, e da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo – FAPESP (Processos Nº 2015/20692-0; Nº 2017/05477-1).

Finalmente, a todos que direta ou indiretamente contribuíram para o desenvolvimento deste estudo.

Muito Obrigada!

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS iii
LISTA DE TABELAS vi
RESUMO vii
CAPÍTULO 1 – Considerações Gerais 9
1.1 Introdução 9
1.2 Revisão de Literatura 11
1.2.1 Estudo do C no Solo 11
1.2.2 Estudo do P no Solo 12
1.2.3 Mineralogia do solo 14
1.2.4 Espectroscopia de Reflectância Difusa (ERD) 17
1.2.5 Mineralogia da Fração Argila por Espectroscopia de Reflectância Difusa 19
1.2.6 Técnicas estatísticas para caracterização, predição e mapeamento de atributos do solo 21
1.3 Referências Bibliográficas 23
CAPÍTULO 2 – Estoques de C e P em solos do Planalto Ocidental Paulista, no contexto Solo-Paisagem 35
2.1 Introdução 36
2.2 Material e Métodos 38
2.2.1 Caracterização da área de estudo 38
2.2.2 Planejamento Amostral 40
2.2.3 Caracterização dos atributos do solo 41
2.2.3.1 Análises granulométricas e químicas do solo 41
2.2.3.2 Análises mineralógicas 42
2.2.3.3 Espectroscopia de reflectância difusa (ERD) 43
2.2.3.4 Estoque de carbono e fósforo 44
2.2.3.5 Agregados do solo 45
2.2.4 Análises Estatísticas 46
2.3 Resultados e Discussões 47
2.3.1. Correlação entre mineralogia quantificada por ERD e DRX 47
2.3.2 Caracterização da área de estudo 49

2.3.3 Caracterização das áreas agrícolas e nativas do Planalto Ocidental Paulista .55
2.3.4 Estimativa dos estoques de C e P por ERD 68
2.4 Conclusões.....75
2.5 Referências 75
CAPÍTULO 3 - Predição e mapeamento detalhado de C por sensor espectral para solos do Planalto Ocidental Paulista.....86
3.1 Introdução 87
3.2 MATERIAL E MÉTODOS 89
3.2.1 Localização e caracterização da área 89
3.2.2 Análises.....91
3.2.2.1 Análises granulométricas e químicas do solo.....91
3.2.2.2 Análises mineralógicas.....91
3.2.2.3 Espectroscopia de reflectância difusa (ERD) 92
3.2.2.4 Conteúdo e Estoque de Carbono 93
3.2.3 Análise Estatística 93
3.3 Resultados e Discussões 95
3.3.1 Correlação dos teores de C com atributos do solo.....95
3.3.2 Assinatura espectral e faixas mais importantes para a estimativa de C.....102
3.3.3 Estimativa do C total.....108
3.3.3.1 Estimativa por Random Forest (RF).....108
3.3.3.2 Estimativa por regressão por mínimos quadrados parciais (PLSR) 113
3.3.4 Mapeamento do C total 116
3.4 Conclusões.....121
3.5 Referências 121
CAPÍTULO 4 – Considerações Finais 134

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO 2 – Compartimentos naturais para estoques de C e P em solos do Planalto Ocidental Paulista

Figura 1. a) Mapa geológico atualizado do Planalto Ocidental Paulista. Fonte: Mod. de Fernandes e Magalhães-Ribeiro (2015). b) Mapa pedológico do Planalto Ocidental Paulista. FONTE: Instituto Agronômico de Campinas. c) Mapa de formas da paisagem d) Mapa de dissecação do Planalto Ocidental Paulista. e) Planejamento amostral dos pontos coletados. 39

Figura 2. Análise dos vales espectrais para cálculos do contínuo removível (CR), considerando a faixa de ocorrência de cada mineral. 43

Figura 3. Estimativa entre a razão Ct/(Ct+Gb) calculada por difração de raios x (DRX) e calculada pela técnica de contínuo removível (CR) aplicado as curvas de espectroscopia de reflectância difusa (ERD). (Fonte: Extraído de Fernandes et al. 2020) (Número amostral: 600 Pontos). 47

Figura 4. Estimativa dos minerais hematita (Hm) e goethita (Gt) calculada por difração de raios x (DRX) e calculada pela técnica de contínuo removível (CR) aplicado as curvas de espectroscopia de reflectância difusa (ERD). (Número amostral: 600 Pontos). 48

Figura 5. Atributos granulométricos e físicos, por compartimentos e áreas agrícola (AA) e mata nativa (MN) para solos do Planalto Ocidental Paulista. (Número Amostral: 44 pontos). 56

Figura 6. Atributos químicos, por compartimentos e áreas agrícola (AA) e mata nativa (MN) para solos do Planalto Ocidental Paulista. (Número Amostral: 44 pontos). 58

Figura 7. Atributos mineralógicos, por compartimentos e áreas agrícola (AA) e mata nativa (MN) para solos do Planalto Ocidental Paulista. (Número Amostral: 44 pontos). 62

Figura 8. Estoques de C e P, por compartimentos e áreas agrícola (AA) e mata nativa (MN) para solos do Planalto Ocidental Paulista. (Número Amostral: 44 pontos). 64

Figura 9. Matriz de correlação de Sperman para granulometria, mineralogia, densidade do solo (DS), conteúdos e estoques de C e P, e isótopos de C, para solos do Planalto Ocidental Paulista.....68

Figura 10. Curvas espectrais para solos do Planalto Ocidental Paulista em áreas agrícolas e de mata nativa para compartimentos de basalto e arenito. 69
Figura 11. A) Análise de regressão para dados de estoque de C e P observados e estimados por regressão mínima por quadrados parciais (PLS) a partir das curvas espectrais para amostras estratificadas de áreas agrícola e mata nativa. B) Valores de Importância de predição (VIP).....71
Figura 12. Mapas de variabilidade espacial para os estoques de C e P estimados por regressão mínima por quadrados parciais (PLS) a partir das curvas espectrais.....73

CAPÍTULO 3 - Caracterização e mapeamento detalhado de C por sensor espectral para solos do Planalto Ocidental Paulista

Figura 1. a) Mapa geológico atualizado do Planalto Ocidental Paulista. b) Mapa pedológico do Planalto Ocidental Paulista. FONTE: Instituto Agronômico de Campinas. c) Mapa de dissecação do Planalto Ocidental Paulista. d) Planejamento amostral dos pontos coletados.....90
Figura 2. Matriz de correlação de sperman para os atributos na camada de 0 – 0,20 m dos solos e diferentes compartimentos geológicos e geomorfológicos do Planalto Ocidental Paulista. 100
Figura 3. Curvas espectrais de amostras estratificadas para arenito e basalto, para área do Planalto Ocidental Paulista. Adaptada de Fernandes et al. (2020). 103
Figura 4. Análise de Cluster com mapa de calor para as faixas espectrais mais importantes para estimativa de C, apontadas por modelagem Stepwise, teores de C e compartimentos geológicos e geomorfológicos, para solos do Planalto Ocidental Paulista. 107
Figura 5. Random Forest dos comprimentos de onda para estimativa de C total (g Kg^{-1}), para solos do Planalto Ocidental Paulista. 109
Figura 6. A) Análise de regressão entre dados preditos de C (g Kg^{-1}) pelas faixas Vis (Visível), NIR (Infravermelho médio) e Vis+NIR por Random Forest e observados para solos do Planalto Ocidental Paulista. B) Gráficos de relevância para as diferentes bandas das faixas Vis, NIR e Vis+NIR para estimativa de C. 112
Figura 7. A) Análise de regressão entre dados preditos de C (g Kg^{-1}) pelas faixas Vis (Visível), NIR (Infravermelho médio) e Vis+NIR, por regressão por mínimos quadrados

parciais e observados para solos do Planalto Ocidental Paulista. B) Gráficos de relevância para as diferentes bandas das faixas Vis, NIR e Vis+NIR para estimativa de C.....115
Figura 8. Mapas de C observado e estimado por Random Forest com base nas faixas da curva espectral Vis (A), NIR (B) e Vis+NIR (B), e por regressão por mínimos quadrados parciais com base nas faixas da curva espectral Vis (A), NIR (B) e Vis+NIR (B), e seus respectivos mapas de erro, para os solos do Planalto Ocidental Paulista. 119

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO 2 – Compartimentos naturais para estoques de C e P em solos do Planalto Ocidental Paulista

Tabela 1. Estatística descritiva dos atributos granulométricos, químicos e mineralógicos dos solos para diferentes compartimentos geológicos e geomorfológicos do Planalto. (Número amostral: 600 pontos).....51

Tabela 2. Distribuição de classes de agregados, diâmetro médio geométrico (DMG) e diâmetro médio ponderado (DMP) para os diferentes compartimentos geológicos e geomorfológicos do Planalto Ocidental Paulista. (Número amostral: 200 pontos). ...54

CAPÍTULO 3 - Caracterização e mapeamento detalhado de C por sensor espectral para solos do Planalto Ocidental Paulista

Tabela 1. Estatística descritiva para os atributos mineralógicos dos solos de diferentes compartimentos geológicos e geomorfológicos, para áreas agrícolas e mata nativa do Planalto Ocidental Paulista. 96

Tabela 2. Métricas de avaliação dos modelos de Random Forest para estimativa do C total (g Kg^{-1}) para as faixas Vis, NIR e Vis+NIR, na profundidade de 0,00 - 0,20 m, para solos do Planalto Ocidental Paulista. 111

Tabela 3. Métricas de avaliação dos modelos por regressão por mínimos quadrados parciais para estimativa do C total (g Kg^{-1}) para as faixas Vis, NIR e Vis+NIR, na profundidade de 0,00 - 0,20 m, para solos do Planalto Ocidental Paulista. 114

Tabela 4. Métricas geoestatísticas dos teores totais de C observados e estimados, pelas faixas Vis (Visível), NIR (Infravermelho médio) e Vis+NIR por Random Forest (RF) e regressão por mínimos quadrados parciais (PLSR) na profundidade de 0,00 - 0,20 m, para os solos do Planalto Ocidental Paulista. 117

MAPEAMENTO DE C E P COM BASE NA MINERALOGIA ESTIMADA POR Vis-NIR-SWIR

RESUMO: O uso irracional dos solos tem causado desequilíbrios em todo o ecossistema. A influência em outros componentes do meio, como na água, no ar e nos ciclos biogeoquímicos dos elementos, já é notória. O presente trabalho teve como objetivo estimar os estoques de C e P em solos do Planalto Ocidental Paulista, a partir da mineralogia da fração argila dada por espectroscopia de reflectância difusa, e estabelecer e mapear áreas específicas de manejo. A área de estudo foi o Planalto Ocidental Paulista, que ocupa cerca de 13 milhões de ha. Foram coletadas 600 amostras para realização de análises físicas, mineralógicas e espectrais. Foram avaliados: a mineralogia, química, granulometria e física dos solos, os estoques de C e P, e os isótopos de C, em amostras estratificadas, com base na geologia, geomorfologia e pedologia da área. Todos os dados foram submetidos a análises estatísticas e geoestatísticas. Os resultados obtidos permitiram obter os valores de referência de estoque de C e P, baseados na composição mineralógica do solo. Solos de basalto apresentam os maiores conteúdos de C e estoques do elemento, quando comparados aos solos de arenito. Solos de arenito, em formas da paisagem altamente dissecadas apresentaram os maiores estoques de P, seguido pelos solos de basalto. É possível gerar mapas de estoques de C e P, e mapas de conteúdo de C a partir de diferentes análises matemáticas. A aprendizagem de máquina permite boa estimativa dos conteúdos de C para diferentes geologias. Estes resultados permitirão o planejamento para definição de áreas de manejo específico para fins de conservação dos recursos naturais. Sendo possível atingir este objetivo utilizando sensores, como o espectro, que permitem a quantificação de um grande número amostral, de forma rápida, prática, barata e menos poluente.

Palavras-chave: Ciência do solo, mineralogia de argila, ciclos biogeoquímicos, segurança alimentar.

MAPPING OF C AND P BASED ON MINERALOGY ESTIMATED BY Vis-NIR-SWIR

ABSTRACT: The irrational use of land has caused imbalances throughout the ecosystem. The influence on other components of the environment, such as water, air and the biogeochemical cycles of the elements, is already notorious. The present work aimed to estimate the C and P stocks in soils of the Planalto Ocidental Paulista, from the mineralogy of the clay fraction given by diffuse reflectance spectroscopy, and to establish and map specific management areas. The study area was the Planalto Ocidental Paulista, which occupies about 13 million ha. 600 samples were collected to perform physical, mineralogical and spectral analyses. The mineralogy, chemistry, particle size and physics of soils, C and P stocks, and C isotopes were evaluated in stratified samples, based on the geology, geomorphology and pedology of the area. All data were subjected to statistical and geostatistical analyses. The results obtained allowed to obtain the reference values of C and P stock, based on the mineralogical composition of the soil. Basalt soils have the highest C contents and element stocks when compared to sandstone soils. Sandstone soils in highly dissected landscape forms had the highest P stocks, followed by basalt soils. It is possible to generate C and P stock maps, and C content maps from different mathematical analyses. Machine learning allows good estimation of C contents for different geologies. These results will allow planning for the definition of specific management areas for the purpose of conserving natural resources. It is possible to achieve this goal using sensors such as the spectrum, which allow the quantification of a large sample number, in a fast, practical, cheap and less polluting way.

Keywords: Soil science, clay mineralogy, biogeochemical cycles, food safety.

CAPÍTULO 1 – Considerações Gerais

1.1 Introdução

A população mundial já passa dos 7,7 milhões de pessoas, com estimativa para 11 milhões até 2100 (Gerland et al., 201). Estes números causam enorme pressão na agricultura para aumento na produtividade, sustentabilidade dos ecossistemas e segurança alimentar. A solução mais incitada é o aumento da produtividade em áreas já exploradas. Para tanto é necessário uso de diversas tecnologias, entre as quais aquelas que envolvem processos de alteração do solo, aumentando da emissão de gases e o uso irracional de fertilizantes. Entretanto, para que os impactos sejam mínimos é de extrema importância que se tenha conhecimento de todas as características do solo e de seus atributos, permitindo o planejamento estratégico do uso e da ocupação do solo (Padarian et al., 2015).

Os minerais presentes no solo governam inúmeras propriedades que tem relação direta com a produtividade das culturas (Barbieri et al., 2009; Camargo et al., 2008a, 2008b; Carmo et al., 2016; Ferreira et al., 1999; Montanari et al., 2010; Sanchez et al., 2013). Estes minerais já foram quantificados por espectroscopia de reflectância difusa (ERD) com sucesso para solos da Austrália (Viscarra-Rossel et al., 2010; Viscarra-Rossel, 2011), do Marrocos (Mulder et al., 2013; Volaniaina H. Ramaroson et al., 2018), para regiões da França (Crowley e Vergo, 1988; Kruse et al., 1991; Madeira Netto et al., 1995) e para algumas regiões do Brasil (Bahia et al., 2015; Fernandes, 2017; Vendrame et al., 2012).

A ERD é uma técnica que registra os processos de absorção e dispersão produzidos na superfície das partículas do solo, permitindo a confecção de uma curva de reflectância característica para cada solo (Clark, 1999). A técnica é rápida, não poluente, de menor custo e já tem sido utilizada para caracterização de diferentes atributos (Ackerson et al., 2015; Bahia et al., 2015; Camargo et al., 2015; Demattê et al., 2017, 2019; Stenberg et al., 2010; Viscarra Rossel et al., 2010, 2016). Alguns estudos já mostram a eficiência da técnica até para classificação de solos (Minasny et al., 2010; Terra et al., 2018; Vasques et al., 2014). Todavia as relações existentes entre a mineralogia e os ciclos biogeoquímicos de alguns elementos, como o C e P,

que além de apresentarem influências entre si, apresentam grandes influências para o meio ambiente, são poucos estudados.

Ao estudarem a estrutura dos limites planetários Rockstrom et al. (2009) concluíram que o planeta pode ser dividido em 10 fronteiras que garantem um espaço operacional seguro para a humanidade. Conforme estes autores a fronteira que se refere ao ciclo do P já se encontra no limite e à referente a emissão de CO_2, indicada pelas mudanças climáticas, está acima do limite, sendo considerada crítica. A perturbação humana nestas fronteiras e a alteração dos limites planetários gera um risco considerável à desestabilidade do período histórico relativamente estável que a sociedade atual sobrevive. Neste sentido, o conhecimento e estudo dos limites planetários e as influências das ações antrópicas nos ciclos biogeoquímicos são valiosos para as decisões políticas e a condução do desenvolvimento social.

O solo é um sistema em constante processo de alteração. Portanto não há como fazer previsões certas sobre as consequências das atividades humanas nos ecossistemas terrestres. A difusão de novas tecnologias e pesquisas agrícolas, desenvolvidas nas próximas décadas irão determinar as possibilidades de mitigação de recursos e adaptação as mudanças climáticas para garantir a continuidade na produção de alimentos (Lybbert and Sumner, 2012). Quinton et al. (2010) apontam que os ciclos de C, N e P estão inter-relacionados, com influências diretas na produtividade primaria do sistema. A mineralização do C, devido à mobilização do solo, conduz a aumentos consideráveis nos teores de P, sugerindo que quando há estabilidade de C, o ciclo do P pode ser alterado.

A composição mineralógica dos solos apresenta diferentes relações com a estabilização da matéria orgânica e estoques de C e P nos solos, dada suas propriedades físicas. Oliveira et al. (2015) apontam que solos mais arenosos apresentam maiores perdas de C, devido a maior lixiviação e menor agregação e atividade de argila, enquanto solos mais argilosos e mais ricos em óxidos de Al apresentam maiores variações no estoque de C. Enquanto para solos com mineralogia oxídica e minerais 1:1, os íons de fosfato interagem com estes minerais formando compostos insolúveis, tornando o elemento indisponível as plantas (Mogollón et al., 2018).

Supondo que a mineralogia estimada por ERD apresenta alta correlação com os estoques de C e P nos solos, e que a confecção de mapas auxiliará na definição de compartimentos com características especificas, a presente pesquisa tem como objetivo estudar a relação existente entre a mineralogia da fração argila para diferentes compartimentos geológicos e geomorfológicos do Planalto Ocidental Paulista e os estoques de C e P, para tomadas de decisão e planejamentos de zonas de manejo específico.

1.2 Revisão de Literatura

1.2.1 Estudo do C no Solo

A conversão de florestas em áreas agrícolas impõe inúmeras modificações nos grandes ciclos biogeoquímicos dos ecossistemas. Hoje a preocupação com as maiores emissões de dióxido de carbono (CO_2) na atmosfera é um tema mundialmente discutido. Inúmeros estudos já apontam o solo como um dos principais reservatórios de carbono orgânico (Corg), tendo papel fundamental no ciclo global de C (Assad et al., 2013; Balsam et al., 2011; Cambou et al., 2016; Conant et al., 2007). A associação da matéria orgânica (MO) e as partículas minerais é reconhecida como o mecanismo essencial para armazenamento a longo prazo de C nos ecossistemas do solo (Ahmed, 2018).

A mineralogia e textura dos solos apresenta relação direta com o estoque de C devido as propriedades físicas da superfície das argilas (Oliveira et al., 2015) O uso inadequado e sem planejamento dos solos, devido à falta de conhecimento da dinâmica de entrada e saída de C do solo, aumenta em 31% o aumento da emissão de CO_2 (Lybbert and Sumner, 2012). Quinton et al., (2010) apontam que só os processos de erosão provocam perdas de mais de 20% do C do solo, pela emissão de CO_2.

Segundo England e Viscarra-Rossel (2018) é possível estabilizar ou aumentar os estoques de C no solo através da identificação e implementação de gestão agronômica e ambiental. Todavia o Corg do solo apresenta alta variabilidade e precisa de quantificações para verificação nas mudanças de seu estoque em função das

atividades antrópicas, e requer grande volume amostral (Guerrero et al., 2016). Portanto, o estudo do estoque de C e sua dinâmica na paisagem pode auxiliar no desenvolvimento de novas tecnologias e políticas para mitigação e qual o papel do solo como fonte ou depósito de C-CO_2 para a atmosfera (Costa et al., 2009).

A quantificação do estoque de C no solo é uma análise demorada e que por exigir uso de amostras indeformadas, nem sempre pode ser realizada. A alternativa é uso dos sensores de solo. A ERD já vem sendo utilizada por alguns para quantificar os estoques de C. Cambou et al. (2016) apontam a ERD como técnica econômica, rápida e precisa para prever os estoques de C. Guerrero et al. (2016) estudando o uso de bibliotecas espectrais para quantificação dos estoques de C, concluíram que modelos derivados de pequenas bibliotecas espectrais podem fornecer previsões exatas do atributos.

Uma metodologia que vem ganhando destaque na ciência do solo é o uso de isótopos estáveis de C para identificar a origem do C nos solos. Segundo Alves et al. (2006), o uso dos isótopos estáveis permite o conhecimento e entendimento da dinâmica da decomposição de matéria orgânica e se esta advém de plantas C3 ou C4, podendo indicar quais foram as alterações causadas pela interversão antrópica. A técnica vem sendo amplamente usada no Brasil que na maioria de suas áreas agrícolas, envolve a mistura de mata nativa (C3), pastagem (C4) ou culturas como milho e cana de açúcar (Assad et al., 2013).

O entendimento da variação dos isótopos de C permiti identificar a origem do C e assim os efeitos das atividades antrópicas sobre a estrutura do ecossistema. Com o conhecimento da mineralogia dos solos, estoque de C e qual a origem do C será possível a compreensão de parte da dinâmica dos solos. Tal conhecimento associado aos compartimentos geológicos e geomorfológicos será possível a idealização de planos de ações e práticas de manejo específicas para cada unidade de mapeamento do Planalto Ocidental Paulista.

1.2.2 Estudo do P no Solo

Os solos do Brasil apresentam baixa fertilidade natural, necessitando de grandes quantidades de adubos, para que a produtividade seja suficiente para atender

a demanda e garantir a segurança alimentar. Neste sentido o consumo por adubos, principalmente os fosfatados cresceu muito. O P é um elemento essencial para a produtividade das culturas e sua fonte principal são as rochas (Viscarra Rossel and Bui, 2016). As fontes de P são esgotáveis ou podem ficar retidas em um único país. Três países controlam 85% das rochas fosfáticas, e o Marrocos é o carro chefe, esse desequilíbrio pode gerar uma fonte potencial de turbulências políticas (Elser and Bennett, 2011).

A erosão é o principal meio para perdas de nutrientes como o P (Quinton et al., 2010). Maior parte do P é armazenado na forma inorgânica (Quinton et al., 2010), outra parte está ligada a óxidos de ferro e alumínio e minerais de grade 1:1, o que torna o elemento indisponíveis as plantas, e aumenta sua perca nos processos de erosão (Mogollón et al., 2018). Elser e Bennett (2011) apontam que o uso indiscriminado de adubos fosfatados está criando um fluxo unidirecional do P para lagos e oceanos, prejudicando ecossistemas terrestres e marinhos. No cenário atual a reciclagem P ou a adoção de políticas de gestão tornam-se cada vez mais necessárias (Mew, 2016).

Pesquisadores da Universidade Washington, em Saint Louis, nos EUA, são mais incisivos afirmando que os estoques de P acabarão em 80 anos, com base nisto trabalham em tecnologias alternativas para garantir a segurança alimentar (Raliya et al., 2016). Os pesquisadores investiram no uso de nano partículas para favorecer o crescimento das plantas e diminuir os riscos pela oferta reduzida de comida. Porém alternativas mais simples como o mapeamento do estoque de P e a disponibilidade desta baseada na variabilidade mineralógica podem auxiliar na orientação de políticas em torno da segurança alimentar, e no planejamento racional para o cultivo nos solos brasileiros.

Eberhardt et al. (2008)estudando os teores totais de P e a mineralogia de Latossolos do Cerrado, observaram que o P remanescente e o P disponível apresentam relação com a mineralogia destes solos, com grande destaque para a Gb. Viscarra-Rossel e Bui (2015) estudando o estoque de P nos solos da Austrália, observaram que estes são naturalmente pobres em disponibilizar o elemento, assim como nos solos brasileiros, e que o uso de P em excesso minimiza a biodiversidade natural das espécies, favorecendo a infestação de plantas daninhas.

O conhecimento da distribuição espacial dos estoques naturais do elemento, pode contribuir para a evolução do ecossistema, produtividade da agricultura, qualidade ambiental e manutenção da biodiversidade. Os principais problemas relacionados ao P são: os estoques de P nas rochas serem escassos; o risco de eutrofização das águas pelo uso excessivo de fertilizantes fosfatados; e a perda de P por processos erosivos. Cordell; et al. (2009) aponta que estamos passando por uma era de mudanças globais, nuca vista antes, é improvável nos adaptarmos tão rapidamente a escassez do fosforo, visto que a demanda pelo elemento só aumenta.

A crise alimentar, portanto, só poderá ser evitada se primeiramente reconhecida, e abordada nas discussões sobre mudanças climáticas e segurança alimentar. Algumas das possíveis soluções citadas por Elser e Bennett (2011) é a reciclagem e uso consciente do P, estabelecer uma rede de pesquisa nacionais e internacionais e políticas para a sustentabilidade do nutriente e talvez criar um mercado para estoque de P, assim como o do C. Os adubos fosfatados devem ser melhor gerenciados, onde não é necessário, não deve ser usado apenas para cumprir cronogramas de plantio, e onde é necessário para aumentar a produtividade, deve ser usado com muita consciência (Mogollón et al., 2018).

1.2.3 Mineralogia do solo

A mineralogia dos solos tropicais é composta principalmente por minerais 1:1 e óxidos de ferro e alumínio, sua importância deve-se a influência destes nas propriedades químicas e físicas dos solos, devido seu reduzido tamanho, elevada área superficial e alta atividade de superfície (Kampf et al., 2012). Como exemplo da influência destes minerais podemos citar a caulinita (Ct), do grupo das argilas 1:1, um dos minerais predominantes nos solos da região dos trópicos úmidos (Melo e Wypych, 2009; Resende et al., 2011).

A Ct possui formato em placas interferindo em vários processos físico-químicos do solo, formação de agregados, porosidade, retenção de água, drenagem, reações de troca, lixiviação de nutrientes, influencia no comportamento químico de solos de clima tropical, na adsorção de cátions em baixos pH, entre outros (Mello e Wypych, 2009). A gibbsita (Gb) também desempenha importante papel nestes solos. Como um

óxido de alumínio apresenta formato esférico exercendo influência significativa nas propriedades dos solos, como na formação de micro agregados fortes e estáveis, que podem favorecer o preparo e permeabilidade e drenagem no solo (Kampf et al., 2012).

Além dos mineiras, Ct e Gb, os óxidos de ferro, como hematita (Hm) e goethita (Gt), também influenciam nas propriedades químicas e físicas do solo. Goldberg (1989), Albuquerque et al. (2000), Camargo et al.(2008b), Ferreira et al. (1999a) estudaram a participação destes minerais nas propriedades físicas do solo como, por exemplo, a estabilidade do agregado. Os efeitos positivos são verificados pelo comportamento de agentes cimentantes que os oxi-hidróxidos de ferro e alumínio possuem nos agregados (Mcintyre, 1956; Kemper, 1965; Arca e Weed, 1966) e a cristalografia desses minerais (Schahabi e Schwertmann, 1970; Blackmore, 1973).

Ghidin et al. (2006) relatam em seus estudos que hematita, goethita e gibbsita foram responsáveis pelo aumento na macroporosidade, porosidade total e redução na densidade do solo para Latossolo Bruno ácrico e Latossolo Vermelho distrófico. Neste contexto pode-se observar que o arranjo e quantidade dos minerais presentes no solo irão determinar importantes propriedades físicas que auxiliam na conservação dos solos. Portanto seu estudo pode indicar regiões mais susceptíveis aos processos de erosão, principal fenômeno responsável pela perda dos solos brasileiros.

Estudando Latossolos da região Sul do Brasil, Cortez et al. (2009), relacionaram a ocorrência de agregados de classe > 4 mm a presença gibbsita com maiores áreas de pico. Azevedo e Bonumá (2004) explicam que solos com horizontes B oxídicos apresentam agregados mais estáveis em resposta a alta razão gibbsita/(gibbsita/caulinita) (Gb/(Gb+Ct)), que indica maiores quantidade de gibbsita (Gb) no solo.

Ferreira et al. (1999a) concluíram em seu trabalho que a estabilidade de agregados é altamente relacionada com os teores de Gb no solo. Os autores estudaram a densidade do solo, o diâmetro médio geométrico dos agregados, e a porosidade de Latossolos gibbsítico e cauliníticos. Os resultados apontam a importância do alumínio no comportamento das propriedades físicas do solo, associadas a estrutura. Pode-se inferir ainda que os valores de densidade do solo variaram diretamente com os teores de caulinita e inversamente com os teores de Gb.

A correlação entre os dados cristalográficos dos minerais e a estabilidade de agregados é essencial para explicar a distribuição dos diferentes tamanhos dos agregados na paisagem. Camargo et al. (2008b) estudaram hematita (Hm) e goethita (Gt), Gb e Ct e a relação dos dados cristalográficos dos minerais com a estabilidade de agregados, em Latossolos do estado de São Paulo. Os autores relataram que a ocorrência de minerais Gt e Ct apresenta correlação com a estabilidade de agregados do solo. Tendo o diâmetro médio do cristal da caulinita apresentado correlação positiva entre o diâmetro médio geométrico dos agregados do solo e agregados de classe >2mm.

A força entre a união das partículas, é o que favorece ou não o desprendimento e transporte das partículas do solo, causando a erosão, e esta força é dada a presença dos minerais do solo. Portanto, sem considerar o manejo do solo e as interferências antrópicas, a suscetibilidade do solo erodir é condicionada pelos minerais, a gênese do solo.

A erodibilidade do solo pela água é um fenômeno que depende das propriedades que atuam na resistência do solo a degradação e das propriedades que afetem seu transporte pela água. Ambos são processos que dependem da estabilidade de agregados, que está relacionada com a mineralogia dos solos. Albuquerque et al. (2000) estudaram a relação entre o índice de agregados e a erodibilidade do solo em entressulcos em amostras de solos com mineralogia diferentes. A terra roxa estruturada, corresponde atualmente aos Nitossolos, com composição mineralógica caulinítica oxídica, podendo apresentar minerais 2:1. O brunizém corresponde aos Chernossolos. Os Chernossolos e Vertissolos de modo geral apresentam maior quantidade de argilo minerais 2:1.

Os resultados dos autores corroboram com os observados por (Camargo et al., 2008a). Os óxidos de ferro e minerais 1:1 contribuem para melhor agregação do solo, podendo influenciar na menor erodibilidade, os resultados dos autores indicaram que Latossolos e Nitossolos, com mineralogia predominada por óxidos apresentam os menores índices de erodibilidade em entressulcos.

1.2.4 Espectroscopia de Reflectância Difusa (ERD)

A espectroscopia de reflectância difusa (ERD) é uma técnica baseada na utilização de espectros de luz que vem sendo utilizada em diversas áreas da ciência do solo (Ackerson et al., 2015; Demattê et al., 2019; England and Viscarra-Rossel, 2018; Guerrero et al., 2016; Nagra et al., 2017). A técnica consiste em analisar a luz que é refletida ou dispersa em um material solido, liquido ou gasoso, em função do comprimento de onda em que foi emitida (Clark, 1999). É útil para medir a composição da água e mineras do solo (Stenberg et al., 2010). A curva é subdividido em três faixas: visível (VIS), infravermelho próximo (NIR) e infravermelho de ondas curtas (SWIR) (Dematte et al., 2016).

A ERD é uma técnica rápida, fácil e não destrutiva (Viscarra-Rossel, 2011), exige pouco preparo de amostras, pouca quantidade de solo e não utiliza nenhum reagente químico. A técnica é uma inovação para o mapeamento de grandes extensões agrícolas, pois permite a avaliação de diferentes atributos a partir de uma única análise e quantificação de muitas amostras em um único dia, sem prejudicar o ambiente, pelo descarte de produtos químicos no meio, e a saúde do profissional.

A técnica é vantajosa por ser mais sensível a materiais cristalinos e amorfos que técnicas convencionais como a difração de raios x (DRX) e por poder ser usada de perto, em laboratório ou de longe, em satélites (Clark, 1999). As curvas espectrais são amplamente inespecíficas, pois há interferências dos constituintes do solo que se sobrepõe, somado aos ruídos instrumentais, são as principais desvantagens da técnica (Viscarra-Rossel and Mcbratney, 2008).

Para minimizar as desvantagens da ERD recomenda-se que os estudos devem avançar em calibrações, compreensão da complexidade espectral dos solo e para a aplicação e uso de espectros para o mapeamento e monitoramento do solo, para inferir sobre sua qualidade e fertilidade (Stenberg et al., 2010). O pré processamento espectral como alisamento para corrigir os ruídos são muito utilizados, além de análises de regressão, componentes principais, analise multivariada, redes neurais e arvores de decisão que ajudam na calibração e analises dos dados obtidos (Stenberg and Viscarra-Rossel, 2006)

A identificação dos atributos a partir da curva de reflectância dada pela espectroscopia é possível graças reflectância da cor do solo, influenciada por minerais e pelo conteúdo de MO e à agitação das moléculas de H-C, H-N e OH (Viscarra Rossel et al., 2006). Os fótons são absorvidos pelos minerais por vários processos e essa variedade de absorção, em cada comprimento de onda, permite a obtenção das informações sobre a química dos minerais presente na amostra (Clark, 1999)

Na faixa entre 420 – 480 nm e 510 – 620 nm, são faixas características para a caracterização dos óxidos de ferro, Hm e Gt, respectivamente (Sherman e Waite, 1985; Stenberg et al., 2010). Scheinost et al. (1998) apontam a ocorrência destes óxidos nas faixas de 530 – 590 nm para hematita, e 415 – 450 nm para goethita. Bahia et al., (2015) quantificaram estes óxidos de ferro utilizando uma faixa de 530 – 590 nm para Hm, e 415 – 450 nm para Gt, com coeficiente de regressão de 0,79 e 0,99, respectivamente. Cezar et al. (2013) estudando a curva espectral em minerais Hm, Gt e magnetita sintetizados em laboratórios apresentam relações não lineares com respectivos fatores de reflectância espectrais nas faixas de 780 – 950 nm, 595 – 770 nm e 1200 – 1930 nm.

Em 1400 nm a agitação do grupo de hidroxilas (OH) e H_2O ligadas no interior ou superfície dos minerais (Bishop et al., 2008; Goetz et al., 2001; Stenberg et al., 2010). As principais características espectrais da Ct e Gb, podem ser observadas devido a vibrações da combinação das moléculas Al-OH (Bishop et al., 2008; Gomez et l., 2008a; Kruse et al., 1991; Madeira Netto et al., 1995; Viscarra-Rossel, 2011). As bandas mais citadas na literatura são 2200 nm para Ct e 2265 nm para Gb (Demattê et al., 2017; Franceschini et al., 2018; Stenberg e Viscarra-Rossel, 2006; Viscarra-Rossel, 2011). Fernandes et al. (2020) obteve boa predição da caulinita na faixa de 2130 – 2260 nm e da gibbsita na faixa de 2240 – 2300 nm.

Sousa Junior et al. (2008) estudando o comportamento espectral de diferentes classes de solo em uma topos sequência na região de São Carlos – SP, observaram que o aumento no teor de matéria orgânica, argila e óxidos de ferro, resultam diretamente na diminuição da intensidade da reflectância do solo, enquanto maiores teores de areia quartzosa aumenta a reflectância do solo. Conforme os autores, o conteúdo de matéria orgânica e variações nos teores de argila influenciam as curvas espectrais mesmo em profundidade.

Existe uma importante relação com os padrões básicos de assinatura espectral, os solos brasileiros e as condições ambientes (Demattê et al., 2019). Solos com maiores conteúdos de areia apresentam maior reflectância do que solos de basalto, devido as cores dos minerais presentes em cada material. Outros fatores que causam variações nas curvas espectrais são o conteúdo de carbono, tamanho das partículas e umidade das amostras. Quanto maior umidade do solo menor intensidade de reflectância em toda espectral, maior mascaramento de minerais como a Ct e ocorre o deslocamento do início da absorção na faixa do VIS (Demattê et al., 2017). Guerrero et al. (2016) estudando o uso de bibliotecas espectrais, apontam que o uso de grandes bibliotecas também pode induzir a erros na quantificação de atributos do solo.

1.2.5 Mineralogia da Fração Argila por Espectroscopia de Reflectância Difusa

Os solos da região tropical e sub tropical são altamente intemperizados tendo como mineralogia característica óxidos de Fe e Al, e caulinita (Ct). Schhwertman e Taylor (1989) apontam a goethita (Gt) e hematita (Hm) como os principais óxidos Fe associados a mineralogia dos solos deste clima. A mineralogia é justificada pela maior solubilidade do Si em comparação com Al e Fe. A mineralogia do solo influencia os demais atributos do solo como cor, adsorção de cátions e ânions, estrutura, suscetibilidade a erosão e a contaminação, nível de fertilidade, entre outros (Camargo et al., 2008a; Carmo et al., 2016; Cornell e Schwertmann, 2003; Ferreira et al., 1999b, 1999a; Regmi et al., 2009). A formação dos óxidos e hidróxidos são pouco influenciadas pelas condições climáticas e práticas de manejo, portanto estes são considerados importantes indicadores pedogenéticos, por persistirem ao longo do tempo (Kampf e Curi, 2000).

O Planalto Ocidental Paulista apresenta uma extensão de 13 milhões de hectares, sendo 11 milhões formados por geologia arenítica e 2 milhões por geologia basáltica (Fernandes et al., 2007). Solos originados de Arenito apresentam altas quantidades de quartzo e óxido de silício, que por sua vez favorecem maior ocorrência de minerais como a Ct e Gb. A riqueza em quartzo favorece o processo de dissolução ou desintegração dos minerais primários que são ricos em silício, assim o silício que fica disponível na solução reorganiza-se com o alumínio formando a Ct, quando há

lixiviação de Si fica somente a Gb (Coelho e Vidal-Torrado, 2003; Furian et al., 2002). (Silva et al., 2020) estudando os solos do Planalto observou que os valores dos indicies de intemperismo, Ki e Kr, dos solos de referência dos Arenitos, apresentam valores que apontam e classificam estes como cauliníticos a cauliníticos oxídicos.

Com o conhecimento dos minerais característicos da fração argila dos solos é possível a divisão e definição de áreas homogêneas na paisagem graças à variabilidade espacial destes que dependem do relevo. Atualmente o mapeamento da mineralogia do solo sendo realizado por Espectroscopia de Reflectância Difusa (ERD) (Ackerson et al., 2015; Bahia et al., 2015b, 2015a; Bishop et al., 2008; Brown et al., 2006; R A Viscarra Rossel et al., 2010; Viscarra Rossel, 2011). A ERD é uma técnica rápida, fácil e eficiente para a caracterização dos solos, sem o uso de reagentes e de baixo custo (Cambou et al., 2016; England e Viscarra-Rossel, 2018; Gomez et al., 2008; Guerrero et al., 2016).

A caracterização dos minerais é possível a partir da ERD porque a técnica garante a captura das diferentes cores que os solos apresentam, pela reflectância da superfície das partículas e pela vibração de moléculas de água e íons de H^+ e OH^- ligados aos minerais (Bishop et al., 2008; Madeira Netto et al., 1995; Stenberg et al., 2010; R A Viscarra Rossel et al., 2010). Os óxidos de Fe já foram quantificados por Bahia et al. (2015a,b), Camargo et al., (2015b) e Viscarra-Rossel et al. (2010). Enquanto a Ct e Gb já foram quantificados por Fernandes et al., (2020), Madeira Netto et al. (1995), Mulder et al. (2013), Ramaroson et al., (2018), Vendrame et al. (2012) e Viscarra-Rossel (2011).

O estudo da variabilidade espacial da mineralogia dos solos tropicais (Camargo et al., 2014, 2013a; Cunha et al., 2005; Silva et al., 2020) e sua relação com atributos físicos, como a estabilidade de agregados (Camargo et al., 2008b, 2008a; Ferreira; Fernandes e Curi, 1999b, 1999a; Ghidin et al., 2006; Albuquerque et al., 2000; Camargo et al., 2008b; Cortez et al., 2009; Ghindin et al., 2006; Ferreira et al., 1999) tem sido amplamente estudados, mas estudos que correlacionam os minerais aos estoques de carbono (C) e fósforo (P) ainda são escassos.

Estudos anteriores já relacionaram com sucesso a emissão de CO_2 e o estoque de C no solo, com Hm e Gt estimados por ERD em pequenas áreas (Bahia, 2012, 2016; Bahia et al., 2014, 2015). Estes resultados suportam a hipótese que a

mineralogia oxídica, Ct e Gb estimada por ERD podem influenciar no comportamento do estoque de C e P, em diferentes compartimentos geológicos e geomorfológicos em grandes áreas, como o POP. O estudo destes resultados auxiliará em políticas de uso e manejo do solo mitigando a emissão de CO_2 e reduzindo o uso de adubos fosfatados.

1.2.6 Técnicas estatísticas para caracterização, predição e mapeamento de atributos do solo

A demanda para aumento na produção de alimentos, a pressão para os solos expressarem o máximo de seu potencial, para aumento de áreas produtivas, para cultivo em solos arenosos, de baixa fertilidade, entre outros geram necessidade imediata de informações detalhadas. As técnicas convencionais de caracterização, predição e mapeamento de atributos do solo não acompanham esta necessidade. Estas técnicas apresentam limitações que tornam os estudos e mapas imprecisos para definição das práticas de manejo (Liu et al., 2020). Isto afeta diretamente a economia e sustentabilidade do país (Demattê et al., 2019).

Neste contexto surgem inúmeras técnicas alternativas, como sensores indiretos e técnicas matemáticas, que possibilitem tomadas de decisão em tempo real, até mesmo no campo (Ng et al., 2019). Os sensores, chamados proximais, que permitem a quantificação indireta de atributos do solo, como espectroscopia de refletância difusa (ERD), geram uma enorme quantidade de dados. Estes, por sua vez, precisam de tratamento e análises robustas que suportem seu nível de complexidade.

A curva espectral dos solos, obtida pela ERD pode geram centenas e dados. E em cada comprimento de onda, como mencionado anteriormente, é possível identificar, quantificar e/ou estimar atributos com alta precisão (Coblinski et al., 2020; Ng et al., 2019; Reda et al., 2019; Nocita et al., 2015; Goldshleger et al., 2004). Para tanto são necessárias técnicas estatísticas com capacidade de compreender a magnitude destes dados e nos fornecerem resultados precisos. Entre as mais utilizadas podemos citar a regressão mínima por quadrados parciais (PLSR), a arvore de decisão ou mais conhecida no termo em inglês radom forest (RF) e a

geoestatística, são técnicas que facilitam a compreensão e visualização destes dados com a rapidez e precisão exigidas.

A PLSR, citada na literatura as vezes como técnica quimiométrica (Thanasoulias et al., 2002), as vezes como técnica de aprendizado de máquina (Morellos et al., 2016), considera as correlações entre muitas variáveis para quantificar uma única variável. A técnica interpreta os padrões a partir de uma calibração rigorosa, com um banco de dados parciais (chamados de banco de dados de calibração), que envolve toda a variabilidade dos dados estudados. E em cima de um segundo banco de dados (chamados banco de dados de predição), estima o atributo de interesse (Viscarra-Rosse, 2008).

A técnica já tem sido utilizada com sucesso para predizer inúmeros atributos do solo, utilizando as curvas espectrais, em várias regiões do mundo. Utilizando a PLSR Bahia et al. (2015) estimaram os conteúdos de Hm e Gt; Fernandes et al. (2020) estimaram os conteúdos de Ct e Gb; Gomes (2017) e Camargo et al. (2015) estimaram os conteúdos de P disponível e adsorvido, respectivamente; e Bahia et al. (2017) estimaram os conteúdos de C e N. Estes trabalhos, realizados em solos brasileiros, demostram a potencialidade e diversidade da técnica. A nível internacional pode-se citar inúmeros outros trabalhos, com os mais variados atributos do solo (Viscarra-Rossel, 2008; Knox et al., 2015; Tajik et al., 2020; Amin et al., 2020; Asgari et al., 2020).

Os algoritmos de aprendizagem de máquinas, entre eles o RF, são mais precisos na estimativa de atributos do solo, quando comparados às técnicas paramétricas tradicionais, como regressões, por exemplo (Sothe et al., 2020). Especialmente quando o objeto de estudo é complexo e os dados a serem trabalhados são não lineares, com diferentes escalas e de diferentes tipos de fontes. A seleção do algoritmo apropriado para a construção do modelo é fundamental para otimizar os resultados no contexto dos dados disponíveis (Bui et al., 2020).

O RF, semelhante ao PLSR, consegue interpretar o padrão dos dados em um banco de dados chamado de treino, e depois testa esses padrões em um segundo banco de dados, chamado de teste. O algoritmo consegue captar os padrões não lineares dos dados, se adaptar e melhorar a precisão dos modelos (Marsland, 2015). Esta técnica permite o mapeamento de vários atributos do solo (Aitkenhead et al.,

2018; Moura-Bueno et al., 2019; Dotto et al., 2018; Knox et al., 2015; Tajik et al., 2020; Keskin et al., 2019) de forma rápida e eficiente. Todavia para solos brasileiros a técnica ainda tem sido pouco utilizada, ganhando maior destaque nos últimos anos.

A geoestatística tem sido convencionalmente utilizada em inúmeros trabalhos para apresentar o padrão da variabilidade espacial dos atributos do solo (Bahia et al., 2015, 2017; Camargo et al., 2018; Silva et al., 2020; Fernandes et al., 2020; Marques Jr et al., 2014, 2015; Silveiro et al., 2019). Esta, permite ampliar os conhecimentos adquiridos de uma pequena área, para grandes áreas, fazendo uso da krigagem (Vieira et al., 2000). Sabe-se que a geologia e as formas da paisagem influenciam a variabilidade espacial dos atributos do solo, desta forma a geoestatística permite a visualização e interpretação desses padrões (Souza et al., 2004; Cunha et al., 2005; Barbieri et al., 2019).

A associação dos sensores, a técnicas matemáticas, como as modelagens para estimativa de atributos e a geoestatística, permite que se obtenha conhecimento detalhado dos solos. Estes que por sua vez auxiliarão nas tomadas de decisão quanto as práticas de manejo, que viabilizem aumento da produtividade e a conservação dos recursos naturais.

1.3 Referências Bibliográficas

Ackerson JP, Demattê JAM, Morgan CLS (2015) Predicting clay content on field-moist intact tropical soils using a dried, ground VisNIR library with external parameter orthogonalization. **Geoderma** 259–260:196–204. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.06.002

Ahmed IU (2018) Forest Soil C: Stock and Stability under Global Change. **New Persepctives in Forest Science**. 3:37–67. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5772/46845

Aitkenhead M, Cameron C, Gaskin G, Choisy B, Coull M, Black H (2018) Digital RGB photography and visible-range spectroscopy for soil composition analysis. Geoderma 313:265–275. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.020

Albuquerque JA, Cassol EA, Reinert DJ (2000) Relação entre a erodibilidade em entressulcos e estabilidade dos agregados. **Rev. Bras. Ciência do Solo** 24:141–151. https://doi.org/10.1590/s0100-06832000000100016

Alves BJR, Zotarelli L, Jantalia CP, Boddey RM, Urquiaga S (2006) Emprego de isótopos estáveis para o estudo do carbono e do nitrogênio no sistema solo-planta. **Processos Biológicos No Sistema Solo-Planta** 13:343–368.

Amin I, Fkrat F, Mammadov E, Babayeb M. (2020) Soil Organic Carbon Prediction by Vis-NIR Spectroscopy: Case Study the Kur-Aras Plain, Azerbaijan. **Communications in soil Science and plant analysis** 51:726-734. https://doi.org/10.1080/00103624.2020.1729367

Arca MN, Weed SB. (1966) Soil agrgregation and porosity in relation to contents of free iron oxide and clay. **Soil Science** 109:282-288.

Asgari N, Ayoubi S, Demattê JAM, Dotto AC. (2020) Carbonates and organic matter in soils characterized by reflected energy from 350-25000 nm wavelength. **Journal of Mountain Science** 17:1636-1651. https://doi.org/10.1007/s11629-019-5789-9

Assad ED, Pinto HS, Martins SC, Groppo JD, Salgado PR, Evangelista B, Vasconcellos E, Sano EE, Pavão E, Luna R, Camargo PB, Martinelli LA (2013) Changes in soil carbon stocks in Brazil due to land use: Paired site comparisons and a regional pasture soil survey. **Biogeosciences** 10:6141–6160. https://doi.org/10.5194/bg-10-6141-2013

Azevedo AC, Bonumá AS (2004) Partículas coloidais, dispersão e agregação em latossolos. **Ciência Rural** 34:609–617. https://doi.org/10.1590/S0103-84782004000200046

Bahia ASRS (2012) **Espectroscopia de reflectância difusa como técnica auxiliar na caracterização da emissão de CO2 e atributos do solo**. 86f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – UNESP, Jaboticabal.

Bahia ASRS (2016) **Estimação de atributos do solo por espectroscopia de reflectância difusa e suscetibilidade magnética no contexto da paisagem**. 148f Tese (Doutorado em Agronomia Ciência do Solo) UNESP, Jaboticabal.

Bahia ASRS, Marques J, La Scala N, Cerri CEP, Camargo LA (2017) Prediction and Mapping of Soil Attributes using Diffuse Reflectance Spectroscopy and Magnetic Susceptibility. **Soil Science Society of America Journal** 81:1450–1462. https://doi.org/10.2136/sssaj2017.06.0206

Bahia ASRS, Marques Jr J, Siqueira DS (2015) Procedures using diffuse reflectance spectroscopy for estimating hematite and goethite in Oxisols of São Paulo, Brazil. **Geoderma Regional** 5:150–156. https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2015.04.006

Bahia ASRS, Marques Júnior J, Panosso AR, Camargo LA, Siqueira DS, La Scala N (2014). Iron oxides as proxies for characterizing anisotropy in soil CO 2 emission in sugarcane areas under green harvest. **Agric. Ecosyst. Environ.** 192:152–162.

Bahia ASRS, Marques Júnior J, Panosso AR, Camargo LA, Siqueira DS, Teixeira DDB, La Scala Júnior N (2015) Field-scale spatial correlation between contents of iron oxides and CO2 emission in an Oxisol cultivated with sugarcane. **Science Agriculture** 72:157–166. https://doi.org/10.1590/0103-9016-2014-0142

Balsam WL, Ellwood BB, Ji J, Williams ER, Long X, El Hassani A (2011) Magnetic susceptibility as a proxy for rainfall: Worldwide data from tropical and temperate climate. **Quat. Sci. Rev.** 30:2732–2744. https://doi.org/10.1016/j.quascirev.2011.06.002

Barbieri DM, Marques Júnior J, Alleoni LRF, Garbuio FJ, Camargo LA (2009) Hillslope curvature, clay mineralogy, and phosphorus adsorption in an Alfisol cultivated with sugarcane. **Science Agriculture** 66:819–826. https://doi.org/10.1590/S0103-90162009000600015

Barbieri DM, Marques Júnior J, Alleoni LRF, Garbuio FJ, Camargo LA (2009) Hillslope curvature, clay mineralogy, and phosphorus adsorption in an Alfisol cultivated with sugarcane. **Science Agriculture** 66:819–826. https://doi.org/10.1590/S0103-90162009000600015

Bishop JL, Lane MD, Dyar MD, JBA (2008) Reflectance and emission spectroscopy study of four groups of phyllosilicates: smectites, kaolinite-serpentines, chlorites and micas. **Clay Minerals** 43:35–54. https://doi.org/10.1180/claymin.2008.043.1.03

Blackmore AV. (1973) Aggregation of clay by the productsof iromn (III) hydrolysis. **Australian Journal Soil Research** 11:75-85.

Brown, D.J., Shepherd, K.D., Walsh, M.G., Dewayne Mays, M., Reinsch, T.G., 2006. Global soil characterization with VNIR diffuse reflectance spectroscopy. Geoderma 132, 273–290. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.04.025

Bui DT, Tsangaratos P, Nguyen VT, Liem NV, Trinh PT. (2020) Comparing the prediction performance of a Deep Learning Neural Network model with conventional machine learning models in landslide susceptibility assessment. **Catena** 188:104426. https://doi.org/10.1016/j.catena.2019.104426

Camargo LA, Marques J, Barrón V, Alleoni LRF, Barbosa RS, Pereira GT (2015) Mapping of clay, iron oxide and adsorbed phosphate in Oxisols using diffuse reflectance spectroscopy. **Geoderma** 251–252:124–132. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.03.027

Camargo LA, Marques J, Pereira GT, Alleoni LRF (2013) Spatial correlation between the composition of the clay fraction and contents of available phosphorus of an Oxisol at hillslope scale. **Catena** 100:100–106. https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.07.016

Camargo LA, Marques Jr J, Barrón V, Alleoni LRF, Pereira GT, Teixeira DB, Bahia ASRS. (2018) Predicting potentially toxic elements in tropical soils from iron oxides, magnetic susceptibility and diffuse reflectance spectra. **Catena** 165:503-215. https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.02.030

Camargo LA, Marques Júnior J, Pereira GT, Bahia ASRS (2014) Clay mineralogy and magnetic susceptibility of Oxisols in geomorphic surfaces. **Science Agriculture** 71:244–256. https://doi.org/10.1590/S0103-90162014000300010

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

Camargo LA, Marques Júnior J, Pereira GT, Horvat RA (2008b) Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um Latossolo sob diferentes formas do relevo. II - Correlação espacial entre mineralogia e agregados. **Revista Brasileira Ciência do Solo** 32:2279–2288. https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000600007

CAMARGO, L. A. et al. Clay mineralogy and magnetic susceptibility of Oxisols in geomorphic surfaces. **Scientia Agricola**, v. 71, n. 3, p. 244–256, 2014.

Cambou A, Cardinael R, Kouakoua E, Villeneuve M, Durand C, Barthès BG (2016) Prediction of soil organic carbon stock using visible and near infrared reflectance spectroscopy (VNIRS) in the field. **Geoderma** 261:151–159. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.007

Carmo DAB, Marques Júnior J, Siqueira DS, Bahia ASRS, Santos HM, Pollo, GZ (2016) Cor do solo na identificação de áreas com diferentes potenciais produtivos e qualidade de café. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 51:1261–1271. https://doi.org/10.1590/S0100-204X2016000900026

Cezar E, Nanni MR, Chicati ML, Souza IG, Costa ACS (2013) Uso de dados espectrais para estimar a relação entre óxidos de ferro e minerais 2:1 com suas respectivas reflectâncias. **Semina: Ciências Agrarias** 34:1479–1492. https://doi.org/10.5433/1679-0359.2013v34n4p1479

Clark RN (1999) Spectroscopy of Rocks and Minerals and Principles of Spectroscopy. Manual of Remote Sensing. **Remote Sensing for the Earth Sciences**: Manual of Remote Sensing. 3–58.

Coblinski JA. et al. (2020) Prediction of soil texture classes through different wavelength regions of reflectance spectroscopy at various soil depths. **Catena** 189:104485.

Coelho MR, Vidal-Torrado P (2003) Desenvolvidos De Arenito Do Grupo Bauru. **Revista Brasileira Ciência do Solo** 27:495–507.

Conant RT, Easter M, Paustian K, Swan A, Williams S (2007) Impacts of periodic tillage on soil C stocks: A synthesis. **Soil Tillage Researsch** 95:1–10. https://doi.org/10.1016/j.still.2006.12.006

Cordell D, Drangert JO, White S (2009) The story of phosphorus: Global food security and food for thought. **Glob. Environ. Chang.** 19:292–305. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2008.10.009

Cornell RM, Schwertmann U (2003) The Iron Oxides: Struture, properties, reactions, occurences and uses. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA,Weinheim.

Costa OV, Cantarutti RB, Fontes LEF, Costa LM, Nacif PGS, Faria JC (2009) Estoque de carbono do solo sob pastagem em área de tabuleiro costeiro no sul da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 33:1137–1145. https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000500007

Crowley JK, Vergo N (1988) near-infrared reflectance spectra of mixtures of kaolin-group minerals. **Use in clay mineral studies** 36:310–316.

Cunha P, Marques Júnior J, Curi N, Pereira GT, Lepsch IF (2005) Superfícies geomórficas e atributos de Latossolos em um sequência arenítico-basáltica da região de Jaboticabal (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 29:81–90.

Demattê JAM, et al. (2019) The Brazilian Soil Spectral Library (BSSL): A general view, application and challenges. **Geoderma** 354:113793. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.05.043

Demattê JAM, Horák-Terra I, Beirigo RM, Terra FS, Marques KPP, Fongaro CT, Silva ACS, Vidal-Torrado (2017) Genesis and properties of wetland soils by VIS-NIR-SWIR as a technique for environmental monitoring. **Journal Enviromenmental Manag**. 197:50–62. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.014

Dematte JAM, Morgan CLS, Chabrillat S, Rizzo R, Franceschini MHD, Terra FS, Vasques GM, Wetterlind J (2016) Spestral sensing from ground to space in soil science: stat of the art, applications, potencial and perspectives, in: **Remote Sensing Handbook**: Land Resources Monitoring, Modeling and Mapping with Remote Sensing. pp. 661–732.

Dotto AC, Dalmolin RSD, Caten AT, Grunwald S. (2018) A systematic study on the application of scatter-corrective and spectral- derivative preprocessing for multivariate prediction of soil organic carbon by Vis-NIR spectra. **Geoderma** 314:262-274.

Eberhardt DN, Vendrame PRS, Becquer T, Guimarães MDF (2008) Influência da granulometria e da mineralogia sobre a retenção do fósforo em latossolos sob pastagens no cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 32:1009–1016. https://doi.org/10.1590/s0100-06832008000300010

Elser J, Bennett E (2011) Phosphorus cycle: A broken biogeochemical cycle. **Nature** 478:29–31. https://doi.org/10.1038/478029a

England, J.R., Viscarra-Rossel, R.A., 2018. Proximal sensing for soil carbon accounting. Soil 4, 101–122. https://doi.org/10.5194/soil-4-101-2018

FAO (2019) **Fome aumenta no mundo e atinge 820 milhões de pessoas, diz relatório da ONU [WWW Document].** Nações Unidas Bras. URL http://twixar.me/FXfT

Fernandes K (2017) **Estimativa da caulinita e gibbsita por técnicas de difração de raios x e espectroscopia de reflectância difusa dos solos do planalto ocidental paulista.** 70f. Dissertação (Mestrado em Agronomia – Ciência do Solo – UNESP, Jaboticabal.

Fernandes K, Marques Jr J, Bahia ASRS, Demattê JAM, Ribon AA (2020) Landscape-scale spatial variability of kaolinite-gibbsite ratio in tropical soils detected by diffuse reflectance spectroscopy. Catena 195, 104795. https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104795

Fernandes LA, Castro AB, Basilici G (2007) Seismites in continental sand sea deposits of the Late Cretaceous Caiuá Desert, Bauru Basin, Brasil. **Sediment. Geology** 199:61–64. https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2005.12.030

Ferreira MM, Fernandes B, Curi N (1999a) Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 515–524. https://doi.org/10.1590/s0100-06831999000300004

Ferreira MM, Fernandes B, Curi N (1999b) Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos da região sudeste do Brasil. **Rev. Bras. Ciência do Solo** 23:507–514. https://doi.org/10.1590/S0100-06832009000100004

Franceschini MHD, Demattê JAM, Kooistra L, Bartholomeus H, Rizzo R, Fongaro CT, Molin JP (2018) Effects of external factors on soil reflectance measured on-the-go and assessment of potential spectral correction through orthogonalisation and standardisation procedures. **Soil Tillage Research** 177. https://doi.org/10.1016/j.still.2017.10.004

Furian S, Barbiéro L, Boulet R, Curmi P, Grimaldi M, Grimaldi C (2002) Distribution and dynamics of gibbsite and kaolinite in an oxisol of Serra do Mar, southeastern Brazil. **Geoderma** 106:83–100. https://doi.org/10.1016/S0016-7061(01)00117-3

Gerland P, Raftery AE, Ev Ikova H, Li N, Gu D, Spoorenberg T, Alkema L, Fosdick BK, Chunn J, Lalic N, Bay G, Buettner T, Heilig GK, Wilmoth J (2014) World population stabilization unlikely this century. **Science** 346:234–237. https://doi.org/10.1126/science.1257469

Ghidin AA, Melo VDF, Costa V, Maria J, Costa J (2006) Topossequências de Latossolos originados de rochas basálticas no Paraná. I - Mineralogia da fração argila. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 30:293–306.

Goetz AFH, Chabrillat S, Lu Z (2001) Field Reflectance Spectrometry for Detection of Swelling Clays at Construction Sites. F. Anal. **Chem. Technol.** 5:143–155. https://doi.org/10.1002/fact.1015

Goldberg S. (1989) Interactions of aluminum and iron oxides and clay minerals and their effect on soil physical properties: A review. **Communications in soil science and plant analysis** 20:1181-1207.

Goldshleger N. et al. SOIL Reflectance As A Tool For Assessing Physical Crust Arrangement Of Four Typical Soils In Israel. **Soil Science** 169:677–687.

Gomes RP (2017) **Gênese, Mineralogia E Dinâmica Do Fósforo Nos Solos Do Planalto Ocidental Paulista Gênese , Mineralogia E Dinâmica Do Fósforo**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) Universideade Estadual Paulsita.

Gomez C, Lagacherie P, Coulouma G (2008) Continuum removal versus PLSR method for clay and calcium carbonate content estimation from laboratory and airborne hyperspectral measurements. **Geoderma** 148:141–148. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.09.016

Guerrero C, Wetterlind J, Stenberg B, Mouazen AM, Gabarrón-Galeote MA, Ruiz-Sinoga JD, Zornoza R, Viscarra-Rossel RA (2016) Do we really need large spectral libraries for local scale SOC assessment with NIR spectroscopy? **Soil Tillage Research** 155:501–509. https://doi.org/10.1016/j.still.2015.07.008

Kämpf N, Curi N. (2000) **Óxidos de ferro**: Indicadores de ambientes pedogênicos e geoquímicos. In: Novais RN, Álvarez VVH, Schaefer CEGR. Tópicos em ciências do solo. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 107-138.

Kemper WD, Chepil WS (1965) Aggregate stability and size distribution. In: Black CA (Ed.) **Methods of soil analysis. Madison**: ASA, pt. 1, p. 499-510.

Keskin H, Grunwald S, Harris WG. (2019) Digital mapping of soil carbon fractions with machine learning. **Geoderma** 339:40-58. https://doi.org/10.1016/j.geoderma. 2018.12.037

Knox NM, Grunwald S, McDowell ML, Bruland GL, Myes DB, Harris WG. (2015) Modelling soil carbon fractions with visible near-infrared (VNIR) and mid-infrared. **Geoderma** 239-240:229-239. http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.10.019

Kruse FA, Geoimaging H, Hauff P (1991) Spectral identification (1 . 2-2 . 5 μ m) and characterization of Paris Basin kaolinite / smectite clays using a field spectrometer. **Phys. Meansurements Signatures Remote Sens** 5:181–184.

Leal FT, França ABC, Siqueira DS, Teixeira DDB, Marques Júnior J, La Scala Júnior N (2015) Characterization of potential CO2 emissions in agricultural areas using magnetic susceptibility. **Sci. Agric.** 72:535–539. https://doi.org/10.1590/0103-9016-2014-0420

Liu, X. et al. (2020) A graded proportion method of training sample selection for updating conventional soil maps. **Geoderma** 357:113939.

Lybbert TJ, Sumner DA (2012) Agricultural technologies for climate change in developing countries: Policy options for innovation and technology diffusion. **Food Policy** 37:114–123. https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2011.11.001

Madeira Netto J, Bédidi A, Pouget M, Cervelle B, Flay N (1995) Spectral (MIR) determination of kaolinite and gibbsite contents in lateritic soils. C.R. **Acad. Sci. ParisIIa**, 119–128.

Marques Jr J et al. (2014) Magnetic susceptibility and diffuse reflectance spectroscopy to characterize the spatial variability of soil properties in a brazilian haplustalf. **Geoderma** 219–220:63–71.

Marques Jr J, Alleoni LRF, Teixeira DB, Siqueira DS, Pereira GT. (2015) Sampling planning of micronutrients and aluminium of the soils of. **Geoderma Regional** 4:91–99.

Marsland SW (2015) **Machine Learning An Algorithmic Perspective**. 2. ed. 2015

McIntyre DS. (1956) The effect of free ferric oxide on the structure of some Terra Rossa and Rendzina soils. **Journal Soil Science** 7:302- 306.

Mew MC (2016) Phosphate rock costs, prices and resources interaction. **Sci. Total Environ** 542:1008–1012. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.045

Minasny B, McBratney AB, Hartemin AE (2010) Global pedodiversity, taxonomic distance, and the World Reference Base. **Geoderma** 155:132–139. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.04.024

Mogollón JM, Beusen AHW, Van Grinsven HJM, Westhoek H, Bouwman AF (2018) Future agricultural phosphorus demand according to the shared socioeconomic pathways. **Glob. Environ. Chang**. 50:149–163. https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2018.03.007

Montanari R, Marques Júnior J, Campos MCC, Souza ZM, Camargo LA (2010) Caracterização mineralógica de Latossolos em diferentes feições do relevo na região de Jaboticabal, SP. **Revista Ciência Agronômica** 41:191–199.

Morellos A, Pantazi XE, Moshou D, Alexandridis T, Whetton R, Tziotzios G, Wiebensohn J, Bill R, Mouazen AM (2016) Machine learning based prediction of soil total nitrogen, organic carbon and moisture content by using VIS-NIR spectroscopy. **Biosystems engineering** 152:104–116. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng .2016. 04.018

Moura-Bueno JM, Dalmolin RSD, Caten AT, Dotto AC, Demattê JAM. (2019) Stratification of a local VIS-NIR-SWIR spectral library by homogeneity criteria yields more accurate soil organic carbon predictions Jean. **Geoderma** 337:565-581.

Mulder VL, Plotze M, Bruin S, Schaepman ME, Mavris C, Kokaly RF, Egli M (2013) Quantifying mineral abundances of complex mixtures by coupling spectral deconvolution of SWIR spectra (2.1-2.4 ??m) and regression tree analysis. **Geoderma** 207–208:279–290. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.05.011

Mulder VL, Plötze M, Bruin S, Schaepman ME, Mavris C, Kokaly RF, Egli M (2013) Quantifying mineral abundances of complex mixtures by coupling spectral deconvolution of SWIR spectra (2 . 1 – 2 . 4 μ m) and regression tree analysis. **Geoderma** 207–208:279–290. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2013.05.011

Nagra G, Burkett D, Huang J, Ward C, Triantafilis J (2017) Field level digital mapping of soil mineralogy using proximal and remote-sensed data. **Soil Use Manag**. 33: 425–436. https://doi.org/10.1111/sum.12353

Ng, W. et al. (2019) Convolutional neural network for simultaneous prediction of several soil properties using visible/near-infrared, mid-infrared, and their combined spectra. **Geoderma** 352:251–267.

Nocita M. et al. (2015) Soil Spectroscopy: An Alternative to Wet Chemistry for Soil Monitoring. **Advances in Agronomy** 132:139–159.

Oliveira ES, Reatto A, Roig HL (2015) Estoques De Carbono Do Solo Segundo Componentes Da Paisagem. **Cad. Ciência Tecnol. Brasília** 32:71–93.

Oliveira JF, Brossard M, Corazza EJ, Marchão RL, Vendramame PRS, Brito OR, Guimarães MF (2015) Vis-NIR spectrometry, soil phosphate extraction methods and interactions of soil attributes. **Quim. Nova** 38:342–350. https://doi.org/10.5935/0100-4042.20150009

Padarian J, Minasny B, McBratney AB (2015) Using Google's cloud-based platform for digital soil mapping. **Comput. Geosci**. 83:80–88. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.06.023

Quinton JN, Govers G, Van Oost K, Bardgett RD (2010) The impact of agricultural soil erosion on biogeochemical cycling. **Nat. Geosci**. 3:311–314. https://doi.org/10.1038/ngeo838

Raliya R, Tarafdar JC, Biswas P (2016) Enhancing the Mobilization of Native Phosphorus in the Mung Bean Rhizosphere Using ZnO Nanoparticles Synthesized by Soil Fungi. **J. Agric. Food Chem**. 64:3111–3118. https://doi.org/10.1021/acs.jafc.5b05224

Ramaroson, Volaniaina H, Becquer T, Oliveira S, Raza H, Larvy J, Blavet D, Vendrame PRS, Rabeharisoa L, Rakotondrazafy AFM (2018) Mineralogical analysis of ferralitic soils in Madagascar using NIR spectroscopy. **Catena** 168:102–109. https://doi.org/10.1016/j.catena.2017.07.016

Reda R. et al. (2019) A comparative study between a new method and other machine learning algorithms for soil organic carbon and total nitrogen prediction using near infrared spectroscopy. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems** 195,.

Regmi R, Black C, Sudakar C, Keyes PH, Naik R, Lawes G, Vaishnava P, Rablau C, Kahn D, Lavoie M, Garg VK, Oliveira AC (2009) Effects of fatty acid surfactants on the magnetic and magnetohydrodynamic properties of ferrofluids. **J. Appl. Phys.** 106. https://doi.org/10.1063/1.3259382

Rockstrom J., et al. (2009) A safe operating space for humanity. **Nature** 461:472–475. https://doi.org/10.1109/TIP.2011.2165549

Sanchez MGB, Marques J, Siqueira DS, Camargo LA, Pereira GT (2013) Delineation of specific management areas for coffee cultivation based on the soil-relief relationship and numerical classification. **Precision Agriculture** 14:201–214. https://doi.org/10.1007/s11119-012-9288-z

Scheinost AC, Chavernas A, Barrón V, Torrent J (1998) Use and limitations of second-derivative diffuse reflectance spectroscopy in the visible to near-infrared range to identify and quantify Fe oxide minerals in soils. **Clays Clay Minerals** 46:528–536. https://doi.org/10.1346/CCMN.1998.0460506

Sherman DM, Waite TD (1985) Electronic spectra of Fe3+ oxides and oxide hydrxides in the nerar IR to nerar UV. **Am. Mineral.** 70:1262–1269. https://doi.org/10.1080/13658816.2015.1131828

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

Silveiro NEQ, Siqueira DS, Coelho RM, Da Costa Ferreira D, Marques JJr. (2019) Protocol for the use of legacy data and magnetic signature on soil mapping of São Paulo Central West, Brazil. **Science Of The Total Environment** 693:133463, 2019. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.269

Sothe C. et al. (2020) A comparison of machine and deep-learning algorithms applied to multisource data for a subtropical forest area classification. **International Journal of Remote Sensing** 41:1943–1969.

Sousa Junior JGDA, Demattê JAM, Genú AM (2008) Comportamento Espectral Dos Solos Na Paisagem A Partir De Dados Coletados Por Sensores Terrestre E Orbital. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 32:727–738.

Souza ZM, Marques Junior J, Pereira GT. (2004) Variabilidade espacial da estabilidade de agregados e matéria orgânica em solos de relevos diferentes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 39:491-499.

Stenberg B, Viscarra-Rossel RA (2006) Diffuse Reflectance Spectroscopy for High-Resolution Soil Sensing. **Proximal Soil Sensing**. pp. 29–47.

Stenberg B, Viscarra-Rossel RA, Mouazen AM, Wetterlind J (2010) Visible and Near Infrared Spectroscopy in Soil Science. **Soil Science** 163–215. https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)07005-7

Taijk S, Ayoubi S, Zeraatpisheh M. (2020) Digital mapping of soil organic carbon using ensemble learning model in Mollisols of Hyrcanian forests, northern Iran. **Geoderma** Regional 20.

Terra FS, Demattê JAM, Viscarra-Rossel RA (2018) Proximal spectral sensing in pedological assessments: vis–NIR spectra for soil classification based on weathering and pedogenesis. **Geoderma** 318, 123–136. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.053

Thanasoulias NC, Piliouris ET, Kotti MSE, Evmiridis NP. (2002) Application of multivariate chemometrics in forensic soil discrimination based on the UV-Vis spectrum of the acid fraction of humus. **Forensic Science International** 130:73-82.

Vasques GM, Demattê JAM, Rossel RAV, Ramírez-Lopes L, Terra S, Viscarra Rossel RA, Ramírez-López L, Terra FS (2014) Soil classification using visible/near-infrared diffuse reflectance spectra from multiple depths. **Geoderma** 223–225:73–78. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.019

Vendrame PRS, Marchão RL, Brunet D, Becquer T (2012) The potential of NIR spectroscopy to predict soil texture and mineralogy in Cerrado Latosols. **Eur. J. Soil Sci.** 63:743–753. https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.2012.01483.x

Vieira SR, Millete J, Topp GC, Reynolds WD. (2000) **Handbook for geostatistical analysis of variability in soil and climate data.** Tópicos Ciência do Solo, 2:1 45.

Viscarra Rossel RA (2011) Fine-resolution multiscale mapping of clay minerals in Australian soils measured with near infrared spectra. J**. Geophys. Res. Earth Surf.** 116:1–15. https://doi.org/10.1029/2011JF001977

Viscarra Rossel RA, et al. 2016. A global spectral library to characterize the world's soil. **Earth-Science Rev**. 155:198–230. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.01.012

Viscarra-Rossel RA (2008) Parles: software for chemometric analysis of spectroscopic data. **Chemometries and Intelligent Laboratory Systems** 90:72-83.

Viscarra-Rossel RA (2011) Fine - resolution multiscale mapping of clay minerals in Australian soils measured with near infrared spectra. **J. Geophys. Res**. 116:1–15. https://doi.org/10.1029/2011JF001977

Viscarra-Rossel RA, Bui EN (2016) A new detailed map of total phosphorus stocks in Australian soil. **Sci. Total Environ**. 542:1040–1049. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.119

Viscarra-Rossel RA, Bui EN, Caritat P, Mckenzie NJ (2010) Mapping iron oxides and the color of Australian soil using visible – near - infrared reflectance spectra. **J. Geophys. Res.** 115:1–13. https://doi.org/10.1029/2009JF001645

Viscarra-Rossel RA, Chappell A, Caritat P, Mckenzie NJ (2010) Mapping the information content of Australian visible-near infrared soil spectra. World Congr. **Soil Sci. Soil Solut. a Chang. World** 19:91–94.

Viscarra-Rossel RA, Mcbratney AB (2008) Diffuse Reflectance Spectroscopy as a Tool for Digital Soil, in: Digital Soil Mapping with Limited Data. pp. 165–172. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-8592-5

Viscarra-Rossel RA, Walvoort DJJ, McBratney AB, Janik LJ, Skjemstad JO (2006) Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. **Geoderma** 131:59–75. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.03.007

CAPÍTULO 2 – Estoques de C e P em solos do Planalto Ocidental Paulista, no contexto Solo-Paisagem

Resumo: O estudo dos estoques de C e P do solo podem auxiliar em inúmeras tomadas de decisão, incluindo segurança alimentar e redução de emissão de gases. O objetivo desta pesquisa é caracterizar e mapear os estoques C e P, em solos do Planalto Ocidental Paulista (POP), no contexto das relações solo-paisagem. A área de estudo ocupa cerca de 13 milhões de hectares. É caracterizada por dois diferentes grupos geológicos: arenítico e basáltico; sob característica geomorfológica e pedológica complexas. Foram coletadas 600 amostras na área do POP para realização de análises físicas, mineralógicas e espectrais. E 44 pontos em áreas agrícolas e nativas (amostragem estratificada), para determinação dos estoques de C e P. A amostragem estratificada serviu como banco de dados de calibração para estimativa dos estoques em área total. A estimativa foi realizada por regressão mínima por quadrados parciais (PLSR). E os mapas foram realizados com auxílio de geoestatística. A integração dos componentes da paisagem (geologia, geomorfologia e pedologia) foram expressos pelo mapa de dissecação da paisagem (pouco, moderadamente e altamente dissecado). As áreas geologicamente relacionadas ao basalto estão relacionadas ao compartimento pouco dissecado. Enquanto áreas de arenito mais relacionado ao compartimento moderadamente dissecado. Observou-se que solos de áreas basálticas apresentam os maiores estoques de C e P, quando comparados aqueles de áreas areníticas. O uso de regressão mínima por quadrados parciais permite a confecção de mapas de estoques de C e P para os solos de toda a extensão do Planalto. Os mapas gerados podem servir como base para tomadas de decisões de práticas de manejo do solo, assim como para definições de políticas públicas de uso e ocupação do solo.

Palavras-chave: conservação do solo, planejamento e uso do solo, segurança alimentar.

2.1 Introdução

O Planalto Ocidental Paulista (POP) entende-se por cerca de 50% do território do estado de São Paulo. É uma região de extrema importância agrícola, participando de grande parte da produção de cana-de-açúcar e citros do país. O substrato da região é composto predominantemente por arenitos (85%), principalmente pela Formação Vale do Rio do Peixe e exposições de basaltos da Formação Serra Geral (Fernandes; Magalhães-Ribeiro, 2015). A geologia e geomorfologia conferem ao POP, ambientes propícios para a formação predominante de Latossolos e Argissolos (Embrapa, 2018).

O aumento na população mundial e escassez de alimento para essa população, causam enorme pressão na agricultura para aumento da produtividade (Padarian et al., 2015). Por outro lado, a preservação e conservação, dos recursos ambientais como solo e água, são fatores importantes para manutenção da vida terrestre. Muitos estudos caracterizam a variabilidade espacial de atributos do solo em pequenas áreas do POP (Bahia et al., 2015a; Camargo et al., 2008, 2014, 2015; Marques et al., 2014; Sanchez et al., 2009; Siqueira et al., 2010). Todavia na extensão total da área, pouco se sabe sobre as ligações entre os diferentes compartimentos geológicos, geomorfológicos e os atributos do solo.

O solo é um dos principais sistemas de armazenamento de C e alternativa para mitigação de emissão de CO_2 (Assad et al., 2013; Cambou et al., 2016; Lybbert e Sumner, 2012). E o P é um nutriente essencial para desenvolvimento das plantas (McLaughlin, 2019; Viscarra Rossel and Bui, 2016) e para produção de alimentos (Mogollón et al., 2018). Sabe-se que o estoque destes elementos, em alguns casos independem das práticas de manejo, mas sim da mineralogia do solo. A mineralogia governa o comportamento dos atributos físicos dos solos, adsorção de partículas, como o fosfato e até mesmo a emissão de gases (Bahia et al., 2015b; Camargo et al., 2015, 2008; Ferreira et al., 1999a; Viscarra Rossel and Bui, 2016). A associação destes estudos com mapas de variabilidade espacial torna o estudo da relação da mineralogia dos solos e estoques de C e P, de vital importância para gestão e planejamento agrícola.

Para aumento da produtividade agrícola e conservação do solo e da água, cada vez mais estudos tem como foco a geração e recomendações de práticas específicas

de manejo, e planejamento estratégico de níveis regionais e estaduais (Brown et al., 2006; Padarian et al., 2015). Lybbert e Sumner (2012) apontam que se devem adotar políticas específicas para criação de tecnologias agrícolas. Entre as políticas citadas pelos autores estão: o aumento do investimento em pesquisa e desenvolvimento agrícola em países desenvolvidos; a reconstrução e expansão da capacidade publica de pesquisa agrícola em países em desenvolvimento, para práticas de gestão do solo e segurança alimentar; ajudar a mitigar gastos e investir em melhores informações. E o conhecimento de todas as características do solo, permitirá a melhoria dessas políticas e avanço da fronteira agrícola brasileira (Padarian et al., 2015).

Para estudos desta magnitude deve-se quantificar atributos que expliquem todas as características e diversidades dos solos, como sua mineralogia. Todavia, a quantificação mineralógica em grandes áreas exige recursos econômicos e profissionais que nem sempre estão disponíveis (Bahia et al., 2015b; Camargo et al., 2015; Viscarra-Rossel, 2011). Neste cenário, pesquisadores tem sugerido o uso da espectroscopia de reflectância difusa (ERD) (Demattê et al., 2019; England and Viscarra-Rossel, 2018; Viscarra Rossel et al., 2017).

A ERD já foi utilizada com sucesso para mapeamento e caracterização de diversos atributos (Ackerson et al., 2015; Bahia et al., 2015b; Bishop et al., 2008; Brown et al., 2006; Buddenbaum and Steffens, 2012; Carmo et al., 2016). Entre estes atributos estão: a mineralogia da fração argila (Bahia et al., 2015a; Eberhardt et al., 2008; Madeira Netto et al., 1995; Silva et al., 2020; Viscarra-Rossel et al., 2010; Viscarra Rossel, 2011); os conteúdos de C (Cambou et al., 2016; England e Viscarra-Rossel, 2018; Guerrero et al., 2016); conteúdos de P (Camargo et al., 2015; Gomes, 2017) e até atributos físicos (Askari et al., 2015b, 2015a; Oliveira et al., 2016).

Inúmeros trabalhos têm como foco a adoção de novas metodologias, utilizando a ERD para estimativa de atributos em solos tropicais. Bahia et al. (2015) e Silva et al. (2020) estiram com eficiência os conteúdos de hematita (Hm) e goethita (Gt) para solos do estado de São Paulo, com alta eficiência. Fernandes et al. (2020) estimaram os conteúdos de caulinita (Ct) e gibbsita (Gb) para toda a extensão do planalto. Bahia et al. (2017) estimaram o conteúdo de C. Enquanto Gomes (2017) e Camargo et al. (2015) estimaram os conteúdos de P total e P adsorvido, respectivamente.

Assumindo que a ERD pode auxiliar no mapeamento de ambientes com diferentes estoques de C e P, e que a mineralogia condiciona diferentes ambientes de formação para os solos, o presente estudo teve como objetivo caracterizar e mapear os estoques C e P, em solos do Planalto Ocidental Paulista, no contexto das relações solo-paisagem.

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Caracterização da área de estudo

A área de estudo está inserida no Planalto Ocidental Paulista, que corresponde aproximadamente 13 milhões de hectares (~ 48% do Estado de São Paulo) (Figura 1). Na região norte e noroeste do Planalto prevalece o clima tropical com estação seca de inverno, enquanto na região sul prevalece o clima temperado úmido com verão quente. Na parte leste e sudeste o clima é temperado úmido com inverno seco e verão quente. Nestas regiões pode ser subclassificado em mais 4 variações de acordo com Thornthwaite. A vegetação natural da área era Mata Atlântica na região oeste e Cerrado na região leste e sudoeste do Planalto, sendo o uso atual mais representativo cultivo de cana-de-açúcar e pastagem.

O esboço geológico é caracterizado principalmente por sedimentos arenosos, argilosos e cascalho, rochas vulcânicas de composição básica e sequências sedimentares, principalmente psamíticas, podendo incluir piroclásticas (Figura 1a). Dos 13 milhões de hectares do Planalto, aproximadamente 2 milhões hectares são ocupados por basalto (15,5%), 7,4 milhões hectares pela Formação Vale do Rio do Peixe (57,1%) e 3,6 milhões de hectares pelas outras formações sedimentares (27,5%).

As formações geológicas do Planalto são divididas em dois Grupos: (i) Grupo Caiuá composto pelas Formações Santo Anastácio e Rio Paraná no estado de São Paulo, correspondente a depósitos de lençóis de areia, de clima seco, acumulados em extensas e monótonas planícies desérticas, marginais dos grandes complexos de dunas do sand sea (Deserto Caiuá) que se estende para região norte do estado do Paraná. O Grupo Bauru é composto pelas formações Uberaba, Vale do Rio do Peixe,

Araçatuba, São José do Rio Preto, Presidente Prudente e Marília. Inclui ainda os Analcimitos Taiúva, rochas vulcânicas localmente intercaladas na sequência (Fernandes, 2004; Fernandes et al., 2007).

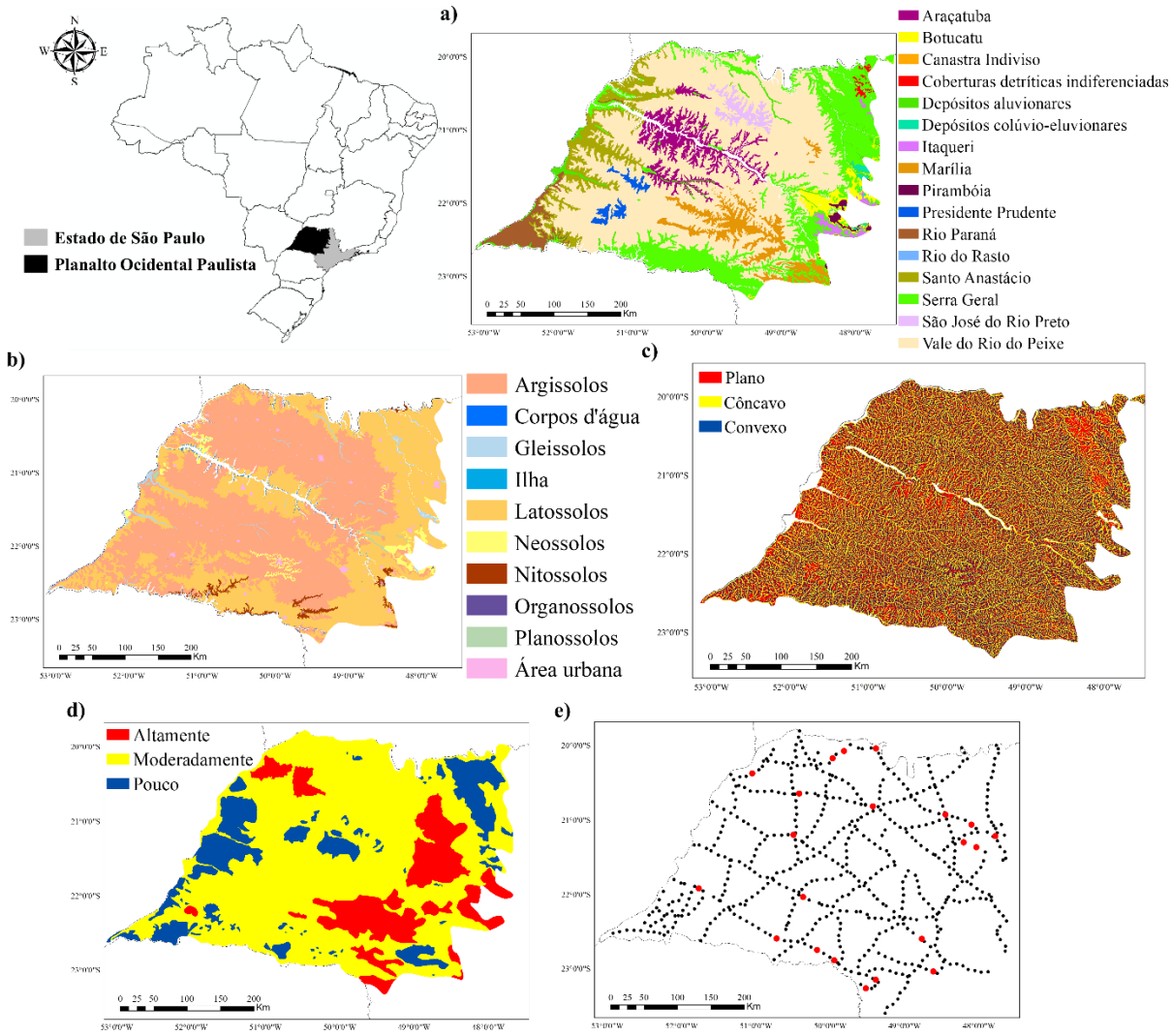


Figura 1. a) Mapa geológico atualizado do Planalto Ocidental Paulista. Fonte: Mod. de Fernandes e Magalhães-Ribeiro (2015). b) Mapa pedológico do Planalto Ocidental Paulista. FONTE: Instituto Agronômico de Campinas. c) Mapa de formas da paisagem d) Mapa de dissecação do Planalto Ocidental Paulista. e) Planejamento amostral dos pontos coletados.

Os solos de maior ocorrência são classificados como Argissolo Vermelho-Amarelo, Latossolo Vermelho, Latossolo férrico, Neossolo Litólico, Nitossolo

Vermelho e Gleissolo Háplico (Figura 1b). A Figura 1d mostra o mapa da assinatura geomorfométrica da área estudada (Vasconcelos et al. 2012). A integração dos componentes da paisagem (geologia, geomorfologia e pedologia) possibilitou a compilação do mapa de dissecação da paisagem (pouco, moderadamente e altamente dissecado, Figura 1c). As áreas geologicamente relacionadas ao basalto estão relacionadas ao compartimento pouco dissecado. Enquanto áreas de arenito mais relacionado ao compartimento moderadamente dissecado. Assim, o nível de dissecação expressa a evolução do solo na paisagem, que está associada a pedogênese (taxa de formação do solo) e geomorfogênese (taxa de evolução da paisagem). Para o delineamento dos compartimentos de dissecação foi utilizado o mapa de relevo do IBGE (Fernandes e Coimbra, 2000) e com auxílio da metodologia proposta por Vasconcelos et al. (2012).

2.2.2 Planejamento Amostral

Foram coletadas 600 amostras de solo georreferenciadas no Planalto Ocidental Paulista para o estudo da variabilidade espacial dos atributos em estudo na profundidade de 0,00 – 0,20 m. o espaçamento mínimo entre as amostras foi de 10 km e o espaçamento máximos de 60 km (Figura 1e).

As amostras foram coletadas seguindo as rodovias do Estado de São Paulo, em locais representativos com mínima interferência antrópica. Com base no arquivo de rodovias do Estado fornecidas pelo Departamento de Estradas e Rodagem foi elaborado o plano de amostragem utilizando a ferramenta ET GeoWizards no ArcView 9.3. As informações das coordenadas de cada ponto foram definidas previamente e inseridos em um GPS de navegação com precisão de 3 a 5 metros. A coleta das amostras foi orientada por navegação em tempo real utilizando GPS e notebooks.

Após a identificação dos padrões de variabilidade dos atributos do solo e identificação de áreas homogêneas foram selecionados pontos simulando amostragem estratificada (Dinkins e Jonessoil, 2008), 22 pontos em vermelho na Figura 1e. Os pontos estratificados foram coletados de foram a representar uma área agrícola e mata nativa mais próxima e de forma a representarem a variação de vários atributos da área (mineralogia - Hm, Gt e a razão Ct/(Ct+Gb), granulometria, geologia,

pedologia e geomorfologia). A adoção desta amostragem foi determinada com base em inúmeras pesquisas anteriores (Campos et al., 2012; Fernandes et al., 2020; Marques Júnior et al., 2015; Peluco, 2016; Siansi, 2019; Silva et al., 2020; Silveiro et al., 2019; Teixeira et al., 2013)

A amostragem estratificada é representativa dos compartimentos, fatores de formação do solo e causadores iniciais da variabilidade. Esse procedimento garante que os pontos selecionados nos compartimentos específicos, tenham o mesmo intervalo de referência e sejam representativos da mesma amplitude de variação dos dados. E a apresentação destes dados foi dividida em 6 compartimentos:

- Compartimento 1 (C1) – Amostra de solo originados de arenito em ambiente altamente dissecado;
- Compartimento 2 (C2) – Amostra de solo originados de arenito em ambiente moderadamente dissecado;
- Compartimento 3 (C3) – Amostra de solo originados de arenito em ambiente pouco dissecado;
- Compartimento 4 (C4) – Amostra de solo originados de basalto em ambientes altamente dissecado;
- Compartimento 5 (C5) – Amostra de solo originados de basalto em ambientes moderadamente dissecado;
- Compartimento 6 (C6) – Amostra de solo originados de basalto em ambientes pouco dissecado;

2.2.3 Caracterização dos atributos do solo

2.2.3.1 Análises granulométricas e químicas do solo

As análises granulométricas foram feitas para todos os pontos do POP e para os pontos estratificados. Foi utilizado o método da pipeta, com uma solução de NaOH 0,1 mol L^{-1} como dispersante químico e agitação mecânica em aparato de baixa rotação, por 16 horas, seguindo metodologia preconizada (EMBRAPA, 2017).

As análises químicas descritas a seguir também foram realizadas para todos os pontos do POP e para os pontos estratificados. O pH foi determinado potencio

metricamente utilizando-se relação 1:2,5 de solo: solução, sendo utilizada como solução apenas água. Os conteúdos de cálcio, magnésio e potássio foram extraídos utilizando-se o método da resina trocadora de íons (Raij et al., 2001). A acidez trocável (Al^{3+}) foi determinada seguindo a metodologia de Raij e Zullo (1977), e o carbono orgânico segundo (EMBRAPA, 2017), e transformado em matéria orgânica (MO) após multiplicação por 1,74. A capacidade de troca de cátions (CTC) foi obtido por: CTC = Mg + Ca + K + H + Al. A saturação por bases (V%) foi dada por: V% = (Mg+Ca+K) /CTC.

2.2.3.2 Análises mineralógicas

A mineralogia foi determinada para todas as amostras do POP, incluindo a amostras estratégicas. Foi determinado os teores de ferro relativo à totalidade de ferros pedogenéticos extraídos por ditionito-citrato-bicarbonato (Fed) seguiu a metodologia de (Mehra e Jackson, 1958) foram feitas para todos os pontos do grid e para as amostras estratificadas. A determinação dos teores de ferro extraídos por oxalato de amônio (Feo) relativos aos óxidos de ferro pedogenéticos de baixa cristalinidade seguiu a metodologia citada Camargo et al. (1986), adaptado de (Schwertmann, 1973).

Os minerais foram quantificados para alguns pontos do grid total e para todas as amostras estratificadas. A argila para a análise de difratometria de raios-X (DRX) foi separada da amostra de solo pelo método de centrifugação (Jackson, 1985). Na caracterização da Ct e da Gb, a fração argila foi submetida à eliminação dos óxidos de ferro pelo método ditionito-citrato-bicarbonato (DCB), segundo Mehra e Jackson (1960), e peneirada em malha de 0,10 mm. Os minerais da fração argila caulinita (Ct) e gibbsita (Gb) foram caracterizados por DRX em lâminas confeccionadas com material sem orientação (em pó). A caracterização da Gt e Hm foi feita após tratamento da fração argila com NaOH 5 mol L^{-1} (1g argila/100 ml solução), para a concentração dos mesmos, segundo método de Norrish e Taylor (1961) modificado por Kämpf e Schwertmann (1982).

A difração de raios X foi realizada com as amostras preparadas pelo método do pó, em aparelho HGZ equipado com cátodo de cobalto e filtro de ferro e radiação

K (20 mA, 30 kV) para a difração da Hm e Gt e cátodo de cobre com filtro de níquel para a difração da Ct e Gb. A velocidade de varredura empregada foi de 1º2θ/minuto e amplitude de 23 a 49°. Foram utilizados para avaliação mineralógica os reflexos da caulinita (001), gibbsita (002), hematita (012 e 110) e da goethita (110 e 111).

2.2.3.3 Espectroscopia de reflectância difusa (ERD)

A espectroscopia de reflectância difusa (ERD) foi determinada para todas as amostras do POP, incluindo a amostras estratégicas. Para a obtenção dos espectros de reflectância difusa, foi moído aproximadamente 1 g de solo (TFSA) em almofariz de ágata até obtenção de coloração constante e o conteúdo foi colocado em porta-amostras com espaço cilíndrico de 16 mm de diâmetro. Os valores de reflectância serão determinados em espectrofotômetro Lambda 950 UV/Vis/NIR acoplado com uma esfera integradora de 150 mm de diâmetro. Os espectros serão registrados em intervalos de 0,5 nm, com tempo de integração de 2,43 nm s^{-1} ao longo do intervalo de 380 a 2.500 nm (visível-VIS, infravermelho próximo-NIR e infravermelho de ondas curtas-SWIR).

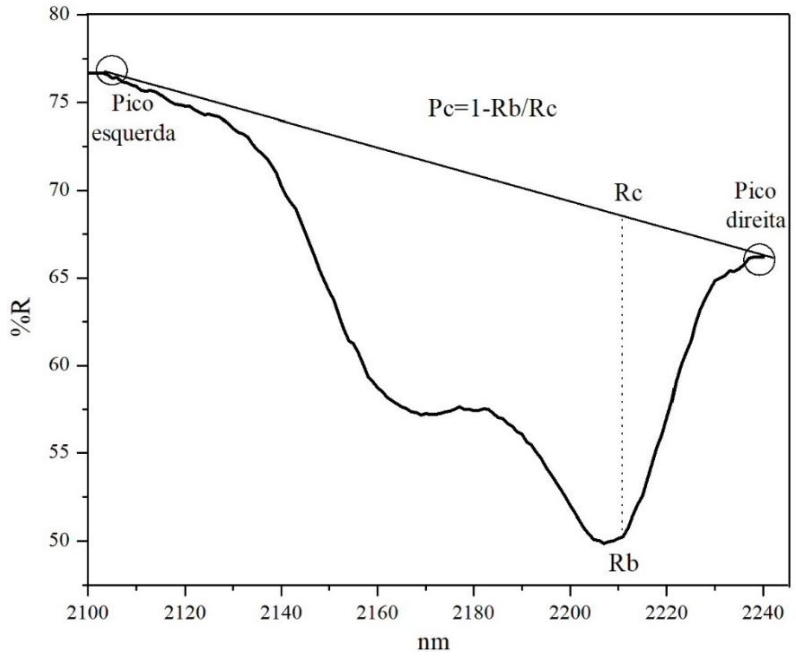


Figura 2. Análise dos vales espectrais para cálculos do contínuo removível (CR), considerando a faixa de ocorrência de cada mineral.

Os teores dos atributos minerais estudados serão estimados, de forma indireta, pela técnica do contínuo removível (CR) (Clark e Roush, 1984; Clark, 1999), para posterior correlação com os estoques de C e P. O CR será calculado dividindo-se os valores de reflectância originais com os valores correspondentes da linha sólida para cada mineral. A profundidade da banda de absorção (P) a um comprimento de onda específico (C), foi calculada por: Pc=1-Rb/Rc, em que Rb é o valor da reflectância na banda do espectro (valor mínimo de reflectância dentro da gama de sólido descartado) e Rc é o valor central da reflectância correspondente à banda do espectro central contínuo, como pode ser observado na Figura 2.

Finalmente, o sólido removível foi calculado de acordo com a equação: Pc=1-CR. Para a Ct utilizou-se a faixa de 2100 – 2240 nm (Demattê e Terra, 2014; Fernandes, 2017; Viscarra-Rossel et al., 2016; Dufréchou et al., 2015; Pizarro et al., 2001; Oliveira et al., 2016), para a Gb a faixa de 2240 a 2300 nm (Demattê e Terra, 2014; Fernandes, 2017; Oliveira et al., 2016; Dando e Dando, 2010; Pizarro et al., 2001), para Hm 530-590 nm e Gt 415-450 nm (Bahia et al., 2015; Viscarra-Rossel et al., 2010; Demattê et al. 2016; Silva et al. 2020).

2.2.3.4 Estoque de carbono e fósforo

Os estoques de C e P foram analisados apenas para as amostras estratificadas em áreas agrícolas e mata nativa num total de 44. Os valores de isótopos de C também foram realizados apenas para as amostras estratificadas, todavia a análise foi realizada por parceiros do grupo de pesquisa junto ao laboratório de Ecologia da Universidade de São Paulo.

Os teores totais de carbono (C%) do solo foram determinados por combustão via seca, no equipamento LECO CN-2000 (LECO Corporation, St Joseph, MI, USA). As amostras de solo (TFSA) foram passadas por peneira de 100 mesh e oxidadas a altas temperaturas (forno a 1350 ºC), com auxílio de oxigênio 2.8 ultrapuro. O fósforo disponível foi extraído utilizando-se o método da resina trocadora de íons (Raij et al., 2001).

Amostras indeformadas foram coletadas com anel volumétrico (com volume conhecido) nas profundidades de 0,00-0,05 m, com duas repetições, para determinação dos seguintes atributos físicos: porosidade, densidade do solo (DS) e umidade do solo. Para o cálculo da DS, serão determinadas as respectivas massas e umidade do solo contido no anel. A densidade de cada camada foi calculada de acordo com a equação:

$$DS\ (g\ cm^{-3}) = \ massa\ de\ solo\ seca\ (g)/volume\ do\ cilindro\ \ (cm^{-3})$$

O cálculo dos teores totais dos estoques de C e P foi efetuado mediante curvas de calibração cruzada e com base no peso da amostra analisada. Para cada amostra de solo, serão calculados os estoques de C e P (em Mg ha^{-1}), conforme equação descrita abaixo:

$$Estoque\ de\ P\ ou\ C = C\ ou\ P\ (\%) \times\ Densidade\ do\ solo\ (g\ cm^{-3}) \times\ Espessura\ (cm)$$

2.2.3.5 Agregados do solo

Em função da dificuldade da análise e coleta de material em campo, os agregados foram analisados em apenas alguns pontos do POP, apenas a nível de caracterização da área. Cerca de 220 pontos, dentro do total de 600 pontos. A análise de agregados depende do estado em que as amostras chegam ao laboratório. A estrutura original do solo não pode ser perdida ou alterada no transporte. Logo foi feita uma avaliação em todas as amostras e separadas para análise aquelas que não sofreram interferência durante o transporte.

A separação e a estabilidade dos agregados foram determinadas pelo método descrito por Kemper e Chepil (1965), com modificações, nas seguintes classes de diâmetro: > 2,0; 2,0–1,0; 1,0–0,5; 0,5–0,25; 0,25– 0,125 e 0,125–0,105 mm. As classes de agregados utilizadas neste estudo foram: > 2,0 e < 1,0 mm. Uma vez secas ao ar, as amostras com estrutura natural foram passadas em peneiras de malhas de 9,52 e 4,76 mm.

Os agregados retidos na peneira de 4,76 foram pesados e submetidos ao pré-umedecimento lento por meio dede atomização com água destilada e, posteriormente, foram agitados, por 15 min, em jogo de peneira com malhas de 2,0; 1,0; 0,5; 0,25; 0,125; e 0,105 mm, dentro de um recipiente que continha água (Figura 8B). A massa do material retido em cada peneira foi colocada em estufa a 105 °C. Mediante os resultados obtidos, foi calculado o diâmetro médio geométrico (DMG), que foi adotado como índice de estabilidade, de acordo com Mazurack (1950).

2.2.4 Análises Estatísticas

Os dados foram submetidos à estatística descritiva após finalização das análises laboratoriais. Foram calculados: média, máximo, mínimo desvio padrão, e coeficiente de variação. Para avaliação da diferença dos valores médios entre as áreas mínimas de manejo, identificadas com base nos modelos de paisagem. Essas análises foram realizadas com o uso do programa estatístico Minitab 14 (Minitab, 2000). Para averiguar a correlação entre os atributos do solo foram calculados os coeficientes de correlação simples.

A análise de regressão por mínimos quadrados parciais (PLSR) usa calibrações e validações quimiométricas, utilizando procedimento de validação cruzada. Foram realizadas a conversão das medidas de reflectância em absorbância (Log10(1/Reflectância) e usado o tratamento de dados de média centralizada para leitura dos dados. O software utilizado foi o ParleS® (Viscarra-Rossel, 2008) onde foi feita a relação entre toda a curva espectral e os atributos estudados.

Para a caracterização do padrão da variabilidade espacial, dos valores observados foi utilizada a análise geoestatística (Vieira, 2000). Semivariogramas relacionando o vetor distância à semivariância foram construídos e modelos foram ajustados. Os valores foram interpolados pela krigagem ordinária para a construção de mapas de distribuição espacial.

2.3 Resultados e Discussões

2.3.1. Correlação entre mineralogia quantificada por ERD e DRX

A Figuras 3 e 4 são apresentados os resultados da relação existente entre a estimativa de minerais a partir da ERD e a quantificação dos minerais por DRX, para toda área do POP. A Figura 3 mostra a relação existente entre a razão Ct/(Ct+Gb) obtida por difração de raios x (DRX) e pelo CR aplicado às curvas espectrais. O coeficiente de determinação (R^2) foi igual a 0,90, apontando que existe relação entre os resultados. Ou seja, a razão Ct/(Ct+Gb) pode ser estimada por ERD, como já observado por outros autores (Viscarra-Rossel, 2011; Mulder et al., 2013). Segundo Oliveira et al. (2013) os altos teores de Ct e Gb presentes nos solos, podem dificultar a interpretação dos minerais Ct e Gb de forma separada. As características de absorção são estreitas nas faixas destes minerais, e a combinação de moléculas de O-H, são outras dificuldades associadas a identificação dos minerais.

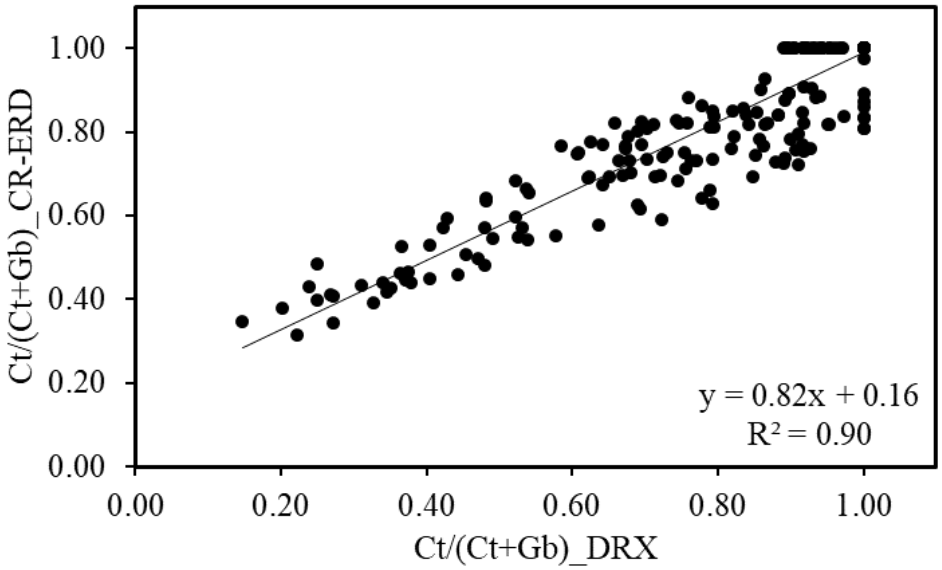


Figura 3. Estimativa entre a razão Ct/(Ct+Gb) calculada por difração de raios x (DRX) e calculada pela técnica de contínuo removível (CR) aplicado as curvas de espectroscopia de reflectância difusa (ERD). (Fonte: Extraído de Fernandes et al. 2020) (Número amostral: 600 Pontos).

Ainda que seja necessário o uso de DRX, para a formação de um banco de dados padrão, que irá permitir o conhecimento do comportamento dos minerais, a ERD pode estar associada. Esta segunda técnica permitirá mensuração de uma grande densidade amostral em grandes extensões territoriais, em menor tempo, com menor poluição e menos gastos. Viscarra-Rossel (2011) estimaram Ct, a partir do CR, com eficiência para os solos da Austrália. Mulder et al. (2013), utilizaram outro método matemático, a arvore de regressão, e também conseguiram estimar os teores de Ct para solos do Marrocos. Isto mostra que mesmo o uso de métodos matemáticos mais simples é possível estimar os atributos do solo.

A Figura 4 apresenta as relações entre Hm e Gt obtidas por DRX e obtidas por CR. A regressão para Hm apresentou um coeficiente de determinação igual a 0,85 e da Gb de 0,60. Bahia et al. (2015) ao estudarem a metodologia do CR para a estimativa destes óxidos em uma área menor do POP, encontraram maior índices de confiança para a Hm em relação a Gt. Provavelmente os melhores resultados observados por Bahia et al. (2015) apresentaram maiores índices de confiança devido ao tamanho da área e menor variabilidade geológica e geomorfológica. O Planalto trata-se de uma extensão com 13 milhões de hectares, com diferentes condições geológicas, geomorfológicas e até climáticas, que conferem aos solos diferentes ambientes de formação e pedogênese.

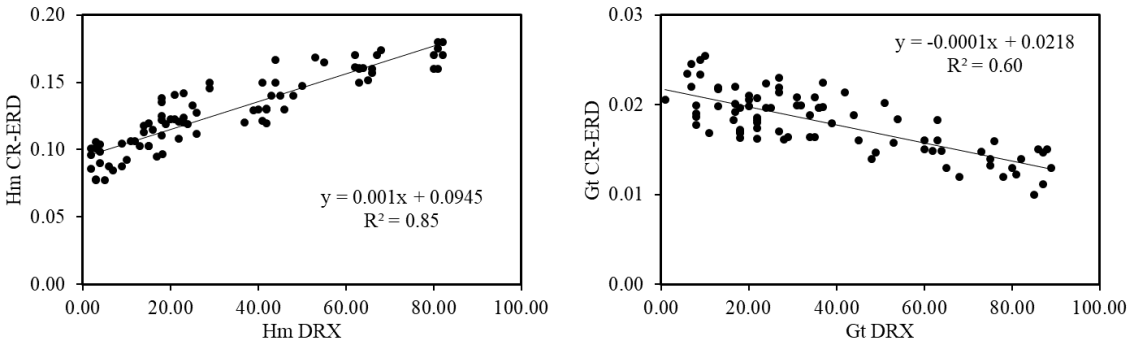


Figura 4. Estimativa dos minerais hematita (Hm) e goethita (Gt) calculada por difração de raios x (DRX) e calculada pela técnica de contínuo removível (CR) aplicado as curvas de espectroscopia de reflectância difusa (ERD). (Número amostral: 600 Pontos).

Ao estudarem a Hm e Gt estimada por ERD a partir da segunda derivada de Kubelka-Munk, Silva et al. (2020), quando relacionados com valores obtidos por DRX, observaram valores de R^2 de 0,81 e 0,61, respectivamente, para solos do POP. Valores semelhantes aos observados aqui, embora o método de quantificação seja diferente, mesmo usando a ERD. Estes autores apontam que o aumento dos teores de Gt afeta a refletância dos solos. Solos amarelos tem menor potencial de absorção de luz, quando comparados aos solos vermelhos, com maiores conteúdos de Hm (Fernandes et al. 2004). Logo, a quantificação da Gt pode ser um pouco prejudica.

Pode-se apontar o potencial da técnica para estimativa dos óxidos de ferro em grandes áreas. Segundo Viscarra-Rossel et al. (2016) que trabalharam com dados globais, a ERD permite encontrar relações locais entre os atributos do solo, e estimativas cada vez mais precisas, permitindo a obtenção de um robusto banco de dados. Ou seja, a ERD permite a estimativa de inúmeros atributos do solo, podendo contribuir até para maiores elucidações quanto a relação entre estes atributos, seja para melhoria das produtividades em campo, ou para melhoria do conhecimento na pesquisa (Exemplo: definição dos níveis de série e família no Sistema Brasileiro de Classificação de Solo).

Ramaroson et al. (2018) apontam que a técnica de ERD é ainda mais importante em países pobres, como o Madagáscar, onde os levantamentos de solo são incompletos, principalmente se tratando de grandes escalas. Segundo pesquisa realizada por estes pesquisadores a ERD fornece resultados confiáveis, acerca da mineralogia, permitindo o desenvolvimento de estudos detalhados sobre os solos da região e o avanço da agricultura. Dado o exposto podemos utilizar as curvas para inferir outros atributos, de extrema ligação com a mineralogia do solo, como os estoques de C e P, e definir os diferentes potenciais para conservação e uso eficiente destes no solo.

2.3.2 Caracterização da área de estudo

Para área total foram considerados os compartimentos geológicos e geomorfológicos separadamente, a fim de melhor caracterização e compreensão de toda a extensão e complexidade do POP (Tabela 1). Os solos originados do arenítico

apresentaram os maiores conteúdos de areia, típico para solos originados desde material de origem, correspondem a ocorrência da classe dos Argissolo, em sua maior proporção (Figura1). E nos solos originados do basáltico, registrou-se as maiores médias de argila para os níveis moderadamente e pouco dissecados. Esses, por sua vez, correspondem a classe dos Latossolos, na maior parte de sua extensão (Figura1). A granulometria indica a maior presença de solos intemperizados em áreas de basalto, relativamente aquelas de arenito.

Para o nível de dissecação a porcentagem de areia é maior para o compartimento altamente dissecado e menor para o pouco dissecado (Tabela 1). Enquanto o teor de argila aumenta do ambiente pouco dissecado para o altamente dissecado. Assim como para os compartimentos geológicos, a granulometria evidenciou a evolução dos solos entre os ambientes.

Os valores de pH apresentaram poucas alterações entre os diferentes compartimentos. O pH é um atributo facilmente alterável em função das práticas de manejo, e, portanto, pode não refletir diretamente a gênese dos solos. Bahia (2016) também não observaram influência da geologia ou geomorfologia para atributos químicos do solo. Panosso et al. (2012) também observaram alta influência das atividades antrópicas na variabilidade dos atributos químicos do solo, ao estudar áreas de cana-açúcar. O conteúdo de MO não apresenta grande diferença para os compartimentos geológicos, porém houve para os compartimentos geomorfológicos. Houve um acréscimo de 6 g Kg^{-1}, do ambiente pouco dissecado para o altamente dissecado. Ambientes altamente dissecados apresentam maior movimentação da paisagem e predomínio de áreas côncavas, favorecendo assim o maior acúmulo de água e os maiores conteúdos de MO.

Para o compartimento geológico o maior valor médio de argila, coincidiu com o maior valor médio de MO. Para os compartimentos geomorfológicos o resultado foi contrário. Maiores médias de MO estão associadas as menores médias de argila. Segundo Mendes (2015) apontam que os maiores conteúdos de argila aos maiores conteúdo de MO e maiores estoques de C.

Tabela 1. Estatística descritiva dos atributos granulométricos, químicos e mineralógicos dos solos para diferentes compartimentos geológicos e geomorfológicos do Planalto. (Número amostral: 600 pontos).

	Areia	Silte	Argila	pH	MO	CTC	V	Fed	Feo	Gt	Hm	Ct/
		%			g Kg^{-1}	$mmol_c$ dm^{-3}	%	g Kg^{-1}				(Ct+Gb)
ARENITO												
MÉD	73,0	11,0	16,0	4,9	17,8	71,6	60	18,2	0,9	3,9	20,3	0,9
MÍN	6,0	4,0	2,0	3,6	6,0	23,4	21	1,3	0,1	0,0	4,1	0,3
MÁX	93,0	75,0	68,0	7,4	54,0	357,7	97	76,3	8,6	52,5	67,4	1,0
DP	16,3	8,9	11,3	0,7	9,2	39,6	16	12,0	0,9	6,2	13,0	0,1
CV	22,6	74,9	72,7	14,4	51,4	55,3	27	65,6	97,4	161,1	64,1	12,1
BASALTO												
MÉD	44,0	24,0	32,0	4,7	18,0	59,6	48	45,7	3,1	9,0	46,6	0,5
MÍN	8,6	4,2	5,7	3,9	6,0	24,1	11	7,5	0,2	0,0	7,2	0,1
MÁX	90,0	73,0	59,0	6,2	58,0	109,2	85	63,4	6,3	41,0	71,6	1,0
DP	27,7	16,7	16,3	0,6	11,6	27,0	21	12,4	1,4	10,7	15,3	0,2
CV	62,9	68,0	52,2	13,1	64,2	45,3	44	27,2	47,2	118,0	32,8	44,0
ALTAMENTE DISSECADO												
MÉD	71,0	11,0	18,0	5,1	22,4	92,0	66	14,2	0,7	2,7	16,6	0,9
MÍN	10,0	2,0	2,0	3,6	8,0	33,7	30	1,3	0,1	0,0	5,4	0,3
MÁX	90,0	50,0	65,0	7,3	54,0	357,7	97	49,9	4,5	25,0	54,8	1,0
DP	16,2	7,5	12,1	0,8	11,8	63,3	15	8,4	0,6	4,7	11,1	0,1
CV	22,6	65,5	71,9	16,8	53,0	68,7	24	59,5	84,5	171,3	67,3	15,2
MODERADAMENTE DISSECADO												
MÉD	69,0	12,0	19,0	4,8	17,2	61,5	56	21,8	1,2	4,4	24,2	0,9
MÍN	8,0	4,0	2,0	3,7	6,0	25,7	11	2,1	0,1	0,0	4,1	0,2
MÁX	93,0	74,4	62,8	7,1	58,0	145,1	88	62,2	5,7	36,5	71,6	1,0
DP	20,2	10,4	13,2	0,6	9,0	22,7	16	15,3	1,1	6,7	16,4	0,1
CV	28,9	81,6	76,5	12,4	52,1	37,0	29	70,3	91,8	152,9	67,8	17,7
POUCO DISSECADO												
MÉD	65,0	15,0	20,0	4,9	16,1	68,7	57	25,8	1,5	5,7	27,8	0,8
MÍN	6,0	2,0	2,0	3,8	6,0	23,4	18	4,8	0,1	0,0	4,6	0,1
MÁX	92,0	74,0	68,0	7,4	41,0	155,4	90	76,3	8,6	52,5	69,9	1,0
DP	22,3	13,0	13,5	0,7	7,5	29,9	19	16,0	1,5	8,7	17,1	0,2
CV	33,9	83,4	73,4	14,4	46,	43,5	33	62,0	103,1	152,1	61,7	28,3

*MO – Matéria orgânica; CTC – Capacidade de troca de cátions; V% - Saturação por bases, Fed – Ferro cristalino extraído por ditionito-citrato-bicarbonato; Feo – ferro no cristalino extraído por ácido oxálico e oxalato de amônio; Gt – Goethita; Hm – Hematita; Ct – Caulinita; Gb – Gibbsita; DP – Desvio padrão; CV – Coeficiente de variação.

Os solos do compartimento arenítico apresentam melhor CTC e V%, quando comparado aos solos originados de basalto. No primeiro compartimento há um valor de 71 $mmol_c$ dm^{-3} de CTC, e 60% de saturação por bases. O compartimento arenítico

é predominante no POP e, portanto, mais cultivado, provavelmente as práticas de correção do solo e manejo, influenciam nesses valores. Todavia rochas areníticas apresentam maior granulometria, portanto o intemperismo nessas rochas é mais lento, quando compradas as rochas basálticas.

O mesmo acontece para os solos de compartimento altamente dissecado. Estes apresentam médias de CTC de 92 $mmol_c\ dm^{-3}$ e 66% de saturação por bases, enquanto solos de ambiente pouco dissecados apresentam CTC de 68 $mmol_c\ dm^{-3}$ e 57% de saturação por bases. Para o compartimento geomorfológico fica mais evidente a influência da gênese do solo também para fertilidade. Solos de compartimente pouco dissecados são aqueles associados a paisagens mais planas, favorecendo maior infiltração de água, lixiviação de íons e processos de intemperismo.

Quanto ao Fed, os solos de compartimentos basálticos apresentam maiores conteúdos (46 g Kg^{-1}) quando comparados aqueles de arenito (18 g Kg^{-1}). O mesmo acontece para os conteúdos de Feo. Os solos de compartimento arenito apresentam média de aproximadamente 1 g Kg^{-1}, e os solos basálticos 3 g Kg^{-1}. Para os conteúdos de ferro por compartimento geomorfológico, o compartimento pouco dissecado apresenta maiores medidas de Fed (25 g Kg^{-1}) e de Feo (1,52 g Kg^{-1}), enquanto os conteúdos para solos areníticos são de 14 g Kg^{-1} e 0,75 g Kg^{-1}, respectivamente.

A mineralogia oxídica é predominante para solos do compartimento basáltico, enquanto solos do compartimento arenítico tem predomínio de mineralogia caulinítica. A mineralogia apresentou médicas com pequenas diferenças para os compartimentos geomorfológicos. Segundo Curi e Franzmeier (1987) solos originados de basalto tem maiores teores de ferro em relação aqueles de arenito, favorecendo a formação de óxidos de ferro em detrimento a outros minerais. Mesmo pequenas o compartimento pouco dissecado apresenta predomínio de óxidos e o compartimento altamente dissecado apresenta predomínio de mineralogia caulinítica.

Todos os atributos apontados indicam que solos basáltico e de compartimentos pouco dissecados são mais intemperizados que aqueles de compartimentos areníticos e altamente dissecados. O compartimento moderadamente dissecado apresenta médias intermediárias para os compartimentos altamente e pouco dissecados para todos os atributos, não permitindo a diferenciação deste compartimento. Nesse grupo foram incluídas todas as formas da paisagem

intermediarias, portanto espera-se que as variáveis apresentem maior variação para os demais compartimentos.

A intensidade das formas da paisagem, nesse caso apontado pelo nível de dissecação, segue um padrão importo pelo controle estrutural do material de origem. Conforme os rios adentravam a bacia a paisagem era esculpida e os sedimentos mais finos eram transportados, desta forma a as áreas menos resistentes foram erodidas favorecendo a inversão das formas da paisagem (Fernandes, 1998; Fernandes e Coimbra, 2000). Portanto o processo de dissecação é responsável pela variabilidade dos atributos do solo, associado ao controle estrutural da geologia.

A dissecação da paisagem indica a variação pedogênese (formação do solo) e geomorfogênese (esculpimento da paisagem). O compartimento altamente dissecado reuni áreas côncavas de alta intensidade, indicando maiores dissecações na região, e consequentemente maior geomorfogênese. Enquanto o compartimento pouco dissecado engloba regiões mais preservadas, com superfícies mais aplainadas e maiores taxas de pedogênese, em relação a geomorfogênese.

O estudo das médias e desvio padrão de atributos para diferentes compartimentos geológicos e geomorfológicos podem auxiliar na calibração de dados quando se trabalha com escalas diferentes. Desta fora é possível a indicação de amostras representativas para óxidos de ferro (Bahia et al., 2015b), em termos de validação de campo, calibração de modelagem matemática na variabilidade especial em escalas detalhas (Teixeira, 2015), indicar o potencial regional de erosão (Ibiapina, 2015) e auxiliar no planejamento para uso e ocupação do solo, visando a preservação de estoques de C (Mendes, 2015) e P, maior objetivo do presente estudo.

Na Tabela 2 pode-se observar que o diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG) que aponta a classe de agregados de maior ocorrência são maiores para os solos de Basalto quando comparados aos solos de arenito. Os índices, DMG e DMP, não apresentam grandes diferenças para os compartimentos geomorfológicos, apontando que a geologia tem maior influência na agregação do solo que as formas da paisagem.

Os maiores valores observados para o DMG e DMP apontam que há predomínio de agregados em uma determinada classe de tamanho, como podemos observar pela Tabela1 para a classe de agregados 8,00 – 4,00 mm, para os diferentes

compartimentos geológicos e geomorfológicos. Hickmann e Costa (2012) observaram médias de DMG e DMP de 2,73 mm e 2,61 mm, respectivamente, ao estudarem um Argissolo Vermelho-Amarelo sob sistema de plantio direto. Conforme os autores as maiores médias destes índices estão associadas ao predomínio de agregados maiores, favorecidos pelos maiores conteúdos de matéria orgânica, cátions polivalentes, óxidos e aluminossilicatos.

Tabela 2. Distribuição de classes de agregados, diâmetro médio geométrico (DMG) e diâmetro médio ponderado (DMP) para os diferentes compartimentos geológicos e geomorfológicos do Planalto Ocidental Paulista. (Número amostral: 200 pontos).

	DISTRIBUIÇÃO DE CLASSES DE AGREGADOS (g)							DMG	DMP
	8,00-4,00	4,00-2,00	2,00-1,00	1,00-0,50	0,50-0,25	0,25-0,125	<0,125		
ARENITO									
MÉDIA	55,59	12,11	4,57	3,87	7,17	9,42	7,27	2,65	3,92
MÍNIMO	2,89	2,38	0,16	0,05	0,10	0,05	0,50	0,34	0,85
MÁXIMO	95,20	26,48	13,39	13,24	24,19	37,07	33,45	5,55	5,82
DP	24,97	5,80	3,76	3,49	5,92	10,04	7,62	1,57	1,34
CV	44,92	47,84	82,29	90,20	82,58	106,51	104,76	59,17	34,15
BASALTO									
MÉDIA	81,75	6,42	1,49	2,04	4,14	2,55	1,61	4,23	5,18
MÍNIMO	66,19	2,16	0,75	0,96	0,64	0,48	0,11	2,49	4,27
MÁXIMO	93,59	15,88	2,91	4,95	10,96	6,58	4,54	5,46	5,75
DP	11,03	5,13	0,70	1,37	3,84	2,17	1,47	1,02	0,54
CV	13,50	79,89	46,83	67,10	92,70	85,36	90,96	24,13	10,45
ALTAMENTE DISSECADO									
MÉDIA	61,29	9,98	3,74	3,01	8,03	8,95	5,00	2,62	4,16
MÍNIMO	30,47	4,35	0,31	0,21	0,57	0,67	0,72	1,03	2,71
MÁXIMO	93,17	19,60	11,98	6,73	21,07	25,16	14,48	5,39	5,74
DP	17,27	4,82	3,14	1,94	4,88	7,03	3,41	1,17	0,87
CV	28,18	48,29	83,85	64,50	60,85	78,51	68,19	44,60	20,82
MODERADAMENTE DISSECADO									
MÉDIA	57,96	11,65	4,43	3,27	6,19	8,95	7,55	2,89	4,03
MÍNIMO	3,91	2,38	0,16	0,05	0,10	0,05	0,11	0,37	1,00
MÁXIMO	95,20	26,48	13,39	10,07	24,19	37,07	33,45	5,55	5,82
DP	27,96	6,32	3,77	2,85	6,26	11,12	8,70	1,76	1,48
CV	48,25	54,30	85,18	87,14	101,07	124,20	115,15	60,70	36,81
POUCO DISSECADO									
MÉDIA	57,08	12,51	4,22	5,17	7,18	7,72	6,11	2,86	4,01
MÍNIMO	2,89	2,16	0,35	0,10	0,25	0,61	0,50	0,34	0,85
MÁXIMO	91,32	20,29	12,84	13,24	18,15	28,35	22,97	5,05	5,61
DP	25,98	6,19	4,11	4,92	5,59	8,96	6,99	1,62	1,40
CV	45,52	49,52	97,42	95,24	77,79	116,08	114,40	56,62	34,88

*DV – Desvio padrão; CV – Coeficiente de variação.

As médias de DMG e DMP observadas neste estudo são maiores que as citadas em algumas literaturas. Deve-se lembrar que a coleta das amostras

indeformadas é dificultada quando se trata de uma campanha para mapeamento de uma área tão grande como o POP. Em áreas pequenas a coleta e armazenamento das amostras indeformadas é mais fácil e rápido, o que minimiza a alteração das propriedades naturais da amostra.

Contudo em comparativo com os valores médios da razão Ct/(Ct+Gb), os compartimentos que apresentam maiores médias de DMG e DMP, Basalto moderadamente e pouco dissecado são os mesmo que apresentam os maiores conteúdos de Gb. Vitorino et al. (2003) apontam que a maior estabilidade de agregados é favorecida em solos mais gibbsíticos, ao passo que o contrário é observado para solos mais cauliníticos.

A Ct mais cristalina se correlaciona com agregados mais estáveis e de maior tamanho, para Latossolos de Basalto em 1 ha do estado de São Paulo (Camargo et al. 2008). Considerando que as caulinitas mais cristalinas no POP estão presentes nos compartimentos do Basalto, os resultados deste assemelham-se aos de Camargo et al. (2008), pois nas áreas de Basalto, também apresentaram os agregados mais estáveis e de maior. Inferindo que existe relação entre a Ct e Gb e a agregação do solo tanto em pequenas áreas (1 ha), como numa extensão de 13 milhões de ha, como o POP.

2.3.3 Caracterização das áreas agrícolas e nativas do Planalto Ocidental Paulista

Os solos do C3 são os mais arenosos, tanto para área agrícola como nativa (Figura 5A). Os teores de areia tendem a diminuir conforme aumenta o grau de dissecação da paisagem, do C3 (89 %) para C1 (77 %). Isso porque conforme a paisagem vai sendo esculpida, tendem a se acumular as partículas mais finas. Ou seja, tendem a ser maiores os conteúdos de argila, como pode ser observado na Figura 5B, as médias aumentam de C3 (10 %) para C1 (21%), em área agrícola e mata nativa. Para os compartimentos de basalto os teores de areia têm a tendencia de diminuir do C4 para C6 (Figura 5A). Uma exceção pode ser observada para o C5 sob mata nativa, que apresenta média de areia (45%) semelhante ao C1. Ambos os

compartimentos de dissecação moderada se apresentam no intermédio dos demais, podendo apresentar médias intermediárias de transição.

Os compartimentos de basalto apresentam os maiores conteúdos de argila (Figura 5B). Entre área agrícola e mata nativa a maior diferença foi observada no C6. Os solos sob mata apresentam 65 % de argila, enquanto aqueles sob área agrícola 52%. Embora se espere comportamentos semelhantes, por ambas as áreas estarem no mesmo compartimento, geológico e geomorfologia, trata-se de dados naturais que tendem a apresentam alta variabilidade. As grandes diferenças entre as médias de argila e areia para os compartimentos e área agrícola e mata nativa aponta a alta variação dos atributos para a área do POP.

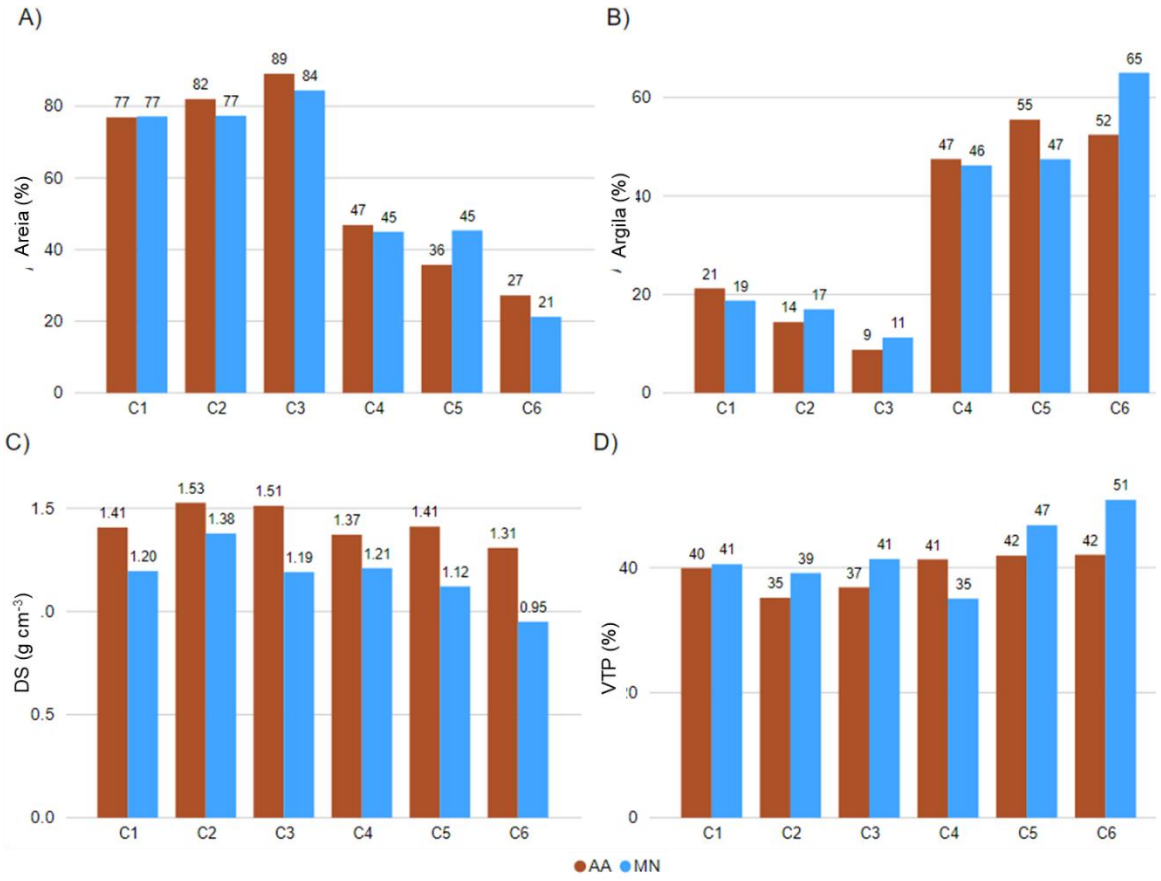


Figura 5. Atributos granulométricos e físicos, por compartimentos e áreas agrícola (AA) e mata nativa (MN) para solos do Planalto Ocidental Paulista. (Número Amostral: 44 pontos).

*Compartimento 1 (C1) – Amostra de solo originados de arenito altamente dissecado; Compartimento 2 (C2) – Amostra de solo originados de arenito moderadamente dissecado; Compartimento 3 (C3) – Amostra de solo originados de arenito pouco dissecado; Compartimento 4 (C4) – Amostra de solo originados de basalto altamente dissecado; Compartimento 5 (C5) – Amostra de solo originados de basalto moderadamente dissecado; Compartimento 6 (C6) – Amostra de solo originados de basalto pouco dissecado.

De modo geral as variações entre as médias de granulometria foram pequenas para área agrícola e nativa. Isto porque a influência antrópica não é significativa para alterar a textura dos solos. As variações são justificadas pelo material de origem do solo, processos de intemperismo, variações de forma da paisagem, ou seja, a textura é característica da gênese do solo. E ocorre em outros trabalhos para solos do estado de São Paulo (Silveiro, 2018; Siansi, 2019; Peluco, 2016; Teixeira et al., 2018; Siqueira et al., 2014).

Ambientes pouco dissecados são aqueles mais planos que favorecem a maior infiltração de água, melhor drenagem, maior lixiviação, radiação solar mais uniforme, entre outras características que favorecem maior intemperismo do solo (maiores taxas de pedogênese). Portanto espera-se maiores médias de argila e menores de areia. Como pode ser observado para C6 (Figura 5A e 5B). Todavia considerando que os compartimentos altamente dissecados apresentam áreas côncavas de alta intensidade, e comportamento deposicional (Sanchez et al., 2009) também pode haver acúmulos de materiais mais finos, resultando nos menores conteúdos de areia e maiores de argila para C1. Resultados semelhantes foram observados por Silva (2016) e por Cunha et al. (2005).

Os valores médios de densidade do solo (DS) foram maiores para todos os solos de área agrícola, independente do compartimento (Figura 5C). Fato que mostra a influência das atividades agrícolas na alteração da qualidade física do solo. De modo geral as médias são maiores para C1 (1,41 g cm^{-3}), C2 (1,53 g cm^{-3}) e C3 (1,51 g cm^{-3}), compartimentos do arenito, quando comparadas as médias dos compartimentos de basalto (C4 – 1,37 g cm^{-3}; C5 – 1,41 g cm^{-3}; C6 – 1,31 g cm^{-3}). Espera-se que em solos mais cauliníticos, como dos arenitos, a forma deste mineral favoreça maiores valores de DS, enquanto para solos de basalto, com maiores conteúdos de óxidos de ferro, o formato destes óxidos contribui para melhor arranjo das partículas e menor DS (Ferreira et al., 1999; Siqueira et al., 2010).

Quando se observa os valores de DS para os solos sob mata nativa, a média é menor para os compartimentos de basalto (C4 – 1,21 g cm^{-3}; C5 – 1,12 g cm^{-3}; C6 – 0,95 g cm^{-3}). Novamente para C2 e C5, compartimentos de geomorfologia moderadamente dissecada, as médias são intermediárias aqueles altamente e pouco

dissecados, independente da geologia, mostrando que estes são zonas transicionais. As médias de volume total de poros (VTP) também são maiores para os solos sob mata nativa. Exceto para o C4, em que a areia agrícola apresentou maior VTP (41%) quando comparado a mata nativa (35%). Apontando a influência que as atividades de manejo podem proporcionar aos solos.

As maiores médias de saturação por base (V%) foram observadas para as áreas agrícolas quando comparadas a mata nativa (Figura 6A). Exceto C3 que a mata nativa apresentou maior V% (76%) que a área agrícola (59%). Considerando C1, C2 e C3, para área agrícola as médias de V% diminuíram conforme se diminui o grau de dissecação, 69%, 66% e 59%, respectivamente. Já para mata nativa o V% aumentou de C1 (46%) para C3 (76%). Para os compartimentos de basalto, observou-se aumento da V% de C4 (74%) para C6 (85%), para área agrícola. E diminuição de C4 (71%) para C6 (66%), em mata nativa. Resultados que mostram novamente a influência das atividades agrícolas no POP.

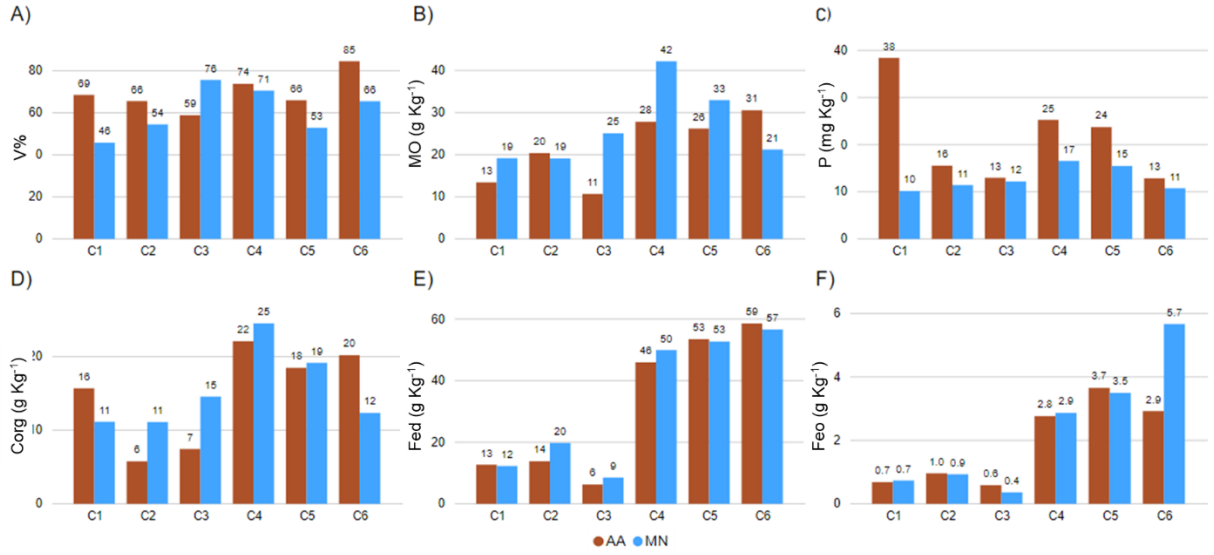


Figura 6. Atributos químicos, por compartimentos e áreas agrícola (AA) e mata nativa (MN) para solos do Planalto Ocidental Paulista. (Número Amostral: 44 pontos).

*Compartimento 1 (C1) – Amostra de solo originados de arenito altamente dissecado; Compartimento 2 (C2) – Amostra de solo originados de arenito moderadamente dissecado; Compartimento 3 (C3) – Amostra de solo originados de arenito pouco dissecado; Compartimento 4 (C4) – Amostra de solo originados de basalto altamente dissecado; Compartimento 5 (C5) – Amostra de solo originados de basalto moderadamente dissecado; Compartimento 6 (C6) – Amostra de solo originados de basalto pouco dissecado.

As medias de MO apresentaram diferença entre as áreas agrícolas e nativas, como esperado (Figura 6B). Para mata nativa a tendencia foi aumentar de C1 (13 g

kg^{-1}) para C3 (25 g kg^{-1}) e diminuir de C4 (42 g kg^{-1}) para C6 (21 g kg^{-1}). O contrário pode ser observado para áreas agrícolas, as médias de MO tendem a diminuir de C1 (13 g kg^{-1}) para C3 (11 g kg^{-1}). E aumentar de C4 (28 g kg^{-1}) para C6 (31 g kg^{-1}). Este atributo também é variável conforme as práticas de manejo. No POP são inúmeras as atividades agrícolas, e cada uma exige um manejo diferente. Como para outros atributos os compartimentos de geomorfologia moderadamente dissecada (C2 e C5) apresentou médias intermediárias para aqueles altamente e pouco dissecados.

As médias de P foram diferentes para as áreas agrícolas e nativas de todos os compartimentos (Figura 6C). As maiores diferenças foram para C1 com média de 38 mg kg^{-1}, para área agrícola e 10 mg kg^{-1}, para mata nativa. Os compartimentos C1 e C4, correspondente a geomorfologia altamente dissecada apresentaram as maiores médias de P, 36 mg dm^{-3} para área agrícola e 25 mg dm^{-3} para áreas agrícolas. Em todos os pontos de área agrícola foram observados os maiores valores médios de P, assim como os maiores valores máximos. A adubação fosfatada é uma prática comum na agricultura brasileira e normalmente os produtores adicionam mais que o necessário.

Parte do P adicionado é adsorvido nos óxidos, que é a mineralogia predominante nos solos brasileiros (Vilar et al., 2010). A adsorção que ocorre na superfície destes óxidos é específica e deixa o nutriente indisponível para as plantas (Mogollón et al., 2018). Muitos produtores não conhecem a mineralogia de seus solos, ou tão pouco conhecem a mineralogia como um fator importante na adubação fosfática. Desta forma adicionam quantidades desnecessárias de adubos fosfatados. A necessidade das culturas é sanada, mas o P não aproveitado pelas plantas e que não é adsorvido pelos óxidos é lixiviado, chegando aos lenções freáticos e cursos d'agua, muitas vezes levando a eutrofização deste recurso (Reitzel et al., 2019).

Os teores de Corg foram maiores para ambas as áreas de C4 (22 e 25 g kg^{-1}, respectivamente), quando comparados aos demais compartimentos (Figura 6D). As maiores diferenças entre área agrícola e mata nativa são observadas para os compartimentos de arenito (C1, C2 e C3) e para C6. Estudando áreas menores do POP Bahia (2016) observou valores de C, semelhantes aos encontrados neste. Todos os valores médios dos atributos são semelhantes ao encontrados em literatura para diferentes compartimentos geológicos de arenito e basalto (Bahia, 2016; Camargo et

al., 2014, 2013; Ghidin et al., 2006; Siqueira et al., 2010). Estudos definindo a associação entre compartimentos geológicos e geomorfológicos (baseado no nível de dissecação) ainda são escassos para o POP. Entretanto são importantes para apresentar o comportamento dos atributos quando se associa geologia e forma da paisagem.

Para C1, C2 e C4, observa-se as menores médias de Fed, com tendência a diminuir do compartimento altamente dissecado C1 (13 g kg^{-1}) para o pouco dissecado C3 (6 g kg^{-1}) (Figura 6E). Entre área agrícola e mata nativa, para os compartimentos de arenito, a maior diferença é para o C2, moderadamente dissecado, 14 e 20 g kg^{-1}, respectivamente. Para os compartimentos de basalto observa-se que os valores de Fed foram semelhantes para áreas agrícola e nativa (Figura 6E). As medias aumentaram conforme menor o grau de dissecação (C4 – 46 e 50 g kg^{-1}, e C6 – 59 e 57 g kg^{-1}para áreas agrícolas e matas nativas, respectivamente).

Os valores de Feo, referente aos teores de ferro não cristalino, expressa os conteúdos de F pouco cristalinos, como aqueles encontrados na constituição da Gt. As médias deste, não apresentaram grandes diferenças para as áreas agrícolas e nativas, para os compartimentos referentes ao arenito (C1, C2 e C3) (Figura 6F). A média diminuiu de C1 (0,7 g kg^{-1}) para C3 (0,6 g kg^{-1}), mas foi maior para C2 (1,0 g kg^{-1}). Os compartimentos referentes a solos de basalto, apresentaram as maiores médias de Feo, assim como observado para Fed. As médias aumentaram conforme se diminuiu o grau de dissecação (C4 – 2,8 e 2,9, e C6 – 2,9 e 5,7 g kg^{-1}, para área agrícola e mata nativa, respectivamente.

Conforme se aumenta o grau de dissecação da paisagem, aumenta-se o predomínio de formas côncavas, em relação as planas, favorecendo maior acúmulo de água, menor incidência solar, e consequentemente menor grau de intemperismo. Portanto aumenta-se as chances de maiores conteúdos de ferro menos cristalino. Resultados semelhantes foram observados por Camargo et al. (2018), ao estudarem superfícies geomórficas do estado de São Paulo.

Em Latossolo desenvolvido de arenito Cunha et al. (2005) encontrou 30 g kg^{-1} para Fed e 2,5 g kg^{-1} de Feo. Para Latossolo desenvolvido de basalto foram encontrados 80 g kg^{-1} de Fed e 10 g kg^{-1} de Feo na profundidade de 0,6 a 0,8 m. Bahia et al. (2014, 2015a,b) estudando uma pequena área de transição geológica dentro do

POP observaram medias 80 g kg^{-1} para Fed e 6 g kg^{-1} para Feo. Comparando-se as medias encontradas neste provavelmente correspondem a áreas de basalto.

As médias de Gt foram variáveis entre as áreas agrícolas e mata nativa para os compartimentos geomorfológicos (Figura 7A). Para mata nativa em nenhum dos compartimentos, independente da geologia ou geomorfologia, não houve comportamento padrão. AS medias foram maiores em C2 e C5, 8,9 e 15,1 g kg^{-1}, respectivamente e menores em C3 e C6 4 e 8,9 g kg^{-1}, respectivamente. Para área agrícola, houve diminuição de C1 para C3 e aumento de C4 para C6. De modo geral o óxido é observado em maior com maiores médias para compartimentos de basalto. A neoformação da Gt pode ser facilmente influenciada por fatores como água e MO. Justificando a alta variabilidade nas médias deste óxido. Áreas côncavas de compartimentos altamente dissecado, podem apresentar maior estagnação de água, favorecendo a ambientes de redução de Fe e a formação de Gt (Fitzpatrick; Schwertmann, 1982; Schwertmann, 1985; Cornell; Schwertmann, 2003).

A razão Gt/(Gt+Hm) apresentou comportamento variável, assim como os teores de Gt (Figura 7C). A razão mostra predomínio de Gt nos compartimentos referente ao arenito, e predomínio de Hm naqueles de basalto. Entre áreas agrícolas e nativa as maiores diferenças podem ser observadas para C1, C3 e C6. Contudo não foi se pode observar comportamento padrão. Provavelmente a influência do clima para a neoformação da Gt, tenha sido maior que a formação geológica e/ou geomorfológica.

A cristalinidade da Hm e Gt para os solos do POP, foi estudada previamente (Silva, 2016; Silva et al., 2020). Os autores observaram que a cristalinidade destes óxidos permite boa diferenciação dos ambientes quanto à geomorfologia. Teixeira (2015) estudando a suscetibilidade magnética (capacidade de magnetização do solo) em uma pequena área do POP observou que ao trabalhar com maiores escalas a geomorfologia, é o fator de maior influência sobre o atributo. O estudo de variáveis em menores escalas de trabalho envolve maiores influências da geologia e clima, enquanto em maiores escalas a geomorfologia e as classes de solo exercem maiores influências (Anderson et al., 2003).

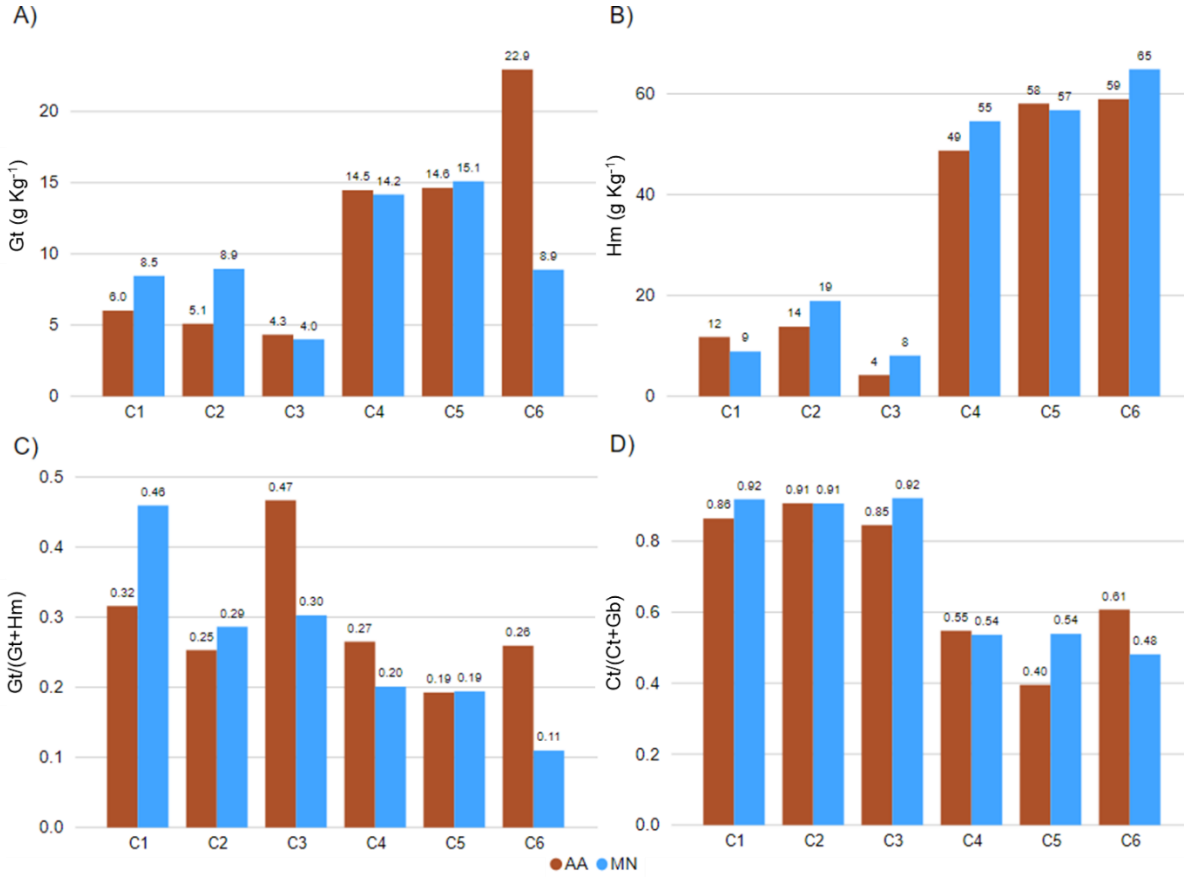


Figura 7. Atributos mineralógicos, por compartimentos e áreas agrícola (AA) e mata nativa (MN) para solos do Planalto Ocidental Paulista. (Número Amostral: 44 pontos).

*Compartimento 1 (C1) – Amostra de solo originados de arenito altamente dissecado; Compartimento 2 (C2) – Amostra de solo originados de arenito moderadamente dissecado; Compartimento 3 (C3) – Amostra de solo originados de arenito pouco dissecado; Compartimento 4 (C4) – Amostra de solo originados de basalto altamente dissecado; Compartimento 5 (C5) – Amostra de solo originados de basalto moderadamente dissecado; Compartimento 6 (C6) – Amostra de solo originados de basalto pouco dissecado.

A razão Ct/(Ct+Gb) não apresentou grandes diferenças para área agrícola e mata nativa (Figura 7D). Observa-se diferença maior entre os compartimentos referentes ao arenito (C1, C2 e C3), quando comparado aqueles de basalto (C3, C4 e C5). Em média os compartimentos de arenito apresentaram razão média e 0,90, enquanto aqueles de basalto apresentaram média de 0,50. Considerando a geomorfologia, dentro da geologia não se observada grandes diferenças, mostrando que a geologia é mais influente sobre a razão Ct/(Ct+Gb) que a geomorfologia. As médias da razão Ct/(Ct+Gb) encontrada em outros trabalhos para solos de Basalto estão entre 0,50 a 0,60, e acima de 0,80 para Arenito (Cunha et al., 2005; Camargo et al., 2008; Camargo et al., 2013). Medias semelhantes aquelas encontradas neste.

Estudando o modelo da evolução pedogeomorfogênica da Serra da Canastra Vasconcelos et al. (2013) observaram que a dinâmica do relevo desenvolvido a partir do processo de abatimento do terreno (maior dissecação da paisagem) causa ambientes de saturação e estagnação de água, e áreas mais planas melhores condições para a drenagem. Por sua vez, ambientes de maior estagnação de água favorecem o avanço da hidromorfia, resultando na formação de minerais amorfos e predominância da Ct (Kampf et al., 2009), enquanto as áreas mais planas e bem drenadas favorecem o avanço da oxidação, tendo domínio de minerais mais cristalinos e maiores conteúdos de Gb (Kampf et al., 1988; Ker, 1994).

A precipitação, forma da paisagem e geologia segundo Viscarra-Rossel (2011) são os principais preditores para a modelagem da Ct nos solos da Austrália. O autor explica que o clima, a matéria orgânica, a classe de solo, a topografia e o tempo interagem juntamente influenciando na formação, abundância e distribuição dos minerais, pois controlam a movimentação da água, que regem as reações do intemperismo, como foi observado para os solos do POP.

As distribuições das classes de solos estão associadas principalmente as formas do relevo, sendo este o principal fator por maiores variabilidades de atributos em ambiente convexos, que em ambientes, lineares (Silva Jr et al. 2012). Portanto a variabilidade dos atributos é consequência das formas da paisagem, e a geoestatística auxilia na transferência destas informações quando consideram a geomorfologia da área estudada.

O compartimento com maior estoque de C foi o C4, referente ao basalto altamente dissecado, 153Mg ha^{-1} para área agrícola e 146 Mg ha^{-1} para mata nativa (Figura 8ª), quando comparados aos demais compartimentos. Para compartimentos referentes ao basalto o estoque de C foi maior para área agrícola que para mata nativa. Diferente do observado para aqueles de arenito, em que apenas o C1 (arenito altamente dissecado) da área agrícola apresenta maior estoque de C. A médias de estoque de C sofrem maior influência em relação aos fatores de formação do solo do que quanto as práticas de manejo.

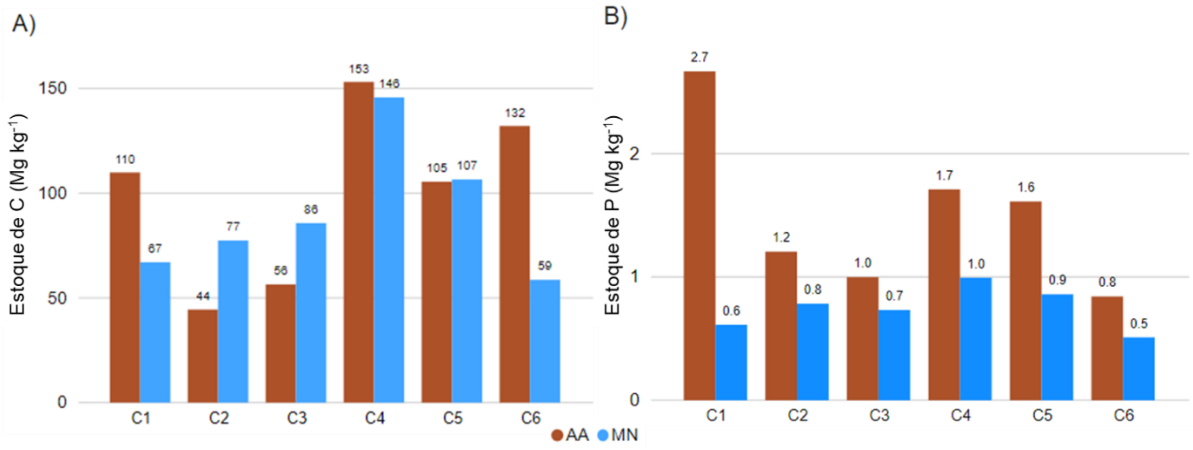


Figura 8. Estoques de C e P, por compartimentos e áreas agrícola (AA) e mata nativa (MN) para solos do Planalto Ocidental Paulista. (Número Amostral: 44 pontos).

*Compartimento 1 (C1) – Amostra de solo originados de arenito altamente dissecado; Compartimento 2 (C2) – Amostra de solo originados de arenito moderadamente dissecado; Compartimento 3 (C3) – Amostra de solo originados de arenito pouco dissecado; Compartimento 4 (C4) – Amostra de solo originados de basalto altamente dissecado; Compartimento 5 (C5) – Amostra de solo originados de basalto moderadamente dissecado; Compartimento 6 (C6) – Amostra de solo originados de basalto pouco dissecado.

Embora as práticas de manejo possam diminuir os estoques naturais de C no solo (Assad et al. 2013), existem compartimentos naturais com maior potencial de estocar C, independente da prática de manejo, caso dos compartimentos C1 e C4. Mesmo o potencial de estoque de C sendo menor para solos de arenito (C1 – 110 Mg ha^{-1-}), quando comparado aos de basalto (C4 153 Mg ha^{-1}) ambientes altamente dissecados favorecem os estoques do elemento.

Estudos apontam que a conversão de mata nativa em área agrícola tende a diminuir os estoques de C, pelo menos em camadas superficiais (Baker et al., 2007; Don et al., 2011; Eclesia et al., 2012). Como observado para C2 (44Mg ha^{-1} para área agrícola e 77 Mg ha^{-1} para mata nativa) e C3 (56 Mg ha^{-1} para área agrícola e 86 Mg ha^{-1} para mata nativa). Entretanto outros estudos apontam que em função do uso do solo, clima, práticas agrícolas ou de conservação, as comparações entre áreas agrícolas podem se tonar neutras (Braz et al., 2013). Neste as variações para alguns compartimentos, como citado anteriormente, foi maior para áreas agrícolas que para mata nativa. Apontando a importância de se apresentar tais dados para definir as práticas de manejo mais condizentes com as condições do solo, para favorecer o aumento natural dos estoques de C.

Conforme os dados, áreas com variações no teor de argila são potenciais reservatórios de C, como foi proposto por Mendes (2015). A emissão de CO_2 do solo

pode ser descrita pelo coeficiente de decaimento de emissão do solo e o estoque de C nos solos. Portanto os potenciais de maior ou menor emissão são intrínsecos do solo e estão intimamente ligados aos processos e fatores de formação, expressos por atributos covariativos como a textura e a mineralogia (Bahia et al., 2015a; La Scala Jr et al., 2000a, 2000b; Leal et al., 2015)

Os estudos sobre os estoques de C têm avançado nos últimos anos, porém poucos ainda correlacionam o estudo da variável em função dos diferentes compartimentos geológicos e geomorfológicos com a mineralogia do solo. Hickman e Costa (2012) observara médias de 9,23 Mg ha^{-1} para áreas de Plantio Direto sob Argissolos. Rosendo e Rosa (2012) já observaram 43,92 Mg ha^{-1} para pastagem degradada sob Latossolos. Todavia nenhum destes estudos evidencia essa variação nas médias em função das diferentes classes de solos e a constituição mineralogia desta classe.

Estudando mata nativa e áreas de pastagem, Assad et al. (2013) observaram estoques de C de 33 Mg ha^{-1} e 24 Mg ha^{-1}, respectivamente. Os autores fizeram uma modelagem STEPWISE para apontar as variáveis de maior influência no estoque e apontaram a MO e areia como as de maior influência. Ainda afirmam que variáveis climáticas, como temperatura e precipitação, e do solo como textura, densidade e fertilidade podem controlar os estoques de C.

Os estoques de C variam em função do tipo de solo e a profundidade estudada, e embora essas correlações sejam pouco estudadas, o estoque é um importante indicador de serviços ambientais (Parron et al. 2015). Assad et al. (2013) completam afirmando que em escalas locais de trabalho, as propriedades do solo ganham destaque na influência dos estoques de C. Saiz et al. (2012) apontaram em seu estudo que a textura do solo, foi determinante para variações do estoque de C.

Considerando os compartimentos de basalto a média de estoque de P também foi maior para C4 (1,7 Mg ha^{-1} para área agrícola e 1,0 Mg ha^{-1} para mata nativa) (Figura 7B). Onde todas as áreas agrícolas apresentaram maiores estoques de P.O mesmo ocorre para os compartimentos e arenito. A maior média de estoque de P foi observada para C1 sob área agrícola (2,6 Mg ha^{-1}). Diferente dos estoques de C, os estoques de P sofrem maior influência com as práticas de manejo. A adubação

fosfatada, em muitos casos feita em excesso pode aumentar a quantidade do nutriente no solo.

Quando se observa a influência geomorfológica nos estoques de P, ignorando as médias sob mata nativa, estes tendem a aumentar com o nível de dissecação da paisagem (Figura 7B). Quanto maior o nível de dissecação maiores são os estoques e P, independente da geologia. O predomínio de formas concavas pode estar atuando como região de acúmulo de P. Em casos de adubações excessivas, o elemento não adsorvido pelos minerais e não aproveitado pelas plantas pode sofrer lixiviação, acumulando-se em cotas mais baixas da paisagem e até mesmo contaminando recursos hídricos (Viscarra-Rossel e Bui, 2006; Reitzel et al., 2019).

O estoque de P ainda é pouco estudado. Segundo Viscarra-Rossel e Bui (2016) solos altamente intemperizados, como os de países de clima tropical, apresentam baixa disponibilidade de estoque de P. Estudando solos australianos, os pesquisados observaram uma variação nos estoques de C menor do que os observados nestes. Para os solos da Austrália a variação foi de 0,2 a 12 Mg ha^{-1} (Viscarra-Rossel e Bui, 2015). Enquanto nos solos deste a variação foi de 0,5 a 2,7 Mg ha^{-1}. Santos et al. (2015) observação variação no estoque de P de 3 a 8 Mg ha^{-1} para Plintossolos sob vegetação nativa no estado do Mato Grosso. Magalhães et al. (2013) estudando Argissolos sob mata nativa, e sob cultivo de teca há 8 anos, obtivera médias variando de 12 a 200 Mg ha^{-1}.

Observando o mapas de solos do POP os solos predominantes são Argissolos e Latossolos, portanto os valores concordam com aqueles observados por Magalhães et al. (2013). Estudos detalhados sobre os estoques de P permitirão a melhoria de modelos ecológicos, melhor orientação nas formulações de políticas de segurança alimentar e hídrica, biodiversidade e conservação, na elaboração de projetos de rede de monitoramento, e no fornecimento de uma referência para avaliar o impacto das mudanças na cobertura da terra uso e manejo do solo e qualidade da água. O próximo passo é a correlação com os minerais e a curva espectral para a definição de zonas de manejo específico.

Os maiores estoques de C e P condizem com aqueles compartimentos que apresentam mineralogia oxídica predominante (Tabela 5). Com exceção do C1, que apresentou alta média de estoque de P e corresponde a mineralogia oxídica. Como

observado para toda a extensão do POP os solos do compartimento arenítico são cauliníticos, e os do compartimento basáltico oxídicos, apresentando as maiores médias de Gt (15 g Kg^{-1} para área agrícola e 14 g Kg^{-1} para mata nativa) e Hm (55 g Kg^{-1} para área agrícola e 57 g Kg^{-1} para mata nativa). Estes resultados para estoque de P podem ter sido observados devido ao uso de adubação fosfatada mais característica nesse compartimento, que em extensão territorial ocupa maior parte do POP, ou por parte do P nos compartimentos de basalto estarem adsorvidos aos óxidos de ferro.

Na Figura 9 é apresentada uma matriz de correlação Sperman preliminar entre a granulometria, mineralogia, DS, conteúdos e estoques de C e P, e isótopo de C. Pode-se observar que a areia possui correlação alta e inversa com o teor de argila, e tores de Fed, Feo, conteúdo de e estoque de Corg. Solos arenosos, originados dos compartimentos areníticos apresentam, menores conteúdos de argila, e consequentemente de Fed, Feo e Corg. O contrário é observado para o teor de argila.

O teor de argila apresentou correlação alta e inversa com a DS, ou seja, quanto maior o teor de argila, menor a DS (Figura 9). Comportamento semelhante é observado para os conteúdos de Fed, Feo, C e P, e os valores de DS. O conteúdo de P disponível apresentou baixa correlação com o conteúdo de Fed, Feo, e as razões Ct/(Ct+Gb) e Hm/(Hm+Gt). Apontando que o a análise não permitiu captar a variação dos conteúdos de P disponível. O estoque de P apresentou comportamento semelhante ao seu conteúdo.

O conteúdo de C apresentou correlação alta e direta com o teor de argila, Fed, Feo, P, e inversa com o teor de areia e a razão Ct/(Ct+Gb). O estoque de C apresenta comportamento semelhante, apontando que solos mais argilosos e de mineralogia predominante oxídica, apresentam os maiores conteúdos de C. Estes solos, por sua vez, podem ser considerados para planejamento e uso do solo, e mitigação de emissão de CO_2. Os isótopos de C^{13} apresentam correlação inversa com conteúdo de argila, e direta com o conteúdo de areia. Os isótopos apresentam valores negativos, o que pode justificar esses resultados. Com as razoes Ct/(Ct+Gb) e Hm/(Hm+Gt) os isótopos apresentaram correlação direta e positiva.



Figura 9. Matriz de correlação de Sperman para granulometria, mineralogia, densidade do solo (DS), conteúdos e estoques de C e P, e isótopos de C, para solos do Planalto Ocidental Paulista.

Estudando os isótopos em diferentes culturas Assad et al. (2013), apontam que as médias para solos sob mata nativa são menores quando comparadas as médias de isótopos sob pastagem. Ou seja, o isótopo tem potencial para apontar a cultura predominante naquela área. Alves (2019) aponta que os isótopos de C têm sido muito utilizados para mensurar a estabilidade de matéria orgânica do solo.

2.3.4 Estimativa dos estoques de C e P por ERD

Percebe-se pelas curvas espectrais (Figura 10) que as reflectâncias são características para ambientes de arenito e basalto. Solos de arenito apresentam maiores valores de reflectância quando comparados aos solos originados de basalto.

Os minerais mais claros presentes no arenito com: quartzo e plagioclásio que aumentam a reflectância das amostras (Demattê et al., 2019). Já os mais escuros presentes no basalto, como os óxidos de ferro, diminuem a reflectância das amostras e gera uma curva espectrais mais baixa e característica.

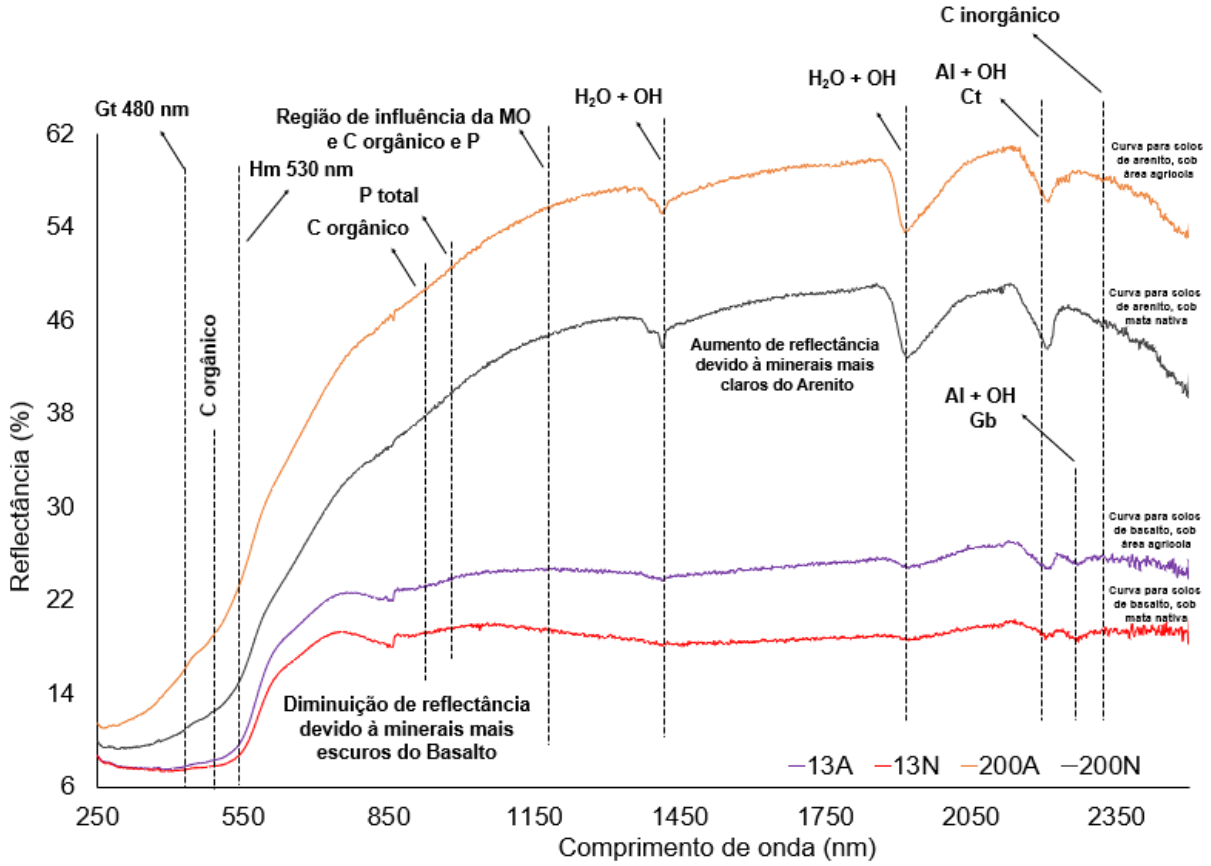


Figura 10. Curvas espectrais para solos do Planalto Ocidental Paulista em áreas agrícolas e de mata nativa para compartimentos de basalto e arenito.

A diferença marcante entre as curvas é observada quando se compara aquelas de áreas agrícolas e matas nativas (Figura 10). As curvas de mata nativa (amostras 13N e 200N) apresentam menor reflectância quando comparadas as amostras de área agrícola (amostras 13A e 200A). Os maiores conteúdos de MO observados em mata nativa (Figura 6) diminuem a reflectância geral das amostras de solos, tornando-a a curva espectral característica, como explica Demattê et al. (2011). Na faixa do visível e do infravermelho próximo, são citados inúmeros comprimentos de onda que podem ser utilizados para estimativa de C orgânico (Asgari et al., 2020; Viscarra-Rossel et

al., 2006; Morellos et al., 2016). Portanto o conteúdo de MO influencia a forma da curva espectral, e a estimativa de atributos do solo.

Próximo das faixas características para ocorrência da MO são citadas na literatura faixas importantes para estimativa dos conteúdos de P. Gomes (2017) apontou como a faixa mais importante para estimativa de P, por regressão mínima por quadrados parciais (PLSR) entre 800 a 900 nm. Viscarra-Rossel et al. (2006) afirmam que faixas entre 400 a 1100 nm são importantes para estimativa do elemento. Demattê et al. (2016) apontam como faixa mais importante entre 1000 a 1100 nm, sendo possível a identificação do fosfato.

Na faixa do visível, entre 400 – 690 nm podem ser caracterizados os óxidos de ferro Hm e Gt (Bahia et al., 2015; Demattê et al., 2019; Fernandes et al., 2004; Viscarra-Rossel et al., 2010; Viscarra-Rossel et al., 2016). E na faixa do infravermelho médio entre 2100 – 2200 nm são caracterizados os minerais Ct e Gb (Fernandes et al., 2020; Pizarro et al., 2001; Viscarra-Rossel et al., 2016). Os minerais também influenciam na forma da curva espectral e podem gerar resultados diferentes e contribuir na predição de diversos outros atributos do solo. Em torno de 1400 nm são notadas as presenças características de hidroxilas relacionadas a água molecular, esteja ela vinculada a minerais ou material orgânico (Brown et al., 2006; Chicati et al., 2019; Hunt e Satesbery, 1970; Fang et al., 2018; Lima et al., 2012; Zhao et al., 2018).

Devido ao tamanho da extensão territorial do Planalto Ocidental Paulista, a quantificação dos estoques de C e P foi realizada apenas na amostragem estratificada (como apontado no Material e Métodos). Os dados de áreas agrícolas e mata nativa serviram como banco de da dados de calibração para regressão mínima de quadrados parciais (PLSR) e estimativa dos estoques para toda extensão do Planalto. Devido à alta variabilidade da área (diferentes geologias e geomorfologias) e dos estoques dos elementos, as regressões tornam-se um pouco erráticas e com pontos de maior dispersão em torno da reta (Figura 11).

A análise de regressão entre os dados de estoques de C e P observados e estimados por PLSR, a partir de curvas espectrais são mais dispersos para os dados de estoque de P (Figura 11). Apontando que estes dados apresentam maior variabilidade ao longo da área. Observa-se um R^2de 0,61 para a análise de estoque de C e de 0,53 para estoque de P, apontando que o último atributo pode apresentam

maiores erros ao ser estimado pelo modelo. Ambos os modelos apresentaram RPD de 1,00. Os valores de RPD medem a acurácia de calibração para os modelos de PLSR, e quando é < 1,4 aponta que o modelo possui previsões pouco confiáveis (Chang et al., 2001).

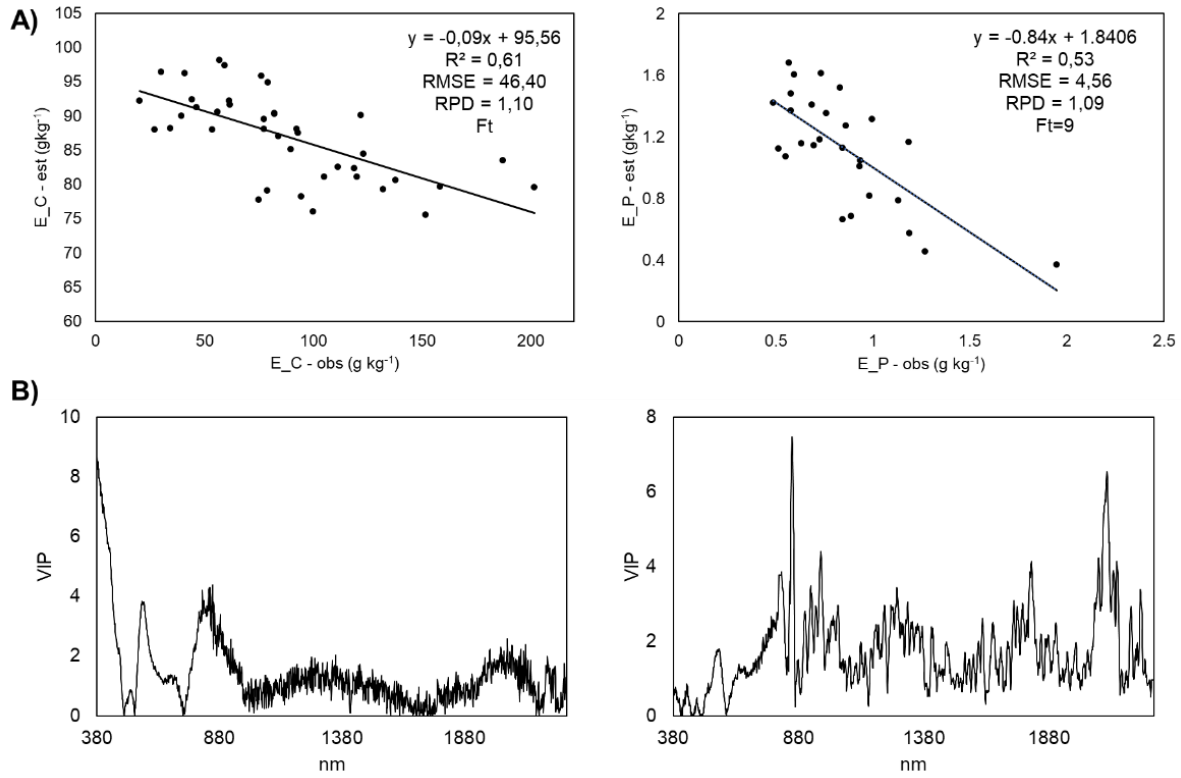


Figura 11. A) Análise de regressão para dados de estoque de C e P observados e estimados por regressão mínima por quadrados parciais (PLS) a partir das curvas espectrais para amostras estratificadas de áreas agrícola e mata nativa. B) Valores de Importância de predição (VIP).

Embora a recomendação para a calibração de modelos seja de um maior banco de dados, cerca de 30% do total (Viscarra-Rossel et al., 2008), se deve considerar a dificuldade para obtenção dos estoques de C e P para uma área tão extensa como o POP. Há limitações em coleta de amostras, armazenamento destas em campo, transporte até o laboratório, gastos financeiros, pessoal treinado, entre outros que tornam a estimativa indireta destes atributos, mesmo com menor acurácia, uma alternativa para se conhecer seu padrão de variabilidade espacial na área estudada (Viscarra-Rossel et al., 2008; Aitkenhead et al., 2018d). Daí a importância do uso de

sensores e modelagem matemática para estimativa destes atributos de forma mais rápida e prática. O equilíbrio entre relação custo-benefício deve sempre ser considerado ao trabalhar com estimativa de atributos tão importantes para a ciência do solo, e ao mesmo tempo tão difíceis de obtenção.

Os valores de importância para predição dos estoques, mostra os comprimentos de onda mais importantes para sua estimativa (Figura 11B). Para estimativa do estoque de C os comprimentos de onda mais importantes estão em 380 nm, 570 nm, 850nm, 2059 nm e 2260 nm. Comprimentos citados na literatura como importantes para estimativa do C, seja ele orgânico ou inorgânico (Viscarra-Rossel et al., 2008; Demattê et al. 2016). Para estimativa dos estoques de P os comprimentos de onda mais importantes estão entre 880 nm, 1940nm e 2020 nm. Gomes (2017) cita o comprimento de 880 nm como o mais importante para estimativa de P no solo. Todavia deve-se considerar que não se trata apenas do elemento, mas do seu estoque, que também considera as condições físicas do solo.

Com base na calibração dos modelos foi realizada a estimativa dos estoques de C e P para toda a extensão do Planalto (Figura 12). O ajuste do semivariograma foi ao modelo esférico, R^2 de 0,95 e alcance de 5,6 m. Este modelo já foi observado em outros trabalhos que trabalham com o estudo de C (Bahia et al., 2014; La-Scala et al. 2000) e é considerado o mais comum para variáveis do solo (Cambardella et al. 1994; Vieira, 2000). Observa-se pelos mapas que os maiores estoques de C estão concentrados nas áreas de geologia basáltica, enquanto os menores nas áreas areníticas. Este fato foi apontado pelas estatísticas descritivas. Ou seja, os modelos mesmo pouco assertivos podem ser utilizados para estimativa do atributo em uma extensão como o planalto e favorecer estudos baseados em mapas.

Pelo mapa obtido para o estoque de P os maiores valores estão em solos de áreas transicionais entre a geologia arenítica e basáltica (Figura 12). Com destaque para a área de arenito altamente dissecado, perto da formação Marília (Figura1a). Concordando com as médias apontadas para os compartimentos, onde se pode contatar que o C1 apresenta a maior média de estoque de P. Os valores médios são observados nas áreas de basalto e os menores nas áreas de arenito pouco dissecados, na porção mais a oeste do POP. Estes resultados apontam que mesmo que o modelo tenha se apresentado um pouco errático na calibração, ainda pode ser

utilizado, pois fornece uma noção geral dos estoques de P em toda a área. O semivariograma ajustou-se ao modelo exponencial, com R^2 de 0,92 e alcance de 3,7 m.

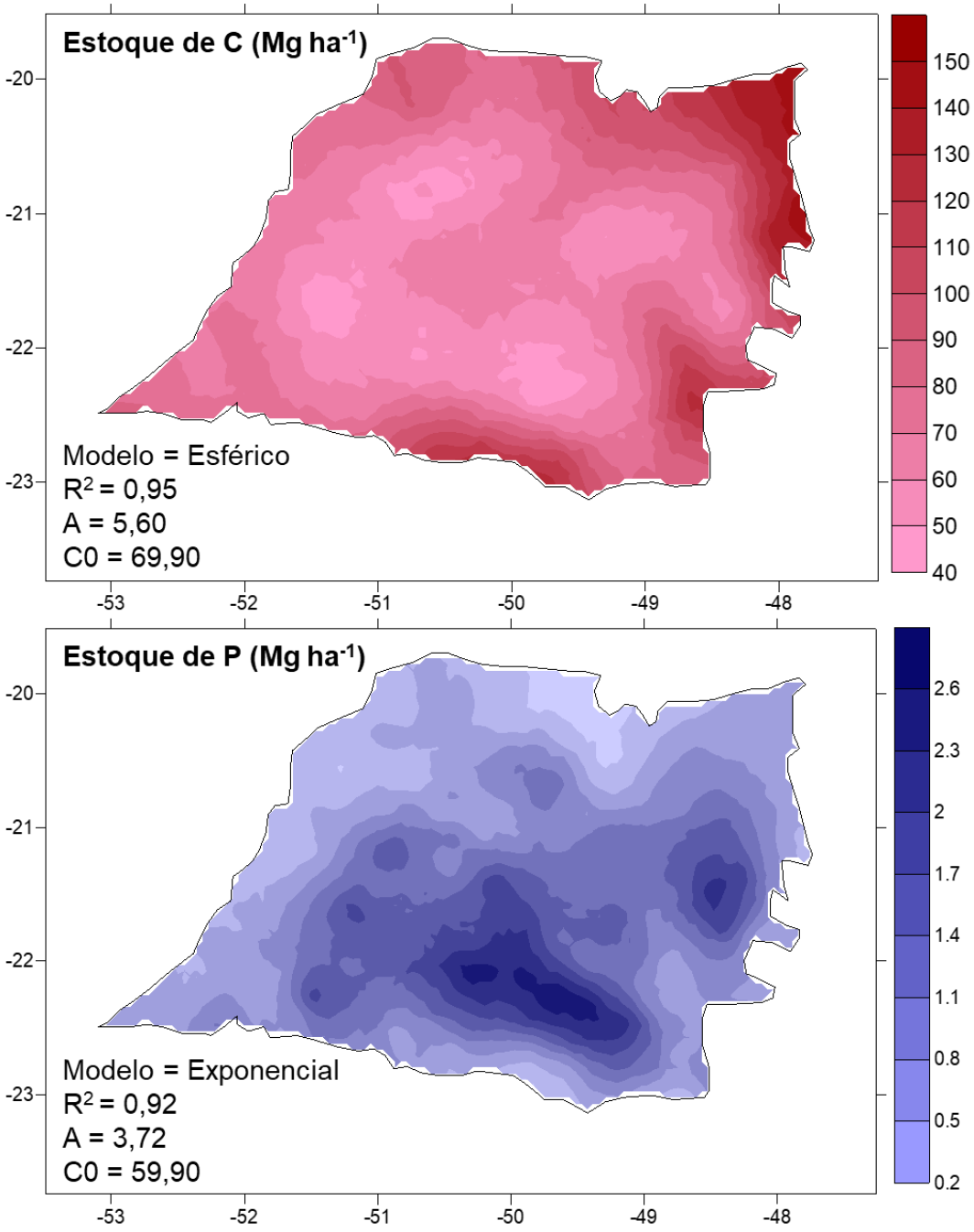


Figura 12. Mapas de variabilidade espacial para os estoques de C e P estimados por regressão mínima por quadrados parciais (PLS) a partir das curvas espectrais.

A formação Marília, embora formada predominantemente por rochas areníticas ricas em quartzo e quartzito, pode apresentar fragmentos de basalto e ocasionalmente rochas ígneas (Fernandes, 2004) que podem estar contribuindo para os aumentos nos estoques de P. Outro fato que contribui é a forma da paisagem. Formas altamente dissecadas são regiões de acúmulo, pois estão em cotas mais baixas da paisagem e recebem material das áreas acima. O conhecimento da distribuição espacial do P no solo é essencial pois permite a avaliação do ecossistema e da produtividade agrícola, qualidade ambiental e gestão da biodiversidade (Viscarra-Rossel e Bui, 2016).

A estimativa dos estoques de C utilizando a ERD pode ser usada para sustentar a contabilidade do solo e avaliar o uso terra e gestão do solo, com práticas que visem o aumento destes, aumentando a produção agrícola e mitigação das emissões de gases de efeito estufa (England e Viscarra-Rossel, 2018). Quanto ao P é fundamental que seja utilizado com sabedoria para maximizar a produtividade e qualidade das colheitas e minimizar no ambiente as consequências das influencias no ciclo do P (McLaughlin, 2019).

A estimativa destes atributos por modelos matemáticos depende do banco de dados, da sua representatividade, repetição, tamanho, e embora os modelos propostos tenham sido considerados pouco assertivos, podem auxiliar em inúmeras decisões táticas e operacionais de manejo da área. O Planalto Ocidental Paulista tem sido alvo de inúmeros estudos, devido sua alta variabilidade e importância econômica (Silva et al., 2020, Fernandes et al., 2020, Silveiro et al. 2019). Os métodos convencionais de laboratório não acompanham a crescente necessidade de quantificar e qualificar o solo de forma economia para melhorar sua gestão (Viscarra-Rossel et al., 2017) ainda mais para áreas de tamanha importância econômica.

Portanto modelos como os aqui propostos são de extrema importância. Mapas desta magnitude auxiliam no crescimento econômico e desenvolvimento de agricultura sustentável na região. E ainda podem orientar em projetos de redes de monitoramento dos elementos, servindo de base para avaliar possíveis impactos futuros sobre mudanças na cobertura da terra, gestão do solo Viscarra-Rossel e Bui, 2016) e emissão de gases (Lybbert e Sumner, 2012).

2.4 Conclusões

Os maiores estoques de C foram observados para solos de basalto, em ambientes altamente dissecado. E os maiores estoques de P foram observados para solos de arenito em ambientes altamente dissecado.

Os isótopos de C apresentam maiores correlações com o teor de argila, ferro cristalino e a mineralogia do solo.

A regressão mínima por quadrados parciais permitiu a confecção do mapa de estoque de C e P para toda a extensão do Planalto Ocidental Paulista, e mostra a relação espacial positivas entre solos de maior e menor teor de argila e areia.

O trabalho ainda permitiu apontar os comprimentos de onda mais importantes para estocar C e P, de maneira natural, podendo servir como base para futuras decisões de práticas de manejo.

2.5 Referências

Ackerson JP, Demattê JAM,, Morgan CLS (2015) Predicting clay content on field-moist intact tropical soils using a dried, ground VisNIR library with external parameter orthogonalization. **Geoderma** 259–260:196–204.

Aitkenhead M, Cameron C, Gaskin G, Choisy B, Coull M, Black H (2018) Digital RGB photography and visible-range spectroscopy for soil composition analysis. **Geoderma** 313:265–275. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.020

Alves RP. (2019) Influências geoambientais nas relações organominerais em solos do Planalto Ocidental Paulista. 114f. Tese(Doutorado em Ecologia) UNB, Brasília.

Anderson MC, Kustas WP, Norman JM. (2003) Up scaling and Downscaling - A Regional View of the Soil–Plant–Atmosphere Continuum. **Agronomy Journal** 95:1408–1423.

Asgari N, Ayoubi S, Demattê JAM, Dotto AC. (2020) Carbonates and organic matter in soils characterized by reflected energy from 350-25000 nm wavelength. **Journal of Mountain Science** 17:1636-1651. https://doi.org/10.1007/s11629-019-5789-9

Askari MS et al. (2015) Evaluation of soil structural quality using VIS-NIR spectra. **Soil and Tillage Researc**h 146: 108–117.

Askari MS, O'rourke SM, Holden NM (2015) Evaluation of soil quality for agricultural production using visible-near-infrared spectroscopy. **Geoderma** 243–244:80–91.

Assad ED et al. (2013) Changes in soil carbon stocks in Brazil due to land use: Paired site comparisons and a regional pasture soil survey. **Biogeosciences** 10:6141–6160.

Bahia ASRS (2016) **Estimação de atributos do solo por espectroscopia de reflectância difusa e suscetibilidade magnética no contexto da paisagem**. 148f Tese (Doutorado em Agronomia Ciência do Solo) UNESP, Jaboticabal.

Bahia ASRS, Marques Júnior J, Panosso AR, Camargo LA, Siqueira DS, Teixeira DB, La Scala Junior N (2015) Field-scale spatial correlation between contents of iron oxides and CO2 emission in an Oxisol cultivated with sugarcane**. Scientia Agricola,** 72:157–166. http://dx.doi.org/10.1590/0103-9016-2014-0142

Bahia ASRS, Marques J, La Scala N, Cerri CEP, Camargo LA (2017) Prediction and Mapping of Soil Attributes using Diffuse Reflectance Spectroscopy and Magnetic Susceptibility. **Soil Science Society of America Journal** 81:1450–1462. https://doi.org/10.2136/sssaj2017.06.0206

Bahia ASRS, Marques Júnior J, Panosso AR, Camargo LA, Siqueira DS, La Scala Junior N (2014) Iron oxides as proxies for characterizing anisotropy in soil CO2 emission in sugarcane areas under green harvest. **Agriculture, Ecosystems and Environment,** 192:52–162, 2014.

Bahia ASRS, Marques JR, Siqueira DS (2015) Procedures using diffuse reflectance spectroscopy for estimating hematite and goethite in Oxisols of São Paulo , Brazil. **GeodermaRegional** 5:150–156.

Baker JM, Hermanus VG, Addison M, Addison P, Van Niekerk Ad (2007) Tillage and soil carbon sequestration — What do we really know ? **Agriculture, Ecosystems and Environment** 118:1–5.

Bishop Jl, Lane Md, Dyar Md (2008) Reflectance and emission spectroscopy study of four groups of phyllosilicates : smectites, kaolinite-serpentines , chlorites. **Clay** 43:35–54.

Braz SP, Urquiaga S, Alves BJR, Jantalia CP, Guimarães AP, Santos CA, Santos SC, Pinheiro EFM, Boddey RM (2013) Soil Carbon Stocks under Productive and Degraded Brachiaria Pastures in the Brazilian Cerrado, **Soil Sciece Society of American Journal** 77:914–928.

Brown DJ, Sheherd KD, Walsh MG, Mays MD, Reinsch TG (2006) Global soil characterization with VNIR diffuse reflectance spectroscopy. **Geoderma** 132:273–290.

Buddenbaum H, Steffens M (2012) The Effects of Spectral Pretreatments on Chemometric Analyses of Soil Profiles Using Laboratory Imaging Spectroscopy. **Applied and Environmental Soil Science** 1–12.

Camargo LA et al. (2014) Clay mineralogy and magnetic susceptibility of Oxisols in geomorphic surfaces. **Scientia Agricola** 71:244–256.

Camargo LA et al. (2015) Mapping of clay, iron oxide and adsorbed phosphate in Oxisols using diffuse reflectance spectroscopy. **Geoderma** 251–252:124–132.

Camargo LA et al. (2013) Spatial correlation between the composition of the clay fraction and contents of available phosphorus of an Oxisol at hillslope scale. **Catena** 100:100–106.

Camargo LA et al. (2008) Variabilidade Espacial De Atributos Mineralógicos De Um Latossolo Sob Diferentes Formas Do Relevo. I - Mineralogia Da Fração Argila. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo** 32:2269–2277.

Camargo AO, Moniz AC, Jorge JA, Valadares LMAS (1986) **Métodos de análise química, mineralógica e física dos solos do Instituto Agronômico de Campinas.** Instituto Agronômico, Campinas, (96 pp.).

Cambardella CA, Moorman TB, Novak JM, Parkin TB, Karlen DL, Turco RF, Konopka AE (1994) Field-scale variability of soil properties in Central Iowa. **Soil Science Society of America Journal**, 58:1501-1508.

Cambou A et al. (2016) Prediction of soil organic carbon stock using visible and near infrared reflectance spectroscopy (VNIRS) in the field. **Geoderma** 261:151–159.

Campos MCC, Montanari R, Marques Júnior J, Pereira GT, Souza ZM (2012) Caracterização de Argissolos em diferentes segmentos de vertente na região de Jaboticabal. Revista de Ciências Agrárias 55:251-259. h ttp://dx.doi.org/10.4322/rca.2012.072 Milton.

Carmo DAB et al. (2016) Cor do solo na identificação de áreas com diferentes potenciais produtivos e qualidade de café. **Pesquisa Agropecuaria Brasileira** 51:1261–1271.

Chang CW, Laird DA, Mausbach MJ, Hurburgh Jr CR. (2001) Near-infrared reflec-tance spectroscopy–principal components regression analyses of soil properties. Soil Science Society of American Journal 65:480–490.

Chicati MS, Nanni MR, Chicati ML, Furlanetto RH, Cezar E, Oliveira RB (2019) Hyperspectral remote detection as an alternative to correlate data of soil constituents. **Remote Sensing Applications: Society and Environment** 16. https:// doi.org/10.1016/j.rsase.2019.100270

Clark RN (1999) Spectroscopy of rocks and minerals, and principles of spectroscopy. In: RENCZ AN editor. **Remote sensing for the earth science.** New York: Manual of Remote Sensing p.3–58.

Clark RN, Roush Tl (1984) Reflectance spectroscopy: Quantitative analysis techniques for remote sensing applications. **Journal Geophys Research** 89:6329–6340.

Cornell RM, Schwertmann U (2003) **The iron oxides: structure, properties, reactions, occurrence, and uses**. 2. ed. Weinheim: Wiley VCH 664 p

Cunha P et al. (2005) superfícies geomórficas e atributos de latossolos em uma seqüência arenítico- basáltica da região de jaboticabal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 29:81–90.

Curi N, Franzmeier DP (1987) Effect of parent rocks on chemical and mineralogical properties of some Oxisols in Brazil. **Soil Science Society of America Journal** 51:153-158.

Dando KR, Dando NR (2010) Rapid, Non-Destructive Analysis of % Gibbsite in Smelting Grade Alumina. **Science And Technology** 06:531–533.

Daniels RB, Hammer RD (1992) **Soil geomorphology**. New York, John Wiley, 236p.

Demattê JAM et al. (2019) The Brazilian Soil Spectral Library (BSSL): A general view, application and challenges. **Geoderma** 354:113793.

Demattê JAM, Terra S (2014) Spectral pedology : A new perspective on evaluation of soils along pedogenetic alterations. **Geoderma** 217–218:190–200.

Demattê JAM, Morgan CLS, Chabrillat S, Rizzo R, Franceschini MHD, Terra FS, Vasques GM, Wetterlind J (2016) **Spestral sensing from ground to space in soil science: stat of the art, applications, potencial and perspectives**, in: Remote Sensing Handbook: Land Resources Monitoring, Modeling and Mapping with Remote Sensing. 661–732.

Demattê JAM, Bortoletto MAM, Vasques GM, Rizzo R. (2011) Quantificação de matéria orgânica do solo através de modelos matemáticos utilizando colorimetria no sistema Munsell de cores. **Bragantia** 3:590-597.

Dinkins DP, Jonessoil C (2008) Sampling **Strategies.** Agriculture and Natural Resources (Ferti- lizers). MT200803AG New 4/08.

Don A, Schumacher J, Freibauer A (2011) Impact of tropical land use change on soil organic carbon stocks - a meta-analysis. **Global Change Biology** 18:3237–3251. b

Dufréchou G, Grandjean G, Bourguignon A (2015) Geometrical analysus of laboratory soil spectra in the short-wave infrared domain: Clay composition and estimation of the swelling potencial. **Geoderma** 243:92-107.

Eberhardt DN et al. (2008) Influência da granulometria e da mineralogia sobre a retenção do fósforo em latossolos sob pastagens no cerrado. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo** 32:1009–1016.

Eclesia RP et al. (2012) Shifts in soil organic carbon for plantation and pasture establishment in native forests and grasslands of South America. **Global Change Biology** 18:3237–3251.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. (2018) **Sistema brasileiro de classificação de solos.** 5. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. (2017) **Manual de métodos de análise de solo**. 3. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos 573 p.

England JR, Viscarra-Rossel RA (2018) Proximal sensing for soil carbon accounting. **Soil** 4:101–122.

Fang Q et al. (2018) Visible and Near-Infrared Reflectance Spectroscopy for Investigating Soil Mineralogy : A Review**. Journal of Spectrosopy** 2018:1–14.

Fernades LA, Ribeiro CMM (2015) Evolution and paleoenvironment of the Bauru Basin (Upper Cretaceous, Brazil). **Journal of South American Earth** 61:71-90.

Fernandes KL (2017) **Estimativa da Caulinita e Gibbsita por técnicas de difração de raios x e espectroscopia de reflectância difusa dos solos do Planalto Ocidental Paulista**. 70 f. Dissertação (Mestre em Agronomia Ciência do Solo). Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinária, Universidade Estadual Paulista (UNESP), Jaboticabal.

Fernandes LA (1998) **Estratigrafia e evolução geológica da parte oriental da Bacia Bauru.**

Fernandes LA, Castro AB, Basilici G (2007) Seismites in continental sand sea deposits of the Late Cretaceous Caiuá Desert, Bauru Basin, Brasil. **Sedimentary Geology** 199:61–64.

Fernandes LA, Coimbra AM (2000) Revisão estratigráfica da parte oriental da bacia Bauru (Neocretáceo). **Revista Brasileira de Geociências** 30:717–728.

Fernandes RBA et al. (2004) quantificação de óxidos de ferro de latossolos brasileiros por espectroscopia de refletância difusa. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo** 28:245–257.

Fernandes LA (2004) Mapa litoestratigráfico da parte oriental da Bacia Bauru (PR, SP, MG), escala 1:1.000.000. Bol. Paraná**. Geoscience** 53–66.

Fernandes K, Marques Jr J, Santos ASR, Demattê JAM, Ribon AA (2020) Landscape-scale spatial variability of kaolinite-gibbsite ratio in tropical soils detected by diffuse reflectance spectroscopy. **Catena** 195:104795. https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104795

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

Ferreira MM, Fernandes B, Curi N (1999) Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 23:515–524.

Fitzpatrick RW, Schwertmann U (1982) Al-Substituted goethite na indicator of pedogenic and other weathering environments in South Africa. **Geoderma** 27:335-347.

Furian S, Barbiero, Boulet R, Curmi P, Grimaldi M, Grimaldi C (2002) Distribution and dynamics of gibbsite and kaolinite in an oxisol of Serra do Mar, southeastern Brazil. **Geoderma** 106:83-100.

Genú AM, Demattê JAM (2010) Informações espectroeletromagnéticas e topográficas na determinação de teores de componentes do solo. **Bragantia** 69:157-164.

Ghidin AA, Melo VF, Lima VC, Lima JMJC (2006) Toposseqüências de Latossolos originados de rochas balsáticas no Paraná. I - Mineralogia da fração argila. **Revista Brasileira de Ciências do Solo** 30:293-306.

Gomes RP (2017) **Gênese , Mineralogia E Dinâmica Do Fósforo Nos Solos Do Planalto Ocidental Paulista Gênese , Mineralogia E Dinâmica Do Fósforo**. Dissertação (Mestrado em Agronomia) Universideade Estadual Paulsita.

Gomez C, Lagacherie P, Coulouma G (2008) Continuum removal versus PLSR method for clay and calcium carbonate content estimation from laboratory and airborne hyperspectral measurements. **Geoderma** 148:141–148.

Guerrero C et al. (2016) Do we really need large spectral libraries for local scale SOC assessment with NIR spectroscopy? **Soil and Tillage Research** 155:501–509.

Hickmann C, Costa LM (2012) Estoque de carbono no solo e agregados em Argissolo sob diferentes manejos de longa duração**. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 16:1055-1061.

Hunt GR, Salisbury JW (1970) Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks, I. Silicate minerals. **Modern Geology** 1:283–300.

Ibiapina TVB (2015) **Processo De Erosão De Um Argissolo Utilizando O Modelo Wepp**. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - UNESP, Jaboticabal.

Inda Jr AV, Kämpf N (2005) Variability of goethite and hematite via reductive dissolution in soils of the tropical and subtropical. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 29:851– 866.

Jackson ML (1985) **Soil Chemical Analysis**, 2nd edition., Madison 930 p.

Kämpf N, Schwertmann U (1982) Relações entre óxidos de ferro e cor em solos cauliníticos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 07:27-31.

Kämpf N. (1988) O ferro no solo. In: REUNIÃO SOBRE FERRO EM SOLOS INUNDADOS, 1., Goiânia, **Anais**. Goiânia, Embrapa/CNPAF, 1988. (Documentos, 22).

Kämpf N, Curi N, Marques JJ. (2009) Intemperismo e ocorrência de minerais no ambiente do solo. In: Melo VF, Alleoni LRF (Eds.), Química e Mineralogia de Solos, Parte I – Conceitos Básicos. Viçosa (MG): SBCS, p. 333- 380.

Kemper WD, Chepil WS (1965) Aggregate stability and size distribution. In: Black CA (Ed.) **Methods of soil analysis. Madison**: ASA, pt. 1, p. 499-510.

Ker JC (1994) Latossolos Do Brasil : Uma Revisão. **Geonomos** 5:17–40.

La Scala JR N et al. (2000a) Carbon dioxide emission related to chemical properties of a tropical bare soil. **Soil Biology and Biochemistry** 32:1469–1473.

La Scala JR N et al. (2000b) Short-term temporal changes in the spatial variability model of CO 2 emissions from a Brazilian bare soil. **Soil Biology and Biochemistry** 32:1459–1462.

Leal FT et al. (2015) Characterization of potential CO2 emissions in agricultural areas using magnetic susceptibility. **Scientia Agricola** 72:535–539.

Lima CLR et al. (2012) Soil compressibility and least limiting water range of a constructed soil under cover crops after coal mining in Southern Brazil. **Soil and Tillage Research** 124:190–195.

Lybbert TJ, Sumner DA (2012) Agricultural technologies for climate change in developing countries: Policy options for innovation and technology diffusion. **Food Policy** 37:114–123.

Madeira Netto J et al. (1995) Spectral (MIR) determination of kaolinite and gibbsite contents in lateritic soils. C.R. **Acad. Sci. Paris** 321:119–128.

Magalhães SSDA et al. (2013) Estoque de nutrientes sob diferentes sistemas de uso do solo de Colorado do Oeste-RO Nutrient stocks under different land use systems of a soil. **Acta Amazonica** 43:63–72.

Marques Jr J et al. (2014) Magnetic susceptibility and diffuse reflectance spectroscopy to characterize the spatial variability of soil properties in a brazilian haplustalf. **Geoderma** 219–220:63–71.

Marques Jr J, Alleoni LRF, Teixeira DB, Siqueira DS, Pereira GT. (2015) Sampling planning of micronutrients and aluminium of the soils of. **Geoderma Regional** 4:91–99.

Mazurack AP (1950) Effect of gaseous phase on water-stable synthetic aggregates. **Soil Science** 69:135-148.

Mclaughlin M (2019) The Future of Phosphorus Use in Agriculture. Better Crops with **Plant Food** 103:57–58.

Mehra OP, Jackson ML (1958) Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. **Clays Clay Minerals** 7:317–327.

Mehra OP, Jackson ML (1960) Iron oxide removed from soils and clays by dithionitecitrate system buffered with sodium bicarbonate. **Clays and Clay Minerals** 7:1317-327.

Mendes T (2015) **Cenários de uso e manejo para conservação do estoque de carbono do solo no Estado do Maranhão**. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – UNESP, Jaboticabal.

MINITAB Release (1961) **Making Data analysis Easler**: version 13.1, 2000.Norrish e Taylor.

Mogollón JM et al. (2018) Future agricultural phosphorus demand according to the shared socioeconomic pathways. **Global Environmental Change** 50:149–163.

Oliveira JF et al. (2016) Visible and near infrared spectra of Ferralsols according to their structural features. **Journal of Near Infrared Spectroscopy** 254:243–254.

Oliveira JF, Brossard M, Siqueira PR, Vendrame PRS, Mayi Iii S, Corazza EJ, Marchão RL, Guimarães MF. (2013) Soil discrimination using diffuse reflectance Vis – NIR spectroscopy in a local toposequence. **Comptes Rendus Geosciences** 345:446–453.

Padarian J, Minasny B, Mcbratney AB (2015) Using Google's cloud-based platform for digital soil mapping. **Computers & Geosciences** 83:80–88.

Panosso AR, Perillo LI, Ferraudo AS, Pereira GT, Vivas- Miranda JG, La Scala N. (2012) Fractal dimension and anisotropy of soil CO2 emission in a mechanically harvested sugarcane production area. **Soil and Tillage Research** 124: 8-16.

Parron LM, Garcia JR, Oliveira EB, Brown GG, Prado RB (2015) **Estoques de carbono no solo como indicador de serviços ambientais, in: Serviços Ambientais Em Sistemas Agrícolas e Florestais Do Bioma Mata Atlântica**. Brasília, DF: Embrapa pp. 92–100.

Peluco RG. (2016) Magnetismo E Cor Na Identificação De Solos Com Diferentes Potenciais De Sorção De Imazaquim. 105f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) UNESP, Jaboticabal, SP.

Pizarro MA, Epiphanio JCN, Galvão LS (2001) Caracterização mineralógica de solos tropicais por sensoriamento remoto hiperespectral. **Pesquisa Agropecuária Tropical** 36:1277–1286.

Raij B (2001) **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais.** Campinas, Instituto Agronômico, 285p.

Raij B, Van Zullo MAT (1977) **Métodos de análises de solo.** Campinas: Instituto Agronômico, 16p.

Reitzel K et al. (2019) New Training to Meet the Global Phosphorus Challenge. **Environmental Science & Technology** 53:8479–8481.

Resende M (1976) **Mineralogy, chemistry, morphology and geomorphology of some soils of Central Plateau of Brazil**. 283p. Thesis [Doctor]. Purdue University, West Lafayette.

Romaroson VH, Becquer T, Sá SO, Razafimahatratra H, Delariviére JL, Blavet D, Vendrame PRS, Rabeharisoa L, Rakotondrazafy AFM (2018) Mineralogical analysis of ferralitic soil in Madagascar using NIR spectroscopy. **Catena** 168:102-109.

Rosendo JS, Rosa R (2012) Comparação do estoque de C estimado em pastagens e vegetação nativa de cerrado. **Sociedade & Natureza** 24:359-376.

Saiz G, Bird MI, Domingues T, Schrodt F, Schwarz M, Feldpausch TR, Veenendaal E, Djagbletey G, Hien F, Compaore H, Diallo A, Lloyd J (2012) Variation in soil carbon stocks and their determinants across a precipitation gradient in West Africa. **Global Change Biology** 18:1670-1683.

Sanchez RB et al. (2009) Variabilidade espacial de atributos do solo e de fatores de erosão em diferentes pedoformas. **Bragantia** 68:1095–1103.

Santos FAS et al. (2015) Atributos químicos , físicos e estoque de cálcio , magnésio , potássio e fósforo em solos de campos de murundus no Brasil. **Acta Amazonica** 45:101–110.

Schwertmann U (1993) Relations between iron oxides, soil color, and soil formation. In: Bigham JM, Ciolkosz EJ Soil color. Madison: **Soil Science Society of America** 51-69.

Schwertmann U (1985) The effect of environments on iron oxide minerals. **Advance Soil Science** 1:172-200.

Siansi FL. (2019) Relações entre assinatura magnética do solo e recomendações de calagem, gessagem e fosfatagem corretiva para cana-de-açúcar. 100f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). UNESP, Jaboticabal, SP.

Silva Júnior JF et al. (2012) Classificação numérica e modelo digital de elevação na caracterização espacial de atributos dos solos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** 16:415–424.

Silva LS et al. (2020) Spatial variability of iron oxides in soils from Brazilian sandstone and basalt. **Catena** 185:104258.

Silva LS (2016) **Mineralogia Da Fração Argila Dos Solos Do Planalto Ocidental Paulista**. Dissertação (Mestrado em Agronomia Ciência do Solo) UNESP, Jaboticabal.

Silveiro NEQ, Siqueira DS, Coelho RM, Da Costa Ferreira D, Marques JJr. (2019) Protocol for the use of legacy data and magnetic signature on soil mapping of São Paulo Central West, Brazil. **Science Of The Total Environment** 693:133463, 2019. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.07.269

Silvero NEQ. (2018) Protocolo para uso de dados legados no mapeamento de solos do Planalto Ocidental Paulista. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2018. Disponível em < https://repositorio.unesp.br/handle/11449/152957 >

Siqueira DS, Marques Jr J, Matias SSR, Barrón V, Torrent J, Baffa O, Oliveira LC (2010) Correlation of properties of Brazilian Haplustalfs with magnetic susceptibility measurements. Soil**, Use and Management** 26:425-431.

Siqueira DS, Marques Jr J, Pereira GT, Barbosa RS, Teixeira DB, Peluco RG. (2014) Sampling density and proportion for the characterization of the variability ofOxisol attributes on different materials. **Geoderma** 232-234:172-182. http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.04.037

Stenberg B et al. (2010) **Visible and Near Infrared Spectroscopy in Soil Science**. In: Soil Science. [s.l: s.n.]. 107p. 163–215.

Stenberg B, Viscarra-Rossel RA (2010) **Diffuse Reflectance Spectroscopy for High-Resolution Soil Sensing.** In: Proximal Soil Sensing. [s.l: s.n.]. p. 29–47.

Teixeira DDB (2015) **Suscetibilidade magnética e análise de incertezas em mapeamento de solos.** Dissertação (Mestrao em Agronomia em Ciência do Solo) UNESP, Jaboticabal.

Teixeira DDB, Bicalho SE, Panosso AR, Cerri CEP, Pereira GT, LaScala Junior N (2013) Spatial variability of soil CO_2 emission in a sugarcane area characterized by secondary information. **Scientia Agricola** 70:195–203.

Teixeira DDB, Marques Júnior J, Siqueira DS, Vasconcellos V, Carvalho Jr O, Martins E, Pereira G (2018) Mapping units based on spatial uncertainty of magnetic susceptibility and clay content. **Catena** 164:79-87.

Vasconcelos V et al. (2013) Modelo De Evolução Pedogeomorfológica Da Serra Da Canastra, Mg Pedogeomorphological Evolution Model Of Serra Da Canastra, MG Palavras-chave: Informações sobre o Artigo. **Revista Brasileira de Geomorfologia** 14:197–212.

Vasconcelos V, Junior OAC, Martins ÉDS, Junior AFC, Guimarães RF, Gomes RA, Trancoso. (2012) Sistema de classificação geomorfométrica baseado em uma arquitetura sequencial em duas etapas: árvore de decisão e classificador espectral, no Parque Nacional Serra da Canastra. **Revista Brasileira de Geomorfologia** 13:171–186.

Vieira SR (2000) **Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo**. In: Novais RF, Alvarez VVH, Schaefer CE (Eds.). Tópicos em Ciência do Solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 1-54.

Vilar CC et al. (2010) Capacidade máxima de adsorção de fósforo relacionada a formas de ferro e alumínio em solos subtropicais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 34:1059–1068.

Viscarra-Rossel RA et al. (2016) A global spectral library to characterize the world's soil. **Earth-Science Reviews** 155:198–230.

Viscarra-Rossel RA et al. (2010) Mapping iron oxides and the color of Australian soil using visible – near - infrared reflectance spectra. **Journal Of Geophysical Research** 115:1–13.

Viscarra-Rossel RA et al. (2017) Novel Proximal Sensing for Monitoring Soil Organic C Stocks and Condition. **Environmental Science and Technology** 51:5630–5641.

Viscarra-Rossel RA (2011) Fine-resolution multiscale mapping of clay minerals in Australian soils measured with near infrared spectra. **Journal of Geophysical Research: Earth Surface** 116:1–15.

Viscarra-Rossel RA, Bui EN (2015) A new detailed map of total phosphorus stocks in Australian soil. **Science of the Total Environment** 542:1040–1049.

Viscarra-Rossel RA et al. Mapping the information content of Australian visible-near infrared soil spectra. World Congress of Soil Science, **Soil Solutions for a Changing World** 91–94.

Viscarra-Rossel RA (2008) Parles: software for chemometric analysis of spectroscopic data. **Chemometries and Intelligent Laboratory Systems** 90:72-83.

Viscarra Rossel RA, Walvoort DJJ, McBratney AB, Janik LJ, Skjemstad JO (2006) Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. **Geoderma** 131:59–75. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.03.007

Viscarra-Rossel RA, Bui EN (2016) A new detailed map of total phosphorus stocks in Australian soil. **Science Total Environmental** 542:1040–1049. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.09.119

Vitorino ACT, Ferreira MM, Curi N, Lima JM, Silva MLN, Motta PEF (2003) Mineralogia, química e estabilidade de agregados do tamanho de silte de solos da Região Sudeste do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** 38:133-141.

Zhao D et al. (2018) A Vis-NIR Spectral Library to Predict Clay in Australian Cotton Growing Soil. **Soil Science Society of America Journal** 82:1347.

CAPÍTULO 3 - Predição e mapeamento detalhado de C por sensor espectral para solos do Planalto Ocidental Paulista

Resumo: A pressão na agricultura para aumento na produtividade, a fome e o aquecimento global, são temas que vem ganhando grande repercussão. E o solo pode desempenhar um papel fundamental, no atual cenário. Considerado como maior reservatório de estoque de C na natureza, estudos sobre este elemento no solo podem auxiliar em importantes planejamentos agrícolas e ambientais. Neste sentido o presente estudo tem como objetivos: a) estudar a relação do C com diferentes atributos mineralógicos, químicos e físicos do solo, em diferentes compartimentos geológicos e geomorfológicos; b) compreender quais as faixas espectrais são mais importantes para estimativa do conteúdo de C; c) estimar o conteúdo de C a partir da espectroscopia de reflectâncias difusa, por diferentes técnicas matemáticas e apontar qual a melhor para condições de solo tropical; d) mapear com detalhe os conteúdos de C. O estudo foi desenvolvido no Planalto Ocidental Paulista, com um total de 265 amostras. Foram avaliados os seguintes atributos: argila, silte, areia, ferro cristalino e ferro não cristalino, saturação por bases, densidade do solo, volume total de poros, C total, estoque de C, razões caulinita/(caulinita+gibbsita) e hematita/(hematita+goethita), teores de hematita e goethita e as curvas espectrais. Os dados foram submetidos para fins de caracterização: a estatística descritiva, correlação de sperman, análise de Stpewise e agrupamento de cluster; para fins de estimativa: regressão mínima por quadrados parciais (PLSR) e random forest (RF); e para fins de mapeamento: a geoestatística. Solos mais argilosos, mais oxídicos, com maior volume total de poros menor densidade, de menor reflectância e de compartimento basalto, apresentam os maiores conteúdos de C. O uso do RF associado a espectroscopia é eficiente para a estimativa e mapeamento dos conteúdos de C. Os mapas de C estimado por RF, são semelhantes ao mapa observado e podem ser utilizados para definição de políticas públicas para uso do solo.

Palavras-chave: quimiometria, aprendizagem de máquina, aquecimento global, mineralogia do solo.

3.1 Introdução

A população mundial já passa dos 7,7 bilhões de pessoas, com estimativa para 9,7 bilhões até 250 (ONU, 2019). Cerca de 20% da população mundial atual, não tem acesso a alimentação suficiente (FAO, 2019). Estes números causam enorme pressão na agricultura para aumento na produtividade, segurança alimentar e sustentabilidade dos ecossistemas. A solução mais incitada é o aumento da produtividade em áreas já exploradas. Para tanto é necessário uso de diversas tecnologias, entre as quais aquelas que envolvem processos de alteração do solo, aumentando o uso irracional de fertilizantes e a emissão de gases. Tais tecnologias no cenário atual, devem ser evitadas.

O solo é o maior reservatório de C na natureza (Ahmed, 2018; Assad et al., 2013; Gruijter et al., 2016; Keskin et al., 2019), chegando a ser duas vezes maior que a atmosfera e a vegetação (Minasny et al., 2017). O C é considerado uma variável importante para fertilidade e produtividade, melhoria das condições físicas do solo (Guerrero et al., 2016; Kuang and Mouazen, 2013; Somarathna et al., 2018), além de favorecer o aquecimento global (England and Viscarra-Rossel, 2018; Gruijter et al., 2016; Keskin et al., 2019). Pequenas mudanças nos estoques de C por área, têm impactos significativos no clima e no gerenciamento da terra (Falloon and Betts, 2010). Entender os processos e as relações do C, com demais atributos do solo, a fim de melhorar as práticas agrícolas, é essencial para programas de sequestro de C (Dawson and Smith, 2007; Somarathna et al., 2018).

A espectroscopia de reflectância difusa (ERD) é uma técnica que registra os processos de absorção e dispersão produzidos na superfície das partículas do solo, (Clark, 1999). A técnica é rápida, não poluente, de menor custo e já tem sido utilizada para caracterização de diferentes atributos (Ackerson et al., 2015; Bahia et al., 2015a; Camargo et al., 2015; Demattê et al., 2019, 2017; Stenberg et al., 2010; R. A. Viscarra Rossel et al., 2010; Viscarra Rossel and Bouma, 2016). Seu uso para estimativa do conteúdo de C no solo (Asgari et al., 2020; Bahia et al., 2017; Bellon-Maurel and McBratney, 2011; Gelsleichter et al., 2019; Viscarra Rossel et al., 2006) pode permitir

o mapeamento detalhado da variável em grandes escalas e a compreensão da sua variação espacial nas paisagens (Minasny et al., 2017; Somarathna et al., 2018).

Os minerais presentes no solo governam inúmeras propriedades que tem relação direta com a produtividade das culturas (Barbieri et al., 2009; Camargo et al., 2008a, 2008b; Carmo et al., 2016; Ferreira et al., 1999a; Montanari et al., 2010; Sanchez et al., 2013). Alguns estudos apontam que existe relação direta entre os óxidos e o fluxo de C no solo em áreas pequenas (Bahia et al., 2017, 2014, 2015b; LaScala Jr et al., 2000). Todavia as relações existentes entre a mineralogia e o C, em grandes áreas, com maior variabilidade geológica e geomorfológica, ainda são poucos estudados. Compreender a relação entre os atributos do solo detalhadamente é a melhor alternativa para práticas de manejo e planejamento do solo (Padarian et al., 2015a).

O solo é um sistema em constante processo de alteração. Portanto não há como fazer previsões certas sobre as consequências das atividades humanas nos ecossistemas terrestres (Quinton et al., 2010). A difusão de novas tecnologias e pesquisas agrícolas, desenvolvidas nas próximas décadas irão determinar as possibilidades de mitigação de recursos e adaptação as mudanças climáticas para garantir a continuidade na produção de alimentos (Lybbert and Sumner, 2012). E sempre há a escassez de dados, inventários e mapas detalhados de C para projetos de grande escala (Somarathna et al., 2018; Stevens et al., 2013), e as melhores técnicas matemáticas para estes estudos (Barbieri, 2011; Morellos et al., 2016), principalmente para o Brasil.

Análises multivariadas, como a regressão mínima por quadrados parciais (PLSR) (Viscarra-Rossel, 2008) e algoritmos de aprendizagem de máquina, como o Radom Forest (RF) (Breiman, 2001a), tem sido amplamente utilizadas na estimativa de C com dados de ERD (Asgari et al., 2020; Bahia et al., 2017; Gelsleichter et al., 2019; Morellos et al., 2016; Somarathna et al., 2018). Bellon-Maurel e McBratney (2011) fornecem uma revisão detalhada de estudos sobre ERD e estimativa de C. Segundo os autores a proposta futura é otimizar estes estudos espacialmente, para fins de mapeamento, e associar estas estimavas a modelos matemáticos robustos.

Estudos de ampla magnitude, que apresentem não só a estimativa do C, mas também sua relação com outros atributos do solo e sua variabilidade espacial, em

mapas, são de extrema importância, para agricultura e sustentabilidade dos ecossistemas terrestres. Neste contexto o presente estudo tem como objetivos: a) estudar a relação do C com diferentes atributos mineralógicos, químicos e físicos do solo, para diferentes compartimentos geológicos e geomorfológicos; b) compreender quais as faixas espectrais são mais importantes para estimativa do conteúdo de C; c) estimar o conteúdo de C a partir da ERD, por diferentes técnicas matemáticas e apontar qual a melhor para condições de solo tropical; d) mapear com detalhe os conteúdos de C.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Localização e caracterização da área

A área de estudo foi o Planalto Ocidental Paulista (POP), que corresponde aproximadamente 13 milhões de hectares (~ 48% do Estado de São Paulo) (Figura 1). Na região norte e noroeste do POP prevalece o clima 1tropical com estação seca de inverno, enquanto na região sul prevalece o clima temperado úmido com verão quente. Na parte leste e sudeste o clima é temperado úmido com inverno seco e verão quente. Nestas regiões pode ser subclassificado em mais 4 variações de acordo com Thornthwaite. A vegetação natural da área era Mata Atlântica na região oeste e Cerrado na região leste e sudoeste do Planalto, sendo o uso atual mais representativo cultivo de cana-de-açúcar e pastagem.

O esboço geológico é caracterizado principalmente por sedimentos arenosos, argilosos e cascalho, rochas vulcânicas de composição básica e sequências sedimentares, principalmente psamíticas, podendo incluir piroclásticas (Figura 1a). Dos 13 milhões de hectares do Planalto, aproximadamente 2 milhões hectares são ocupados por basalto (15,5%), 7,4 milhões hectares pela Formação Vale do Rio do Peixe (57,1%) e 3,6 milhões de hectares pelas outras formações sedimentares (27,5%).

As formações geológicas do Planalto são divididas em dois Grupos: (i) Grupo Caiuá composto pelas Formações Santo Anastácio e Rio Paraná no estado de São Paulo, correspondente a depósitos de lençóis de areia, de clima seco, acumulados

em extensas e monótonas planícies desérticas, marginais dos grandes complexos de dunas do sand sea (Deserto Caiuá) que se estende para região norte do estado do Paraná. O Grupo Bauru é composto pelas formações Uberaba, Vale do Rio do Peixe, Araçatuba, São José do Rio Preto, Presidente Prudente e Marília. Inclui ainda os Analcimitos Taiúva, rochas vulcânicas localmente intercaladas na sequência (Fernandes, 2004; Fernandes et al., 2007).

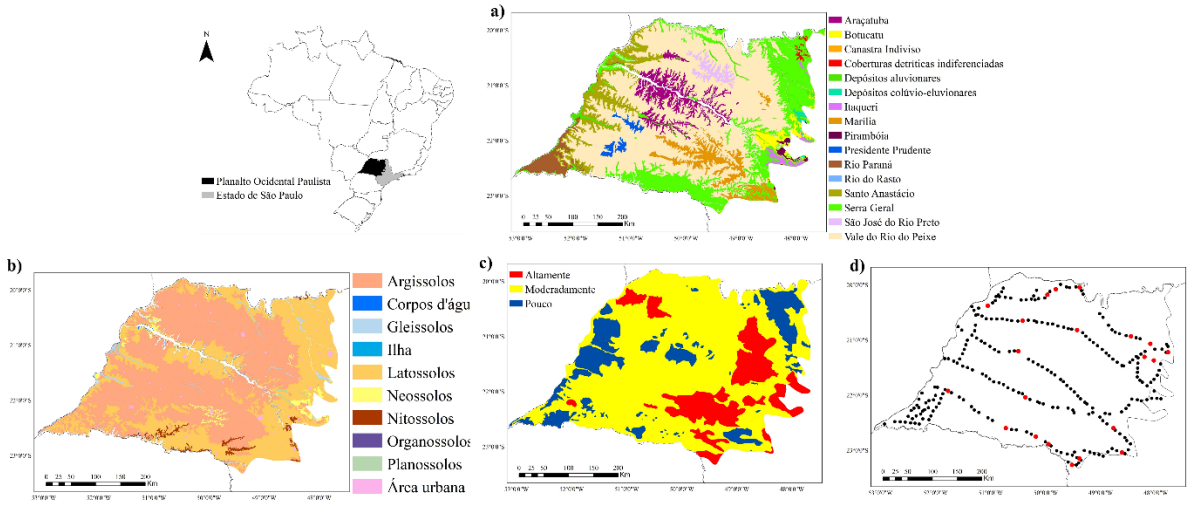


Figura 1. a) Mapa geológico atualizado do Planalto Ocidental Paulista. b) Mapa pedológico do Planalto Ocidental Paulista. FONTE: Instituto Agronômico de Campinas. c) Mapa de dissecação do Planalto Ocidental Paulista. d) Planejamento amostral dos pontos coletados.

Os solos de maior ocorrência são classificados como Argissolo Vermelho-Amarelo, Latossolo, Latossolo férrico, Neossolo Litólico, Nitossolo Vermelho e Gleissolo Háplico (Figura 1b). A Figura 1d mostra a geomorfologia da área estudada. O predomínio na região é de áreas moderadamente dissecadas. O nível de dissecação expressa a evolução solo paisagem (Figura 1b), que é associada a pedogênese (taxa de formação do solo) e geomorfogênese (taxa de evolução da paisagem).

Foram coletadas 265 amostras de solo georreferenciadas no POP para o estudo da variabilidade espacial dos atributos mineralógicos na profundidade de 0,00 – 0,20 m. o espaçamento mínimo entre as amostras foi de 10 km e o espaçamento máximos de 60 km (Figura 1d). As amostras foram coletadas ao longo das rodovias

do Estado, em locais representativos e que tenham sofrido mínima interferência antrópica. Com base no arquivo de rodovias do Estado fornecidas pelo Departamento de Estradas e Rodagem foi elaborado o plano de amostragem utilizando a ferramenta ET GeoWizards no ArcView 9.3. As informações das coordenadas de cada ponto foram definidas previamente e inseridos em um GPS de navegação com precisão de 3 a 5 metros. A coleta das amostras foi orientada por navegação em tempo real utilizando GPS e notebooks.

Após a identificação dos padrões de variabilidade dos atributos do solo e identificação de áreas homogêneas foram selecionados pontos simulando amostragem estratificada (Dinkins e Jonessoil, 2008), 22 pontos em vermelho na Figura 1d. A escolha dos pontos amostrados levou em conta experiências anteriores, dentro do POP, utilizando técnicas geoestatísticas (Campos et al., 2012; Marques Júnior et al., 2015; Teixeira et al., 2013), propondo uma distribuição representativa da área estudada.

3.2.2 Análises

3.2.2.1 Análises granulométricas e químicas do solo

As análises granulométricas foram feitas para todos os pontos do POP (265 amostras). Foi utilizado o método da pipeta, com uma solução de NaOH 0,1 mol L^{-1} como dispersante químico e agitação mecânica em aparato de baixa rotação, por 16 horas, seguindo metodologia preconizada (Embrapa, 2017). Os conteúdos de cálcio, magnésio e potássio foram extraídos utilizando-se o método da resina trocadora de íons (Raij, 2001). A saturação por bases (V%) foi dada por: V% = (Mg+Ca+K) /CTC.

3.2.2.2 Análises mineralógicas

Para todas as amostras do planejamento amostral (265 pontos) foram determinadas as análises de mineralogia. A determinação dos teores de ferro relativo à totalidade de ferros pedogenéticos extraídos por ditionito-citrato-bicarbonato (Fed) seguiu a metodologia de Mehra e Jackson (1958) foram feitas para todos os pontos

do grid e para as amostras estratificadas. A determinação dos teores de ferro extraídos por oxalato de amônio (Feo) relativos aos óxidos de ferro pedogenéticos de baixa cristalinidade seguiu a metodologia citada Camargo et al. (1986), adaptado de Schwertmann (1993).

Os minerais foram quantificados para todos os pontos do grid total e para as amostras estratificadas. A argila para a análise de difratometria de raios-X (DRX) foi separada da amostra de solo pelo método de centrifugação (Jackson, 1985). Na caracterização da caulinita (Ct) e da gibbsita (Gb), a fração argila foi submetida à eliminação dos óxidos de ferro pelo método ditionito-citrato-bicarbonato (DCB), segundo Mehra e Jackson (1960), e peneirada em malha de 0,10 mm. Os minerais da fração argila Ct e Gb foram caracterizados por DRX em lâminas confeccionadas com material sem orientação (em pó). A caracterização da goethita (Gt) e hematita (Hm) foi feita após tratamento da fração argila com NaOH 5 mol L^{-1} (1g argila 100 ml^{-1} solução), para a concentração dos mesmos, segundo método de Norrish e Taylor (1961) modificado por Kämpf e Schwertmann (1982).

A DRX foi realizada com as amostras preparadas pelo método do pó, em aparelho HGZ equipado com cátodo de cobalto e filtro de ferro e radiação K (20 mA, 30 kV) para a difração da Hm e Gt e cátodo de cobre com filtro de níquel para a difração da Ct e Gb. A velocidade de varredura empregada foi de 1º2θ $minuto^{-1}$ e amplitude de 23 a 49°. Foram utilizados para avaliação mineralógica os reflexos da Ct (001), Gb (002), Hm (012 e 110) e da Gt (110 e 111).

3.2.2.3 Espectroscopia de reflectância difusa (ERD)

Para todas as amostras do planejamento amostral (265 pontos) foi realizada a espectroscopia de reflectância difusa (ERD). Para a obtenção dos espectros de reflectância difusa, foi moído aproximadamente 1 g de solo (TFSA) em almofariz de ágata até obtenção de coloração constante e o conteúdo foi 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 nm s^{-1} ao longo do intervalo

de 350 a 2.500 nm (350 – 800 nm – visível – VIS e 801 – 2500 nm – infravermelho próximo-NIR).

3.2.2.4 Conteúdo e Estoque de Carbono

Os teores totais de carbono (C%) do solo, foram determinados para todos os pontos amostrados no POP. A análise foi por combustão via seca, no equipamento LECO CN-2000 (LECO Corporation, St Joseph, MI, USA). As amostras de solo (TFSA) foram passadas por peneira de 100 mesh e oxidadas a altas temperaturas (forno a 1350 ºC), com auxílio de oxigênio 2.8 ultrapuro.

O estoque de C foi analisado apenas para as amostras estratificadas (22 pontos). Amostras indeformadas foram coletadas com anel volumétrico (com volume conhecido) na profundidade de 0,00-0,05, m para determinação dos seguintes atributos físicos: porosidade, densidade do solo (DS) e umidade do solo. Para o cálculo da DS, serão determinadas as respectivas massas e umidade do solo contido no anel. A densidade de cada camada foi calculada de acordo com a equação:

$$DS\ (g\ cm^{-3}) = (\text{massa de solo seca (g)}) / (\text{volume do cilindro})\ \ (cm^{-3})$$

O cálculo dos teores totais do estoque de C foi efetuado mediante curvas de calibração cruzada e com base no peso da amostra analisada. Para cada amostra de solo, foram calculados os estoques de C (em Mg ha^{-1}), conforme equação descrita abaixo:

$$\text{Estoque de C} = C\ (\%) \times \text{Densidade do solo}\ (g\ cm^{-3}) \times \text{Espessura (cm)}$$

3.2.3 Análise Estatística

Os dados foram submetidos à estatística descritiva após finalização das análises laboratoriais. Foram calculados: média, máximo, mínimo desvio padrão, e coeficiente de variação. Para averiguar a correlação entre os atributos do solo serão calculados os coeficientes de correlação simples (Sperman).

Todos os comprimentos de onda das curvas espectrais foram submetidos à regressão Stepwise de forma gradual e interativa (forward- backward), a partir do critério de seleção Akaike (AIC). Após a regressão Stepwise foram selecionadas quais comprimentos de onda eram mais relevantes para estimativa do teor de C. Estes comprimentos foram submetidos a análise de agrupamento de Cluster.

Para estimativa dos teores de C foram utilizadas duas análises: regressão por mínimos quadrados parciais (PLSR) e aprendizagem de máquina (AM). A PLSR usa calibrações e validações quimiométricas, utilizando procedimento de validação cruzada. Foram realizadas as conversões das medidas de reflectância em absorbância (Log10(1/Reflectância) para processamento dos dados no programa. O software utilizado foi o ParleS® (Viscarra-Rossel, 2008) onde foi feita a relação entre toda a curva espectral e os atributos estudados. Para análise, o banco de dado foi subdivido em conjunto calibração (30%) e outro conjunto de predição (70%). O desempenho de cada modelo foi avaliado através do coeficiente de determinação (R^2) e o raiz do erro quadrático médio (RMSE), tais métricas foram avaliadas tanto na calibração como na predição.

O algoritmo de AM utilizado neste, foi o de regressão florestas aleatórias (RF do inglês Random Forest) (Breiman, 2001b). A RF é uma técnica não paramétrica que foi desenvolvida com o intuito de melhorar a previsão dos modelos de Árvores de Classificação e Regressão pois utiliza árvores de decisão totalmente crescidas e reduz o erro e a variação (Yan et al., 2020). Consiste na combinação de diversas árvores, que são geradas a partir de uma variável de entrada amostrada aleatoriamente, todas as árvores apresentam o mesmo tamanho. Já as subdivisões das árvores é realizada com base em um subconjundo amostrado aleatoriamente do banco de dados total, o resultado final do RF é composto pela média dos resultados de todas as árvores (Chagas et al., 2016). Dentre os algoritmos de AM o RF vem sendo um dos mais utilizados por apresentar alto desempenho na predição de atributos do solo (Pahlavan-Rad et al., 2020).

Para avaliar o desempenho dos modelos de previsão é necessário avaliar o seu desempenho em um conjunto de dados independentes e inéditos. Assim o banco de dados foi subdividido em dois conjuntos de diferentes, separados de forma aleatória, ficando: 50% para treino e 50% para teste. A divisão foi feita desta forma

devido a elevada variabilidade dos dados. O desempenho de cada modelo foi avaliado através do R^2 e RMSE, na etapa de treino e na etapa de teste, para a execução do algoritmo foi utilizado o pacote Sckit-Learn (Pedregosa et al., 2011).

Para a caracterização do padrão da variabilidade espacial, dos valores observados foi utilizada a análise geoestatística (Vieira, 2000). Semivariogramas relacionando o vetor distância à semivariância foram construídos e modelos foram ajustados. Os valores foram interpolados pela krigagem ordinária para a construção de mapas de distribuição espacial.

3.3 Resultados e Discussões

3.3.1 Correlação dos teores de C com atributos do solo

Os valores médios de granulometria são observados na Tabela 1. Os solos originados de arenito apresentam média de areia de 82%, enquanto aqueles de basalto são mais argilosos, com média de 53% de argila. O mesmo pode ser observado pelos altos coeficientes de variação, conforme classificação de Warrick e Nielson (1980). Os solos de arenito apresentam máximo de 90% e mínimo de 73% de areia e, portanto, menor variabilidade quando comparado aos solos de basalto. O CV para o conteúdo de areia é classificado como baixo para o compartimento.

Nos compartimentos geomorfológicos a média de argila aumentou do compartimento pouco dissecado (23% de argila) para o compartimento altamente dissecado (34% de argila). Já as médias de silte e areia aumentaram do compartimento altamente dissecado para o pouco dissecado (Tabela 1). Os valores de máximo e mínimo, para as médias de argila e silte, são maiores para o compartimento pouco dissecado quando comparado aos demais. Isto aponta que os solos dos compartimentos altamente dissecados tendem a ser mais argilosos, e os do compartimento pouco dissecados mais arenosos.

Ambientes pouco dissecados seriam aqueles mais planos que favorecem a maior infiltração de água, melhor drenagem, maior lixiviação, radiação solar mais uniforme, entre outras características que condicionam maior intemperismo do solo (maiores taxas de pedogênese). Portanto esperava-se maiores médias de argila e

menores de areia. Todavia considerando que os compartimentos altamente dissecados apresentam áreas côncavas de alta intensidade, e comportamento deposicional (Sanchez et al., 2009) materiais mais finos, como argila e material orgânico podem ter se acumulado neste compartimento. Resultados semelhantes foram observados por Silva et al. (Silva et al., 2020) e por Cunha et al. (2005).

Tabela 1. Estatística descritiva para os atributos mineralógicos dos solos de diferentes compartimentos geológicos e geomorfológicos, para áreas agrícolas e mata nativa do Planalto Ocidental Paulista.

	ARGILA	SILTE	AREIA	Fed	Feo	V	DS	VTP	C	EC	Ct/	Gt/	Gt	Hm
		%		g Kg^{-1}		%	g cm^{-3}	%	g Kg^{-1}	Mg Kg^{-1}	(Ct+Gb)	(Gt+Hm)	g Kg^{-1}	
SOLOS DE COMPARTIMENTO ARENITICO														
MÉD.	14,5	3,1	82,2	12,5	0,8	65,0	1,5	36,0	10,4	80,7	0,8	0,2	5,1	12,1
MIN	7,4	0,5	73,4	5,7	0,4	36,5	1,3	30,2	5,2	42,0	0,4	0,08	1,3	3,5
MÁX	22,5	11,3	90,8	18,2	1,9	78,8	1,6	40,8	18,1	147,6	1,0	0,6	8,5	19,8
DP	4,7	3,1	5,2	4,0	0,3	11,5	0,1	3,9	4,4	33,3	0,1	0,1	2,4	51,1
CV	32,5	98,4	6,4	32,2	42,7	17,6	8,6	10,8	40,9	41,3	19,9	47,1	47,0	42,6
SOLOS DE COMPARTIMENTO BASÁLTICO														
MÉD.	53,1	9,4	37,4	52,2	3,3	70,2	1,3	41,7	20,2	144,3	0,	0,2	15,6	55,8
MIN	27,5	1,5	23,8	29,9	1,5	43,6	1,2	32,5	14,5	102,0	0,2	0,03	2,8	23,8
MÁX	67,4	20,3	70,9	64,3	6,0	84,5	1,6	47,6	25,5	189,1	0,7	0,5	26,0	73,6
DP	15,7	6,9	20,0	12,6	1,3	12,3	0,1	5,0	3,8	29,1	0,1	0,1	7,1	18,5
CV	29,7	73,1	53,6	24,1	41,7	17,6	10,6	12,7	18,5	20,1	33,3	61,0	45,7	33,2
SOLOS DE COMPARTIMENTOS ALTAMENTE DISSECCADOS														
MÉD.	34,3	3,7	61,8	29,3	1,7	71,1	1,3	40,6	19,6	137,5	0,7	0,2	10,2	30,2
MIN	19,9	0,6	25,3	8,4	0,5	67,3	1,2	36,9	15,9	110,7	0,3	0,03	2,8	7,7
MÁX	65,0	9,7	76,9	56,9	3,5	74,1	1,4	45,6	25,5	189,1	1,0	0,5	26,0	73,6
DP	20,8	4,0	24,7	21,4	1,3	3,2	0,0	3,6	4,5	35,2	0,2	0,1	10,7	29,6
CV	60,7	108,2	39,9	73,1	79,6	4,5	5,4	9,0	23,0	25,6	35,6	65,7	105,1	98,0
SOLOS DE COMPARTIMENTOS MODERADAMENTE DISSECCADOS														
MÉD.	28,0	5,3	66,5	27,0	1,8	65,7	1,4	37,2	13,0	95,6	0,7	0,2	8,2	28,5
MIN	10,0	0,5	23,8	8,6	0,4	36,5	1,2	30,1	5,3	42,0	0,2	0,08	1,3	5,9
MÁX	67,4	18,6	89,3	64,3	6,0	78,8	1,6	47,6	23,9	172,3	1,0	0,3	18,9	69,0
DP	22,0	5,0	25,2	20,8	1,6	12,0	0,1	5,6	6,3	44,9	0,3	0,1	5,2	23,5
CV	78,5	94,3	37,9	77,0	86,9	18,2	10,4	15,7	48,5	46,9	40,4	45,2	63,7	82,2
SOLOS DE COMPARTIMENTOS POUCO DISSECCADOS														
MÉD.	23,3	8,2	68,4	23,7	1,3	67,4	1,4	38,8	14,8	100,0	0,7	0,4	10,5	22,6
MIN	7,4	1,6	27,2	5,7	0,5	45,6	1,3	35,3	8,8	61,6	0,6	0,2	2,7	3,5
MÁX	52,4	20,3	90,8	58,5	2,9	84,5	1,5	42,5	21,7	143,6	1,0	0,6	22,9	58,9
DP	25,2	10,5	35,7	30,2	1,3	19,8	0,1	3,2	6,9	41,2	0,2	0,1	10,8	31,6
CV	108,3	127,2	52,2	127,4	98,7	29,5	9,1	8,1	49,2	41,2	26,9	45,1	103,1	140,6

* MÉD – média; MIN – mínimo; MÁX – máximo; DP – desvio padrão; CV – coeficiente de variação; Fed – ferro cristalino; Feo – ferro não cristalino; V% - saturação por bases; DS – densidade do solo; VTP – volume total de poros; C – carbono; EC – estoque de carbono; Ct – caulinita; Gb – gibbsita; Gt – goethita; Hm – hematita.

Quanto ao conteúdo de Fed (Tabela 1), os solos de compartimentos basálticos apresentam maiores conteúdos médios (52 g Kg^{-1}) quando comparados aqueles de arenito (12 g Kg^{-1}). O mesmo acontece para os conteúdos de Feo. Os solos do compartimento arenito apresentam média de aproximadamente 1 g Kg^{-1}, e os solos basálticos 3 g Kg^{-1}. Para os conteúdos de ferro por compartimento geomorfológico, o compartimento pouco dissecado apresenta a menor média de Fed (24 g Kg^{-1}) e de Feo (1,37 g Kg^{-1}). O teor de Fed teve o mesmo comportamento do teor de argila, menor no compartimento pouco dissecado e maior no compartimento altamente dissecado.

Os solos do compartimento basáltico apresentam maior V% (70%), quando comparado aos solos originados de arenito (65%) (Tabela 1). O POP é uma área intensamente cultivada, provavelmente as práticas de correção do solo e manejo, influenciaram nestes resultados. Vale ressaltar que rochas areníticas apresentam maior granulometria, portanto o intemperismo nessas rochas é mais lento, quando compradas as rochas basálticas. Para os compartimentos geomorfológicos a média de V% foi de 71%, enquanto solos de ambiente pouco dissecados apresentaram média de 67%. O compartimento moderadamente dissecado, ficou intermediário aos demais (65%). As diferenças são pequenas para estes compartimentos.

O valor médio de densidade do solo (DS) é maior para os solos de arenito (1,52 g cm^{-3}), quando comparado aos solos de basalto (1,39 g cm^{-3}) (Tabela 1). Este aspecto pode apontar que para áreas grandes a análise de dados por compartimentos pode apresentar resultados semelhantes daqueles observados em literatura. Pois espera-se que em solos mais caulinítico, como dos arenitos, a forma deste mineral favoreça maiores valores de DS, enquanto para solos de basalto, com maiores conteúdos de óxidos de ferro, o formato destes contribui para melhor arranjo das partículas e menor DS (Ferreira et al., 1999a; Siqueira et al., 2010). A DS apresentou médias intermediárias para o compartimento moderadamente dissecado (1,49 g cm^{-3}). E aumentou do altamente dissecado para o pouco dissecado 1,39 g cm^{-3} e 1,44 g cm^{-3}, respectivamente.

As médias de volume total de poros (VTP) é inversa as medias de DS (Tabela 1). O VTP é maior para solos de compartimentos basálticos (41%) e menores para

arenítico (36%). As médias para os compartimentos geomorfológicos apresentaram poucas diferenças, 40% para o compartimento altamente dissecado, 37% para o moderadamente dissecado e 38% para o pouco dissecado. Indicando o compartimento geomorfológico não captou bem a variabilidade do VTP.

Os teores totais de C foram maiores para ambas as áreas dos compartimentos de basalto e altamente dissecado, quando comparados aos demais compartimentos. A média para o compartimento basáltico (20,82 g kg^{-1}) é quase o dobro da média observada para o compartimento arenítico (10,74 g kg^{-1}). Estudando áreas menores do POP Bahia et al. (2017) observaram valores de C, semelhantes aos encontrados neste. Todos os valores médios dos atributos são semelhantes ao encontrados em literatura para diferentes compartimentos geológicos de arenito e basalto (Bahia et al., 2017; Camargo et al., 2014, 2013b; Ghidin et al., 2006; Siqueira et al., 2010).

O compartimento com maior estoque de C (EC) foi o basalto, 144 Mg ha^{-1}, quando comparados ao arenítico. O mesmo acontece para os compartimentos: altamente (137 Mg ha^{-1}) e pouco dissecados (100 Mg ha^{-1}), condizendo com os maiores conteúdos de C e argila. Estudos apontam que a conversão de mata nativa em área agrícola tende a diminuir os estoques de C, pelo menos em camadas superficiais (Baker et al., 2007; Don et al., 2011; Eclesia et al., 2012). Entretanto outros estudos apontam que em função do uso do solo, clima, práticas agrícolas ou de conservação, as comparações entre áreas agrícolas podem se tonar neutras (Braz et al., 2013). Dependendo da prática adotada os EC podem aumentar, como aponta diversos estudos para fins de redução de emissão de CO_2 e crédito de C (Bellon-Maurel and McBratney, 2011; Gruijter et al., 2016; Minasny et al., 2017).

Os estudos sobre os estoques de C têm avançado nos últimos anos, porém poucos ainda correlacionam o estudo da variável em função dos diferentes compartimentos geológicos e geomorfológicos com a mineralogia do solo. Hickman e Costa (2012) observara médias de 9,23 Mg ha^{-1} para áreas de Plantio Direto sob Argissolos. Rosendo e Rosa (2012) já observaram 43,92 Mg ha^{-1} para pastagem degradada sob Latossolos. Estudando mata nativa e áreas de pastagem, Assad et al. (2013) observaram estoques de C de 33 Mg ha^{-1} e 24 Mg ha^{-1}, respectivamente. Todavia nenhum destes estudos evidencia essa variação nas médias em função da constituição mineralogia do solo.

Os maiores EC condizem com aqueles compartimentos que apresentam mineralogia oxídica predominante (Tabela 1). Como observado para toda a extensão do POP. Os solos do compartimento arenítico são cauliníticos, e os do basáltico oxídicos, apresentando as maiores médias de Gt (15 g Kg^{-1}) e Hm (55 g Kg^{-1}). O fato também é observado pelo valor médio da ração Gt/(Gt+Hm) de 0,22 para solos originados de basalto e média de 0,89 para a razão Ct/(Ct+Gb) para solos areníticos (Tabela 1).

Segundo Curi e Franzmeier (1987) solos originados de basalto tem maiores teores de ferro em relação aqueles de arenito, favorecendo a formação de óxidos de ferro em detrimento a outros minerais. A mineralogia apresentou médias com pequenas diferenças para os compartimentos geomorfológicos. A maior diferença pode ser observada para a razão Gt/(Gt+Hm) de 0,40 no pouco dissecado, maior quando comparado aos demais. Apontando que este apresenta predomínio de mineralogia oxídica, enquanto os demais (altamente e moderadamente dissecados) tem predomínio de mineralogia caulinítica.

A Figura 2 apresenta uma matriz de correlação com todos os atributos estudados e os compartimentos geológicos e geomorfológicos. Observa-se uma correlação direta entre o teor de areia e o compartimento arenítico e entre o teor de argila e o basáltico, apontando o que foi observado na estatística descritiva. Solos originados de arenito são mais arenosos, e solos de basalto mais argilosos. Os compartimentos geomorfológicos não apresentaram boas correlações com os geológicos. Houve correlação diretamente proporcional entre o conteúdo de argila e o compartimento altamente dissecado e inversa com o conteúdo de areia. O inverso foi observado para o conteúdo de areia.

Os teores de Fed e Feo apresentaram correlação alta e inversa com o compartimento arenítico (-0,83), e direta com o basáltico (Figura 2). Quanto a geomorfologia os teores de Fed e Feo apresentaram baixos coeficientes de correlação, o maior foi de -0,24 e -0,22, respectivamente para os solos do compartimento pouco dissecado. Os atributos V%, VTP, C, EC, Gt e Hm apresentaram correlação direta com o compartimento basáltico, e inversa com o arenítico. Enquanto a DS, e as razões Ct/(Ct+Gb) e Gt/(Gt+Hm) apresentaram correlações negativas com o compartimento arenítico e positiva com o basáltico.

Para os compartimentos geomorfológicos as maiores correlações (acima de 0,30) foram observadas entre o teor total de C e EC para o compartimento altamente dissecado. Os demais atributos apresentaram baixas correlações. Devido ao tamanho da área não foi possível caracterizar os EC's para todo o POP, apenas para amostras estratificadas. Contudo observa-se relação alta e direta entre os EC's e teor de C, já que o mesmo é considerado para seu cálculo. Assad et al. (2013) apontam que a temperatura, precipitação, textura, densidade e fertilidade do solo, são as principais variáveis que podem controlar os EC's.

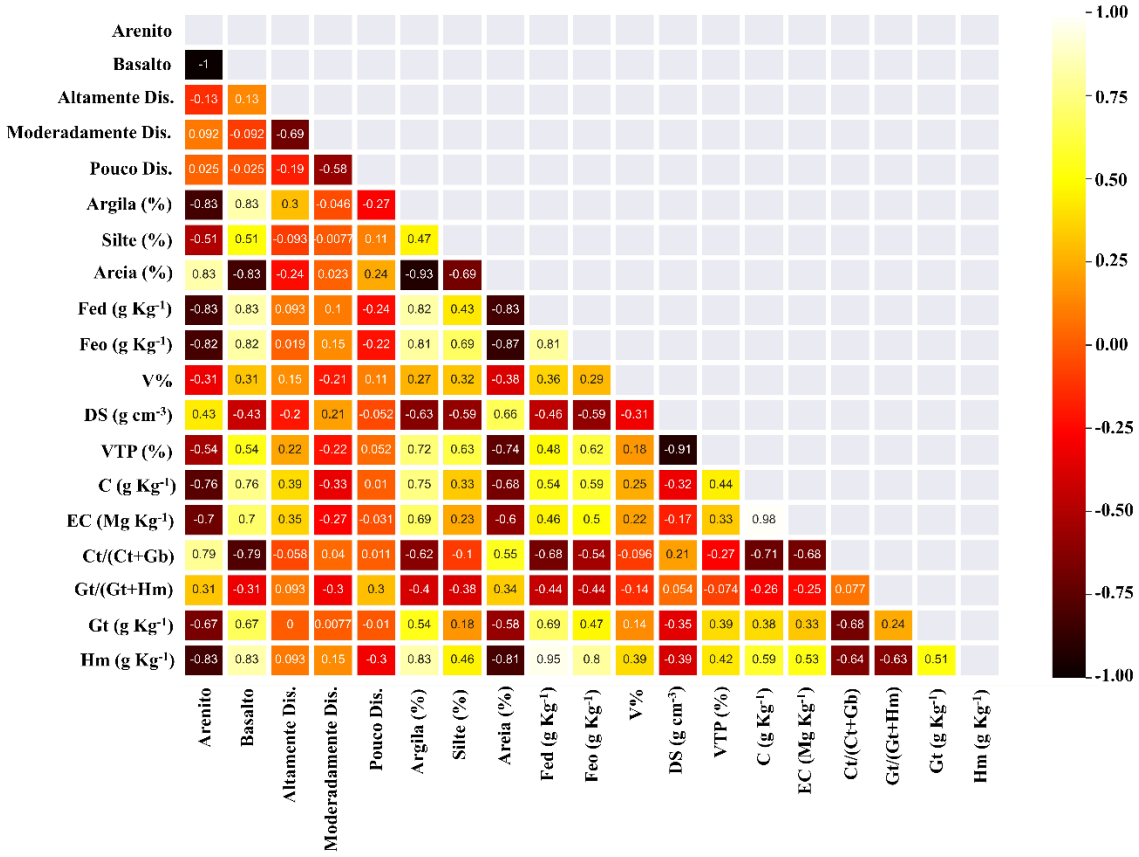


Figura 2. Matriz de correlação de sperman para os atributos na camada de 0 – 0,20 m dos solos e diferentes compartimentos geológicos e geomorfológicos do Planalto Ocidental Paulista.

*Fed – ferro cristalino; Feo – ferro não cristalino; V% - saturação por bases; DS – densidade do solo; VTP – volume total de poros; C – carbono; EC – estoque de carbono; Ct – caulinita; Gb – gibbsita; Gt – goethita; Hm – hematita.

Considerando as correlações entre os atributos e o conteúdo de C e EC, as maiores foram entre o conteúdo de argila, e a mineralogia do solo. Quanto maior o

conteúdo de argila e predominância de óxidos do solo maior os conteúdos de C e o EC. O contrário é observado para solos mais arenosos com predomínio de mineralogia caulinítica, pois a correlação entre estes atributos e o C e EC são altas porém negativas.

Conforme os dados apresentados áreas com maiores médias no teor de argila são potenciais reservatórios de C, como foi proposto por Mendes (2015). A emissão de CO_2 do solo pode ser descrita pelo coeficiente de decaimento de emissão do solo e o estoque de C nos solos. Portanto os potenciais de maior ou menor emissão são intrínsecos do solo e estão intimamente ligados aos processos e fatores de formação, expressos por atributos covariativos como a textura e a mineralogia (Bahia et al., 2015; La Scala Jr et al., 2000; Leal et al., 2015). Assad et al. (2013) fizeram uma modelagem stepwise para apontar as variáveis de maior influência no EC e apontaram a MO e areia como as de maior influência.

Os EC's variam em função do tipo de solo e a profundidade estudada, e embora essas correlações sejam pouco estudadas, o estoque é um importante indicador de serviços ambientais (Parron et al., 2015). Assad et al. (2013) completam afirmando que em escalas locais de trabalho, as propriedades do solo ganham destaque na influência dos EC's. Saiz et al. (2012) apontaram em seu estudo que a textura do solo, foi determinante para variações do EC.

Considerando a estatística descritiva e todos os atributos estudados, pode-se apontar que solos basáltico e de compartimentos pouco dissecados são mais intemperizados que aqueles areníticos e altamente dissecados. O compartimento moderadamente dissecado apresenta médias intermediárias para aqueles altamente e pouco dissecados para todos os atributos, não permitindo a diferenciação mais específica deste. Nesse grupo foram incluídas todas as formas da paisagem intermediarias, portanto espera-se que os atributos apresentem maior variação comparados aos demais compartimentos.

A intensidade das formas da paisagem, nesse caso apontado pelo nível de dissecação, segue um padrão imposto pelo controle estrutural do material de origem, indicando a variação pedogênese (formação do solo) e geomorfogênese (esculpimento da paisagem). O compartimento altamente dissecado reune áreas côncavas de alta intensidade, indicando maiores dissecações na região, e

consequentemente maior geomorfogênese. Enquanto o compartimento pouco dissecado engloba regiões mais preservadas, com superfícies mais aplainadas e maiores taxas de pedogênese, em relação a geomorfogênese.

Estudando o modelo da evolução pedogeomorfogênica da Serra da Canastra Vasconcelos et al. (2013) observaram que a dinâmica do relevo desenvolvido a partir do processo de abatimento do terreno (maior dissecação da paisagem) causa ambientes de saturação e estagnação de água, e áreas mais planas melhores condições para a drenagem. Por sua vez, ambientes de maior estagnação de água favorecem o avanço da hidromorfia, resultando na formação de minerais amorfos e predominância da Ct (Schaefer et al., 2008), enquanto as áreas mais planas e bem drenadas favorecem o avanço da oxidação, tendo domínio de minerais mais cristalinos e maiores conteúdos de Gb (Kampf et al., 1988; Ker, 1994).

Dadas as observações pode-se afirmar que em compartimentos de basalto, altamente dissecados, com maiores conteúdos de argila e mineralogia oxídica, são mais favoráveis para estocar C. O contrário é verdadeiro para solos de arenito. Estes resultados podem auxiliar os produtores na tomada decisão quanto a plantio, reflorestamento e práticas que visem aumentar os EC's no solo, e reduzir a emissão de CO_2. Algumas destas práticas são citadas por (Minasny et al., 2017). O uso destas práticas já vem sendo considerado em políticas de crédito de C e monetização.

3.3.2 Assinatura espectral e faixas mais importantes para a estimativa de C

A Figura 3 apresenta as assinaturas espectrais para os diferentes compartimentos geológicos e geomorfológicos do POP. As curvas para o solo de arenito apresentam maior reflectância, devido a menor absorbância das partículas do solo. Solos de arenito apresentam maiores conteúdos de minerais claros, como ortoclásio, quartzo e plagioclásio que aumentam a reflectância das amostras (Demattê et al., 2019). Enquanto para a amostra do basalto, os valores de reflectância são menores, indicando que a absorbância é maior. Os minerais mais escuros dos solos originados de basalto como óxidos de ferro, refletem menos, gerando uma curva espectral mais baixa, quando comparada a curva de solos de arenito (Genú et al., 2013; Malley et al., 2004).

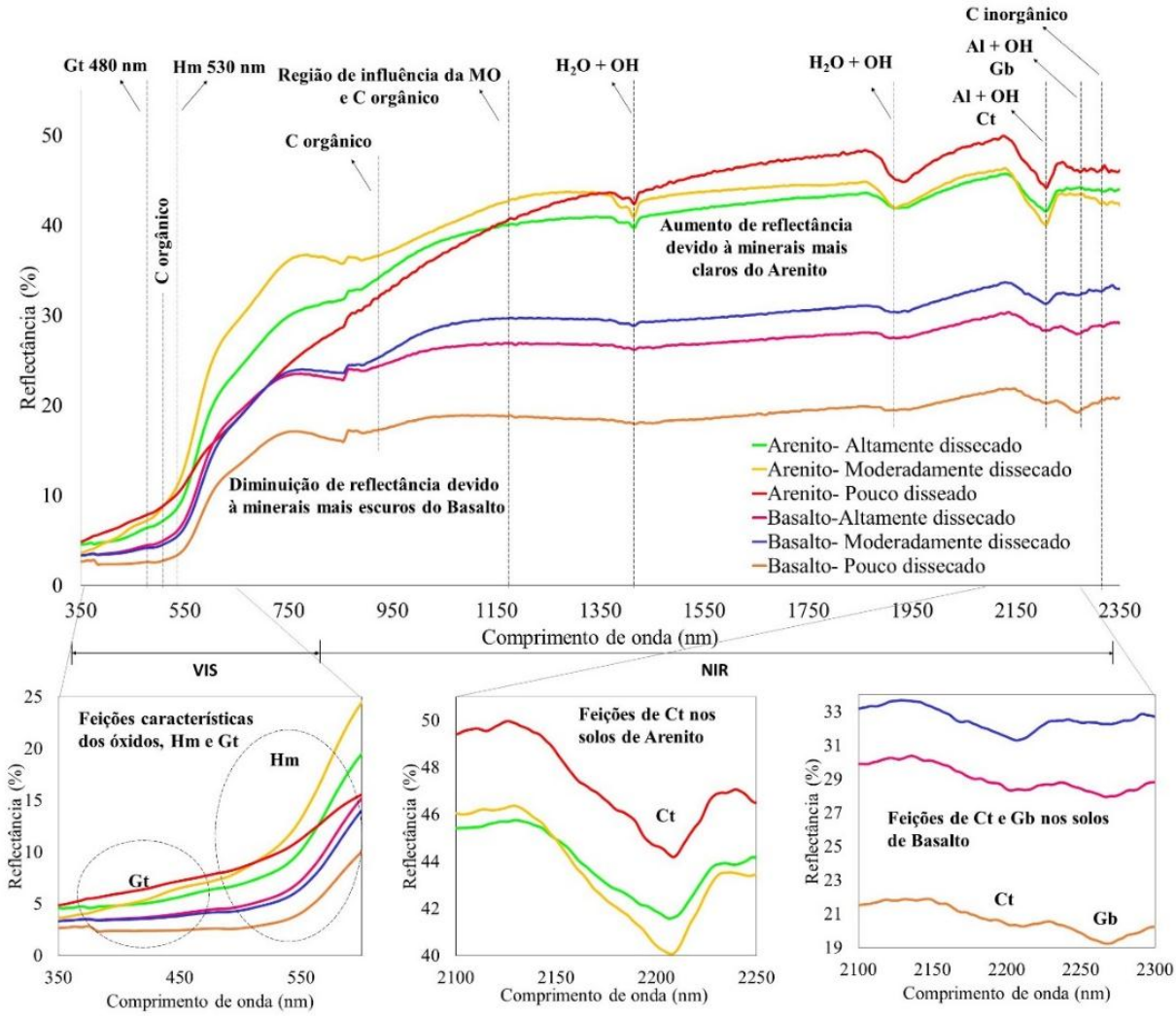


Figura 3. Curvas espectrais de amostras estratificadas para arenito e basalto, para área do Planalto Ocidental Paulista. Adaptada de Fernandes et al. (2020).

*Ct – caulinita; Gb – gibbsita; Gt – goethita; Hm – hematita; MO – Matéria orgânica; H_2O – molécula de água; OH – hidroxila.

A faixa de 400 a 690 nm, no visível (VIS) é utilizada para caracterizar a presença dos óxidos Hm e Gt (Bahia et al., 2015; Demattê et al., 2019; Fernandes et al., 2004; Viscarra-Rossel et al., 2010; Viscarra Rossel et al., 2016). Observa-se que a curva nessa faixa apresentar maior concavidade para o solo de basalto, apontado a maior expressão de óxidos para solos com esse material de origem. O comportamento espectral, para os solos de basalto, aponta ainda predomínio da Hm, em relação a Gt (maior concavidade característica) resultados semelhantes foram citados por Genú et al. (2010), para Latossolos da formação Serra Geral.

Para a Ct e Gb a faixa característica vai de 2000-2100 a 2300-2350 nm (Fernandes et al., 2020; Pizarro et al., 2001; Viscarra-Rossel et al., 2016). Observa-se que para o solo de arenito há apenas um vale característico, entre 2100-2200 nm, referente a Ct. Para as amostras de arenito, rico em quartzo e silício o mineral predominante é a Ct. Logo, este mineral é mais abundante na fração argila nos solos do POP, pois maior parte dos solos da área é de origem arenítica. Silva et al. (2020) aponta valores de índices de intemperismo (Ki e Kr) que classificam os solos de referência da região como cauliníticos a cauliníticos oxídicos.

Para o solo de basalto, observa-se na faixa de 2150 a 2300 nm duas feições, a primeira referente à Ct e a segunda à Gb. Em relação à curva do solo de arenito a profundidade do vale da Ct é menor, apontando que em solos de basalto há um ambiente menos propício para a formação de Ct. Estudando curvas espectrais dos biomas brasileiros Demattê et al. (2019) afirmam que feições característica da Gb é característica de solos mais intemperizado, como os solos do bioma Cerrado. Enquanto solos menos intemperizado, como solos do Rio Grandes do Norte, não apresentam feições características da Gb. O basalto apresenta minerais mais facilmente intemperizáveis que os de arenito, portanto apresentará maiores conteúdos de Gb.

Na faixa de 1400 nm Stenberg e Viscarra-Rossel (2006) apontam a presença de hidroxilas relacionadas a água molecular. Já na faixa de 1900 nm (Brown et al., 2006; Chicati et al., 2019; Hunt e Satesbery, 1970; Fang et al., 2018; Lima et al., 2012; Zhao et al., 2018) há presença marcante da molécula de água (H-O-H), ligada aos minerais ou a impurezas. Dufréchou et al. (2015) afirmam que a banda de 1900 nm não é característica de um mineral específico, mas pela composição da argila. Bandas que foram indicadas no VIP como importantes na predição da razão Ct/(Ct+Gb), podendo, portanto, ser apenas influências de outros minerais ou da molécula de água.

Completando as discussões acima, Bishop et al. (2008) apontam que as variações nas faixas de absorbância ocorrem pelo estiramento dos óxidos de Si, Fe e Al, o tamanho do cátion, o modo de dobragem, entre outras características cristalográficas que podem dividir a ocorrência dos atributos em diversas bandas espectrais. Demattê et al. (2017) observaram que a relação entre o comportamento espectral dos solos é variável conforme os diferentes processos pedogenéticos do

solo e a posição da paisagem. Logo, as identificações das bandas espectrais são restritas as características e condições de formação do solo.

Para os teores de C as faixas mais citadas na literatura são de 850 – 900 nm e 2320 – 2370 nm para C orgânico, inorgânico e MO (Asgari et al., 2020); 410, 570 e 660 nm para Corg (Viscarra Rossel et al., 2006); 476 e 808 nm (Morellos et al., 2016). São diversas as faixas no intervalo Vis-NIR com potencial e prever o teor de C, seja ele total, orgânico ou inorgânico. Bahia et al. (2017) afirmar que os melhores parâmetros de previsão podem ser observados na faixa do NIR, pois ao logo deste intervalo existem diversas faixas relacionadas as ligações de elementos como C-C, C=C, CH, C-N.

Para minimizar erros o presente estudo inseriu todas as faixas espectrais no modelo Stepwise, que de forma gradual e interativa foi selecionando as faixas mais importantes para predição do C total. Conforme o comprimento de onda foi sendo inserido no modelo o erro mensurado pelos índices RMSE e MAE foi diminuindo e o R^2 foi aumentando. Para a faixa do Vis a primeira banda a ser inserida no modelo foi a de 699 nm, seguidas pelas bandas de 352, 696, 697, 503, 501, 455, 442 e 478 nm. Tendo sido este o melhor modelo com os seguintes parâmetros: RMSE de 4,74, MAE de 3,77, e R^2 0,30.

Para a faixa do NIR a primeira banda a entrar no modelo foi a de 2434 nm seguida pelas bandas de 2211, 2413, 1696, 1617, 2207, 1946, 1465, 1400, 1078, 1022, 1902, 1696, 1493, 1410, 1943, 1939, 1896, 1892, 1522, 1453, 1402, 1420, 1129, 1092 e 949 nm. Para a faixa do NIR o melhor modelo encontrado apresentou RMSE de 3,87, MAE de 3,07 e R^2 de 0,52.

Os melhores parâmetros obtidos para o NIR podem ser explicados segundo observações de Bahia et al. (2017) citadas anteriormente. Ao longo do NIR há mais faixas que podem se relacionar com o C. Algumas das faixas classificadas como importantes, conforme modelo de Stepwise foram semelhantes, aquelas citadas por outros autores, como 660 e 410 nm citados por Viscarra-Rossel et al. (2006), e 808 e 476 nm citados por Morellos et al. (2016). Estes resultados apontam que algumas variações nas faixas mais importantes para estimativa do C, podem ser observadas quando se compara estudos de diferentes solos e regiões do mundo.

A partir das bandas mais importantes, foram gerados gráficos de Cluster com mapas de calor (Figuras 4), a fim de agrupar as bandas espectrais, os teores de C, os compartimentos geológicos e compreender suas relações de causa e efeito com os comprimentos de onda selecionados pelo Stepwise. Na Figura 4 observa-se que os maiores conteúdos de C (Cores mais claras) foram agrupados com o compartimento de basalto, tanto para a faixa do Vis como para a faixa do NIR. O compartimento arenítico foi agrupado e associado aos menores teores de C.

Para as bandas espectrais de maior importância na faixa do Vis e do NIR (Figura 4) observa-se que os maiores conteúdos de C se agrupam com as menores reflectâncias. Na faixa do Vis que expressa cor do solo (Bahia et al., 2015; Carmo et al., 2016; Viscarra Rossel et al., 2010) os conteúdos de C estarão associados ao C orgânico, presente na matéria orgânica (MO). Demattê et al. (2003) estudando a influência da MO na reflectância dos solos, apontam que sua remoção aumenta a reflectância em toda a curva espectral. Ou seja, quanto menor o conteúdo de MO, mais claros são os solos e, portanto, maior a sua reflectância.

O contrário foi observado para o compartimento arenítico. As maiores reflectâncias foram agrupadas para solos de arenito com menores conteúdos de C. Estes fatos podem ser observados pelas curvas espectrais na Figura 3. As menores reflectâncias são observadas para solos originados de basalto, que apresentam maiores médias de C (Tabela 1). E as curvas espectrais de maior reflectância são observadas para solos de arenito (Figura 3), que por sua vez apresentam menores médias de C (Tabela 1)

. Algumas amostras do compartimento de basalto não foram agrupadas e ficaram dispersas entre amostras do compartimento arenítico. Em teoria todas as amostras de cada um dos compartimentos deveriam formar um único grupo. Todavia deve-se lembrar que os mapas e a escala de coleta de pontos são diferentes. Os pontos foram escolhidos e coletados com base em experiencias anteriores em áreas menores (Campos et al., 2012; Marques Júnior et al., 2015; Teixeira et al., 2013) e de modo a representar toda a variabilidade de 13 milhões de hectares. E que se trata de dados agronômicos, que apresentam alta variabilidade no espaço e, portanto, apresentam comportamentos diferentes daqueles esperados.

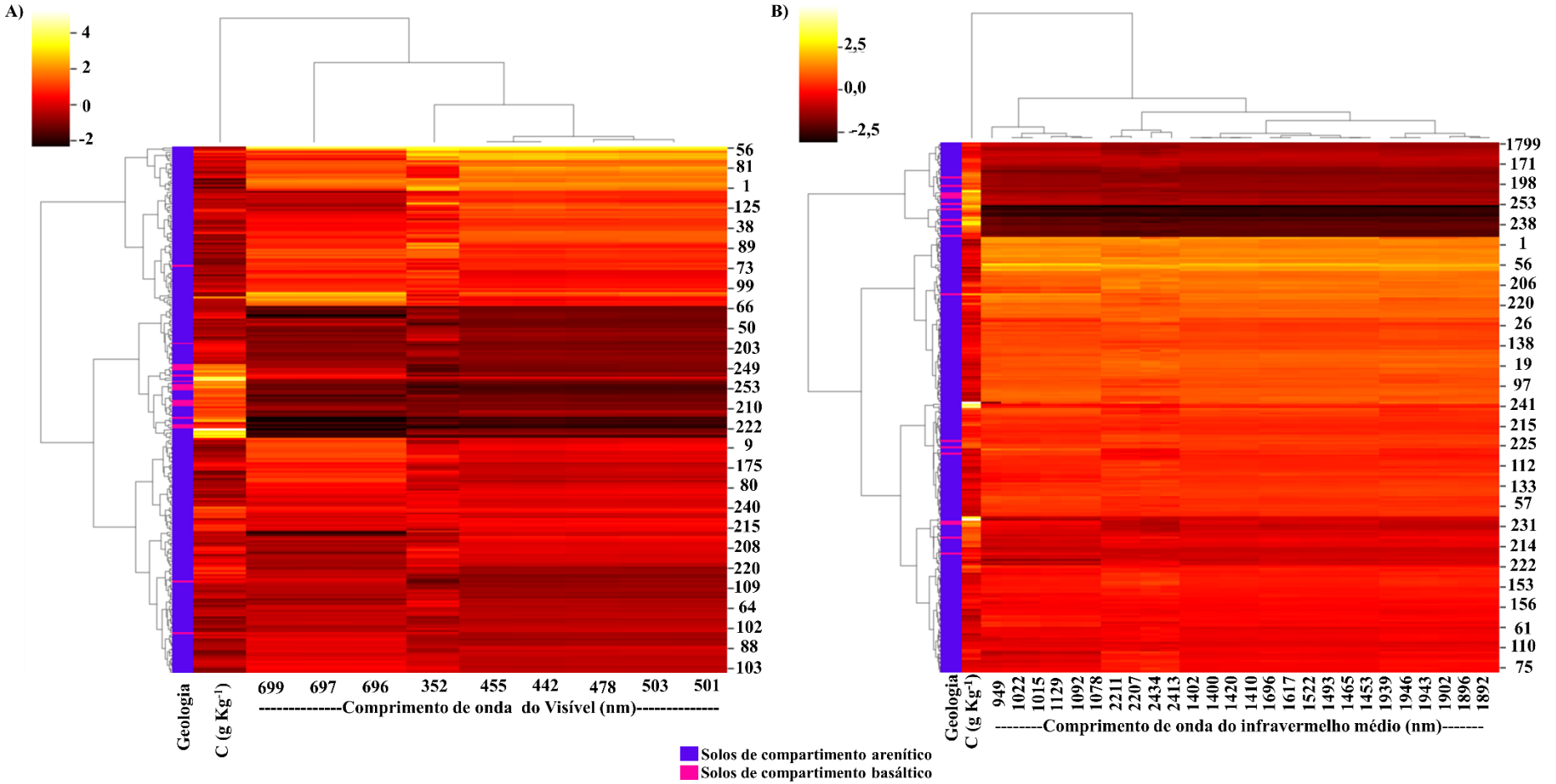


Figura 4. Análise de Cluster com mapa de calor para as faixas espectrais mais importantes para estimativa de C, apontadas por modelagem Stepwise, teores de C e compartimentos geológicos e geomorfológicos, para solos do Planalto Ocidental Paulista.

3.3.3 Estimativa do C total

3.3.3.1 Estimativa por Random Forest (RF)

Para análise de RF e agilizar a geração do modelo foram selecionados os comprimentos de onda considerados mais importantes para estimativa do C, dadas pela análise de Stepwise, discutidas no tópico anterior. Para fins ilustrativos foi selecionada de forma aleatória uma árvore para cada faixa (Vis, NIR e Vis+NIR) utilizada para estimativa de C (Figura 5). Observa-se que nos nós iniciais, os erros de estimativa para o C, dados pelo erro quadrado médio (do inglês: Mean Squared Error – MSE) são maiores, e vão diminuindo à medida que chegam no último nó (Figura 5).

Para a árvore da faixa do Vis o primeiro comprimento de onda a ser selecionada foi a de 352 nm. Neste comprimento as amostras que têm valores de reflectância (R) ≤ 3,1%, vão para o segundo nó com estimativa dos maiores conteúdos de C (22,6 g Kg^{-1}), e aquelas que não seguem esta regra vão para o terceiro nó com estimativa dos menores conteúdos de C (10,1 g Kg^{-1}) (Figura 5A). No segundo nó ainda são consideradas as amostras no comprimento de onda de 352 nm, amostras com valores de R ≤ 3% seguem para o quarto nó, com estimativa de C igual a 20 g Kg^{-1}, e as com valores de R > 3% seguem para o quinto nó com estimativa de C igual a 25,8 g Kg^{-1} (Figura 5A).

O terceiro nó selecionou o comprimento de onda de 697 nm, amostras com valores de R ≤ 29,9% seguiram para o sexto nó, com estimativa de C igual a 11,4 g Kg^{-1}, aquelas que não seguem a regra para o sétimo nó. O comprimento de onda selecionado no quarto nó foi o de 455 nm. Para o quinto nó foi selecionado o comprimento de onda de 442 nm. Para os nós terminais do quarto nó houve duas estimativas de C, uma com MSE igual a zero, com C igual a 16,5 g Kg^{-1}, e outro com MSE de 1,2, com C igual a 21,3 g Kg^{-1}.

Seguindo o alinhamento do sexto e sétimo nós, o sexto selecionou o comprimento de onda de 696 nm e o sétimo de 478 nm (Figura 5A). Para os nos terminais, do sexto nó os erros foram maiores, quando comparados aos erros dos nós terminais do sétimo nó. De modo geral para o intervalo de 350 – 480 nm, que vai do violeta ao azul as estimativas são menos erráticas e apontam os maiores conteúdos

de C. Enquanto no intervalo de 480 – 600 nm, os erros são maiores e apontam os menores conteúdos de C.



Figura 5. Random Forest dos comprimentos de onda para estimativa de C total (g Kg^{-1}), para solos do Planalto Ocidental Paulista.

*MSE - do inglês: Mean Squared Error; Vis – Visível; NIR – infravermelho médio; R – reflectância.

A árvore selecionada aleatoriamente para a estimativa de C pela a faixa do NIR (Figura 5B) selecionou como o comprimento de onda de 1400 nm, para o primeiro nó. Valores de R ≤ 29% são subdivididas no segundo nó, e R > 29% no terceiro nó. O segundo nó, selecionou o comprimento de onda de 2434 nm, foi subdivido em um quarto nó e em um quinto no terminal, com erro igual a 0. O quarto nó selecionou o comprimento de onda de 2413 nm, com estimativa de conteúdo de C igual a 22,4 g Kg^{-1}. O terceiro nó selecionou o comprimento de onda de 1956 nm e com conteúdo de C igual a 9,3 22,4 g Kg^{-1}. Semelhante a árvore da faixa do Vis (Figura 5A) os nós terminais separaram as estimativas de C > 20 g Kg^{-1} e < 20 g Kg^{-1}.

A árvore selecionada para a faixa do Vis-NIR, selecionou o comprimento de onda de 1946 nm para o primeiro nó (Figura 5C). Amostras com valores de R ≤ 35% foram subdivididas no segundo nó, e R > 35% no terceiro nó. O Segundo nó subdividiu as amostras com R ≤ 3%, no comprimento de onda de 352 nm, para o quarto sub nó, e R > 3% no quinto sub nó. No terceiro sub nó amostras com valores de R ≤ 10,5%, no comprimento de onda de 455 nm foram subdivididos no sexto sub no, e R > 10,5% no sétimo sub nó.

Semelhante as árvores anteriores os maiores e menores conteúdos de C foram divididos nos nós terminais. Os nós terminais do quarto nó estimaram os conteúdos de C > 20 g Kg^{-1}, enquanto os demais nós terminais estimaram os conteúdos de C < 20 g Kg^{-1}. De modo geral os maiores valores de reflectância são associadas as menores estimativas de C, e os menores valores de reflectância as maiores estimativas de C. Como foi observado nas discussões acima. O maior conteúdo de C é observado para solos originados de basalto e de menores reflectância (Figuras 3 e 4). O que corrobora com os resultados de Demattê et al. (2003).

Conforme Tabela 2, a fase de teste apresentou métricas menores que na fase de treino. Heil et al. (2020) também observaram redução nas métricas na fase de predição para o conteúdo de C e ferro do solo. A estimativa do C para a faixa Vis+NIR apresentou as melhores métricas, com RMSE de 3,40 e R^2 de ,74 para o treino e RMSE de 4,88 e R^2 de 0,54, para o teste. Para a estimativa do C na faixa do NIR (RMSE – 3,41 e R^2 – 0,73), as métricas foi semelhantes aquelas observadas para a

faixa Vis+NIR na fase do treino. Todavia no teste o R^2 na faixa do NIR foi maior que aquele observado para a faixa Vis+NIR.

Utilizando o algoritmo de AM cubista, Morellos et al. (2016) obtiveram um RMSE de 2,18 e um R^2 0,78 para estimativa do C orgânico, em um Luvissolo da Alemanha. Gelsleichter et al. (2019) estudando a estimativa C por meio de RF obteve um R^2 de 0,84 para solos do Parque Nacional do Itatiaia, Brasil. Os resultados citados na literatura são superiores aos obtidos neste. Porem deve-se consideram que a grande variabilidade da área pode induzir a maiores erros, e predições mais erráticas. Embora quando comparadas as relações custo benefício, ainda eficientes (Aitkenhead et al., 2018; Gómez-Robledo et al., 2013; Viscarra Rossel et al., 2008). Stenberg (2010) aponta que a amostras de solos arenosos nas fases de teste e/ou calibração pode resultar em piores estimativas de atributos. A areia possui uma superfície total pequena, quando comparada a argila e a MO o que pode causar efeitos mais erráticos devido à alta absorção (Clark, 1999).

Tabela 2. Métricas de avaliação dos modelos de Random Forest para estimativa do C total (g Kg^{-1}) para as faixas Vis, NIR e Vis+NIR, na profundidade de 0,00 - 0,20 m, para solos do Planalto Ocidental Paulista.

		Treino		Teste	
		RMSE	R^2	RMSE	R^2
C (g Kg^{-1})	Vis	4.27	0,67	4.86	0,54
	NIR	3.41	0,73	4.73	0,59
	Vis+NIR	3.40	0,74	4.88	0,54

* Vis – Visível; NIR – infravermelho médio; RMSE - do inglês Root-mean-square deviation.

Na Figura 6A é apresentada a regressão entre os dados observados e estimados. Observa-se para a estimativa utilizando as três faixas (Vis, NIR e Vis+NIR) que os valores até 10 g Kg^{-1} de C, observados e estimados pelo RF estão bem próximos entre si e da reta. Para valores de C > 10 g Kg^{-1} nota-se que a dispersão entre os dados observados e estimados pelo RF ficam mais dispersos. Esta observação pode indicar que o algoritmo tem pouca sensibilidade para aprender e estimar maiores conteúdos de C. Logo em áreas com maiores conteúdo do elemento,

deve-se adensar a malha amostral para minimizar os erros. Por tratar-se de uma área de grande, com alta variabilidade geológica e geomorfológica, as amplas diferenças entre valores mínimos e máximos, pode tornar a predição mais errática.

Dentro dos comprimentos de onda considerados mais importantes pelo stepwise, o modelo RF realizou um ranqueamento com base na importância de cada comprimento de onda (Figura 6B). Para a faixa do Vis, o comprimento de onda mais importante foi o de 352 nm, seguido pelo de 442 nm, 699 nm, 696 nm, 478 nm e 503 nm. Os comprimentos com importância menor que 0,05 não foram considerados. Para a faixa do NIR os comprimentos de maior importância foram os de 1022 nm, 2434 nm, 1946 nm, 949 nm, 2413 nm, 1696 nm, 2211 nm, 1400 nm e 1092 nm.

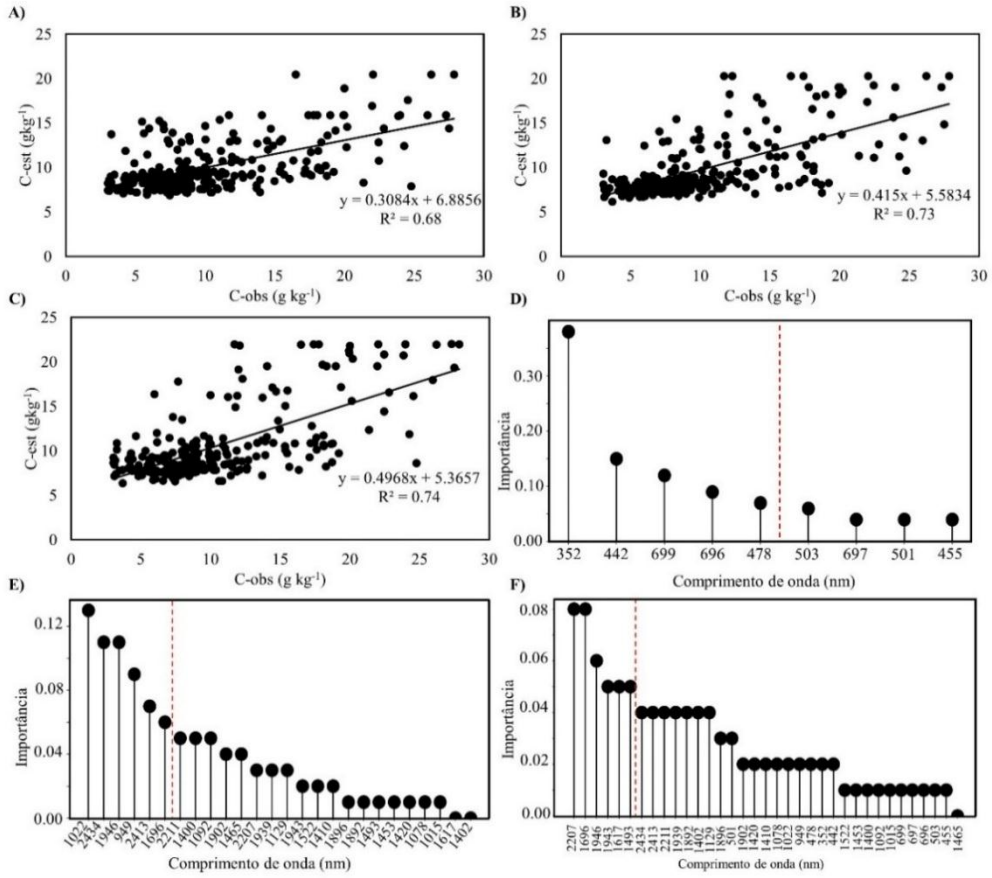


Figura 6. A) Análise de regressão entre dados preditos de C (g Kg^{-1}) pelas faixas Vis (Visível), NIR (Infravermelho médio) e Vis+NIR por Random Forest e observados para solos do Planalto Ocidental Paulista. B) Gráficos de relevância para as diferentes bandas das faixas Vis, NIR e Vis+NIR para estimativa de C.

***** Vis – Visível; NIR – infravermelho médio; C-obs – Carbono observado; C-est – Carbono estimado.

Na associação das faixas Vis+NIR os comprimentos mais importantes foram 2207 nm, 1696 nm, 1946 nm, 1943 nm e 1617 nm. É possível observar que os comprimentos de onda do Vis, quando se utiliza as ambas as faixas para estimativa do C, são as de menor importância. Morellos et al. (2016) utilizando AM e ERD, na faixa do Vis+NIR, para estimativa dos conteúdos de C apontam como comprimentos de onda mais importantes os de 476 e 808 nm. Contudo os autores não consideram estimativas por faixas separadas de Vis, ou NIR. O que pode justificar seus resultados. Comparados com os obtidos neste estudo, o comprimento de 478 nm foi considerado importante. Deve-se considerar que as diferenças no conteúdo de C, outros atributos do solo, principalmente os mineralógicos, podem interferir nas concavidades da curva espectral (Dematte et al., 2003; Demattê et al., 2004).

De modo geral a AM mostra resultados superiores quando comparados aos métodos estatísticos e de modelagem tradicionais, todavia pode ser considerada de baixa interpretalibidade (Padarian et al., 2020). Para superar esta possível dificuldade deve-se avaliar a importância das variáveis utilizadas para estimativa e o número de vezes que foram citadas nas regras (Henderson et al., 2005; Martin et al., 2014; Schellaci et al., 2017; Khanal et al. 2018). Desta forma é possível visualizar como os modelos foram gerados e interpretá-los (Figuras 5 e 6).

3.3.3.2 Estimativa por regressão por mínimos quadrados parciais (PLSR)

As métricas obtidas para a regressão por mínimos quadrados parciais (PLSR) apresentam menor R^2 e maior RMSE quando comparadas aquelas obtidas pelos modelos de RF (Tabela 3). Diferente da análise anterior esta análise faz uma calibração com 30% do banco de dados, e depois com o restante realiza a predição. Nesta fase de predição os erros dados pelo RMSE e os valores de R^2 são ligeiramente maiores. Bahia et al. (2017) estimando o C total por PLSR obtiveram um R^2 de 0,82 para a faixa do Vis, e de 0,88 para a faixa Vis+NIR, para uma pequena área de estudo dentro do POP. Asgari et al. (2020) estudando a estimativa de C orgânico no Iran, obtiveram um R^2 de 0,74, para a faixa Vis+NIR. Viscarra-Rossel et al. (Viscarra Rossel et al., 2006) obtiveram R^2 de 0,86 para a faixa do NIR e de 0,91 para a faixa Vis+NIR.

Embora os resultados sejam superiores aos encontrados nestes, deve-se lembrar a extensão e a alta variabilidade do POP.

Para esta modelagem a faixa que apresentou as melhores métricas foi a do Vis, com R^2 de 0,64 e RMSE de 4,40 para calibração, e R^2 de 0,57 e RMSE de 6,65 para a predição (Tabela 3). Seguido pela faixa Vis+NIR com R^2 de 0,52 e RMSE de 4,59 para calibração, e R^2 de 0,53 e RMSE de 6,42 para a predição. E o NIR com as piores métricas, principalmente na fase de predição, com R^2 de 0,32 e RMSE de 5,56 para calibração, e R^2 de 0,35 e RMSE de 7,75 para a predição. Bahia et al. (2017) explica que as métricas obtidas para a faixa do Vis pode ser justificada pela boa relação do C com os óxidos de ferro. As relações entre estes óxidos e os conteúdos de C foram observadas neste estudo e por (Bahia et al., 2014; 2015; LaScala Jr et al., 2000).

Tabela 3. Métricas de avaliação dos modelos por regressão por mínimos quadrados parciais para estimativa do C total (g Kg^{-1}) para as faixas Vis, NIR e Vis+NIR, na profundidade de 0,00 - 0,20 m, para solos do Planalto Ocidental Paulista.

		Calibração		Predição	
		RMSE	R^2	RMSE	R^2
C (g Kg^{-1})	Vis	4,40	0,64	6,65	0,57
	NIR	5,56	0,32	7,75	0,35
	Vis+NIR	4,59	0,52	6,42	0,53

***** Vis – Visível; NIR – infravermelho médio; RMSE – do inglês Root-mean-square deviation.

Diferente do RF independente dos maiores ou menores conteúdos de C, os dados observados e estimados apresentaram maior dispersão ao longo da reta, na análise de regressão (Figura 7A). Para modelagem do PLSR foi utilizada toda curva espectral, pois os modelos de calibração e predição precisam grande variedade de dados. Os comprimentos de onda podem apresentar amplas variações que influenciam na capacidade preditiva da analise quimiométrica (Thanasoulias et al., 2002). Em complementação Wold et al. (2001) explica que a análise de PLSR é baseada na homogeneidade dos dados, e variações muito bruscas de diluição das curvas ou nos ruídos, podem induzir a erros. Ou seja, trabalhar apenas com alguns

comprimentos de onda, ou fazer pré-processamentos extremos podem favorecer a erros na estimativa de atributos. Gelsleichter et al. (2019) estudando o pré-processamento de curvas espectrais para estimativa de C apontam que este pode diminuir o potencial preditivo do PLSR.

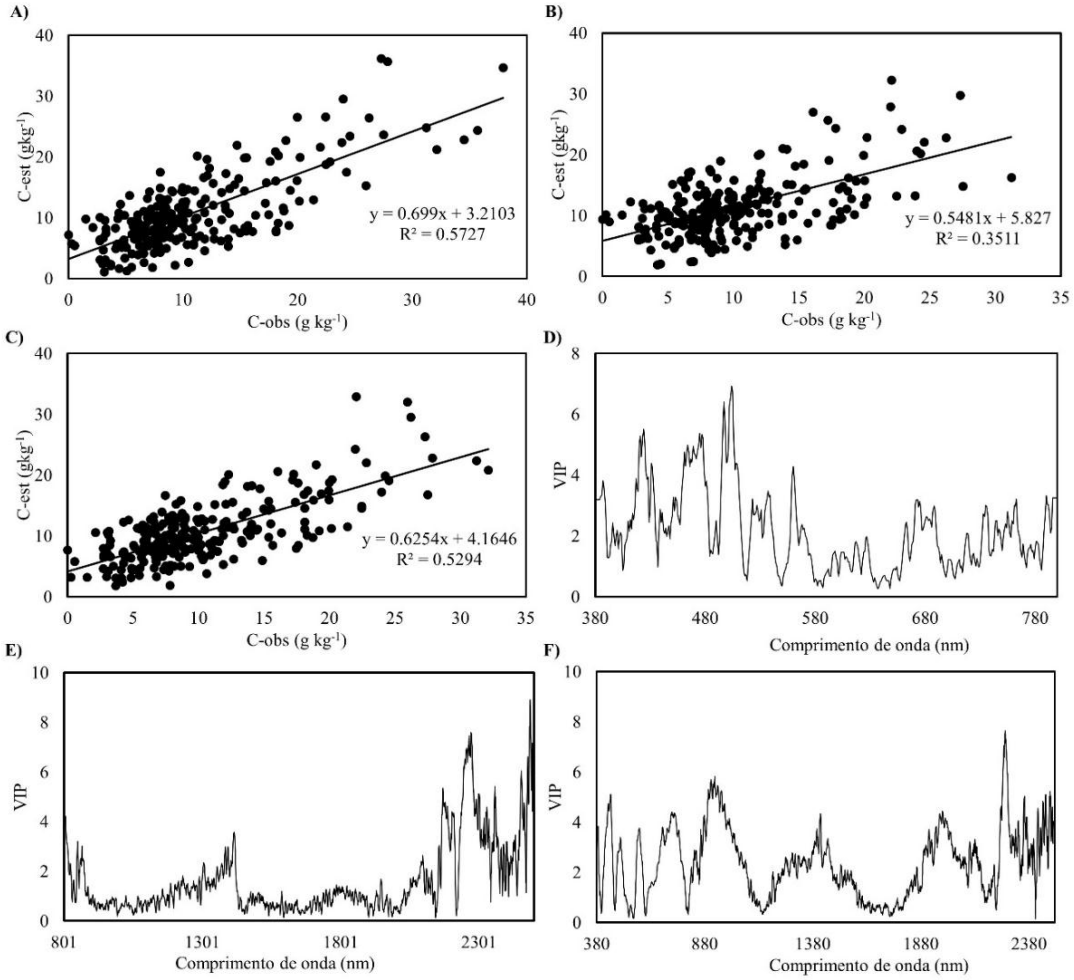


Figura 7. A) Análise de regressão entre dados preditos de C (g Kg^{-1}) pelas faixas Vis (Visível), NIR (Infravermelho médio) e Vis+NIR, por regressão por mínimos quadrados parciais e observados para solos do Planalto Ocidental Paulista. B) Gráficos de relevância para as diferentes bandas das faixas Vis, NIR e Vis+NIR para estimativa de C.

***** Vis – Visível; NIR – infravermelho médio; C-obs – Carbono observado; C-est – Carbono estimado; VIP – valores de importância.

Para a faixa do Vis o PLSR considerou como variáveis mais importantes os comprimentos de onda de 504 nm, seguida pelas de 497 nm, 423 nm, 478 nm e 464

nm. Para a faixa do NIR, os comprimentos de 2484 nm, 2273 nm, 2477 nm, 2245 nm e 2456 nm. E para a faixa Vis+NIR os comprimentos mais importantes foram o de 2271 nm, 925 nm, 941 nm, 443 nm, 2358 nm, 1982 nm e 742 nm.

Comparando a modelagem do PLR com o RF, nota-se que este último algoritmo demostrou desempenho superior quando comparado a análise quimiométrica multivariada. Morellos et al. (2016) utilizando RF e PLSR observaram que a AM tem melhor desempenho para estimativa de C. Os autores afirmam que a eficiência desse modelo se dá por sua alta capacidade de lidar com o padrão não linear dos dados. Viscarra-Rossel et al. (2010), Mouazen et al. (2010) Keskin et al. (2019) e Gelsleichter et al. (2019) fizeram as mesmas considerações, concordando com os resultados observados neste.

Quanto aos comprimentos considerados mais importantes para cada faixa, ambos consideram a faixa entre 420 a 480 nm importantes para predição de C. O PLSR não considera o comprimento de 352 nm e acima de 500 nm tão importantes para a estimativa. No NIR o RF considera como importantes os comprimentos de onda entre 1000 a 2000 nm, enquanto o PLSR considera mais importantes aqueles acima de 2000 nm. A faixas consideradas importantes para precisão de C são amplas quando se compara com a literatura. Viscarra-Rossel et al. (2006) cita amplos comprimentos entre 400 – 2198 nm na faixa Vis-NIR e 1100 – 2498 nm para a faixa NIR. Demattê et al. (2016) cita diversos comprimentos de onda entre eles: 825 nm, 853 nm, 1100 nm, 1138 nm, 1449 nm, 1524 nm, 1650 nm, 1706 nm, 1730 nm, 1754 nm, 1930 nm, 1961 nm, 2033 nm, 2135 nm, 2137 nm, 2275 nm, 2316 nm, 2307 nm, 2336 nm, 2381 nm, 2469 nm. Ambos os autores corroboram com os resultados deste estudo, tanta em comprimentos de onda específicos, quanto que no NIR há mais comprimentos que podem ter importância para estimativa de C.

3.3.4 Mapeamento do C total

Para mapeamento detalhado os conteúdos de C observado e estimados por RF e PLSR para as faixas Vis, NIR e Vir-NIR foram submetidos a análise geoestatística (Tabela 4). Observa-se que os ajustes dos modelos foram diferentes. Os dados de C observado e estimado por RF, e por PLSR ambos na faixa do se

ajustaram ao modelo exponencial. Os dados de C estimado por RF para as faixas NIR e Vis+NIR, e por PLSR na faixa Vis+NIR se ajustaram modelo esférico. E o C estimado por PLSR na faixa do NIR apresentou comportamento gaussiano.

Tabela 4. Métricas geoestatísticas dos teores totais de C observados e estimados, pelas faixas Vis (Visível), NIR (Infravermelho médio) e Vis+NIR por Random Forest (RF) e regressão por mínimos quadrados parciais (PLSR) na profundidade de 0,00 - 0,20 m, para os solos do Planalto Ocidental Paulista.

	Atributo	Modelo	C0	C0+C	A0 (m)	R^2	SQR	ADE
Observado	C (g kg-1)	Exp	19.4	58.22	5.95	0,82	5.32	0.66
Estimado RF	C (g kg-1) - Vis	Exp	3.68	7.44	0.25	0.78	2.24	0.50
	C (g kg-1) - NIR	Esf	4.93	9.87	0.93	0.90	2.65	0.50
	C (g kg-1) - Vis-NIR	Esf	5.88	13.62	1.01	0.91	3.50	0.56
Estimado PLSR	C (g kg-1) - Vis	Exp	29.3	98.60	5.11	0.70	4.10	0.70
	C (g kg-1) - NIR	Gau	15.8	44.95	3.15	0.92	3.80	0.74
	C (g kg-1) - Vis-NIR	Esf	16.22	37.96	6.01	0.83	4.45	0.57

*exp – exponencial; esf – esférico; gau – gaussiano; C_0 – Efeito pepita; C_0+C – Patamar; A0 - Alcance; SQR – Soma dos quadrados dos resíduos; ADE – avaliados de dependência espacial.

Trabalho com mapeamento de C para uma pequena área do estado de São Paulo Bahia et al. (2017) ajustaram o modelo esférico aos dados. Estudando o fluxo de CO_2 no solo em áreas do estado de São Paulo Bahia et al. (2014) e LaScala Jr et al. (2000) também ajustaram os dados ao mesmo modelo. Apontando que os dados encontrados neste estudo estão de acordo com aqueles observados em literaturas. O modelo esférico é considerado o mais comum para ajuste de variáveis de solo (Cambardella et al., 1994; Vieira, 2000), pois estas apresentam variações abruptas ao logo da paisagem (Isaaks e Srivastava, 1989).

Os alcances mais próximos foram obtidos para os dados de C observado (5,95 m) e estimados por PLSR, para a faixa do Vis (5,11 m), NIR (3,15 m) e Vis+NIR (6,01 m). Com os maiores valores de dependência espacial (ADE). Os maiores alcances para os dados estimados indicam maiores subestimações nos dados, gerando um banco de dados mais homogêneo. O contrário foi observado para os dados estimados por RF. Estes apresentaram menores alcances, e menor dependência espacial. Os

resultados apontam que o algoritmo tem maior sensibilidade para capturar a heterogeneidade dos dados.

Os mapas detalhados podem ser observados na Figura 8. Observa-se que nas bordas Sul, Sudoeste e Leste, onde estão os compartimentos basálticos, estão os maiores conteúdos de C. Nas demais regiões do POP, principalmente na região central, onde os arenitos, observa-se os menores conteúdos de C. Observa-se que apesar do amplo intervalo dos teores de C, no arenito, a estimativas utilizando a ERD, tanto pelo RF é capaz de detectar estas variações.

Os mapas dos dados estimados por RF apresentam comportamento semelhante ao mapa de C observado (Figura 8). Todavia o algoritmo tende a subestimar os conteúdos de C, em ambos os compartimentos geológicos e geomorfológicos. Conforme apontado pelas métricas, o modelo de estimativa que associou as faixas do Vis+NIR gerou o mapa de C mais semelhante ao observado. A associação das faixas permite captar melhor as transições em os compartimentos, principalmente nos compartimentos areníticos. A estimativa do C por Vis e NIR, embora apresentem mapas semelhantes ao observado, os conteúdos no compartimento arenítico são generalizados.

Os mapas dos dados estimados por PLSR também apresentaram comportamento semelhantes ao mapa de C observado (Figura 8). Nota-se que os dados estimados pela associação das faixas Vis+NIR e NIR, não conseguem captar as variações entre os compartimentos de arenito e basalto. Tendendo a superestimar os conteúdos de C nas regiões de basalto, onde tem mais C, e subestimar na região do arenito, onde tem menor conteúdo de C. Na região Sudoeste e Sul do POP há uma extensão do compartimento basáltico, com maior conteúdo de C (mapa de C total observado). Contudo estas faixas na análise de PLSR não captou essa variação.

Seguindo as melhores métricas do PLSR o mapa de dados estimados para a faixa do Vis, foi o que apresentou os padrões mais semelhantes ao mapa observado (Figura 8). Os dados no compartimento de basalto seguiram os mesmos padrões do mapa observado. Para o compartimento de arenito houve superestimação dos dados, especialmente na região central do POP.

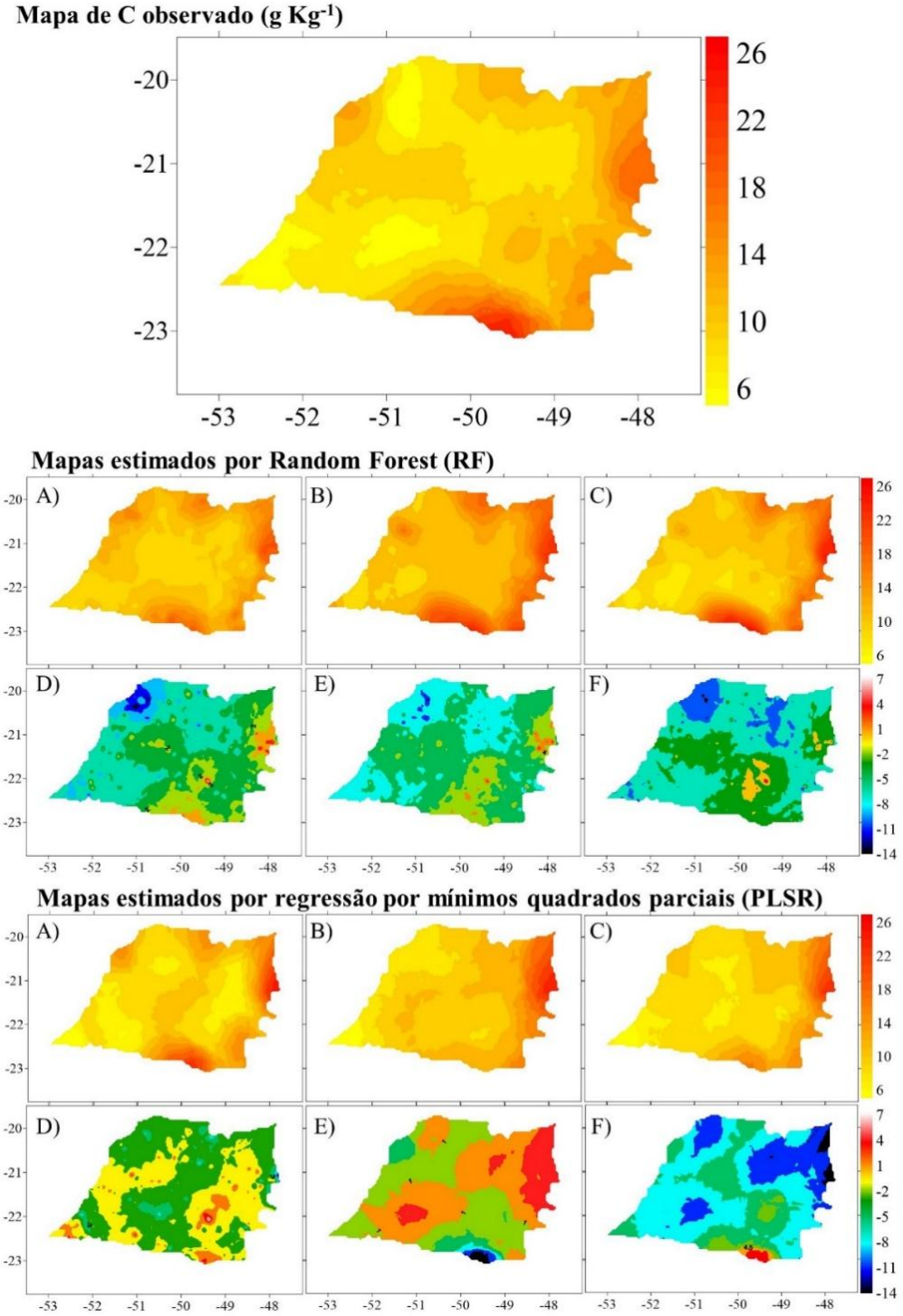


Figura 8. Mapas de C observado e estimado por Random Forest com base nas faixas da curva espectral Vis (A), NIR (B) e Vis+NIR (B), e por regressão por mínimos quadrados parciais com base nas faixas da curva espectral Vis (A), NIR (B) e Vis+NIR (B), e seus respectivos mapas de erro, para os solos do Planalto Ocidental Paulista.

***** Vis – Visível; NIR – infravermelho médio.

Bahia et al. (2017) mapeando o conteúdo total de C em uma pequena área dentro do POP observaram que o PLSR subestima os valores máximos de C, enquanto se mostra mais assertivo para as regiões com menores conteúdos de C. Estes resultados mostram que a extensão e variabilidade da área, ou seja, menor homogeneidade dos dados influencia na capacidade preditiva da PLSR.

Em comparação aos melhores mapas para os modelos de predição, mapa estimado por RF na faixa Vis+NIR e por PLSR na faixa do Vis, o mapa estimado por RF apresentam os padrões mais próximos aqueles do mapa observado, indicando a superioridade do algoritmo. Os mapas de erro apresentados nas Figuras 8D, 8E e 8F, apontam que os mapas estimados por PLSR são mais erráticos quando comparados aos estimados por RF. Os erros observados para os mapas estimados por PLSR são mais homogêneos ao longo do POP quando comparado aos estimados por RF.

Como citado acima a superioridade das modelagens matemáticas, depende do banco de dados. Entretanto nota-se que o RF é superior ao PLSR, apresentando mapas mais próximos ao mapa observado. A escolha da modelagem irá depender do tamanho do banco de dados e da expertise do profissional. Para análise com RF o banco de dados foi reduzido com auxílio da análise Stpewise, para finalidades práticas e de processamento de dados. Enquanto na análise com PLSR foram inseridos dos os dados espectrais, para atender os pré-requisitos de modelagem.

Considerando os resultados deste estudo, o RF seria a modelagem mais eficiente, prática e rápida para estimativa do conteúdo de C para solos tropicais. A seleção de comprimentos de onda específicos permite ao pesquisador trabalhar com menor banco de dados e sensores que captam com menor frequência os comprimentos de onda. Modelos derivados de menores bibliotecas espectrais podem fornecer previsões mais exatas do conteúdo de C, superando previsões obtidas com um modelo derivado de uma grande biblioteca espectral (Guerrero et al., 2016).

O uso dos algoritmos mais robustos da AM consegue captar a não linearidade dos dados, além de conseguir se adaptar ao bando de dados e melhorar a precisão dos modelos (Marsland, 2015). As técnicas de AM capta informações espaciais valiosas que não são capturadas pela covariáveis ambientais e a inclusão destas informações melhora o desempenho preditivo geral (Beguin et al., 2017). Estes algoritmos associados a ERD permite o mapeamento detalhado do conteúdo de C, de

forma precisa e rápida. Técnicas indiretas, como a ERD, são eficientes para captar a variabilidade espacial do C, e são mais rápidos eficientes e de menor custo, quando comparadas as técnicas convencionais (Aitkenhead et al., 2018; Bahia et al., 2017). Os mapas gerados utilizando estas estimativas podem auxiliar na definição de políticas públicas para uso do solo, para redução de emissão de CO_2 e para políticas de crédito de C.

3.4 Conclusões

Os maiores conteúdos de C são associados a solos mais argilosos, com mineralogia oxídica, maior volume total de poros e menor densidade do solo, em compartimentos basálticos, altamente dissecados.

Solos de maior reflectância apresentam menores conteúdos de C.

A técnica de espectroscopia de reflectância difusa apresentou eficiência para estimativa de C. Solos de maior reflectância apresentam os menores conteúdos de C.

O algoritmo Random Forest associado a faixa espectral Vis+NIR, é mais eficiente que a regressão mínima por quadrados parciais para estimativa do conteúdo de C, em solos tropicais.

O algoritmo Random Forest associado a faixa espectral Vis+NIR permitiu a confecção de mapa estimado do conteúdo de C, mais semelhante ao mapa observado, apontando que o mesmo pode ser utilizado para definição de políticas públicas para uso do solo, para redução de emissão de CO_2 e para políticas de crédito de C, de forma econômica e rápida.

3.5 Referências

Ackerson JP, Demattê JAM, Morgan CLS (2015) Predicting clay content on field-moist intact tropical soils using a dried, ground VisNIR library with external parameter orthogonalization. **Geoderma** 259–260:196–204. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.06.002

Ahmed IU (2018) **Forest Soil C**: Stock and Stability under Global Change, in: New Persepctives in Forest Science. pp. 37–67. https://doi.org/http://dx.doi.org/10.5772/46845

Aitkenhead M, Cameron C, Gaskin G, Choisy B, Coull M, Black H (2018) Digital RGB photography and visible-range spectroscopy for soil composition analysis. **Geoderma** 313:265–275. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.11.020

Asgari N, Ayoubi S, Demattê JAM, Dotto AC (2020) Carbonates and organic matter in soils characterized by reflected energy from 350–25000 nm wavelength. **Journal of Mountain Science** 17(7):1636-1651. https://doi.org/10.1007/s11629-019-5789-9

Assad ED, Pinto HS, Martins SC, Groppo JD, Salgado PR, Evangelista B, Vasconcellos E, Sano EE, Pavão E, Luna R, Camargo PB, Martinelli LA (2013) Changes in soil carbon stocks in Brazil due to land use: Paired site comparisons and a regional pasture soil survey. **Biogeosciences** 10:6141–6160. https://doi.org/10.5194/bg-10-6141-2013

Bahia ASRS, Marques Jr J, Siqueira DS (2015a) Procedures using diffuse reflectance spectroscopy for estimating hematite and goethite in Oxisols of São Paulo, Brazil. **Geoderma Regional** 5:150–156. https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2015.04.006

Bahia ASRS, Marques Júnior J, Panosso AR, Camargo LA, Siqueira DS, Scala N La, (2014) Iron oxides as proxies for characterizing anisotropy in soil CO2 emission in sugarcane areas under green harvest. **Agriculture, Ecosystems & Environment** 192:152–162.

Bahia ASRS, Marques Júnior J, Panosso AR, Camargo LA, Siqueira DS, Teixeira DDB, La Scala Júnior N (2015b) Field-scale spatial correlation between contents of iron oxides and CO2 emission in an Oxisol cultivated with sugarcane. **Scientia Agricola** 72:157–166. https://doi.org/10.1590/0103-9016-2014-0142

Bahia ASRS, Marques J, La Scala N, Cerri CEP, Camargo LA (2017) Prediction and Mapping of Soil Attributes using Diffuse Reflectance Spectroscopy and Magnetic Susceptibility. **Soil Science Society of America Journal** 81:1450–1462. https://doi.org/10.2136/sssaj2017.06.0206

Baker JM, Ochsner TE, Venterea RT, Griffis TJ (2007) Tillage and soil carbon sequestration — What do we really know? **Agriculture, Ecosystems & Environment** 118:1–5. https://doi.org/10.1016/j.agee.2006.05.014

Barbieri DM, Marques Júnior J, Alleoni LRF, Garbuio FJ, Camargo LA (2009) Hillslope curvature, clay mineralogy, and phosphorus adsorption in an Alfisol cultivated with sugarcane. **Scientia Agricola** 66:819–826. https://doi.org/10.1590/S0103-90162009000600015

Barbieri DM. (2011) Atributos Físicos, Químicos E Mineralógicos De Um Latossolo Vermelho Eutroférrico Sob Dois Sistemas De Colheita De Cana-De-Açúcar. Tese (Doutor em Ciência do Solo) UNESP, Jaboticabal, SP.

Beguin J, Fuglstad G, Mansuy N, Paré D (2017) Predicting soil properties in the Canadian boreal forest with limited data: Comparison of spatial and non-spatial statistical approaches. **Geoderma** 306:195–205. https://doi.org/10.1016/j.geoderma .2017.06.016

Bellon-Maurel V, McBratney A (2011) Near-infrared (NIR) and mid-infrared (MIR) spectroscopic techniques for assessing the amount of carbon stock in soils - Critical review and research perspectives. **Soil Biology and Biochemistry** 43:1398–1410. https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2011.02.019

Bishop JL, Lane MD, Dyar MDJBA (2008) Reflectance and emission spectroscopy study of four groups of phyllosilicates: smectites, kaolinite-serpentines, chlorites and micas. **Clay Minerals** 43:35–54. https://doi.org/10.1180/claymin.2008.043.1.03

Braz SP, Urquiaga S, Alves BJR, Jantalia CP, Guimarães AP, Santos CA, Santosm SC, Pinheiro EFM, Boddey RM (2013) Soil Carbon Stocks under Productive and Degraded Brachiaria Pastures in the Brazilian Cerrado, **Soil Sciece Society of American Journal,** 77:914–928.

Breiman L (2001a) Random Forest. **Machine Learning** 45:5–32. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

Breiman L (2001b) ST4_Method_Random_Forest. **Machine Learning** 45:5–32. https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004

Brown DJ, Shepherd KD, Walsh MG, Dewayne May, Reinsch TG (2006) Global soil characterization with VNIR diffuse reflectance spectroscopy. **Geoderma** 132:273–290. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.04.025

Camargo LA, Marques Júnior J, Pereira GT (2013) Mineralogy of the clay fraction of Alfisols in two curvatures. IV - Spatial correlation with physical properties. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 37:307–316.

Camargo LA, Marques Júnior J, Pereira GT, Bahia ASRS (2014) Clay mineralogy and magnetic susceptibility of Oxisols in geomorphic surfaces. **Scientia Agricola** 71:244–256. https://doi.org/10.1590/S0103-90162014000300010

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

Camargo LA, Marques Júnior J, Pereira GT, Horvat RA (2008b) Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um Latossolo sob diferentes formas do relevo. II - Correlação espacial entre mineralogia e agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 32: 2279–2288. https://doi.org/10.1590/S0100-06832008000600007

Camargo LA, Marques J, Barrón V, Alleoni LRF, Barbosa RS, Pereira GT (2015) Mapping of clay, iron oxide and adsorbed phosphate in Oxisols using diffuse reflectance spectroscopy. **Geoderma** 251–252:124–132. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.03.027

Camargo OA, Moniz AC, Jorge JA, Valadares LMAS (1986) Métodos de análise química, mineralógica e física dos solos do Instituto Agronômico de Campinas. Instituto Agronômico, Campinas. 96 pp.

Cambardella CA, Moorman TB, Novak JM, Parkin TB, Karlen DL, Turco RF, Konopka AE (1994) Field-scale variability of soil properties in Central Iowa. **Soil Science Society of America Journal**, 58:1501-1508.

Campos MCC, Montanari R, Marques Júnior J, Pereira GT, Souza ZM (2012) Caracterização de Argissolos em diferentes segmentos de vertente na região de Jaboticabal. **Revista de Ciências Agrárias** 55:251-259. h ttp://dx.doi.org/10.4322/rca.2012.072 Milton.

Carmo DAB, Marques Júnior J, Siqueira DS, Bahia ASRS, Santos HM, Pollo GZ (2016) Cor do solo na identificação de áreas com diferentes potenciais produtivos e qualidade de café. Pesquisa Agropecuária Brasileira 51:1261–1271. https://doi.org/10.1590 /S0100-204X2016000900026

Chagas CS, Carvalho Junior W, Bhering SB, Calderano Filho B (2016) Spatial prediction of soil surface texture in a semiarid region using random forest and multiple linear regressions. **Catena** 139:232–240. https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.01.001

Chicati MS, Nanni MR, Chicati ML, Furlanetto RH, Cezar E, Oliveira RB (2019) Hyperspectral remote detection as an alternative to correlate data of soil constituents. **Remote Sensing Applications: Society and Environment** 16. https:// doi.org/10.1016/j.rsase.2019.100270

Clark RN 1(999) **Spectroscopy of Rocks and Minerals and Principles of Spectroscopy. Manual of Remote Sensing**, in: Remote Sensing for the Earth Sciences: Manual of Remote Sensing. pp. 3–58.

Cunha P, Marques Júnior J, Curi N, Pereira GT, Lepsch IF (2005) Superfícies geomórficas e atributos de Latossolos em um sequência arenítico-basáltica da região de Jaboticabal (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 29, 81–90.

Curi N, Franzmeier DP (1987) Effect of parent rocks on chemical and mineralogical properties of some Oxisols in Brazil. **Soil Science Society of America Journal** 51:153-158.

Dawson JJC, Smith P (2007) Carbon losses from soil and its consequences for land-use management. **Science of the Total Environment** 382:165–190. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2007.03.023

Demattê JAM, Epiphanio JC, Formaggio AR (2003) Influência da matéria orgânica e de formas de ferro na reflectância de solos tropicais. **Bragantia** 62:451–464.

Demattê JAM, Morgan CLS, Chabrillat S, Rizzo R, Franceschini MHD, Terra FS, Vasques GM, Wetterlind J (2016) **Spestral sensing from ground to space in soil science: stat of the art, applications, potencial and perspectives**, in: Remote Sensing Handbook: Land Resources Monitoring, Modeling and Mapping with Remote Sensing. 661–732.

Demattê JAM, Campos RC, Alves MC, Fiorio PR, Nanni MR (2004) Visible-NIR reflectance: A new approach on soil evaluation. **Geoderma** 121:95–112. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2003.09.012

Demattê JAM, Dotto AC, Paiva AFS, Sato MV, Dalmolin RSD, Araújo MSB, Silva EB, Nanni MR, ten Caten A, Noronha NC, Lacerda MPC, Araújo Filho JC, Rizzo R, Bellinaso H, Francelino MR, Schaefer CEGR, Vicente LE, Santos UJ, Sá Barretto Sampaio EV, Menezes RSC, Souza JJLL, Abrahão WAP, Coelho RM, Grego CR, Lani JL, Fernandes AR, Gonçalves DAM, Silva SHG, Menezes MD, Curi N, Couto EG, Anjos LHC, Ceddia MB, Pinheiro ÉFM, Grunwald S, Vasques GM, Marques Júnior J, Silva AJ, Barreto MCV, Nóbrega GN, Silva MZ, Souza SF, Valladares GS, Viana JHM, Silva Terra F, Horák-Terra I, Fiorio PR, Silva RC, Frade Júnior EF, Lima RHC, Alba JMF, Souza Junior VS, Brefin MDLMS, Ruivo MDLP, Ferreira TO, Brait MA, Caetano NR, Bringhenti I, Sousa Mendes W, Safanelli JL, Guimarães CCB, Poppiel RR, Souza AB, Quesada CA, Couto HTZ (2019) The Brazilian Soil Spectral Library (BSSL): A general view, application and challenges. **Geoderma** 354:113793. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2019.05.043

Demattê, J.A.M., Horák-Terra, I., Beirigo, R.M., Terra, F.S., Marques, K.P.P., Fongaro, C.T., Silva, A.C.S., Vidal-Torrado, P., 2017. Genesis and properties of wetland soils by VIS-NIR-SWIR as a technique for environmental monitoring. J. Enviromenmental Manag. 197, 50–62. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.03.014

Dinkins, D.P., Jonessoil, C., 2008. Sampling Strategies. Agriculture and Natural Resources. MT200803AG New 4/08.

Don, A., Schumacher, J., Freibauer, A., 2011. Impact of tropical land use change on soil organic carbon stocks - a meta-analysis. Glob. Chang. Biol. 18, 3237–3251.

Dufréchou G, Grandjean G, Bourguignon A (2015) Geometrical analysis of laboratory soil spectra in the short-wave infrared domain: Clay composition and estimation of the swelling potential. **Geoderma** 243–244: 92–107. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.12.014

Eclesia RP, Jobbagy EG, Jackson RB, Biganzoli F, Piñeiro G (2012) Shifts in soil organic carbon for plantation and pasture establishment in native forests and grasslands of South America. **Global Change Biology** 18:3237–3251. https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2012.02761.x

Embrapa 2017. **Manual de métodos de análises**. In: Manual de Métodos de Análise de Solo. Brasília, DF, p. 574.

England JR, Viscarra-Rossel RA (2018) Proximal sensing for soil carbon accounting. **Soil** 4:101–122. https://doi.org/10.5194/soil-4-101-2018

Falloon P, Betts R (2010) Climate impacts on European agriculture and water management in the context of adaptation and mitigation-The importance of an integrated approach. Science of the Total Environment 408:5667–5687. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2009.05.002

Fang Q, Hong H, Zhao L, Kukolich S, Yin K, Wang C (2018) Visible and Near-Infrared Reflectance Spectroscopy for Investigating Soil Mineralogy: A Review. **Journal Spectrosopy** 2018:1–14.

FAO (2019) **Fome aumenta no mundo e atinge 820 milhões de pessoas**, diz relatório da ONU [WWW Document]. Nações Unidas Bras. URL http://twixar.me/FXfT

Fernandes K, Marques Jr J, Santos ASR, Demattê JAM, Ribon AA (2020) Landscape-scale spatial variability of kaolinite-gibbsite ratio in tropical soils detected by diffuse reflectance spectroscopy. **Catena** 195:104795. https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104795

Fernandes LA (2004) Mapa litoestratigráfico da parte oriental da Bacia Bauru (PR, SP, MG), escala 1:1.000.000. Bol. Paraná**. Geoscience** 53–66.

Fernandes LA, Castro AB, Basilici G (2007) Seismites in continental sand sea deposits of the Late Cretaceous Caiuá Desert, Bauru Basin, Brasil. **Sedimentary Geology** 199:61–64. https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2005.12.030

Fernandes RBA, Barrón V, Torrent J, Fontes MPF (2004) Quantificação de óxidos de ferro de Latossolos brasileiros por espectroscopia de reflectância difusa. **Revista Brasileia de Ciência do Solo** 28:245–257.

Ferreira MM, Fernandes B, Curi N (1999) Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileia de Ciência do Solo** 23:515–524. https://doi.org/10.1590/s0100-06831999000300004

Gelsleichter YA, Anjos LHC, Costa EM, Valente G, Debiasi P, Antunes MAH, Marcondes RAT (2019) Machine Learning Algorithms for Soil Properties Prediction with Treated Vis–NIR Spectrums from the Itatiaia National Park. **Preprints** 1:1–20. https://doi.org/10.20944/PREPRINTS201911.0053.V1

Genú AM, Demattê JAM, Fiorio PR (2010) Análise espectral de solos da Região de Mogi-Guaçú (SP). **Semina** 31:1235–1244. https://doi.org/10.5433/16790359.2010v31n4Sup1p1235

Genú AM, Demattê JAM, Nanni MR (2013) Caracterização e comparação do comportamento espectral de atributos do solo obtidos por sensores orbitais (ASTER e TM) e terrestre (IRIS). **Ambiência Guarapuava** 9:279–288. https://doi.org/10.5777/ambiencia.2013.02.03

Ghidin AA, Melo VDF, Costa V, Maria J, Costa J (2006) Topossequências de Latossolos originados de rochas basálticas no Paraná. I - Mineralogia da fração argila. **Revista Brasileia de Ciência do Solo** 30:293–306.

Gómez-Robledo L, López-Ruiz N, Melgosa M, Palma AJ, Capitán-Vallvey LF, Sánchez-Marañón M (2013) Using the mobile phone as munsell soil-colour sensor: An experiment under controlled illumination conditions. **Computers and Electronics in Agriculture** 99:200–208. https://doi.org/10.1016/j.compag.2013.10.002

Gruijter JJ, McBratney AB, Minasny B, Wheeler I, Malone BP, Stockmann U (2016) Farm-scale soil carbon auditing. **Geoderma** 265:120–130. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.11.010

Guerrero C, Wetterlind J, Stenberg B, Mouazen AM, Gabarrón-Galeote MA, Ruiz-Sinoga JD, Zornoza R, Viscarra-Rossel RA (2016) Do we really need large spectral libraries for local scale SOC assessment with NIR spectroscopy? **Soil Tillage Research** 155:501–509. https://doi.org/10.1016/j.still.2015.07.008

Heil J, Marschner B, Stumpe B (2020) Digital photography as a tool for microscale mapping of soil organic carbon and iron oxides. **Catena** 193:104610. https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104610

Henderson BL, Bui EN, Moran CJ, Simon DAP (2005) Australia-wide predictions of soil properties using decision trees. **Geoderma** 124:383−398.

Hickmann C, Costa LM (2012) Estoque de carbono no solo e agregados em Argissolo sob diferentes manejos de longa duração. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental 16:1055–1061.

Hunt GR, Salisbury JW (1970) Visible and near-infrared spectra of minerals and rocks, I. Silicate minerals. **Modern Geology** 1:283–300.

Issaks EH, Srivastava RM (1989) **A introduction to applied geoestatistics.** Oxford: University Press, 561 p.

Jackson ML (1985) **Soil Chemical Analysis**, 2nd edition., Madison. 930 p.

Kämpf N (1988) **O ferro no solo.** In: reunião sobre ferro em solos inundados, 1, Goiânia, 1988. Anais... Goiânia, EMBRAPA - CNPAF, p.35-71.

Kämpf N, Schwertmann U (1982) Relações entre óxidos de ferro e cor em solos cauliníticos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo** 7:27-31.

Ker JC (1994) Latossolos Do Brasil: Uma Revisão. **Geonomos** 5:17–40.

Keskin H, Grunwald S, Harris WG (2019) Digital mapping of soil carbon fractions with machine learning. **Geoderma** 339:40–58. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2018.12.037

Khanal S, Fulton J, Klopfenstein A, Douridas N, Shearer S (2018) Integration of high resolution remotely sensed data and ma- chine learning techniques for spatial prediction of soil properties and corn yield. Computers and Electronics in Agriculture 153:213–225.

Kuang B, Mouazen AM (2013) Non-biased prediction of soil organic carbon and total nitrogen with vis-NIR spectroscopy, as affected by soil moisture content and texture. Biosystems engineering 114:249–258. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2013.01.005

La Scala Jr N, Marques Jr J, Pereira GT, Cora JE (2000) Short-term temporal changes in the spatial variability model of CO 2 emissions from a Brazilian bare soil. **Soil Biology and Biochemistry** 32:1459–1462.

Leal FT, França ABC, Siqueira DS, Teixeira DDB, Marques Júnior J, La Scala Júnior N (2015) Characterization of potential CO2 emissions in agricultural areas using magnetic susceptibility**. Science Agriculture** 72:535–539. https://doi.org/10.1590/0103-9016-2014-0420

Lima CLR, Miola ECC, Timm LC, Pauletto EA, Silva AP (2012) Soil compressibility and least limiting water range of a constructed soil under cover crops after coal mining in Southern Brazil. **Soil Tillage Research** 124, 190–195. https://doi.org/ 10.1016/j.still.2012.06.006

Lybbert TJ, Sumner DA (2012) Agricultural technologies for climate change in developing countries: Policy options for innovation and technology diffusion. **Food Policy** 37:114–123. https://doi.org/10.1016/j.foodpol.2011.11.001

Malley DF, Martin PD, Ben-Dor E (2004) **Application in analysis of soils**. In: Roberts CA, Workman J, Reeves JB Near-Infrared Spectroscopy in Agriculture. Madison: American Society of Agronomy; Crop Science Society of America; Soil Sci. Soci. of America, 729–784.

Marques Júnior J, Alleoni LRF, Teixeira DDB, Siqueira DS, Pereira GT (2015) Sampling planning of micronutrients and aluminium of the soils of. **Geoderma Reginal** 4:91–99. https://doi.org/10.1016/j.geodrs.2014.12.004

Marsland SW (2015) **Machine Learning An Algorithmic Perspective.** 2. ed. 2015

Martin M, Orton T, Lacarce E, Meersmans J, Saby N, Paroissien J, Jolivet C, Boulonne L, Arrouays D (2014) Evaluation of modelling approaches for predicting the spatial distribu- tion of soil organic carbon stocks at the national scale. **Geoderma** 223:97–107.

Mehra OP, Jackson ML (1958) Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. **Clays Clay Minerals** 7:317–327.

Mehra OP, Jackson ML (1960) Iron oxide removed from soils and clays by dithionitecitrate system buffered with sodium bicarbonate. **Clays and Clay Minerals** 7:1317-327.

Mendes T (2015) **Cenários de uso e manejo para conservação do estoque de carbono do solo no Estado do Maranhão**. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal.

Minasny B, Malone BP, McBratney AB, Angers DA, Arrouays D, Chambers A, Chaplot V, Chen ZS, Cheng K, Das BS, Field DJ, Gimona A, Hedley CB, Hong SY, Mandal B, Marchant BP, Martin M, McConkey BG, Mulder VL, O'Rourke S, Richer-de-Forges AC, Odeh I, Padarian J, Paustian K, Pan G, Poggio L, Savin I, Stolbovoy V, Stockmann U, Sulaeman Y, Tsui CC, Vågen TG, van Wesemael B, Winowiecki L (2017) Soil carbon 4 per mille. **Geoderma** 292:59–86. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.01.002

Minasny B, McBratney AB, Hartemink AE (2010) Global pedodiversity, taxonomic distance, and the World Reference Base. **Geoderma** 155:132–139. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.04.024

Montanari R, Marques Júnior J, Campos MCC, Souza ZM, Camargo LA (2010) Caracterização mineralógica de Latossolos em diferentes feições do relevo na região de Jaboticabal, SP. **Revista Ciência Agronômica** 41:191–199.

Morellos A, Pantazi XE, Moshou D, Alexandridis T, Whetton R, Tziotzios G, Wiebensohn J, Bill R, Mouazen AM (2016) Machine learning based prediction of soil total nitrogen, organic carbon and moisture content by using VIS-NIR spectroscopy. Biosystems engineering 152:104–116. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2016. 04.018

Mouazen AM, Kuang B, Baerdemaeker J, Ramon H (2010) Comparison between principal component, partial least squares and artificial neural network analyses for accuracy of measurement of selected soil properties with visible and near infrared spectroscopy. **Geoderma** 158:23-31.

Norrish K, Taylor RM (1961) The isomorphous replacement of iron by aluminium in soil goethites. **Journal of Soil Science** 12:294–305.

ONU (2019) **O Perspectivas Mundiais de População 2019.** Disponível em: <https://population.un.org/wpp/>. Acesso em: 06 de agosto de 2020.

Padarian J, Minasny B, McBratney ABB (2015) Using Google's cloud-based platform for digital soil mapping. **Computers & Geosciences** 83:80–88. https://doi.org/10.1016/j.cageo.2015.06.023

Padarian J, Minasny B, McBratney AB (2020) Machine learning and soil sciences: A review aided by machine learning tools. **Soil** 6:35–52. https://doi.org/10.5194/soil-6-35-2020

Pahlavan-Rad MR, 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** 194:104715. https://doi.org/10.1016/j.catena.2020.104715

Parron LM, Garcia JR, Oliveira EB, Brown GG, Prado RB (2015) **Estoques de carbono no solo como indicador de serviços ambientais, in: Serviços Ambientais Em Sistemas Agrícolas e Florestais Do Bioma Mata Atlântica**. Brasília, DF: Embrapa pp. 92–100.

Pedregosa FGV, Gramfort A, Michel V, Thirion B, Grisel O, Blondel M, Prettenhofer P, Weiss R, Dubourg V, Vanderplas J, Passos A, Cournapeau D, Brucher M, Perrot M, Duchesnay E (2011) Scikit-learn: Machine Learning in Python. **Journal of Machine Learning Research** 12:2825–2830.

Pizarro MA, Epiphanio JCN, Galvão LS (2001) Caracterização mineralógica de solos tropicais por sensoriamento remoto hiperespectral. **Pesquisa Agropecuária Tropical** 36:1277–1286.

Quinton JN, Govers G, Van Oost K, Bardgett RD (2010) The impact of agricultural soil erosion on biogeochemical cycling. Nature Geoscience 3:311–314. https://doi.org/10.1038/ngeo838

Raij BV (2001) Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais. Campinas, Instituto Agronômico, 285p.

Rosendo JS, Rosa R (2012) Comparação do estoque de c estimado em pastagens e vegetação nativa de cerrado. Sociedade e Natureza 24:359–375.

Saiz G, Bird MI, Domingues T, Schrodt F, Schwarz M, Feldpausch TR, Veenendaal E, Djagbletey G, Hien F, Compaore H, Diallo A, Lloyd J (2012) Variation in soil carbon stocks and their determinants across a precipitation gradient in West Africa. **Global Change Biology,** 18:1670-1683.

Sanchez MGB, Marques J, Siqueira DS, Camargo LA, Pereira GT (2013) Delineation of specific management areas for coffee cultivation based on the soil-relief relationship and numerical classification. Precision Agriculture 14:201–214. https://doi.org/10.1007/s11119-012-9288

Sanchez RB, Júnior JM, Souza ZM, Pereira GT, Filho MVM (2009) Variabilidade espacial de atributos do solo e de fatores de erosão em diferentes pedoformas. **Bragantia** 68:1095–1103. https://doi.org/10.1590/S0006-87052009000400030

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

Schillaci C, Lombardo L, Saia S, Fantappiè M, Märker M, Acutis M (2017) Modelling the topsoil carbon stock of agricul- tural lands with the Stochastic Gradient Treeboost in a semi-arid Mediterranean region, **Geoderma** 286:35–45.

Schwertmann U (1993) **Relations between iron oxides, soil color, and soil formation**. In: Bigham JM, Ciolkosz EJ Soil color. Madison: Soil Science Society of America, p.51-69.

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

Siqueira DS, Marques J, Matias SSR, Barrón V, Torrent J, Baffa O, Oliveira LC (2010) Correlation of properties of Brazilian Haplustalfs with magnetic susceptibility measurements. **Soil Use and Management** 26:425–431. https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2010.00294.x

Somarathna PDSN, Minasny B, Malone BP, Stockmann U, McBratney AB (2018) Accounting for the measurement error of spectroscopically inferred soil carbon data for improved precision of spatial predictions. Science of the Total Environment 631–632:377–389. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.02.302

Stenberg B (2010) Effects of soil sample pretreatments and standardised rewetting as interacted with sand classes on Vis-NIR predictions of clay and soil organic carbon. **Geoderma** 158:15–22. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.04.008

Stenberg B, Viscarra-Rossel RA, Mouazen AM, Wetterlind J (2010) Visible and Near Infrared Spectroscopy in Soil Science. **Soil Science** 163–215. https://doi.org/10.1016/S0065-2113(10)07005-7

Stenberg B, Viscarra-Rossel RA (2006) **Diffuse Reflectance Spectroscopy for High-Resolution Soil Sensing.** Proximal Soil Sensing. pp. 29–47.

Stevens A, Nocita M, Tóth G, Montanarella L, Van Wesemael B (2013) Prediction of Soil Organic Carbon at the European Scale by Visible and Near InfraRed Reflectance Spectroscopy. **Plos One** 8:6. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0066409

Teixeira DDB, Bicalho SE, Panosso AR, Cerri CEP, Pereira GT, LaScala Junior N (2013) Spatial variability of soil CO_2 emission in a sugarcane area characterized by secondary information. **Scientia Agricola** 70:195–203.

Terra FS, Demattê JAM, Viscarra-Rossel RA (2018) Proximal spectral sensing in pedological assessments: vis–NIR spectra for soil classification based on weathering and pedogenesis. **Geoderma** 318:123–136. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.10.053

Thanasoulias NC, Piliouris ET, Kotti ME, Evmiridis NP (2002) Application of multivariate chemometrics in forensic soil discrimination based on the UV-Vis spectrum of the acid fraction of humus. **Forensic Sci. Iternational** 130:73–82.

Vasconcelos V, Souza D, Martins E, Carvalho Junior OA, Marques Junior J, Silva Siqueira D, Couto Junior AF, Fontes Guimarães R, Gomes RAT, Reatto A (2013) Modelo de evolução pedogeomorfológica da Serra da Canastra, MG. **Revista Brasileira de Geomorfologia** 14:197–212.

Vasques GM, Demattê JAM, Viscarra-Rossel RA, Ramírez-Lopes L, Terra FS (2014) Soil classification using visible/near-infrared diffuse reflectance spectra from multiple depths. **Geoderma** 223–225:73–78. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.019

Vieira SR (2000) **Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo.** In: Novais RF, Alvarez VVH, Schaefer CE Tópicos em Ciência do Solo. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 1-54.

Viscarra Rossel RA, Bui EN, Caritat P, Mckenzie NJ (2010) Mapping iron oxides and the color of Australian soil using visible – near - infrared reflectance spectra. **Journal of Geophysical Research** 115:1–13. https://doi.org/10.1029/2009JF001645

Viscarra Rossel RA, Behrens T, Ben-Dor E, Brown DJ, Demattê JAM, Shepherd KD, Shi Z, Stenberg B, Stevens A, Adamchuk V, Aïchi H, Barthès BG, Bartholomeus HM, Bayer AD, Bernoux M, Böttcher K, Brodský L, Du CW, Chappell A, Fouad Y, Genot V, Gomez C, Grunwald S, Gubler A, Guerrero C, Hedley CB, Knadel M, Morrás HJM, Nocita M, Ramirez-Lopez L, Roudier P, Campos EMR, Sanborn P, Sellitto VM, Sudduth KA, Rawlins BG, Walter C, Winowiecki LA, Hong SY, Ji W (2016) A global spectral library to characterize the world's soil. **Earth-Science Reviews Journal** 155:198–230. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2016.01.012

Viscarra Rossel RA, Bouma J (2016) Soil sensing: A new paradigm for agriculture. **Agricultural Systems** 148:71–74. https://doi.org/10.1016/j.agsy.2016.07.001

Viscarra Rossel RA, Fouad Y, Walter C (2008) Using a digital camera to measure soil organic carbon and iron contents. **Biosystems engineering** 100:149–159. https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.02.007

Viscarra Rossel RA, Walvoort DJJ, McBratney AB, Janik LJ, Skjemstad JO (2006) Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. **Geoderma** 131:59–75. https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.03.007

Viscarra-Rossel RA (2008) Parles: Software for chemometric analysis of spectroscopic data. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems** 90:72–83. https://doi.org/10.1016/j.chemolab.2007.06.006

Viscarra-Rossel RA, Chappell A, Caritat P, Mckenzie NJ (2010) Mapping the information content of Australian visible-near infrared soil spectra. **World Congr. Soil Sci. Soil Solut. a Chang.** 19:91–94.

Warrick AW, Nielsen DR (1980) **Spatial variability of soil physical properties in the field**. In: Hillel D Applications of soil physics. New York: Academic p319-344.

Wold S, Sjöström M, Eriksson L (2001) PLS-regression: A basic tool of chemometrics. **Chemometrics and Intelligent Laboratory Systems** 58:109–130. https://doi.org/10.1016/S0169-7439(01)00155-1

Yan F, Shangguan W, Zhang J, Hu B (2020) Depth-to-bedrock map of China at a spatial resolution of 100 meters. **Science Data** 7:1–13. https://doi.org/10.1038/s41597-019-0345-6

Zhao D, Zhao X, Khongnawang T, Arshad M, Triantafilis J (2018) A Vis-NIR Spectral Library to Predict Clay in Australian Cotton Growing Soil. **Soil Science Society American Journal** 82:1347. https://doi.org/10.2136/sssaj2018.03.0100

CAPÍTULO 4 – Considerações Finais

O tema abordado pela pesquisa está fundamentado na sustentabilidade ambiental e segurança alimentar. Inúmeras práticas de manejo agrícola, utilizadas desde os primórdios da agricultura são nocivas ao ambiente. A emissão de gases, o desmatamento, destruição da camada de ozônio, o aquecimento global, a desertificação, a eutrofização de recursos hídricos, a degradação do solo, são alguns dos incontáveis prejuízos que já vivenciamos. A mudança neste cenário atual da agricultura só será possível com pesquisas desta magnitude, que apontem uma alternativa para produção, porem de forma consciente.

Nos capítulos anteriores são apresentadas possibilidades de desenvolvimento de uma nova agricultura, baseada na sustentabilidade. O uso dos mapas de estoque de C e P, e conteúdo de C poderão servir de base para incontáveis futuras decisões. Onde fazer o melhor manejo da adubação fosfatada, onde aplicar mais, menos, onde é necessária uma forma mais solúvel, onde é necessário o uso de um novo método, como aplicação de pó de rocha, onde vou emitir mais gases e posso investir em uma cultura perene, ou onde o solo tem potencial para estocar C naturalmente, e se pode trabalhar com culturas anuais, são apenas exemplos das possíveis ideias que podem surgir, com a adoção desta pesquisa em áreas agrícolas.

A utilização da geologia e geomorfologia para se compartimentalizar a área de estudo, auxilia na determinada da variabilidade espacial dos atributos estudados. O conhecimento destes atributos em uma área de 13 milhões de hectares, e de relevância econômica, e heterogênea em inúmeras características, podem nortear não apenas trabalhos no estado de São Paulo, mas em estados vizinhos, que disponham de condições semelhantes. Mostrando o potencial futuro desta pesquisa.

A adoção de novas metodologias, como a espectroscopia de reflectância difusa (ERD) e técnicas matemáticas robustas, como o aprendizado de máquina e a geoestatística, atuam de forma conjunta a tornar pesquisa desta magnitude possível. Sem a adoção de tais mapear com precisão estes atributos, em grandes extensões territoriais, seria inviável, economicamente e humanamente. O capital de investimento e de equipe técnica seria de milhões, e demoraria anos. Contudo vê-se que adotando as novas metodologias é possível se obter mapas detalhados e precisos, com baixo

investimento. Estas possibilidades não contribuem somente com os resultados aqui apresentados, mas podem servir de norte e inspiração para futuros trabalhos fazerem uso das mesmas técnicas.

Por se tratar de resultados inéditos, quando se considera, metodologia, extensão territorial, mapas, e outros, pesquisas associadas a esta ainda se fazem necessárias. Seja em outras regiões do país ou com metodologias e técnicas matemáticas diferentes, ou apenas mostrando com experimentação em campo com estes mapas podem ser utilizados, são de extrema importância para sua validação. Todos os dados aqui gerados fazem parte agora de um banco de dados da região e poderão ser utilizados como base de outras pesquisas. Desta forma nortearão o desenvolvimento da pesquisa e inovação de maneira desbravadora, contribuindo para o Brasil em sua economia e sustentabilidade.