

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

**DADOS ESPECTRAIS DOS SOLOS DO CENTRO-OESTE
PAULISTA POR MEIO DE SENSORES PRÓXIMOS**

Danilo Almeida Baldo do Carmo

Engenheiro Agrônomo

2018

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

**DADOS ESPECTRAIS DOS SOLOS DO CENTRO-OESTE
PAULISTA POR MEIO DE SENSORES PRÓXIMOS**

Danilo Almeida Baldo do Carmo

Orientador: Prof. Dr. José Marques Júnior

Coorientador: Dr. Diego Silva Siqueira

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

C291d Carmo, Danilo Almeida Baldo do
Dados espectrais dos solos do Centro-Oeste Paulista por meio de sensores próximos / Danilo Almeida Baldo do Carmo. -- Jaboticabal, 2018

xix, 107 p. : il. ; 29 cm

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2018

Orientador: José Marques Júnior

Banca examinadora: José Alexandre Melo Demattê, Leandro Borges Lemos, Helena Maria Ramos Alves, Glauco de Souza Rolim
Bibliografia

1. Sensor próximo móvel. 2. Espectroscopia de reflectância difusa. 3. Manejo sustentável. 4. Protocolo de mapeamento. I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 528.8:633.73

Ficha catalográfica elaborada pela Seção Técnica de Aquisição e Tratamento da Informação – Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação - UNESP, Câmpus de Jaboticabal.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: DADOS ESPECTRAIS DOS SOLOS DO CENTRO-OESTE PAULISTA POR MEIO DE SENSORES PRÓXIMOS

AUTOR: DANILO ALMEIDA BALDO DO CARMO

ORIENTADOR: JOSÉ MARQUES JUNIOR

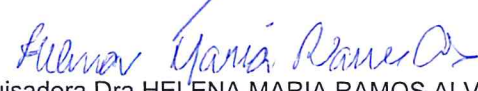
COORDENADOR: DIEGO SILVA SIQUEIRA

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


Prof. Dr. JOSÉ MARQUES JUNIOR
Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal


Prof. Dr. JOSÉ ALEXANDRE MELO DEMATTÊ (Participação por Videoconferência)
Departamento de Ciência do Solo / ESALQ/USP / Piracicaba/SP


Prof. Dr. LEANDRO BORGES LEMOS
Departamento de Produção Vegetal / FCAV / UNESP - Jaboticabal


Pesquisadora Dra HELENA MARIA RAMOS ALVES
Campus da UFLA / EMBRAPA CAFÉ - Lavras / MG


Prof. Dr. GLAUCO DE SOUZA ROLIM
Departamento de Ciências Exatas / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 05 de abril de 2018

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

DANILO ALMEIDA BALDO DO CARMO – nascido em 12 de abril de 1988 em Conceição das Alagoas, no Estado de Minas Gerais, é pós-graduado (Mestrado em Ciência do Solo) pela Universidade Estadual Paulista - Unesp, Câmpus de Jaboticabal, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias - FCAV. Possui graduação em Engenharia Agrônômica pelas Faculdades Associadas de Uberaba - FAZU. Concluiu o curso Técnico Agrícola e Técnico em Açúcar e Álcool pelo Instituto Federal do Triângulo Mineiro - IFTM. Foi bolsista pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Capes (mestrado e doutorado), e também pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Tecnológico e Científico - CNPq (Pesquisador Júnior). Ao longo da graduação e pós-graduação, integrou o conselho diretor, deliberativo, consultivo e financeiro do IFTM; foi diretor da Associação de Pós-Graduação da Unesp de Jaboticabal; e integrante do Grupo de Estudos de Algodão e Cana-de-Açúcar - GEAC, na cidade de Uberaba - MG. Proferiu palestra em instituições públicas e privadas, tendo como exemplo o 10º Congresso Nacional da Bioenergia - UDOP; Escolas Técnicas Estaduais - Etec; Unesp; IFTM, Igreja Católica, etc. Recebeu o prêmio de melhor trabalho no concurso de divulgação científica na área de manejo e conservação, evento organizado pela Universidade Federal de Viçosa - UFV (IV Simpósio Mineiro de Ciência do Solo). Foi um dos organizadores do II Encontro Paulista de Ciência do Solo e I Encontro Brasileiro de Pedometria (2016); Aula Magna promovida pela Unesp, Jaboticabal (2014); I Encontro Paulista de Ciência do Solo (2013); e I Seminário de Algodão e Cana-de-Açúcar (2011). Estagiou nas empresas públicas de pesquisa do Governo de Minas Gerais (Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais - Epamig), na área de Nematologia, e do Governo Federal (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária - Embrapa), na área de Melhoramento Genético da Soja. Ocupou os cargos de Serviços Gerais Rurais (Fazenda Aroeira/SADIA Ltda.); Assistente Agrícola (Delta Sucroenergia); e Professor (Centro Educacional de Uberaba - CEU). Desde 2013 atua como pesquisador colaborador no grupo de pesquisa de Caracterização do Solo para Fins de Manejo Específico - CSME (Unesp, Jaboticabal).

Epígrafe

Todo conhecimento começa com o sonho.
O sonho nada mais é que a aventura pelo mar desconhecido, em busca da terra sonhada. Mas sonhar é coisa que não se ensina, brota das profundezas do corpo, como a alegria brota das profundezas da terra. Como mestre só posso então lhe dizer uma coisa. Contem-me os seus sonhos para que sonhemos juntos.

Rubem Alves

DEDICO

Ao meu pai e à minha mãe (Wagner Luís e Valdete Maria), pessoas que amo, que me apresentaram o caminho da verdade, da caridade e do amor, por acreditarem em meus objetivos em benefício de uma sociedade justa e humana. Ao meu irmão (Alisson Almeida), por tudo que me ajudou até hoje.

OFEREÇO

À minha família, em especial aos meus avós maternos, João Gregório de Almeida Filho (in memoriam) e Ana Barreto do Carmo Almeida, e paternos, Oswaldo Barbosa do Carmo (in memoriam) e Irene Baldo (in memoriam).

AGRADECIMENTOS

A Deus, inteligência suprema, a causa primária de todas as coisas. A ordem universal reinante na Natureza, a inteligência revelada na construção dos seres, a sabedoria espalhada em todo o conjunto, qual uma aurora luminosa e, sobretudo, a universidade do plano geral regida pela harmoniosa lei da perfeitabilidade. (Livro dos Espíritos - Ed FEB).

À Fcav/Unesp, e ao programa de pós-graduação (Produção Vegetal). À Fapesp, pelo apoio (processo nº 11/07549-2) na geração do banco de dados. As bolsas de estudo concedidas pelas seguintes instituições: Capes e CNPq. Ao CNPq, pelo apoio financeiro ao projeto temático “Geovariabilidade do Planalto Ocidental Paulista e sua relação com as mudanças climáticas e planejamento estratégico de uso e ocupação do solo” (Edital Universal 01/2016 - Faixa C, Proc.nº 402796/2016-0). À CAPES (Proc. nº 149940) e à PROPE / UNESP (Pró-reitora de Pesquisa da Universidade Estadual Paulista, Edital Nº 15/2014), pelo apoio financeiro ao projeto de pesquisa de fronteira “Diffuse reflectance spectroscopy and soil erodibility in Western Plateau Paulista, the context of soil-landscap”.

Ao professor Dr. José Marques Júnior, orientador desta pesquisa, pela sua fidelidade, amizade, companheirismo e por ter depositado confiança na realização de minhas atividades. Ao Dr. Diego Silva Siqueira, coorientador desta pesquisa, amigo que carrego como exemplo de caráter em minha caminhada pela vida. Enfim, por terem apoiado este estudo e proporcionando oportunidade de realização do projeto.

Agradeço a todos os integrantes do grupo de pesquisa Caracterização do Solo para Fins de Manejo Específico (CSME), amigos que me acompanharam durante a pesquisa e a realização deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora, sendo: Dr. José Marques Júnior, Dr. José Alexandre Melo Demattê, Dr. Leandro Borges Lemos, Dra. Helena Maria Ramos Alves, Dr. Glauco de Souza Rolim. Obrigado pela participação, bem como pelas contribuições para o crescimento de nosso estudo.

Em especial a todas as escolas onde tive o prazer de estudar e aos professores (as), pelo aprendizado: Escola Municipal José de Sene Prata; Escola Estadual Herculino Antônio Borges; Escola Estadual José Alexandre Miziara; Instituto Federal do Triângulo Mineiro; Faculdades Associadas de Uberaba;

Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, pertencente à Universidade Estadual Paulista.

Deus seja louvado

Muito Obrigado!

SUMÁRIO

	Página
RESUMO	xi
ABSTRACT	xii
LISTA DE ABREVIATURAS	xiii
LISTA DE TABELAS	xvi
LISTA DE FIGURAS	xvii
LISTA DE APÊNDICES	xx
CAPÍTULO 1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
1.1 Introdução.....	1
1.2 Revisão de Literatura.....	3
1.2.1 Dados espectrais e a Carta de cores de Munsell.....	3
1.2.2 Covariável ambiental: dados de cor do solo.....	11
1.2.3 Indicadores científicos: Cor do Solo até o ano de 2018.....	15
1.3 Referências.....	23
CAPÍTULO 2 – DADOS ESPECTRAIS DO SOLO COM CULTIVO DE CAFÉ POR MEIO DE SENSORES PRÓXIMOS	35
2.1 Introdução.....	36
2.2 Material e Métodos.....	39
2.2.1 Caracterização da área de amostragem, análises do solo e planta.....	39
2.2.2 Obtenção da imagem por sensor próximo móvel (SPM).....	42
2.2.3 Análise da espectroscopia de reflectância difusa (ERD).....	45
2.2.4 Análise estatística dos dados.....	46
2.3 Resultados e Discussão.....	47
2.4 Conclusões.....	57
2.5 Referências.....	57
CAPÍTULO 3 – DADOS ESPECTRAIS DOS SOLOS DO PLANALTO OCIDENTAL PAULISTA POR SENSORES PRÓXIMOS	63
3.1 Introdução.....	64
3.2 Material e Métodos.....	65
3.2.1 Caracterização da área e amostragem.....	65
3.2.2 Obtenção da imagem por sensor próximo móvel (SPM), e espectroscopia de reflectância difusa (ERD).....	67
3.2.3 Análises químicas e granulométricas.....	68

3.2.4 Análises estatísticas e geoestatística.....	69
3.3 Resultados e Discussão.....	72
3.4 Conclusões.....	91
3.5 Referência.....	92
CAPÍTULO 4 – CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	103
APÊNDICE.....	104

DADOS ESPECTRAIS DOS SOLOS DO CENTRO-OESTE PAULISTA POR MEIO DE SENSORES PRÓXIMOS

RESUMO – A agricultura moderna no contexto internacional propõe inovações para o agronegócio, em especial para as práticas agrícolas. No entanto, este avanço deverá auxiliar o empresário rural a aumentar a eficiência, utilizando de forma sustentável os recursos naturais: água, terra e energia. Desse modo, objetivou-se, neste estudo, verificar o potencial dos sensores para obter os dados espectrais de um argissolo com cultivo de café. Utilizou-se de um conjunto de dados de um grid com 51 amostras de solo, em 39 hectares, com cultivo de café (Catuaí Amarelo, linhagem IAC 62). A obtenção das variáveis da cor: matiz, valor, croma, red, green e blue foi determinada por espectroscopia de reflectância difusa (ERD) e sensor próximo móvel (SPM). Os resultados mostraram relação com os atributos do solo nos seguintes casos: red_{SPM} e argila: ($R^2 = 0,70$, $p < 0,01$), $green_{SPM}$ e CTC ($R^2 = 0,73$, $p < 0,01$), red_{SPM} e P ($R^2 = 0,64$, $p < 0,05$), $blue_{SPM}$ e EC ($R^2 = 0,96$, $p < 0,01$) e, $green_{SPM}$ e Fe ($R^2 = 0,75$, $p < 0,01$). Para os atributos da planta, foram: $green_{SPM}$ e P_{17} ($R^2 = 0,70$, $p < 0,01$), defeitos com regressões variando de 0,71 - 0,84 e, red_{SPM} e produtividade ($R^2 = 0,95$, $p < 0,01$). Os resultados mostraram que o uso da cor determinada pelo red, green e blue permitiu identificar atributos do solo e áreas com potenciais produtivos e qualitativos do café. Para o estudo no Planalto Ocidental Paulista, realizou-se um grid em área de 13 milhões de hectares, totalizando 600 amostras na profundidade de 0,00-0,20 metros. Nestas amostras, foram determinadas as variáveis da cor. Observou-se semelhança no uso dos métodos ERD e SPM. Os semivariogramas da ERD tiveram alcance para as variáveis matiz, valor, croma, red, green e blue de 112 km, 216 km, 19 km, 207 km, 183 km e 158 km, respectivamente. Com o uso do SPM, os alcances foram de: 19 km, 226 km, 30 km, 160 km, 218 km e 75 km, respectivamente. Os semivariogramas cruzados estimaram os atributos físico-químicos (Argila, capacidade de troca catiônica - CTC, fósforo - P e hematita - Hm). Os semivariogramas cruzados explicaram a distância máxima de correlação observada entre as variáveis. Os resultados do SPM mostraram que a cor nos sistemas red, green e blue pode ser utilizada na predição do teor de argila (77%), CTC (99%), P (90%) e Hm (70%). Com o uso da ERD, os sistemas red, green e blue predizem o teor de argila (79%), CTC (94%), P (86%) e Hm (67%). Estes resultados mostram que a cor é um indicativo seguro dos atributos do solo. Como alternativa de baixo custo, o SPM mostrou ser uma ferramenta eficiente que possibilita a avaliação destes atributos.

Palavras-chave: Espectroscopia de reflectância difusa, Manejo sustentável, Protocolo de mapeamento, Sensor próximo móvel

SPECTRAL DATA OF MIDWEST PAULISTA SOILS BY MEANS OF NEAR SENSORS

ABSTRACT - Modern agriculture in the international context proposes innovations for agribusiness, especially for agricultural practices. However, this progress must help the rural entrepreneur to increase efficiency, using sustainable natural resources: water, land and energy. Thus, the objective of this study was, to verify the potential of the sensors to obtain the spectral data of an argisol with coffee cultivation. We used a set of data with a grid 51 soil samples on 39 hectares, with coffee cultivation (Yellow Catuaí, lineage IAC 62). Obtaining the color variables: hue, value, chroma, red, green and blue was determined by diffuse reflectance spectroscopy (DRS) and mobile near sensor (MNS). The results were related to soil attributes in the following cases: redMNS and clay: ($R^2 = 0.70$, $p < 0.01$), greenMNS and CTC ($R^2 = 0.73$, $p < 0.01$), redMNS and P ($R^2 = 0.64$, $p < 0.05$), blueMNS and EC ($R^2 = 0.96$, $p < 0.01$) and, greenMNS and Fe ($R^2 = 0.75$, $p < 0.01$). For the plant attributes, were: greenMNS and P17 ($R^2 = 0.70$, $p < 0.01$), defects with regressions ranging from 0.71 - 0.84 and, redMNS and productivity ($R^2 = 0.95$, $p < 0.01$). The results showed that the use of the color determined by red, green and blue allowed to identify soil attributes and areas with productive and qualitative potentials of coffee. For the study in the Midwest Paulista Plateau, a grid was realized in an area of 13 million hectares, totaling 600 samples in the depth of 0.00-0.20 meters. In these samples, the color variables were determined. Similarity was observed in the use of DRS and MNS methods. The DRS semivariograms were range for the hue, value, chroma, red, green and blue variables of 112 km, 216 km, 19 km, 207 km, 183 km and 158 km, respectively. With the use of MNS, the ranges were: 19 km, 226 km, 30 km, 160 km, 218 km and 75 km, respectively. The crossed semivariograms estimated the physical-chemical attributes (clay, cation exchange capacity - CTC, phosphorus - P and hematite-Hm). Crossed semivariograms explained the maximum correlation distance observed between the variables. The results of the MNS showed that the color in the red, green and blue systems can be used to predict the content of clay (77%), CTC (99%), P (90%) and Hm (70%). With the use of DRS, red, green and blue systems predict the content of clay (79%), CTC (94%), P (86%) and Hm (67%). These results show that color is a safe indication of soil attributes. As an alternative of low cost, the MNS has shown to be an efficient tool that allows the evaluation of these attributes.

Keywords: Diffuse reflectance spectroscopy, Sustainable management , Mapping protocol, Mobile near sensor

LISTA DE ABREVIATURAS

A) Instituições

Capes	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CENA	Centro de Energia Nuclear na Agricultura
CEU	Centro Educacional de Uberaba
CIE	Comissão Internacional de Iluminação (<i>Commision. Internationale L'Eclairirage</i>)
CNPq	Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico
CSME	Grupo de Pesquisa Caracterização do Solo para fins de Manejo Específico
DER	Departamento de Estradas de Rodagem
Embrapa	Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária
Epamig	Empresa de Pesquisa Agropecuária de Minas Gerais
Etec	Escola Técnica Estadual
FAO	Food and Agriculture Organization of the United Nations, tradução: Organização das Nações Unidas para Alimentação e Agricultura
Fapesp	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FAZU	Faculdades Associadas de Uberaba
FCA	Faculdade de Ciências Agrônomicas
FCAV	Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias
FEIS	Universidade Estadual Paulista em Ilha Solteira
GEAC	Grupo de Estudos de Algodão e Cana-de-Açúcar
INPE	Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais
ISSS	International Society of Soil Science
Mapa	Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
SiBCS	Sistema Brasileiro de Classificação de Solos
UDOP	União dos Produtores de Bioenergia
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
UFSCar	Universidade Federal de São Carlos
UFV	Universidade Federal de Viçosa
UnB	Universidade de Brasília
Unesp	Universidade Estadual Paulista
Unicamp	Universidade Estadual de Campinas
USDA	Departamento de Agricultura dos Estados Unidos
USP	Universidade de São Paulo

B)

Nomenclaturas

a	Alcance
Ad	Altamente dissecado
C	Chroma, tradução: croma
$C_2H_3NaO_2$	Acetato de sódio
$C_4H_6O_4Ca$	Acetato de cálcio
Ca^{2+}	Cálcio
C_o	Efeito pepita
CO	Carbono orgânico
C_o+C	Patamar.
Ct	Caulinita
CTC	Capacidade de troca catiônica

CV	Coeficiente de variação (%)
DP	Desvio-padrão
DRC	Modelo de um descascador de amostra de café para laboratório
EC	Estoque de carbono
ERD	Espectroscopia de reflectância difusa
Fe	Ferro
Fe ₂ O ₃	Óxido de ferro
Fe _d	Óxidos de ferro pedogênicos
Fe _o	Óxido de ferro de baixa cristalinidade
Fe _t	Ferro total
Gb	Gipsita
GDE	Grau de dependência espacial
Gt	Goethita
H ou M	Hue, tradução: matiz
H ⁺ Al ³⁺	Acidez do solo
H ₂ SO ₄	Ácido sulfúrico
Hm	Hematita
HSV	Sistema de cores formadas pelas componentes hue (matiz), saturation (saturação) e value (valor)
IAC62	Linhagem da cultura de café Catuaí Amarelo
IAV	Índice de avermelhamento
JPEG	<i>Short Joint Photographic Experts Group</i> (método comum usado para comprimir imagens fotográficas)
K ²⁺	Potássio
Máx.	Máximo
Md	Moderadamente dissecado
Mn	Manganês
Mg	Magnésio
Mg ²⁺	Cátion magnésio
Mín.	Mínimo
Mir	Infravermelho médio ou termal (MIR ou TIR; 2.500 - 25.000 nm)
MO	Matéria orgânica
N	Normalidade (concentração de uma solução)
NaOH	Hidróxido de sódio
Nir	Infravermelho próximo (700 - 2.500 nm)
O	(West, tradução: Oeste)
P	Fósforo
Pd	Pouco dissecado
P _{disp}	Fósforo disponível
pH	Potencial hidrogeniônico
R ²	Coeficiente de determinação
RGB	Abreviação para: <i>red</i> , <i>green</i> e <i>blue</i>
RMSE	Raiz do erro quadrático médio
S	(South, tradução: Sul)
SB	Soma de Bases
SM	Suscetibilidade magnética
SPM	Sensor próximo móvel
Teste t de Student pareado	Teste de hipótese que usa conceitos estatísticos para rejeitar ou não uma hipótese nula.

TFSA	Terra fina seca ao ar
<i>update</i>	Atualizar, modernizar
V	Value, tradução: valor
Valor-p	Nível descritivo ou probabilidade de significância
Vis	Região espectral do visível (400 - 700 nm)

C)**Unidades de medidas**

μm	Micrômetro
b.u.	Base úmida
g	Gramma
g kg^{-1}	Quantidade de gramas por quilograma
ha	Hectares
Kg	quilograma
m	Metro
m^3kg^{-1}	Metro cúbico por quilograma
mm	Milímetro
$\text{mmol}_c\text{dm}^{-3}$	Millimol de carga por decímetro cúbico
mol l^{-1}	Mol por litro
nm	Nanômetro
rpm	Rotações por minuto

D)**Software**

ArcView	Software de informação geográfica
GS ⁺	Software de análise geoestatística e de mapeamento
Minitab®	Software voltado para fins estatísticos
Munsell Conversion	Software para converter variáveis da cor
Office Excel	Software para editar planilhas e gerar gráficos
Paint	Software para edição de Imagens
Surfer®	Software para a visualização de 3D de contorno e modelagem de superfícies

LISTA DE TABELAS

	Página
CAPÍTULO 1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS.....	1
Tabela 1. Propriedade dos minerais na pigmentação, suas fórmulas, tamanho e cores do solo. Fonte: Adaptado de (LYNN; PEARSON, 2000).....	12
Tabela 2. Aplicação do uso da cor em pesquisas sobre solos.....	14
Tabela 3. Índices bibliométricos com o tema cor do solo, analisados em três plataformas de dados.....	16
CAPÍTULO 2 - DADOS ESPECTRAIS DO SOLO COM CULTIVO DE CAFÉ POR MEIO DE SENSORES PRÓXIMOS.....	35
Tabela 1. Valores médios, erro da média, DP, CV (%), Mín, e Máx. das variáveis da cor do solo na profundidade de 0,00 - 0,20 m, em 51 amostras de um Argissolo no Planalto Ocidental Paulista.....	48
Tabela 2. Resultados das regressões lineares: equação geral da reta, R ² , valor-p e RMSE, observados em variáveis da cor de um Argissolo no Planalto Ocidental Paulista.....	50
Tabela 3. Modelos ajustados, equação geral da reta, R ² e valor-p, observados em variáveis da cor de um Argissolo no Planalto Ocidental Paulista.....	55
CAPÍTULO 3 - DADOS ESPECTRAIS DOS SOLOS DO PLANALTO OCIDENTAL PAULISTA POR SENSORES PRÓXIMOS.....	63
Tabela 1. Parâmetros estatísticos das variáveis da cor do solo, na profundidade de 0,00 - 0,20 m, no Planalto Ocidental Paulista.....	72

LISTA DE FIGURAS

	Página
CAPÍTULO 1 - CONSIDERAÇÕES GERAIS	1
Figura 1. Diagrama da disposição dos componentes do sistema de cores Munsell: matiz, valor e croma (adaptado de RUS, 2007).....	5
Figura 2. Notação de cor através da Carta de cores de Munsell (exemplo padrão 2,5 YR 5/6).....	6
Figura 3. Princípio do funcionamento do olho humano na obtenção da cor (a). Princípio de funcionamento de uma câmera digital na obtenção da cor (b).....	10
Figura 4. Porcentagem de fomentos no Estado de São Paulo, segundo o relatório da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP). Tópico: cor do solo. Número total de fomentos: 52. Mapa do refinamento por municípios (a); Porcentagem do refinamento por cidades (b).....	17
Figura 5. Porcentagem de fomentos no Estado de São Paulo, segundo o relatório da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP). Tópico: cor do solo. Número total de fomentos: 52. Porcentagem do refinamento por área do conhecimento (a); Porcentagem do refinamento por instituições de pesquisa (b)....	18
Figura 6. Teses e dissertações registradas na Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes). Tópico: cor do solo. Número total de trabalhos: 30. Gráfico do refinamento por número de trabalhos em ano de publicação (a); Porcentagem do refinamento das principais instituições de pesquisa (b).....	19
Figura 7. Porcentagem de teses e dissertações registradas na Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes). Tópico: Cor do solo. Número total de trabalhos: 30. Porcentagem do refinamento em grandes áreas do conhecimento.....	20
Figura 8. Distribuição de artigos registrados na plataforma Scopus® com afiliação brasileira. Tópico: “soil color”. Número total de trabalhos: 46. Gráfico do refinamento por número de publicações ao ano (a); Gráfico do refinamento em porcentagem nas grandes áreas do conhecimento (b).....	21
Figura 9. Distribuição de artigos registrados na plataforma Scopus® com afiliação brasileira. Tópico: “soil color”. Número total de trabalhos: 46.....	22
CAPÍTULO 2 - DADOS ESPECTRAIS DO SOLO COM CULTIVO DE CAFÉ POR MEIO DE SENSORES PRÓXIMOS	35
Figura 1. Ilustração do local estudado. Localização da área (a); Sobreposição dos mapas conforme as variáveis da cor (Matiz, valor e croma) (b); Malha amostral e unidade amostral (c).....	40

Figura 2. Diagrama do princípio de funcionamento do SPM (a); Obtenção dos atributos da cor (red, green e blue) utilizando o Software Paint (b); Faixa espectral do visível (c); Obtenção dos atributos da cor (matiz, valor e croma) através do Software Munsell Conversion (d).....43

Figura 3. Imagens das amostras de solo, obtidas pelo método da ERD e SPM e suas regiões de interesse (RDI), com os resultados RGB.....44

Figura 4. Diagrama do princípio de funcionamento da ERD, utilizando um sensor Lambda 950 UV/VIS/NIR, extraído de Carmo (2014).....44

Figura 5. Dispersões e ajustes de regressões medidos pelos métodos do SPM e ERD em variáveis da cor de um Argissolo no Planalto Ocidental Paulista.....49

Figura 6. Histograma de frequência de distribuição dos dados obtidos através do método do SPM e ERD em variáveis da cor de um Argissolo no Planalto Ocidental Paulista.....51

Figura 7. Funções de distribuição de probabilidade acumulativa normal dos dados obtidos através do método do SPM e ERD em variáveis da cor de um Argissolo do Planalto Ocidental Paulista.....52

Figura 8. Atributos físico-químicos do solo em relação ao red, green e blue obtidos pelo método do SPM em um Argissolo no Planalto Ocidental Paulista.....54

Figura 9. Atributos produtivos e qualitativos do café em relação ao red, green e blue obtidos pelo método do SPM em um Argissolo no Planalto Ocidental Paulista.....56

CAPÍTULO 3 - DADOS ESPECTRAIS DOS SOLOS DO PLANALTO OCIDENTAL PAULISTA POR SENSORES PRÓXIMOS.....63

Figura 1. Mapa do Brasil, mapa do Estado de São Paulo e planejamento amostral (Planalto Ocidental Paulista) para locais com conhecimento prévio dos agentes causadores de variabilidade (a); Esquema simplificado do grau de dissecação da paisagem, adaptado de Silva (2016) e projeto CNPQ (Proc.nº 402796/2016-0) (b). Mapa geológico na escala semidetalhada 1:200.000, adaptado de Fernandes, Castro e Basilici (2007) (c); Mapa pedológico do Estado de São Paulo. Informações Técnicas: Instituto Agrônomo de Campinas, v.52, 2000. Disponível em:< <http://www.iac.sp.gov.br/publicacoes/agronomico/pdf/mapa.pdf> >. Acessado em: 31 ago. 2015 (d).....66

Figura 2. Média e DP da distribuição das variáveis da cor do solo, na profundidade de 0,00-0,20 m, formados a partir de diferentes materiais de origem (arenito e basalto) no Planalto Ocidental Paulista. Cor do sistema Munsell: matiz, valor e croma (a, b, c). Cor do sistema RGB: red, green e blue (d, e, f).....74

Figura 3. Parâmetros dos modelos de semivariogramas ajustados para as variáveis da cor (matiz, valor e croma); e mapas de distribuição no Planalto Ocidental Paulista, obtidos pelo método da espectroscopia de reflectância difusa - ERD. Esf.: modelo esférico; Exp.: modelo exponencial; Co: efeito pepita; Co + C1: patamar; a: alcance; $C0/(C0+C1)$: grau de dependência espacial; R2: coeficiente de determinação.....76

Figura 4. Parâmetros dos modelos de semivariogramas ajustados para as variáveis da cor do solo (matiz, valor e croma); e mapas de distribuição no Planalto Ocidental Paulista, obtidos pelo método do sensor próximo móvel - SPM. Exp.: modelo exponencial; Co: efeito pepita; Co + C1: patamar; a: alcance; $C0/(C0+C1)$: grau de dependência espacial; R2: coeficiente de determinação.....77

Figura 5. Parâmetros dos modelos de semivariogramas ajustados para as variáveis da cor do solo (red, green e blue); e mapas de distribuição no Planalto Ocidental Paulista, obtidos pelo método de espectroscopia de reflectância difusa - ERD. Esf.: modelo esférico; Exp.: modelo exponencial; Co: efeito pepita; Co + C1: patamar; a: alcance; $C0/(C0+C1)$: grau de dependência espacial; R2: coeficiente de determinação.....80

Figura 6. Parâmetros dos modelos de semivariogramas ajustados para as variáveis da cor do solo (red, green e blue); e mapas de distribuição no Planalto Ocidental Paulista, obtidos pelo método do sensor próximo móvel - SPM. Esf.: modelo esférico; Exp.: modelo exponencial; Gauss.: modelo gaussiano; Co: efeito pepita; Co + C1: patamar; a: alcance; $C0/(C0+C1)$: grau de dependência espacial; R2: coeficiente de determinação.....81

Figura 7. Parâmetros dos modelos de semivariogramas cruzados ajustados para os pares das variáveis da cor e atributos do solo; e mapas de distribuição no Planalto Ocidental Paulista, obtidos pelo método do sensor próximo móvel - SPM. Exp.: modelo exponencial; Gauss.: modelo gaussiano; Co: efeito pepita; Co + C1: patamar; a: alcance; $C0/(C0+C1)$: grau de dependência espacial; R2: coeficiente de determinação.....87

Figura 8. Parâmetros dos modelos de semivariogramas cruzados ajustados para os pares das variáveis da cor e atributos do solo; e mapas de distribuição no Planalto Ocidental Paulista, obtidos pelo método da espectroscopia de reflectância difusa - ERD. Exp.: modelo exponencial; Gauss.: modelo gaussiano; Co: efeito pepita; Co + C1: patamar; a: alcance; $C0/(C0+C1)$: grau de dependência espacial; R2: coeficiente de determinação.....88

Figura 9. Mapas de distribuição dos atributos da cor (Matiz, Valor e Croma) dentro do Planalto Ocidental Paulista (a); Triângulo da cor relacionado à produtividade do café (b); Zoneamento agroclimático para a cultura do café no Estado de São Paulo (c); Área de concentração dos municípios produtores de café no Estado de São Paulo.....90

LISTA DE APÊNDICES**Página**

- Apêndice I.** Valores dos atributos mineralógicos, cor (matiz, valor, croma e IAV) e cor visual do solo obtido pelos métodos espectrais.....105
- Apêndice II.** Mapa da intensidade de formas do terreno pela assinatura geomorfométrica (escala ultradetalhada <1:5.000). Adaptado de Silva (2016) e projeto CNPQ (Proc.nº 402796/2016-0). Fonte: referências no capítulo 3, p.98. ..106
- Apêndice III.** Modelo de semivariograma experimental (CARMO, 2014) Fonte: referência capítulo 1, p.25107

CAPÍTULO 1 - Considerações gerais

1.1 Introdução

O agronegócio é um dos pilares da economia brasileira, proporcionando ao País liderança mundial em diversos produtos agropecuários. Este crescimento econômico influenciou substancialmente o uso dos recursos naturais, sobretudo no biossistema solo. No entanto, nos últimos anos, houve uma crescente conscientização por práticas sustentáveis, essenciais na busca de procedimentos de gestão e conhecimento prévio no uso da terra. Com isso, entender os atributos do solo e sua variação no ambiente tornou-se fundamental na implantação de métodos sustentáveis.

O desenvolvimento do princípio social, econômico e natural alcançou espaço nas ciências agrárias. Porém, é indispensável o conhecimento detalhado dos atributos do solo. Além disso, a caracterização da variabilidade espacial dos atributos do solo de maneira rápida e precisa contribui na tomada de decisão (DELLEN et al., 2011) e no planejamento de práticas sustentáveis. Estas informações são utilizadas no desenvolvimento de indicadores para a gestão do solo (BHATTI; MULLA; FRAZIER, 1991; ROCKSTRÖM et al., 2009), desenvolvendo ferramentas que promovam a produção sustentável (SIQUEIRA; MARQUES JR.; PEREIRA, 2010a; PELUCO et al., 2015).

Os mapas em escala adequada, em nível detalhado (1:20000), são capazes de expor a variabilidade espacial de atributos, propondo modelos de uso do solo. Esses modelos permitem fornecer informações simples e dinâmicas (SIQUEIRA et al., 2015). Porém, o mapeamento dos atributos do solo em escala apropriada ainda é escasso, no que se refere ao manejo do cultivo (MENDONÇA-SANTOS; SANTOS, 2006). Uma das implicações está diretamente relacionada ao alto custo das unidades de mapeamento dos atributos do solo (BEN-DOR et al., 2008). Além disso, a quantificação dos atributos do solo pelos métodos tradicionais demanda tempo, reagentes (soluções químicas) em quantidades elevadas, o que gera acúmulo de resíduos no ambiente. Estes fatores são considerados indesejáveis no mapeamento sustentável dos atributos do solo em grandes áreas (SIQUEIRA et al., 2016). Com isso, despertou a necessidade de criar métodos indiretos que quantifiquem de forma rápida e de baixo custo os atributos do solo (SIQUEIRA et al., 2010b).

Entre os atributos do solo usados na identificação e quantificação por métodos indiretos, a cor destaca-se como uma alternativa promissora, já que ela expressa os processos de formação (RESENDE, 1976; VISCARRA-ROSSEL et al., 2010) e reflete as propriedades físicas, químicas e mineralógicas do solo (FERNANDEZ; SCHULZE, 1992; SCHAETZL; ANDERSON, 2005). Em virtude disso, a cor ocupa o segundo nível categórico na diferenciação de solos brasileiros (EMBRAPA, 2013), sendo fundamental em outros sistemas de classificação do solo, como a “Food and Agriculture Organization of the United Nations” (FAO) e “Soil Taxonomy” (SOIL SURVEY STAFF, 1999).

No Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), a cor é determinada pela comparação visual com os padrões da Carta de cores de Munsell, o que permite distinguir as classes de solos (EMBRAPA, 2013). Todavia, por ser este sistema obtido pela percepção visual de um observador, o uso da Carta de cores de Munsell tornou-se pouco detalhada em comparação aos equipamentos próximos, visto que possui sensibilidade espectral maior que o olho humano (400 – 700 nm). Isso porque a percepção é dependente da luz incidente sobre o solo, da sensibilidade do observador e da energia refletida pelo solo (MELVILLE; ATKINSON, 1985). Assim, quantificar a cor tornou-se um problema crítico quando se utiliza a Carta de cores de Munsell. Dessa forma, nos estudos atuais, foi necessário avaliar a cor do solo por meio de instrumentos, tais como: colorímetros, espectrorradiômetros, espectroscopia de reflectância difusa e, recentemente, a câmera digital (VISCARRA-ROSSEL; FOUAD; WALTER, 2008; MARQUES JR. et al., 2014; CARMO et al., 2016). Estes equipamentos também são dependentes da luz; porém, em condições controladas, detêm maior precisão.

A cor tem grande potencial para o mapeamento e quantificação indireta dos atributos do solo (MARQUES JR. et al., 2014; RESENDE et al., 2014; PELUCO et al., 2015; CARMO et al., 2016). O primeiro experimento que utilizou a cor teve como propósito determinar as características de várias classes de solo (STONER et al., 1979). Recentemente, estudos como o de Carmo et al. (2016) afirmaram que a cor do solo pode ser usada na identificação de áreas com diferentes potenciais produtivo e qualitativo do cafeeiro. Outros estudos, como o de Fernandes et al. (2017), no cerrado goiano, estimaram os teores de óxidos de ferro (hematita e goethita) e caracterizaram a cor por dados espectrais, de modo semelhante às investigações de Bahia, Marques JR. e Siqueira (2015). A cor do solo também foi

utilizada para mapear o fósforo adsorvido por meio do índice de avermelhamento do solo (PELUCO et al., 2015). Em seu estudo, Aquino et al. (2016) caracterizaram os óxidos de ferro da fração argila usando a cor, em uma área com terra preta arqueológica, no sul do Amazonas. Por sua vez, Viscarra-Rossel, Fouad e Walter (2008) utilizaram a cor para quantificar o teor de carbono orgânico e ferro do solo. No Estado do Maranhão, usou-se a cor para avaliar o coeficiente de erodibilidade (DANTAS et al., 2014). Estes resultados decorreram-se pelo fato de a cor ser um produto da variação dos minerais (BARRÓN; MELLO; TORRENT, 2000), despertando ao solo uma coloração própria. Diante disso, é notória a necessidade de pesquisas que propõem novas tecnologias na identificação da relação da cor com os atributos do solo e as características da planta.

Sabendo-se que a cor é um indicador de processos e de propriedades do solo, este atributo poderá mapear as alterações físico-químicas presentes no ambiente, definindo zonas de manejo para as culturas agrícolas. De acordo com o supracitado, o estudo foi desenvolvido com o propósito de avaliar: I) O potencial dos métodos ERD e SPM na obtenção da cor; II) Uso da cor para caracterizar a variabilidade de atributos do solo e da planta, e III) Propor um protocolo de mapeamento sustentável para o Planalto Ocidental Paulista, utilizando a cor.

1.2 Revisão de Literatura

1.2.1 Dados espectrais e a Carta de cores de Munsell

A luz visível é entendida como a faixa de frequência do espectro luminoso captada pelo olho humano. Tal definição foi obtida a partir do conhecimento científico e filosófico de Christiaan Huygens (1629-1695) e Isaac Newton (1642-1727). Primeiramente, o físico holandês Christiaan Huygens defendeu a teoria ondulatória da luz, e, logo em seguida, o inglês Isaac Newton ilustrou a teoria da colorimetria, compreendendo que a luz era formada por partículas. Nessa teoria, Isaac Newton defendia que a luz branca (luz solar), ao incidir sobre um prisma de cristal, decompunha-se em uma mistura de sete cores diferentes (violeta, índigo, vermelho, laranja, amarelo, verde e azul), criando um espectro de cores em diversos comprimentos de onda (OHTA; ROBERTSON, 2006). A partir desse conhecimento especulativo, estabeleceu-se que a luz branca seria a descoberta da faixa de

frequência do espectro visível (400 a 700 nanômetros), produzindo diferentes percepções de cores visíveis ao olho humano (PETTER, 2003).

A energia espectral refletida por um determinado objeto é simulada em um diagrama denominado de curvas espectrais. Cada objeto reflete um comprimento de onda eletromagnética, provocado pela excitação dos elétrons, propondo estudos para a compreensão destes fenômenos. O exemplo disso é o solo, que é um corpo natural, constituído por mistura de partículas minerais e orgânicas, com capacidade de absorver e refletir luz incidente (BARRÓN; TORRENT, 1986). Essa característica intrínseca do solo permite fornecer informações sobre mineralogia, gênese, classificação e propriedades do solo (STONER et al., 1979; FERNANDES et al., 2004; McBRATNEY; MINASNY; VISCARRA-ROSSEL, 2006; KNADEL et al., 2012). A aplicação de estudo utilizando dados espectrais na capacidade preditiva de atributos do solo tem sido adotada para fins de manejo (CAMARGO et al., 2015; PELUCO et al., 2015; CARMO et al., 2016), buscando atender às demandas de uso sustentável do solo. Recentemente, tem crescido o emprego do uso de dados espectrais na ciência do solo, na quantificação dos minerais do solo, sobretudo dos óxidos de ferro e da matéria orgânica, pois são substâncias cromófilas, isto é, que conferem cor ao solo (BARRÓN; MELLO; TORRENT, 2000; VISCARRA-ROSSEL et al., 2010; BAHIA; MARQUES JR.; SIQUEIRA, 2015).

As informações espectrais do solo poderão ser captadas pelo olho humano, como também por sensores. Rotineiramente, o uso da Carta de cores de Munsell tornou-se uma realidade para descrever a cor do solo (MUNSELL SOIL COLOR COMPANY, 1975). Esta Carta, "Munsell Soil Color Charts", é um livro que contém uma série de modelos de cores, encontradas nos solos. No ano de 1949, foi adotada no "American Soil Survey Program", passando a ser indicada pela "International Society of Soil Science" (ISSS), no ano de 1960 (SIMONSON, 1993). Porém, foi utilizada oficialmente como método de classificação dos solos pelo Departamento de Agricultura dos Estados Unidos (USDA), em 1951. No Brasil, o SiBCS passou a utilizar a cor Munsell como um atributo diagnóstico, característico de determinadas classes de solo em seu nível categórico (EMBRAPA, 2013).

A Carta de cores de Munsell está fundamentada na teoria da percepção visual, em que é o olho humano que distingue as diferentes pigmentações presentes no solo. Esta variação da cor ocorre através das diversas combinações de matizes, associadas com o valor e com o croma, ou em inglês: "hue, value e chroma". Estas

variáveis da cor encontram-se dispostas tridimensionalmente no sistema de cores Munsell, observado na Figura 1.

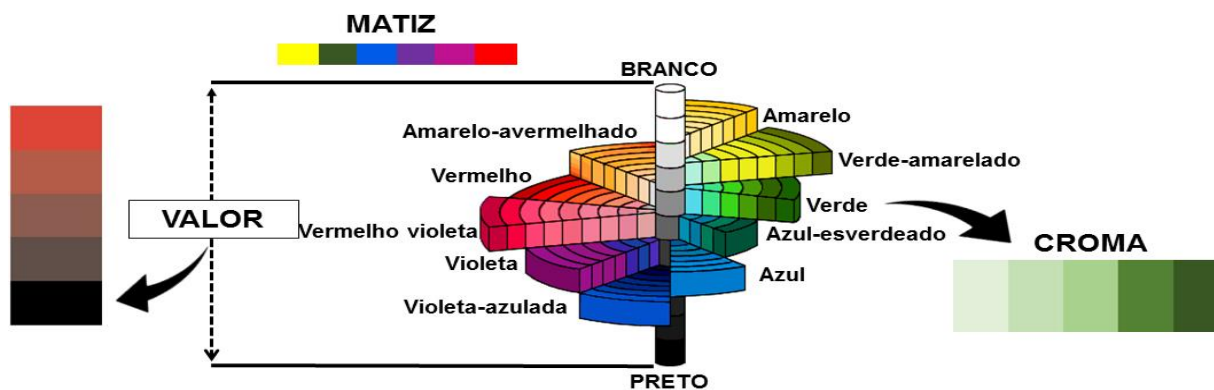


Figura 1. Diagrama da disposição dos componentes do sistema de cores Munsell: matiz, valor e croma (adaptado de RUS, 2007).

O matiz refere-se ao comprimento de onda da luz, ou seja, a cor dominante do espectro visível. Esta variável da cor é dividida em cinco cores primárias: vermelha (red-R), amarela (yellow-Y); verde (green-G), azul (blue-B) e roxa (purple-P). Estas cores dividem-se em mais cinco intermediárias: yellow-red (YR); green-yellow (GY); blue-green (BG); purple-blue (PB); e red-purple (RP). Nos solos, ocorre predomínio dos matizes vermelho (R), amarelo (Y) e vermelho-amarelo (YR) que, segundo Fernandes et al. (2004), ocorre em maior ou menor intensidade devido aos componentes mineralógicos presentes no solo.

Na Carta de cores de Munsell, existe uma escala numérica que especifica as variações do comprimento de onda, por exemplo, em uma variação da cor vermelha para a cor amarela na seguinte ordem: 10R; 2,5YR; 7,5YR; 10YR; 2,5Y. Assim, observa-se que o matiz possui uma variação de 10 unidades na escala numérica, tendo como exemplo o vermelho: 5R (100% de vermelho e 0% de amarelo) a 5Y amarelo (0% de vermelho e 100% de amarelo). Na Carta de cores de Munsell, cada página corresponde a um matiz (Figura 2), contudo são nomeados 14 matizes em acréscimos de 2,5 unidades, sendo: 5R, 7,5R, 10R, 2,5YR, 5YR, 7,5YR, 10YR, 2,5Y, 5Y, 10Y, 5GY, Gley 1, Gley 2 e White. As nomenclaturas Gley 1 e Gley 2 são solos de coloração acinzentada (CLELAND, 1921; SOIL SURVEY STAFF, 1999; SANTOS et al., 2005; SCHAETZL; ANDERSON, 2005). Mediante a cor expressa pelo solo, através do matiz, é possível deduzir o funcionamento do solo, ou seja, deduções de fertilidade, drenagem, etc.

O valor é o brilho ou tonalidade, ou seja, a proporção das cores branca e preta. O valor demonstra a intensidade da luz refletida ou o brilho que, na escala acromática, varia do preto absoluto (valor 0) até o branco absoluto (valor 10). Na Carta de cores de Munsell, o valor está organizado verticalmente, na ordem crescente do final para o topo da página (Figura 2).

O croma é a pureza da cor em relação ao cinza, indicando o nível de saturação da cor. A variação do croma ocorre de zero (0), isto é, cores neutras, como o branco, até as cores cinza e preta, em que a variação ocorrerá até oito (8), proporcionando cores mais vivas. Na Carta de cores de Munsell, a variável croma está posicionada horizontalmente na página (Figura 2). Contudo, o croma está em ordem crescente da esquerda da página para a direita (CLELAND, 1921; SOIL SURVEY STAFF, 1999; SANTOS et al., 2005; SCHAETZL; ANDERSON, 2005).

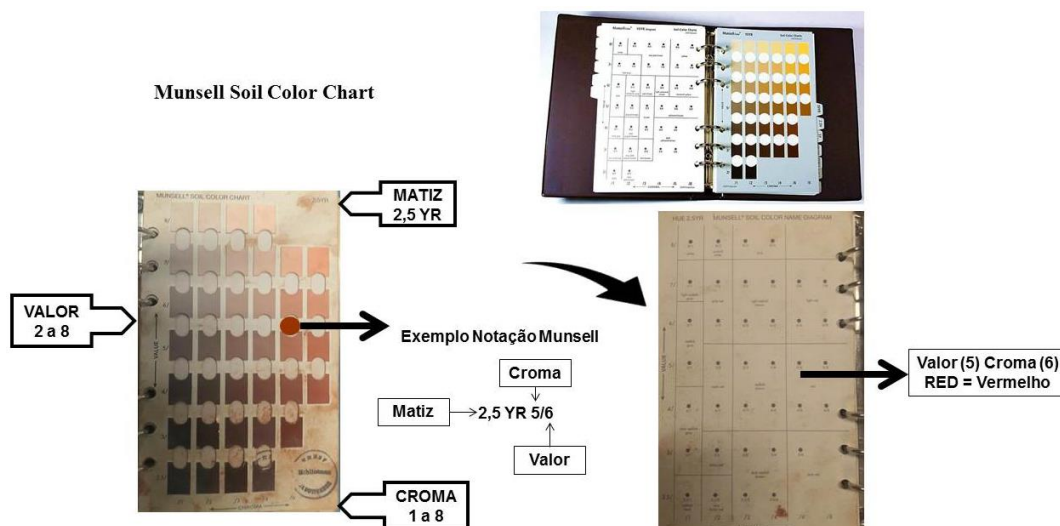


Figura 2. Notação de cor através da Carta de cores de Munsell (exemplo padrão 2,5 YR 5/6).

Cada página da Carta de cores de Munsell corresponde a um padrão de cor, utilizado na caracterização do solo. No campo, a comparação é visual, sendo efetuada tanto em amostras secas como em úmidas. A amostra de solo a ser analisada é posicionada sob a abertura referente ao padrão de cor da Carta de cores de Munsell. Neste padrão, a cor mais semelhante à amostra dispõe de uma notação correspondente à cor Munsell, seguindo a ordem da variável matiz, valor/croma. A título de exemplo, em uma amostra de solo que tenha matiz 2,5 YR (5,6 Red), valor 5 e croma 6, a notação Munsell seguirá o seguinte padrão: 2,5 YR 5/6 (Figura 2). Na página anterior aos padrões de cores, encontra-se o nome

correspondente a cada cor, em inglês. Neste exemplo (2,5 YR 5/6), a nomenclatura da cor citada pela Carta de cores de Munsell (MUNSELL SOIL COLOR COMPANY, 2000) será Red, correlato em português à cor vermelha (SANTOS et al., 2005). Assim, essas variáveis da cor (matiz, valor e croma) obtidos através do sistema de cores Munsell, a partir daí, são utilizadas por pesquisadores para discriminar os solos mundialmente (SIMONSON, 1993).

A Carta de cores de Munsell é um método convencional mundialmente utilizado, sendo dependente de fatores não controlados (BARRÓN; MELLO; TORRENT, 2000). Estes fatores resultam na subjetividade do uso da Carta de cores de Munsell, que, por sua vez, é dependente da luz que incide sobre a amostra de solo, e da percepção visual dos pesquisadores na interpretação da cor (MELVILLE; ATKINSON, 1985). Essa variação da radiância refletida é também atribuída às partículas minerais e orgânicas do solo que interagem com a luz incidente, absorvendo e dispersando esta luz (BARRÓN; TORRENT, 1986; FORMAGGIO et al., 1996; ASKARI; O'ROURKE; HOLDEN, 2015; DEMATTÊ et al., 2015). Dentre estes, fatores como as condições ambientais, teor de umidade presente no solo e outros fatores não controlados causam subjetividade na amostra, comprometendo a classificação dos solos (POST et al., 1993).

Os erros de determinação da cor de uma amostra de solo interferem nos resultados (TORRENT; BARRÓN, 1993), o que justifica a demanda por instrumentos mais precisos e objetivos (CAMPOS; DEMATTÊ, 2004). Diante dessa deficiência, tem-se a necessidade por métodos alternativos que analisa a cor, com maior precisão, rapidez e baixo custo. Alguns equipamentos que determinam, rigorosamente, as variáveis da cor já foram apresentados pela comunidade científica, como os colorímetros, espectrofotômetros e espectrorradiômetros. São sensores que quantificam a cor, propondo uma classificação direta e eliminando a subjetividade do método tradicional (Carta de cores de Munsell). Estes sensores permitem analisar as variáveis da cor, estabelecendo parâmetros de análise através da reflectância espectral do solo (TORRENT et al., 1983; BARRÓN; TORRENT, 1986), eliminando o erro humano e quantificando a cor de maneira exata (STIGLITZ et al., 2016).

Os sensores são utilizados na obtenção de informações quantitativas da cor, através das faixas espectrais do solo. São equipamentos como sensores remotos (multiespectral e hiperespectral) e próximos (radiômetro e espectro-radiômetro) que

forneem os resultados espectrais. Estas ferramentas estimam a cor de forma quantitativa, não destrutiva, rápida e eficiente, o que permite sua aplicação em estudos com grandes quantidades de amostra (JANIK; MERRY; SKJEMSTAD, 1998; MALLEY; MARTIN; BEN-DOR, 2004; NANNI; DEMATTÊ, 2006; VISCARRA-ROSSEL et al., 2006; CAÑASVERAS SÁNCHEZ et al., 2012; CASTALDI et al., 2016; GORE; CHAUDHARI; GAWALI, 2016; GUPTA et al., 2016). Uma vez que, a cor deduz informações intrínsecas sobre o solo, o uso da espectroscopia de reflectância difusa (ERD) para obter dados quantitativos tornou-se uma ferramenta importante no conhecimento sobre o solo.

O princípio da ERD está fundamentado na Lei de Beer-Lambert. Nesta lei, quando uma radiação eletromagnética incide sobre uma amostra, os vários comprimentos de onda são absorvidos pela amostra e, então, é refletida de maneira difusa. Assim, quando a luz incide em uma amostra de solo, parte desta luz é parcialmente refletida e transmitida, criando uma curva de reflectância dentro do intervalo de comprimento de onda, que varia entre 400 e 700 nm (espectro visível). Essas interações são dependentes das características físicas e químicas da amostra e do ângulo de incidência da luz (radiação eletromagnética) (VISCARRA-ROSSEL et al., 2006).

O método da ERD vem sendo utilizado na geração de informações do solo, permitindo identificar minerais presentes neste (VISCARRA-ROSSEL et al., 2006; SILVERSTEIN; FRANCIS; KIEMLE, 2007; CAÑASVERAS SÁNCHEZ et al., 2012). Outros estudos estimaram os teores de argila, areia, silte, carbono orgânico, teores de óxidos de ferro, como hematita (Hm) e goethita (Gt), na faixa do visível (Vis - 400 a 750 nm), infravermelho próximo (NIR - 750 a 2.500 nm) e infravermelho médio (MIR - 2.500 a 25.000 nm) (SKOOG; HOLLER; NIEMAN, 2006; VISCARRA-ROSSEL et al., 2006; BEN-DOR et al., 2008). Outros autores utilizaram a ERD na determinação de atributos do solo, mineralógicos, físicos, e químicos (BROWN et al., 2006; VISCARRA-ROSSEL et al., 2006; BEN-DOR; HELLER; CHUDNOVSKY, 2008; BEN-DOR et al., 2008; DU; LINKER; SHAVIV, 2008; MARQUES JR. et al., 2014; VASQUES et al., 2014). A ERD também permitiu estimar o fósforo (P) como parâmetro de fertilidade do solo (BOGREKCI; LEE, 2005). Outros autores propuseram o uso da ERD no desenvolvimento de modelos de predição de carbono orgânico (MOUAZEN et al., 2007), determinação de carbono total, potencial hidrogeniônico (pH), P disponível e umidade do solo, como também da matéria

orgânica (DEMATTÊ et al., 2011). Estes estudos indicam a banda do visível (350 a 750 nm) como a mais utilizada na determinação das propriedades do solo, pois a cor (matiz, valor e croma) é determinada nessa faixa (TORRENT; BARRÓN, 2008; VISCARRA-ROSSEL et al., 2010).

A obtenção precisa da cor do solo fez com que diversos pesquisadores voltassem suas pesquisas a aplicações agrícolas. O estudo realizado por Peluco (2016) propôs utilizar parâmetros da cor (matiz, valor, croma e índice de avermelhamento) (IAV) por meio da ERD, verificando então o potencial de sorção de herbicidas em diferentes solos. Contudo, neste estudo, a cor foi eficiente na estimativa do coeficiente de sorção do herbicida. Em que a variável croma correlacionou com 98% de precisão, seguido pelo matiz (85%) e valor (54%). Em outro estudo, Carmo et al. (2016) confirmaram a eficiência do uso da ERD na identificação de áreas com diferentes potenciais produtivos e a qualidade de café, obtendo precisão variando de 61 a 97 %. Outros importantes estudos sobre os atributos do solo, do ponto de vista agrônomo, foram a previsão do pH e a recomendação das doses de calcário (TEKIN; KUANG; MOUAZEN, 2013). Estes resultados mostram o efeito do uso da ERD como fonte de informações sobre o solo, sendo úteis no manejo localizado das culturas, nas aplicações de insumos em taxa variada e no uso sustentável do solo. Estes estudos são promissores, pois a obtenção de dados da cor é uma fonte de informação importante nas tomadas de decisões agronômicas. Entretanto, pesquisas recentes têm apontado o uso de outros equipamentos para a obtenção da cor, buscando uma aplicação direta no campo, com eficiência e rapidez.

O sensor próximo móvel (SPM) vem sendo utilizado na determinação de atributos do solo, um método semelhante ao olho humano, formando imagens a partir da radiação eletromagnética (Figura 3). Portanto, os especialistas estimam que a visão humana possa distinguir até 10 milhões de cores (WYSZECKI, 2006; MYERS, 2010). De outro modo, na câmera digital, o sistema de cores leva em conta as três cores primárias (Vermelha, Verde e Azul) ou em inglês (Red, Green e Blue). Assim, os sinais RGB estão presentes em todas as câmeras fotográficas digitais, até mesmo na câmera de celulares. Estes aparelhos capturam fotografias mostrando suas cores reais, ou seja, a combinação dos sinais RGB. Como cada cor primária recebe um valor de intensidade variando de 0 a 256 tons, cada byte (capacidade de

armazenamento) permite representar 256 tons de uma cor primária; com isso, é possível ter 16 milhões de cores (R: 256 x G: 256 x B: 256).

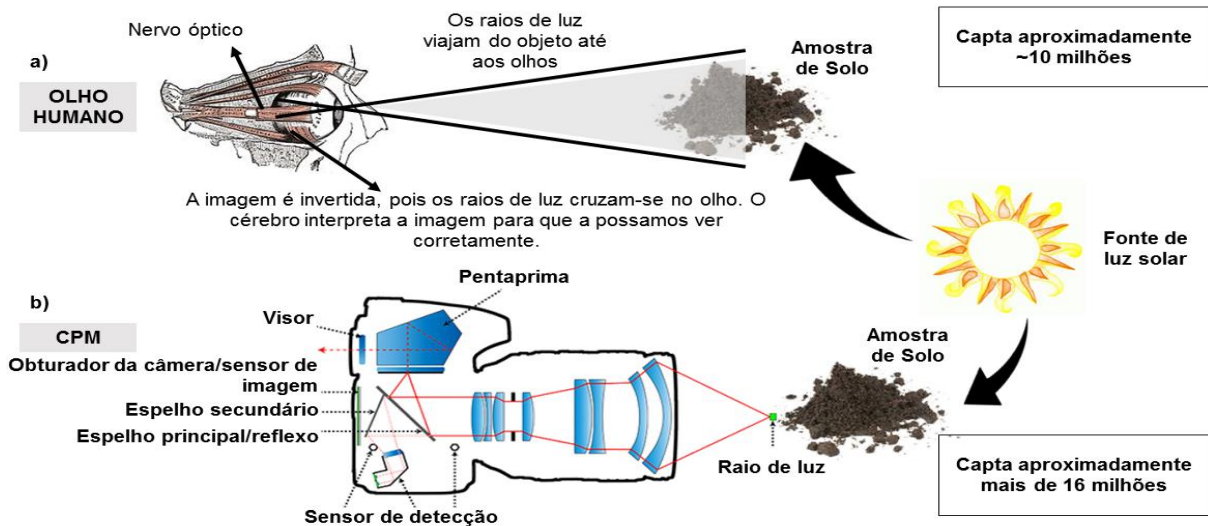


Figura 3. Princípio do funcionamento do olho humano na obtenção da cor (a). Princípio de funcionamento de uma câmera digital na obtenção da cor (b).

Poder-se-ia argumentar que uma câmera digital é capaz de vencer o olho humano. Seria uma informação contraditória, pois a busca nas ciências agrárias é efetuar leituras sobre a cor do solo de maneira precisa. Diversas pesquisas avaliaram a obtenção da cor pelo olho humano; no entanto, os resultados apontaram para um método subjetivo, apresentando divergências na classificação da cor do solo. Diante da discrepância nos resultados, que compararam o olho humano e alguns equipamentos, os dados mostraram que os sensores obtiveram precisão nos resultados (POST et al., 1993; CAMPOS; DEMATTÊ, 2004). Estas comparações indicam tendências do uso de novas tecnologias que quantifiquem rigorosamente, as variáveis da cor.

Os avanços na tecnologia são fundamentais para o futuro do agronegócio; assim, o SPM é uma inovação rápida, econômica e de fácil acesso, tornando uma alternativa que favorece a agricultura sustentável. Sua funcionalidade vai de encontro aos avanços no agronegócio, uma área crescente na busca de metodologias objetivas, práticas e rápidas. Assim, o potencial do SPM vem como uma resposta à sucessiva demanda de dados objetivos sobre a cor do solo. Por ser este dispositivo eletrônico acessível a todos, em contraste com os aparelhos mais complexos e dispendiosos, sua utilização como um sensor próximo no campo tornou-se viável. Contudo, alguns estudos já propuseram o uso do SPM como

detector de cor do solo, e este fato deve-se à sua possibilidade de obtenção de informações de cor a partir de imagens em RGB (AYDEMIR; KESKIN; DREES, 2004; VISCARRA-ROSSEL; FOUAD; WALTER, 2008; O'DONNELL et al., 2011).

As pesquisas que utilizam o SPM para captar a resposta espectral dos solos são relativamente novas e crescentes. Um destes estudos buscou utilizar a câmera digital para avaliar a precisão dos índices de cor do solo (LEVIN; BEN-DOR; SINGER, 2007). Os autores mostraram que a câmera pode ser uma alternativa fácil e rápida para medir quantitativamente a cor do solo. Gómez-Robledo et al. (2013) investigaram em laboratório o potencial do telefone móvel (smartphone) para capturar imagens de cor de solo. Como objetivo, os autores avaliaram a precisão alcançada pelo telefone móvel em relação aos espectrômetros comerciais. Outros estudos tenderam a utilizar a câmera de celular no monitoramento do crescimento de culturas, estado nutricional e cobertura do dossel (JIA et al., 2014).

Em razão do que foi supracitado, faz-se necessário o investimento em futuros trabalhos que propõem estabelecer metodologias utilizando como base o SPM na obtenção dos dados espectrais. Estas investigações deverão contribuir com o conhecimento do solo através de métodos simples, rápidos, com menor custo de mão de obra. Contudo, são necessários esforços no sentido de compatibilizar a produção eficiente com sustentabilidade ambiental.








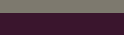



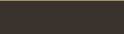





1.2.2 Covariável ambiental: dados de cor do solo

A primeira impressão que se tem ao olhar para o solo é sua cor; assim, as variações presentes em cada solo chamam a atenção. É devido a essa sensível aparência, que justificou a cor, ser o atributo principal na caracterização de um solo (SANTANA, 1984; SOIL SURVEY STAFF, 1988). Cores como o roxo, azul, verde, amarelo ou vermelho são os matizes simples descritos no sistema Munsell, utilizadas no sistema de classificação do solo (MUNSELL COLOR COMPANY, 2000). Esta notação pela Carta de cores de Munsell define comparações sobre os diversos tipos de solo, propondo investigações mais profundas para descrever suas propriedades.

A evolução e a distribuição de cores vertical e horizontal no solo fazem parte da ação remota de decomposição das rochas através do intemperismo e da natureza das partículas presentes (BARRÓN; MELLO; TORRENT, 2000; SÁNCHEZ-

MARAÑÓN et al., 2004). No solo, o elemento químico ferro (Fe) forma pequenos cristais, despertando uma coloração amarela ou vermelha. A matéria orgânica (MO) decomposta em húmus, juntamente com o manganês (Mn) formam minerais de cor escura, interferindo na coloração do solo. Na presença abundante de quartzo e escassez de óxidos de Fe e MO, a pigmentação tende a cores claras e esbranquiçadas (AZEVEDO; DALMOLIN, 2004). Portanto, a cor do solo é resultado da combinação de três principais pigmentos: óxidos de ferro e hidróxidos (vermelho a amarelo), silicato e minerais de carbonato (branco a cinza) e húmus (preto) (SÁNCHEZ-MARAÑÓN et al., 2004). Demais estudos afirmaram que minerais, como hematita, goethita, lepidocrocita, maghemita e ferridrita são óxidos de ferro imóveis, que produzem cores de amarelo a vermelho (SCHWERTMANN, 1993). A variação da pigmentação do solo pelos minerais é demonstrada na Tabela 1.

Tabela 1. Propriedade dos minerais na pigmentação, suas fórmulas, tamanho e cores do solo. Fonte: Adaptado de (LYNN; PEARSON, 2000).

Mineral	Fórmula	Tamanho	Munsell	Cor	Cor RGB
Goethita	FeOOH	1-2 mm	10YR 8/6	Amarela	
Goethita	FeOOH	~ 0,2 mm	7.5YR 5/6	Bruno-forte	
Hematita	Fe ₂ O ₃	~ 0,4 mm	5R 3/6	Vermelha	
Hematita	Fe ₂ O ₃	~ 0,1 mm	10R 4/8	Vermelha	
Lepidocrocita	Fe ³⁺ O(OH)	~0,5 mm	5YR 6/8	Amarelo-avermelhada	
Lepidocrocita	Fe ³⁺ O(OH)	~0,1 mm	2.5YR 4/6	Vermelha	
Ferridrita	Fe ₅ HO ₈ 4H ₂ O		2.5YR 3/6	Vermelho-escura	
Glauconita	K(SixAl _{4-x})(Al,Fe,Mg)O ₁₀ (OH) ₂		5Y 5/1	Cinzento-escura	
Sulfeto de Ferro	FeS		10YR 2/1	Preta	
Pirita	FeS ₂		10YR 2/1	Preta (metálica)	
Jarosita	K Fe ₃ (OH) ₆ (SO ₄) ₂		5Y 6/4	Amarelo-claro-acinzentada	
Todorokite	MnO ₄		10YR 2/1	Preta	
Húmus			10YR 2/1	Preta	
Calcita	CaCO ₃		10YR 8/2	Branca	
Dolomita	CaMg (CO ₃) ₂		10YR 8/2	Branca	
Gipsita	CaSO ₄ x 2H ₂ O		10YR 8/3	Bruno muito clara acinzentada	
Quartzo	SiO ₂		10YR 6/1	Cinzento-clara	

~ valor aproximado; mm: milímetros; YR: red-yellow (vermelho-amarelo); R: red (vermelho); Y: yellow (amarelo).

Os minerais de óxidos de Fe, como a Hm e Gt, conferem, respectivamente, cor vermelha e amarela aos solos. A Gt é um mineral presente em diversos tipos de solo, em variadas condições climáticas (DAVEY; RUSSEL; WILSON, 1975). Na presença deste mineral (Gt) com cristais parcialmente grandes, o poder pigmentante tende a proporcionar cor amarela ao solo. Se houver a influência de cristais menores

de Gt, o pigmento bruno-forte tende a predominar na coloração do solo. Nos solos hematíticos, presentes em regiões áridas e tropicais, a cor tende ao tom vermelho (WALKER; HAWKINS, 1957; DAVEY; RUSSEL; WILSON, 1975; GALVÃO; VITORELLO, 1998; BARRÓN; MELLO; TORRENT, 2000). Porém, na presença de cristais maiores de Hm, a cor torna-se um vermelho intenso, podendo ser herdado do material que deu origem ao solo. Contudo, com cristais menores de Hm, a intensidade tende a ser menor, proporcionando um vermelho pálido. Neste contexto, diversos trabalhos consideram a importância da Gt e da Hm na pigmentação dos solos brasileiros (RESENDE, 1976; BIGHAM et al., 1978; COSTA, 1979; SANTANA, 1984).

Além dos minerais, fatores relacionados ao relevo podem interferir na pigmentação e alterar a cor do solo. A topografia e a profundidade do solo atuam diretamente na drenagem, na propriedade e na formação do solo (WANG et al., 2001), tal como nos padrões de cores (DESSALEGNA et al., 2014). A drenagem tem grande impacto na cor do solo; logo, a cor poderá revelar a percepção sobre o regime hidrológico local. Os solos bem drenados tendem a ter cores mais intensas do que aqueles mal drenados (SCHOONOVER; CRIM, 2015). Isto ocorre devido à condição anaeróbica, em que o Fe (III) do solo é reduzido a Fe (II), resultando em cores azuladas ou esverdeadas (RESENDE et al., 2007), o que é evidenciado pelo hidromorfismo (BREEMEN; BUURMAN, 2002; BISPO; SILVA; TORRADO, 2011). Isto ocorre, pois o ambiente redutor dificulta a cristalização de óxidos de Fe (SCHWERTMANN, 1985), que, por sua vez, interferem na pigmentação. Outra explicação é dada a Gt, que possui um tamanho maior (~1-2 μm) quando comparado a Hm (~0,1-0,4 μm); portanto, em um solo com maior capacidade de drenagem, a Hm geralmente é drenada, alterando a cor do solo (SCHWERTMANN, 1993).

A MO exerce um papel indireto e crucial na remoção dos pigmentos de Fe em solos úmidos. Isto ocorre devido à presença de água, que afeta diretamente a taxa de decomposição da MO (VAN DEN BERG; LESPCH; SAKAI, 1987). Este processo estabelece um ambiente anaeróbico, que minimiza drasticamente a decomposição por microrganismo, predominantemente aeróbico (BREEMEN; BUURMAN, 2002). Tanto no húmus como na MO, as bactérias do solo contribuem no processo de remoção e redução do Fe ($\text{Fe}^{3+} \rightarrow \text{Fe}^{2+}$) e Mn ($\text{Mn}^{4+} \rightarrow \text{Mn}^{2+}$), alterando a cor na superfície do solo (SCHWERTMANN, 1993; LYNN; PEARSON, 2000). A consequência deste processo torna a cor do solo mais escura, a partir do momento

em que a concentração de MO aumenta (KETTERINGS; BIGHAM, 2000; BAROUCHAS; MOUSTAKAS, 2004). A alteração da cor, proveniente da MO, presume que o solo de coloração escura possa conter um aumento da fertilidade (KETTERINGS; BIGHAM, 2000). No entanto, a cor torna-se um fator importante para verificar a relação de causa e efeito entre os atributos físico-químicos do solo (VISCARRA-ROSSEL; FOUAD; WALTER, 2008) que interferem na vegetação (LYNN; PEARSON, 2000), determinando a produtividade agrícola.

Dentro deste enfoque, a evolução do conhecimento sobre a pigmentação e seus efeitos no solo avançou nas últimas décadas. Por ser uma covariação de causa e efeito da gênese do solo, a cor tornou-se uma análise prévia para explicar alterações ocorridas em atributos do solo. Neste sentido, os cientistas do solo estão utilizando a cor como ferramenta de avaliação das propriedades intrínsecas do solo (Tabela 2).

Tabela 2. Aplicação do uso da cor em pesquisas sobre solos.

Trabalho	Área de Aplicação
Levin, Ben-Dor e Singer (2007)	Medição de índices de cores e propriedades relacionadas de solos arenosos em ambientes semiáridos.
Viscarra-Rossel, Fouad e Walter (2008)	Quantificação do teor de carbono orgânico e ferro do solo.
Viscarra-Rossel e Webster (2011)	Discriminação dos horizontes e classes de solos.
Gómez-Robledo et al. (2013)	Uso do telefone móvel como sensor de cor do solo.
Dantas et al. (2014)	Cor do solo para estimar o coeficiente de erodibilidade em sulcos e entressulcos de Argissolos coesos.
Marques JR. et al. (2014)	Caracterização da variabilidade espacial das propriedades do solo.
Resende et al. (2014)	Variabilidade espacial de atributos de solos coesos.
Bahia; Marques JR. e Siqueira (2015)	Estimativa da hematita e da goethita em Latossolos.
Camargo et al. (2015)	Mapeamento de argila, óxido de ferro e fosfato adsorvido em Latossolos.
Peluco et al. (2015)	Mapeamento do fósforo adsorvido.
Siqueira et al. (2015)	Unidade de mapeamento com base na relação solo-paisagem e variabilidade espacial de suscetibilidade magnética e cor do solo.
Aquino et al. (2016)	Características da cor e óxidos de ferro da fração argila em terra preta arqueológica no sul do Amazonas.
Carmo et al. (2016)	Identificação de áreas com diferentes potenciais produtivos e qualidade de café.

Os recentes trabalhos que utilizaram a cor foram propostos para fornecer informações sobre atributos inerentes ao solo. Em grande parte, estas informações buscam detalhar variáveis mineralógicas, físicas e químicas por meio da quantificação indireta. Conforme Sousa Júnior, Demattê e Genu (2008), essas informações são importantes, uma vez que a variabilidade da produção da cultura tem relação com os atributos do solo. Porém, ainda são necessárias inovações em

métodos de simples aplicabilidade, especialmente para o uso sustentável do solo e aumento da eficiência das culturas.

1.2.3 Indicadores científicos: Cor do Solo até o ano de 2018

A bibliometria sobre o tema cor do solo é uma relevante ferramenta para se obter uma visão ampla deste assunto nas Ciências Agrárias. Os índices gerados através da bibliometria explicam os padrões de organização do conhecimento e fornecem perspectivas à comunidade científica (ARVANITIS; CHATELIN, 1994).

A análise bibliométrica do monitoramento sobre o tema cor do solo no Brasil levou em conta três plataformas de dados, sendo as informações decorrentes da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), que forneceu informações de auxílios e bolsas no Estado de São Paulo. Como também, a base do catálogo da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes), que disponibilizou os dados de teses e dissertações. Bem como, a plataforma Scopus®, com o banco de dados de artigos acadêmicos com filiações brasileiras. Estes parâmetros de medição expuseram a distribuição geográfica das cidades paulistas, grandes áreas do conhecimento, principais instituições de pesquisas, colaboração internacional e evolução anual com o tema cor do solo. Na Tabela 3, foram apresentados os dados das plataformas, sendo subdivididos em três terminologias, sendo: Agronomia, solos e cor do solo. Os resultados demonstraram o desempenho por número de trabalhos e porcentagens referentes ao tema cor do solo, disponibilizado nas plataformas.

Em todo o horizonte da pesquisa sobre agronomia, que somam 75.902 fontes de informações científicas, os estudos sobre o solo totalizaram 25.737 deste total. Um número menor é observado para cor do solo, ou seja, apenas 128 trabalhos. Dentro do universo da agronomia, estudos sobre cor do solo participam com apenas 0,17% do total. Vários são os fatores que contribuíram para este cenário, sendo a maioria explicada a partir do ano de 1980 até o início de 2000. Neste período, a ciência do solo viveu uma situação de diminuição dos investimentos e de desinteresse da sociedade, da agricultura e do governo (MERMUT; ESWARAN, 1997). Com isso, houve uma diminuição drástica no número de estudantes nas universidades interessados pelas Ciências Agrárias, sobretudo pelos solos (HARTEMINK; McBRATNEY, 2008).

Atualmente, pode-se detectar um novo momento de importância e de crescimento da ciência do solo no Brasil e também no mundo (HARTEMINK; McBRATENY, 2008). Diante dos problemas globais, a ciência do solo passa a ganhar destaque, necessitando de informações em escalas detalhadas sobre o solo. Estas informações são necessárias para a tomada de decisões, no aumento da produção de alimentos, na bioenergia, em fibras, na produção sustentável, nas mudanças climáticas, na disponibilidade de água, no uso do solo e em políticas públicas (EMBRAPA, 2014). Ainda assim, é necessário um “update” dos métodos aplicado ao solo, os quais sejam modernos e implantem conhecimento de uso sustentável da terra.

Tabela 3. Índices bibliométricos com o tema cor do solo, analisados em três plataformas de dados.

Divisão	Auxílio e Pesquisa FAPESP ¹		Teses e dissertações (Capes) ²		Artigos SCOPUS® ³	
	Número	%	Número	%	Número	%
Agronomia	30.201	100	45.078	100	623	100
Solos	8.170	27,05	17.163	38,07	404	64,85
Cor do solo	52	0,17	30	0,07	46	7,38
Outros	21.979	72,78	27.885	61,86	213	27,77

¹ Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP); ² Base do Banco de Teses e Dissertações da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes); Banco de dados de resumos e citações de artigos para jornais/revistas acadêmicos (SCOPUS®).

A ação do Governo Paulista, através da FAPESP, órgão que fomenta estudos no Estado de São Paulo, é demonstrada na Figura 4. A distribuição espacial gerada contribuiu para interpretar os resultados de programas voltados ao estudo sobre a cor do solo (Figura 4a). Os resultados mostram que o número de projetos financiados sobre cor do solo foi maior na sequência das seguintes cidades: Piracicaba; Botucatu; Ilha Solteira; Jaboticabal; Campinas; São Carlos; Pirassununga; São Paulo; Registro; Rio Claro e Limeira. Este direcionamento dos financiamentos está relacionado com a área de interesse sobre o tema cor do solo, que, neste caso, são as Ciências Agrárias, com 80,4% do fomento no estado. Este aumento deve-se também às universidades que trabalham diretamente com estudos sobre Ciências Agrárias (Figura 4b).

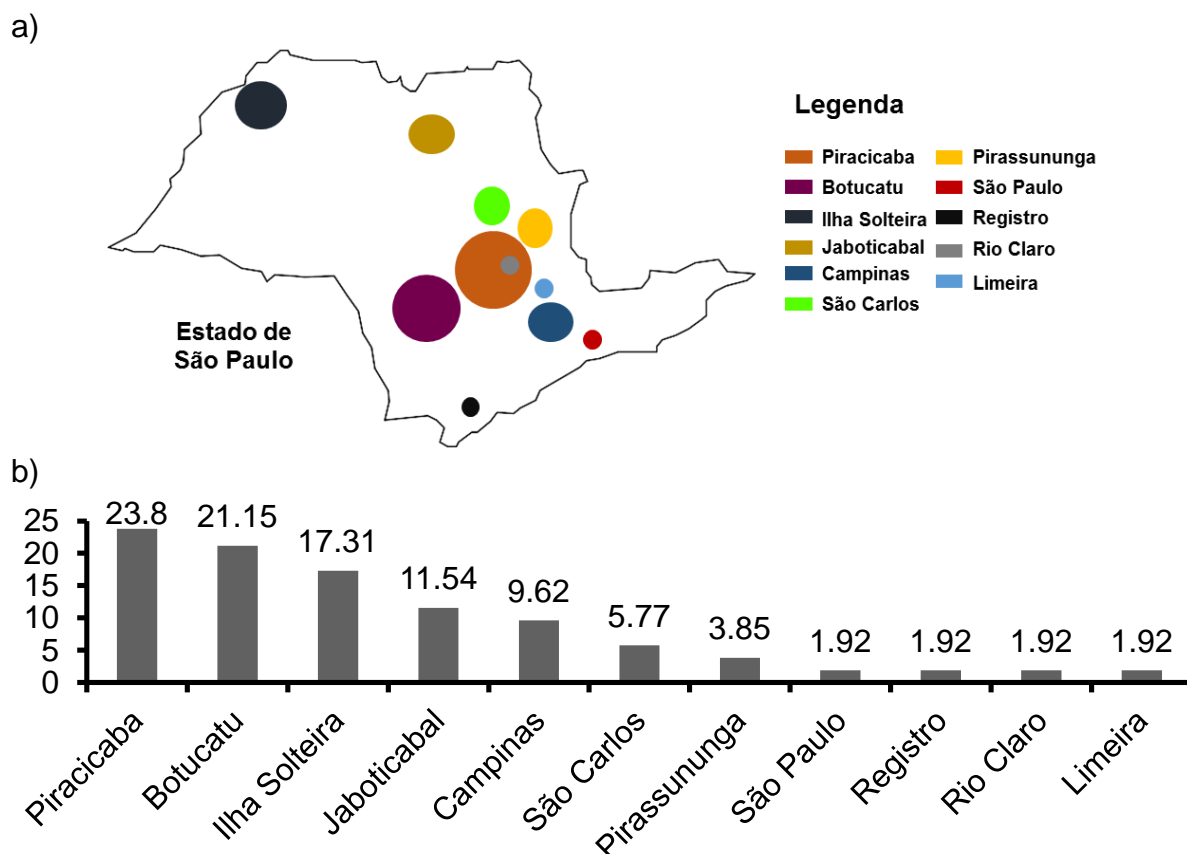


Figura 4. Porcentagem de fomentos no Estado de São Paulo, segundo o relatório da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP). Tópico: cor do solo. Número total de fomentos: 52. Mapa do refinamento por municípios (a); Porcentagem do refinamento por cidades (b).

Os estudos sobre cor do solo no Estado de São Paulo estão concentrados nas Ciências Agrárias (80,77%) que incluem estudos diretos em Agronomia, Zootecnia, Engenharia Agrícola e Recursos Florestais/Engenharia Florestal (Figura 5a). Contudo, outras áreas foram fomentadas em menor porcentagem, sendo: Ciências Biológicas (5,77%), Ciências Exatas e da Terra (5,77%), Engenharia (5,77%) e Ciências Humanas (1,92%).

Na Figura 5b, são apresentadas as instituições de pesquisas que aplicam investimentos na cor do solo. Em ordem decrescente, destacaram-se seis instituições com maior número de fomentos, de um total de 52 auxílios e bolsas, sendo: Universidade Estadual Paulista – Unesp (53,85%); Universidade de São Paulo - USP (30,77%); Universidade de Campinas - Unicamp (5,77%); Universidade Federal de São Carlos - UFSCar (3,85%); Agência Paulista de Tecnologia dos Agronegócios - APTA (1,92%) e Centro Nacional de Pesquisa em Energia e Materiais - CNPEM (1,92%). A tendência de maior fomento destinado para a UNESP

deve-se ao número de câmpus que desenvolvem pesquisas nas Ciências Agrárias, como, por exemplo: Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias (FCAV-Jaboticabal); Faculdade de Engenharia (FEIS-Ilha Solteira); Faculdade de Ciências Agrônômicas (FCA-Botucatu) e Câmpus Experimental de Registro (Registro) (Figura 4a).

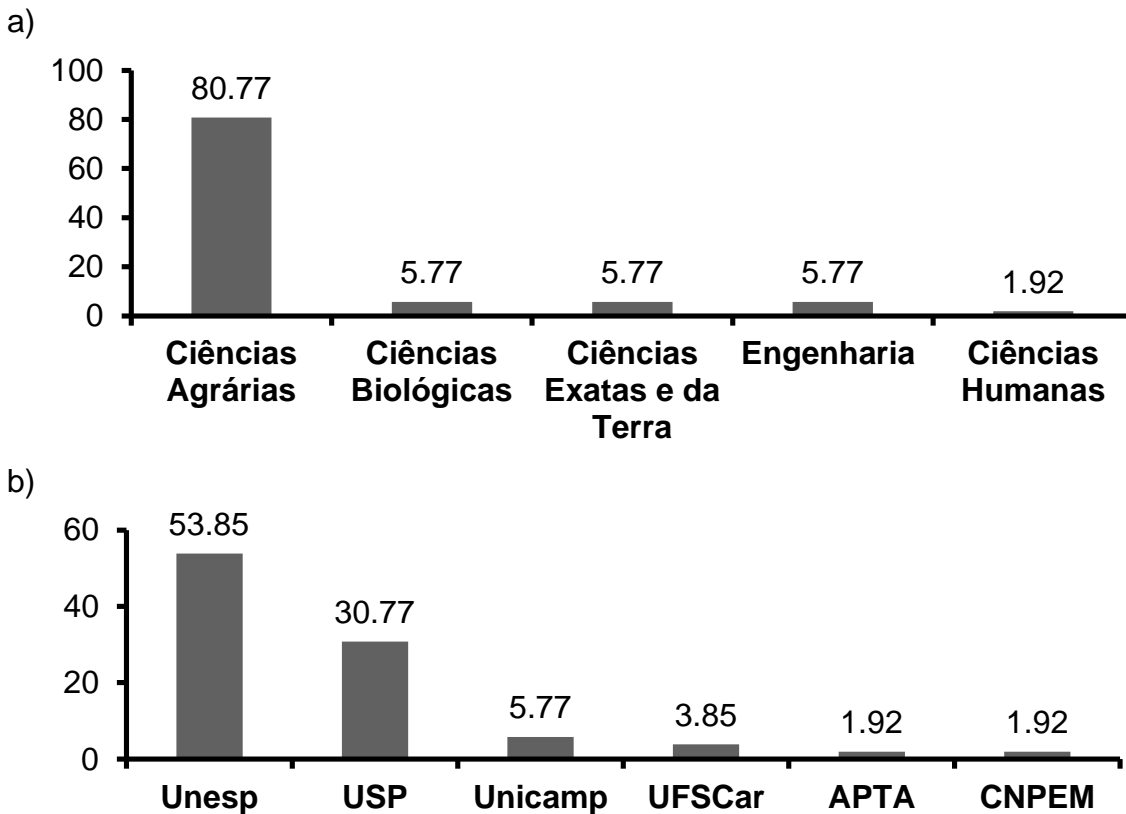


Figura 5. Porcentagem de fomentos no Estado de São Paulo, segundo o relatório da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP). Tópico: cor do solo. Número total de fomentos: 52. Porcentagem do refinamento por área do conhecimento (a); Porcentagem do refinamento por instituições de pesquisa (b).

Propondo analisar em termos temporais a pesquisa sobre cor do solo, foram utilizadas as dissertações de mestrado e teses de doutorado publicadas entre 1988 a 2016 (Figura 6a). Estes resultados foram extraídos da base do Banco de Teses e Dissertações da Capes. Usou-se como tema central a cor do solo, e, até 2016, foram trinta trabalhos apresentados sobre o assunto. Logo, as instituições de pesquisas focadas em cor do solo, em ordem decrescente, em sua maioria, concentram-se com 20% do total na Universidade Estadual Paulista - Unesp; Universidade Federal de Viçosa - UFV (10%); Universidade de São Paulo/Centro de

Energia Nuclear na Agricultura - USP/CENA (6,67%); Universidade de Brasília – UnB (6,67%) e Universidade Federal de Santa Catarina - UFSC (6,67%).

A Figura 6a indicou que, até o ano de 2012, as pesquisas obtiveram a média entre 1-2 trabalhos sobre o tema cor do solo. Novas abordagens surgiram a partir do ano de 2013, observando um aumento até 2016 em defesas realizadas. A Unesp/FCAV configura um caso específico, pois possui um maior número de pesquisadores que desenvolvem pesquisas em cor do solo.

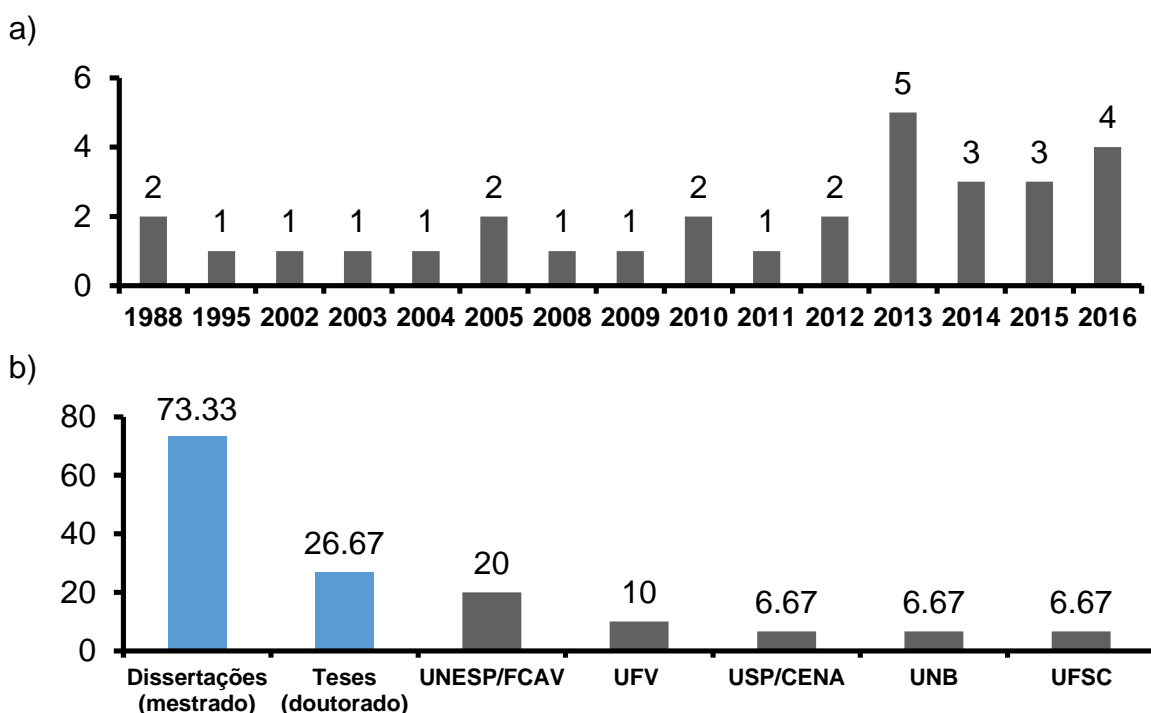


Figura 6. Teses e dissertações registradas na Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes). Tópico: cor do solo. Número total de trabalhos: 30. Gráfico do refinamento por número de trabalhos em ano de publicação (a); Porcentagem do refinamento das principais instituições de pesquisa (b).

Para teses e dissertações, as grandes áreas do conhecimento foram: Ciências Agrárias (83,33%); Ciências Exatas e da Terra (6,67%); Multidisciplinar (6,67%); e Ciências Sociais Aplicadas (3,33%). A explicação da capacidade da Unesp/FCAV, em concentrar o maior número de publicações em Ciências Agrárias, deve-se ao fato da geração no avanço de métodos científicos e tecnológicos, propostas com o tema cor do solo no manejo de áreas agrícolas (Figura 7). A título de exemplo, verificaram-se alguns estudos com o tema cor do solo, desenvolvidos nesta universidade (Unesp/FCAV). Como o de Resende (2013), que utilizou a cor na

caracterização de Argissolos coesos maranhenses; Uso da cor do solo para identificar áreas de manejo específico em cana-de-açúcar (PELUCO, 2013; PELUCO, 2016); Aplicação da cor para o planejamento amostral em Latossolos (SIQUEIRA, 2013). Como também, na caracterização de áreas específicas de manejo para a cultura do café, utilizando a cor do solo (CARMO, 2014). Estas abordagens do uso da cor do solo provam o empenho da comunidade científica da Unesp/FCAV, em fornecer informações detalhadas do solo, aplicando um método prático e eficiente em estudos de campo.

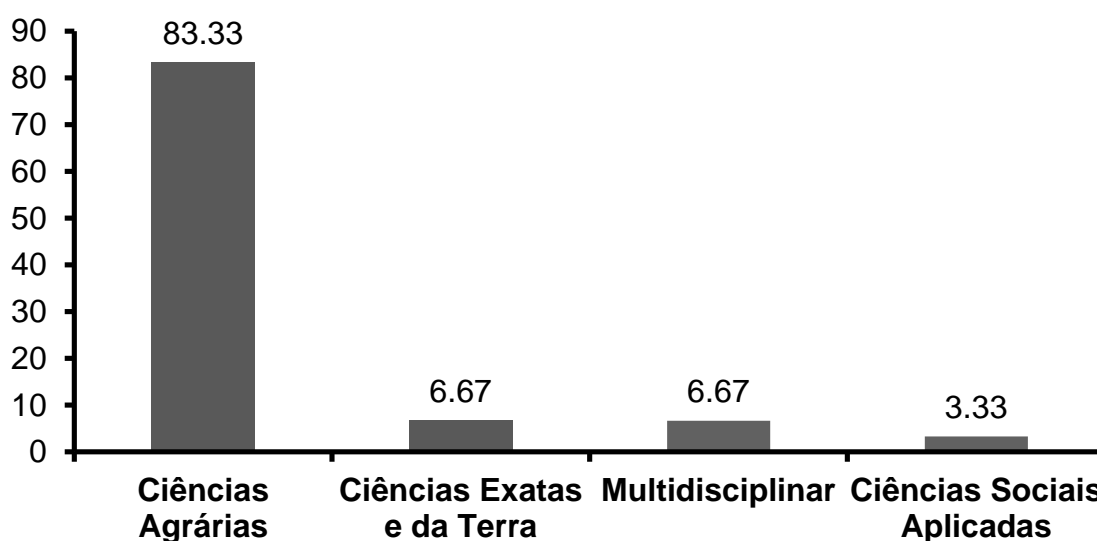


Figura 7. Porcentagem de teses e dissertações registradas na Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (Capes). Tópico: Cor do solo. Número total de trabalhos: 30. Porcentagem do refinamento em grandes áreas do conhecimento.

Para entender a dinâmica do uso da cor do solo na comunidade internacional, utilizou-se da plataforma Scopus®, cujo tema central foi “soil color”. A Figura 8a propõe analisar, em termos temporais, o progresso da pesquisa internacional, com afiliação brasileira. Um total de 46 artigos foi publicado, havendo uma variação das publicações no decorrer dos anos de 1986 a 2016, dando-se início a um novo período de aumento das publicações a partir de 2004. Mesmo assim, as publicações referentes à “soil color” somam apenas 0,20% no universo dos 23.358 artigos que estudam os solos, com afiliações brasileiras. Estes trabalhos concentraram-se em maior parte na área das Ciências Agrícolas e Biológicas (67,39%), seguindo pelas Ciências da Terra e Planetárias (28,26%); Ciência Ambiental (12,22%); Física e Astronomia (6,52%) e Química (4,35%).

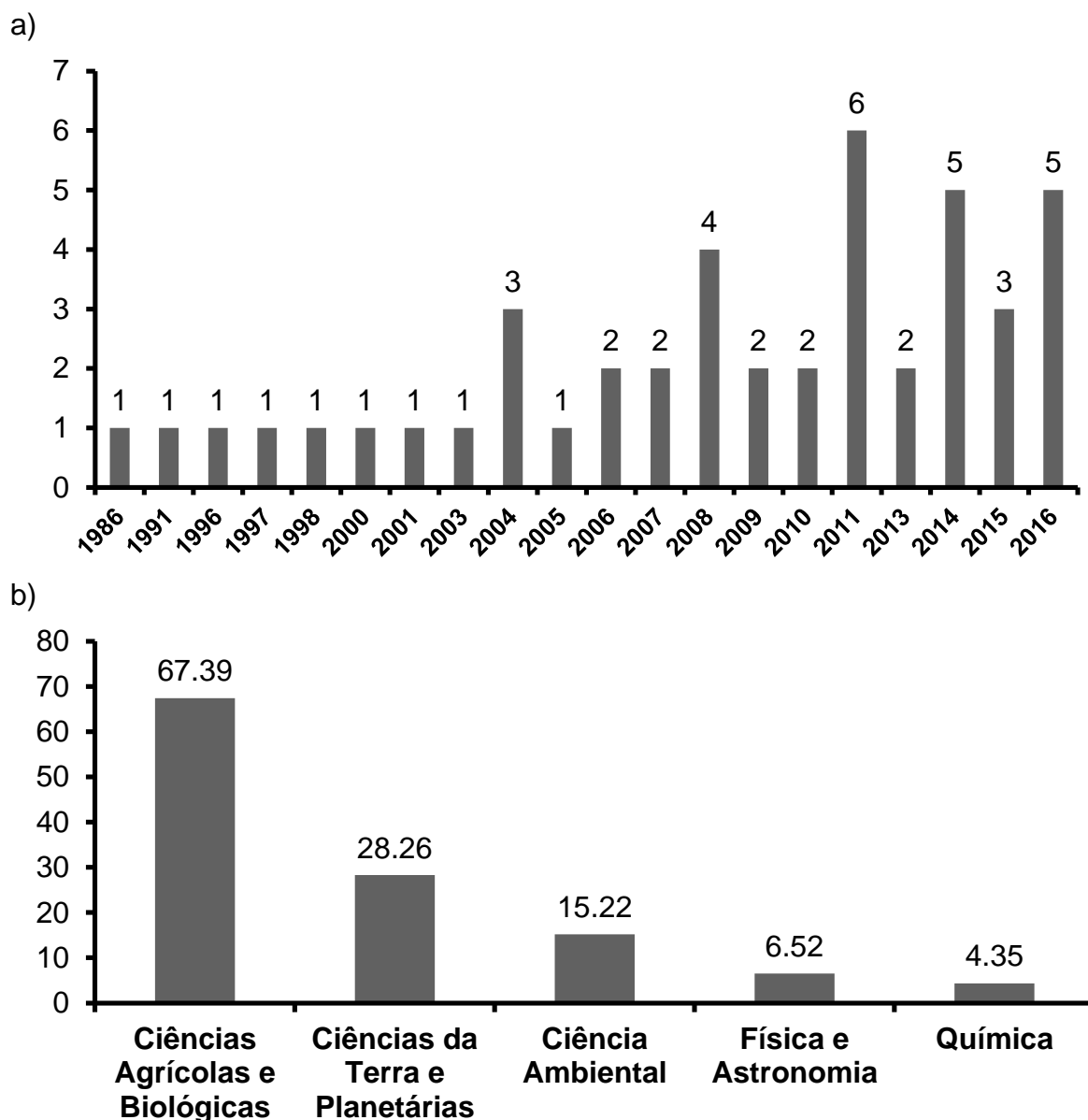


Figura 8. Distribuição de artigos registrados na plataforma Scopus® com afiliação brasileira. Tópico: “soil color”. Número total de trabalhos: 46. Gráfico do refinamento por número de publicações ao ano (a); Gráfico do refinamento em porcentagem nas grandes áreas do conhecimento (b).

Houve uma evolução da abordagem de estudo no decorrer do tempo, e os trabalhos pioneiros da década de 80 e 90 estudaram a cor para interpretar as características físico-químicas do solo (FABRIS et al., 1986; FITZPATRICK; FRITSCH; SELF, 1996; CANELLAS et al., 2000). A partir de 2004, os estudos já buscavam métodos comparativos para avaliar a objetividade da avaliação da cor (CAMPOS; DEMATTÊ, 2004). Em seguida, os estudos evoluíram, propondo o uso da cor do solo para quantificar de forma indireta atributos do solo (DEMATTÊ et al., 2011; AJAYI et al., 2011). Logo, os estudos atuais propõem aplicações que utilizam

a cor para identificar áreas com potencial de produção em culturas como o café (CARMO et al., 2016), na avaliação de atributos químicos (PELUCO et al., 2015) e no uso da cor para detalhar unidade de mapeamentos (SIQUEIRA et al., 2015).

As principais instituições de pesquisa que desenvolvem estudos com “soil color” estão apresentadas na Figura 9. Foram analisadas cinco instituições, e os estudos foram desenvolvidos em sua grande maioria pela USP (28,26%), seguida da Unesp (13,04%); UFV (13,04%); Embrapa (10,87%) e Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais - INPE (8,7%). As cinco instituições representaram, juntas, 73,91% dos artigos publicados internacionalmente (Figura 9a). Grande parte dos pesquisadores da USP e Unesp influenciaram na concentração destes resultados, visto que desenvolveram pesquisas com o tema “soil color” (Figura 9b). A análise bibliométrica na base de dados Scopus® indica um impulso de trabalhos sobre “soil color” nas instituições de pesquisa do Estado de São Paulo que, até a década de 2000, eram dominadas por outras instituições do País.

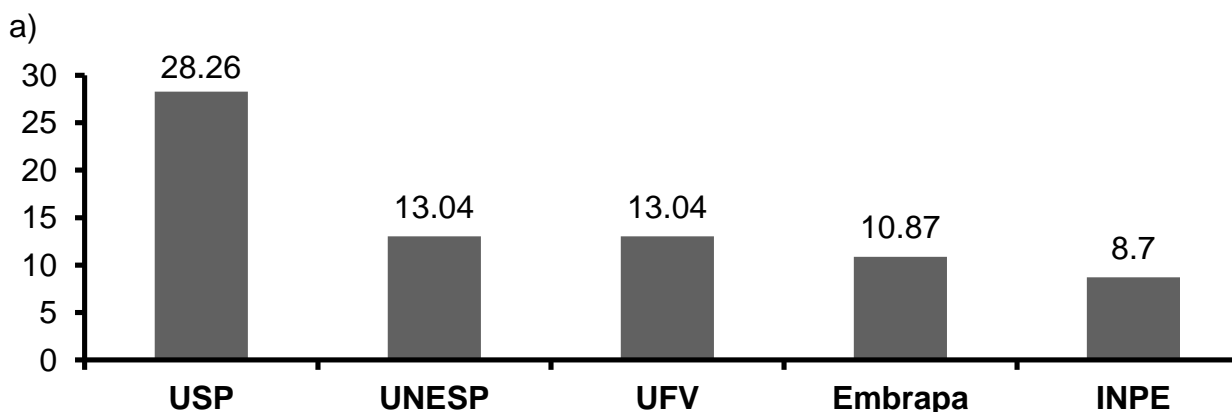


Figura 9. Distribuição de artigos registrados na plataforma Scopus® com afiliação brasileira. Tópico: “soil color”. Número total de trabalhos: 46.

A preocupação atual sobre o uso do solo representa um importante papel no atual contexto das Ciências Agrárias. Com isso, confirma a necessidade por métodos rápidos e práticos para subsidiar o planejamento da conservação do solo. Alternativas voltadas para as questões multidisciplinares contribuem para o aumento do número de publicações nesse campo da ciência. Porém, estudos que investiguem as tendências estritamente sobre o tópico cor do solo ainda são raros. Portanto, os incentivos justificam a necessidade de se debater o papel da pesquisa em cor do solo. Estas investigações refletem sobre o futuro do desenvolvimento de tecnologias sustentáveis a serem aplicadas nas Ciências Agrárias.

1.3 Referências

AJAYI, A. E.; DIAS JÚNIOR, M. S.; CURI, N.; OLUFAYO, A. A. Soil colour as a simple indicator of load bearing capacity in Brazilian Latosols. **Journal of the Indian Society of Soil Science**, v. 59, n. 1, p. 14-21, 2011.

AQUINO, R. E.; MARQUES JR., J.; CAMPOS, M. C. C.; OLIVEIRA, I. A.; BAHIA, A. S. R. S.; SANTOS, L. A. C. Characteristics of color and iron oxides of clay fraction in Archeological Dark Earth in Apuí region, southern Amazonas. **Geoderma**, Amsterdam, v. 262, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.010>.

ARVANITIS, R.; CHATELIN, Y. Bibliometrics of tropical soil sciences: Some reflections and orientations. In: McDONALD, P. (Ed). **The literature of soil science**. Ithaca: Cornell University Press, 1994. p. 73-94.

ASKARIA, S. M.; O'ROURKE, M. S.; HOLDEN, M. N. Evaluation of soil quality for agricultural production using visible-near-infrared spectroscopy. **Geoderma**, Amsterdam, v. 243-244, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.12.012>.

AYDEMIR, S.; KESKIN, S.; DREES, L.R. Quantification of soil features using digital image processing (DIP) techniques. **Geoderma**, Amsterdam, v. 119, n. 1-2, 2004. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00218-0](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00218-0).

AZEVEDO, A. C.; DALMOLIN, R. S. D. **Solos e Ambiente: uma introdução**. Santa Maria: Pallotti, 2004. 100p.

BAHIA, A. S. R. S.; MARQUES JR., J.; SIQUEIRA, D. S. Procedures using diffuse reflectance spectroscopy for estimating hematite and goethite in Oxisols of São Paulo, Brazil. **Geoderma Regional**, v. 5, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geodrs.2015.04.006>.

BAROUCHAS, P. E.; MOUSTAKAS, N. K. Soil colour and spectral analysis employing linear regression models I Effect of organic matter. **International Agrophysics**, v. 18, n. 1, p. 1-10, 2004.

BARRÓN, V.; MELLO, J. W. V.; TORRENT, J. Caracterização de óxidos de ferro em solos por espectroscopia de reflectância difusa. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.). **Tópicos de ciência do solo**. 2. ed. Viçosa: SBCS, 2000. p. 139-161.

BARRÓN, V.; TORRENT, J. Use of the Kubelka-Munk theory to study the influence of iron oxides on soil color. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v. 37, n. 4, 1986. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2389.1986.tb00382.x>.

BEN-DOR, E.; HELLER, D.; CHUDNOVSKY, A. A novel method of classifying soil profiles in the field using optical means. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 72, n. 4, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj2006.0059>.

BEN-DOR, E.; TAYLOR, R. G.; HILL, J.; DEMATTÊ, J. A. M.; WHITING, M. L.; CHABRILLAT, S.; SOMMER S. Imaging spectrometry for soil applications. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 97, 2008. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2113\(07\)00008-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0065-2113(07)00008-9).

BHATTI, A. U.; MULLA, D. J.; FRAZIER, B. E. Estimation of soil properties and wheat yields on complex eroded hills using geostatistics and thematic mapper images. **Remote Sensing Environment**, v. 37, n. 3, 1991. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90080-P](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90080-P).

BIGHAM, J. M.; GOLDEN, D. C.; BOWEN, L. H.; BUOL, S. W.; WEED, S. B. Iron oxide mineralogy of well-drained ultisols and oxisols: I. Characterization of iron oxides in soil clays by Mössbauer spectroscopy, X-ray diffractometry and selected chemical techniques. **Soil Science Society of America Journal**, v. 42, p. 816-825, 1978.

BISPO, F. H. A.; SILVA, A. C.; TORRADO, P. V. Highlands of the upper Jequitinhonha valley, Brazil: I - characterization and classification. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 4, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832011000400001>.

BOGREKCI, I.; LEE, W. S. Spectral phosphorus mapping using diffuse reflectance of soils and grass. **Biosystems Engineering**, v. 91, n. 3, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2005.04.015>.

BREEMEN, N. V.; BUURMAN, P. **Soil formation**. 2. ed. Dordrecht: Kluwer Academic, 2002. 404p.

BROWN, D. J.; SHEPHERD, K. D.; WALSH, M. G.; MAYS, M. D.; REINSCH, T. G. Global soil characterization with VNIR diffuse reflectance spectroscopy. **Geoderma**, Amsterdam, v. 132, n. 3-4, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.04.025>.

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

CAMPOS, R. C.; DEMATTÊ, J. A. M. Cor do solo: uma abordagem da forma convencional de obtenção em oposição à automatização do método para fins de classificação de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 5, 2004. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832004000500008>.

CAÑASVERAS SÁNCHEZ, J. C.; BARRÓN, V.; DEL CAMPILLO, M. C.; VISCARRA-ROSSEL, R. A. Reflectance spectroscopy: a tool for predicting soil properties related to the incidence of Fe chlorosis. **Spanish Journal of Agricultural Research**, Madrid, v. 10, n. 4, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5424/sjar/2012104-681-11>.

CANELLAS, L. P.; BERNER, P. G.; SILVA, S. D.; SILVA, M. B.; SANTOS, G. D. A. Frações da matéria orgânica em seis solos de uma topossequência no Estado do Rio de Janeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, n. 1, p. 133-143, 2000.

CARMO, D. A. B. **Cor do solo na caracterização de áreas específicas de manejo para cultura do café**. 2014. 62f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Ciência do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Jaboticabal, 2014.

CARMO, D. A. B.; MARQUES JR., J.; SIQUEIRA, D. S.; BAHIA, A. S. R.; SANTOS, H. M.; POLLO, G. Z. Cor do solo na identificação de áreas com diferentes potenciais produtivos e qualidade de café. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 9, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2016000900026>.

CASTALDI, F.; PALOMBO, A.; SANTINI, F.; PASCUCCI S.; PIGNATTI, S.; CASA, R. Evaluation of the potential of the current and forthcoming multispectral and hyperspectral imagers to estimate soil texture and organic carbon. **Remote Sensing of Environment**, v. 179, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2016.03.025>.

CLELAND, T. M. **Practical description of the Munsell color system, with suggestions for its use**, 1921. 19p.

COSTA, L. M. **Surface soil color and reflectance as related to physico-chemical and mineralogical soil properties**. 1979. 154f. Tese (Doutorado) - University of Missouri, Columbia, 1979.

DANTAS, J. S.; MARTINS FILHO, M. V.; MARQUES JR., J.; RESENDE, J. M.; TEIXEIRA, D. D. B.; BARBOSA, R. S.; SIQUEIRA, D. S. Coeficiente de erodibilidade em sulcos e entressulcos de Argissolos coesos estimado pela cor do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 49, n. 9, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2014000900006>.

DAVEY, B. G.; RUSSEL, J. D.; WILSON, M. J. Iron oxide and clay minerals and their relation to colours of red and yellow podzolic soils near. **Geoderma**, Sydney, v. 14, n. 2, 1975. Disponível em: [http://doi.org/10.1016/0016-7061\(75\)90071-3](http://doi.org/10.1016/0016-7061(75)90071-3).

DELLEN, H. VAN.; VLIET, J. VAN.; RUTLEDGE, D. T.; KIRKBY, M. J. Comparison of scale and scaling issues in integrated land-use models for policy support. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 142, n. 1-2, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.03.005>.

DEMATTÊ, J. A. M.; BORTOLETTO, M. A. M.; VASQUES, G. M.; RIZZO, R. Quantificação de matéria orgânica do solo através de modelos matemáticos utilizando colorimetria no sistema Munsell de cores. **Bragantia**, Campinas, v. 70, n. 3, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0006-87052011005000006>.

DEMATTÊ, M. A. J.; ARAÚJO, R. S.; FIORIO, R. P.; FONGARO, T. C.; NANNI, R. M. Espectroscopia VIS-NIR-SWIR na avaliação de solos ao longo de uma toposequência em Piracicaba (SP). **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 46, n. 4, 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.5935/1806-6690.20150054>.

DESSALEGNA, D.; BEYENE, S.; RAM, N.; WALLEY, F.; GALA, T. S. Effects of topography and land use on soil characteristics along the toposequence of Ele watershed in southern Ethiopia. **Catena**, v. 115, 2014. Disponível em: <http://doi.org/10.1016/j.catena.2013.11.007>.

DU, C.; LINKER, R.; SHAVIV, A. Identification of agricultural Mediterranean soils using mid-infrared photo acoustic spectroscopy. **Geoderma**, Amsterdam, v. 143, n. 1, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2007.10.012>.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - Embrapa. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2013. 353p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - Embrapa. **Visão 2014-2034: o futuro do desenvolvimento tecnológico da agricultura brasileira**. Brasília: Embrapa, 2014. 194p.

FABRIS, J. D.; RESENDE, M.; ALLAN, J.; COEY, J. M. D. Mössbauer analysis of Brazilian oxisols. **Hyperfine Interactions**, v. 29, n. 1-4, 1986. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1007/BF02399424>.

FERNANDES, K. L.; RIBON, A. P.; MARQUES JR., J.; BAHIA, A. S. R. S.; TAVARES FILHO, J. Magnetic and spectral signatures of Cerrado soils in the state of Goiás, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 52, n.10, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2017001000012>.

FERNANDES, R. B. A.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; FONTES, M. P. F. Quantificação de óxidos de ferro de Latossolos brasileiros por espectroscopia de reflectância difusa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 2, 2004. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832004000200003>.

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

FITZPATRICK, R. W.; FRITSCH, E.; SELF, P. G. Interpretation of soil features produced by ancient and modern processes in degraded landscapes: V. Development of saline sulfidic features in non-tidal seepage areas. **Geoderma**, v. 69, n. 1-2, 1996. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0016-7061\(95\)00046-1](https://doi.org/10.1016/0016-7061(95)00046-1).

FORMAGGIO, A. R.; EPIPHANIO, J. C. N.; VALERIANO, M. M.; OLIVEIRA, J. B. Comportamento espectral (450-2.450 nm) de solos tropicais de São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, p. 467-474, 1996.

GALVÃO, L. S.; VITORELLO, I. Role of organic matter in obliterating the effects of iron on spectral reflectance and colour of Brazilian tropical soils. **International Journal of Remote Sensing**, v. 9, n. 10, 1998. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/014311698215090>.

GÓMEZ-ROBLEDO, L.; LÓPEZ-RUIZ, N.; MELGOSA, M.; PALMA, A. J.; CAPITÁN-VALLVEY, L. F.; SÁNCHEZ-MARAÑÓN, M. Using the mobile phone as Munsell soil-colour sensor: An experiment under controlled illumination conditions. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 99, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2013.10.002>.

GORE, R. D.; CHAUDHARI, R. H.; GAWALI, B. W. Creation of Soil Spectral Library for Marathwada Region. **International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS**, v. 5, n. 6, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.23953/cloud.ijarsg.60>.

GUPTA, A.; DAS, B. S.; KUMAR, A.; CHAKRABORTY, P.; MOHANTY, B. Rapid and Noninvasive Assessment of Atterberg Limits Using Diffuse Reflectance Spectroscopy. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 80, n. 5, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj2015.11.0402>.

HARTEMINK, A. E.; McBRATNEY, A. B. A soil science renaissance. **Geoderma**, Amsterdam, v. 148, n. 2, 2008. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2008.10.006>.

JANIK, L. J.; MERRY, R. H.; SKJEMSTAD, J. O. Can mid infra-red diffuse reflectance analysis replace soil extractions? **Australian Journal Experimental Agriculture**, v. 38, n. 7, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1071/EA97144>.

JIA, B.; HE, H.; MA, F.; DIAO, M.; JIANG, G.; ZHENG, Z.; CUI, J.; FAN, H. Use of a Digital Camera to Monitor the Growth and Nitrogen Status of Cotton. **The Scientific World Journal**, v. 2014, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/602647>.

KETTERINGS, Q. M.; BIGHAM J. M. Soil Color as an Indicator of Slash-and-Burn Fire Severity and Soil Fertility in Sumatra, Indonesia. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 5, 2000. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2000.6451826x>.

KNADEL, M.; VISCARRA-ROSSEL, R. A.; DENG, F.; THOMSEN, A.; GREVE, M. H. Visible-near infrared spectra as a proxy for topsoil texture and glacial boundaries. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 77, n. 2, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj2012.0093>.

LEVIN, N.; BEN-DOR, E.; SINGER, A. A digital camera as tool to measure colour indices and related properties of sandy soils in semi-arid environments. **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, n. 24, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01431160500099444>.

LYNN, W. C.; PEARSON, M. J. The Color of Soil, The Science Teacher, 2000. MALLEY, D. F., MARTIN, P. D., BEN-DOR, E. Application in analysis of soils. In: ROBERTS, C.A.; WORKMAN, J.; REEVES, J.B. (Eds.). **Near-Infrared Spectroscopy in Agriculture**. Madison, WI: Soil Science Society of America, 2004. p. 729-784.

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

McBRATNEY, A. B.; MINASNY, B.; VISCARRA-ROSSEL, R. A. Spectral soil analysis and inference systems: a powerful combination for solving the soil data crisis. **Geoderma**. Amsterdam, v. 136, n. 1-2, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2006.03.051>.

MELVILLE, M. D.; ATKINSON, G. Soil color: its measurement and its designation in models of uniform color space. **Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 36, n. 4, 1985. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1985.tb00353.x>.

MENDONÇA-SANTOS, M. L.; SANTOS, H. G. Chapter 3 The State of the Art of Brazilian Soil Mapping and Prospects for Digital Soil Mapping. **Developments in Soil Science**, v. 31, 2006. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0166-2481\(06\)31003-3](https://doi.org/10.1016/S0166-2481(06)31003-3).

MERMUT, A. R.; ESWARAN, H. Opportunities for soil science in a milieu of reduced funds. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 77, 1997. Disponível em: <https://doi.org/10.4141/S96-088>.

MOUAZEN, A. M.; MALEKI, M. R.; BAERDEMAEKER, J.; RAMON, H. On-line measurement of some selected soil properties using a VIS-NIR sensor. **Soil and Tillage Research**, v. 93, n. 1, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.still.2006.03.009>.

MUNSELL SOIL COLOR COMPANY, **Munsell soil color charts, Munsell color, Macbeth Division of Kollmorgen Corporation**. Baltimore: Munsell Color, 1950, revised 1975. 34p.

MUNSELL SOIL COLOR COMPANY. **Munsell color soil charts**. Baltimore, 2000.

MYERS, D. G. **Psychology**. 9. ed. Madison: Worth Publishers, 2010. 910p.

NANNI, M. R.; DEMATTÊ, J. A. M. Spectral Reflectance methodology in comparison to traditional soil analysis. **Soil Science Society of America Journal Abstract - Pedology**, v. 70, n. 2, 2006. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.2136/sssaj2003.0285>.

O'DONNELL, T. K.; GOYNE, K. W.; MILES, R. J.; BAFFAUT, C.; ANDERSON, S. H.; SUDDUTH, K. A. Determination of representative elementary areas for soil redoximorphic features identified by digital image processing. **Geoderma**, Amsterdam, v. 161, n. 3-4, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.12.011>.

OHTA, N.; ROBERTSON, A. **Colorimetry: fundamentals and applications**. England: John Wiley & Sons, 2006. 354 p.

PELUCO, R. G. **Magnetismo e cor na identificação de solos com diferentes potenciais de sorção de imazaquim**. 2016. 92f. Tese (Doutorado em Agronomia/Ciência do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Jaboticabal, 2016.

PELUCO, R. G. **Técnicas indiretas na identificação de áreas de manejo específico para cana-de-açúcar**. 2013. 78 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Produção Vegetal) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Jaboticabal, 2013.

PELUCO, R. G.; MARQUES JR., J.; SIQUEIRA, D. S.; PEREIRA, G. T.; BARBOSA, R. S.; TEIXEIRA, D. B. Mapeamento do fósforo adsorvido por meio da cor e da suscetibilidade magnética do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 3, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2015000300010>.

PETTER C. O. **Princípios de Colorimetria**. Porto Alegre: PPGEM/UFRGS, 2003. (Apostila).

POST, D. F.; BRYANT, R. B.; BATCHILY, A. K.; HUETE, A. R.; LEVINE, S. J.; MAYS, M. D.; ESCADAFAL, R. Correlations between field and laboratory measurements of soil color. In: SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA (Madison, Estados Unidos). **Soil color**. Madison, 1993. p. 35-49. (SSSA Special Publication, 31).

RESENDE, J. M. A. **Caracterização pedométrica da fertilidade e cor de Argissolos coesos do leste maranhense**. 2013. 83f. Tese (Doutorado em Agronomia/Ciência do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Jaboticabal, 2013.

RESENDE, J. M. A.; MARQUES JR., J.; MARTINS FILHO, M. V.; DANTAS, J. S.; SIQUEIRA, D. S.; TEIXEIRA, D. D. B. Variabilidade espacial de atributos de solos coesos do leste maranhense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 4, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832014000400004>.

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

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. **Pedologia**: base para distinção de ambientes. 5. ed. Lavras: UFLA, 2007. 322p.

ROCKSTRÖM, J. A. Safe operating space for humanity. **Nature**, v. 461, 2009. Disponível em: <http://hdl.handle.net/11449/42025>.

RUS, J. Diagram representing the three dimensions of the Munsell color system. 2007. In: BLEYS, J. (Ed). **Language strategies for the domain of colour**. Berlin: Language Science Press, 2015. p. 198-199.

SÁNCHEZ-MARAÑÓN, M.; SORIANO, M.; MELGOSA, M.; DELGADO, G.; DELGADO, R. Quantifying the effects of aggregation, particle size and components on the colour of Mediterranean soils. **European journal of soil science**, v. 55, n. 3, 2004. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2389.2004.00624.x>.

SANTANA, D. P. **Soil formation in a topossequence of oxisols from Patos de Minas region, Minas Gerais State, Brazil**. 1984. 129f. Tese (Doutorado) - Purdue University, West Lafayette, 1984.

SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C.; SHIMIZU, S. H. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. Viçosa. SBCS/EMBRAPA/CNPS, 2005. 100p.

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

SCHOONOVER, J. E.; CRIM, J. F. An introduction to soil concepts and the role of soils in watershed management. **Journal of Contemporary Water Research & Education**, v. 154, n. 1, 2015. Disponível em: <http://doi.org/10.1111/j.1936-704X.2015.03186.x>.

SCHWERTMANN, U. Occurrence and formation of iron oxides in various pedoenvironments. In: STUCKI, J. W.; GOODMAN, B. A.; SCHWERTMANN, U. (Ed.). **Iron in soils and clay minerals: NATO advanced Study Institute on iron in soils and clay minerals**. Dordrecht: Reidel, 1985. p. 267-308.

SCHWERTMANN, U. Relations between iron oxides, soil color, and soil formation. In: BIGHAM, J. M.; CIOLKOSZ, E. J. (Ed.). **Soil Color**. Madison: SSSA, 1993. p. 57-66. (Special Publication, 31).

SILVERSTEIN, R. M.; FRANCIS, X. R.; KIEMLE, D. J. W. **Identificação espectrométrica de compostos orgânicos**. 7. ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007. 530 p.

SIMONSON, R. W. Soil color standards and terms for field use - history of their development. In: BIGHAM, J. M.; CIOLKOSZ, E. J. (Ed.). **Soil Color**. Madison: Soil Science Society of America, 1993. p. 1-20. (Special Publication, 31).

SIQUEIRA, D. S. **Mapeamento de atributos e planejamento amostral para Latossolos utilizando suscetibilidade magnética, cor e relação solo-paisagem**. 2013. 109f. Tese (Doutorado em Agronomia/Produção Vegetal) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Jaboticabal, 2013.

SIQUEIRA, D. S.; MARQUES JR., J.; PEREIRA, G. T. The use of landforms to predict the variability of soil and orange attributes. **Geoderma**, Amsterdam, v. 155, n. 1-2, 2010 a. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2009.11.024>.

SIQUEIRA, D. S.; MARQUES JR., J.; MATIAS, S. S. R.; BARRÓN, V.; TORRENT, J.; BAFFA, O.; OLIVEIRA, L. C. Correlation of properties of Brazilian Haplustalfs with magnetic susceptibility measurements. **Soil, Use and Management**, Oxford, v. 26, n. 4, 2010 b. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1475-2743.2010.00294.x>.

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

SIQUEIRA, D. S.; MARQUES JR., J.; TEIXEIRA, D. B.; MATIAS, S. S. R.; CAMARGO, L. A.; PEREIRA, G. T. Magnetic susceptibility for characterizing areas with different potentials for sugarcane production. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 9, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2016000900034>.

SKOOG, D. A.; HOLLER, F. J.; NIEMAN, T. A. **Princípios de análise Instrumental**. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2006. 836p.

SOIL SURVEY STAFF. **Soil survey manual**. Washington: USDA, 1988. 442p. (USDA. Handbook, 18).

SOIL SURVEY STAFF. **Soil taxonomy**: A basic system of soil classification of making and interpreting soil surveys. 2. ed. Washington/USDA-Natural Resources Conservation Service: Soil Taxonomy, 1999. 886p. (Agriculture Handbook, 436).

SOUSA JÚNIOR, J. A.; DEMATTÊ, J. A. M.; GENU, A. M. Comportamento espectral dos solos na paisagem a partir de dados coletados por sensores terrestre e orbital. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 2, 2008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000200027>.

STIGLITZ, R.; MIKHAILOVA, E.; POST, C.; SCHLAUTMAN, M.; SHARP, J. Evaluation of an inexpensive sensor to measure soil color. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 121, 2016. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2015.11.014>.

STONER, E. R.; BAUMGARDNER, F. M.; BIEHL, L. L.; ROBINSON, B. F. **Atlas of soil reflectance properties**. West Lafayette: Purdue University, 1979. 88p.

TEKIN, Y.; KUANG, B.; MOUAZEN, A. M. Potential of on-line visible and near infrared spectroscopy for measurement of pH for deriving variable rate lime recommendations. **Sensors**, Basel, v. 13, n. 8, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.3390/s130810177>.

TORRENT, J.; BARRÓN, V. Diffuse reflectance spectroscopy. In: ULERY, A.L.; DREES, L.R. (Eds.). **Methods of Soil Analysis. Part 5. Mineralogical Methods**. Madison: Soil Science Society of America, 2008. p. 367-385. (SSSA Book Series, 5).

TORRENT, J.; BARRÓN, V. Laboratory measurement of soil color: Theory and practice. Soil color. **Soil Science Society of America**, p. 21-33, 1993. (SSSA, Special Publication, 31).

TORRENT, J.; SCHWERTMANN, U.; FECHTER, H.; ALFEREZ, F. Quantitative relationships between soil color and hematite content. **Soil Science**, Baltimore, v. 136, p. 354-358, 1983.

VAN DEN BERG, M.; LESPCH, I. F.; SAKAI, E. Solos de planícies aluviais do Vale do Ribeira do Iguapé-SP. II. Relações entre características físicas e químicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 11, p. 315-321, 1987.

VASQUES, G. M.; DEMATTÊ, J. A. M.; VISCARRA-ROSSEL, R. A.; RAMÍREZ-LÓPEZ, L.; TERRA, F.S. Soil classification using visible/near-infrared diffuse reflectance spectra from multiple depths. **Geoderma**, Amsterdam, v. 223-225, 2014. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2014.01.019>.

VISCARRA-ROSSEL, R. A.; BUI, E. N.; CARITAT, P.; MCKENZIE, N. J. Mapping iron oxides and the color of Australian soil using visible–near-infrared reflectance spectra. **Journal of Geophysical Research**, v. 115, n. f4, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2009JF001645>.

VISCARRA-ROSSEL, R. A.; FOUAD, Y.; WALTER, C. Using a digital camera to measure soil organic carbon and iron contents. **Biosystems Engineering**, v. 100, n. 2, 2008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.02.007>.

VISCARRA-ROSSEL, R. A.; WALVOORT, D. J. J.; McBRATNEY, A. B.; JANIK, L. J.; SKJEMSTAD, J. O. Visible, near infrared, mid infrared or combined diffuse reflectance spectroscopy for simultaneous assessment of various soil properties. **Geoderma**, Amsterdam, v. 131, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.03.007>.

VISCARRA-ROSSEL, R. A.; WEBSTER, R. Discrimination of Australian soil horizons and classes from their visible-near infrared spectra. **European Journal of Soil Science**, v. 62, n. 4, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2389.2011.01356.x>.

WALKER, P. H.; HAWKINS, C. A. A study of river terraces and soil development on the Nepean River. **Journal and Proceedings of the Royal Society of New South Wales**, v. 91, p. 67-84, 1957.

WANG, J.; FU, B.; QIU, Y.; CHEN, L. Soil nutrients in relation to land use and landscape position in semi-arid small catchment of the loess plateau in China. **Journal of Arid Environments**, v. 48, n. 4, 2001. Disponível em: <https://doi.org/10.1006/jare.2000.0763>.

WYSZECKI, G. **Color**. Chicago: World Book, 2006. 824p.

CAPÍTULO 2 – Dados espectrais do solo com cultivo de café por meio de sensores próximos

RESUMO – A gestão do solo é um desafio para melhorar a produtividade e a lucratividade do agronegócio. Esta pesquisa investiga métodos para facilitar o mapeamento sustentável do solo. Através dos dados espectrais, obtidos por sensores próximos, propôs-se o mapeamento dos atributos do solo. Posteriormente, identificou-se o fator de causa e efeito sobre os atributos qualitativos e produtivos da planta. Utilizou-se de um conjunto de dados de um grid com 51 amostras de solo, em 39 hectares sob cultivo de café (Catuaí Amarelo, linhagem IAC 62). A obtenção dos componentes da cor: matiz, valor, croma, red, green e blue foi determinada por espectroscopia de reflectância difusa (ERD) e sensor próximo móvel (SPM). Os métodos foram comparados entre si mediante gráficos de dispersões, histogramas de frequências e funções de distribuição de probabilidade acumulativa normal. Posteriormente, realizou-se a análise de regressão entre os dados espectrais com os atributos do solo e também com a qualidade e a produtividade do café. Os maiores coeficientes de determinação observados nos atributos do solo foram: red_{SPM} e argila: ($R^2 = 0,70$, $p < 0,01$), green_{SPM} e CTC ($R^2 = 0,73$, $p < 0,01$), red_{SPM} e P ($R^2 = 0,64$, $p < 0,05$), blue_{SPM} e EC ($R^2 = 0,96$, $p < 0,01$) e, green_{SPM} e Fe ($R^2 = 0,75$, $p < 0,01$). Para os atributos da planta, foram: green_{SPM} e P₁₇ ($R^2 = 0,70$, $p < 0,01$), defeitos com regressões variando de 0,71 - 0,84, e red_{SPM} e produtividade ($R^2 = 0,95$, $p < 0,01$). O uso da cor determinada pelo red, green e blue do sensor próximo móvel permitiu identificar atributos do solo e áreas com diferentes potenciais produtivos e qualitativos do café.

Palavras-chave: Câmera digital, Índice de cor, Pedometria, Produtividade, Sustentabilidade agrícola

2.1 Introdução

Nos solos tropicais, a cor é um atributo covariativo dos fatores de formação do solo. Essa propriedade reflete importantes processos internos, como a composição de cores de minerais de ferro (Fe), conteúdo de matéria orgânica (MO), e teor de água (BEDIDI et al., 1992; FERNANDEZ; SCHULZE, 1992; DALMOLIN et al., 2005). A cor tornou-se um importante atributo, sendo utilizada no segundo nível categórico para caracterizar e classificar os solos. Usualmente, é utilizada no Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (SiBCS), porém sua determinação faz-se de forma qualitativa, por meio da Carta de cores de Munsell (MUNSELL SOIL COLOR COMPANY, 2000). Por não quantificar a cor, esta Carta tornou-se pouco utilizada em estudos do solo; logo, métodos que quantifiquem a cor tornaram-se importantes neste contexto de estudo.

Para obter informações precisas, as pesquisas das últimas décadas, principalmente em relação às Ciências Agrárias, têm sugerido que as tomadas de decisão sejam baseadas em indicadores, visando a menores impactos nos biosistemas, sejam eles água, solo e ar (BAHIA; MARQUES JR.; SIQUEIRA, 2015; CAMARGO et al., 2016; CARMO et al., 2016). Em relação ao biosistema solo, são de suma importância a utilização e a pesquisa por métodos inovadores. Essas inovações deverão identificar e mapear áreas com diferentes potenciais de uso e ocupação do solo em regiões tropicais e temperadas. As informações sobre os dados espectrais do solo contribuem na geração do conhecimento, tal como na elaboração de um banco de dados para uso em aplicações de agricultura de precisão.

A análise convencional que determina a cor através da Carta de cores de Munsell foi um avanço para o conhecimento atual. A adoção de novos métodos de obtenção da cor propõe corrigir as limitações de uso desta Carta. Neste contexto, algumas pesquisas relataram três principais fatores que afetam as características da cor, sendo: condições de iluminação; características físicas e químicas da amostra, e sensibilidade do observador (BERNS, 2000). Há resultados apontando para problemas de acurácia na identificação da cor do solo, em determinados experimentos, usando a Carta de cores de Munsell (SÁNCHEZ-MARAÑÓN; HUERTAS; MELGOSA, 2005; SÁNCHEZ-MARAÑÓN et al., 2011). Diante disso, alternativas mais robustas mediante sensores próximos espectrais vêm sendo

estudadas para determinar a cor do solo (TORRENT; BARRON, 1993; VISCARRA-ROSSEL; WEBSTER, 2011). Esses sensores de solo podem ser utilizados diretamente no campo, melhorando a eficácia dos resultados das variáveis da cor.

O uso dos sensores próximos integrou diversos estudos, como na determinação de zonas de manejo para produtividade e qualidade do cafeeiro (CARMO et al., 2016), definição de áreas de manejo em cultivo de cana-de-açúcar (MARQUES JR. et al., 2014), bem como no cultivo da soja (RESENDE et al., 2014), e até mesmo na identificação de zonas com potenciais de adsorção de fósforo (CAMARGO et al., 2015; PELUCO et al., 2015). Diante do exposto, a íntima relação dos resultados estabelece o sensor próximo como um método ágil, que permite a realização de um volume maior de amostras, com menor custo e menos mão de obra.

Outros autores também utilizaram os dados espectrais para determinar atributos do solo. Bahia et al. (2015) relacionaram os dados espectrais com a mineralogia dos óxidos Fe do solo. Sob outra perspectiva, alguns autores usaram os dados espectrais para verificar a adsorção de fósforo (CAMARGO et al., 2015), bem como a erodibilidade em solos do Maranhão (DANTAS et al., 2014). Muitos destes trabalhos têm-se concentrado em obter os dados espectrais no comprimento de onda que varia de 380 a 2.500 nm (nanômetro). Os aparelhos que medem esta variação de onda (380 a 2.500 nm) são dispendiosos e inapropriados para serem manuseados no campo, tornando-os indispensáveis para muitos pesquisadores, profissionais e empresários rurais. As recentes pesquisas buscam soluções viáveis e práticas para atender à demanda deste público que necessita de informações do biosistema solo. No entanto, foi necessário propor outros métodos de obtenção espectral, que sejam eficientes, de baixo custo e que utilizem uma pequena faixa de frequência da luz.

A câmera digital do celular, que é um sensor próximo móvel, pode ter vantagens sobre a obtenção de dados da cor, pois trata-se de um método rápido, econômico, consistente e objetivo. Este equipamento já foi proposto como detector da cor do solo em diversos estudos (VISCARRA-ROSSEL; FOUAD; WALTER, 2008; O'DONNELL et al., 2011). Isto foi possível devido à possibilidade de obtenção de informações em imagens digitais red, green e blue (RGB). A única medida de cor por pixel é em sinais de RGB, e vários autores (LEÓN et al., 2006; VISCARRA-ROSSEL

et al., 2006; RODRÍGUEZ-PULIDO et al., 2012) propuseram sistemas que permitem transformar o pixel das imagens da cor do solo para sinais RGB.

Algumas investigações já validaram o uso do sensor próximo móvel (SPM) como sensor para aplicações no campo das Ciências Agrárias. A título de exemplo, o estudo de Gómez-Robledo et al. (2013) avaliou a cor do solo sob iluminação controlada, utilizando um celular. Na França, a câmera digital foi utilizada para medir o teor de carbono orgânico, bem como o de Fe (VISCARRA-ROSSEL; FOUAD; WALTER, 2008). Em Israel, a câmera digital foi uma ferramenta importante para medir índices de cores e as propriedades de solos arenosos, em ambientes semiáridos (LEVIN; BEN-DOR; SINGER, 2007). Estes estudos têm validado os benefícios do uso do SPM (faixas RGB) para estudar atributos do solo. Portanto, os resultados da cor, obtidos por um método de menor custo, tempo de coleta e praticidade, poderão estabelecer funções de pedotransferência aplicadas ao estudo do solo. Estas funções de pedotransferência permitem estimar propriedades do solo, a partir de uma variável de prática obtenção e baixo custo (McBRATNEY et al., 2002).

Devido aos avanços significativos nas técnicas de programação e eletrônica, houve a possibilidade de se obter métodos para aquisição de dados nos mais diferentes campos da ciência, sobretudo nas Ciências Agrárias. A aquisição dos dados espectrais do solo, utilizando sensores próximos, pode viabilizar o conhecimento do potencial do solo. Portanto, os dados gerados poderão ser utilizados pelos usuários, sejam eles extensionistas, pesquisadores ou empresas. Desse modo, é possível que os benefícios estejam relacionados diretamente com a melhoria da qualidade de vida, pois aumentam os indicadores sociais de pequenos produtores, sua competitividade e produtividade. Ainda assim, ao verificar o potencial e a agilidade dos métodos, os usuários em questão estarão aptos a definir zonas de manejo e a compreender o comportamento da planta no solo.

Por acompanhar os fatores de formação do solo, os dados espectrais poderão delimitar as zonas de manejo para culturas agrícolas. Diante de uma nova fronteira na pesquisa, este trabalho tem por objetivo: I) Obter os dados espectrais de um Argissolo com cultivo de café, utilizando sensores próximos. II) Verificar o potencial dos sensores no mapeamento de atributos do solo. III) Elucidar a aplicabilidade do sensor no fator de causa e efeito da cor sobre o manejo de atributos qualitativos e produtivos do cafeeiro.

2.2 Material e Métodos

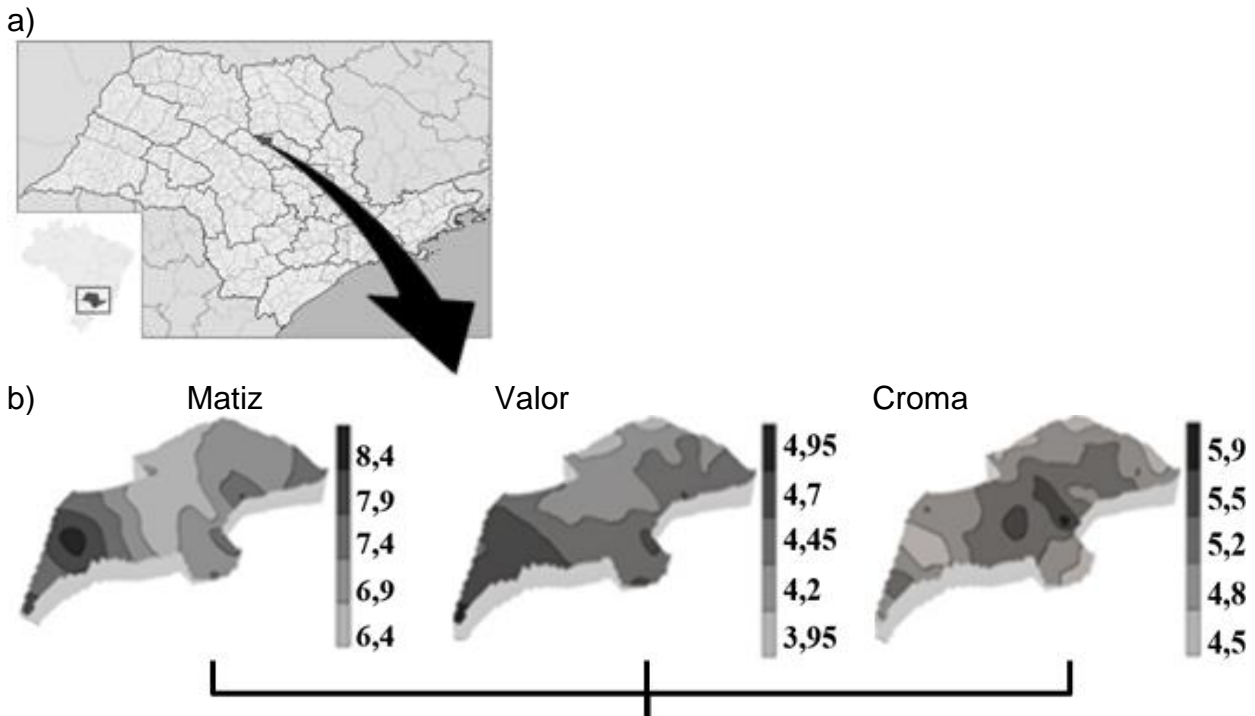
2.2.1 Caracterização da área de amostragem, análises do solo e planta

Dados foram coletados no município de Matão, sudoeste do Estado de São Paulo, Brasil, em área de 39 hectares (ha). As coordenadas geográficas centrais da área são: 21° 36' S e 48° 29' W, com altitude variando entre 590 e 615 metros (m) (Figura 1a). Segundo a classificação de Thornthwaite (1948), o clima local é definido como B1rB'4a', tipo Mesotérmico Úmido, com pequena deficiência hídrica, sendo a evapotranspiração de verão menor que 70% da evapotranspiração anual. O material geológico está relacionado aos arenitos do Grupo Bauru, Formação Adamantina. Geomorfologicamente, a área está inserida no Planalto Ocidental Paulista, local que ocupa aproximadamente metade da extensão territorial do Estado de São Paulo, com aproximadamente 13 milhões de hectares (IPT, 1981).

O solo foi classificado como Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (EMBRAPA, 2013), um Alfisol, de acordo com a Soil Taxonomy (SOIL SURVEY STAFF, 1999; 2014). O teor médio de óxido de ferro (Fe_2O_3) obtido pelo ataque sulfúrico foi de 30 g kg^{-1} (EMBRAPA, 1997). Uma média de óxidos de ferro pedogênicos (Fe_d) de $12,07 \text{ g kg}^{-1}$, mediante o método do ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (MEHRA; JACKSON, 1960) e $1,48 \text{ g kg}^{-1}$ de óxidos de ferro de baixa cristalinidade (Fe_o), extraído com oxalato de amônio $0,2 \text{ mol l}^{-1}$ (SCHWERTMANN, 1964) (Apêndice I). Na profundidade de 0,00-0,20 m, o teor médio de argila foi de 160 g kg^{-1} , soma de bases (SB) de $52 \text{ mmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e suscetibilidade magnética (SM) de $1,50 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$.

A área estava sob cultivo com a espécie *Coffea arábica* cultivar Catuaí Amarelo, linhagem IAC 62, com sete anos de idade. Estas plantas estavam dispostas em espaçamento de $3,5 \times 0,5 \text{ m}$, cultivadas desde o início no sistema de fertirrigação por gotejamento. Para a escolha dos pontos de coleta, levou-se em consideração a comparação das variáveis da cor e argila, ou seja, fez-se a sobreposição de mapas da argila, e os componentes da cor (matiz, valor e croma), conforme a Figura 1b. Estes mapas foram extraídos em estudo realizado por Carmo et al. (2016) e, conforme a homogeneidade do padrão da variabilidade das variáveis da cor na área, foram utilizados 51 pontos para amostragem. As amostras de solo foram coletadas na profundidade de 0,00-0,20 m, sob a projeção da copa de uma

planta central. Nestas amostras, foram determinadas as variáveis da cor (matiz, valor, croma e RGB) pelos métodos da Espectroscopia de Reflectância Difusa (ERD) e SPM.



Fonte: Adaptado de Carmo et al. (2016).

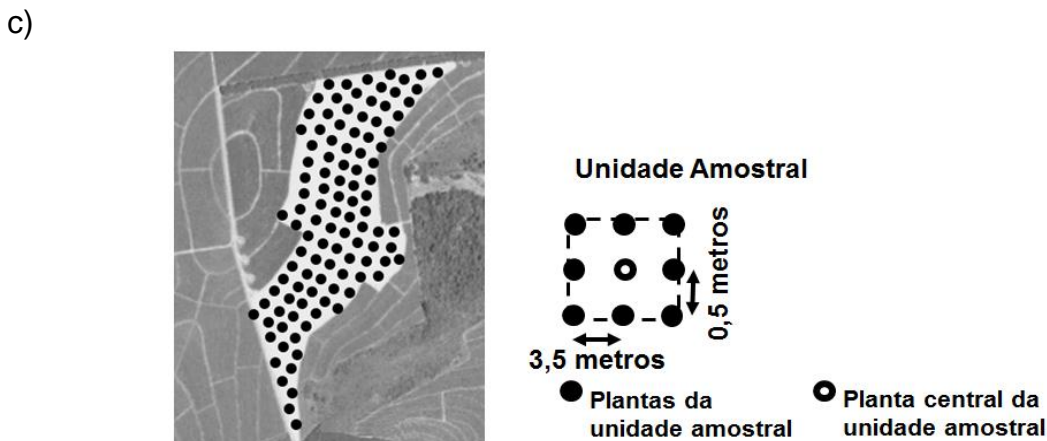


Figura 1. Ilustração do local estudado. Localização da área (a); Sobreposição dos mapas conforme as variáveis da cor (Matiz, valor e croma) (b); Malha amostral e unidade amostral (c).

As amostras foram submetidas à análise granulométrica, seguindo o método de Day (1965). Utilizou-se a solução de hidróxido de sódio (NaOH 0,1 N) como dispersante químico e agitação com aparato de baixa rotação. A argila foi determinada pelo método da pipeta. O carbono orgânico (CO) foi extraído conforme

EMBRAPA (1997). A fração terra fina seca ao ar (TFSA) foi submetida à dissolução seletiva por ataque com ácido sulfúrico (H_2SO_4). O extrato resultante foi usado para determinar o conteúdo de ferro total (Fe_2O_3) (EMBRAPA, 1997). O fósforo disponível foi obtido conforme o método da resina trocadora de íons (RAIJ et al., 2001). A capacidade de troca catiônica (CTC) foi determinada utilizando-se de uma solução de acetato de cálcio ($C_4H_6O_4Ca$ 1 N pH 7,0), como cátion saturante, e uma solução de acetato de sódio ($C_2H_3NaO_2$ 1N pH 7,0), como deslocante (RAIJ; KUPPER, 1966).

Buscando quantificar a produtividade e a qualidade do grão de café, foram definidas unidades amostrais compostas por 9 plantas, totalizando 459 plantas avaliadas (Figura 1c). Após a colheita, os frutos de café foram secados ao sol, em terreiro de concreto, até atingirem teor de água em base úmida (b.u) de 11 a 12,5%. Em seguida, o café em coco foi beneficiado, utilizando-se de um descascador Pinhalense®, tipo DRC 02, com 1.700 rpm, obtendo-se o grão cru. Buscou-se eliminar as impurezas, como cascas, galhos, restos de folhas, etc. Após o beneficiamento e a correção da umidade para 12,5%, estimou-se a produtividade, determinada em sacas de 60 kg de café beneficiado (grão cru). Os resultados foram contabilizados mediante a unidade amostral, e posteriormente estimou-se a produção de café beneficiado em sacas de 60 kg ha^{-1} .

A classificação dos grãos, quanto ao tamanho, formato e defeitos, obedeceu à tabela oficial de classificação (MAPA, 2003). Foram pesados 100 g de café em grão de cada unidade amostral, e posteriormente despejado sobre um conjunto de peneiras, dispostas na seguinte ordem: peneira redonda com 17 milímetros (mm) de abertura (grão chato e graúdo) e fundo (paus, pedras, grãos quebrados, entre outros). Após o peneiramento, quantificou-se o número de grãos retidos na peneira de 17 mm (P_{17}). Neste estudo, a P_{17} representou a qualidade dos grãos, ou seja, a presença de grão chato e graúdo. A classificação quanto ao tipo (defeitos) foram considerados como intrínsecos, ou seja, quando o defeito ocorreu por ocasião dos processos agrícolas, como a secagem e o beneficiamento. Estes processos são causadores de defeito no grão, como a presença de grãos pretos, ardidos, verdes, malgranados, quebrados e brocados. Os defeitos extrínsecos manifestaram-se pela presença de impurezas na amostra, como: pedras, torrões, cascas e paus. Ao final da análise, todos os defeitos foram somados, e o valor foi determinado em concordância com a tabela oficial de classificação.

2.2.2 Obtenção da imagem por sensor próximo móvel (SPM)

Foi depositado 0,5 g de TFSA em porta-amostras individuais (3,0 × 0,5 cm) e acondicionado sobre uma folha de papel de cor marrom, evitando reflexo de luz. As amostras foram levemente compactadas por um bastão, a fim de evitar efeitos de sombreamento causado por uma possível rugosidade da superfície. As imagens do solo foram obtidas utilizando um SPM com 13 megapixels e resolução de 4128×3086 pixels. O equipamento possuía abertura de f/2.0, o que permitiu maior entrada de luz, obtendo imagens mais nítidas. Definiu-se o modo automático do balanço de branco, permitindo que a câmera determinasse a cor da luz. O SPM foi montado a 0,30 m de distância da lente do sensor até a porta-amostra contendo o solo (Figura 2a).

As imagens foram obtidas em laboratório, sem o uso de flash e efeitos de melhoria da qualidade. Evitar o uso do flash foi uma maneira de impedir a presença de pixels brancos, permitindo uma reflectância real do solo. Com a finalidade de analisar a imagem, criou-se um corte (60 × 50 pixels), denominado como região de interesse (RDI), no centro da imagem (Figura 2ab; Figura 3). Esta RDI permitiu obter pixels com maior representatividade por estarem em uma região de menor influência da luz e/ou de rugosidade.

Visando a estabelecer a uniformidade de iluminação das amostras, utilizou-se de uma fonte luminosa artificial. O uso de uma lâmpada externa fluorescente manteve um padrão nas imagens, o que conferiu maior confiabilidade ao método do SPM. As imagens foram arquivadas em Short Joint Photographic Experts Group – JPEG. Alguns autores, como Levin, Ben-Dor e Singer (2007), afirmaram que as imagens em JPEG possuem alta taxa de compressão, o que permite maior capacidade de uso do equipamento. Foram capturadas imagens de 51 amostras, obtendo posteriormente os valores de RGB, utilizando o programa Paint do Windows® (Figura 2b). A codificação RGB foi criada em 1931, pela Comissão Internacional da Iluminação (CIE, 1931), e consiste em representar o espaço das cores com base em três radiações monocromáticas de cores, sendo as cores red, green e blue demonstradas na Figura 2c. Internacionalmente, aceitam-se os seguintes comprimentos de onda para o sistema RGB: red (700 nm); green (556,1 nm) e blue (435,8 nm), informações definidas pela Comissão Internacional da Iluminação (CIE, 1931).

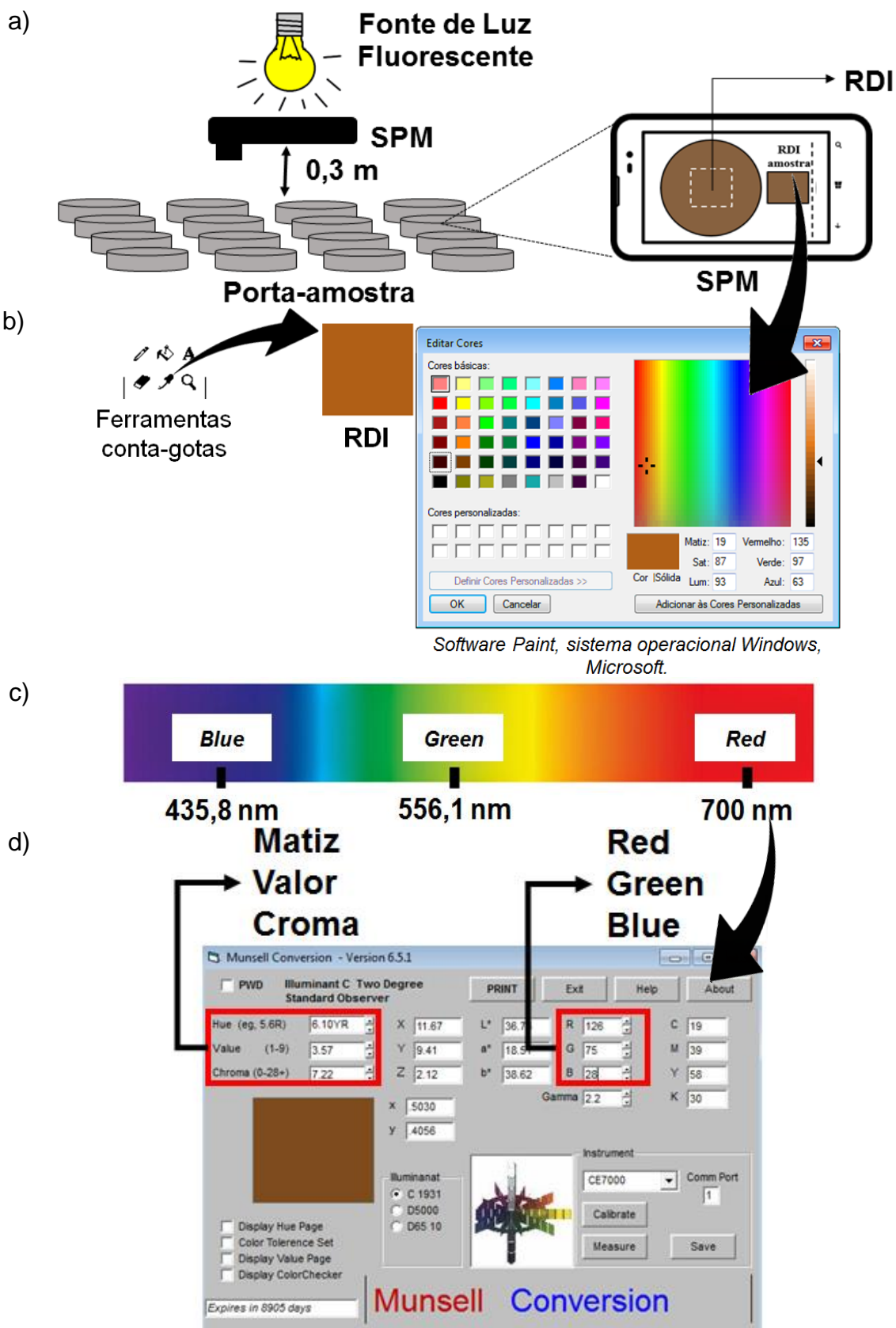


Figura 2. Diagrama do princípio de funcionamento do SPM (a); Obtenção dos atributos da cor (*red*, *green* e *blue*) utilizando o Software Paint (b); Faixa espectral do visível (c); Obtenção dos atributos da cor (matiz, valor e cromia) através do Software Munsell Conversion (d).

Espectroscopia de reflectância difusa - ERD

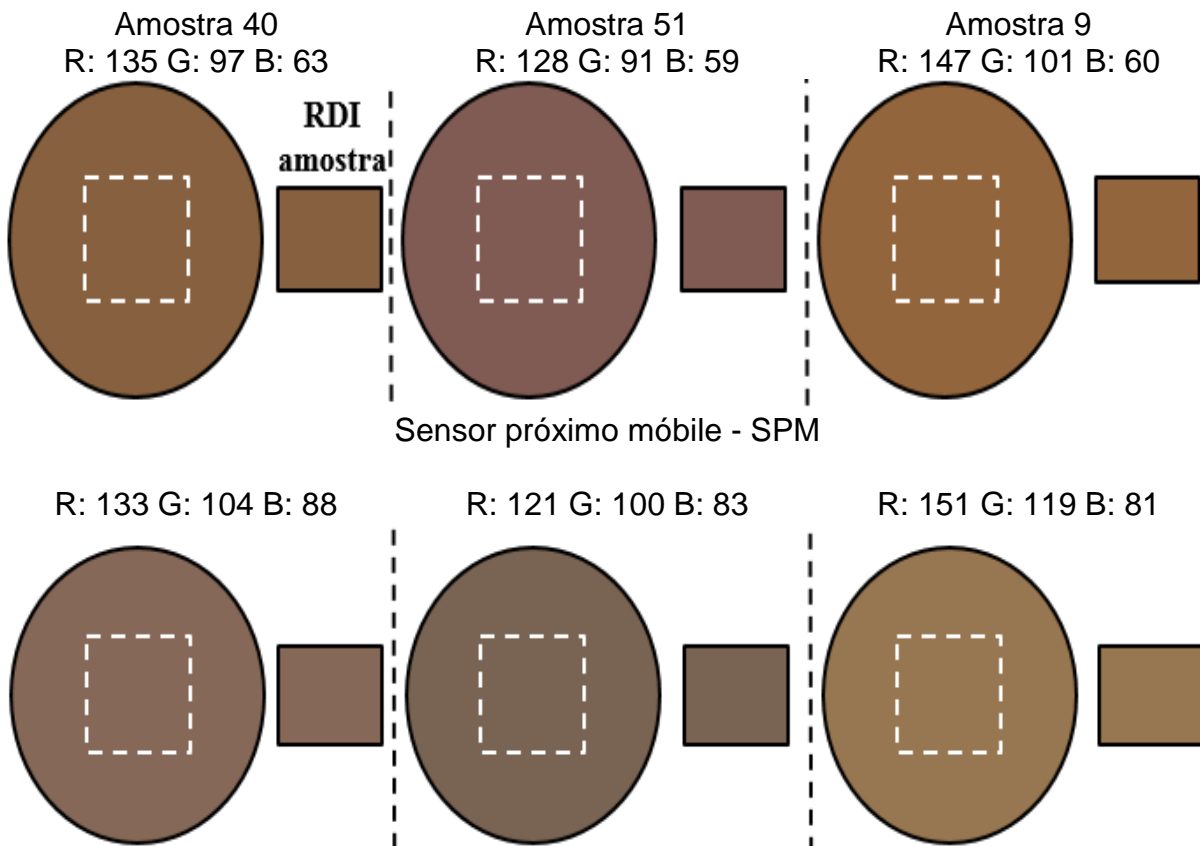


Figura 3. Imagens das amostras de solo, obtidas pelo método da ERD e SPM e suas regiões de interesse (RDI), com os resultados RGB.

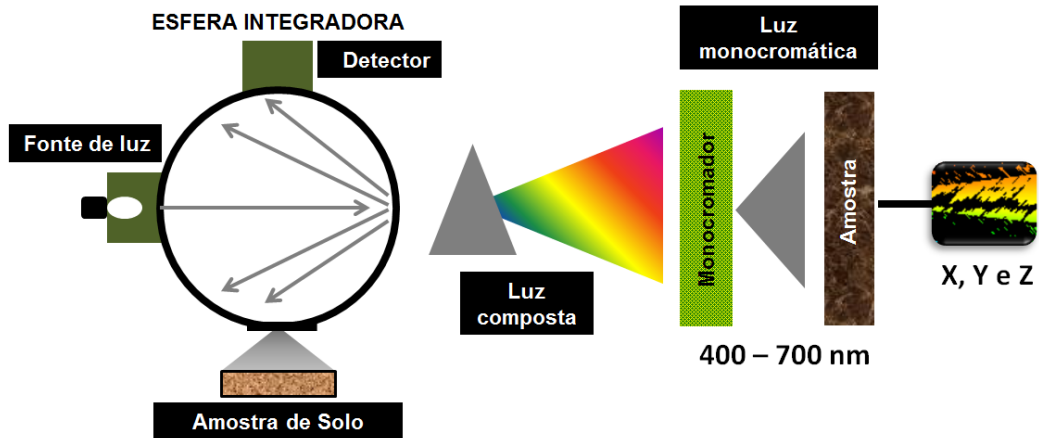
Determinaram-se, por meio do SPM, 51 amostras de solos, obtendo-se um total de 357 informações sobre a cor, sendo o matiz, valor, croma, IAV e RGB. As medidas de cor usando o SPM seguiu o princípio de funcionamento em que a imagem é convertida, gerando a informação monocromática com uma variedade de filtro RGB. Posteriormente, o sistema RGB codifica a imagem usando 8 bits, representado por 256 valores, que variam de 0 (escuro) a 255 (branco) para cada um dos canais de cor (red, green e blue).

O resultado do RGB foi calculado utilizando-se da opção selecionadora de cores do software Paint do Windows®. Estes valores RGB foram transformados no modelo de cores HSV (em inglês: hue, saturation e brightness, tradução: tonalidade, saturação e brilho, respectivamente), buscando representar as cores e suas variáveis, sendo o matiz, valor e croma. Estes dados foram obtidos através do programa Munsell Conversion - versão 6.4, conforme Barrón, Mello e Torrent (2000) e Viscarra-Rossel (2011) (Figura 2d).

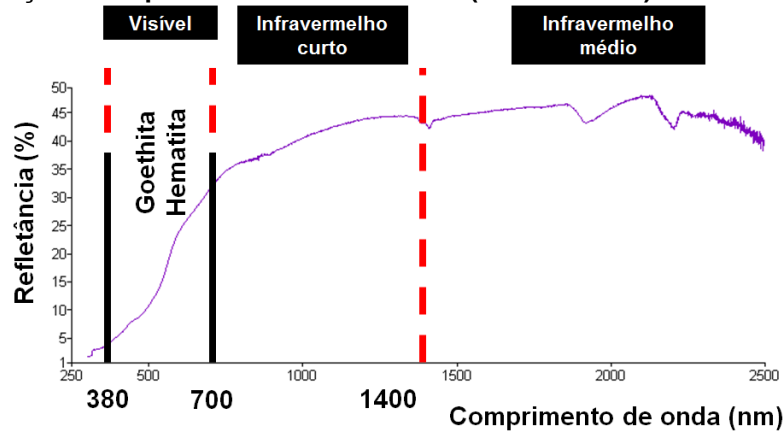
2.2.3 Análise da espectroscopia de reflectância difusa (ERD)

As 51 amostras de solo foram submetidas à análise da ERD, obtendo um total de 357 resultados sobre a cor, sendo o matiz, valor, croma, IAV e RGB (Figura 4).

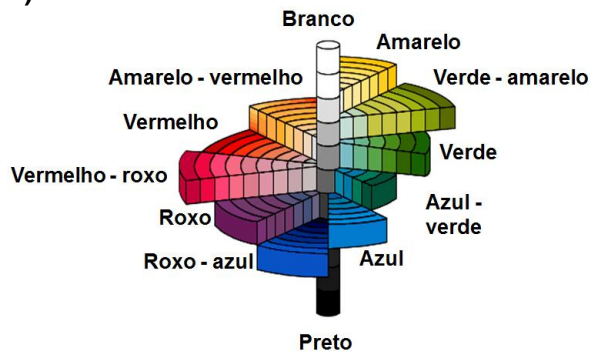
1ª fase: Análise espectral do solo em aparelho espectrofotômetro



2ª fase: determinação do espectro na faixa do visível (380 a 700 nm)



3ª Fase: Conversão dos valores de reflectância para o sistema triestímulo (X, Y e Z).



4ª fase: Conversão para o sistema Munsell, obtenção dos valores para cálculo do índice de avermelhamento do solo (IAV)

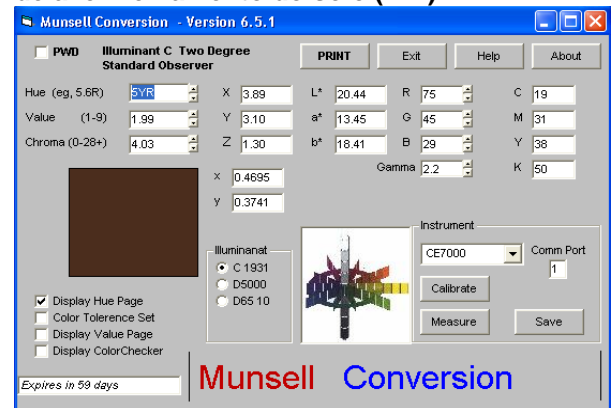


Figura 4. Diagrama do princípio de funcionamento da ERD, utilizando um sensor Lambda 950 UV/VIS/NIR, extraído de Carmo (2014).

O material do porta-amostra (TFSA) foi pesado (0,5 g de solo) e moído em almofariz de ágata até a obtenção da coloração constante. Posteriormente, a TFSA foi analisada por um sensor Lambda 950 UV/VIS/NIR, em que os valores de reflectância foram determinados a cada 0,5 nm na faixa do visível, no intervalo de 380 a 780 nm (TORRENT; BARRÓN, 2008). Após a obtenção dos espectros de reflectância das amostras, determinaram-se os valores triestímulos XYZ, definidos pela CIE (WYSZECKI; STILES, 1982). Pelas coordenadas dos valores de XYZ, foram deduzidos os valores de Munsell referentes a matiz (H), croma (C) e valor (V), utilizando o programa Munsell Conversion, versão 6.4 (Figura 4).

Os valores de H, C e V, conforme método de Munsell, foram utilizados no cálculo do índice de avermelhamento (IAV), pela Equação 1 (TORRENT; BARRÓN, 2008).

$$\text{IAV} = \frac{(10 - H) \times C}{V} \quad \text{[Equação 1]}$$

em que, V é o valor Munsell; C é o valor numérico do croma, e H é o valor numérico que corresponde ao matiz.

2.2.4 Análise estatística dos dados

Foi elaborada uma tabela contendo a estatística descritiva, média, erro da média, desvio-padrão (DP), coeficiente de variação (CV), mínimo (mín.) e máximo (máx.). O teste t de Student, pareado a 5% de probabilidade, foi utilizado para avaliar a diferença das médias. Os métodos (ERD e SPM) foram submetidos à análise de dispersão contendo a precisão (R^2), a raiz do erro quadrático médio (RMSE), histograma de frequência e funções de distribuição de probabilidade acumulativa normal.

Foram montados grupos a partir da análise dos quintis (valor de uma variável, dividido em cinco partes iguais) do RGB, com atributos do solo e da planta. Estes grupos facilitaram na explicação e nas semelhanças de causa e efeito entre as variáveis estudadas. As análises dos coeficientes de determinação das regressões foram feitas para inferir a relação de uma variável dependente, com variáveis independentes específicas. A partir das distribuições dos dados, desenvolveram-se

as funções de pedotransferência, propondo estimar os valores dos atributos do solo, bem como da planta.

2.3 Resultados e Discussão

Maiores valores médios de matiz (71,74) e croma (51,48) foram observados pela ERD, enquanto a variável valor apresentou resultado médio de 53,46, utilizando o método do SPM (Tabela 1). Houve diferenças significativas entre os métodos, fato observado pelas variáveis analisadas (matiz, valor, croma e RGB). Este fato sugere que a luminosidade pelo método do SPM foi mais bem captada. No entanto, alterações atribuídas ao dispositivo (WESTLAND; RIPAMONTI; CHEUNG, 2012), às condições de iluminação da amostra (VISCARRA-ROSSEL; FOUAD; WALTER, 2008) e à geometria do espaço Munsell (GÓMEZ-ROBLEDO et al., 2013) podem ter interferido nos resultados obtidos.

Em relação ao CV, pode-se observar maior variação quando se utilizou o método do SPM. A classificação para o CV seguiu os padrões propostos por Warrick e Nielsen (1980), propondo três níveis: baixa ($CV \leq 12\%$), média ($12\% < CV \leq 52\%$) e alta ($CV > 52\%$). Assim, o CV foi considerado baixo para: ERD (matiz, valor, croma e RGB) e SPM (Valor e RGB); médio: ERD (IAV) e SPM (Matiz e croma); e alto: SPM (IAV). De acordo com Trangmar, Yost e Uehara (1985), as propriedades do solo, como as características morfológicas (cor), são pouco alteradas pelo manejo agrícola. Entretanto, a diferença observada para o CV nas variáveis da cor é justificada pela dependência do dispositivo, mediante sua fonte luminosa. De outro modo, a escolha automática do sensor para capturar a imagem não apresentou controle sobre a coloração final, podendo ocorrer variação quanto ao brilho de cada fotografia.

Com relação ao DP, os maiores valores ocorreram nos dados do SPM; por sua vez, menores valores foram observados na ERD. Este comportamento explicou a heterogeneidade dos resultados obtidos através dos métodos propostos no estudo. Esta informação foi possível porque os valores do DP para o RGB foram maiores em ambos os métodos. Explicando, então, que a alta variabilidade entre as amostras ocorreu devido aos ambientes presentes na área (CARMO et al., 2016), que estabeleceu a absorção dos canais RGB.

Tabela 1. Valores médios, erro da média, DP, CV (%), Mín, e Máx. das variáveis da cor do solo na profundidade de 0,00 - 0,20 m, em 51 amostras de um Argissolo no Planalto Ocidental Paulista.

Variável	Média*		Erro da média	DP	CV(%)	Mín.	Máx.
Matiz _{SPM}	5,62	b	0,30	2,12	37,66	1,17	9,37
Matiz _{ERD}	71,74	a	0,08	0,59	8,17	60,50	89,50
Valor _{SPM}	53,46	a	0,05	0,38	7,05	42,70	60,50
Valor _{ERD}	44,54	b	0,04	0,31	6,92	37,00	52,60
Croma _{SPM}	32,26	b	0,09	0,63	19,53	19,70	49,70
Croma _{ERD}	51,48	a	0,05	0,38	7,43	41,80	65,00
IAV _{SPM}	2,75	b	0,23	1,65	60,11	0,35	6,63
IAV _{ERD}	3,33	a	0,13	0,89	26,76	0,95	5,33
Red _{SPM}	155,14	a	1,56	11,16	7,19	121,00	181,00
Red _{ERD}	140,51	b	1,21	8,64	6,15	119,00	159,00
Green _{SPM}	125,00	a	1,36	9,71	7,77	100,00	145,00
Green _{ERD}	99,55	b	1,09	7,76	7,79	82,00	121,00
Blue _{SPM}	103,90	a	1,41	10,09	9,71	81,00	125,00
Blue _{ERD}	62,04	b	0,82	5,88	9,46	52,00	80,00

*Médias seguidas de mesma letra na linha não diferem estatisticamente entre si, pelo teste t de Student, pareado a 5% de probabilidade. CV: Coeficiente de variação (%); DP: Desvio-Padrão; Mín.: Mínimo; Máx.: Máximo; IAV: Índice de avermelhamento do solo; ERD: Espectroscopia de reflectância difusa e SPM: Sensor próximo móvel.

As variáveis da cor, obtidas pelos métodos do SPM e ERD, foram relacionadas entre si (Figura 5). A análise de regressão foi positiva entre os métodos, ajustando ao modelo linear (Tabela 2). Os modelos de regressões observados em croma, IAV, matiz, valor e RGB, representados pelos valores de R^2 e a raiz do erro quadrático médio (RMSE), que especifica o erro médio gerado pelos métodos, contribuíram para verificar o potencial de precisão e para comparar os métodos utilizados neste estudo.

Quase que de forma geral, os valores de RGB revelaram resultados próximos, quando comparados pelos métodos do SPM ou ERD. Este fato revela que o método que utilizou o SPM pode proporcionar análises precisas, identificando as variáveis da cor do solo. Considerando outros estudos, que utilizaram a câmera de celular, os resultados também confirmaram o telemóvel como um método alternativo aplicado em estudos do solo (LEVIN; BEN-DOR; SINGER, 2007; VISCARRA-ROSSEL; FOUAD; WALTER, 2008). Em geral, estes resultados apresentaram-se capazes de realizar medições das variáveis da cor do solo de maneira objetiva, fácil e rápida, utilizando um SPM.

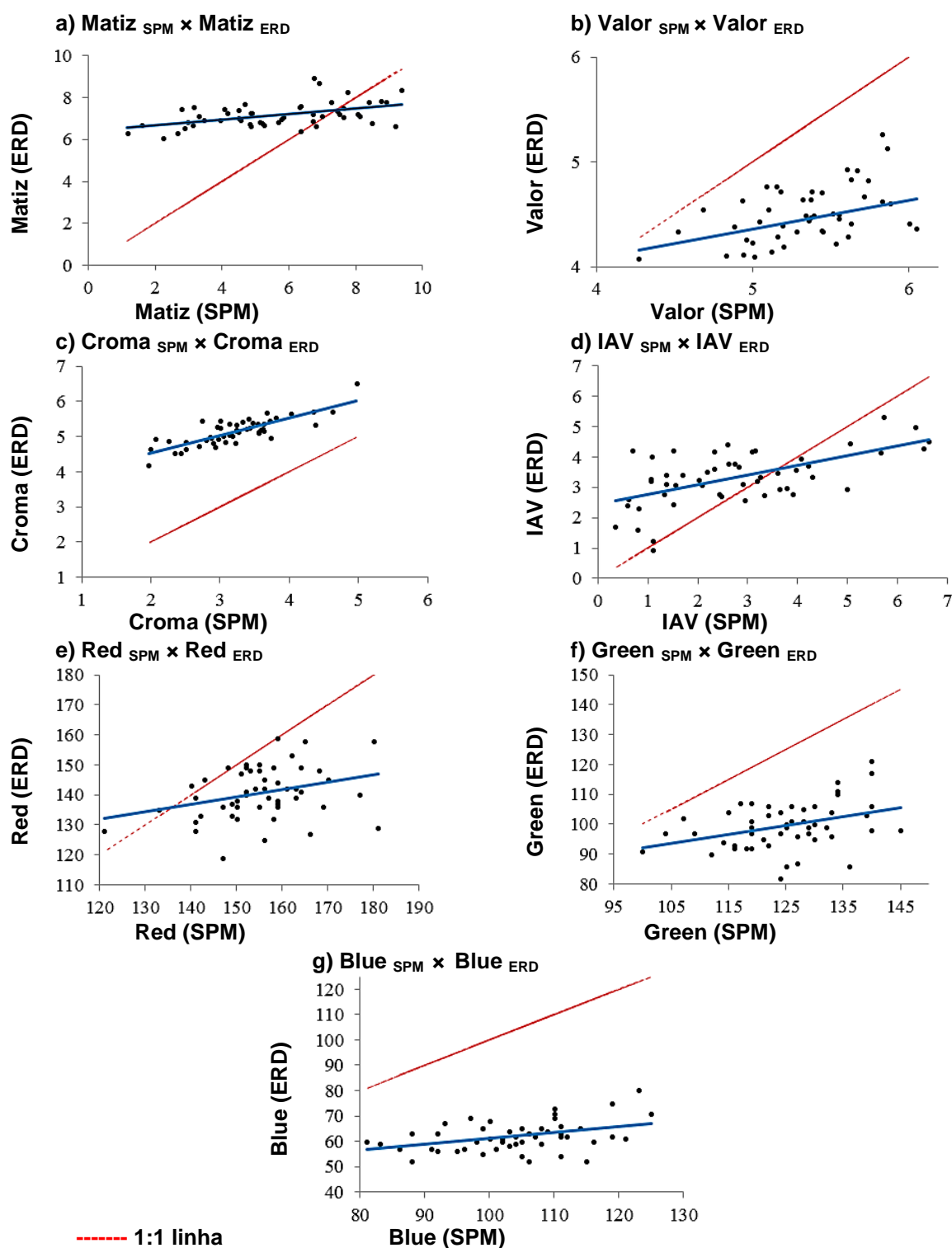


Figura 5. Dispersões e ajustes de regressões medidos pelos métodos do SPM e ERD em variáveis da cor de um Argissolo no Planalto Ocidental Paulista.

Analisando os dados do sistema RGB, a precisão dos valores foi inferior na variável blue (RMSE = 4,88), seguido do green (RMSE = 1,86) e red (RMSE = 0,76). Resultados consistentes como o de Viscarra-Rossel, Fouad e Walter (2008) encontraram valores de RMSE para RGB entre 3,94 (red), 1,39 (green) e 1,20 (blue),

respectivamente, na profundidade de 0,00-0,20 m, em solos da França. Considerando a precisão para comparar os métodos, os resultados de RGB validaram uma distribuição precisa dos dados. Por outro lado, os resultados para matiz, valor, croma e IAV foram ligeiramente tendenciosos. Com isso, estas variáveis obtiveram precisão de 1,59; 1,46; 2,69 e 1,35, respectivamente (Tabela 2). Ainda que os valores de R^2 obtidos para o RGB não tenham exibido um valor alto, a dispersão dos dados indicou que o RGB proporciona resultados mais próximos do SPM com a ERD, neste estudo.

Tabela 2. Resultados das regressões lineares: equação geral da reta, R^2 , valor-p e RMSE, observados em variáveis da cor de um Argissolo no Planalto Ocidental Paulista.

Atributos da cor do solo					
Variável dependente (X)	Variável independente (Y)	Regressão Linear			
		Equação da reta	R^2	Valor-p	RMSE
Matiz (ERD)	Matiz (SPM)	$y = 0,1328x + 6,428$	0,23	<0,01	1,59
Valor (ERD)	Valor (SPM)	$y = 0,2769x + 2,9739$	0,11	<0,01	1,46
Croma (ERD)	Croma (SPM)	$y = 0,4957x + 3,54889$	0,67	<0,01	2,69
IAV (ERD)	IAV (SPM)	$y = 0,3165x + 2,4535$	0,35	<0,05	1,35
Red (ERD)	Red (SPM)	$y = 0,2481x + 102,03$	0,10	<0,01	0,76
Green (ERD)	Green (SPM)	$y = 0,2999x + 62,06$	0,14	<0,01	1,86
Blue (ERD)	Blue (SPM)	$y = 0,2377x + 37,337$	0,17	<0,01	4,88

Eixo X e Y: referente aos gráficos da Figura 2; R^2 : Coeficiente de determinação (%); Valor-p: Nível de significância com que se rejeitaria a hipótese nula, (< 0,01; < 0,05; e ns: não significativo); RMSE: Raiz do erro quadrático médio.

Para verificar a similaridade entre os dados das variáveis da cor, foram plotados análise de histogramas. Esta análise propôs interpretar a distribuição dos dados gerados, obtidos pelos métodos. Em geral, houve maior variação dos dados nas seguintes variáveis: Matiz, valor, croma e IAV; ao contrário, observou-se menor deslocamento para as variáveis RGB. No entanto, os métodos ajustaram-se melhor quando utilizaram os resultados do RGB, pois houve um comportamento similar observado pelos métodos (Figura 6). Entre as comparações, o método do SPM apresentou resultados mais bem distribuídos. Tal característica está nas variáveis da cor, que exibiram comportamento de distribuição mais constante, isto é, com curvas

assimétricas, o que assegura a tendência de distribuição de valores, determinadas pelo CV expresso na Tabela 1.

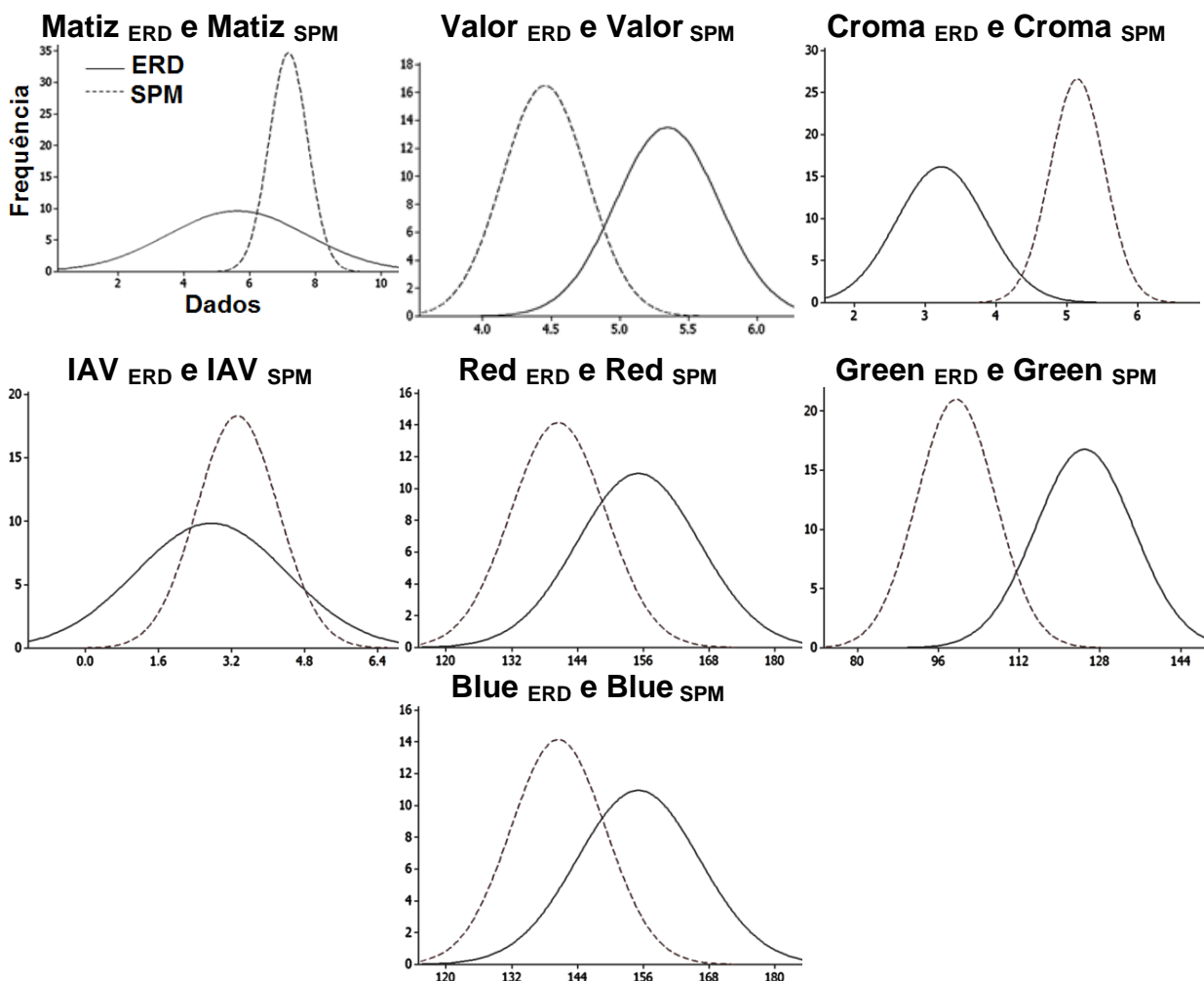


Figura 6. Histograma de frequência de distribuição dos dados obtidos através do método do SPM e ERD em variáveis da cor de um Argissolo no Planalto Ocidental Paulista.

Pela análise dos histogramas, as variáveis RGB mostraram claramente que não houve concentração dos valores estimados. A pouca diferença observada entre os métodos deve-se ao fato da dependência do dispositivo (HONG; LUO; RHODES, 2001; WESTLAND; RIPAMONTI; CHEUNG, 2012) e pela influência da luz (VISCARRA-ROSSEL; FOUAD; WALTER, 2008). Neste caso, estes fatores são importantes na percepção de uma fotografia obtida por um SPM. Por outro lado, ao transformar uma função dos valores XYZ da ERD para sinais RGB, poderá também influenciar nos resultados, dado que, nas funções de transformação, o matiz da cor é o coordenador angular da estrutura cilíndrica do sistema Munsell e os dois sistemas de cores RGB e XYZ detêm de espaços geométricos semelhantes (GÓMEZ-

ROBLEDO et al., 2013). Neste caso, ao contrário do RGB, que é um sistema aditivo de cores, o sistema XYZ é um espaço puramente matemático. Assim, o principal problema consiste na alteração linear das mudanças de coordenadas dos sistemas.

A análise das funções de distribuição de probabilidade acumulativa normal permitiu analisar a eficácia dos métodos. A separação dos dados foi evidenciada por grupos isolados, mediante o método utilizado (Figura 7).

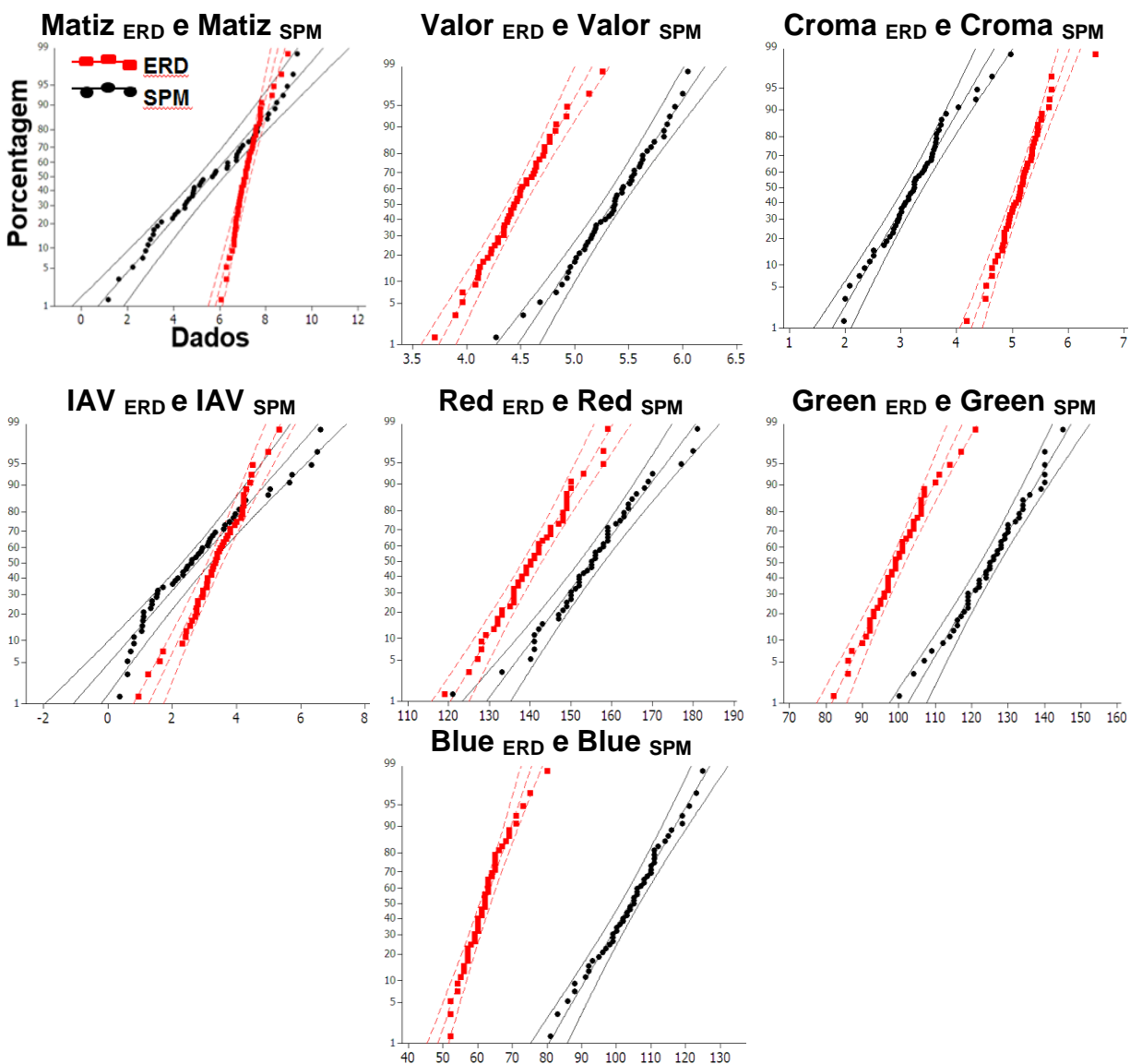


Figura 7. Funções de distribuição de probabilidade acumulativa normal dos dados obtidos através do método do SPM e ERD em variáveis da cor de um Argissolo do Planalto Ocidental Paulista.

Nos atributos RGB, 100% dos pontos experimentais possuem comportamento normal, validado pelo agrupamento dos dados no gráfico. No entanto, não somente os gráficos, mas também sua uniformidade indicam que as variáveis RGB exibiram

um aspecto mais homogêneo (Figura 7). Com isso, o sistema RGB tornou-se uma informação importante do solo, pois apresentou distribuição uniformizada dos dados e precisão nos resultados. Este conhecimento instituiu a teoria em que o uso do SPM pode ser explorado como um dispositivo que captura informações inerentes da cor do solo.

Determinaram-se as análises de regressões das variáveis RGB, obtidos a partir do SPM, com os atributos do solo (argila e EC), expostas na Figura 8 e Tabela 3. Houve correlação para a argila, que foi estimada com maior exatidão quando utilizou a variável red_{SPM} ($R^2 = 0,70$, $p < 0,01$). Resultados superiores foram encontrados por Levin, Ben-Dor e Singer (2007), que, determinando atributos físicos do solo, concluíram que a câmera digital obteve bom desempenho, alcançando precisão de 82% na determinação da argila. Para o EC, observaram-se valores significativos quando este atributo foi estimado com a variável $blue_{SPM}$ ($R^2 = 0,96$, $p < 0,01$). Viscarra-Rossel, Fouad e Walter (2008) também tiveram eficiência utilizando o RGB para atributos físicos, pois obtiveram 88% na estimação do CO. Estes autores destacaram, ainda, que o RGB pode ser usado para obter função de pedotransferência precisa para os atributos do solo.

A cor do solo foi avaliada como método funcional para quantificar os atributos químicos do solo (CTC, P e Fe). Os gráficos de dispersão apresentados na Figura 8 e Tabela 3, validam o método, devido às correlações observadas para os atributos analisados. Para a CTC, foi encontrada maior precisão quando estimada pelo $green_{SPM}$, com ($R^2 = 0,73$, $p < 0,01$), bem como para estimar o Fe_t ($R^2 = 0,75$, $p < 0,01$). Para o P, foi observado valor de regressão de ($R^2 = 0,64$, $p < 0,05$), quando utilizou o red_{SPM} , variável com maior significância. No que se refere ao desempenho de uma câmera digital, resultados semelhantes foram obtidos por Viscarra-Rossel, Fouad e Walter (2008) para predição de Fe ($R^2 = 0,70$); do mesmo modo, Levin, Ben-Dor e Singer (2007), que obtiveram $R^2 = 0,88$ na estimativa do Fe. Dessa forma, os resultados validam as vantagens do SPM, como um método para descrever o comportamento dos atributos do solo. Este potencial de conhecimento e detalhamento dos atributos físico-químicos propõe a gestão no uso do solo e a expansão da produção agrícola.

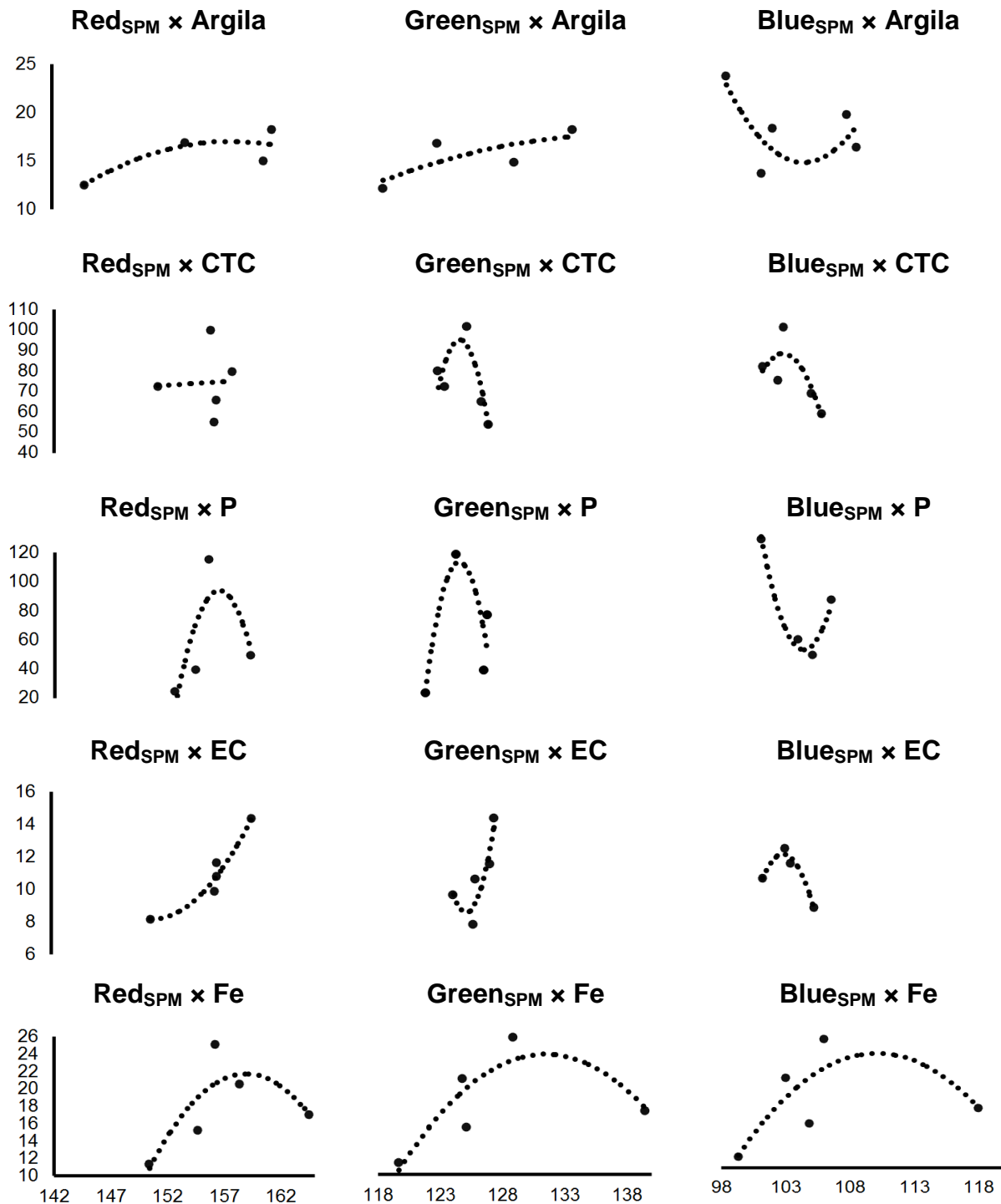


Figura 8. Atributos físico-químicos do solo em relação ao *red*, *green* e *blue* obtidos pelo método do SPM em um Argissolo no Planalto Ocidental Paulista.

Os resultados das variáveis da cor foram relacionados aos dados da planta (Figura 9 e Tabela 3). Para avaliar o potencial dos métodos, estabeleceram-se fatores que quantificaram informações específicas para a cultura do café. Neste aspecto, por meio de funções quadráticas, os dados obtidos pelo SPM e ERD explicaram três atributos da cultura do café, sendo: produtividade, defeitos e P_{17} .

Tabela 3. Modelos ajustados, equação geral da reta, R² e valor-p, observados em variáveis da cor de um Argissolo no Planalto Ocidental Paulista.

Atributos físico-químicos				
Variáveis dependentes (X)	Variável independente (Y)	Regressão Linear		
		Modelos	R ²	Valor-p
Red	Argila	$y = -0,0297x^2 + 9,3397x - 716,29$	0,70	<0,01
Red	CTC	$y = 0,0082x^2 - 2,1464x + 210,8$	0,0029	<0,01
Red	P	$y = -5,4918x^2 + 1716,1x - 133972$	0,64	<0,05
Red	EC	$y = 0,0879x^2 - 26,426x + 1994$	0,94	<0,01
Red	F _t	$y = -0,1508x^2 + 47,923x - 3786,4$	0,67	<0,01
Green	Argila	$y = -0,015x^2 + 4,0925x - 261,54$	0,59	<0,01
Green	CTC	$y = -9,2106x^2 + 2295,9x - 142981$	0,73	<0,01
Green	P	$y = -14,384x^2 + 3584,8x - 223229$	0,75	ns
Green	EC	$y = 1,2563x^2 - 312,07x + 19389$	0,82	<0,01
Green	Fe _t	$y = -0,0922x^2 + 24,237x - 1569,7$	0,75	<0,01
Blue	Argila	$y = 0,2471x^2 - 51,755x + 2723,7$	0,40	<0,01
Blue	CTC	$y = -4,3124x^2 + 890,49x - 45884$	0,60	<0,05
Blue	P	$y = 7,8943x^2 - 1653,7x + 86644$	0,98	ns
Blue	EC	$y = -0,6613x^2 + 136,57x - 7039,2$	0,96	<0,01
Blue	F _t	$y = -0,1033x^2 + 22,74x - 1228,4$	0,59	<0,01
Atributos produtivos e qualitativos				
Red	P ₁₇	$y = -0,9658x + 185,74$	0,69	<0,01
Red	Defeitos	$y = 0,8054x^2 - 230,74x + 16574$	0,84	ns
Red	Produtividade	$y = 1,654x^2 - 511,11x + 39492$	0,95	<0,01
Green	P ₁₇	$y = 0,7899x^2 - 198,21x + 12461$	0,70	<0,01
Green	Defeitos	$y = 1,6581x^2 - 396,68x + 23828$	0,75	ns
Green	Produtividade	$y = -0,7942x^2 + 197,8x - 12288$	0,32	<0,01
Blue	P ₁₇	$y = 0,4582x^2 - 95,314x + 4984,1$	0,67	<0,01
Blue	Defeitos	$y = -21,893x^2 + 4565,3x - 237763$	0,71	ns
Blue	Produtividade	$y = -0,486x^2 + 100,56x - 5173,5$	0,45	<0,01

Eixo X e Y: referente aos gráficos das Figuras 5 e 6; CTC: Capacidade de troca catiônica (mmol_c dm⁻³); P: Fósforo (g kg⁻¹); Fe_t: Ferro total (g kg⁻¹); P₁₇: Grãos de café retidos na peneira redonda com 17 milímetros (mm) de abertura (grão chato e graúdo); R²: Coeficiente de determinação (%); Valor-p: Nível de significância com que se rejeitaria a hipótese nula, (< 0,01; < 0,05; e não significativo ns).

Regressões positivas foram notadas para a P₁₇ e produtividade, estimadas pelo green_{SPM} e red_{SPM}, com (R² = 0,70 e 0,95, p < 0,01), respectivamente (Figura 9). As regressões observadas para as variáveis da planta descreveram as relações com as variáveis da cor, e sua influência quanto à produtividade, bem como a qualidade do café. Em outras culturas, como o algodão, foi possível verificar o potencial da câmera digital no monitoramento do crescimento do algodoeiro, obtendo-se valores de R² = 0,92 (JIA et al., 2014). Portanto, as variáveis da cor podem ser usadas para monitorar regiões com potenciais para produtividade e qualidade do cafeeiro. Vale ressaltar que, conforme se geram as funções de pedotransferência, essas precisam ser modeladas e validadas para serem utilizadas.

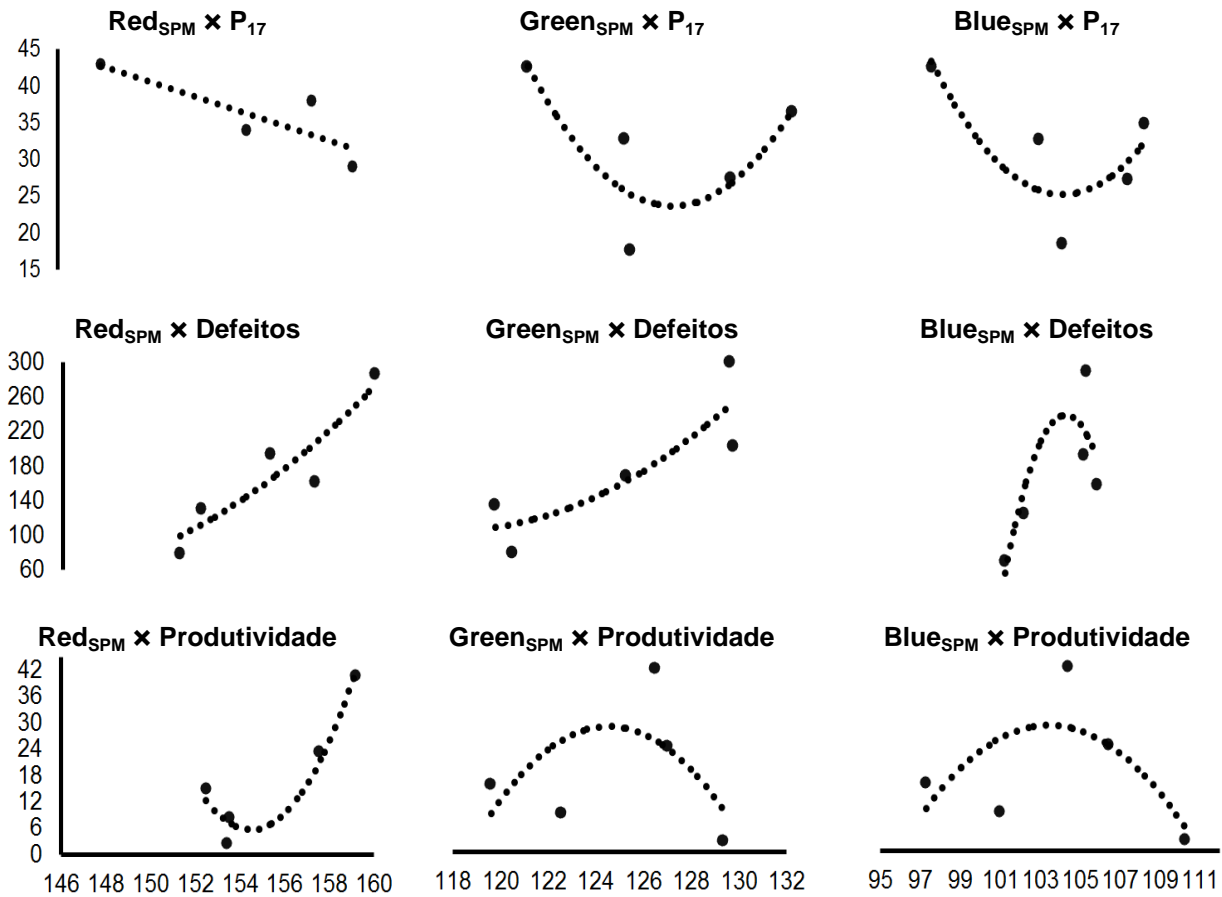


Figura 9. Atributos produtivos e qualitativos do café em relação ao red, green e blue obtidos pelo método do SPM em um Argissolo no Planalto Ocidental Paulista.

Os resultados obtidos, utilizando as variáveis da cor, indicaram semelhanças no desempenho de ambos os métodos. Isso indica que o SPM, por capturar os sinais RGB de maneira rápida e prática, garante seu uso em áreas agrícolas. Assim, por obter informações dos atributos do solo e da planta de maneira não destrutiva, o método do SPM propõe uma tática sustentável de uso do solo. Ainda assim, as imagens podem ser arquivadas durante um período de tempo, para posterior avaliação dos atributos. Não apenas no Brasil, o uso das câmeras digitais vem sendo utilizado no mundo, propondo monitorar o solo e as culturas (LEVIN; BENDOR; SINGER, 2007; VISCARRA-ROSSEL; FOUAD; WALTER, 2008; GÓMEZ-ROBLEDO et al., 2013; JIA et al., 2014). Estas pesquisas também verificaram a eficiência do uso das câmeras digitais, comparada aos equipamentos mais caros e complexos de serem operados no campo. Assim, o efeito desejado do uso do SPM foi facilitar a obtenção das informações tecnológicas de campo, com rapidez e precisão.

2.4 Conclusões

Os métodos do SPM e ERD foram eficientes na identificação das variáveis da cor do solo (RGB). Os sinais RGB podem, assim, ser utilizados para quantificar atributos físico-químicos do solo e da planta. As funções de pedotransferência geradas podem estimar a argila, CTC, P, EC, F_t , P_{17} , defeitos e produtividade.

Para a variável produtividade, quando o RGB_{SPM} variou entre 159; 127 e 106, respectivamente, foram observados maiores produções. Para a variável defeito, os menores valores foram observados nos locais onde o RGB foi de 150; 121 e 102, respectivamente. Os grãos retidos na P_{17} ocorreram nos locais onde RGB_{SPM} do solo foi de 147; 119 e 96, respectivamente.

Os resultados indicam que o SPM, por ser eficiente, rápido e prático, pode ser explorado por todos, ou seja, na pesquisa, na extensão e por empresas agrícolas. Este instrumento é de fácil manuseio e detém precisão na geração de informações não destrutivas de atributos do solo e da planta.

2.5 Referências

BAHIA, A. S. R. S.; MARQUES JR., J.; SIQUEIRA, D. S. Procedures using diffuse reflectance spectroscopy for estimating hematite and goethite in Oxisols of São Paulo, Brazil. **Geoderma Regional**, v. 5, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geodrs.2015.04.006>.

BARRÓN, V.; MELLO, J. W. V.; TORRENT, J. Caracterização de óxidos de ferro em solos por espectroscopia de reflectância difusa. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.). **Tópicos de ciência do solo**. 2. ed. Viçosa: SBCS, 2000. p. 139-161.

BEDIDI, A.; CERVELLE, B.; MADEIRA, J.; POUGET, M. Moisture effects on visible spectral characteristics of lateritic soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 153, n. 2, p. 129-141, 1992.

BERNS, R. S. **Billmeyer and Saltzman's. Principles of Color Technology**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 2000. 272p.

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

CAMARGO, L. A.; MARQUES JR., J.; PEREIRA, G. T.; ALLEONI, L. R. F.; BAHIA, A. S. R. DE S.; TEIXEIRA, D. B. Pedotransfer functions to assess adsorbed phosphate using iron oxide content and magnetic susceptibility in an Oxisol. **Soil Use and Management**, v. 32, n. 2, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1111/sum.12255>.

CARMO, D. A. B.; MARQUES JR., J.; SIQUEIRA, D. S.; BAHIA, A. S. R.; SANTOS, H. M.; POLLO, G. Z. Cor do solo na identificação de áreas com diferentes potenciais produtivos e qualidade de café. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 9, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2016000900026>.

COMMISSION INTERNATIONALE L'ECLARIRAGE - CIE.. **Proceedings of the eight session**. Cambridge: England, 1931. np. (Bureau central de la CIE, Paris).

DALMOLIN, R. S. D.; GONÇALVES, C. N.; KLAMT, E.; DICK, D. P. Relação entre os constituintes do solo e seu comportamento espectral. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 2, 2005. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782005000200042>.

DANTAS, J. S.; MARTINS FILHO, M. V.; MARQUES JR., J.; RESENDE, J. M.; TEIXEIRA, D. D. B.; BARBOSA, R. S.; SIQUEIRA, D. S. Coeficiente de erodibilidade em sulcos e entressulcos de Argissolos coesos estimado pela cor do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 49, n. 9, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2014000900006>.

DAY, P.R. Particle fractionation and particle - size analysis. In: BLACK, C. A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: Agronomy Society of America, 1965. v. 1, p. 545-566.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - Embrapa. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212p. (EMBRAPA-CNPS: Documentos:1).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - Embrapa. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2013. 353p.

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

GÓMEZ-ROBLEDO, L.; LÓPEZ-RUIZ, N.; MELGOSA, M.; PALMA, A. J.; CAPITÁN-VALLVEY, L. F.; SÁNCHEZ-MARAÑÓN, M. Using the mobile phone as Munsell soil-colour sensor: An experiment under controlled illumination conditions. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 99, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2013.10.002>.

HONG, G.; LUO, M. R.; RHODES, P. A. Study of Digital Camera Colorimetric Characterization Based on Polynomial Modeling. **Color Research and Application**, v. 26, n. 1, 2001. Disponível em: [http://dx.doi.org/10.1002/1520-6378\(200102\)26:1<76::AID-COL8>3.0.CO;2-3](http://dx.doi.org/10.1002/1520-6378(200102)26:1<76::AID-COL8>3.0.CO;2-3).

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS DO ESTADO DE SÃO PAULO - IPT. **Mapa geomorfológico do Estado de São Paulo**. São Paulo: IPT, 1981. (IPT Publicação, 1.183; IPT Monografia, 5).

JIA, B.; HE, H.; MA, F.; DIAO, M.; JIANG, G.; ZHENG, Z.; CUI, J.; FAN, H. Use of a Digital Camera to Monitor the Growth and Nitrogen Status of Cotton. **The Scientific World Journal**, v. 2014, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1155/2014/602647>.

LEÓN, K.; MERY, D.; PEDRESCHI, F.; LEÓN, J. Color measurement in $L^*a^*b^*$ units from RGB digital images. **Food Research International**, v. 39, 2006. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.foodres.2006.03.006>.

LEVIN, N.; BEN-DOR, E.; SINGER, A. A digital camera as tool to measure colour indices and related properties of sandy soils in semi-arid environments. **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, n. 24, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01431160500099444>.

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

McBRATNEY, A. B.; MINASNY, B.; CATTLE, S. R.; VERVOORT, R. W. From pedotransfer functions to soil inference systems. **Geoderma**, Amsterdam, v. 109, p. 1-2, 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(02\)00139-8](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(02)00139-8).

MEHRA, O. P.; JACKSON, M. L. Iron oxide removal from soil and clays by dithionite - citrate system buffered with sodium bicarbonate. **Clays and clay minerals: proceedings of the Seventh National Conference**, p. 317-327, 1960.

MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO – MAPA. INSTRUÇÃO NORMATIVA Nº 8, DE 11 DE JUNHO DE 2003. **BINAGRI – SISLEGIS**, Brasília, 13 de jun. de 2003. Disponível em: <http://sistemasweb.agricultura.gov.br/sislegis/action/detalhaAto.do?method=visualizarAtoPortalMapa&chave=550412066>. Acesso em: 31 jan. 2018.

MUNSELL SOIL COLOR COMPANY. **Munsell color soil charts**. Baltimore, 2000.
O'DONNELL, T. K.; GOYNE, K. W.; MILES, R. J.; BAFFAUT, C.; ANDERSON, S. H.; SUDDUTH, K. A. Determination of representative elementary areas for soil redoximorphic features identified by digital image processing. **Geoderma**, Amsterdam, v. 161, n. 3-4, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2010.12.011>.

PELUCO, R. G.; MARQUES JR., J.; SIQUEIRA, D. S.; PEREIRA, G. T.; BARBOSA, R. S.; TEIXEIRA, D. B. Mapeamento do fósforo adsorvido por meio da cor e da suscetibilidade magnética do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 3, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2015000300010>.

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

RAIJ, B. V.; KUPPER, A. Capacidade de troca de cátions em solos. Estudo comparativo de alguns métodos. **Bragantia**, Campinas, v. 25, n. 30, p. 327-336, 1966.

RESENDE, J. M. A.; MARQUES JR., J.; MARTINS FILHO, M. V.; DANTAS, J. S.; SIQUEIRA, D. S.; TEIXEIRA, D. D. B. Variabilidade espacial de atributos de solos coesos do leste maranhense. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 4, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832014000400004>.

RODRÍGUES-PULIDO, F. J.; GÓMEZ-ROBLEDO, L.; MELGOSA, M.; GORDILLO, B.; GONZÁLEZ-MIRET, M. L.; HEREDIA, F. J. Ripeness estimation of grape berries and seeds by image analysis. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 82, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.01.004>.

SÁNCHEZ-MARAÑÓN, M.; GARCÍA, P. A.; HUERTAS, R.; HERNÁNDEZ-ANDRES, J.; MELGOSA, M. Influence of natural daylight on soil color description: assessment using a color-appearance model. **Soil Science Society of America Journal**, v. 75, n. 3, p. 984-993, 2011.

SÁNCHEZ-MARAÑÓN, M.; HUERTAS, R.; MELGOSA, M. Colour variation in standard soil-colour charts. **Australian Journal of Soil Research**, v. 43, n. 7, 2005. Disponível em: <https://doi.org/10.1071/SR04169>.

SCHWERTMANN, U. Differenzierung der Eisenoxide des Bodens durch Extraktion mit Ammoniumoxalat-Lösung. **Jornal of Plant Nutrition and Soil Science**, v. 105, n. 3, 1964. Disponível em: <https://doi.org/10.1002/jpln.3591050303>.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**. 11. ed. Washington: Soil Survey Staff, Department of Agriculture, 2014. 372p.

SOIL SURVEY STAFF. **Soil taxonomy**: A basic system of soil classification of making and interpreting soil surveys. 2. ed. Washington/USDA-Natural Resources Conservation Service: Soil Taxonomy, 1999. 886p. (Agriculture Handbook, 436).

THORNTHWAITE, C. W. An Approach toward a Rational Classification of Climate. **Geographical Review**, v. 38, n. 1, p. 55-94, 1948.

TORRENT, J.; BARRÓN, V. Diffuse reflectance spectroscopy. In: Ulery, A.L.; Drees, L.R. (Eds.). **Methods of Soil Analysis. Part 5. Mineralogical Methods**. Madison: Soil Science Society of America, 2008. p. 367-385. (SSSA Book Series, 5).

_____. Laboratory measurement of soil color: Theory and practice. Soil color. **Soil Science Society of America**, p. 21-33, 1993. (SSSA, Special Publication, 31).

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, v. 38, 1985. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60673-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60673-2).

VISCARRA-ROSSEL, R. A. Fine-resolution multiscale mapping of clay minerals in Australian soils measured with near infrared spectra. **Journal of Geophysical Research**, v. 116, n. F4, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2011JF001977>.

VISCARRA-ROSSEL, R. A.; FOUAD, Y.; WALTER, C. Using a digital camera to measure soil organic carbon and iron contents. **Biosystems Engineering**, v. 100, n. 2, 2008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.02.007>.

VISCARRA-ROSSEL, R. A.; MINASNY, B.; ROUDIER, P.; McBRATNEY, A. B. Colour space models for soil science. **Geoderma**, Amsterdam, v. 133, n. 3-4, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.07.017>.

VISCARRA-ROSSEL, R. A.; WEBSTER, R. Discrimination of Australian soil horizons and classes from their visible-near infrared spectra. **European Journal of Soil Science**, v. 62, n. 4, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2389.2011.01356.x>.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed). **Applications of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. cap. 13, p. 319-344.

WESTLAND, S.; RIPAMONTI, C.; CHEUNG, V. **Computational Colour Science using MATLAB®**. 2. ed. Wiley, 2012 . p. 220.

WYSZECKI, G.; STILES, W.S. **Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae**. 2. ed. New York, 1982. p. 968.

CAPÍTULO 3 – Dados espectrais dos solos do Planalto Ocidental Paulista por sensores próximos

RESUMO – A informação espectral tornou-se uma tecnologia de obtenção rápida e menos onerosa dos atributos do solo. Desta forma, esta pesquisa objetivou criar protocolos de uso do solo, baseado na cor, utilizando o método da espectroscopia de reflectância difusa - ERD, bem como do sensor próximo móvel - SPM. A área de estudo localiza-se no centro-oeste do Estado de São Paulo, uma área de 13 milhões de hectares, conhecida como Planalto Ocidental Paulista. Na região, ocorre predomínio de Argissolo Vermelho-Amarelo, Latossolo, Latossolo férrico, Neossolo litólico, Nitossolo Vermelho e Gleissolo háplico. Um total de 600 amostras, na profundidade de 0,00-0,20 metros, foi coletado ao longo das rodovias do estado em distância que variou de 10 a 60 quilômetros (km). Em cada amostra, determinaram-se informações sobre a cor do solo, sendo matiz, valor, croma, red, green e blue. Os dados obtidos através dos métodos mostraram similaridade na obtenção dos resultados das variáveis da cor. O alcance observado nos semivariogramas da ERD, para as variáveis matiz, valor, croma, red, green e blue, foram: 112 km, 216 km, 19 km, 207 km, 183 km e 158 km, respectivamente. Com o uso do SPM, os alcances foram de: 19 km, 226 km, 30 km, 160 km, 218 km e 75 km, respectivamente. Propôs criar semivariogramas cruzados para estimar atributos físico-químicos (Argila, capacidade de troca catiônica - CTC, fósforo - P e hematita - Hm). Os alcances dos semivariogramas cruzados explicaram a distância máxima de correlação observada entre as variáveis. Os resultados do SPM mostraram que a cor, nos sistemas red, green e blue, pode ser utilizada na predição do teor de argila (77%), CTC (99%), P (90%) e Hm (70%). Com o uso da ERD, os sistemas red, green e blue predizem o teor de argila (79%), CTC (94%), P (86%) e Hm (67%). Os atributos físico-químicos seguiram o padrão de compartimentalização da mineralogia e variáveis da cor. De fato, os dados espectrais propõem um método sustentável de mapeamento, podendo obter maior número de amostras e melhor caracterização do solo.

Palavras-chave: Sensor próximo móvel, Espectroscopia de reflectância difusa, Geoestatística, Protocolo de mapeamento

3.1 Introdução

A cor é uma característica expressa pela percepção da luz, refletida dos objetos aos olhos humanos. Por ser de fácil avaliação, é utilizada desde o início das civilizações para diversas finalidades, inclusive para a diferenciação dos solos. Atualmente, a cor é considerada um atributo diagnóstico, utilizada para classificação de algumas classes de solos no segundo nível categórico do sistema brasileiro de classificação (EMBRAPA, 2013). Pelos pedólogos, a caracterização da cor é feita pela Carta de cores de Munsell (MUNSELL SOIL COLOR COMPANY, 2000).

A escala Munsell é baseada na percepção visual, comparando-se cores padrões com as amostras de solo. A definição do atributo é dada por três variáveis: matiz, valor e croma. O matiz faz referência das relações entre o vermelho e o amarelo, o valor a uma escala de luminosidade e o croma à pureza ou à intensidade da cor em relação ao cinza. Logo, a incidência de luz na amostra, a experiência do profissional e a percepção da cor através do olho humano causam muita subjetividade nas variáveis (BARRÓN; MELLO; TORRENT, 2000; CAMPOS; DEMATTÊ, 2004).

O avanço da tecnologia permitiu a criação do espectrofotômetro de reflectância difusa, que transforma a cor do solo em dados numéricos. Este método permitiu a aquisição quali-quantitativa por meio da reflectância da energia que foi incidida na amostra (TORRENT; BARRÓN, 2008). A análise dos dados em softwares, associada a profissionais capacitados na interpretação destes resultados, permite o uso da ferramenta para planejamento agrícola e definição de zonas de manejo (MARQUES JR. et al., 2014), em estudo de gênese do solo (DANTAS et al., 2014a), no potencial de erosão (DANTAS et al., 2014b), no potencial de adsorção de fósforo (CAMARGO et al., 2015; PELUCO et al., 2015), na caracterização mineralógica (VISCARRA-ROSSEL, 2011; BAHIA; MARQUES JR.; SIQUEIRA, 2015; FERNANDES et al., 2017) e no conteúdo de matéria orgânica (DEMATTÊ et al., 2011).

O maior detalhamento de estudos baseados na cor é possível porque esta é covariativa dos atributos do solo, como a umidade, o conteúdo de matéria orgânica, a granulometria e, principalmente, a mineralogia expressa pelos óxidos de ferro (SCHULZE et al., 1993; BARRÓN; MELLO; TORRENT, 2000). Todavia, mesmo sendo o espectrofotômetro um equipamento de investimento único, seu uso no

campo é limitado e caro; logo, nem todos podem ter fácil acesso à tecnologia. Como alternativa de baixo custo, novas iniciativas têm sugerido o uso do sensor próximo móvel (SPM) para a caracterização da cor e dos atributos do solo.

O SPM fornece imagens em pixels, e, a partir do processamento computacional das imagens, os pixels são convertidos em cores padrões de RGB, do inglês red, green e blue (VISCARRA-ROSSEL et al., 2006; RODRIGUEZ PULIDO et al., 2012). De outro modo, os dados em reflectância, obtidos pelo espectrofotômetro, podem ser convertidos em triestímulos básicos, conforme a proposta da Comissão Internacional da Iluminação (CIE, 1931), e em sistema de cor RGB. Ambos os dados podem ser convertidos na escala de cor Munsell, permitindo a classificação da cor e da classe dos solos, bem como de seus atributos.

Estudos sobre o uso do SPM confirmaram que este sensor é eficiente para a caracterização da cor do solo. Por exemplo, Levin, Ben-Dor e Singer (2007) utilizaram a câmera digital para medir o ferro e as partículas finas do solo. Viscarra Rossel, Fouad e Walter (2008) compararam o uso de uma câmera digital com um espectrômetro vis-NIR para prever o carbono orgânico do solo. Gómez-Robledo et al. (2013) verificaram o potencial de um telefone celular para capturar imagens de cores do solo. O SPM, como ferramenta para medir os índices de cor, permite mapear atributos físico-químicos do solo. Deste modo, apenas alguns estudos têm proposto o uso da câmera digital para medidas rápidas da reflectância do solo. Dentro deste enfoque, este estudo teve como objetivos: I) Caracterização da cor do solo, utilizando a espectroscopia de reflectância difusa e a câmera próximo móvel. II) Avaliar a relação das variáveis da cor com os atributos do solo. III) Propor protocolos de manejo para solos do Planalto Ocidental Paulista, definindo zonas específicas de manejo.

3.2 Material e Métodos

3.2.1 Caracterização da área e amostragem

A pesquisa foi realizada no Planalto Ocidental Paulista, área correspondente a aproximadamente 48% do Estado de São Paulo, totalizando 13 milhões de hectares (Figura 1a). Deste total, 2 milhões de hectares são ocupados pela geologia do basalto, formação Serra Geral (15,5%). A geologia do arenito ocupa 7,4 milhões

de hectares, formação Vale do Rio do Peixe (57,1%) (Figura 1b). Outras formações sedimentares ocupam 27,5%, um total de 3,6 milhões de hectares (FERNANDES; CASTRO; BASILICI, 2007). Os solos de maior ocorrência são classificados segundo a EMBRAPA (2013) como: Argissolo Vermelho-Amarelo, Latossolo, Latossolo férrico, Neossolo litólico, Nitossolo Vermelho e Gleissolo háplico (Figura 1d).

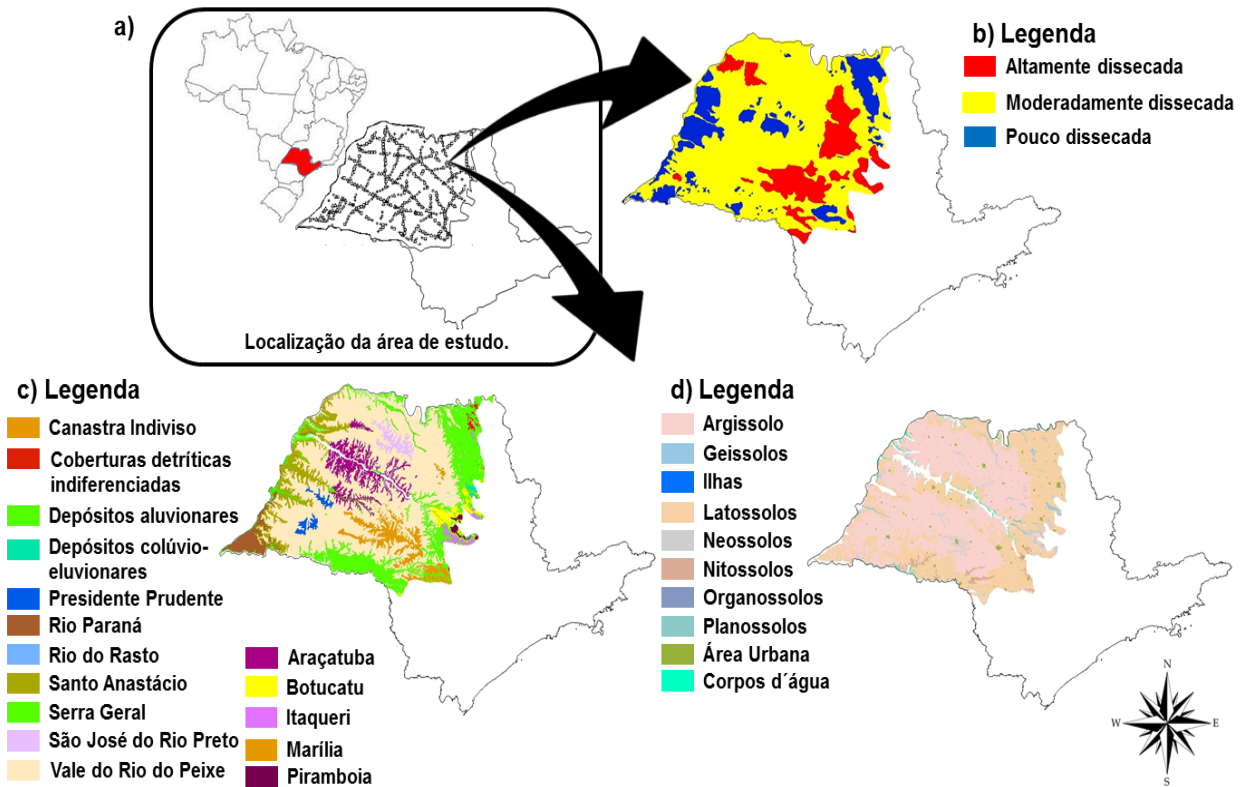


Figura 1. Mapa do Brasil, mapa do Estado de São Paulo e planejamento amostral (Planalto Ocidental Paulista) para locais com conhecimento prévio dos agentes causadores de variabilidade (a); Esquema simplificado do grau de dissecção da paisagem, adaptado de Silva (2016) e projeto CNPQ (Proc.nº 402796/2016-0) (b). Mapa geológico na escala semidetalhada 1:200.000, adaptado de Fernandes, Castro e Basilici (2007) (c); Mapa pedológico do Estado de São Paulo. Informações Técnicas: Instituto Agrônomo de Campinas, v.52, 2000. Disponível em: <<http://www.iac.sp.gov.br/publicacoes/agronomico/pdf/mapa.pdf>>. Acessado em: 31 ago. 2015 (d).

A altitude do Planalto Ocidental Paulista está entre 357 e 610 m. Conforme a classificação de Thornthwaite (1948), nas regiões norte e noroeste, predomina o clima tropical, com estação seca de inverno (C2rA'a'). Enquanto na região sul, o clima temperado úmido prevalece, com verão quente (B4rB'4a). Nas regiões leste e sudeste, o clima é temperado, com inverno seco e verão quente (B2rB'3a). A área naturalmente era ocupada pela vegetação de Mata Atlântica na região oeste, e nas

regiões leste e sudoeste havia predomínio do Cerrado. Atualmente, o uso do solo está ocupado pelo cultivo da cana-de-açúcar e por pastagens.

O mapa de intensidade de formas do terreno (modelo pedogeomorfológico, Apêndice II) apresenta o comportamento do Planalto Ocidental Paulista, mediante os compartimentos presentes na paisagem (VASCONCELOS et al., 2012). Posteriormente, Silva (2016) elaborou o mapa de unidades de dissecção (Figura 1b), sugerindo três estágios de dissecção da paisagem, sendo: pouco dissecado (Pd), moderadamente dissecado (Md) e altamente dissecado (Ad). Estes mapas foram relacionados com os mapas da cor, obtidos através dos métodos do sensor próximo móvel (SPM) e da espectroscopia de reflectância difusa (ERD).

A amostragem levou em consideração a base do arquivo de rodovias do Estado de São Paulo, fornecido pelo Departamento de Estradas de Rodagem (DER). Com isso, criou-se um plano de amostragem, por meio da ferramenta ET GeoWizards, no ArcView 9.3. Essa amostragem promoveu representação espacial na área de estudo, especialmente nos compartimentos geológicos do Planalto Ocidental Paulista (Figura 1c). Um total de 600 amostras foi coletado ao longo das rodovias (Estado SP), em um espaçamento mínimo de 10 quilômetros (km), até o espaçamento máximo de 60 km. Coletou-se o solo na profundidade de 0,00-0,20 metro (m), buscando coletar em áreas com mínima interferência antrópica. A escolha dos pontos amostrados levou em conta experiências anteriores, dentro do Planalto Ocidental Paulista, utilizando técnicas geoestatísticas (MONTANARI et al., 2005, 2012; SOUZA et al., 2006; TEIXEIRA et al., 2013; MARQUES JR. et al., 2015), propondo uma distribuição representativa da área estudada.

3.2.2 Obtenção da imagem por sensor próximo móvel (SPM), e espectroscopia de reflectância difusa (ERD)

O uso do SPM para estudos no Planalto Ocidental Paulista seguiu a metodologia apresentada no item 2.2.2 do capítulo 2 (Figura 2 e Figura 3 do Capítulo 2). As amostras foram maceradas e acomodadas em laboratório, totalizando 600 amostras, na profundidade de 0,00-0,20 m. O método utilizou amostras contendo 0,5 grama (g) de terra fina seca ao ar (TFSA), acomodada em porta-amostras com diâmetro de 3,0 × 0,5 centímetros (cm), obtendo posteriormente imagens através do método do SPM. As imagens obtidas foram analisadas,

determinando, assim, os valores de RGB (Red, Green e Blue). Com estes resultados (RGB), obtiveram-se os valores de matiz, valor e croma, mediante o programa Munsell Conversion - versão 6.4, conforme Barrón, Mello e Torrent (2000) e Viscarra-Rossel (2011).

As 600 amostras foram submetidas ao método da ERD, usando um sensor Lambda 950 UV/VIS/NIR (Item 2.2.3 e Figura 4 do Capítulo 2). As amostras de 0,5 g de TFSA foram acomodadas em porta-amostras individuais (3,0 × 0,5 cm). Efetuou-se em cada amostra uma varredura de reflectância na faixa do visível, entre 380 e 780 nanômetros (nm), em um intervalo de 0,5 nm, conforme metodologia de Torrent e Barrón (2008). Com isso, determinaram-se os valores triestímulos XYZ, definidos pela Comissão Internacional da Iluminação (CIE, 1931; WYSZECKI; STILES, 1982). Posteriormente, com base nas coordenadas XYZ, deduziram-se os valores do sistema Munsell, sendo: matiz (H), valor (V) e croma (C). O programa Munsell Conversion, versão 6.4, foi utilizado para deduzir os valores Munsell, cuja metodologia está disposta na Figura 4 do Capítulo 2.

Um total de 7.200 informações sobre a cor do solo dentro do Planalto Ocidental Paulista foram geradas, mediante os métodos do SPM e ERD. Por meio destes métodos, foi possível analisar o RGB, matiz, valor e croma, sendo as principais variáveis da cor do solo. Estes resultados foram utilizados no mapeamento da distribuição das variáveis da cor, propondo entender as variações dos atributos do solo dentro do Planalto Ocidental Paulista.

3.2.3 Análises químicas e granulométricas

As análises químicas e granulométricas foram realizadas em 300 amostras, com a finalidade de utilizá-las nos semivariogramas cruzados e na confecção dos mapas de cokrigagem. A granulometria (argila) foi determinada pelo método da pipeta, utilizando uma solução de NaOH 0,1 mol l⁻¹ como dispersante químico e agitação mecânica em aparato de baixa rotação, por 16 horas, conforme metodologia recomendada pela EMBRAPA (1997). A capacidade de troca de cátions do solo (CTC) foi calculada a partir dos valores das bases (Ca²⁺ + Mg²⁺ + K⁺ + H⁺ + Al³⁺), utilizando-se de uma solução de acetato de cálcio (C₄H₆O₄Ca 1 N pH 7,0) como cátion saturante, e uma solução de acetato de sódio (C₂H₃NaO₂ 1N pH 7,0) como deslocante (RAIJ; KUPPER, 1966). O fósforo disponível (P_{DISP}) foi extraído

segundo o método da resina trocadora de íons, sendo determinado por colorimetria (RAIJ et al., 2001). Os teores de hematita (Hm) foram determinados pela ERD, em um espectrômetro da Perkin Elmer Lambda 950 UV/Vis/NIR, proposto por Torrent e Barrón (2008).

3.2.4 Análises estatísticas e geoestatística

Os valores médios, erro da média, desvio-padrão (DP), coeficiente de variação (CV), mínimo (Mín.) e máximo (Máx.) das variáveis da cor foram calculados utilizando o software estatístico Minitab® 14 (MINITAB, 2000). Utilizou-se o teste t de Student, pareado a 5% de probabilidade, para avaliar a diferença da média entre os métodos (ERD e SPM). Propôs-se, conforme a geologia (arenito e basalto), construir gráficos de barras que descrevessem o comportamento das variáveis da cor em cada geologia. Estas informações foram úteis para entender os limites dos atributos da cor, com os limites geológicos e a dissecação da paisagem.

Na segunda fase do estudo, propondo identificar os limites das unidades de mapeamento, realizou-se a análise geoestatística (MATHERON, 1963; ISAACS; SRIVASTAVA, 1989). A dependência espacial foi avaliada pelos ajustes de semivariogramas, em que a Equação 1 deduz a estacionariedade da hipótese intrínseca (VIEIRA et al., 1983).

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

em que, $\hat{\gamma}(h)$ é a variância experimental em uma distância de separação h ; $N(h)$ são os números de pares experimentais de observações $z(x_i)$; $z(x_i + h)$ separados pela distância h ; e Z : representa os valores medidos para atributos do solo.

O semivariograma é representado pelo gráfico $\hat{\gamma}(h)$ versus (h) , sendo modelado com o auxílio do software GS+ (Geostatistics for Environmental Sciences), conforme Robertson (1998). Estes semivariogramas foram propostos com base no cálculo da semivariância dos primeiros lags, número de pares, patamar visivelmente definido e no valor de R^2 do modelo ajustado (BURROUGH; McDONNEL, 1998).

Assim, os parâmetros estabelecidos no semivariograma foram: efeito pepita (C_0), patamar (C_0+C), alcance (a) e o grau de dependência espacial (GDE), conforme o Apêndice III. O GDE (Equação 2) foi determinado conforme critérios de Cambardella et al. (1994), em que:

$$\text{GDE} = \left(\frac{C}{C_0 + C} \right) \times 100 \quad [\text{Equação 2}]$$

em que, o GDE é o grau de dependência espacial; C = contribuição da semivariância ($C_0 + C - C_0$) e $C_0 + C$ = patamar.

Assim, levando em consideração o efeito pepita (C_0) e o patamar (C_0+C_1), Cambardella et al. (1994) definiram-se as classes de dependência espacial das variáveis do solo, sendo:

- 1) Forte dependência espacial: $\frac{C_0}{C_0 + C_1} \leq 25 \%$;
- 2) Moderada dependência espacial: $\frac{C_0}{C_0 + C_1}$ entre 25 % e 75 %; e
- 3) Fraca dependência espacial: $\frac{C_0}{C_0 + C_1} > 75 \%$.

Constatada a dependência espacial, foram confeccionados mapas da distribuição espacial das variáveis da cor do solo. Esta estimativa em pontos não amostrados, a partir dos pontos vizinhos, é realizada por um interpolador geoestatístico (krigagem ordinária). Os mapas foram confeccionados através do software Surfer®, versão 8, programa consagrado em estudos sobre os atributos do solo (SILVA JÚNIOR et al., 2012; PELUCO et al., 2015; CARMO et al., 2016). Estes mapas propõem a interpretação da variabilidade espacial de um atributo estudado (GREGO; VIEIRA, 2005), buscando entender sua distribuição na paisagem. No entanto, o valor estimado em locais não amostrados, é definido pela Equação 3:

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \quad [\text{Equação 3}]$$

em que, $\hat{Z}(x_0)$ é o valor estimado para locais não amostrados (x_0); λ_i é o peso atribuído a cada valor amostrado $Z(x_i)$; n é o número de pontos vizinhos usados na estimativa; e $Z(x_i)$ é o valor da variável Z no local x_i .

A terceira fase do estudo consistiu em correlacionar as variáveis da cor (matiz, valor, croma, red, green e blue) com os atributos do solo (Argila, CTC, P e Hm), através do semivariograma cruzado (software GS+, Geostatistics for Environmental Sciences). Estes resultados permitiram verificar o grau de dependência espacial entre as variáveis (VIEIRA et al., 1983) na paisagem. Assim, buscando a espacialização destes atributos do solo em função da cor, utilizou-se a extensão multivariada da krigagem, denominada como cokrigagem. O uso da cokrigagem deve-se à maior precisão quando comparado à krigagem ordinária, principalmente quando o variograma cruzado apresenta dependência espacial entre as duas variáveis (VIEIRA, 2000). O variograma cruzado (Equação 4) expressa a correionalização de duas variáveis, z e y (DEUTSCH; JOURNAL, 1998).

$$\hat{\gamma}_{zy}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=l}^{N(h)} [z(x_i) - z(x_i + h)][y(x_i) - y(x_i + h)] \quad \text{[Equação 4]}$$

em que, $\hat{\gamma}_{zy}(h)$ é a variância cruzada experimental em uma distância de separação h ; $z(x_i)$ é o valor da variável primária (a ser estimada) no ponto i ; e $N(h)$ é o número de pares de pontos separados pela distância h .

Os semivariogramas cruzados são calculados apenas em locais onde as duas variáveis (primária e secundária) são amostradas simultaneamente (DEUTSCH; JOURNAL, 1998). A correlação entre z e y poderá ser negativa ou positiva, assim refletirá no mesmo padrão do semivariograma cruzado. Havendo correlação espacial entre as duas variáveis, a estimativa de uma das variáveis pode ser feita usando informação da outra variável de fácil obtenção, propondo a cokrigagem (GOOVAERTS, 1997). Com isso, a cokrigagem propõe a variação espacial/temporal simultânea entre duas variáveis aleatórias e fortemente correlacionadas entre si (SILVA et al., 2010). Alguns estudos, como os de Han, Schneider e Evans (2003), recomendam a técnica da cokrigagem, pois fornece melhores estimativas quando comparada ao método da krigagem ordinária. Portanto, a cokrigagem é dependente das funções definidas e modeladas dos semivariogramas cruzados. No entanto, foram consideradas para fins de cokrigagem as variáveis que apresentaram correlações entre si.

3.3 Resultados e Discussão

A estatística descritiva apresenta os valores da média, erro da média, DP, CV, mín. e máx. dos solos estudados (Tabela 1). Conforme a classificação de Warrick e Nielsen (1980), a variabilidade dos valores de red_{ERD} foi baixa ($CV \leq 12\%$); em $valor_{(ERD/SPM)}$, $croma_{ERD}$, red_{SPM} , $green_{ERD}$ e $blue_{ERD}$, foram moderados ($12\% < CV < 24\%$); e em $matiz_{(ERD/SPM)}$, $croma_{SPM}$, $green_{SPM}$ e $blue_{SPM}$, foram altos ($CV \geq 24\%$). Estes resultados estão de acordo com os encontrados por Botelho et al. (2006), em que encontraram CV de 12,2 % para o valor, e 18,5% para o croma. As variáveis obtidas através do SPM exibiram o CV mais elevado. Esta alta variabilidade reflete a sensibilidade dessas variáveis aos processos de formação do solo, tendo, assim, maior variação na paisagem.

Tabela 1. Parâmetros estatísticos das variáveis da cor do solo, na profundidade de 0,00 - 0,20 m, no Planalto Ocidental Paulista.

Variável	Média	Erro da média	DP	CV(%)	Mín.	Máx.
Matiz ERD	5,22 b	0,06	1,37	26,22	1,32	9,89
Matiz SPM	5,91 a	0,12	2,72	46,06	0,01	9,98
Valor ERD	4,17 a	0,02	0,50	12,05	2,60	5,46
Valor SPM	4,03 b	0,04	0,95	23,52	1,76	6,92
Croma ERD	5,07 a	0,03	0,76	14,89	3,05	9,98
Croma SPM	5,06 a	0,06	1,42	28,13	1,46	8,36
Red ERD	134,84 a	0,56	12,66	9,39	94,00	167,00
Red SPM	127,95 b	1,00	22,65	17,70	74,00	192,00
Green ERD	91,21 a	0,58	13,20	14,47	55,00	127,00
Green SPM	90,94 a	1,09	24,59	27,04	29,00	168,00
Blue ERD	61,38 a	0,47	10,71	17,45	37,00	105,00
Blue SPM	55,32 b	1,13	25,49	46,07	10,00	140,00

Planalto Ocidental Paulista (n: 510 observações); desvio-padrão (DP); coeficiente de variação (CV%); Mín.: Mínimo; Máx.: Máximo.

Houve diferença estatística ao comparar ambos os métodos (SPM e ERD) pelo teste t de Student pareado, a um nível de significância de 5%. As diferenças entre as médias, principalmente para matiz, valor, red e blue, devem-se, sobretudo,

à sensibilidade espectral e à fonte luminosa dos métodos (ERD e SPM) (POST et al., 1993; TORRENT; BARRON, 1993). No entanto, notou-se que as variáveis da cor do solo tiveram similaridade nos métodos para as geologias observadas (Figura 1c). O método do SPM possibilitou utilizar os dados gerados como microindicador de informações inerentes sobre o solo. Sendo a cor covariável dos fatores de formação do solo (JENNY, 1941), as variações da cor contribuíram para a compreensão da distribuição da geologia no Planalto Ocidental Paulista.

Os resultados dos métodos que propõem o uso do sistema Munsell e RGB obtiveram similaridade na obtenção das informações sobre a cor. Os resultados acompanharam a variação do ambiente, diferindo-se nos compartimentos geológicos (arenito/basalto). Os dados de matiz e valor foram maiores no compartimento arenítico (Figura 2). Portanto, na geologia basáltica, houve redução do matiz e valor, sendo maior apenas para a variável croma. Esta variação da cor do solo nos compartimentos geológicos deve-se às condições de formação de cada ambiente (FERNANDES, 2017), que determinam a presença de óxidos de ferro (Fe) no solo (RESENDE, 1976; SCHWERTMANN, 1993) e alteram consideravelmente a cor.

A presença de diversos minerais no solo, com distintas colorações, afetou as características espectrais da cor, dado que a hematita (Hm) e a goethita (Gt) são os principais minerais dos solos tropicais, sobretudo nos solos brasileiros (KÄMPF; CURI, 2000), podendo pigmentar o solo. Por sua vez, estes minerais, apresentando reflectância e absorvância diferentes (KOSMAS et al., 1983; STONER; DERKSEN; MACEDO, 1991; VITORELLO; GALVÃO, 1996), alteram o comportamento espectral do solo, tendo como consequência a variação da cor (matiz, valor, croma e RGB).

Na geologia arenítica, os valores do sistema RGB foram maiores, independentemente do método utilizado. Este comportamento deve-se à absorção da luz em menor frequência, que é manifestada pela cor red; contudo, os valores de matiz acompanham este aumento. Portanto, o valor e o croma seguem o padrão de cores frias, como o green (500-565 nanômetros-nm) e o blue (440-485 nm), demonstrando similaridade entre o método e o comportamento das variáveis. Assim, as variáveis da cor obtidas pelo SPM apresentaram semelhança às obtidas pela ERD. Os resultados propõem o SPM como um método alternativo para analisar atributos do solo de forma prática e objetiva.

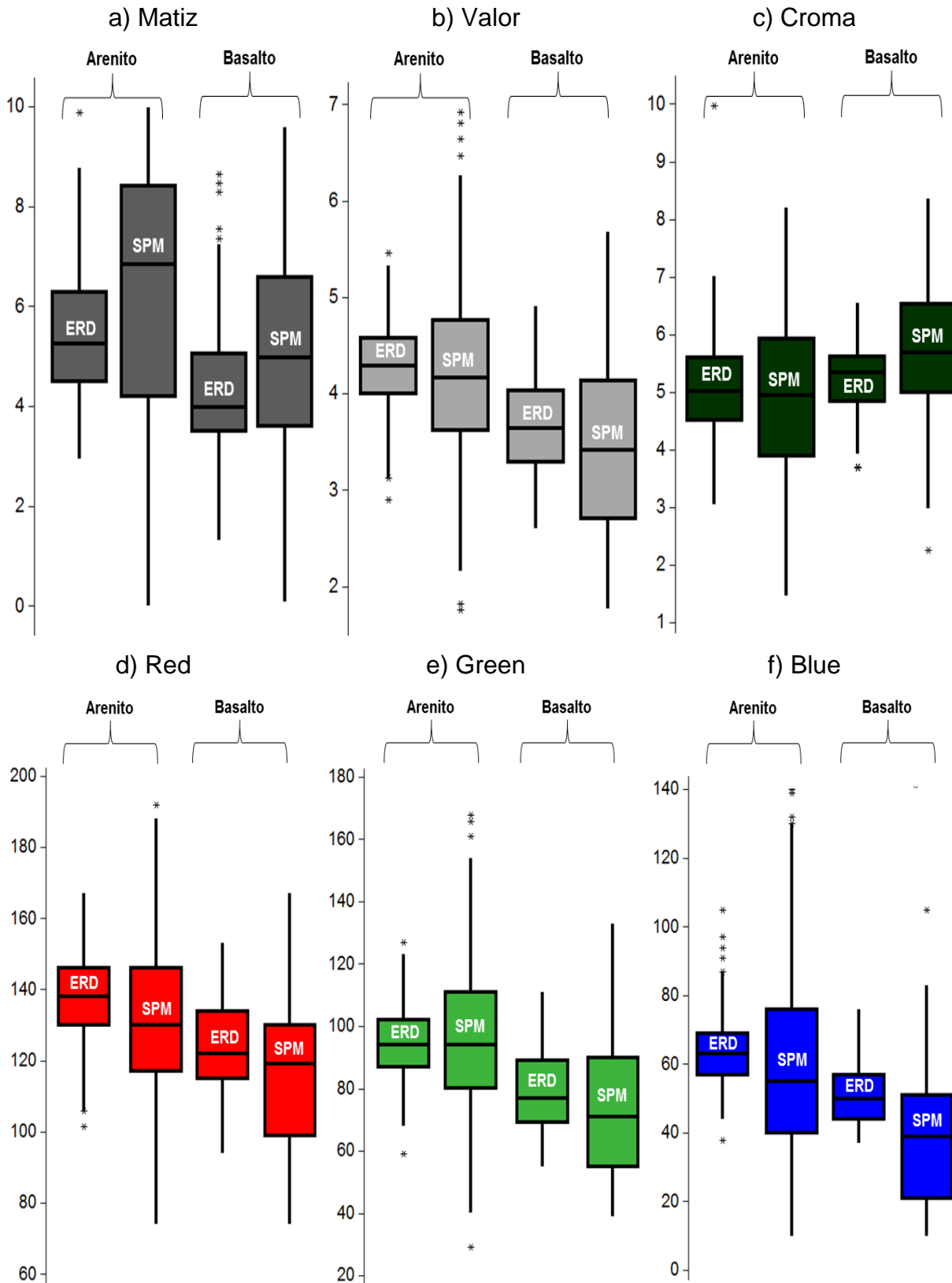


Figura 2. Média e DP da distribuição das variáveis da cor do solo, na profundidade de 0,00-0,20 m, formados a partir de diferentes materiais de origem (arenito e basalto) no Planalto Ocidental Paulista. Cor do sistema Munsell: matiz, valor e cromagem (a, b, c). Cor do sistema RGB: red, green e blue (d, e, f).

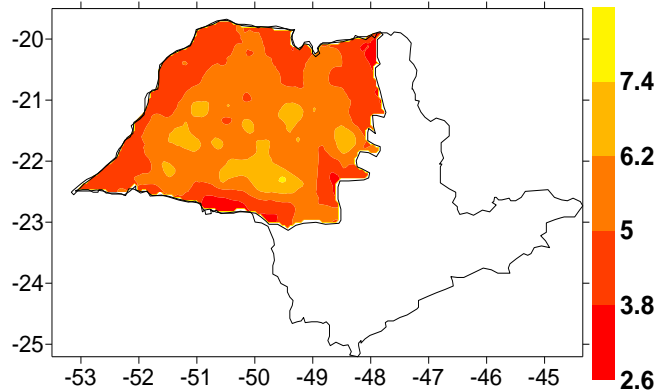
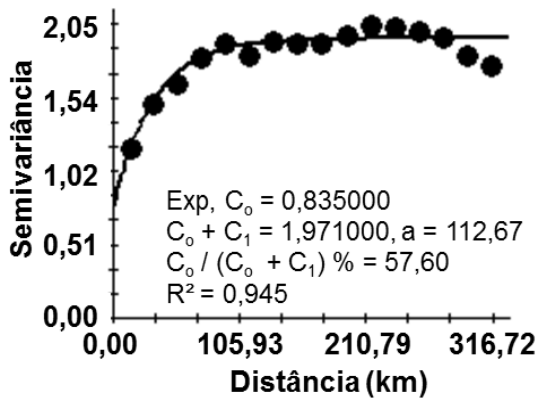
O levantamento de informações sobre os compartimentos do Planalto Ocidental Paulista levou em consideração fatores que limitam as classes pedológicas, que não são homogêneas na paisagem (MONTANARI et al., 2010). Assim, para conhecer a variabilidade dos atributos do solo e seus limites, buscou-se a aplicação da geoestatística, uma técnica consagrada em estudos sobre o solo (McBRATNEY; MENDONÇA SANTOS; MINASNY, 2003). Os mapas gerados através da geoestatística delimitaram os ambientes, propondo metodologias sustentáveis de manejo e conservação do solo para o Planalto Ocidental Paulista.

Com o objetivo de verificar a dependência espacial das variáveis da cor do solo, construíram-se semivariogramas simples, para matiz, valor, croma e RGB, estimados pelos métodos do SPM e ERD (Figura 3 e Figura 4). Foi observada dependência espacial para todas as variáveis da cor. Os modelos propostos apresentaram patamares definidos e valores de R^2 próximos a 1 (BURROUGH; McDONNEL, 1998).

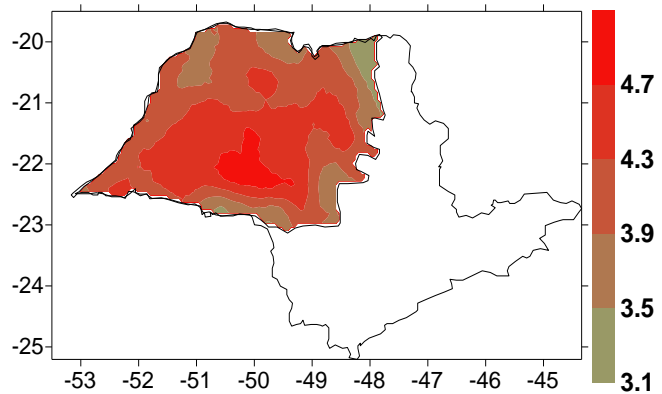
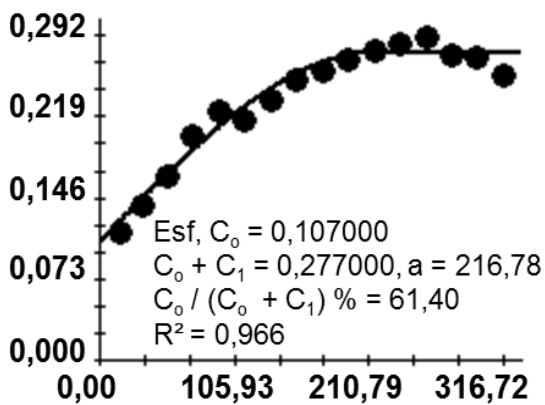
Os modelos esféricos e exponenciais foram utilizados neste estudo. Estes modelos foram confirmados por McBratney e Webster (1986), sendo usuais para explicar o comportamento aplicado em estudos do solo. Esses modelos estão de acordo com o padrão de variabilidade nas formações geológicas (arenito/basalto) dentro do Planalto Ocidental Paulista. Esse comportamento condiz com outros estudos realizados dentro do Planalto Ocidental Paulista, que encontraram modelo exponencial e esférico para variáveis do solo, em cultivo de cana-de-açúcar (PELUCO et al., 2015) e na cafeicultura (CARMO et al., 2016).

Os semivariogramas ajustados ao modelo esférico indicam maior influência da geologia (RAUCH, 2011), propondo melhores ajustes no semivariograma (McBRATNEY; WEBSTER, 1986). Este tipo de ajuste, geralmente, é associado em locais onde as mudanças das variáveis são abruptas. Estas mudanças estão relacionadas ao material de origem (RAUCH, 2011), ao relevo (KRAVCHENKO; BULLOCK, 1998; CAMARGO et al., 2013) e ao solo (MONTANARI et al., 2012). Por outro lado, o modelo exponencial indica uma transição suave das variáveis no ambiente (BURGESS; WEBSTER, 1980), ocasionado pelas ações antrópicas de semelhança da variabilidade.

a) Matiz



b) Valor



c) Croma

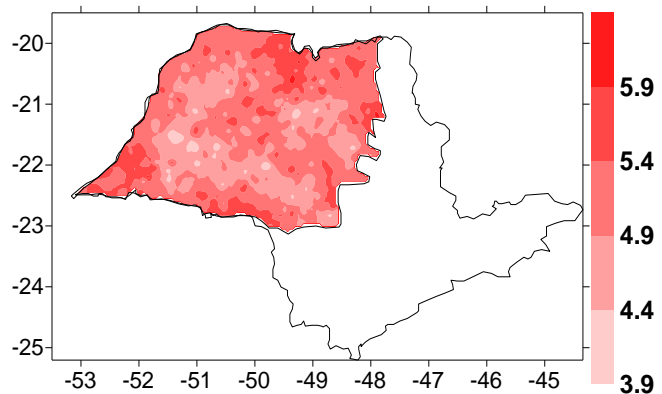
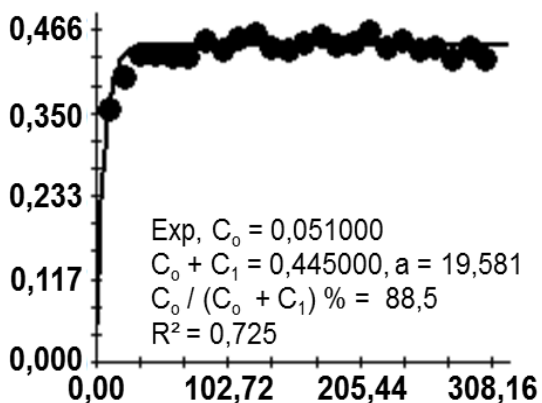
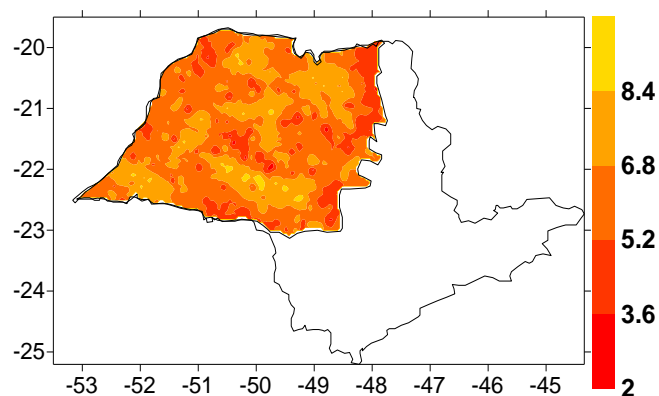
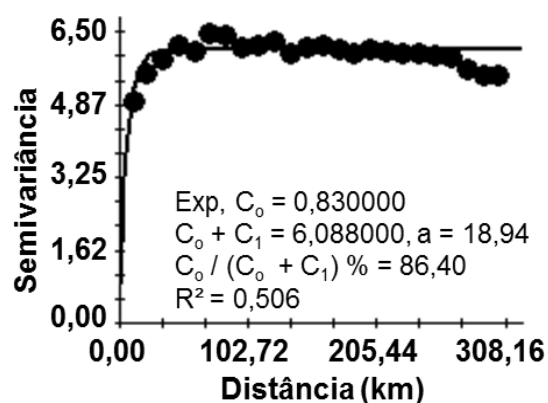
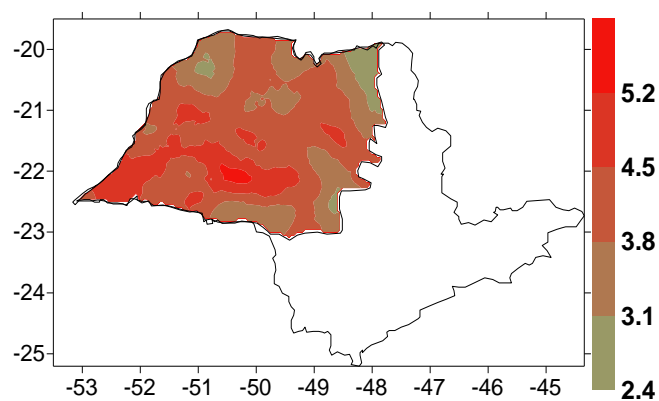
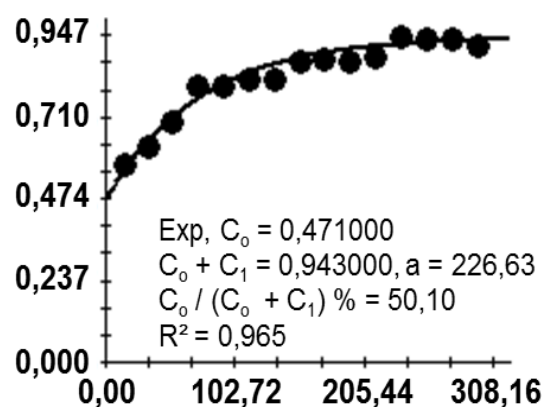


Figura 3. Parâmetros dos modelos de semivariogramas ajustados para as variáveis da cor (matiz, valor e croma); e mapas de distribuição no Planalto Ocidental Paulista, obtidos pelo método da espectroscopia de reflectância difusa - ERD. Esf.: modelo esférico; Exp.: modelo exponencial; C_0 : efeito pepita; $C_0 + C_1$: patamar; a : alcance; $C_0/(C_0+C_1)$: grau de dependência espacial; R^2 : coeficiente de determinação.

a) Matiz



b) Valor



c) Croma

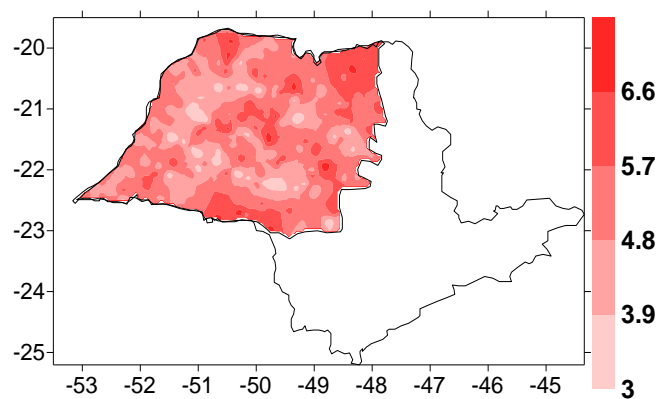
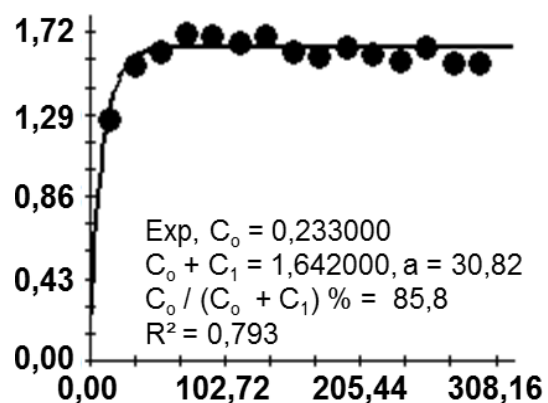


Figura 4. Parâmetros dos modelos de semivariogramas ajustados para as variáveis da cor do solo (matiz, valor e croma); e mapas de distribuição no Planalto Ocidental Paulista, obtidos pelo método do sensor próximo móvel - SPM. Exp.: modelo exponencial; C_0 : efeito pepita; $C_0 + C_1$: patamar; a : alcance; $C_0 / (C_0 + C_1)$: grau de dependência espacial; R^2 : coeficiente de determinação.

Ao estimar o GDE ($C0 / (C0+C1) * 100$), notou-se que as variáveis matiz (57,60 %) e valor (61,40 %), obtidos pelo método da ERD, apresentaram grau de dependência espacial moderado ($25% < GDE < 75%$). Outras variáveis, como o croma (88,5 %), obtiveram fraca dependência espacial ($GDE > 75 %$). Conforme Cambardella et al. (1994), os valores do GDE seguiram o seguinte padrão: $GDE \leq 25%$ (dependência espacial forte); $25% < GDE < 75 %$ (dependência espacial moderada); e $GDE > 75 %$ (dependência espacial fraca).

Em relação ao alcance (a) para as variáveis da cor, observou-se o valor de 19,58 km para o croma, valor mediano de 112,67 km (matiz), até o máximo valor, 216,78 km (valor). Mesmo sendo variáveis da cor (matiz, valor e croma), cada variável correspondeu a um dado intrínseco do solo, ou seja, o matiz (cor dominante), o valor (tonalidade) e o croma (intensidade). Isso explica a variabilidade distinta presente no padrão de distribuição das variáveis na paisagem. Assim, o alcance (a) obtido é um indicador da homogeneidade da variável estudada, que auxilia no planejamento amostral (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989; MONTANARI et al., 2012). Outros estudos encontram alcances inferiores, utilizando o método da ERD, como as observações de Peluco et al. (2015), que obtiveram alcance de 464 m para o índice de avermelhamento do solo (IAV). Por outro lado, Carmo et al. (2016) constaram alcance para matiz de 470 m, para o valor de 479 m, para o croma de 250 m e para o IAV de 450 m.

Utilizou-se o SPM para propor a comparação dos métodos na obtenção dos dados da cor. O modelo exponencial foi o que melhor se ajustou às variáveis matiz, valor e croma. Isso mostra que o SPM capta as informações do solo de maneira mais sutil ao longo da paisagem (Figura 4). Essa aparente contradição dos métodos, para descrever informações sobre a cor do solo, é explicada pelo sistema de captura da imagem. Um SPM capta as imagens em sinais RGB; com isso, para determinar a cor, faz-se necessário um ajustamento dos valores triestímulos (SCHANDA, 2007). Contudo, em algumas situações de iluminação e em condições de saturação, os atributos da cor (matiz, valor e croma) tornaram-se instáveis (SOUTO, 2000). Este fato ocorreu, pois o uso do SPM dá-se melhor quando se utilizam as variáveis de seu sistema, ou seja, em sinais RGB.

Nas variáveis $matiz_{SPM}$ e $croma_{SPM}$, o GDE de 86,40% e 85,8%, respectivamente, foi considerado fraco ($GDE > 75 %$), e para a variável $valor_{SPM}$, moderado ($25% < GDE < 75%$) (CAMBARDELLA et al., 1994). Os altos valores do

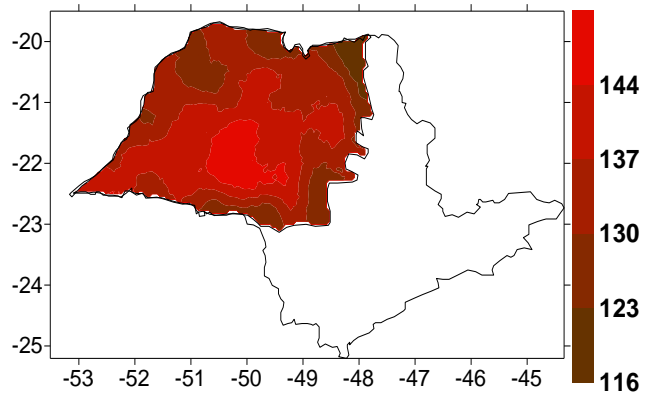
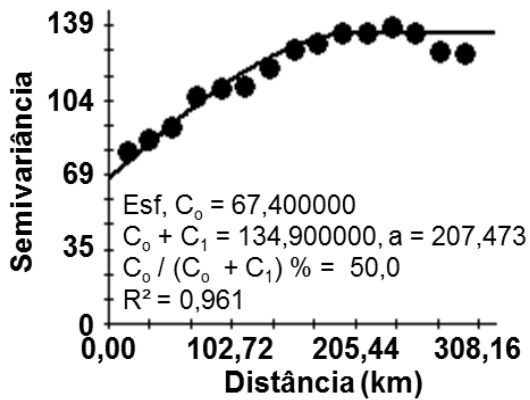
GDE indicaram que a densidade amostral proposta não foi satisfatória para descrever a variabilidade da área estudada, necessitando de um número maior de amostras (SIQUEIRA, 2013). Porém, mesmo com a homogeneidade presente na área, pode-se compreender a variabilidade de campo, através do alcance das variáveis. Na prática, o alcance poderá ser usado como um indicador da homogeneidade da variável estudada, propondo o planejamento amostral (MONTANARI et al., 2012).

Observou-se que apenas o $\text{matiz}_{\text{SPM}}$ obteve o menor valor de alcance (18,94 km), comparado com as variáveis $\text{valor}_{\text{SPM}}$ e $\text{croma}_{\text{SPM}}$. Por outro lado, o $\text{valor}_{\text{SPM}}$ (226,22 km) e o $\text{croma}_{\text{SPM}}$ (30,82 km) foram superiores, inclusive quando confrontados pelo método da ERD. Desta forma, percebeu-se que os maiores valores de alcance ($\text{valor}_{\text{SPM}}$ e $\text{croma}_{\text{SPM}}$) indicaram maior homogeneidade da variável na área. Ao contrário, os menores alcances ($\text{matiz}_{\text{SPM}}$) indicaram maior heterogeneidade da variável na paisagem.

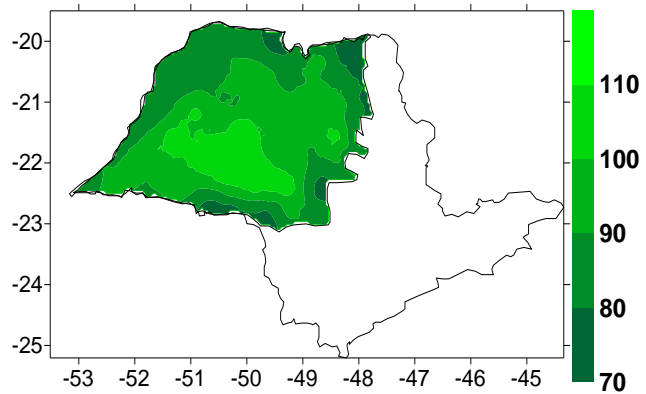
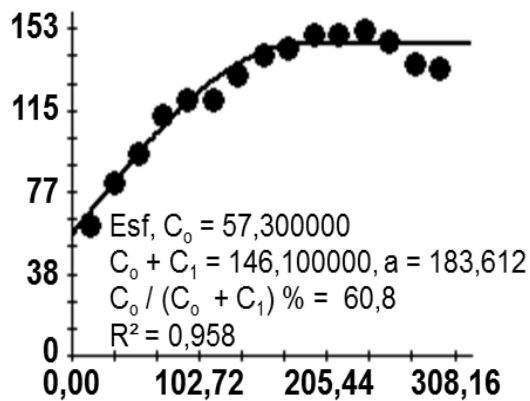
No relatório de atividades do projeto (CNPq – UNIVERSAL 2016 – Faixa C, Proc.nº 402796/2016-0) do Planalto Ocidental Paulista, o alcance para informações da fertilidade do solo foi maior que 60 km, e para os atributos físicos, maiores que 50 km. Diante destas informações, os resultados desta pesquisa poderão auxiliar na calibração de modelos, melhorando as estimativas dos atributos físico-químicos, propondo práticas de gestão do solo. Isto foi possível, pois o raio de alcance das variáveis da cor são maiores que as variáveis físico-químicas do solo.

Utilizaram-se o SPM e a ERD como métodos para determinar as variáveis RGB do solo (Figura 5 e Figura 6). Os semivariogramas simples, observados na Figura 5, ajustaram-se ao modelo esférico para red_{ERD} e $\text{green}_{\text{ERD}}$, que, segundo Cambardella et al. (1994), considera o modelo o mais assertivo na caracterização de variáveis do solo. Para a variável blue_{ERD} , foi definido o modelo exponencial. Estes resultados concordam com Teixeira (2017), que encontrou modelo exponencial em variáveis da cor do solo, dentro do Planalto Ocidental Paulista. Para as variáveis estudadas, a relação do GDE foi de 50%; 60,8% e 75,9%, respectivamente, para red_{ERD} ; $\text{green}_{\text{ERD}}$ e blue_{ERD} . Deste modo, as variáveis red_{ERD} e $\text{green}_{\text{ERD}}$ possuem GDE alta. A variável blue_{ERD} apresentou fraca dependência espacial (CAMBARDELLA et al., 1994).

a) Red



b) Green



c) Blue

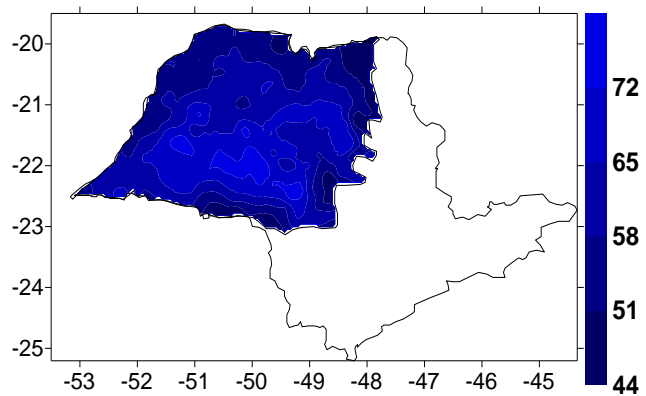
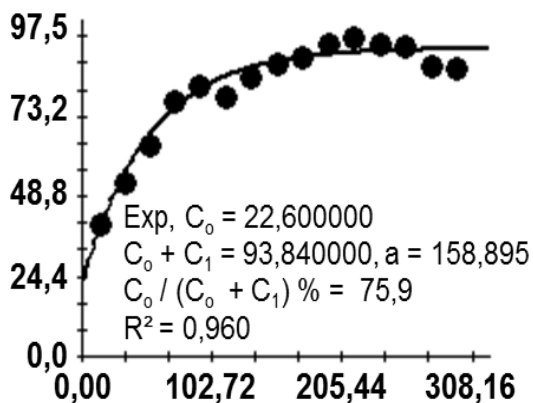
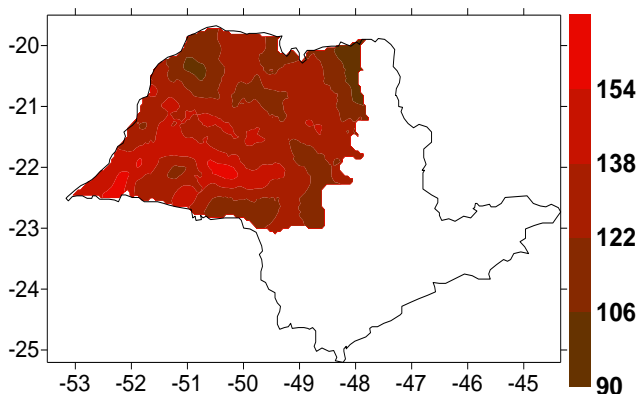
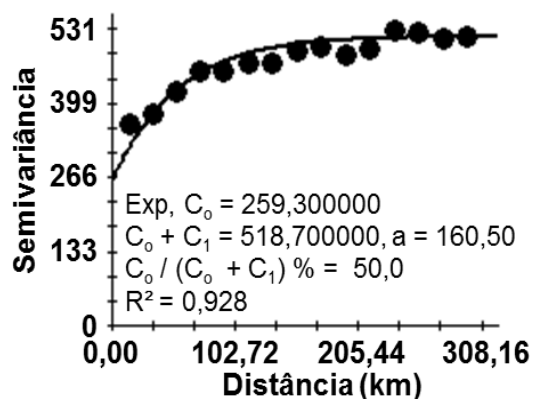
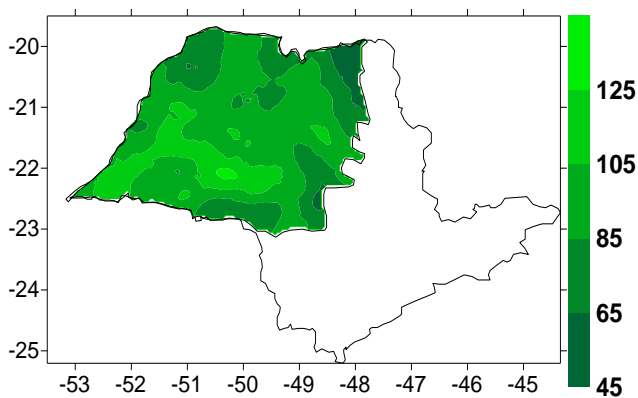
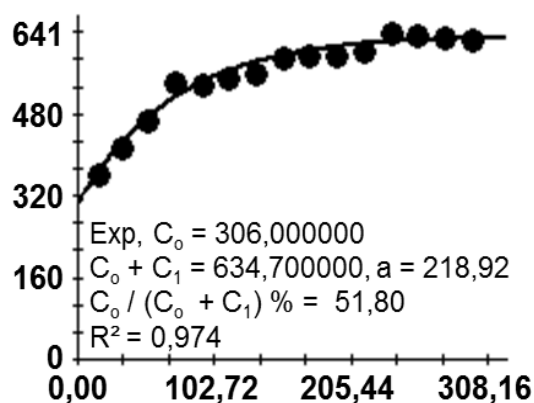


Figura 5. Parâmetros dos modelos de semivariogramas ajustados para as variáveis da cor do solo (red, green e blue); e mapas de distribuição no Planalto Ocidental Paulista, obtidos pelo método de espectroscopia de reflectância difusa - ERD. Esf.: modelo esférico; Exp.: modelo exponencial; C_0 : efeito pepita; $C_0 + C_1$: patamar; a : alcance; $C_0/(C_0+C_1)$: grau de dependência espacial; R^2 : coeficiente de determinação.

a) Red



b) Green



c) Blue

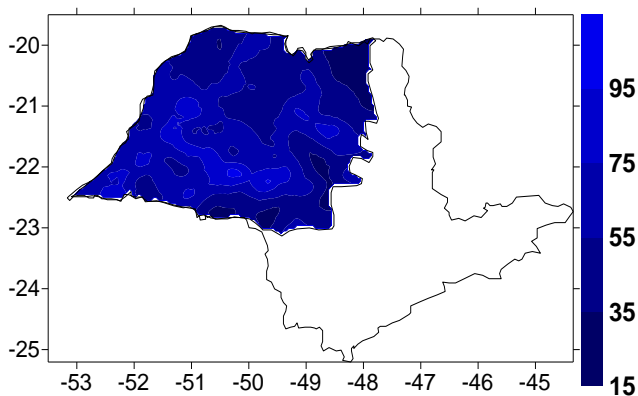
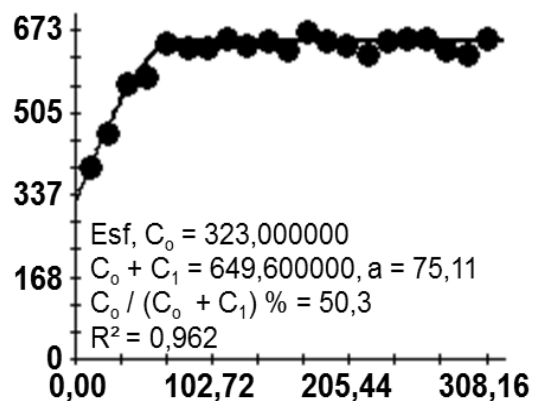


Figura 6. Parâmetros dos modelos de semivariogramas ajustados para as variáveis da cor do solo (red, green e blue); e mapas de distribuição no Planalto Ocidental Paulista, obtidos pelo método do sensor próximo móvel - SPM. Esp.: modelo esférico; Exp.: modelo exponencial; Gauss.: modelo gaussiano; C_0 : efeito pepita; $C_0 + C_1$: patamar; a : alcance; $C_0 / (C_0 + C_1)$: grau de dependência espacial; R^2 : coeficiente de determinação.

Todos os valores de alcance das variáveis da cor (red_{ERD} ; $green_{ERD}$ e $blue_{ERD}$) tiveram comportamento regionalizado, apresentando alcance de 207,47; 183,61; e 158,89 km, respectivamente. Estes valores de alcance indicaram o limite da dependência espacial das variáveis da cor. Os resultados de alcance para as variáveis da cor são maiores do que os descritos por Carmo et al. (2016), Peluco (2016) e Teixeira (2017), em áreas do Planalto Ocidental Paulista. Isto ocorre, pois em grandes áreas, como é o Planalto Ocidental Paulista (13 milhões de hectares), o mapa da geologia e a forma do relevo (Figura 1) impõem um controle sobre os agentes modificadores da cor. Tal razão ocorre pela presença dos minerais de ferro, conteúdo de matéria orgânica e teor de água (BEDIDI et al., 1992; FERNANDEZ; SCHULZE, 1992; DALMOLIN et al., 2005).

O modelo exponencial foi ajustado para os semivariogramas das variáveis red_{SPM} e $green_{SPM}$. Para a variável $blue_{SPM}$, os resultados foram ajustados ao modelo esférico (Figura 6). Em geral, os semivariogramas apresentaram dependência espacial moderada, para red_{SPM} (50%), $blue_{SPM}$ (50,3%), e $green_{SPM}$ (51,8%) (CAMBARDELLA et al., 1994). O parâmetro alcance do semivariograma, foi de 75,11 km para $blue_{SPM}$, 160,5 km para red_{SPM} e 218,92 km para $green_{SPM}$. Portanto, as determinações das variáveis em menor distância do que o alcance permitiram o uso de interpoladores, gerando mapas para locais não amostrados.

A variabilidade espacial do solo na área foi afetada por fatores intrínsecos (CAMBARDELLA et al., 1994). Neste aspecto, a cor do solo, por ser um fator de causa e efeito do ambiente, não exibirá comportamento homogêneo na paisagem. A este respeito, a cor do solo torna-se uma importante variável a ser analisada, independentemente de seu uso.

O detalhamento da Figura 1 mostrou três padrões de dissecação da paisagem no Planalto Ocidental Paulista. A cor vermelha reflete as regiões altamente dissecadas. Coloração amarela, moderadamente dissecada. Por último, as regiões pouco dissecadas apresentam coloração azulada. Essa discriminação da geomorfologia mostra que, na parte central e superior do mapa, ocorre a predominância de regiões moderadamente dissecadas. Na parte oeste do mapa, no limite do estado, ocorre predomínio de regiões pouco dissecadas. Por outro lado, as regiões altamente dissecadas manifestam-se a leste do mapa. Esta relação é importante, pois altera o relevo e, conseqüentemente, a dinâmica da água (drenagem) e a mineralogia do solo.

Devido ao Planalto Ocidental Paulista possuir variação no relevo, a cor é afetada por essa alteração, o que é explicado por sua íntima relação com as condições pedogenéticas. Assim, o potencial de oxidação-redução influencia bruscamente a cor, pois altera o mineral presente no solo. Em ambientes altamente dissecados, a saturação e a estagnação da água propiciam um ambiente redutor. Logo, em ambientes pouco dissecados, as condições de drenagem são melhores; assim, o ambiente torna-se oxidante (VASCONCELOS et al., 2013). Isso indica que o grau de dissecação do solo manifesta as condições para a formação dos minerais, dando cores distintas ao solo no decorrer da paisagem.

Os ambientes geológicos presentes no Planalto Ocidental Paulista são ocupados por dois tipos de formação, sendo a geologia do arenito e a geologia do basalto (FERNANDES; CASTRO; BASILICI, 2007). Na geologia do arenito, o conteúdo do mineral caulinita (Ct) é frequentemente maior (COSTA et al., 2014; CORINGA; COUTO; TORRADO, 2014). No entanto, na geologia do basalto, outros minerais, como a gipsita (Gb), apresentam-se em maior conteúdo (CUNHA et al., 2005; GHIDIN et al., 2006; CAMARGO et al., 2008).

Na região central do mapa (Figura 1), ocorre a geologia arenítica, um ambiente de dissecação moderada, onde Fernandes (2017) encontrou maiores valores de Ct. Neste mesmo mapa, observou-se que as bordas do Planalto Ocidental Paulista estão ocupadas pela geologia do basalto, ambientes pouco dissecados. Os mapas das variáveis da cor do solo (matiz, valor, croma e RGB) apontam semelhanças na compartimentalização do Planalto Ocidental Paulista. Isto indica que as variáveis da cor podem ser utilizadas como pedoindicadores para compartimentalizar os ambientes. Isto porque, utilizando-se da mineralogia no Planalto Ocidental Paulista, Fernandes (2017) confirmou que a Ct e Gb são pedoindicadores de ambientes. Por sua vez, as características da cor acompanham a distribuição da mineralogia dentro do Planalto Ocidental Paulista.

Assim, o fato de a mineralogia provocar a variação da cor, ela também, a cor, torna-se um atributo covariativo do mineral predominante. Desta forma, são observadas variações que seguem o modelo da distribuição da geologia Arenítica. Essas variações seguem os padrões para: $matiz_{ERD}$ (5 - 7,4); $grena_{ERD}$ (90 - 110); $valor_{SPM}$ (3,1 - 5,2), e $grena_{SPM}$ (85 - 125). Nesta geologia (arenito), Fernandes (2017) observou maiores valores de Ct (67 - 68%), sem distinção do grau de dissecação. Em outro estudo, observou-se, também, menor quantidade de óxidos de ferro

(Fe_2O_3), e em comparação à geologia basáltica, essa variação foi de 13 a 69 g kg^{-1} (SANTOS, 2016).

Na geologia basáltica, o padrão da cor seguiu a seguinte variação: $\text{matiz}_{\text{ERD}}$ (2,6 - 5,0); $\text{grena}_{\text{ERD}}$ (70 - 90); $\text{valor}_{\text{SPM}}$ (0,0 - 2,4), e $\text{grena}_{\text{SPM}}$ (45 - 85). Nesta geologia, os ambientes alta e moderadamente dissecados apresentaram 67% e 63% de Ct, respectivamente. Já no ambiente pouco dissecado, observou-se o conteúdo de 60% de Ct. Para o mineral Gb (%), as maiores médias foram na geologia basáltica, que, por sua vez, foi maior no ambiente pouco dissecado (85%) para o altamente dissecado (75%) (FERNANDES, 2017). Foi observado, também, que a variação de óxidos de ferro (Fe_2O_3), especialmente a Hm, variou de 187 a 228 g kg^{-1} para os solos do basalto (SANTOS, 2016).

Os padrões de variação estão associados à geomorfologia que determinam a formação dos óxidos de ferro, influenciando a cor do solo. Na relação de causa-efeito, a cor do solo acompanha a geomorfologia, isto é, em ambientes pouco dissecados, os solos são mais profundos, favorecendo a drenagem, ocasionando um ambiente oxidante, tendo predomínio do mineral Hm de maior cristalinidade. Por outro lado, em ambientes altamente dissecados, os solos são mais rasos, e o lençol freático é superficial, configurando um ambiente redutor, manifestando o mineral Gt nestes ambientes (COVENTRY; TAYLOR; FITZPATRICK, 1983; WILLIAMS, COVENTRY, 1979).

As isolinhas dos mapas da geomorfologia (Figura 1) apresentaram semelhanças com as isolinhas dos mapas da cor do solo, obtidos pelos métodos do SPM e ERD. Os maiores valores de Hm (81 g kg^{-1}) e Gt (54 g kg^{-1}) foram observados nos locais pouco dissecados, na parte leste do mapa, com controle estrutural do basalto. Essa comparação dos mapas geomorfológicos, mineralógicos e da cor auxiliou no entendimento de causa-efeito do solo. Contudo, observou-se que os solos com maior valor de matiz (2,5YR) são encontrados na região oeste, onde ocorrem maiores teores de Hm (> 54 g kg^{-1}). Os solos mais amarelos (5 a 7 YR) ocorrem na região central do Planalto Ocidental Paulista, onde são encontrados maiores valores da relação Ct-Gb, e maiores valores da erodibilidade.

A escolha do método de quantificação da cor busca uma análise simples e descritiva do solo. Neste caso, a cor obtida pelo SPM, que leva em consideração o sistema RGB, mostrou-se eficiente na obtenção da cor do solo, uma vez que a notação pela ERD descreve a cor do solo com um custo mais elevado e mais

demorada. Com isso, o potencial de inovação deste estudo foi relacionar os métodos do SPM e ERD para o planejamento de uso do solo, e estratégias que criam protocolos de gestão, baseados na cor do solo.

Buscando verificar a eficiência da cor nos atributos do solo, semivariogramas cruzados e mapas de cokrigagem foram elaborados. Os modelos apresentados na Figura 7 e na Figura 8 podem ser considerados como os que potencializaram a cokrigagem na determinação da variabilidade dos atributos do solo. Por sua vez, através do uso do SPM, pôde-se obter coeficiente de correlação linear (R^2) acima de 0,70 para atributos do solo (argila, CTC, P e Hm). Neste contexto, os resultados propõem a cor como variável de fácil obtenção para estimar os atributos do solo.

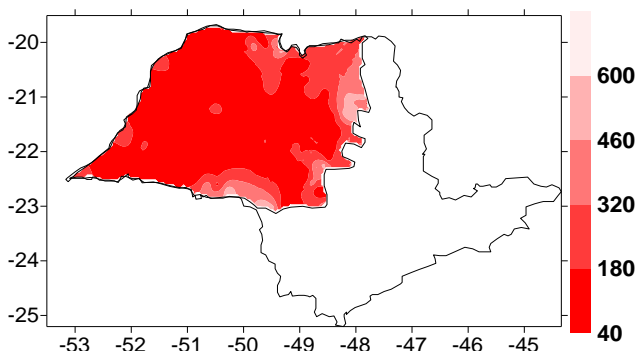
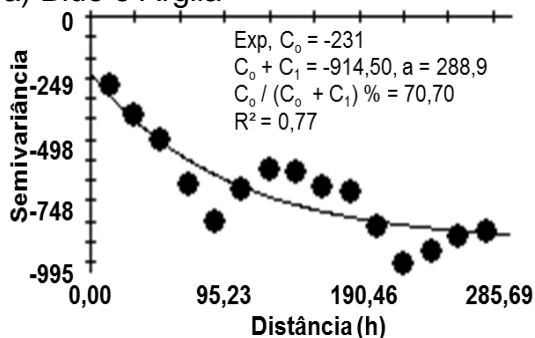
Os semivariogramas cruzados assumiram semivariância negativa para os atributos avaliados, sendo comum quando se utilizam atributos com correlação inversa. Isto indicou que, ao diminuir uma variável da cor, o atributo do solo acompanha esta diminuição (BHATTI; MULLA; FRAZIER, 1991). Verificou-se, também, que o modelo exponencial prevaleceu na maioria dos semivariogramas cruzados, em especial para os seguintes pares: blue_{SPM} e argila ($a = 288,9$ km); red_{SPM} e CTC ($a = 115,56$ km); e blue_{SPM} e Hm ($a = 70,62$ km). De outro modo, para o red_{SPM} e P, onde a dependência espacial foi descrita pelo modelo gaussiano, o alcance foi de 129,47 km. Estes alcances dos semivariogramas explicam a distância de correlação entre duas variáveis (cor e solo), ou seja, amostras selecionadas em uma distância inferior ao alcance observado são correlacionadas entre si (Figura 7).

Analisando o GDE, conforme Cambardella (1994), a dependência espacial foi considerada fraca para a maioria dos atributos avaliados, ou seja, o GDE foi maior que 75 %. Porém, isto indica que o solo em estudo apresenta significativa variabilidade, sendo o ideal neste caso o adensamento da malha amostral, propondo revelar melhor a continuidade espacial dos atributos avaliados. Os pares blue_{SPM} e argila obtiveram dependência espacial moderada (70%). No entanto, além da dependência espacial, a correlação linear é um indicativo seguro para caracterizar a variabilidade dos atributos do solo (CARVALHO; SILVEIRA; VIEIRA, 2002; SILVA et al., 2003). Desta forma, os dados espectrais apresentam potencial para serem utilizados como covariáveis ambientais, propondo modelos de outros atributos inerentes ao solo. No geral, os resultados dos semivariogramas cruzados mostram que a cor no sistema RGB_{SPM} (red, green e blue) pode ser utilizada na predição do teor de argila (77%), CTC (99%), P (90%) e Hm (70%).

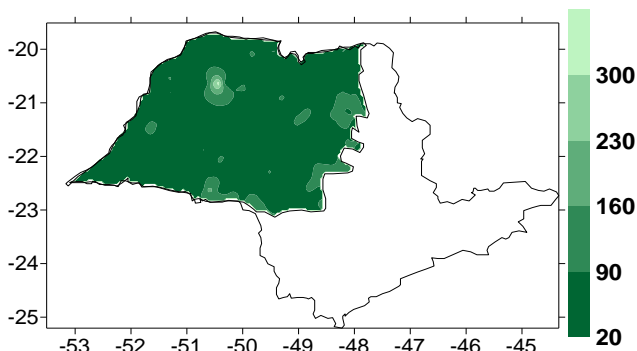
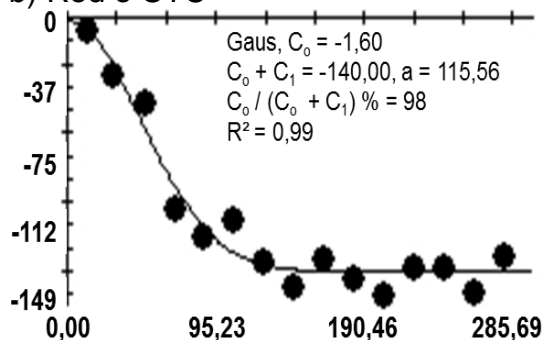
Com o uso do método da ERD, os semivariogramas cruzados dos pares: blue_{ERD} e argila; blue_{ERD} e CTC; green_{ERD} e P, e blue_{ERD} e Hm apresentaram semivariância negativa (Figura 8). O GDE foi fraco para a maioria dos pares, com exceção do blue_{ERD} e Hm, cujo GDE (67,9%) foi considerado moderado (GDE entre 25 % e 75 %), conforme Cambardella (1994). Contudo, essa fraca dependência espacial é realmente observada nos fatores extrínsecos do solo, ou seja, aqueles dependentes da ação antrópica, como o plantio, as calagens e as adubações (TRANGMAR; YOST; UEHARA, 1985; CAMBARDELLA et al., 1994). Os modelos dos semivariogramas cruzados foram semelhantes para os pares blue_{ERD} e argila; blue_{ERD} e Hm, ajustando ao modelo exponencial. Para os pares red_{ERD} e CTC; green_{ERD} e P o modelo ajustado foi o gaussiano. Isto indicou que os pares seguem diferentes padrões de distribuição espacial, conforme as variáveis analisadas. A presença destes modelos teóricos afirmou o possível uso das variáveis da cor como variável auxiliar na obtenção de estimativas de atributos como a argila, CTC, P e Hm, em locais não amostrados. Em geral, a obtenção dos resultados, mediante a cokrigagem, reduz os custos de amostragem e de análise.

Nas Figuras 7 e 8, também são apresentados os mapas interpolados por cokrigagem, verificando a distribuição espacial dos atributos do solo (argila, CTC, P e Hm), mediante as variáveis da cor. Estes mapas de cokrigagem seguiram o modelo de distribuição geomorfológica (arenito e basalto) e da dissecação da paisagem, justificado pelo mineral presente nestes compartimentos. Maiores valores do mineral Hm foram encontrados nos solos do basalto, em ambientes pouco dissecados (SILVA, 2016). Estes locais apresentaram maiores teores de Fe em relação aos arenitos (CURI; FRANZMEIER, 1987; BARRÓN; TORRENT, 2002), Este fato deve-se ao ambiente oxidico, que proporcionou a neoformação da Hm (SILVA, 2016).

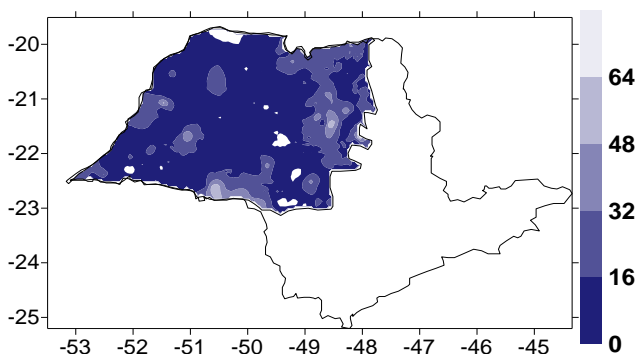
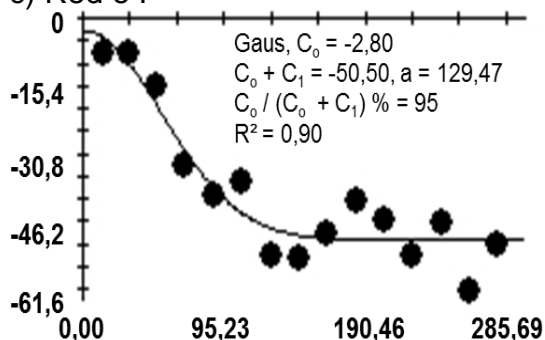
a) Blue e Argila



b) Red e CTC



c) Red e P



d) Blue e Hm

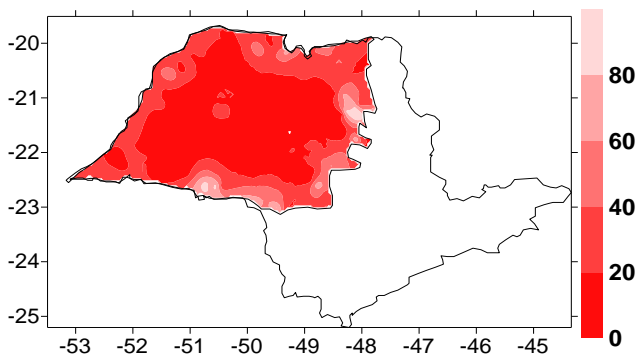
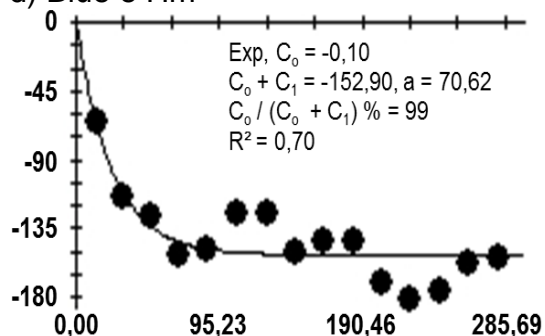
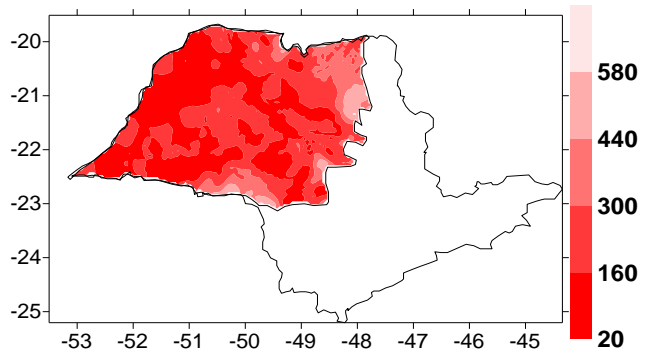
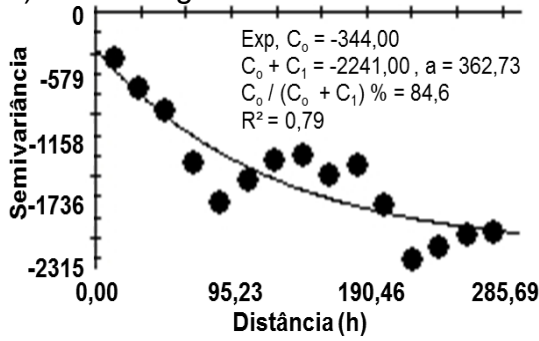
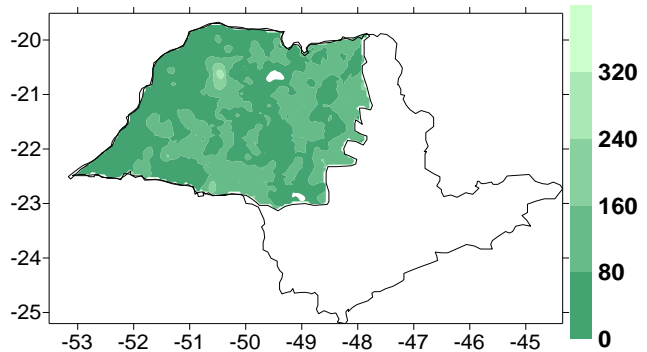
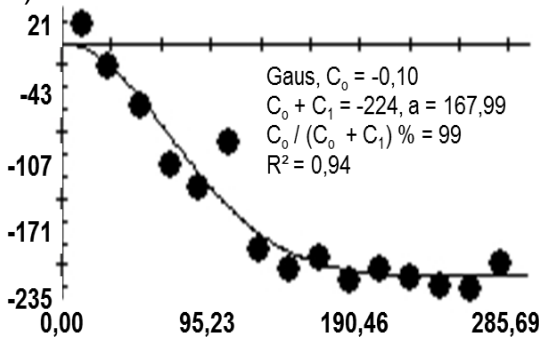


Figura 7. Parâmetros dos modelos de semivariogramas cruzados ajustados para os pares das variáveis da cor e atributos do solo; e mapas de distribuição no Planalto Ocidental Paulista, obtidos pelo método do sensor próximo móvel - SPM. Exp.: modelo exponencial; Gauss.: modelo gaussiano; C_0 : efeito pepita; $C_0 + C_1$: patamar; a : alcance; $C_0/(C_0+C_1)$: grau de dependência espacial; R^2 : coeficiente de determinação.

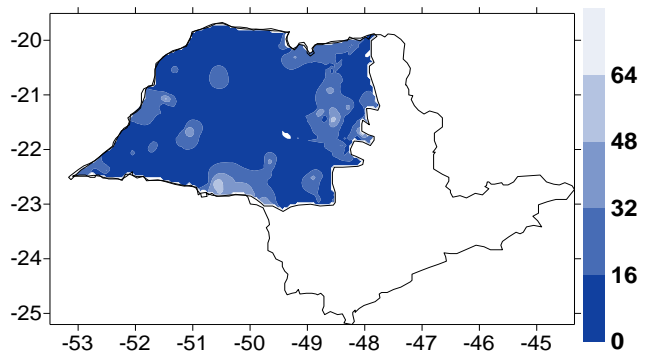
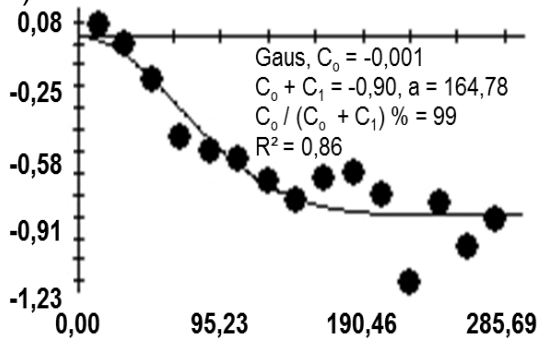
a) Blue e Argila



b) Red e CTC



c) Green e P



d) Blue e Hm

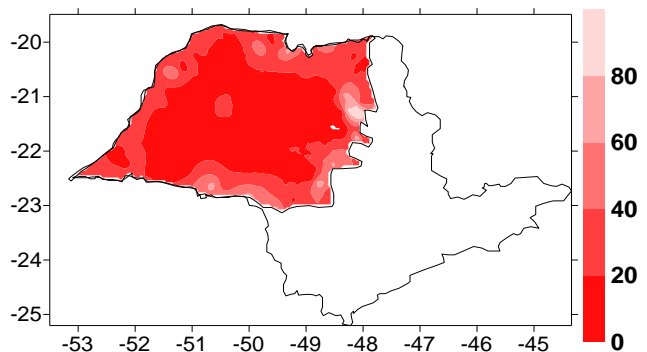
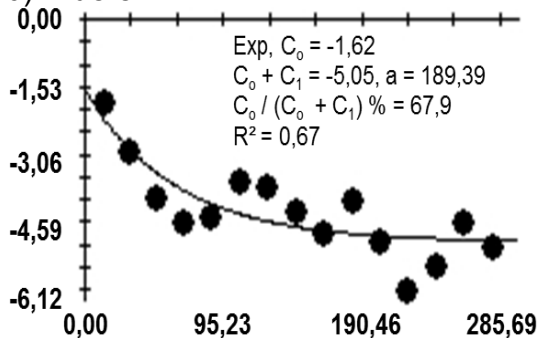


Figura 8. Parâmetros dos modelos de semivariogramas cruzados ajustados para os pares das variáveis da cor e atributos do solo; e mapas de distribuição no Planalto Ocidental Paulista, obtidos pelo método da espectroscopia de reflectância difusa - ERD. Exp.: modelo exponencial; Gauss.: modelo gaussiano; C_0 : efeito pepita; $C_0 + C_1$: patamar; a : alcance; $C_0/(C_0+C_1)$: grau de dependência espacial; R^2 : coeficiente de determinação.

Apesar de os valores de CTC e P serem influenciados pela ação antrópica, especialmente pelo manejo da cana-de-açúcar, verificou-se o padrão de distribuição espacial dos atributos relacionados à fertilidade. Estes atributos seguiram os compartimentos dos fatores de formação, como também dos dados espectrais. Resultados semelhantes para algumas variáveis do solo (argila, P, soma de bases) foram encontrados por Carmo et al. (2016); no entanto, os autores salientam que os métodos indiretos de caracterização da cor tornaram-se uma alternativa que busca identificar áreas com potenciais produtivos e qualitativos para as culturas em grandes áreas.

Além desta teoria, para obter resultados satisfatórios, faz-se necessário conhecer os processos de formação do solo que atuam em locais específicos. Os dados da cokrigagem acompanham o intervalo dos minerais, cujo valor mínimo para a goethita é de 415-425 nm e no máximo 440-450 nm. Para a hematita, no intervalo mínimo de 530-545 nm e máximo de 575-590 nm (BARRÓN et al., 2000; TORRENT; BARRÓN, 2008), os dados espectrais destes minerais estão próximos aos valores de RGB, especialmente para o green (556,1 nm) e blue (435,8 nm).

A utilização dos atributos da cor como covariável para estimar atributos físico-químicos do solo, mediante a técnica da cokrigagem, é uma alternativa promissora. Esta proposta sugere a adoção de sistemas sustentáveis, fundamentada na agricultura de precisão, propondo redução de custo no sistema produtivo. Diante disso, o obstáculo deste estudo foi dispor de recomendações eficientes, como em outros trabalhos que utilizaram a ERD para definir o uso de fertilizantes, o risco de erosão e o potencial de produção agrícola (DANTAS, 2013; RESENDE, 2013; CARMO et al., 2016). Por sua vez, alternativas como o triângulo da cor, aliadas ao zoneamento agroclimático, apontam para o refinamento seguro da cafeicultura em solos do Planalto Ocidental Paulista (CARMO et al., 2016).

A localização das zonas de manejo levou em conta o triângulo da cor, fundamentado pelos atributos matiz, valor e croma, obtidos na faixa espectral do visível (370 a 750 nm). As altas produtividades foram encontradas em regiões cujos atributos da cor seguiram o seguinte padrão: valor entre 4,45 e 4,40, matiz entre 7,09 e 6,99 e croma entre 5,0 e 5,08 (Figuras 9 a b), conforme Carmo et al. (2016).

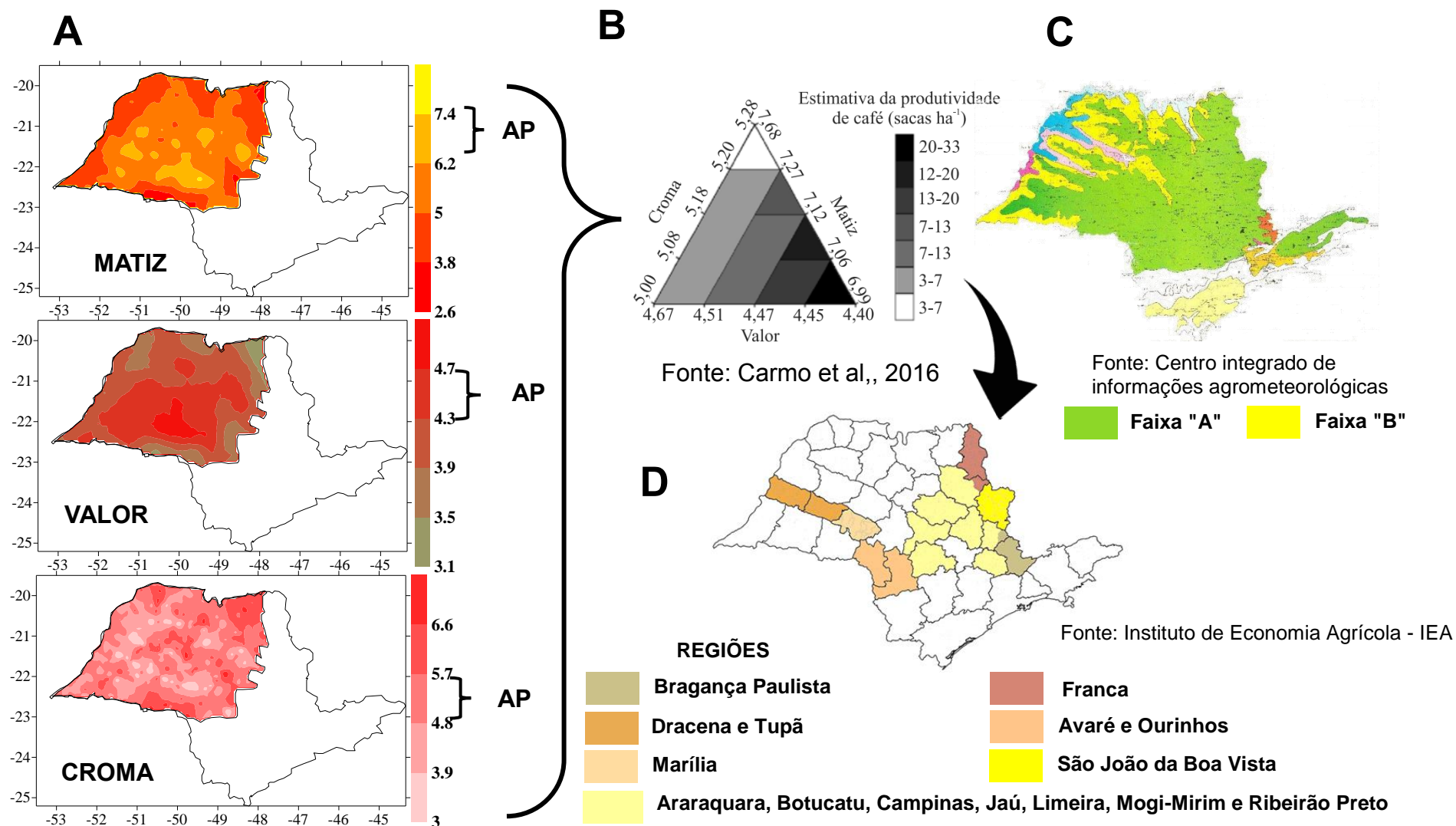


Figura 9. Mapas de distribuição dos atributos da cor (Matiz, Valor e Croma) dentro do Planalto Ocidental Paulista (a); Triângulo da cor relacionado à produtividade do café (b); Zoneamento agroclimático para a cultura do café no Estado de São Paulo (c); Área de concentração dos municípios produtores de café no Estado de São Paulo.

Esta variação condiz com as informações do zoneamento agroclimático no Estado de São Paulo, definindo, assim, aptidão para o cultivo do café. Contudo, as áreas da faixa “A” (cor verde) são regiões em que a temperatura média anual está entre 18° e 22 °C, com deficiência hídrica anual menor que 150 mm, favorecendo condições adequadas ao desenvolvimento do cafeeiro (regiões aptas). Por sua vez, a faixa “B” (cor amarela) são as regiões com temperatura média anual entre 22 e 23 °C e deficiência hídrica anual menor que 150 mm. Esta faixa é considerada apta a marginal, pois apresenta restrições quanto às condições térmicas (Figura 9 c).

A cafeicultura atual segue o padrão recomendado das áreas aptas e satisfatória (Figura 9 d), o que constitui a possibilidade de expansão desta fronteira agrícola (MAPA, 2011). Portanto, a inclusão dos atributos da cor vem ao encontro do aperfeiçoamento dos modelos de zoneamento da aptidão para o cultivo de café, propondo refinar as informações do solo, associado às informações climáticas. Esta tendência de tecnologia sustentável justifica o uso da cor na melhoria do zoneamento produtivo dentro do Planalto Ocidental Paulista. Além do mais, a cor gera resultados rápidos, sem o uso de agentes químicos, menos oneroso, e assim propõe o uso sustentável do solo.

Neste estudo, os resultados das variáveis da cor obtidos pelos métodos do SPM e ERD foram aceitáveis para quantificar atributos do solo. Isso indicou semelhança no desempenho de ambos os métodos, podendo incluir os sinais de RGB como variável para a quantificação de atributos.

3.4 Conclusões

Houve semelhança entre os métodos ERD e SPM para mapear a variabilidade espacial dos componentes da cor. Foi possível identificar mudanças das variáveis da cor no Planalto Ocidental Paulista, permitindo identificar os limites entre os compartimentos geológicos.

A variável da cor mais eficiente para estimar a argila no Planalto Ocidental Paulista foi o blue (79%); para estimar a CTC foi o red (99%); para o P foi o red (90%), e para a Hm foi o blue (70%).

O SPM mostrou ser um método indireto, eficiente para detectar atributos físico-químicos do solo. Este método possibilitou a avaliação dos atributos do solo e, de modo prático, rápido e eficiente, determinou a variabilidade destes atributos. Com

isso, esse método de análise pode subsidiar uma mudança nas práticas de manejo do solo para as empresas voltadas ao setor agroindustrial.

3.5 Referência

BAHIA, A. S. R. S.; MARQUES JR., J.; SIQUEIRA, D. S. Procedures using diffuse reflectance spectroscopy for estimating hematite and goethite in Oxisols of São Paulo, Brazil. **Geoderma Regional**, v. 5, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geodrs.2015.04.006>.

BARRÓN, V.; MELLO, J. W. V.; TORRENT, J. Caracterização de óxidos de ferro em solos por espectroscopia de reflectância difusa. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.). **Tópicos de ciência do solo**. 2. ed. Viçosa: SBCS, 2000. p. 139-161.

BARRÓN, V.; TORRENT, J. Evidence for a simple pathway to maghemite in earth and mars soils. **Geochimica et Cosmochimica Acta**, Oxford, v. 66, n. 15, 2002. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(02\)00876-1](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(02)00876-1).

BEDIDI, A.; CERVELLE, B.; MADEIRA, J.; POUGET, M. Moisture effects on visible spectral characteristics of lateritic soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 153, n. 2, p. 129-141, 1992.

BHATTI, A. U.; MULLA, D. J.; FRAZIER, B. E. Estimation of soil properties and wheat yields on complex eroded hills using geostatistics and thematic mapper images. **Remote Sensing Environment**, v. 37, n. 3, 1991. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90080-P](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90080-P).

BOTELHO, M. R.; DALMOLIN, R. S. D.; PEDRON, F. A.; AZEVEDO, A. C.; RODRIGUES, R. B.; MIGUEL, P. Medida da cor em solos do Rio Grande do Sul com a Carta de Munsell e por colorimetria. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 4, 2006. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782006000400021>.

BURGESS, T. M.; WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. **European Journal of Soil Science**, v. 31, n. 2, 1980. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2389.1980.tb02085.x>.

BURROUGH, P. A.; McDONNELL, R. A. **Principles of Geographical Information Systems**. New York: Oxford University Press, 1998. 333 p.

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

CAMARGO, L. A.; MARQUES JR., J.; PEREIRA, G. T.; ALLEONI, L. R. F. Spatial correlation between the composition of the clay fraction and contents of available phosphorus of an Oxisol at hillslope scale. **Catena**, Cremlingen, v. 100, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2012.07.016>.

CAMARGO, L. A.; MARQUES JR., J.; PEREIRA, G. T.; HOVART, R. A. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um Latossolo sob diferentes formas do relevo. I - MINERALOGIA DA FRAÇÃO ARGILA. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 6, 2008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832008000600006>.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEN, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPKA, A. E. Field-scale variability of soil properties in central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, p. 1.501-1.511, 1994.

CAMPOS, R. C.; DEMATTÊ, J. A. M. Cor do solo: uma abordagem da forma convencional de obtenção em oposição à automatização do método para fins de classificação de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 5, 2004. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832004000500008>.

CARMO, D. A. B.; MARQUES JR., J.; SIQUEIRA, D. S.; BAHIA, A. S. R.; SANTOS, H. M.; POLLO, G. Z. Cor do solo na identificação de áreas com diferentes potenciais produtivos e qualidade de café. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 51, n. 9, 2016. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/s0100-204x2016000900026>.

CARVALHO, J. R. P.; SILVEIRA, P. M.; VIEIRA, S. R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 8, 2002. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2002000800013>.

COMMISSION INTERNATIONALE L'ECLARIRAGE - CIE. **Proceedings of the eight session**. Cambridge: England, 1931. np. (Bureau central de la CIE, Paris).

CORINGA, E. A. O.; COUTO, E. G.; TORRADO, P. V. Geoquímica de solos do pantanal norte, Mato Grosso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 6, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832014000600013>.

COSTA, A. B. S.; CÓRDOBA, V. C.; SÁ, E. F. J.; SCHERER, C. M. S. Diagênese dos arenitos da Tectonossequência Rifte na Bacia do Araripe, NE do Brasil. **Brazilian Journal of Geology**, v. 44, n. 3, 2014. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.5327/Z2317-4889201400030008>.

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

CUNHA, P.; MARQUES JR., J.; CURI, N.; PEREIRA, G. T.; LEPSCH, I. F. Superfícies geomórficas e atributos de Latossolos em uma sequência areniticobasáltica da região de Jaboticabal (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 1, 2005. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832005000100009>.

CURI, N.; FRANZMEIER, D. P. Effect of parent rocks on chemical and mineralogical properties of some Oxisols in Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 51, n. 1, 1987. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj1987.03615995005100010033x>.

DALMOLIN, R. S. D.; GONÇALVES, C. N.; KLAMT, E.; DICK, D. P. Relação entre os constituintes do solo e seu comportamento espectral. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 2, 2005. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-84782005000200042>.

DANTAS, J. S. **Relação solo-paisagem e erodibilidade de solos no leste do Estado do Maranhão**. 2013. 84 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Ciência do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Jaboticabal, 2013.

DANTAS, J. S.; MARQUES JR., J.; MARTINS FILHO, M. V.; RESENDE, J. M. A.; CAMARGO, L. A.; BARBOSA, R. S. Gênese de solos coesos do leste maranhense: relação solo paisagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, 2014 a. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832014000400001>.

DANTAS, J. S.; MARTINS FILHO, M. V.; MARQUES JR., J.; RESENDE, J. M.; TEIXEIRA, D. D. B.; BARBOSA, R. S.; SIQUEIRA, D. S. Coeficiente de erodibilidade em sulcos e entressulcos de Argissolos coesos estimado pela cor do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 49, n. 9, 2014 b. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2014000900006>.

DEMATTE, J. A. M.; BORTOLETTO, M. A. M.; VASQUES, G. M.; RIZZO, R. Quantificação de matéria orgânica do solo através de modelos matemáticos utilizando colorimetria no sistema Munsell de cores. **Bragantia**, v. 70, n. 3, 2011. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0006-87052011005000006>.

DEUTSCH, C.V.; JOURNEL, A.G. 1998. **GSLIB. Geostatistical Software Library and User's Guide**. 2. ed. New York: Oxford University Press, 1998. 366p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - Embrapa. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212p. (EMBRAPA-CNPS: Documentos:1).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - Embrapa. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília: Embrapa, 2013. 353p.

FERNANDES, K .L. **Estimativa da caulinita e gibbsita por técnicas de difração de raios x e espectroscopia de reflectância difusa dos solos do Planalto Ocidental Paulista**. 2017. 70 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Ciência do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Jaboticabal, 2017.

FERNANDES, K. L.; RIBON, A. P.; MARQUES JR., J.; BAHIA, A. S. R. S.; TAVARES FILHO, J. Magnetic and spectral signatures of Cerrado soils in the state of Goiás, Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 52, n.10, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/S0100-204X2017001000012>.

FERNANDES, L. A.; CASTRO, A. B.; BASILICI, G. Seismites in continental sand sea deposits of the Late Cretaceous Caiuá Desert, Bauru Basin, Brazil. **Sedimentary Geology**, v. 199, n. 1-2, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.sedgeo.2005.12.030>.

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

GALVÃO, L. S.; VITORELLO, I. Role of organic matter in obliterating the effects of iron on spectral reflectance and colour of Brazilian tropical soils. **International Journal of Remote Sensing**, v. 9, n. 10, 1998. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1080/014311698215090>.

VITORELLO, I.; GALVÃO, L.S. Spectral properties of geologic materials in the 400 to 2,500 nm range: review for applications to mineral exploration and lithologic mapping. **Photo Interpretation**, v.2, p.77-96, 1996.

GHIDIN, A. A.; MELO, V. F.; LIMA, V. C.; LIMA, J. M. J. C. Topossequência de Latossolos originados de rochas basálticas no Paraná. I – Mineralogia da fração argila. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 2, 2006. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832006000200010>.

GÓMEZ-ROBLEDO, L.; LÓPEZ-RUIZ, N.; MELGOSA, M.; PALMA, A. J.; CAPITÁN-VALLVEY, L. F.; SÁNCHEZ-MARAÑÓN, M. Using the mobile phone as Munsell soil-colour sensor: An experiment under controlled illumination conditions. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 99, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.compag.2013.10.002>.

GOOVAERTS, P. **Geostatistics for Natural Resources Evaluation**. New York: Oxford University Press, 1997. 483p.

GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p.169-177, 2005.

HAN, S.; SCHNEIDER, S. M.; EVANS, R. G. Evaluating cokriging for improving soil nutrient sampling efficiency. **American Society of Agricultural Engineers**, Saint Joseph, v. 46, n. 3, p. 845-849, 2003.

ISAAKS, E. H.; SRIVASTAVA, R. M. **An Introduction to Applied Geostatistics**. Nova York: Oxford University Press, 1989. 592p.

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

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

KOSMAS, C. S.; CURI, N.; BRYANT, R. B.; FRANZMEIER, D. P. Characterization of iron oxide minerals by second-derivative visible spectroscopy. **Soil Science Society America Journal**, v. 48, n. 2, 1983. Disponível em: <https://doi.org/10.2136/sssaj1984.03615995004800020036x>.

KRAVCHENKO, A. N.; BULLOCK, D. G. Correlation of corn and soybean yield with topography and soil properties. **Agronomy Journal**, v. 92, n. 1, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.2134/agronj2000.92175x>.

LEVIN, N.; BEN-DOR, E.; SINGER, A. A digital camera as tool to measure colour indices and related properties of sandy soils in semi-arid environments. **International Journal of Remote Sensing**, v. 26, n. 24, 2007. Disponível em: <https://doi.org/10.1080/01431160500099444>.

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

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

MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Economic Geology**, v. 58, p. 1.246-1.266, 1963.

McBRATNEY, A. B.; MENDONÇA SANTOS, M. L.; MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, Amsterdam, v. 117, v. 1-2, 2003. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(03\)00223-4](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(03)00223-4).

McBRATNEY, A. B.; WEBSTER, R. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. **European Journal of Soil Science**, v. 37, n. 4, 1986. Disponível em: <https://doi.org/10.1111/j.1365-2389.1986.tb00392.x>.

Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento - MAPA. **Oportunidades e desafios às exportações do agronegócio brasileiro**. In: ENCOMEX Empresarial Salvador, 2011. Disponível em: http://mapas.agricultura.gov.br/agroeventos/uploads/20120109_160411_245663226.pdf. Acesso em: 05 fev. 2018.

MINITAB. **Minitab version 14**. Minitab, State College, Pennsylvania. 2000.

MONTANARI, R.; MARQUES JR., J.; CAMPOS, M. C. C.; SOUZA, Z. M.; CAMARGO, L. A. Caracterização mineralógica de Latossolos em diferentes feições do relevo na região de Jaboticabal-SP. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 41, n. 2, p. 191-199, 2010.

MONTANARI, R.; MARQUES JR., J.; PEREIRA, G. T.; SOUZA, Z. M. Forma da paisagem como critério para otimização amostral de Latossolos sob cultivo de canade-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 1, 2005. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2005000100010>.

MONTANARI, R.; SOUZA, G. S. A.; PEREIRA, G. T.; MARQUES JR., J.; SIQUEIRA, D. S.; SIQUEIRA, G. M. The use of scaled semivariograms to plan soil sampling in sugarcane fields. **Precision Agriculture**, v. 13, n. 5, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s11119-012-9265-6>.

MUNSELL SOIL COLOR COMPANY. **Munsell color soil charts**. Baltimore, 2000.

PELUCO, R. G.; MARQUES JR., J.; SIQUEIRA, D. S.; PEREIRA, G. T.; BARBOSA, R. S.; TEIXEIRA, D. B. Mapeamento do fósforo adsorvido por meio da cor e da suscetibilidade magnética do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 3, 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2015000300010>.

PELUCO, R. G. **Magnetismo e cor na identificação de solos com diferentes potenciais de sorção de imazaquim**. 2016. 92 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Ciência do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Jaboticabal, 2016.

POST, D. F.; BRYANT, R. B.; BATCHILY, A. K.; HUETE, A. R.; LEVINE, S. J.; MAYS, M. D.; ESCADAFAL, R. Correlations between field and laboratory measurements of soil color. In: SOIL SCIENCE SOCIETY OF AMERICA (Madison, Estados Unidos). **Soil color**. Madison, 1993. p. 35-49. (SSSA Special Publication, 31).

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

RAIJ, B. V.; KUPPER, A. Capacidade de troca de cátions em solos. Estudo comparativo de alguns métodos. **Bragantia**, Campinas, v. 25, n. 30, p. 327-336, 1966.

RAUCH, J. N. Global distributions of Fe, Al, Cu, and Zn contained in Earth's derma layers. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 110, n. 2, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2011.05.008>.

RESENDE, J. M. A. **Caracterização pedométrica da fertilidade e cor de Argissolos coesos do leste maranhense**. 2013. 83 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Ciência do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Jaboticabal, 2013.

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

ROBERTSON, G. P. **GS+**: geostatistics for the environmental sciences. Plainwell: Gamma Design Software, 1998. 152 p.

RODRÍGUES-PULIDO, F. J.; GÓMEZ-ROBLEDO, L.; MELGOSA, M.; GORDILLO, B.; GONZÁLEZ-MIRET, M. L.; HEREDIA, F. J. Ripeness estimation of grape berries and seeds by image analysis. **Computers and Electronics in Agriculture**, v. 82, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2012.01.004>.

SCHANDA, J. **Colorimetry**: understanding the CIE system. Hoboken: Wiley, 2007. 467p.

SCHULZE, D. G.; NAGEL, J. L.; SCOYOC, G. E.; HENDERSON, T. L.; BAUMGARDNER, M. F.; STOTT, D. E. Significance of organic matter in determining soils colors. In: BIGHAM, J. M.; CIOLKOSZ, E. J. (Ed.). **Soil color**. Madison: Soil Science Society of America, 1993. p. 71-90.

SCHWERTMANN, U. Relations between iron oxides, soil color, and soil formation. In: BIGHAM, J. M.; CIOLKOSZ, E. J. (Ed.). **Soil Color**. Madison: SSSA, 1993. p. 57-66. (Special Publication, 31).

SANTOS, L. S. **Mineralogia da fração argila dos solos do Planalto Ocidental Paulista**. 2016. 68 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Ciência do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Jaboticabal, 2016.

SILVA JÚNIOR, J. F.; MARQUES JR., J.; CAMARGO, L. A.; TEIXEIRA, D. D. T.; PANOSSO, A. R.; PEREIRA, G. T. Simulação geoestatística na caracterização espacial de óxidos de ferro em diferentes pedoformas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 6, 2012. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832012000600003>.

SILVA, L. S. **Mineralogia da fração argila dos solos do Planalto Ocidental Paulista**. 2016. 68f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Ciência do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Jaboticabal, 2016.

SILVA, S. A.; LIMA, J. S. S.; SOUZA, G. S.; OLIVEIRA, R. B.; SILVA, A. F. Variabilidade espacial do fósforo e das frações granulométricas de um Latossolo Vermelho-Amarelo. **Revista Ciência Agronômica**, v. 41, n. 1, p. 1-8, 2010.

SILVA, V.R.; REICHERT, J. M.; STORCK, L.; FEIJO, S. Variabilidade espacial das características químicas do solo e produtividade de milho em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 6, 2003. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832003000600005>.

SIQUEIRA, D. S. **Mapeamento de atributos e planejamento amostral para Latossolos utilizando suscetibilidade magnética, cor e relação solo-paisagem**. 2013. 109f. Tese (Doutorado em Agronomia/Produção Vegetal) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Jaboticabal, 2013.

SOUTO, R. P. **Segmentação de imagem multiespectral utilizando-se o atributo matiz**. 2000. 171f. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2000.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JR., J.; PEREIRA, G. T.; MONTANARI, R. Otimização amostral de atributos de latossolos considerando aspectos solo-relevo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 3, p. 829-836, 2006.

STONER, E.; DERKSEN, I.; MACEDO, J. Discriminação espectral de Latossolos do Planalto Central Brasileiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 26, n. 10, p. 1.599-1.606, 1991.

TEIXEIRA, D. D. B.; BICALHO, E. S.; PANOSSO, A. R.; CERRI, C. E. P.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA, N. Spatial variability of soil CO₂ emission in a sugarcane area characterized by secondary information. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 70, n. 3, 2013. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162013000300008>.

TEIXEIRA, L. G. **Mapeamento da erodibilidade de Latossolos utilizando a cor**. 2017. 87f. Tese (Doutorado em Agronomia/Ciência do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Jaboticabal, 2017.

THORNTHWAITE, C. W. An Approach toward a Rational Classification of Climate. **Geographical Review**, v. 38, n. 1, p. 55-94, 1948.

TORRENT, J.; BARRÓN, V. Diffuse reflectance spectroscopy. In: Ulery, A.L.; Drees, L.R. (Eds.). **Methods of Soil Analysis. Part 5. Mineralogical Methods**. Madison: Soil Science Society of America, 2008. p. 367-385. (SSSA Book Series, 5).

_____. Laboratory measurement of soil color: Theory and practice. Soil color. **Soil Science Society of America**, p. 21-33, 1993. (SSSA, Special Publication, 31).

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, v. 38, 1985. Disponível em: [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60673-2](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60673-2).

VASCONCELOS, V.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; MARTINS, E. S.; COUTO JÚNIOR, A. F.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T. Sistema de classificação geomorfométrica baseada em uma arquitetura sequencial em duas etapas: árvore de decisão e classificador espectral, no Parque Nacional da Serra da Canastra. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 13, n. 2, 2012. Disponível em: <https://doi.org/10.20502/rbg.v13i2.248>.

VASCONCELOS, V.; MARTINS, E. S.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; MARQUES JR., J.; SIQUEIRA, D. S.; COUTO JÚNIOR, A. F.; GUIMARÃES, R. F.; GOMES, R. A. T.; REATTO, A. Modelo de Evolução Pedogeomorfológica da Serra da Canastra-MG. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 14, n. 2, p. 197-212, 2013.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudo da variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. (Ed.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 1-54.

VIEIRA, S. R.; HATFIELD, J. L.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. Geostatistics theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Califórnia, v. 51, n. 3, 1983. Disponível em: <https://doi.org/10.3733/hilg.v51n03p075>.

VISCARRA-ROSSEL, R. A. Fine-resolution multiscale mapping of clay minerals in Australian soils measured with near infrared spectra. **Journal of Geophysical Research**, v. 116, n. F4, 2011. Disponível em: <https://doi.org/10.1029/2011JF001977>.

VISCARRA-ROSSEL, R. A.; FOUAD, Y.; WALTER, C. Using a digital camera to measure soil organic carbon and iron contents. **Biosystems Engineering**, v. 100, n. 2, 2008. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.02.007>.

VISCARRA-ROSSEL, R. A.; MINASNY, B.; ROUDIER, P.; McBRATNEY, A. B. Colour space models for soil science. **Geoderma**, Amsterdam, v. 133, n. 3-4, 2006. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.07.017>.

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

WILLIAMS, J.; COVENTRY, R. J. The contrasting hydrology of red and yellow earths in a landscape of low relief. In: SYMPOSIUM INTERNATIONAL HYDROLOGY OF AREAS OF LOW PRECIPITATION, 128., 1979, Canberra. **Proceedings...** Canberra: International Association of Hydrological Science, 1979. p. 385-395.

WYSZECKI, G.; STILES, W.S. **Color Science: Concepts and Methods, Quantitative Data and Formulae**. 2. ed. New York, 1982. p. 968.

CAPÍTULO 4 – Considerações finais

A câmera digital, por mais básica que seja sua definição, tornou-se importante para a educação, comunicação e preservação da história para todos nós. Os clichês para capturar a vida cotidiana também podem captar informações que ajudam os agricultores a usar precisamente os recursos naturais, sobretudo o solo. Visto que a cor gera um conhecimento íntimo do solo, as ferramentas digitais no contexto do agronegócio auxiliam no manejo sustentável e, substancialmente, no manejo das culturas.

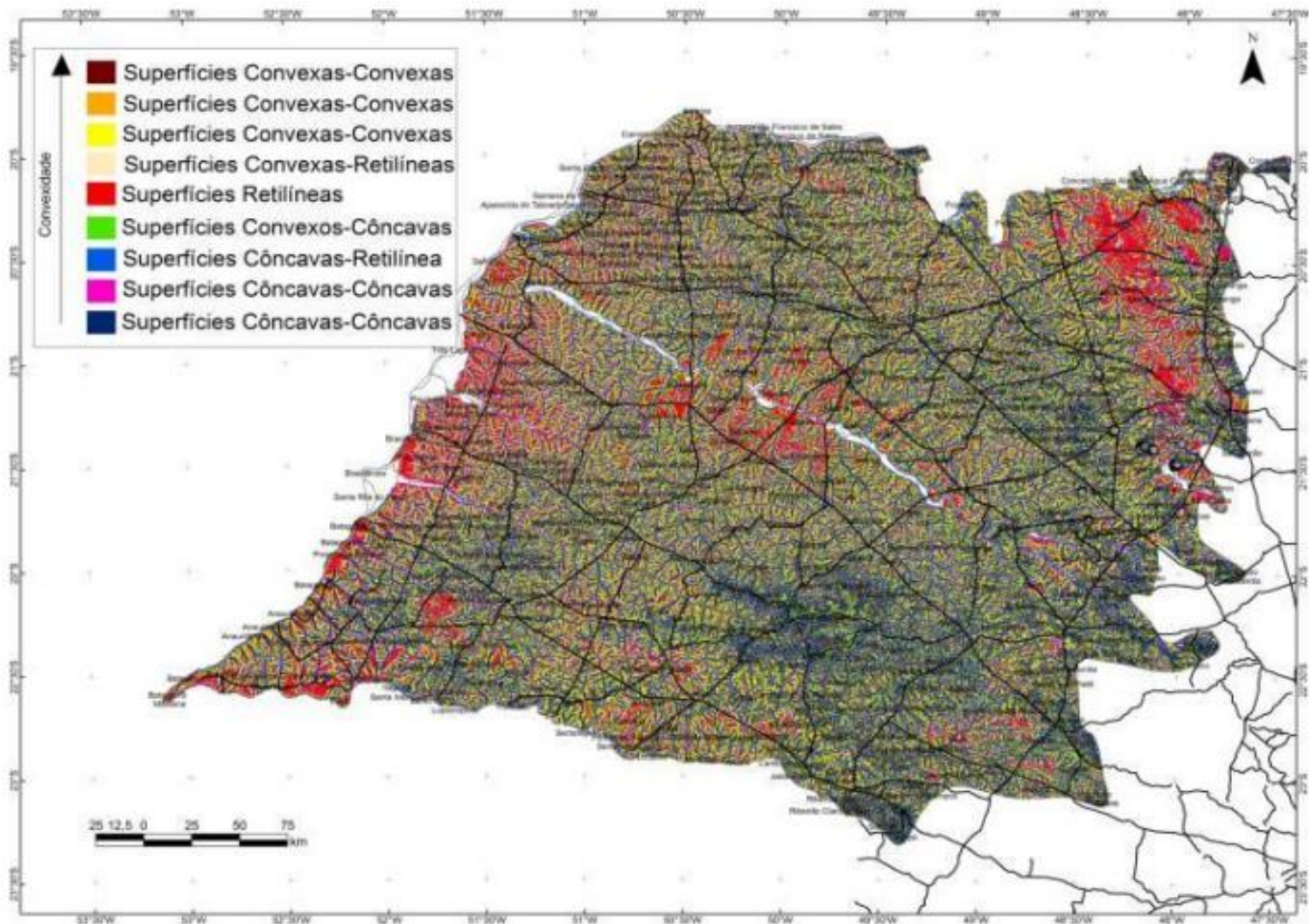
O capítulo 1 (Considerações gerais) apresentou os fatores que influenciam na cor do solo, bem como os índices bibliométricos e os desempenhos acadêmicos com o tema cor do solo. O capítulo 2 (Dados espectrais do solo com cultivo de café por meio de sensores próximos) define um projeto-piloto em área de 39 ha, para propor dois métodos que captam as informações espectrais do solo (ERD e SPM). Estes métodos vêm sendo utilizados pela comunidade científica; portanto, seu uso ainda é restrito em áreas comerciais, sobretudo para o café. A cor comprovada na quantificação de atributos do solo, o passo seguinte, descrito no capítulo 3 (Dados espectrais dos solos do Planalto Ocidental Paulista por sensores próximos), foi explorar os métodos em área de aproximadamente 13 milhões de ha (Planalto Ocidental Paulista). Mediante os resultados, verificou-se que a cor é uma poderosa fonte de informação sobre o solo. No entanto, quando se utiliza uma SPM, é possível obter, precisamente, os resultados de maneira rápida e com menor custo. O principal avanço conquistado neste estudo auxilia na tomada de decisões no campo, e não importa se o empresário rural é pequeno médio ou grande, pois o progresso é para todos.

APÊNDICE

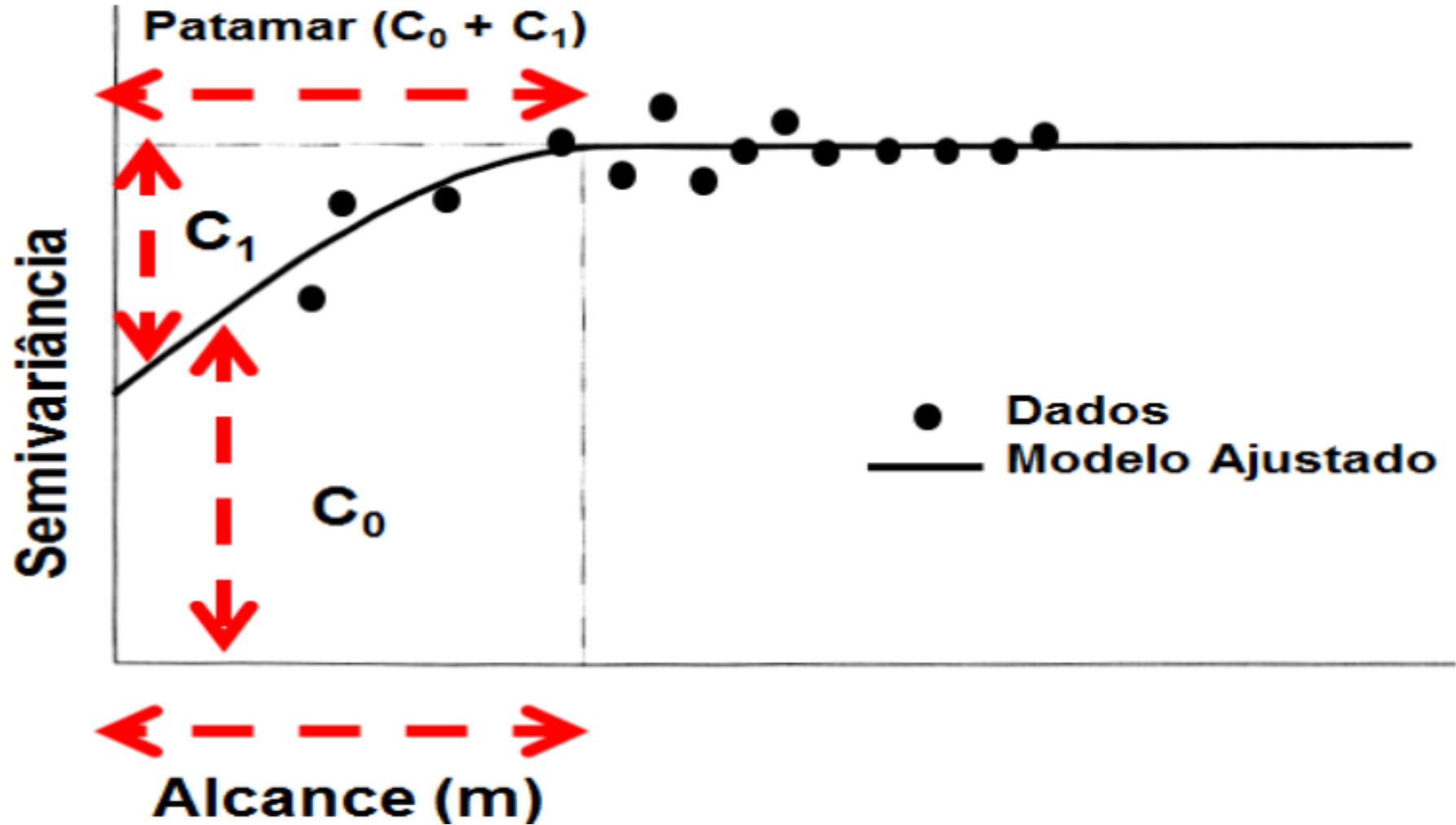
Apêndice I. Valores dos atributos mineralógicos, cor (matiz, valor, croma e IAV) e cor visual do solo obtido pelos métodos espectrais.

Amostra	Fe _d	Fe _o	Hm	Gt	Câmara próximo Móbile (SPM)				Espectroscopia de reflectância difusa (ERD)						
	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	g kg ⁻¹	Matiz	Valor	Croma	IAV	Cor	Matiz	Valor	Croma	IAV	Cor	
1	17.34	1.55	4.26	20.37	8.07	YR	5.61	3.05	1.0		7.2	YR	4.29	5.03	3.28
2	9.39	1.63	3.17	8.82	8.13	YR	5.45	3.07	1.1		7.13	YR	4.34	4.85	3.21
3	10.11	1.14	2.47	11.52	7.44	YR	5.88	3.54	1.5		7.36	YR	4.60	5.35	3.07
4	5.60	1.47	0.91	5.55	8.76	YR	6.05	2.9	0.6		7.82	YR	4.37	4.83	2.41
5	13.91	0.98	6.38	13.46	5.67	YR	5.44	3.43	2.7		6.85	YR	4.35	5.24	3.79
6	9.93	1.22	3.05	10.45	8.4	YR	5.63	2.85	0.8		7.77	YR	4.83	5.00	2.31
7	12.82	1.22	2.54	15.62	8.92	YR	5.39	3	0.6		7.77	YR	4.49	5.26	2.61
8	11.74	1.14	5.27	10.99	6.99	YR	4.94	2.79	1.7		7.14	YR	4.12	4.89	3.39
9	13.18	1.96	6.23	10.92	9.18	YR	5.1	4.34	0.7		6.63	YR	4.55	5.71	4.23
10	11.38	1.31	1.54	14.30	9.37	YR	5.86	3.24	0.3		8.35	YR	5.13	5.33	1.71
11	13.00	1.55	6.69	10.77	5.19	YR	5.55	3.24	2.8		6.78	YR	4.50	5.15	3.69
12	14.27	1.31	6.73	13.13	6.34	YR	5.36	3.55	2.4		7.58	YR	4.44	5.11	2.79
13	11.38	1.06	4.15	11.79	6.31	YR	5.32	3.56	2.5		7.56	YR	4.64	5.14	2.70
14	9.93	1.14	5.06	8.36	6.72	YR	4.93	3.13	2.1		7.19	YR	4.63	5.06	3.07
15	14.81	1.80	5.64	14.42	4.89	YR	5.12	3.26	3.3		7.28	YR	4.15	5.12	3.36
16	10.66	1.55	3.00	11.14	7.74	YR	5.83	2.07	0.8		8.28	YR	5.26	4.92	1.61
17	13.18	1.39	4.70	13.53	8.47	YR	5.16	3.63	1.1		6.79	YR	4.29	5.36	4.01
18	15.17	0.98	7.69	14.02	6.34	YR	5.37	3.81	2.6		6.42	YR	4.47	5.53	4.43
19	13.00	1.71	5.09	12.29	4.48	YR	5.55	3.62	3.6		7.02	YR	4.46	5.19	3.47
20	12.82	0.98	4.57	13.75	1.61	YR	5.53	3.73	5.7		6.68	YR	3.96	4.95	4.15
21	14.81	1.22	5.82	15.13	2.23	YR	5.93	4.37	5.7		6.05	YR	3.96	5.34	5.33
22	10.29	1.39	5.31	8.26	3.95	YR	5.09	3.61	4.3		6.94	YR	4.77	5.21	3.34
23	8.49	1.14	1.61	9.89	6.91	YR	5.6	1.99	1.1		8.68	YR	4.93	4.63	1.24
24	14.27	1.63	4.36	15.24	4.57	YR	4.96	3.72	4.1		6.92	YR	4.26	5.46	3.95
25	10.66	1.22	4.72	9.74	6.82	YR	5.24	2.5	1.5		6.64	YR	3.70	4.64	4.21
26	11.92	1.80	3.37	12.35	7.63	YR	5.34	2.97	1.3		7.49	YR	4.49	4.94	2.76
27	11.38	1.31	5.16	10.27	4.86	YR	5.36	3.22	3.1		6.62	YR	3.89	4.82	4.19
28	8.31	1.06	0.59	10.87	6.76	YR	5.83	1.97	1.1		8.95	YR	4.62	4.18	0.95
29	11.38	1.63	5.36	9.54	2.98	YR	6	3.59	4.2		6.84	YR	4.41	5.18	3.71
30	16.80	1.22	5.64	18.48	2.67	YR	5.74	4.97	6.3		6.3	YR	4.82	6.50	4.99
31	9.39	1.63	3.17	8.82	3.3	YR	5.28	2.51	3.2		7.13	YR	4.34	4.85	3.21
32	14.45	1.88	5.63	13.73	2.89	YR	5.19	3.68	5.0		6.55	YR	4.39	5.67	4.46
33	11.74	1.71	5.19	10.17	4.82	YR	5.44	2.74	2.6		6.73	YR	4.71	5.46	3.79
34	12.10	1.55	5.21	10.98	7.64	YR	5.18	3	1.4		7.05	YR	4.72	5.45	3.41
35	10.84	1.22	2.59	12.40	7.26	YR	5.67	3.13	1.5		7.77	YR	4.92	5.37	2.43
36	14.81	1.88	7.74	11.96	1.17	YR	5.37	4.03	6.6		6.3	YR	4.64	5.66	4.51
37	9.39	2.20	2.55	8.60	4.49	YR	5.51	3.63	3.6		7.41	YR	4.51	5.15	2.96
38	10.29	1.31	3.49	10.42	3.47	YR	5.71	3.47	4.0		6.91	YR	4.67	5.39	3.57
39	15.53	1.47	6.53	15.10	3.12	YR	4.88	4.63	6.5		6.7	YR	4.38	5.70	4.29
40	12.10	2.12	5.47	9.79	4.17	YR	4.52	2.93	3.8		7.26	YR	4.34	4.69	2.96
41	14.45	1.55	5.58	14.31	5.27	YR	5	3.32	3.1		6.7	YR	4.23	5.41	4.22
42	15.71	1.55	5.11	16.84	6.71	YR	4.83	3.41	2.3		6.88	YR	4.11	5.52	4.19
43	11.38	1.63	5.68	9.18	5.13	YR	5.04	2.25	2.2		6.81	YR	4.43	4.86	3.50
44	11.02	1.47	5.06	9.56	5.84	YR	5.01	2.43	2.0		7.05	YR	4.10	4.52	3.25
45	9.93	1.55	3.75	9.15	5.77	YR	5.2	2.87	2.3		6.96	YR	4.19	4.96	3.60
46	13.73	2.12	3.95	14.06	4.85	YR	5.63	3.17	2.9		7.27	YR	4.41	5.01	3.10
47	10.47	2.28	2.97	9.72	3.15	YR	5.53	2.69	3.3		7.55	YR	4.22	4.74	2.75
48	10.66	1.22	3.59	11.00	4.06	YR	5.15	3.38	3.9		7.45	YR	4.77	5.22	2.79
49	12.10	1.63	4.04	12.15	2.79	YR	4.68	3.24	5.0		7.43	YR	4.55	5.19	2.93
50	13.36	1.71	3.26	14.89	4.67	YR	5.38	2.96	2.9		7.71	YR	4.72	5.28	2.56
51	10.11	1.31	4.11	9.44	7.5	YR	4.27	2.34	1.4		7.21	YR	4.08	4.53	3.10

Fe_d: Óxidos de ferro pedogênicos (g kg⁻¹); Fe_o: Óxidos de ferro de baixa cristalinidade (g kg⁻¹); Hm: Hematita (g kg⁻¹); Gt: Goethita (g kg⁻¹); IAV: Índice de avermelhamento do solo.



Apêndice II. Mapa da intensidade de formas do terreno pela assinatura geomorfométrica (escala ultradetalhada <math><1:5.000</math>). Adaptado de Silva (2016) e projeto CNPQ (Proc.nº 402796/2016-0). Fonte: referências no capítulo 3, p.92.



Apêndice III. Modelo de semivariograma experimental (CARMO, 2014).
Fonte: referência capítulo 1, p.25.