

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**MAPEAMENTO DA ERODIBILIDADE DE LATOSSOLOS
UTILIZANDO A COR**

**Luís Gustavo Teixeira
Engenheiro Agrônomo**

2017

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E VETERINÁRIAS
CÂMPUS DE JABOTICABAL**

**MAPEAMENTO DA ERODIBILIDADE DE LATOSSOLOS
UTILIZANDO A COR**

Luís Gustavo Teixeira

Orientador: Prof. Dr. Marcílio Vieira Martins Filho

Coorientadores: Prof. Dr. José Marques Júnior

Prof. 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
(Ciência do Solo).**

2017

T266m Teixeira, Luís Gustavo
Mapeamento da erodibilidade de latossolos utilizando a cor / Luís Gustavo Teixeira. -- Jaboticabal, 2017
xiii, 87 p. : il. ; 29 cm

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2017

Orientador: Marcílio Vieira Martins Filho

Co-orientadores: José Marques Júnior, Diego Silva Siqueira

Banca examinadora: Marcos Guimarães de Andrade Landell, Newton La Scala Júnior, Teresa Cristina Tarlé Pissarra, Walter Maccheroni Júnior

Bibliografia

1. Erosão do solo. 2. Espectroscopia. 3. Lógica fuzzy. 4. Mineralogia. 5. Pedometria. I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.459

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



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: MAPEAMENTO DA ERODIBILIDADE DE LATOSSOLOS UTILIZANDO A COR

AUTOR: LUÍS GUSTAVO TEIXEIRA

ORIENTADOR: MARCÍLIO VIEIRA MARTINS FILHO

COORIENTADOR: JOSÉ MARQUES JUNIOR

COORIENTADOR: DIEGO SILVA SIQUEIRA

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

Prof. Dr. MARCÍLIO VIEIRA MARTINS FILHO
Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Pesquisador Dr. WALTER MACCHERONI JUNIOR
Diretoria Agroindustrial / Grupo São Martinho S.A. / Pradópolis/SP

Prof. Dr. NEWTON LA SCALA JUNIOR
Departamento de Ciências Exatas / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Prof. Dr. MARCOS GUIMARÃES DE ANDRADE LANDELL
Centro Avançado de Pesquisa Tecnológica do Agronegócio de Cana / IAC - Ribeirão Preto/SP

Profa. Dra. TERESA CRISTINA TARLE PISSARRA
Departamento de Engenharia Rural / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 30 de agosto de 2017

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

LUÍS GUSTAVO TEIXEIRA – nascido em 10 de janeiro de 1985 em Ribeirão Preto – SP, e graduado em Engenharia Agrônômica em 2007 pela Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, da Universidade Estadual Paulista, Câmpus Jaboticabal (FCAV-UNESP). Bolsista de iniciação científica pela Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) de 2004 a 2007, logrou duas menções honrosas em eventos de iniciação científica (XIII SIICUSP, 2005; XVIII CIC UNESP, 2006), pelos trabalhos desenvolvidos sobre preparo e respiração do solo. Ao concluir o curso de Agronomia, recebeu três premiações: melhor classificação no conjunto de disciplinas profissionalizantes (CREA-SP), maior média entre as disciplinas e melhor Trabalho de Graduação (FCAV-UNESP). Ainda nesta instituição, como pós-graduando no Programa de Produção Vegetal, deu continuidade à linha de pesquisa em seu Mestrado (2008-2010) sobre emissão de CO₂ do solo após preparo. Em 2014, reingressou na FCVA-UNESP como aluno de Doutorado em Ciência do Solo, para estudo sobre manejo conservacionista do solo e da água. Paralelamente, desde 2007, atua profissionalmente na Usina São Martinho, localizada em Pradópolis - SP, maior unidade de processamento de cana-de-açúcar do mundo, com capacidade de moagem de 10 milhões de toneladas por safra. Ocupou os cargos de Estagiário, Trainee, Suporte Técnico, Coordenador e Gerente de Produção Agrícola. A partir de 2015, é Gerente Agrícola da Usina São Martinho, sendo responsável por todos os processos agrícolas: Preparo do Solo e Plantio, Tratos Culturais, Colheita e Transporte, Manutenção Agrícola, Serviços Agrícolas e Qualidade Agrícola.

EPÍGRAFE

"É junto dos bão que a gente fica mió."

João Guimarães Rosa

"Dar o exemplo não é a melhor maneira
de influenciar os outros. É a única".

Albert Schweitzer

" Olhe bem para a natureza e então você vai
entender tudo melhor."

Albert Einstein

DEDICO

Dedico aos meus pais Antônio Carlos Teixeira e Solange Aparecida Gonçalves Teixeira pelo exemplo, amor, incentivo e carinho. Dedico também às minhas queridas irmãs Ana Carolina Teixeira, Ana Clara Teixeira e Ana Flávia Teixeira, e a minha Esposa Maristela Braga Martins Teixeira, pelo apoio, confiança, companheirismo e por sempre acompanhar meus projetos de vida.

OFEREÇO

A minha família, em especial, aos meus queridos avós maternos, Oswaldo Gonçalves e Odacy Ferreira Gonçalves, e paternos, José Carlos Teixeira e Ana Rita Taveira Teixeira, pelo carinho, atenção, orações e apoio ao longo de minha vida.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, pela família e amigos que me concedeu, pelas oportunidades e desafios, por me conduzir e guiar, amparando-me com força e coragem nos momentos difíceis e por permitir que mais esta etapa se concretizasse.

À Usina São Martinho, em especial Antônio Carlos Pelizari Pinto, Mário Ortiz Gandini e Sidney Menossi, pelo exemplo, direcionamento, apoio, assim como pela disponibilização de área experimental e pelos recursos para pesquisa.

A todos os colaboradores da Usina São Martinho, dos diversos processos sob minha responsabilidade, que me auxiliaram no desafio de trabalhar e cursar a pós-graduação *Stricto Sensu*.

Aos colegas Ana Beatriz Coelho França, Daniel de Bortoli Teixeira, Frederico Luiz Siansi e Rafael Gonçalves Peluco, pelo fundamental auxílio no aperfeiçoamento deste trabalho.

Aos meus estimados mestres, por todo o conhecimento compartilhado no decorrer desta pós-graduação.

À FCAV/UNESP, por disponibilizar ferramentas, estrutura e docentes para minha capacitação e realização deste trabalho em um ambiente acadêmico profícuo.

A todos os que contribuíram de forma direta ou indireta para o êxito deste trabalho e para minha formação como Doutor em Agronomia

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1 Erosão nos solos brasileiros	4
2.2 Fatores determinantes do processo erosivo	6
2.3 Mineralogia da fração argila dos solos tropicais.....	8
2.4 Modelos preditivos de erosão hídrica	10
2.5 Funções de pedotransferência: Espectroscopia de Reflectância Difusa	12
2.6 Ferramentas para modelagem da erodibilidade dos solos	14
2.6.1 Geoestatística	14
2.6.2 Lógica Fuzzy	16
3. MATERIAL E MÉTODOS	18
3.1 Descrição da área de amostragem	18
3.2 Análises laboratoriais	20
3.3 Análise dos dados	22
3.3.1 Estatística descritiva, análise de média e geoestatística	22
3.3.2 Lógica Fuzzy	25
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	28
5. CONCLUSÕES.....	43
6. REFERÊNCIAS	44
APÊNDICE	67

MAPEAMENTO DA ERODIBILIDADE DE LATOSSOLOS UTILIZANDO A COR

RESUMO – A busca por ferramentas que estimem a erosão usando técnicas mais rápidas e menos onerosas e não impactantes ao ambiente são assuntos em ascensão. O objetivo deste trabalho foi estimar a predisposição à erosão em Latossolos por meio da cor obtida por Espectroscopia de Reflectância Difusa (ERD). Este propósito melhora as estratégias de manejo e conservação do solo e da água em áreas de expansão e reforma de cana-de-açúcar, evitando os impactos ambientais negativos. A área de estudo localiza-se no município de Guatapar (SP), com os solos: Latossolo Vermelho distrófico, Latossolo Vermelho distroférico, Latossolo Vermelho eutroférico e Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico. Foram coletadas 9 amostras de solo representativas da área em transeo de 2600 m (1 ponto a cada 289 m) e mais 129 pontos em malha de densidade amostral de 1 ponto a cada 3 ha, na profundidade de 0,00 a 0,20 m. Para as 138 amostras coletadas, foram determinados os atributos mineralógicos, físicos, químicos e da cor. Os valores da K_i , K_r e τ_c foram estimados por meio de equaes propostas por Flanagan e Linvingston (1995). A variabilidade dos atributos do solo foi descrita por meio da construo dos gráficos *boxplot* em funo de 3 compartimentos previamente observados. Foi possível identificar os limites entre os compartimentos com diferentes potenciais erosivos, não identificados pela carta de Munsell. Regressões lineares simples foram estabelecidas entre K_i , K_r e τ_c e os atributos mineralógicos e aqueles relativos à cor do solo. Os componentes da cor mais eficientes para estimar a K_i foi Matiz (88% de precisão); K_r , Valor (62%), e τ_c , Cromo (86%). As análises de dependência espacial mostram que a Matiz pode estimar a K_i , K_r e τ_c com 68% de precisão até  distância média de 215 m. A aplicao da lógica fuzzy foi uma ferramenta eficiente para a avaliao das áreas com predisposio  erosão, posto que acrescentou maiores possibilidades de limites no zoneamento de áreas para fins de manejo específico. A cor do solo obtida pela ERD mostrou-se um método interessante para detectar a predisposio do solo  erosão, partindo do princípio de ser uma técnica não invasiva, de não utilizar produtos para análises químicas e de ser sensível em estimar a erodibilidade e a tensão cisalhante crítica do solo para áreas maiores, auxiliando no planejamento estratégico da conservao do solo em ambiente tropical.

Palavras-chave: erosão do solo, espectroscopia, lógica fuzzy, mineralogia, pedometria.

ERODIBILITY MAPPING IN LATOSOILS USING COLOR

ABSTRACT – The tools to estimate the erosion using faster techniques, which are also less expensive and inoffensive to the environment, are issues on the rise. The aim of this work was to estimate erosion predisposition in Latosoils using the color obtained by Diffuse Reflectance Spectroscopy (DRS). This purpose improves the strategies to soil and water conservation and management in areas of sugarcane expansion and reform, as well as avoids negative environmental impacts. The study was carried out in the municipality of Guatapar (SP), with the following soil types: Dystrophic Red Latosol, oxisol, eutradox red latosol, and Brazilian Oxisol. 9 representative soil samples were collected in a transect with 2600 m (1 point in each 289 m), and another 129 soil samples into a grid of sample density of 1 point per 3 ha, in the depth of 0.00 to 0.20m. For the total 138 soil samples collected, mineralogical, physical, chemical and color attributes of the soil were determined. Interrill and Rill erodibility and critical soil shear stress were estimated using equations proposed by Flanagan and Linvingston (1995). The variability of the soil attributes was described using boxplot graphs in function of three compartments previously studied in the area. It was possible to identify the limits between compartments and different erosive potential not identified by the Munsell Soil Color Charts. Simple linear regressions were established to Interrill and Rill erodibility, and critical soil shear stress with soil mineralogical attributes, and those related to soil color. The most efficient color components to estimate Interrill erodibility were Hue (88% of precision), Rill erodibility, Value (62% of precision) and critical soil shear stress, Chroma (86%). Spatial dependence analyzes show that the hue can estimate those erosion factors with 68% of precision until an average distance of 215m. The application of fuzzy logic was an efficient tool for evaluating areas with erosion predisposition, leading to better possibilities of limits in specific agricultural zones. The soil color obtained by Diffuse Reflectance Spectroscopy (DRS) showed to be a good alternative tool to detect the erosion predisposition of soil, considering that it is a non-invasive technique, it does not use products for chemical analysis and it is sensitive to estimate soil erodibility and critical soil shear stress within greater areas, assisting in the strategic planning of soil conservation in a tropical environment.

Keywords: soil erosion, spectroscopy, fuzzy logic, mineralogy, pedometrics.

LISTA DE ABREVIações

ERD	Espectroscopia de Reflectância Difusa
M	Matiz
C	Croma
V	Valor
IAV	Índice de Avermelhamento
K_i	Erodibilidade em entressulcos
K_r	Erodibilidade em sulcos
τ_c	Tensão cisalhante crítica do solo
AMF	Areia Muito Fina
AF	Areia Fina
AM	Areia Média
AGR	Argila
MO	Matéria Orgânica
Hm	Hematita
Gb	Gibbsita
Ct	Caulinita
Gt	Goethita
SER	Resistência do Solo à Erosão
Fe_2O_3	Ferro total
Al	Alumínio
Ds	Densidade do solo
USLE	Universal Soil Loss Equation
RUSLE	Revised Universal Soil Loss Equation
WEPP	Water Erosion Prediction Project
D_i	Erosão em entressulco
D_r	Erosão em sulco
R^2	Coeficiente de determinação
B	Basalto Formação Serra Geral
DCE	Depósito Colúvio Eluvionar
DA	Depósito Aluvionar
LVAd3.1	Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura média
LVD3.1	Latossolo Vermelho distrófico, textura média
LVD3.4	Latossolo Vermelho distrófico, textura média
LVdf1.1	Latossolo Vermelho distroférico, textura argilosa
LVef1.1	Latossolo Vermelho eutroférico, textura argilosa
ATG	Análise Termogravimétrica
TFSA	Terra Fina Seca ao Ar
C_0	Efeito pepita
C_0+C	Patamar

1. INTRODUÇÃO

O potencial de utilização desta pesquisa ampara decisões para 44 mil hectares do Estado de São Paulo (Siqueira et al., 2015) e aumenta o potencial de uso e a ocupação sustentável de Latossolos com diferentes teores de ferro, assim como fez Peluco (2016) em mesma área de estudo, com estudos sobre o potencial de sorção de herbicida pré-emergente, utilizando cor, e Bahia (2016), analisando a emissão de gases e utilizando cor e assinatura magnética.

Outros autores, estudando mesma área do presente trabalho, obtiveram resultados sobre a erosão utilizando magnetismo e assinatura espectral (BARBOSA, 2014), protocolo de planejamento amostral e potencial de produção de cana-de-açúcar (SIQUEIRA et al., 2010 a e b).

Nas áreas de cultivo de cana-de-açúcar, um novo conceito de sistematização do solo tem sido utilizado, o qual visa a facilitar e a otimizar as operações mecanizadas do preparo de solo à colheita da cana-de-açúcar. Contudo, dentro desta nova sistemática, a eliminação de terraços e sua utilização, como tradicionalmente apresentado pela área de Conservação do Solo e da Água, pressupõem a adoção de novas práticas e o entendimento pleno de fatores que controlam o processo de erosão em sulcos e entressulcos. Neste sentido, o conhecimento e a possibilidade de prever a erodibilidade, e o provável nível de tensão cisalhante crítica do solo, a partir da qual o solo erode devido à formação de sulcos, são fundamentais para o controle deste processo em áreas sob a nova sistematização de não uso de terraços (FERREIRA, 2015).

Ainda mais importante que conhecer os fatores e as variáveis envolvidas com o processo de erosão, é conhecer antecipadamente os efeitos de sistemas de manejo e uso do solo, práticas agrícolas e de controle da erosão (FERREIRA, 2015). Dessa forma, é igualmente importante estimar as variações espaciais e temporais da Resistência do Solo à Erosão (SER), bem como conhecer o impacto da SER nas dimensões e na locação de sulcos e de ravinas (KNAPEN; POESEN, 2010). A SER é controlada por fatores como: condições ambientais; uso do solo; sistemas de preparo; erodibilidade em sulcos influenciada pelo conteúdo de água do solo; densidade do

solo; densidade de raízes; densidade da parte aérea; resíduos culturais e atividade microbológica do solo; e resistência ao cisalhante do solo, a qual afeta a tensão crítica de cisalhamento do solo ou a tensão cisalhante crítica do solo (τ_c) (KNAPEN et al., 2007; KNAPEN; POESEN, 2010).

O potencial de compactação de Latossolos com diferentes teores de ferro pode variar de acordo com a mineralogia destes solos. De acordo com Rossetti (2015), após a simulação de sucessivas passadas de implementos pesados sobre Latossolos com teores de ferro total próximo a 50 g kg^{-1} tem o potencial de compactação 40% superior ao de Latossolos com teor de ferro próximo a 120 g kg^{-1} . Portanto, mesmo em áreas com menores teores de Fe, em que se espera menor tensão cisalhante crítica do solo, esta pode apresentar maior valor devido à compactação do solo, uma vez que solos com baixo teor de ferro apresentam maior potencial de compactação (ROSSETTI, 2015).

A erodibilidade do solo representa a facilidade com que partículas de solo são destacadas e transportadas pela chuva e pela enxurrada (FREITAS, 2014). Segundo Bertoni e Lombardi Neto (1999), as propriedades do solo que influenciam em sua erodibilidade são as mesmas que afetam a velocidade de infiltração da água no solo, a permeabilidade e a capacidade de absorção de água e aquelas que modificam a resistência à dispersão, ao salpicamento, à abrasão e às forças de transporte da enxurrada.

Determinar a erodibilidade do solo em sulcos (K_r), entressulco (K_i) e a tensão cisalhante crítica do solo (τ_c) é uma tarefa complexa, pelas inúmeras variáveis envolvidas (SUMMERFIELD, 1991; FLANAGAN; LIVINGSTON, 1995). Para se chegar aos valores correspondentes à erodibilidade do solo e de sua tensão cisalhante crítica, existem basicamente três métodos (FREITAS, 2014; FLANAGAN; LIVINGSTON, 1995): 1) determinar estes parâmetros em parcelas experimentais no campo, em condição natural de chuva. Contudo, este é um método muito caro e demanda muito tempo para a aquisição das informações; 2) determinar a K_r , K_i e τ_c em nível de campo, mas por meio de chuvas simuladas (WISCHMEIER; SMITH, 1978), porém baseia-se na quantificação da erodibilidade em razão das perdas de solo e do fator erosividade, sob condições de chuva simulada; 3) estimativas da K_r , K_i e τ_c que ocorrem de forma indireta, baseando-se em regressões múltiplas que

contenham como variáveis independentes atributos mineralógicos, físicos, morfológicos e químicos do solo ou as relações destes.

Camargo et al. (2008) afirmaram que a fração argila interfere diretamente no comportamento dos atributos físicos dos solos, inclusive na estabilidade de agregados do solo, que também possui relação estreita com a erodibilidade. Contudo, tanto os métodos tradicionais de observação dos fatores de erosão do solo e τ_c , como dos atributos mineralógicos, encontram algumas limitações.

Deste modo, as pesquisas sobre K_i , K_r e τ_c tornam-se um desafio, fazendo com que a demanda por modelos que sejam capazes de estimar de forma indireta o fator erodibilidade sejam constantes. As principais limitações nas determinações da K_i , K_r e τ_c estão relacionadas ao alto custo, tempo necessário para adquirir e processar as informações (WISCHMEIER; SMITH, 1978; McBRATNEY; MENDONÇA SANTOS; MINASNY, 2003; BARBOSA, 2014), e no caso das análises mineralógicas, o fato de condicionarem um agravante, a produção de resíduos (TORRENT; BARRÓN, 2008). Neste contexto, segundo Barbosa (2014), a pedometria surge como uma ferramenta que torna possível superar estas limitações por meio das funções de pedotransferência. Estas funções são capazes de prever certas propriedades dos solos a partir de outras propriedades facilmente medidas e rotineiramente obtidas a custos mais baixos (EMBRAPA, 2003).

Entre os diversos métodos indiretos, destaca-se a assinatura espectral, que corresponde à reflectância de um objeto em cada comprimento de onda, a qual pode ser obtida por meio de sensores orbitais (CASTALDI et al., 2016) e Espectroscopia de Reflectância Difusa (ERD) (GUPTA et al., 2016). Atributos físicos e químicos (DENARDIN, 1990), nomograma (MARQUES et al., 1997), percentagem de matéria orgânica (AMORIM; SILVA; PRUSKI, 2009), condições de chuva natural (EDUARDO, 2012), suscetibilidade magnética do solo (SANTOS et al., 2011) e Espectroscopia de Reflectância Difusa do solo (GÚZMAN et al., 2013) vêm sendo utilizados como métodos alternativos na estimativa da erodibilidade do solo.

A Espectroscopia de Reflectância Difusa (ERD) consiste em uma análise rápida, econômica, sem uso de reagentes químicos e sem destruição das amostras (TORRENT; BARRÓN, 2008). Atualmente, a ERD vem sendo utilizada em solos da região temperada (ABDI et al., 2016) e tropical (AQUINO et al., 2016), especialmente

nos estudos das propriedades do solo (JANIK; MERRY; SKJEMSTAD, 1998; MALLEY; MARTIN; BEN-DOR, 2004; CAÑASVERAS et al., 2012).

Parâmetros da cor do solo, como Matiz, Valor e Cromo, obtidos na faixa do visível pela ERD, são utilizados na estimativa dos atributos mineralógicos (TORRENT; BARRÓN, 2008; VISCARRA ROSSEL et al., 2010). Segundo Torrent e Barrón (2008), a cor e vários outros atributos visuais do solo são altamente sensíveis à dimensão, à natureza das partículas, à proporção, à morfologia e à associação espacial de seus minerais e componentes orgânicos (BARBOSA, 2014). Portanto, Latossolos com diferentes teores de ferro, apesar de mesma classificação pedológica, possuem diferentes mineralogias e, por conseguinte, diferentes pré-disposições à erosão. A cor do solo estimada pela Espectroscopia de Reflectância Difusa (ERD) é sensível às variações mineralógicas de óxidos de ferro que, por sua vez, influenciam em parâmetros da erosão em sulco (K_r), entressulcos (K_i) e tensão cisalhante crítica do solo (τ_c). Neste sentido, o presente trabalho teve como objetivo estimar a predisposição à erosão em Latossolos por meio da cor obtida por Espectroscopia de Reflectância Difusa (ERD).

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Erosão nos solos brasileiros

De toda a superfície terrestre, aproximadamente 30% de sua extensão são solos cultiváveis, no entanto a agricultura moderna é capaz de explorar apenas 22% desta área. Ou seja, apenas 6,6 % de toda a área é cultivada pela sociedade. Os restantes 78% da superfície terrestre estão indisponíveis para agricultura por ser quente, fria ou seca demais (FAO, 1980). Portanto, deve-se utilizar tal recurso natural de maneira responsável, racional e técnica, de modo a se otimizar o acesso a terra e preservar sua biodiversidade para as futuras gerações.

A degradação dos solos ocasionada pela erosão representa um dos maiores problemas ambientais (VAN PHAM; SMITH, 2014; IFAD, 2014). No Brasil, cerca de 600 milhões de toneladas de solo agricultável são perdidos anualmente, já no Estado

de São Paulo esta perda foi estimada em aproximadamente 194 milhões de toneladas por ano (VEIGA FILHO, 1992).

O solo e a água são elementos fundamentais de sustentação dos sistemas agrícolas e naturais (BERTONI; LOMBARDI NETO, 2008). Por isso, várias práticas conservacionistas vêm sendo adotadas a fim de minimizar os efeitos das chuvas intensas sobre os solos. O adequado manejo do solo otimiza seu uso, aumenta a produção agrícola, reduz os impactos ambientais negativos, desenvolve novos sistemas de produção capazes de promover a sustentabilidade ambiental, social e econômica para as gerações presentes e futuras.

A erosão corresponde a um processo de desprendimento e arraste acelerado das partículas do solo ocasionado pelo vento (erosão eólica) e pela água (erosão hídrica) (GALETI, 1973; BERTONI; LOMBARDI NETO, 1999). A agricultura não conservacionista pode agravar o processo erosivo, provocando prejuízos ao ambiente e o depauperamento dos recursos naturais (RAHMAN; SHI; CHONGFA, 2009). A erosão antrópica ou acelerada é considerada a principal causa de degradação dos solos agrícolas (SILVA; SCHULS; CAMARGO, 2004), e no Brasil a erosão hídrica é a principal responsável pelo desgaste das partículas da superfície do solo (LEPSCH, 2002). Segundo Guerra (2012), para evitar a erosão, é necessário compreender a dinâmica erosiva. O impacto da gota de chuva provoca a ruptura do agregado (quebrando-o em tamanhos menores) e o transporte das partículas. A erosão por salpicamento ou *splash* pode alterar-se em função da resistência do solo ao impacto da gota da chuva e com sua própria energia cinética, ou seja, habilidade da chuva em causar erodibilidade (MORAES, 2016).

O impacto da gota de chuva provoca o selamento e o encrostamento da superfície do solo devido aos processos físicos de ruptura do agregado, ao destacamento e transporte de partículas, além das trocas catiônicas e obstrução de poros pela remobilização de silte e argila nos espaços intergranulares. Todas estas interações acabam provocando a compactação, o destacamento, o arraste e a deposição das partículas, especialmente em superfícies com ausência de cobertura vegetal (MORAES, 2016). Neste processo, forma-se uma camada fina de maior densidade na superfície, que se caracteriza por maior resistência pela redução da taxa de infiltração e de condutividade hidráulica e pelo aumento do escoamento superficial

direto, induzindo à erosão do solo (ZEJUN et al., 2002). O resultado deste processo é o arraste de elementos nutritivos essenciais que estão na solução do solo, como fertilizantes, sementes e defensivos agrícolas (IZIDORIO et al., 2005). Neste sentido, o conhecimento sobre a capacidade de cada solo em sofrer erosão é de extrema importância para realizar o manejo adequado de plantas de cobertura, práticas agrícolas e utilização racional de fertilizantes.

Em um processo de erosão em sulcos, a desagregação do solo só ocorrerá quando a tensão de cisalhamento do fluxo for maior que a tensão crítica de cisalhamento do solo (τ_c). A tensão cisalhante crítica do solo (τ_c) é um importante controlador da resistência ao arraste de solo. O valor de τ_c representa, portanto, uma medida da resistência do solo sob o efeito de uma força, o qual pode ser definido pela equação de Coulomb (ZAHO, 2000). Tal valor é adotado por pesquisadores (LUCA JÚNIOR; MARTINS FILHO, 2008; OLIVEIRA et al., 2009) como um índice, para descrever quantitativamente o limite das condições do solo para o início do processo de erosão em sulcos. A erodibilidade em sulcos (K_r) e a tensão cisalhante crítica do solo (τ_c) determinam a SER e não se correlacionam entre si, mas representam diferentes propriedades do solo (KNAPEN et al., 2007).

2.2 Fatores determinantes do processo erosivo

Para compreender o processo de erodibilidade e a tensão cisalhante crítica dos solos, faz-se necessário compreender os diversos fatores a eles relacionados, como a matéria orgânica, a textura, a mineralogia, as características física, química e biológica do solo, assim como a interação entre eles.

Matéria orgânica

A erodibilidade dos solos pode ser alterada pela matéria orgânica, que desempenha importante papel na capacidade de armazenamento de água e na estabilidade dos agregados (LIMA, 1987). Quanto maiores forem os teores de matéria orgânica nos solos, maior será o tamanho dos agregados e maior será a resistência do solo à dispersão e ao arraste pela enxurrada (SILVA, 1990). Altas correlações entre os teores de matéria orgânica e os modelos de predição da erodibilidade foram encontradas por Silva (1994). Além disso, de acordo com Rocha (2003), em

determinados valores de umidade, a matéria orgânica pode reduzir a resistência ao cisalhamento em função da menor densidade do solo, devido ao menor contato entre as partículas. Por outro lado, dependendo da umidade, a matéria orgânica é capaz de exercer algumas funções físico-químicas, como melhorar o desenvolvimento radicular e a estruturação do solo, conferindo maior resistência ao cisalhamento.

Mineralogia

Diversos autores têm encontrado altas correlações entre os óxidos de ferro e de alumínio com a erodibilidade do solo (LIMA; ANDRADE, 2001). Em seus trabalhos, Denardin (1990) observou que incluir os teores de óxidos de ferro e de alumínio em seu modelo de erodibilidade melhorou o coeficiente do trabalho. Minerais como a gibbsita, óxidos de ferro e matéria orgânica são capazes de favorecer a formação de pequenos grânulos, diminuindo, portanto, a coerência entre as partículas, propiciando, neste caso, a erosão em sulcos. Já a presença de caulinita promove a diminuição da permeabilidade dos solos, promovendo maior volume de enxurrada e desgaste uniforme da superfície do solo, ou seja, favorece a erosão laminar (LIMA, 1987).

Textura

Elevados teores de silte, aliados à baixa agregação, podem favorecer a erosão entressulcos, enquanto altos teores de argila proporcionam um comportamento inverso (LIMA; ANDRADE, 2001). Neste sentido, trabalhos de Silva (1990) e Silva (1994) mostram que a erodibilidade do solo tende a aumentar quando os teores de areia fina e silte são elevados, e a diminuir com a elevação dos teores de argila.

Solos que apresentam elevados teores de silte e areia fina tendem a formar uma crosta na superfície do solo devido ao impacto da gota da chuva (LEMOS; LUTZ, 1957). Esta desagregação dos torrões acaba transformando-o em pequenas partículas, que são facilmente arrastadas para dentro dos poros, reduzindo sua permeabilidade. Solos mais arenosos têm maior quantidade de partículas deslocadas pelo impacto da gota de chuva devido à menor coerência entre as partículas (SILVA et al., 1995).

Estrutura e relevo

A estrutura do solo é um fator igualmente importante na determinação da erodibilidade, pois influencia na taxa de infiltração, na resistência à dispersão, no deslocamento por salpico, na abrasão e nas forças de transporte pela enxurrada (SILVA, 1994). Neste sentido, Wischmeier, Johnson e Cross (1971) mostraram que a estrutura granular é menos suscetível à erosão que a estrutura em blocos, maciça e laminar. Por outro lado, Lima (1987) relata que a estrutura granular condiciona uma baixa coerência entre os grânulos do solo, devido à pequena área de contato, favorecendo o desprendimento e o arraste das partículas pela água. Igualmente importante à estrutura do solo, é conhecer a posição de determinado solo no relevo. Áreas de relevo plano e suave ondulado minimizam o efeito cisalhante da água, o que, juntamente com a permeabilidade proporcionada pela estrutura granular, diminui a ação erosiva da água.

2.3 Mineralogia da fração argila dos solos tropicais

De acordo com estudos realizados por Schwertmann e Taylor (1989), goethita e hematita são os minerais de maior ocorrência em solos intemperizados das regiões tropicais e subtropicais. Nos solos intemperizados destas regiões, há maior presença de minerais como a goethita, hematita, caulinita e gibbsita devido à maior solubilidade do silício em relação ao Fe e ao Al, e menor ocorrência de minerais silicatados (SCHAEFER; FABRIS; KER, 2008).

Segundo Kämpf e Curi (2000), os óxidos e hidróxidos de ferro e de alumínio são considerados indicadores pedogenéticos, pois sua formação é influenciada pelas condições do ambiente e por persistirem por longo tempo no solo. Há grande diversidade entre os óxidos e hidróxidos de ferro e de alumínio devido aos diferentes ambientes pedogenéticos (CAMARGO, 2009). Estudos realizados por Schwertmann e Kämpf (1985) evidenciam diferenças entre as características de goethitas e hematitas nos solos das regiões Sul e Central do Brasil. A diferença entre as populações dos óxidos e dos hidróxidos de ferro pode ser encontrada até mesmo em uma microescala, fato este relevante nos estudos de caracterização destes minerais (SCHWERTMANN; TAYLOR, 1989).

A estabilidade dos agregados do solo está relacionada com o teor e os atributos dos óxidos de ferro, como hematita e goethita (LUTZ, 1936; KROTH; PAGE, 1947; CHESTERS; ATTOE; ALLEN, 1957; SCHWERTMANN; KÄMPF, 1985). Segundo Cornell (1973), a íntima relação de goethitas de pior cristalinidade com a estabilidade do agregado é atribuída à maior área de superfície específica desse mineral. Este fenômeno proporciona aumento no número de grupos hidroxilas disponíveis para interação com os demais compostos que favorecem a estabilidade dos agregados. Quanto maiores forem os teores de hematita, de goethita e de gibbsita, maiores serão a macroporosidade e a porosidade total, e menor será a densidade do solo, para Latossolo Bruno ácrico e Latossolo Vermelho distrófico (GHIDIN et al., 2006b).

Outros importantes minerais que também influenciam nas características físicas do solo são caulinita e gibbsita, por isso é importante compreender todas estas relações a fim de elucidar o comportamento destes atributos. De acordo com Ferreira, Fernandes e Curi (1999b), a caulinita e a gibbsita são os constituintes mineralógicos com maior influência sobre os atributos físicos dos Latossolos da região Sudeste do Brasil.

Azevedo e Bonumá (2004) citaram que, em cinco horizontes B óxicos, os agregados mais estáveis são os de solos com alta razão gibbsita/(gibbsita+caulinita). Ferreira, Fernandes e Curi (1999a) concluíram que caulinita e gibbsita são os minerais responsáveis pelo desenvolvimento da estrutura dos Latossolos estudados. Segundo Vitorino et al. (2003), para Latossolos e Argissolos da região Sudeste do Brasil, a estabilidade dos agregados do solo é positivamente influenciada pela gibbsita, enquanto a caulinita promove o efeito inverso.

Este resultado pode estar relacionado com a participação do $Al(OH)_3$ como agente de ligação entre as partículas, justificando a positiva interferência da gibbsita na estabilidade do agregado (PEDROTTI, 2000). Estes minerais não são importantes somente na agregação do solo, uma vez que a densidade do solo (D_s) também é afetada, apresentando correlação positiva entre caulinita e D_s , e o inverso ocorre com a gibbsita (FERREIRA; FERNANDES; CURI, 1999b; PEDROTTI et al., 2003; GHIDIN et al., 2006b). Valores de densidade do solo mais baixos para Latossolos gibbsíticos, e mais altos para Latossolos caulíníticos têm sido reportados na literatura (SILVA et al., 1995; MUGGLER et al., 1996; CHAGAS et al., 1997). Ressalta-se que estas

relações foram estudadas majoritariamente em Latossolos, havendo relativa carência de dados para Argissolos desenvolvidos de arenitos.

Os atributos mineralógicos podem, também, variar de acordo com as características da paisagem. De acordo com Camargo et al. (2008), os atributos mineralógicos apresentam dependência espacial e relacionam-se com pequenas variações do relevo. Por exemplo, altas concentrações de gibbsita são encontradas em solos com estágio avançado de intemperismo, como os Latossolos e os Argissolos (SOIL SURVEY STAFF, 1996). Brito et al. (2006), estudando um Latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar, relataram que áreas côncavas apresentam maiores valores de densidade do solo e resistência do solo à penetração, provavelmente devido à mineralogia mais gibbsítica e aos maiores teores de matéria orgânica nestes solos.

2.4 Modelos preditivos de erosão hídrica

Existem diferentes modelos matemáticos que são capazes de estimar a degradação, o transporte e a deposição das partículas do solo. Esta estimativa é essencial para prever possíveis impactos ocasionados por uma determinada cultura ou prática agrícola antes mesmo de ter sido implementada. Os principais modelos são: (i) modelo empírico de predição da erosão denominado *Universal Soil Loss Equation* (USLE) (WISCHMEIER; SMITH, 1978), que apresenta a seguinte equação: $A = R \times K \times LS \times C \times P$; (ii) *Revised Universal Soil Loss Equation* (RUSLE) (RENARD et al., 1997); e (iii) modelo determinístico de erosão denominado *Water Erosion Prediction Project* (WEPP) (FLANAGAN et al., 1995).

A erodibilidade do solo expressa a suscetibilidade de um solo à erosão, a qual é dependente dos atributos mineralógicos, químicos, morfológicos e físicos do solo (WISCHMEIER; SMITH, 1978; BERTONI; LOMBARDI NETO, 2010). No modelo USLE, o fator K representa a erodibilidade do solo (WISCHMEIER; SMITH, 1978), enquanto no modelo WEPP, o fator K é subdividido em K_i (erodibilidade do solo em entressulcos) e K_r (erodibilidade do solo em sulcos) (FLANAGAN et al., 1995).

A determinação da erosão total, segundo o modelo WEPP, corresponde ao somatório de D_i (erosão em entressulco) e D_r (erosão em sulco). A relação entre a taxa de desagregação e a presença de cobertura vegetal, no processo de erosão em entressulcos, pode ser modelada conforme descrito por Bradford e Foster (1996)

(Equação 1); já a erosão em sulco pode ser calculada mediante equação de Foster (1982) (Equação 2).

$$D_i = K_i \times I \times R \times S_f \times C_i \quad (1)$$

em que, D_i é a taxa de erosão em entressulcos ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$); R é a taxa de enxurrada (m s^{-1}); I é a intensidade de chuva (m s^{-1}); K_i é a erodibilidade em entressulcos (kg s m^{-4}); S_f é o fator declividade, e C_i é o coeficiente de cobertura do solo.

$$D_r = K_r \times (\tau - \tau_c) \times [1 - G/T] \quad (2)$$

em que, D_r corresponde à taxa de erosão em sulco ($\text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$); τ é a tensão cisalhante (N m^{-2}); τ_c corresponde à tensão cisalhante crítica do solo (N m^{-2}); G é a carga de sedimento ($\text{Kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$), e finalmente o T corresponde à capacidade de transporte ($\text{Kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$).

O modelo empírico de predição da erosão, chamado de *Universal Soil Loss Equation* (USLE), considera fatores como: a erosividade da chuva, a erodibilidade do solo, o relevo, a cobertura, o manejo e as práticas de controle de erosão (AMORIM; SILVA; PRUSKI, 2009). No entanto, o USLE não leva em conta a desagregação e o transporte das partículas pelo solo, além de não ser aplicada na estimativa de perdas de solo para um evento específico, não estima a erosão em sulco em fase mais avançada e não leva em consideração a variabilidade espacial e a temporal dos solos (FOSTER, 1982).

Surge então uma versão mais atualizada do USLE que foi denominada *Revised Universal Soil Loss Equation* (RUSLE). Nesta nova concepção, foram adicionados conceitos de base física para a determinação de alguns componentes, proporcionando uma reprodução mais real do sistema. Porém, este modelo ainda apresentava algumas limitações, como não ser aplicado em grandes áreas e dificultar sua aplicação em condições edafoclimáticas divergentes das utilizadas no modelo (FERNANDES et al., 2003).

As pesquisas continuaram a evoluir, e a base teórica passa a embasar o novo modelo chamado *Water Erosion Prediction Project* (WEPP). Neste modelo, incorporam-se conceitos de erosão em sulco (K_r) e entressulco (K_i) (SILVA et al., 1994). Além disso, o processo erosivo é determinado levando em consideração o estado atual do solo, a cobertura vegetal, os restos culturas e a umidade do solo (MORAES, 2016). No modelo WEPP, quando ocorre uma chuva, pode-se determinar se haverá

escoamento superficial, e se houver, ele é capaz de estimar a desagregação, o transporte e a deposição, somente baseando-se nas características atuais do terreno (LAFLEN; LANE; FOSTER, 1991; LANE et al., 1992).

A habilidade de um solo em resistir à erosão é expressa por um parâmetro chamado fator K (FREIRE et al.,1992). A suscetibilidade à desagregação e ao desalojamento das partículas está em função da ação do impacto da gota da chuva e do fluxo de enxurrada, que podem variar de solo para solo (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1993). Esses processos estão diretamente relacionados com as características físicas (textura, estrutura, estabilidade de agregados, permeabilidade do solo), químicas (matéria orgânica) e mineralógicas (óxidos de Fe e Al) dos solos (GRISSINGER, 1966; WISCHMEIER; MANNERING, 1969; WISCHMEIER; JOHNSON; CROSS, 1971; BUBENZER; JONES, 1971; LAL, 1988; SILVA, 1994).

Solos com alta taxa de infiltração, elevados teores de matéria orgânica, bem estruturados e com boa permeabilidade, oferecem maior resistência ao impacto da gota da chuva e ao fluxo de enxurrada (LAL, 1988). Neste sentido, solos com texturas arenosa, franco arenosa e franca são mais permeáveis, portanto menos sujeitos à ação da enxurrada. Por outro lado, solos com altos teores de silte e areia fina sofrem mais eventos erosivos (LAL, 1988). A textura do solo é, portanto, um importante fator que afeta sua erodibilidade, pois partículas mais grosseiras resistem mais ao transporte do que aquelas mais finas.

2.5 Funções de pedotransferência: Espectroscopia de Reflectância Difusa

A ciência do solo acompanhou o impacto da transformação do vasto número de informações, acarretando em muitas ferramentas e milhares de dados gerados (McBRATNEY; MENDONÇA SANTOS; MINASNY,2003). Busca-se, neste contexto, aperfeiçoar o domínio, a compreensão e a aplicabilidade desta era de mineração de informações embarcada em grandes blocos de dados (TEN CATEN et al., 2009; KEMPEN et al., 2010; KEMPEN; BRUS; STORVOGEL, 2011; SILVEIRA et al., 2012). Com o direcionamento das informações e de aquisições mais detalhadas de dados, a construção de um cenário agrícola sustentável será mais consolidada e abastecerá as decisões futuras para amparar um ambiente sócioeconômico com um

maior equilíbrio ambiental (HASTIE; TIBSHIRANI; FRIEDMAN, 2001; McBRATNEY; MENDONÇA SANTOS; MINASNY, 2003).

As preocupações ambientais cada vez mais frequentes têm direcionado os estudos em metodologias que sejam mais sustentáveis e que agredam menos o ambiente. Com isso, técnicas alternativas de análise dos constituintes do solo, que aliem rapidez e qualidade nas análises, são necessárias para satisfazer às exigências da agricultura moderna.

Para a criação deste cenário agrícola mais sustentável, destaca-se a pedometria. De acordo com McBratney, Mendonça Santos e Minasny (2003), as funções de pedotransferência são definidas como modelos matemáticos utilizados para estimar os atributos do solo a partir de outros atributos determinados, de maneira mais rápida, barata e ambientalmente menos impactantes. Na agricultura moderna, as funções de pedotransferência ganham cada vez mais espaço, pois são capazes de estimar os atributos do solo de maneira simples e rápida.

A determinação de maneira direta da erodibilidade, por meio de chuvas naturais e simuladas, demanda grandes investimentos, especialmente quando o objetivo é a espacialização em grandes áreas (BARBOSA, 2014). Por isso, é grande a necessidade de se estimar a erodibilidade de maneira indireta por meio de: (i) ferramentas de pedotransferência, incluindo meta-análise (IBÁÑEZ; MONTANARELLA, 2013); (ii) assinatura magnética (YANG; BRYNE; YANG, 2016); e (iii) assinatura espectral (PERCIVAL; WILLIAMSON, 2016).

De acordo com Torrent e Barrón (2008), o uso da Espectroscopia de Reflectância Difusa (ERD) consiste na aquisição qualiquantitativa de dados por meio da transmissão ou da absorção da energia radiante incidente em uma amostra. A energia diferencial dos vários comprimentos de onda do espectro é absorvida pelas moléculas em estudo, e a análise qualiquantitativa da amostra é realizada com base na Lei de Beer-Lambert. O processo de absorção de luz na ERD envolve transições eletrônicas, excitação de elétrons do orbital de moléculas e cristais (SKOOG; LEARY, 2002). A forma em que ocorre esta interação e a região do espectro em que ela ocorre, geram informações que permitem a identificação da composição química de grande parte dos minerais presentes nas amostras (VISCARRA ROSSEL et al., 2006; SILVERSTEIN; FRANCIS; KIEMLE, 2007; CAÑASVERAS et al., 2012).

Diversos autores têm utilizado os parâmetros da cor do solo (Matiz, Valor, Cromo e IAV), determinados pela reflectância do solo na faixa do visível (350 a 750 nm), na estimativa da produção de grãos de café (CARMO et al., 2016), assim como a determinação dos teores de óxidos de ferro, como hematita e goethita (VISCARRA ROSSEL et al., 2010; BAHIA; MARQUES; SIQUEIRA, 2015), carbono total (XIE et al., 2011) e outras importantes propriedades do solo que covariam com elas, tanto do ponto de vista pedológico quanto do agrônomico (BARRÓN; MELLO; TORRENT, 2000; BARRÓN; TORRENT, 2013).

A cor pode ser determinada de diferentes maneiras (TORRENT; BARRÓN, 2008), e aquela obtida por técnicas de Espectroscopia de Reflectância Difusa (ERD) tem-se mostrado eficaz em muitos estudos (PELUCO et al., 2015; CARMO et al., 2016). As técnicas de determinação da cor do solo por comparações visuais, conforme a carta de Munsell (*Soil Color Charts*), é análise tradicional nas ciências agrárias para fins pedológicos. Este método, em decorrência das diferentes percepções visuais, torna os resultados diferentes quando avaliados por avaliadores distintos; logo, é uma técnica que demonstra dificuldade para validar os resultados (BARRÓN; MELLO; TORRENT, 2000; CAMPOS; DEMATTÊ, 2004).

Portanto, a ERD pode estimar os teores de óxidos de ferro por meio de metodologias estudadas por Barrón e Torrent (1986), Scheinost et al. (1998), Almeida, Torrent e Barrón (2003) e Fernandes et al. (2004). No presente trabalho, a ERD foi utilizada na avaliação indireta dos atributos da cor para estimar a erodibilidade dos Latossolos com diferentes teores de ferro, em diferentes materiais de origem.

2.6 Ferramentas para modelagem da erodibilidade dos solos

2.6.1 Geoestatística

Geoestatística é um segmento da estatística que utiliza conceito de variáveis regionalizadas na avaliação de variabilidade espacial (GREGO; DE OLIVEIRA; VIEIRA, 2014). Esta técnica considera as relações espaciais existentes entre as observações que compõem uma amostra e possibilita quantificar os erros das avaliações laboratoriais. Para Chilés e Delfiner (1999), a geoestatística é definida como uma ferramenta que visa a fornecer descrições quantitativas de variáveis

naturais distribuídas no espaço ou no tempo, na qual se incluem, os estudos da variabilidade espacial dos atributos físicos do solo.

A geoestatística é uma técnica consolidada na Ciência Agrária e ampara decisões estratégicas e complexas, por exemplo, ao sistema de manejo adotado (PANOSSO et al., 2008), efeitos ambientais (LA SCALA JÚNIOR et al., 2000; IZIDORIO et al., 2005), otimização amostral (MONTANARI et al., 2005), produtividade das diferentes culturas (LEÃO, 2004; SOUZA et al., 2004; SANCHEZ, 2009), estudos de aplicação de vinhaça (PELUCO et al., 2013), erosão do solo (SANTOS et al., 2013), unidades de mapeamento (CAMARGO et al., 2014; SILVA et al., 2015), avaliação das incertezas em mapeamento de solos (TEIXEIRA, 2015), parâmetros da cor e as variáveis da planta de café (CARMO et al., 2016), e a variabilidade das propriedades físicas do solo em áreas propensas ao deslizamento (FONSECA et al., 2017).

Desde o início do século XX, estuda-se a variabilidade espacial dos atributos do solo. Essas mesmas técnicas como: casualização, repetição e funções de distribuição são utilizadas até hoje. Yamamoto e Landim (2013) mencionam que a partir da década de 80 a metodologia geoestatística teve ampla aplicação não só na Engenharia de Minas, mas também na agricultura de precisão, na cartografia, na climatologia, na Engenharia Florestal, na hidrologia, na pedologia, dentre outras.

Em muitos locais, o planejamento agrícola é feito com base em estatísticas como média e desvio-padrão, não assumindo a interdependência entre as amostras (CHILÉS; DELFINER, 1999). Porém, para que a interação existente entre solo e planta seja mais bem compreendida, são precisos estudos em situações reais de campo, as quais, muitas vezes, não são válidas ao longo da paisagem (STEVENSON et al., 2001).

Uma variável aleatória muda de acordo com alguma lei de distribuição de probabilidade quando assume diferentes valores em função da localização onde é amostrada em campo e torna-se uma variável regionalizada, base da geoestatística (TRANGMAR; YOST; UEHARA, 1985). Com as técnicas geoestatísticas, como as medidas de autocorrelação e da semivariância, torna-se possível estimar a dependência espacial entre as amostras.

O semivariograma pode ser validado por várias técnicas, sendo as mais usuais: soma dos quadrados dos resíduos, coeficiente de determinação (R^2) e validações

cruzada (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989) e externa (VIEIRA; LOMBARDI NETO, 1995). Após modelar o semivariograma experimental, torna-se possível estimar valores da variável em estudo, em pontos não amostrados dentro da área, por meio dos interpoladores geoestatísticos.

Em 1951, o Engenheiro de Minas D. G. Krige, trabalhando na procura de ouro na África do Sul, concluiu que a distância das amostras era de suma importância para encontrar sentido nas variâncias das mesmas. Baseado nestas observações, o engenheiro francês Georges Matheron (1963) desenvolveu a Teoria das Variáveis Regionalizadas, que consiste na explicação de fenômenos com alguma distribuição no espaço por meio de variáveis que dependem de um valor e da posição espacial. Nesta teoria desenvolvida por Matheron (1963), as amostras não são totalmente independentes de sua localização geográfica.

2.6.2 Lógica Fuzzy

Assim como a geoestatística, a metodologia da lógica fuzzy investiga as informações espaciais dos atributos do solo (TEIXEIRA, 2015). Apesar de ser uma técnica ainda pouco empregada nas ciências dos solos, especialmente nos estudos relacionados à erosão do solo (NOLASCO-CARVALHO; FRANCA-ROCHA; UCHA, 2009; CAMARINHA et al., 2012; LIMA, 2013), muitos autores têm mostrado potencial preditivo da lógica fuzzy na espacialização de atributos do solo (SOUZA; MARQUES JÚNIOR; PEREIRA, 2009), terras agricultáveis (SILVA et al., 2015), construções de mapas de fertilidade do solo (MADDAHI et al., 2015; SANTOS et al., 2017), representações das propriedades físicas e hidráulicas dos solos e da precipitação (SIMÕES et al., 2016), e na determinação de áreas mais ou menos suscetíveis à erosão do solo (CABRAL; VALLADARES; AQUINO, 2016).

A lógica fuzzy foi introduzida no meio científico com a publicação do artigo Fuzzy Sets, em 1965, pelo professor Lofti Aliasker Zadeh, no *Journal Information and Control*. A partir daí, pesquisadores vêm desenvolvendo algoritmos específicos para o uso desta teoria para a análise de seus modelos, o que pode ser encontrado tanto na literatura nacional (BARROS, 1997; RIBACIONKA, 1999; ORTEGA, 2001), como na literatura internacional (KLIR; YUAN, 1995; PEDRYCZ; GOMIDE, 1998).

A metodologia fuzzy aplica-se tanto para o mapeamento dos atributos do solo (SILVA; LIMA, 2009), quanto para a delimitação das unidades de solo (ZHU, 1997). Seu objetivo é simular, de modo aproximado, o raciocínio humano, visando a responder a uma questão baseada em um conhecimento inexato, incompleto e não totalmente confiável (SILVA; LIMA, 2009). É uma técnica que, associada ao grau de certeza à experiência do pedólogo, simula as incertezas e as transições comuns aos sistemas pedológicos dos dados auxiliares relacionados aos fatores de formação do solo e aos conhecimentos previamente obtidos (NOLASCO-CARVALHO; FRANCA-ROCHA; UCHA, 2009). Contudo, a determinação das incertezas por esta técnica apresenta alta complexidade de entendimento e de dificuldade em sua implementação (TEIXEIRA, 2015).

O sistema fuzzy pode ser representado em uma função de R^n em R , em que cada entrada fuzzy corresponde a uma saída fuzzy. Os módulos utilizados nesta metodologia são descritos a seguir (AMENDOLA; SOUZA; BARROS, 2015):

1) Módulo da fuzzificação: modela matematicamente a informação das variáveis de entrada por meio de conjuntos fuzzy. A cada variável de entrada devem ser atribuídos termos linguísticos que representam o estado desta variável, e a cada termo linguístico deve ser associado um conjunto fuzzy por uma função de pertinência.

2) Módulo da base de regras: constitui o núcleo do sistema, pois é onde se guardam as variáveis e suas classificações linguísticas.

3) Módulo de inferência: define os conceitos lógicos para estabelecer a relação fuzzy que modela a base de regras e fornece a saída da fuzzy a partir de cada entrada fuzzy.

4) Módulo defuzzificação: traduz o estado da variável de saída fuzzy para um valor numérico.

Com o uso da lógica fuzzy, podem-se encontrar mapas pedológicos com mais delimitações, melhor refinamento de escala e menor generalização comparados ao mapa convencional (NOLASCO-CARVALHO; FRANCA-ROCHA; UCHA, 2009). Os conjuntos fuzzy são aqueles que não possuem fronteiras bem definidas, representando a incerteza que pode ser traduzida em uma imprecisão benéfica para lidar com as limitações apresentadas pelos conjuntos clássicos da lógica convencional

ou Booleana. Na lógica fuzzy, não ocorre uma transição abrupta de classes como na convencional, mas, sim, suave (TANAKA, 1997).

A Ciência do Solo possui uma elevada complexidade intrínseca que se torna, virtualmente, impossível captar os processos em sua totalidade e ter uma perfeita acurácia dos dados representados (SIMÕES et al., 2016). No entanto, as análises espaciais com o uso da lógica fuzzy mostram-se um eficiente recurso para diagnosticar áreas em que há grau de incerteza na variabilidade espacial (LONGLEY et al., 2011; CAMARINHA et al., 2012).

Em muitos fenômenos naturais, não é possível eliminar todos os problemas envolvendo os erros de medição e de variação espacial (BURROUGH, 1986). Quando a variável de entrada de um modelo lógico ou quantitativo gera incertezas, os resultados também serão não confiáveis (HEUVELINK; BURROUGH; STEIN, 1989). As incertezas que envolvem as variáveis de entrada no modelo fuzzy são principalmente devido a erros amostrais e laboratoriais. Segundo Embrapa (1997) e Montesinos et al. (2002), os erros atribuídos à amostragem de campo variam entre 80% a 85%, e a das análises laboratoriais, podem variar de 3% a 26% (CANTARELLA et al., 2006).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição da área de amostragem

As coordenadas geográficas centrais da área experimental são 21°28'31,71"S e 48° 1'36,41"O, com altitude média de 557 m acima do nível do mar, localizada no município de Guatapará-SP, Brasil (Figura 1a). O clima da região, de acordo com Thornthwaite (1948), pode ser definido como B1rB'4a', Tipo Mesotérmico Úmido, com pequena deficiência hídrica, sendo a evapotranspiração de verão menor que 48% da evapotranspiração anual. Esta área está inserida na província geomorfológica do Planalto Ocidental Paulista, próximas ao limite das Cuestas Basálticas, no divisor litoestratigráfico arenito-basáltico.

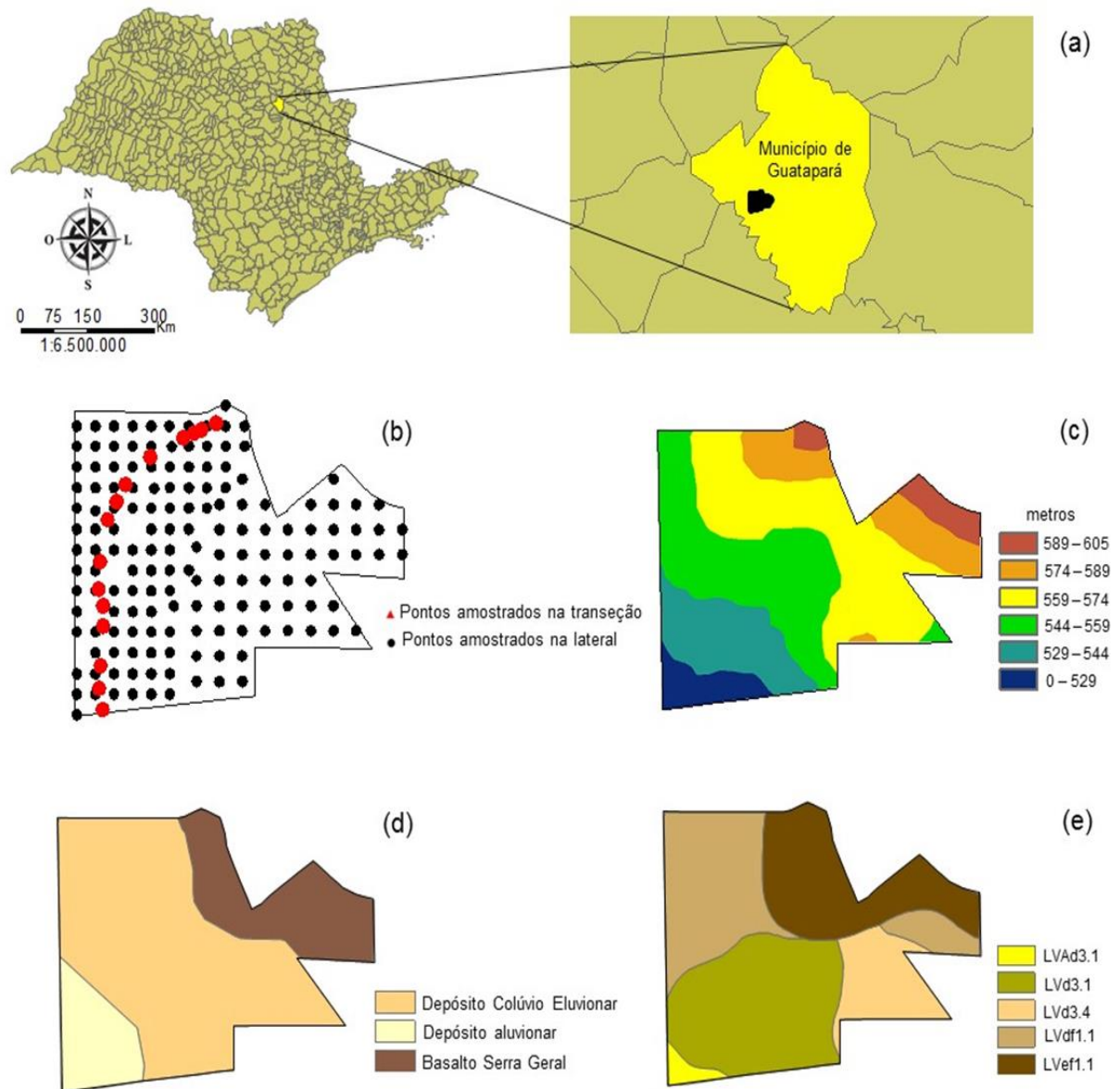


Figura 1. Mapa de localizao da área experimental (1a); gride amostral (1b); mapa altimétrico da área (1c); mapa geológico (1d); mapa pedológico (1e), sendo Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura média (LVAd3.1), Latossolo Vermelho distrófico, textura média (LVd3.1; LVd3.4), Latossolo Vermelho distroférico, textura argilosa (LVdf1.1) e Latossolo Vermelho eutroférico, textura argilosa (LVef1.1).

Na rea de experimento, foram verificados os materiais de origem, Basalto Formao Serra Geral (B), Depósito Colúvio Eluvionar (DCE) e Depósito Aluvionar (DA) (CPRM, 2012; SIQUERIA et al., 2015) (Figura 1d), e os solos foram classificados, de acordo com o levantamento realizado pelo Centro de Tecnologia Canaveira (CTC) (escala 1:12000), como Latossolo Vermelho distrófico, textura média (LVd3.1; LVd3.4), Latossolo Vermelho distroférico, textura argilosa (LVdf1.1); Latossolo

Vermelho eutroférico, textura argilosa (LVef1.1) e Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura média (LVAd3.1) (EMBRAPA, 2006) (Figura 1e).

Nos solos do topo, o teor de ferro total (Fe_2O_3) é de aproximadamente 200 g kg^{-1} ; e, na parte mais baixa da paisagem, de 10 g kg^{-1} (SIQUEIRA et al., 2015). A vegetação natural local era constituída por floresta tropical subcaducifólia. Atualmente, a área é cultivada com cana-de-açúcar sob sistema de colheita mecanizada de cana crua há mais de 15 anos.

Foram coletadas 9 amostras de solo representativas da área, em uma transeção de 2600 m (1 ponto a cada 289 m) e mais 129 pontos em uma malha de densidade amostral de 1 ponto a cada 3 ha, totalizando 138 pontos, na profundidade de 0,00-0,20 m, na área experimental de 387 ha. Com base nos mapas de variabilidade de assinatura magnética e de cor, apresentados por Siqueira et al. (2015), pontos da transeção representativos das classes de variabilidade de atributos físicos, químicos e mineralógicos do solo (Figura 1e) foram selecionados. Mais detalhes da caracterização da área são apresentados em Barbosa (2014) e Siqueira et al. (2015).

3.2 Análises laboratoriais

Para caracterizar os 9 pontos representativos da área experimental, foi realizada análise textural para a determinação do percentual de areia muito fina (GEE; BAUNDER, 1986), do cálculo da K_i , K_r e τ_c , e da análise de mineralogia da fração argila. A caulinita (Ct) e a gibbsita (Gb) foram determinadas pela análise termogravimétrica.

O ferro total (Fe_2O_3) foi determinado após digestão ácida com H_2SO_4 (EMBRAPA, 1997). A caracterização da goethita (Gt) e da hematita (Hm) foi realizada utilizando a difração de raios-x (DRX), após o tratamento da fração argila, segundo as etapas descritas por Kämpf e Schwertmann (1982). O diâmetro médio do cristal (DMC) foi calculado a partir da largura à meia-altura (LMA) e da posição dos reflexos dos minerais, utilizando a equação de Scherrer (SCHULZE, 1984). A caulinita (Ct) e a gibbsita (Gb) foram quantificadas pela análise termogravimétrica (ATG) (KARATHANASIS; HAJEC, 1982).

Os fatores de erosão K_i (kg s m^{-4}), K_r (s m^{-1}) e τ_c (N m^{-2}) foram calculados com as equações propostas por Flanagan e Livingston (1995):

$$\left[\begin{array}{ll} K_i = 2728000 + 192100 \text{ AMF} & \text{areia} \geq 30\% \end{array} \right. \quad (3)$$

$$\left[\begin{array}{ll} K_i = 6054000 - 55130 \text{ ARG} & \text{areia} < 30\% \end{array} \right. \quad (4)$$

$$\left[\begin{array}{ll} K_r = 0,00197 + 0,00030 \text{ AMF} + 0,03863 e^{-1,84 \text{ MO}} & \text{areia} \geq 30\% \end{array} \right. \quad (5)$$

$$\left[\begin{array}{ll} K_r = 0,0069 + 0,134 e^{-0,20 \cdot \text{ARG}} & \text{areia} < 30\% \end{array} \right. \quad (6)$$

$$\left[\begin{array}{ll} \tau_c = 2,67 + 0,065 \text{ ARG} - 0,058 \text{ AMF} & \text{areia} \geq 30\% \end{array} \right. \quad (7)$$

$$\left[\begin{array}{ll} \tau_c = 3,5 & \text{areia} < 30\% \end{array} \right. \quad (8)$$

em que, AMF = percentual de Areia Muito Fina, %; ARG = percentual de Argila, %; e = base dos logaritmos neperianos; MO = percentual de Matéria Orgânica do solo, %.

Para os 129 pontos, os minerais da fração argila Hm e Gt foram quantificados pela técnica de ERD, através do pico da segunda derivada da função de Kubelka-Munk (KUBELKA; MUNK, 1931). Nas curvas da segunda derivada, foram identificadas as bandas de absorção características aos óxidos de ferro (KOSMAS et al., 1984; SCHEINOST; SCHWERTMANN, 1999). Para a identificação da goethita, foram utilizados os intervalos mínimos de 415-425 nm, e máximos de 440-450 nm; e para a hematita, intervalos mínimos de 530-545 nm e máximos de 575-590 nm. Com o valor das amplitudes (distância entre o mínimo e o máximo) das bandas de absorção características à Gt e à Hm, obteve-se o parâmetro R:

$$R = A_{Hm}/A_{Hm} + A_{Gt} \quad (9)$$

em que, A_{Hm} é a amplitude da banda da hematita, e A_{Gt} a amplitude da banda da goethita.

A partir desta relação, utilizou-se uma curva-padrão para calcular o teor de hematita representada pelo fator K:

$$K = 0,0192 + 0,9732 R \quad (10)$$

A partir do fator K, foi realizado o cálculo da proporção de hematita (Hm):

$$\text{Hm}\% = 2,274 (F_{ed}\% - F_{eo}\%)/1,59 + 1,43 (1-K/K) \quad (11)$$

em que, F_{ed} é o ferro extraído com citrato-bicarbonato-ditionito, e F_{eo} é o ferro extraído com oxalato de amônio.

A proporção de goethita (Gt) foi obtida pela seguinte equação:

$$\text{Gt}\% = 1,59 [F_{ed}\% - F_{eo}\% - (\text{Hm}\%/1,43)] \quad (12)$$

Para os 138 pontos, o percentual de argila foi determinado pelo método da pipeta, utilizando solução de NaOH 0,1 mol L⁻¹ como dispersante químico e agitação mecânica em aparato de baixa rotação, por 16 horas (EMBRAPA, 1997). As amostras foram secas e passadas em peneira de 2,0 mm de abertura de malha para a determinação da Matéria Orgânica (MO), de acordo com Raij et al. (2001).

Na obtenção dos espectros de reflectância difusa, as avaliações foram feitas com o sensor de laboratório Lambda 950 (Perkin Elmer Ltd., Waltham, MA, EUA). Foi moído 0,5 g de TFSA das 138 amostras em ágata, até à obtenção de coloração constante. O conteúdo foi colocado em um porta-amostras com um espaço cilíndrico de 16 mm. Os valores de reflectância foram determinados, em espectrofotômetro equipado com esfera integradora de 80 mm, a cada 1 nm, com um tempo de integração de 0,2 segundo, fazendo uma varredura no intervalo de 380 a 780 nm.

Após a obtenção dos espectros de reflectância difusa das amostras de solo, foram determinados os valores de triestímulo XYZ, definidos pela Comisión Internacional de L'Eclairage-CIE (WYSZECKI; STILES, 1982). A partir das coordenadas XYZ, foram deduzidos os valores Munsell de Matiz, Cromo e Valor utilizando o programa *Munsell Conversion* versão 6.4, conforme Barrón, Mello e Torrent (2000). O Matiz corresponde ao comprimento de onda da luz; já o Valor refere-se ao brilho ou à tonalidade, e o Cromo representa a intensidade ou pureza em relação ao cinza. Com base nos valores de Cromo, Valor e Matiz, obtidos pela análise de espectroscopia de reflectância difusa, foi calculado um Índice de Avermelhamento (IAV) que representa um índice formado pela combinação destes três componentes, conforme Equação 13 (BARRÓN; MELLO; TORRENT, 2000):

$$IAV = \frac{(10 - Matiz) \times Cromo}{Valor} \quad (13)$$

3.3 Análise dos dados

3.3.1 Estatística descritiva, análise de média e geoestatística

Balizada pelas observações de Siqueira et al. (2015), a área de estudo foi subdividida em três compartimentos (Figura 2).

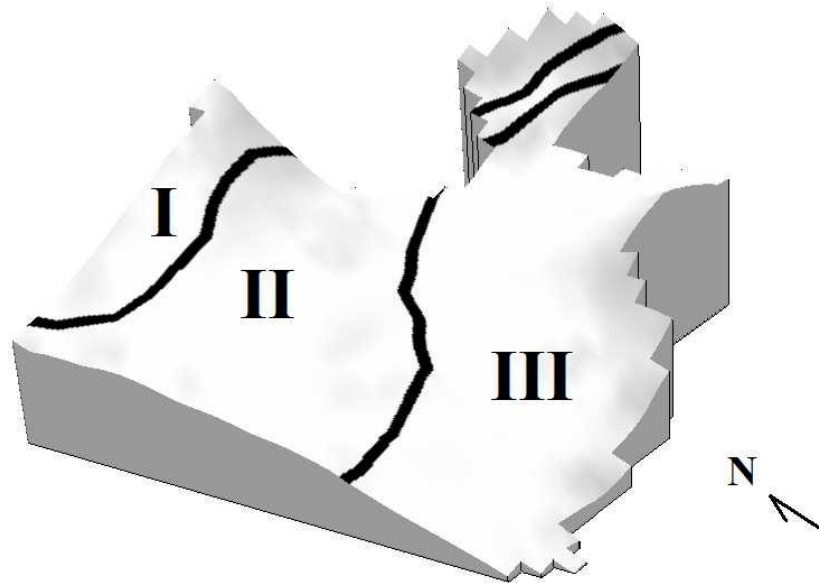


Figura 2. Proposta de delineamento das unidades de mapeamento detalhado na área de estudo com base na validação de modelos conceituais de relação solo-paisagem utilizando “Split Moving Windows”, geoestatística e suscetibilidade magnética (Extraído de Siqueira et al., 2015).

Os limites conceituais de campos e a variabilidade espacial dos picos mais representativos, detectados pelo sistema *Split Moving Windows* (SMW), permitiram uma avaliação distinta que acarretou na formação dos compartimentos I, II e III. Destaca-se que o padrão que permite a identificação destas áreas está atrelado à variabilidade dos atributos do solo, conforme Siqueira et al. (2015). A variação do teor de ferro total, que está entre 10 e 200 g kg⁻¹ ao longo da transeção Serra Geral, Depósito Colúvio-Eluvionar e Depósito Aluvionar, foi determinante para a escolha destes compartimentos. Sendo o compartimento I aquele que apresenta teores de ferro maiores que 120 g kg⁻¹; já no compartimento II, os teores estão entre 50 e 120 g kg⁻¹, e no compartimento III, os teores de ferro são menores que 50 g kg⁻¹.

A variabilidade dos atributos do solo foi previamente descrita por meio da construção dos gráficos *boxplot*, em função dos compartimentos observados por Siqueira et al. (2015). A construção do *boxplot* foi realizada no programa estatístico Minitab (2000).

Análises de regressões foram estabelecidas entre os atributos mineralógicos, cor do solo, K_i , K_r e τ_c , o que possibilitou estimar os fatores de erosão para a área total (n= 129 pontos).

A análise da dependência espacial dos dados foi feita por meio da geoestatística (VIEIRA et al., 1983), utilizando-se dos semivariogramas que foram estimados com base nas pressuposições de estacionariedade da hipótese intrínseca. Os semivariogramas foram modelados com o auxílio do software GS+ - *Geostatistics for Environmental Sciences* (ROBERTSON, 2004) e os modelos matemáticos ajustados aos semivariogramas experimentais. Sob a teoria da hipótese intrínseca, o semivariograma experimental foi estimado pela Equação (14).

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \quad (14)$$

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

Os semivariogramas experimentais foram escolhidos com base no número de pares envolvidos no cálculo da semivariância dos primeiros lags, na presença de patamar bem definido, valor do R^2 para o modelo ajustado e validação cruzada, coeficientes linear e angular da regressão entre valores observados e estimados, e soma de quadrado dos resíduos (SQR) (SIQUEIRA et al., 2010a). Com base na razão entre o efeito pepita (C_0) e o patamar (C_0+C_1), foram definidas classes de dependência espacial das variáveis do solo, segundo Cambardella et al. (1994), sendo:

- 1) $C_0/(C_0+C_1) \leq 25 \%$, variável apresenta forte dependência espacial;
- 2) $C_0/(C_0+C_1)$ entre 25 % e 75 %, variável apresenta moderada dependência espacial;
- 3) $C_0/(C_0+C_1) > 75 \%$, variável apresenta fraca dependência espacial.

A estacionariedade necessária ao uso da geoestatística foi avaliada por meio das análises de tendência, utilizando regressões linear e quadrática, para os eixos da Latitude, Longitude e suas interações. Assim, para os atributos em que foi identificada a presença de tendência (K_i , K_r e τ_c), a modelagem do variograma foi conduzida nos valores do resíduo da análise de regressão. O resíduo foi calculado pela diferença entre o valor medido e o valor estimado pelo polinômio (DAVIS, 1986).

Com os valores interpolados por meio da krigagem dos atributos da cor do solo (Matiz, Valor, Cromo e IAV) e dos fatores de erosão do solo (K_i , K_r e τ_c), foi proposta a construção de mapas de padrão espacial dos atributos estudados por meio do software ArcGIS versão 10.2 (ESRI, 2010). As correlações espaciais dos atributos da

cor do solo com os fatores de erosão do solo foram avaliadas por meio de semivariogramas cruzados.

3.3.2 Lógica Fuzzy

Um modelo fuzzy foi construído tal que as variáveis de entrada foram os fatores de erosão como: erodibilidade em entressulcos (K_i) e em sulcos (K_r), e a tensão cisalhante crítica do solo (τ_c). Estes fatores de erosão foram relacionados entre si para a definição de áreas com predisposição à erosão do solo (variável de saída). Reconhecidas as classes críticas à erosão em entressulcos e em sulcos, foi possível mapear áreas com predisposição à erosão.

Os números reais $[a,b,c,d]$ representam os conjuntos fuzzy de entrada e de saída, e constituíram os parâmetros das funções de pertinência (Equação 15), respectivamente, definidas por:

$$\mu(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a}, & x \in (a, b) \\ 1, & x \in [b, c] \\ \frac{x-d}{c-d}, & x \in (c, d) \\ 0, & \text{caso contrário} \end{cases} \quad \text{para o caso trapezoidal} \quad (15)$$

em que, os extremos desses conjuntos foram definidos a partir do domínio das variáveis linguísticas.

Salienta-se que, para o presente trabalho, as relações que formaram a base de regras no modelador fuzzy foram descritas com base em estudos sobre erodibilidade do solo (BARBOSA, 2015; FREITAS, 2014; IBIAPINA, 2015), que investigam a relação de causa e efeito entre K_i , K_r e τ_c em áreas suscetíveis à erosão. Considerou-se, ainda, que: 1) maior fator de erodibilidade em entressulcos (K_i) resulta em maior erosão em entressulcos (D_i) (MEYER; HARMON, 1984; LE BISSONNAIS; SINGER, 1993; ALBUQUERQUE; CASSOL; REINERT, 2000); 2) quanto maior o valor da erodibilidade em sulcos (K_r), maior será a taxa de desagregação em sulcos (D_r) (SCHÄFER et al., 2001; CANTALICE, 2001); 3) quanto menor a tensão cisalhante crítica do solo (τ_c), maior a chance de liberação de sedimentos nos sulcos (D_r) (TISCARENO LOPEZ et al., 1993; CANTALICE et al., 2005; BARBOSA, 2015).

A partir deste conceito, empregou-se a transformação de classes quantitativas em classes qualitativas, como o realizado por Cabral, Valladares e Aquino (2016). As classes estabelecidas foram: Muito Baixa, Baixa, Média, Alta e Muito Alta. Os valores da K_i , K_r e τ_c estimados pela Hm foram previamente divididos em 5 quantis, que posteriormente foram classificados qualitativamente, como indica a Tabela 1.

Considerando as qualificações por quantis, regras de inferência foram estabelecidas para determinar áreas com predisposição à erosão, a partir da seguinte premissa: se K_i é Baixa, K_r é Alta e τ_c é Muito Baixa, a predisposição à erosão do solo é Muito Alta. Portanto, a classe Muito Alta à predisposição à erosão do solo foi definida quando $2,72 \leq K_i < 2,89$; $3,19 \leq K_r < 3,23$ e $\tau_c \geq 4,84$. Com base em tal premissa, obtiveram-se como resultado 125 possibilidades para classificar a predisposição à erosão (Apêndice I).

Tabela 1. Classificação dos valores quantitativos da K_i , K_r e τ_c em atributos qualitativos para modelagem da lógica fuzzy.

	$K_i \times 10^6$		$K_r \times 10^{-3}$		τ_c	
	Quantil	Classe	Quantil	Classe	Quantil	Classe
1 ° Quantil	$K_i < 2,72$	MB	$K_r < 3,02$	MB	$\tau_c < 3,84$	MA
2 ° Quantil	$2,72 \leq K_i < 2,89$	B	$3,02 \leq K_r < 3,09$	B	$3,84 \leq \tau_c < 4,06$	A
3 ° Quantil	$2,89 \leq K_i < 3,27$	M	$3,09 \leq K_r < 3,19$	M	$4,06 \leq \tau_c < 4,55$	M
4 ° Quantil	$3,27 \leq K_i < 3,51$	A	$3,19 \leq K_r < 3,23$	A	$4,55 \leq \tau_c < 4,84$	B
5 ° Quantil	$K_i \geq 3,51$	MA	$K_r \geq 3,23$	MA	$\tau_c \geq 4,84$	MB

Em que, K_i – erodibilidade entressulco (kg s m^{-4}); K_r – erodibilidade em sulco (s m^{-1}), τ_c – tensão cisalhante crítica do solo (N m^{-2}), MA – Muito Alta, A – Alta, M – Média, B – Baixa e MB – Muito Baixa.

A Figura 3 apresenta um resumo do método proposto para identificar as áreas com predisposição à erosão por meio da lógica fuzzy. Considerando as qualificações por quantis, foram estabelecidas regras de inferência para determinar áreas com predisposição à erosão, a partir da seguinte premissa: se K_i é Baixa, K_r é Alta e τ_c é Muito Baixa, a predisposição à erosão do solo é Muito Alta (MA). Neste exemplo, a classe Muito Alta à predisposição à erosão do solo foi definida quando $2,72 \leq K_i < 2,89$; $3,19 \leq K_r < 3,23$ e $\tau_c \geq 4,84$.

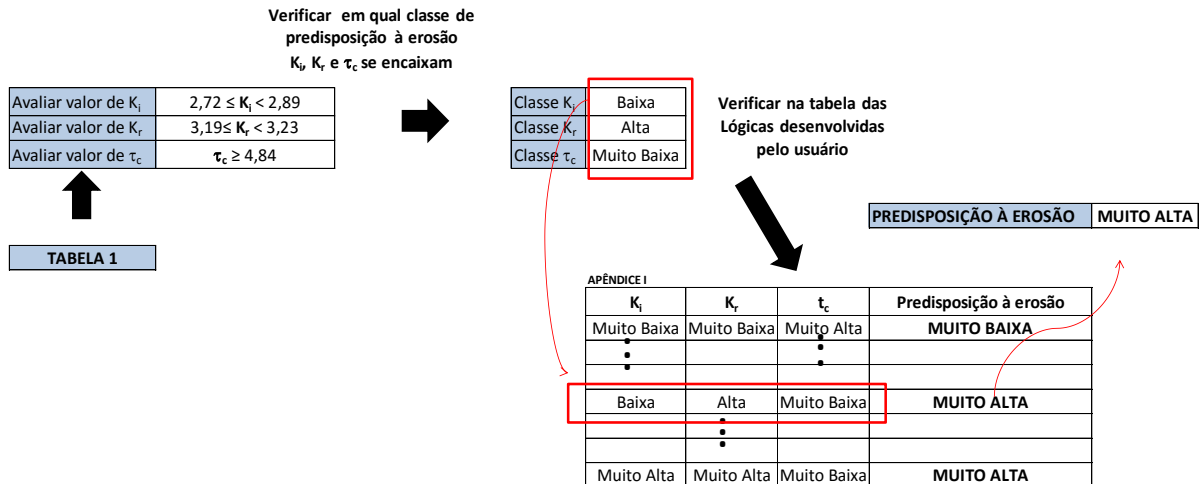


Figura 3. Etapas para a obtenção do mapa utilizando a lógica fuzzy. Em que, $K_i \times 10^6$ – erodibilidade em entressulcos (kg s m^{-4}); $K_r \times 10^{-3}$ – erodibilidade em sulcos (s m^{-1}), τ_c – tensão cisalhante crítica do solo (N m^{-2}).

Com a aplicação da inferência fuzzy, ligou-se cada uma das proposições da base de regras, por meio de lógica-matemática e operações que obedecem às leis do cálculo proposicional, e simulou-se o processo de dedução humana, como postulado por Zadeh (1965).

Balizada pela variabilidade espacial da K_i , K_r e τ_c , as proposições da base de regras para prever as áreas suscetíveis à erosão (Tabela 2) foram realizadas pelo método de Mamdani Fuzzy, cuja inferência é de máximo-mínimo (ZADEH, 1997).

Tabela 2. Termos linguísticos do conjunto fuzzy e os parâmetros da associação trapezoidal de entrada e saída.

Termos Linguísticos	Parâmetros			
	Entrada			Saída
	$K_i \times 10^{-6}$	$K_r \times 10^{-3}$	τ_c	Predisposição
Muito Baixa	[0 0 2,70 2,72]	[0 0 3,01 3,02]	[4,83 4,84 5,53 5,53]	[0 0 7,5 8]
Baixa	[2,70 2,72 2,88 2,89]	[3,01 3,02 3,08 3,09]	[4,54 4,55 4,83 4,84]	[7,5 8 8,5 9]
Média	[2,88 2,89 3,26 3,27]	[3,08 3,09 3,18 3,19]	[4,05 4,06 4,54 4,55]	[8,5 9 9,5 10]
Alta	[3,26 3,27 3,50 3,51]	[3,18 3,19 3,22 3,23]	[3,83 3,84 4,05 4,06]	[9,5 10 10,5 11]
Muito Alta	[3,50 3,51 4,01 4,01]	[3,22 3,23 3,44 3,44]	[0 0 3,83 3,84]	[10,5 11 20 20]

Em que, K_i – erodibilidade entressulco (kg s m^{-4}); K_r – erodibilidade em sulco (s m^{-1}), τ_c – tensão cisalhante crítica do solo (N m^{-2}).

O presente trabalho considerou o método de defuzzificação por centro de gravidade (ZADEH, 1997). As análises computacionais da lógica fuzzy foram realizadas no software Matlab 6.1. (MATLAB 6.1, The Mathworks Inc., Natick, MA).

Na Figura 4, estão as etapas do protocolo de mapeamento da predisposição de Latossolos à erosão, utilizando cor e modelagem matemática.

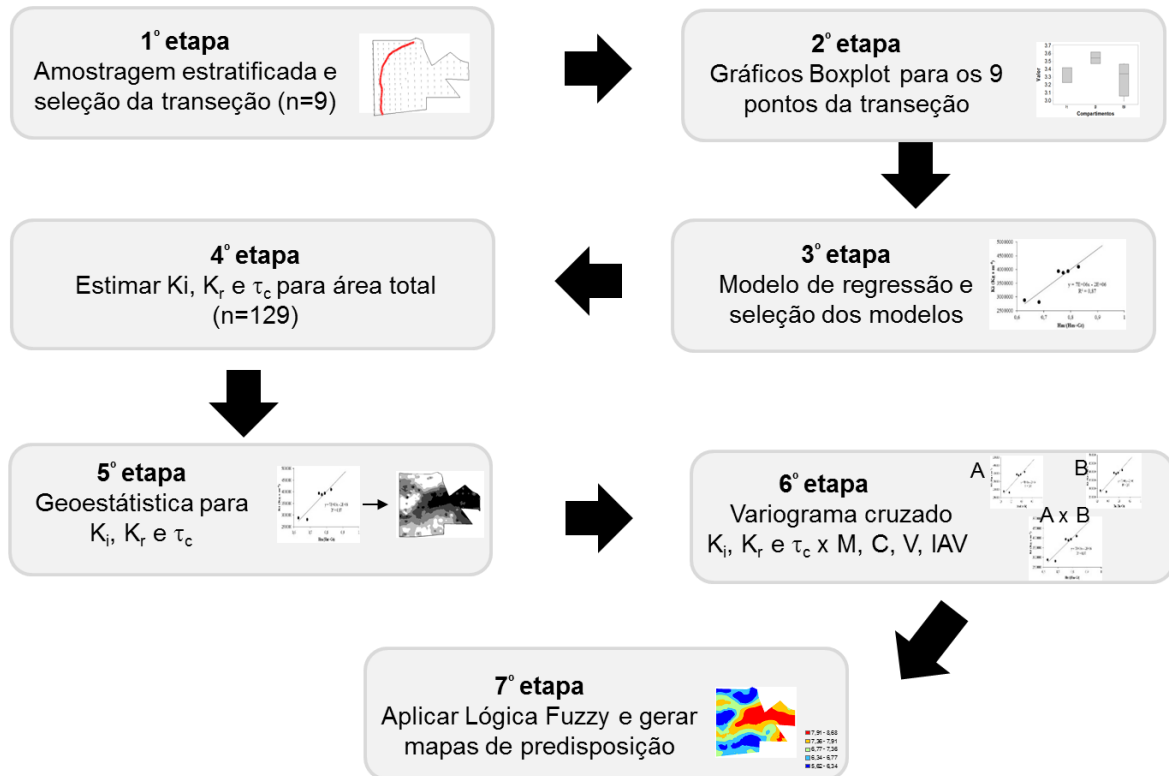


Figura 4. Etapas do protocolo de mapeamento da predisposição de Latossolos à erosão utilizando cor e modelagem matemática. Sendo K_i – erodibilidade entressulco (kg s m^{-4}); K_r – erodibilidade em sulco (s m^{-1}); τ_c – tensão cisalhante crítica do solo (N m^{-2}); Matiz (M); Cromo (C); Valor (V), e Índice de Avermelhamento (IAV).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os atributos do solo em compartimentos pedológicos com diferentes teores de ferro, os quais foram previamente mapeados por Siqueira et al. (2015), são observados na Figura 5. Os maiores valores da K_i e τ_c foram encontrados nas regiões onde ocorrem os solos com teores de ferro menores que 50 g kg^{-1} e no intervalo de 50 a 120 g kg^{-1} , respectivamente (Figura 5a e 5c). Resende (1976) e Dick (1986) relatam que solos com menores teores de ferro têm preferência à formação do mineral caulinita. Nestes ambientes, a estrutura laminar deste mineral promove menor

permeabilidade do solo, maior volume de enxurrada e desgaste da superfície do solo, favorecendo, portanto, a erosão laminar (K_i) (LIMA, 1987).

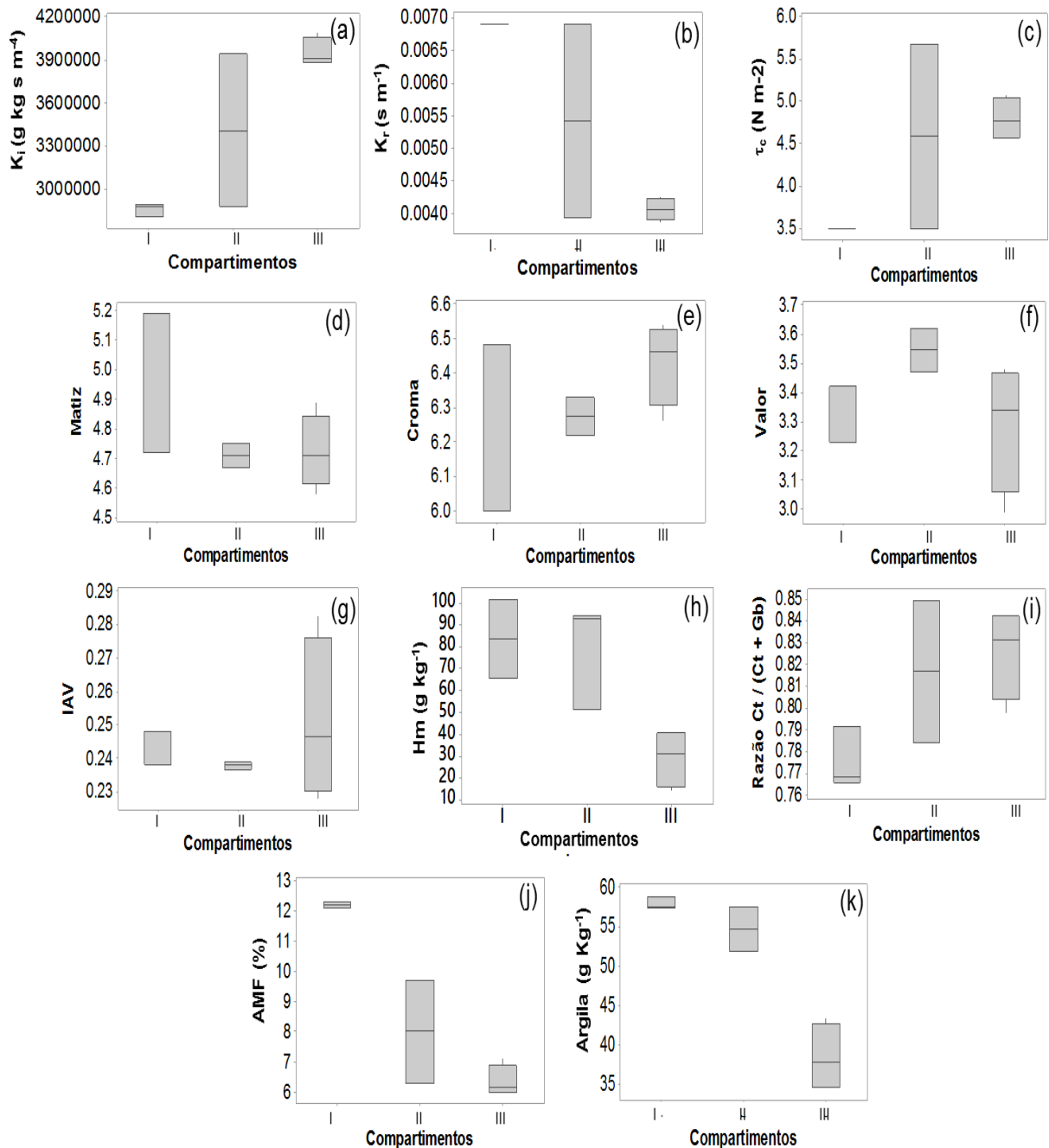


Figura 5. Gráficos *boxplot* dos valores da K_i ($kg\ s\ m^{-4}$), K_r ($s\ m^{-1}$), τ_c ($N\ m^{-2}$), Matiz, Cromo, Valor, IAV, Hm ($g\ kg^{-1}$), razão Ct / (Ct+Gb), Areia Muito Fina (AMF) em %, teor de argila ($g\ kg^{-1}$), sendo $n=9$ pontos. Os valores da K_i , K_r e τ_c foram estimados por meio de equações propostas por Flanagan e Linvingston (1995). Os compartimentos foram determinados por Siqueira et al. (2015), em que compartimento I apresenta teores de ferro maiores que $120\ g\ kg^{-1}$, compartimento II entre 50 e $120\ g\ kg^{-1}$ de ferro total e compartimento III teores de ferro menores que $50\ g\ kg^{-1}$.

Os maiores valores de K_r foram observados no compartimento I, onde ocorrem os maiores teores de Fe_2O_3 ($> 120 \text{ g kg}^{-1}$ de Fe_2O_3), enquanto os menores teores ocorreram no compartimento III ($< 50 \text{ g kg}^{-1}$ de Fe_2O_3) (Figura 5b). Segundo o Sistema Brasileiro de Classificação de Solos (EMBRAPA, 2006), esses valores de ferro enquadram-se na classe mesoférrica (teores de Fe_2O_3 , variando de 80 a 180 g kg^{-1}) e hipoférrica (teores de $Fe_2O_3 < 80 \text{ g kg}^{-1}$).

Avaliando os componentes de cor como: o Matiz (comprimento de onda da luz), Cromo (intensidade ou pureza em relação ao cinza), Valor (brilho ou tonalidade) e IAV (índice formado pela combinação destes três componentes), verifica-se que o Matiz apresentou os maiores valores no compartimento I ($> 120 \text{ g kg}^{-1}$ de Fe_2O_3) (Figura 5d). O maior teor de ferro do Basalto presente no compartimento I, associado a uma drenagem livre, favorece a formação de hematita (SCHWERTMANN; TAYLOR, 1989), que é responsável por ocasionar uma coloração avermelhada ao solo. Por outro lado, os valores mais altos de Cromo foram observados no compartimento com menor teor de ferro ($< 50 \text{ g kg}^{-1}$ de Fe_2O_3) (Figura 5e). O componente Valor apresentou seu nível mais alto no compartimento II (50 a 120 g kg^{-1} Fe_2O_3), e o mais baixo, no compartimento I ($> 120 \text{ g kg}^{-1}$ de Fe_2O_3) (Figura 5f). E, finalmente, o componente IAV apresentou valores médios mais altos nos locais com menores teores de ferro ($< 50 \text{ g kg}^{-1}$ de Fe_2O_3) (Figura 5g).

Considerando a alta variação do Fe_2O_3 no Estado de São Paulo, alto poder de pigmentação da hematita, que dificulta a identificação de variações no padrão de cor no campo utilizando a carta de Munsell, parâmetros da cor obtidos pela ERD podem ser uma alternativa para viabilizar de forma prática e objetiva, no campo, locais com predisposição à erosão. Neste sentido, de acordo com Botelho et al. (2006), um mesmo valor da Matiz na carta de Munsell (10YR) apresentou variações do Matiz quando utilizada a colorimetria (8,20YR, 8,46YR, 7,84YR, 7,72YR). Portanto, a obtenção da cor por sensores mais eficientes pode auxiliar na identificação dos limites entre compartimentos com diferentes potenciais erosivos, colaborando para definir zonas de manejos específicos no campo e, conseqüentemente, na gestão agrícola.

Na mineralogia dos óxidos de ferro, todos os solos contêm hematita e goethita, que são os óxidos mais comuns nos solos tropicais. O teor de hematita variou de 102 g kg^{-1} (compartimento I) a 38 g kg^{-1} (compartimento III) (Figura 5h), revelando domínio

da hematita em relação à goethita nos solos estudados, o que conferiu a eles predomínio da coloração vermelha. Estes resultados estão de acordo com a literatura, uma vez que, nos locais com os maiores teores de ferro (compartimento I), espera-se encontrar maior teor de hematita (SCHWERTMANN; TAYLOR, 1989).

Houve aumento da razão $Ct/(Ct+Gb)$ do compartimento com mais ferro (0,77) para o compartimento com menos ferro (0,82) (Figura 5i). Estes resultados indicam que as três regiões mapeadas por Siqueira et al. (2015) são três ambientes pedogenéticos distintos. Cunha et al. (2000), estudando Latossolos com variação de ferro na mesma amplitude encontrada na área (50 a 120 g kg⁻¹), também observaram variação na razão $Ct/(Ct+Gb)$.

Além de influenciar na tensão cisalhante crítica do solo, a variação mineralógica influencia no potencial do solo em ser compactado (mecânica de solos). Rossetti et al. (2015), estudando o potencial de compactação nos mesmos Latossolos de Cunha et al. (2000), encontraram que solos com menos ferro têm potencial de compactação 40% maior do que solos com mais ferro. Esse aumento da compactação influencia diretamente na tensão cisalhante crítica do solo.

Pode-se ainda observar que o comportamento da Areia Muito Fina (AMF) é semelhante ao *boxplot* obtido para o K_r e inverso ao obtido pela τ_c (Figura 5j). Este comportamento é coerente com o esperado, já que, para os cálculos de K_r nos 9 pontos da transeção, foi utilizada a seguinte equação: $K_r = 0,00197 + 0,00030 \text{ AMF} + 0,03863 e^{-1,84 \text{ MO}}$ (areia $\geq 30\%$). Portanto, quanto maiores os valores de AMF maior será o valor de K_r , sendo estas duas grandezas diretamente proporcionais. Já a AMF é inversamente proporcional aos valores da τ_c , visto que $\tau_c = 2,67 + 0,065 \text{ ARG} - 0,058 \text{ AMF}$ (areia $\geq 30\%$).

As médias observadas para o teor de argila (Figura 5k) acompanharam as variações geológicas presentes na área (Figura 1d), pois os maiores teores de argila foram encontrados no compartimento I, que está inserido em uma área sobre Basalto-Serra Geral, a qual comumente apresenta maiores teores de ferro. Já a menor média para a argila foi encontrada no compartimento III, onde os teores de ferro são baixos, já que a mesma está localizada sobre uma área de Depósito Aluvionar. Estes resultados coincidem com aqueles encontrados por Bahia (2016), uma vez que a pedologia e a geomorfologia apresentam influência sobre os teores de argila na área

estudada. Estas variações nos teores de argila são devidas aos diferentes materiais de origem dos Latossolos, uma vez que a área estudada está inserida em um divisor litoestratigráfico Arenito-Basalto (PELUCO et al., 2013).

Modelos lineares foram estabelecidos entre os atributos analisados (Figura 6). A variação de precisão em que os modelos das Figuras 6a a 6r estimaram a K_i , K_r e τ_c foi de 12 a 94%. Todos os modelos, com exceção do IAV (Figura 6p,6q e 6r) e croma (Figura 6k), apresentaram coeficientes de determinação acima de 0,50 para com seus pares envolvidos.

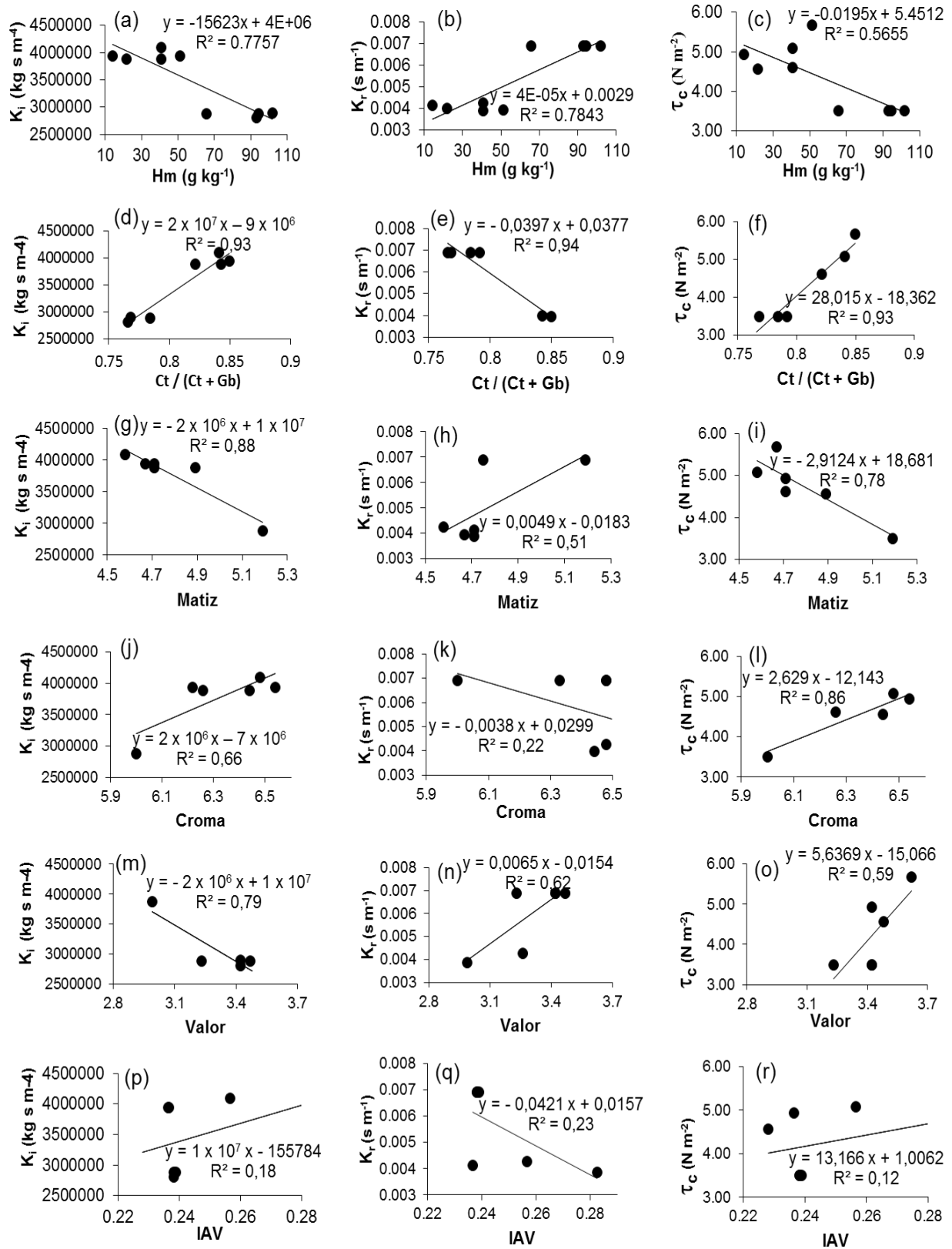


Figura 6. Modelos de regressão entre erodibilidade em entressulcos (K_i) (kg s m^{-4}), em sulcos (K_r) (s m^{-1}) e a tensão cisalhante crítica do solo (τ_c) (N m^{-2}) com Hm (g kg^{-1}), Ct/ (Ct + Gb), Matiz, Cromo, Valor e IAV, na profundidade de 0,00 -0,20m.

A erodibilidade em sulco (K_r) correlacionou-se positivamente com o teor de hematita, com coeficiente de determinação (R^2) superior a 0,70 (Figuras 6b). Já a erodibilidade em entressulcos (K_i) e a tensão cisalhante crítica do solo (τ_c) se correlacionaram negativamente com a hematita, como registrado nas Figuras 6a e 6c.

O comportamento da razão $Ct/(Ct+Gb)$ foi o oposto daquele observado pelo teor de hematita (Figuras 6d, 6e e 6f). Tais resultados indicam que Latossolos mais caulíníticos têm maiores valores da K_i . De acordo com Ferreira, Fernandes e Curi (1999b), solos caulíníticos apresentam uma macroestrutura do tipo em placas, devendo originar Latossolos com maior densidade do solo, maior proporção de poros pequenos e menor permeabilidade, favorecendo a ocorrência da erosão em entressulcos.

Para melhor compreensão sobre a erodibilidade dos solos, torna-se necessária a compressão dos diversos fatores que interferem no entendimento deste processo, tais como: teor de matéria orgânica, distribuição e frequência de chuvas, agregação das partículas, densidade do solo, compactação, mineralogia do solo, taxa de infiltração, entre outros.

Neste sentido, trabalhos científicos apontaram que áreas com preparo do solo realizado por um período de três anos apresentaram decréscimo na estabilidade de agregados (ROSSETTI, 2016; RACZKOWSKI et al., 2012). Quando há desestabilidade dos agregados, os solos tornam-se mais suscetíveis à erosão (ROSSETTI, 2016), ou seja, solos com predominância de goethita em relação a hematita (BARRÓN; TORRENT, 1986) e com predominância de gibbsita em relação a caulinita tendem a apresentar maior predisposição à erosão.

A taxa de erosão global considera em seus cálculos a erosão em sulcos, entressulcos e tensão cisalhante crítica do solo, sendo influenciada pela dinâmica de compactação do solo. Solos com menores teores de ferro tendem a ter maior potencial de compactação. Rossetti (2015), estudando o potencial de compactação em Latossolos com mesma variação de ferro (entre 10 e 200 g kg⁻¹ de Fe₂O₃), mostrou que solos com menor teor de ferro tem potencial de compactação 40 vezes maior do que solos com mais ferro. Quanto maior a compactação, maior será a tensão cisalhante crítica do solo, pois a pressão mecânica do rodado das máquinas comprime as partículas do solo, aumentando a adesão entre elas. Logo, esse efeito também

deve ser considerado, e o fenômeno de erosão global deve ser tratado de forma holística.

Como a erosão está ligada à mineralogia do solo, que pode ser correlacionada a atributos da cor (Matiz, Cromo, Valor e IAV – Figura 6), áreas propensas à erosão podem ser identificadas por esses fatores; no entanto, para a validação final dos modelos, faz-se necessária a presença de especialistas de campo no refinamento e na interpretação dos resultados obtidos.

Os componentes da cor do solo (Matiz, Cromo, Valor e IAV) produziram correlações lineares simples, evidenciando a dependência de K_i , K_r e τ_c com a cor (Figuras 6g a 6r). De acordo com as Figuras 6g, 6h e 6i, quanto maior for o Matiz do solo, menores serão os valores da K_i e τ_c e maior será a K_r . O Matiz do solo está relacionado com as cores vermelha, amarela e misturas de ambas, estando estas cores relacionadas aos teores de hematita e goethita do solo (EMBRAPA, 2006). O Valor e o Cromo estão relacionados com a luminosidade (preto) e a pureza da cor em relação ao cinza, respectivamente (DEMATTE et al., 2011), enquanto o IAV se trata de um índice criado a partir destes três componentes da cor, baseados no sistema Munsell (BARRÓN; MELLO; TORRENT, 2000).

Houve correlação positiva entre K_i com Cromo e IAV (Figura 6j e 6p), mas negativas com Matiz e Valor (Figura 6g e 6m). A relação inversa da K_i com o Matiz indica que, neste estudo, os solos mais avermelhados apresentaram menor predisposição à erosão em entressulco, o que pode estar relacionado a um alto teor de hematita nestas áreas, que garante coloração mais avermelhada aos solos e maior estabilidade dos agregados (BARRÓN; TORRENT, 1986). De acordo com a Figura 6l e 6o, quanto maiores forem os valores de Cromo e Valor maior será a tensão cisalhante crítica do solo, com coeficientes de determinação de 86% e 59%, respectivamente. Por outro lado, os maiores valores de K_r foram observados nos locais com menor Cromo e maior Valor (Figura 6k e 6n).

O IAV explicou apenas 18%, 23% e 12% das variações da K_i , K_r e τ_c , respectivamente. Os resultados obtidos podem ser explicados pela mineralogia. As variações de cor avaliadas pelo IAV não diferiram significativamente entre os Latossolos do presente trabalho. Tal fato ocorreu, uma vez que cada Latossolo estudado demonstrou haver predomínio de hematita em relação à gibbsita. A hematita

é o pigmento que tingem o solo da cor vermelha. Com isto, o IAV tendeu a ter uma distribuição homogênea entre os Latossolos devido ao predomínio da cor vermelha, o que resultou nos baixos coeficientes de determinação observados (Figuras 6p, 6q e 6r).

Autores como Carmo et al. (2016) utilizaram os componentes de cor, na identificação de áreas com diferentes potenciais de produtividade e de qualidade de grãos de café. Camargo (2013), trabalhando com solos na transição Basalto, Formação Serra Geral, Arenito, Grupo Bauru, relata que a cor do solo, determinada por ERD, tem potencial para ser utilizada como atributo diagnóstico, assim como Fernandes et al. (2004) sugerem o uso da ERD na caracterização de solos brasileiros, especialmente os Latossolos, devido ao alto grau de intemperismo. Portanto, é possível prever de maneira rápida, precisa e não invasiva as características mineralógicas, físicas e químicas do solo (SHEPHERD; WALSH, 2002; DALMOLIN; GONÇALVES; DICK, 2005).

Deste modo, a ERD permite identificar mudanças na coloração quase imperceptíveis no campo com a carta de Munsell, o que permite a identificação dos limites entre compartimentos com diferentes potenciais erosivos. Tal conhecimento, permite o planejamento estratégico da conservação do solo em ambientes tropicais.

A construção de ambientes de produção para a cana-de-açúcar leva em consideração, entre outros fatores, os limites pedológicos; no entanto, as classes pedológicas não são homogêneas (MONTANARI et al., 2010), apresentando variabilidade dos atributos que podem interferir na produtividade da cana-de-açúcar. Desta maneira, a aplicação de técnicas geoestatísticas podem auxiliar na melhor compreensão da variabilidade de atributos do solo e de seus limites no campo (McBRATNEY; MENDONÇA; MINASNY, 2003), favorecendo a formação de ambientes específicos de manejo mais precisos e acurados.

A fim de verificar a dependência espacial dos atributos estudados, foram construídos semivariogramas simples para K_i , K_r e τ_c que foram estimados a partir do teor de hematita (Figura 7). Todos os atributos estudados apresentaram dependência espacial (Figura 7), sendo o modelo esférico o que melhor se ajustou à estrutura da variabilidade espacial dos dados. McBratney e Webster (1986), em seus estudos

sobre modelos de ajuste para semivariograma, indicaram que os modelos esféricos e exponenciais são os mais utilizados para a descrição de atributos do solo.

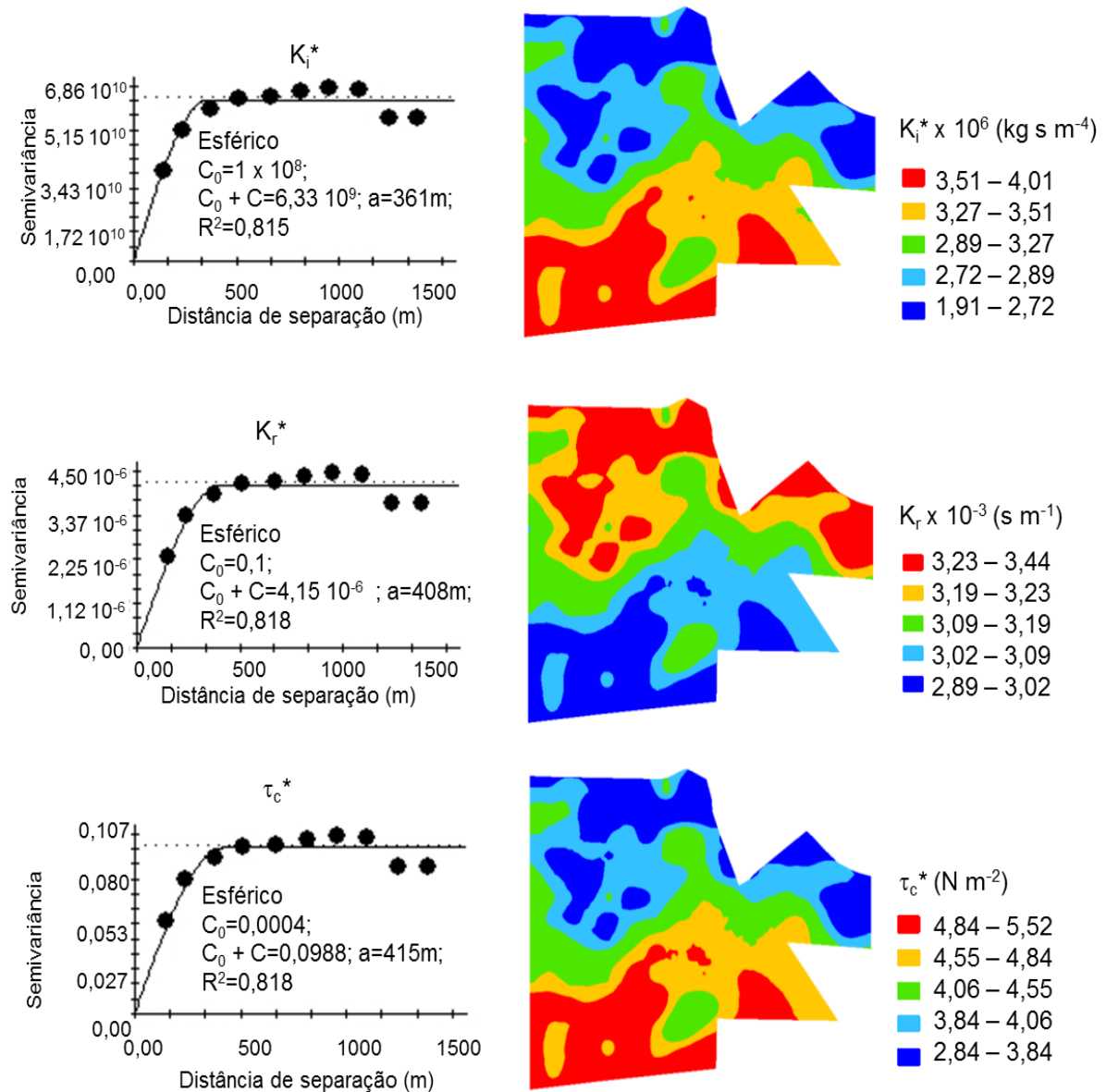


Figura 7. Semivariograma simples e mapas de variabilidade espacial para K_i , K_r e τ_c . (retirada de tendência da K_i , K_r e τ_c no eixo y). * Atributo gerado pelo mineral hematita.

Estudos de Cambardella et al. (1994) indicam que o modelo esférico é considerado o mais assertivo na caracterização de atributos do solo. Os semivariogramas da K_i , K_r e τ_c ajustaram-se ao modelo esférico. Peluco (2013 e 2016), em seus trabalhos com geoestatística, também utilizou o modelo esférico nos ajustes para argila, suscetibilidade magnética, capacidade-suporte de aplicação de vinhaça e CTC. Ajustes de semivariogramas ao modelo esférico estão normalmente associados

a mudanças mais abruptas nos atributos estudados. Por outro lado, os modelos exponenciais ou gaussianos indicam transição mais sutis na paisagem (BURGESS; WEBSTER, 1980).

Pode-se observar que K_i , K_r e τ_c apresentaram alcances de 361; 408 e 415 m, respectivamente, indicando um padrão de variabilidade semelhante entre esses atributos e a distribuição não aleatória (Figura 7). Os alcances obtidos pelos semivariogramas representam a distância de separação em que, dentro dela, existe dependência entre os pontos amostrados (ISAACS; SRIVASTAVA, 1989). Portanto, avaliações com distâncias maiores que os alcances apresentam distribuição aleatória e, portanto, são independentes (PELUCO, 2016).

A relação entre o efeito pepita (C_0) e o patamar (C_0+C_1) pode ser usada para definir classes distintas de dependência espacial das variáveis do solo. Segundo classificação realizada por Cambardella et al. (1994), quando a relação $C_0/(C_0+C_1)$ for menor ou igual a 25 %, a variável apresenta forte dependência espacial; já quando a relação $C_0/(C_0+C_1)$ estiver entre 25 % e 75 %, a variável apresenta moderada dependência espacial e, finalmente, em uma relação $C_0/(C_0+C_1) > 75 %$, ocorre fraca dependência espacial. Para os atributos estudados, a relação $C_0/(C_0+C_1)$ foi de 2%; 24% e 0,4%, respectivamente, para K_i , K_r e τ_c . Deste modo, todas as variáveis estudadas apresentam forte dependência espacial.

Para estudar a variabilidade e verificar a existência de correlação espacial, foram construídos mapas de padrão espacial para K_i , K_r e τ_c (Figura 7). Os mapas obtidos da K_i , K_r e τ_c indicam padrões espaciais diferentes, uma vez que, os menores valores da K_r na área estudada ocorrem nos locais em que τ_c apresentou os maiores valores. Este comportamento já era esperado, uma vez que, quanto maiores forem aos valores da τ_c , menores serão os valores da K_r , já que para o cálculo da K_r utiliza-se a equação de Foster (1982), considerando-se $\tau - \tau_c > 0$: $K_r = D_r / (\tau - \tau_c) \times [1 - G/T]$. Por outro lado, a parte mais baixa da área de estudo, que está localizada em uma região de Depósito Aluvionar, apresentou os maiores valores de erodibilidade em entressulcos (Figura 7). Tal resultado é coerente com os observados no campo e obtidos na literatura (LIMA, 1987). Os mapas e os semivariogramas obtidos para Matiz, Croma, Valor e IAV encontram-se no Apêndice II.

Na Figura 8, são apresentados os semivariogramas cruzados dos atributos estudados em função do Matiz, Cromo, Valor e IAV.

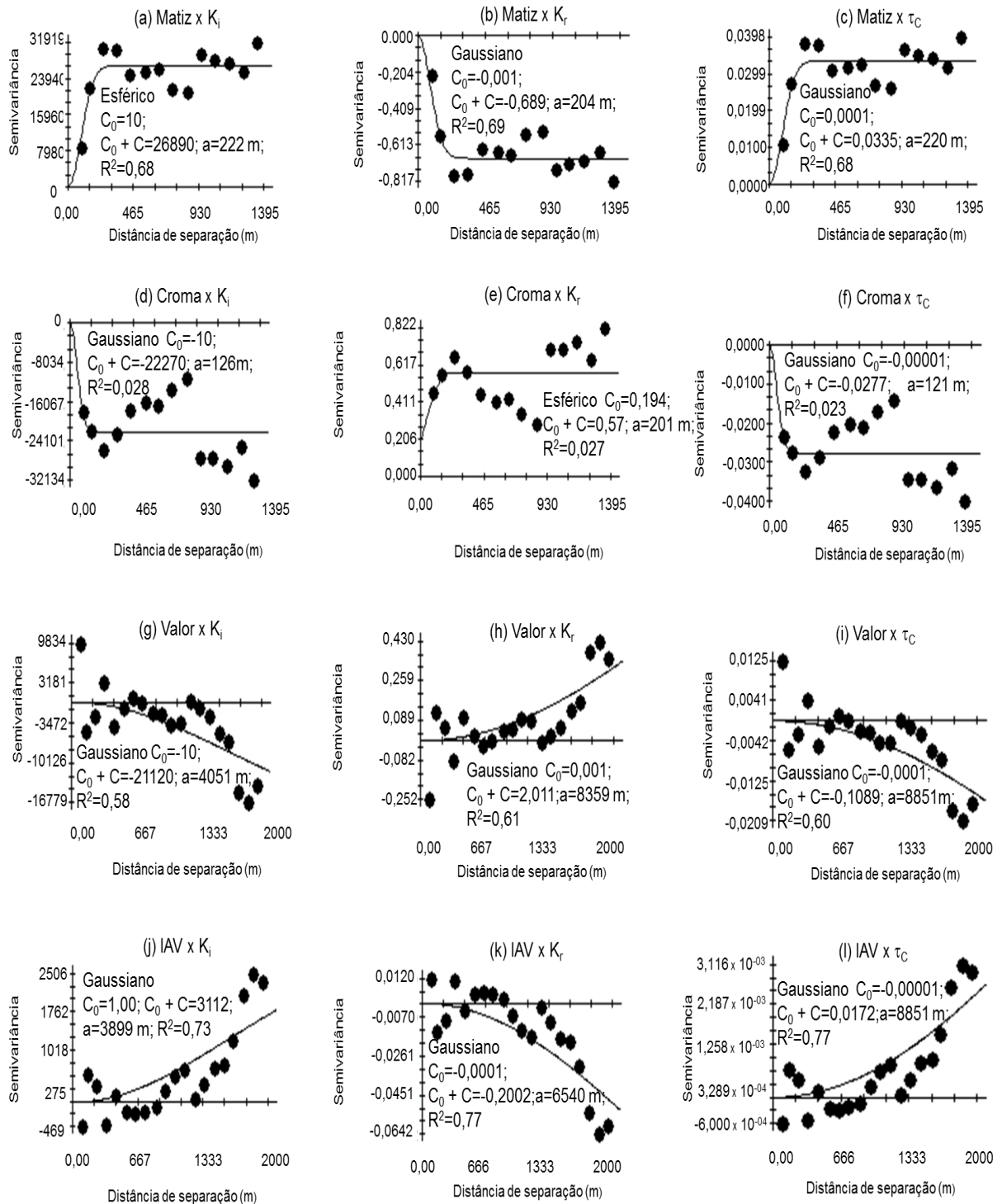


Figura 8. Semivariograma cruzado para os atributos estudados. Sendo que, para as estimativas da K_i , K_r e τ_c , foi realizado o procedimento de retirada de tendência.

Segundo Bhatti et al. (1991), os semivariogramas cruzados podem relacionar-se de maneira positiva, ou seja, o aumento de um atributo é acompanhado pelo aumento de outro; bem como negativa, indicando que o aumento de um dos atributos leva ao decréscimo do outro.

Relações de dependência espacial positivas foram obtidas com o Matiz em relação à K_i (alcance de 222 metros) e a τ_c (alcance de 220 metros) (Figuras 8a e 8c). No entanto, houve dependência espacial negativa entre Matiz e K_r com alcance de 204 metros (Figura 8b). Portanto, na área de estudo, os semivariogramas cruzados encontrados indicam que o Matiz pode ser utilizado na estimativa da K_i , K_r e τ_c com 68%, 69% e 68% de precisão, respectivamente.

Pode-se observar que houve padrão espacial semelhante entre Matiz e K_i e Matiz e τ_c (Figura 8 e Apêndice II). Esta semelhança é comprovada pela observação dos semivariogramas cruzados que apresentam correlação espacial definida positiva entre esses atributos, com forte grau de dependência espacial (CAMBARDELLA et al., 1994) (Figuras 8a a 8c). Estes resultados indicam que os componentes da cor obtidos pela ERD têm potencial para ser utilizados como covariáveis no processo de modelagem da cokrigagem, auxiliando na elaboração de mapas dos parâmetros da K_i , K_r e τ_c .

Embora tenha sido constatada a correlação negativa entre a K_i e o teor de hematita no solo (Figura 6a), verificou-se, pelo semivariograma cruzado, a existência de correspondência espacial positiva entre o Matiz e K_i (Figura 8a). Verificou-se, portanto, que, nas áreas com maior Matiz (mais hematita), ocorrem os maiores valores da K_i , o que evidencia a importância da geoestatística no aprofundamento dos estudos na Ciência do Solo. Camargo et al. (2012) apontaram a necessidade da aplicação de técnicas geoestatísticas para estudos de correlação entre atributos do solo, enfatizando que a análise de correlação simples aplicada isoladamente não é suficiente para entendimento pleno da relação entre atributos (PELUCO, 2016).

Os componentes da cor do solo vêm sendo utilizados em relações diretas para estimar a fertilidade, com precisão de 85% (RESENDE, 2013); erodibilidade com precisão de 70 a 73%; e a acurácia, com 53% (DANTAS et al., 2014). Em solos com teor de Fe_2O_3 de 10 a 200 g kg^{-1} , o IAV apresentou baixa precisão (4%) na estimativa de áreas com diferentes potenciais de adsorção de fósforo (PELUCO et al., 2015).

Os semivariogramas cruzados não apresentaram bons ajustes entre o IAV e K_i , K_r e τ_c como indicam as Figuras 8j, 8k e 8l. Isto indica que este índice não é o mais adequado a ser utilizado nas estimativas destes atributos. Os demais atributos estudados, como Croma e Valor, quando relacionados espacialmente com K_i , K_r e τ_c , também não apresentaram dependência espacial.

O mapeamento das áreas pelo uso da lógica fuzzy (Figura 9) foi sensível em detectar regiões com altas e baixas vulnerabilidades à erosão. As faixas de predisposição à erosão ajudam no planejamento do uso do solo. Outros trabalhos têm usado a lógica fuzzy para apoiar as decisões de planejamento agrícola (ANTUNES et al., 2003; XIMENES et al., 2008; FERNANDES et al., 2010).

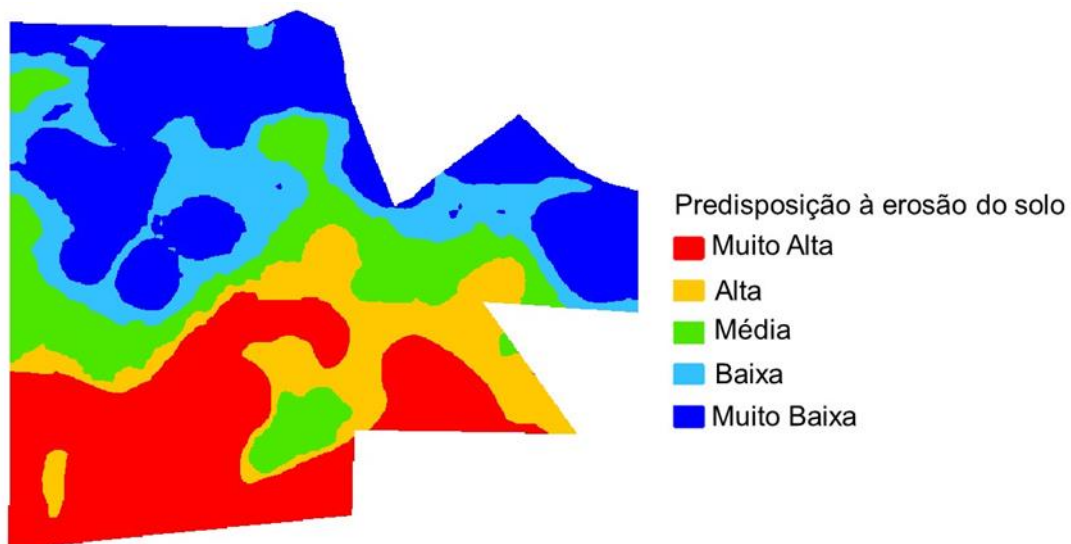


Figura 9. Mapa de predisposição à erosão modelado pela lógica fuzzy.

O mapa da Figura 9 apresenta uma predição pela lógica fuzzy que, ao contrário da forma booleana, permitiu certas suavizações dos limites mais visíveis, como descrito por Goyal et al. (2014). Desta forma, a lógica fuzzy permitiu tratar a imprecisão de forma qualitativa, decorrente do fato de a técnica de mapeamento temático trabalhar com limites rígidos. O limite de incertezas das zonas de transição está associado à experiência do pedólogo, relacionando os fatores de formação do solo e os conhecimentos previamente obtidos (NOLASCO-CARVALHO; FRANCA-ROCHA; UCHA, 2009). São os mapas de incertezas quantitativos que permitem melhor análise

dos resultados obtidos e contribuem para os processos de tomadas de decisão (SIMÕES; SHAW, 2011; ROSS, 2010; GOYAL et al., 2014).

O diagnóstico de áreas mais ou menos predispostas à erosão depende de modelo matemático eficiente e sensível em detectar os máximos e mínimos da área. Alguns autores têm demonstrado que imprecisões nos mapas podem acontecer devido à menor qualidade das informações espaciais (NOLASCO-CARVALHO; FRANCA-ROCHA; UCHA, 2009). Neste contexto, verificou-se que as classes Muito Alta e Muito Baixa de predisposição à erosão correspondem, nesta ordem, a 26,57% e 29,34% da área total. Já as classes Baixa, Média e Alta correspondem a 44,09% da área em estudo (Figura 9).

Modelos de regressão (Figura 6) podem dar suporte nas decisões que investigam o potencial do solo à erosão, mas muitos autores verificaram que a lógica fuzzy é mais precisa que os modelos de regressão (VIERTIL, 2011; PERUZZI, 2012; GIUSTI et al., 2015; PUTTI, 2014). Técnicas computacionais utilizando a lógica fuzzy podem ajudar a reduzir as imprecisões e a proporcionar análises mais refinadas, quando comparadas com os resultados obtidos por meio da estatística clássica (BUCKLEY, 2006; LI et al., 2007; AKBARI; REZAEI, 2010; PITERBARG, 2011; BLANCO-FERNANDEZ et al., 2013, 2014).

Analisando-se a Tabela 1, em concomitância com regras de inferência do Apêndice I, a lógica fuzzy permitiu uma ponderação racional e lógica de composição de classes de predisposição à erosão, combinando individualmente os fatores de erosão K_i , K_r e τ_c .

Os resultados expressos na Figura 9 advêm de análises com as quais foi simulado o processo de dedução humana postulado por Zadeh (1965). Deste modo, com classes atribuídas para cada fator de erosão, obtiveram-se condições como (Apêndice I): 1) K_i Muito Alta, K_r Alta e τ_c Muito Alta; 2) K_i Baixa, K_r Média e τ_c Baixa. Como resultado em termos de predisposição à erosão, tem-se o seguinte: caso 1, classe Alta; caso 2, classe Média.

Na lógica fuzzy, as classes individuais de cada fator de erosão foram consideradas para inferir uma classe final de saída, ou seja, ela analisou como as classes dos valores dos atributos da erosão se relacionam para direcionar uma classe de predisposição à erosão. Como resultado, foi possível compor um mapa de classes

pela lógica fuzzy buscando diagnosticar a predisposição à erosão, o que permitiu observar com maior precisão as áreas que tendem a ser mais suscetíveis à erosão (Figura 9).

5. CONCLUSÕES

- 1.** A cor é um método indireto eficaz para detectar a predisposição do solo à erosão.
- 2.** É possível identificar mudanças da coloração dos Latossolos pela Espectroscopia de Reflectância Difusa (ERD), permitindo a identificação dos limites entre compartimentos com diferentes predisposições do solo à erosão.
- 3.** O componente da cor mais eficiente para estimar a erodibilidade em entressulcos (K_i) é o Matiz (88% de precisão), para estimar a erodibilidade em sulcos (K_r) é o Valor (62%) e para a tensão cisalhante crítica do solo (τ_c) é o Cromo (86%).
- 4.** As análises de dependência espacial mostram que o Matiz permite estimar K_i , K_r e τ_c com 68% de precisão até à distância média de 215 m.
- 5.** Existe dependência espacial para K_i , K_r e τ_c , tal que os semivariogramas da K_i , K_r e τ_c se ajustam ao modelo esférico.
- 6.** A aplicação da lógica fuzzy é uma ferramenta eficiente para a avaliação das áreas com predisposição à erosão, posto que acrescenta maiores possibilidades de limites no zoneamento de áreas para fins de manejo específico.

6. REFERÊNCIAS

ABDI, D.; CADE-MENUN, B.J.; ZIADI, N.; TREMBLAY, G.F.; PARENT, L.E. Visible near infrared reflectance spectroscopy to predict soil phosphorus pools in chernozems of Saskatchewan, Canada. **Geoderma Regional**, Amsterdam, v.7, n.2, p.93-101, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.geodrs.2016.02.004>>.

AKBARI, M.B.; REZAEI, A. Bootstrap testing fuzzy hypotheses and observations on fuzzy statistic. **Expert Systems With Applications**, Oxford, v.37, p.5782-5787, 2010.

ALBUQUERQUE, J.A.; CASSOL, E.A.; REINERT, D.J. Relação entre a erodibilidade em entressulcos e estabilidade dos agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.24; p.141-151, 2000.

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

AMENDOLA, M.; SOUZA, A.L.; BARROS, L.C. **Manual do uso da teoria dos conjuntos Fuzzy no MATLAB 6.5**. Versão 2. Campinas: FEAGRI & IMECC/UNICAMP, 2005. 46p. Disponível em: <http://www.logicafuzzy.com.br/wpcontent/uploads/2012/12/manual_fuzzy_matlab.pdf>. Acesso em: 15 set. 2015.

AMORIM, R.S.S.; SILVA, D.D.; PRUSKI, F.F. Principais modelos para estimar as perdas de solo em áreas agrícolas. In: PRUSKI, F.F. (Ed.). **Conservação de solo e água: práticas mecânicas para o controle da erosão hídrica**. 2.ed. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2009. p.74-107.

ANTUNES, A.F.B.; LINGNAU, C.; CENTENO, J.A.S. Object Oriented Analysis and Semantic Network for high Resolution Image Classification. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v.9, n.2, p.233-242, 2003.

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**, New York, v.262, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.010>>.

AZEVEDO, A.C.; BONUMÁ, A.S. Partículas coloidais, dispersão e agregação em latossolos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, p.609-617, 2004.

BAHIA, A.S.R.S. **Estimação de atributos do solo por espectroscopia de reflectância difusa e suscetibilidade magnética no contexto da paisagem**. 2016. 148 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Jaboticabal, 2016.

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**, Amsterdam, v.5, p.150-156, 2015.

BARBOSA, M.A.B. **Hidráulica do escoamento superficial no processo de erosão em sulcos de um argissolo**. 2015. 45f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Jaboticabal, 2015.

BARBOSA, R.S. **Erodibilidade de latossolos predita pela suscetibilidade magnética e espectroscopia de reflectância difusa**. 2014. 78 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2014.

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 em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. v.1, p.139-162.

BARRÓN, V.; TORRENT, J. Iron, manganese and aluminium oxides and oxyhydroxides. **European Mineralogical Union Notes in Mineralogy**, Budapest, v.14, p.297-336, 2013.

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

BARROS, L.C. **Sobre sistemas dinâmicos fuzzy: teoria e aplicações**.1997. 103 f. Tese (Doutorado em Matemática Aplicada) - Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1997.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo** 6.ed. São Paulo: Ícone, 2008. 355p.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do Solo**. 4.ed. Campinas: Ícone, 1999. 355 p.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 7.ed. São Paulo: Editora Ícone, 2010. 355 p.

BERTONI, J.E.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 3.ed. São Paulo: Ícone Editora, 1993.

BHATTI, A.U.; MULLA, D.J.; KOEHLER, F.E.; GURMANI, A.H. Identifying and removing spatial correlation from yield experiments. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.55, p.1523-1528, 1991.

BLANCO-FERNÁNDEZ, A.; CASALS, M.R.; COLUBI, A.; CORRAL, N.; GARCÍABÁRZANA, M.; GIL, M.A.; GONZÁLEZ-RODRÍGUEZ, G.; LÓPEZ, M.T.; LUBIANO, M.A.; MONTENEGRO, M.; RAMOS-GUAJARDO, A.B.; DE LA ROSA DE SÁ, A, S.; SINOVA, B. A distance-based statistical analysis of fuzzy number-valued data. **International Journal of Approximate Reasoning**, New York, v.55, p.1487-1501, 2014.

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, p.1179-1185, 2006.

BRADFORD, J.M.; FOSTER, G.R. Interrill soil erosion and slope steepness factors. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.5, p.909-915, 1996.

BRITO, L.F.; SOUZA, Z.M.; MONTANARI, R.; MARQUES JR.; CAZETTA, D.A.; CALZAVARA, S.A.; OLIVEIRA, L. Influência de formas do relevo em atributos físicos de um latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, p.1749-1755, 2006.

BUBENZER, G.D.; JONES J.R. Drop size and impact velocity effects on the detachment of soil under simulated rainfall. **Transactions of the American Society of Agricultural Engineers**, St Joseh, v.14, p.625-628.1971.

BUCKLEY, J.J. **Fuzzy probability and statistics: studies in fuzziness and soft computing**. New York: Springer, 2006. v.196, 270 p.

BURGESS, T.M.; WEBSTER, R. Optimal interpolation and isarithmic mapping of soil properties. I. The semivariogram and punctual kriging. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.31, n.3, p.315-331, 1980.

BURROUGH, P.A. **Principles of geographic information systems for land resources assessment**. New York: Clarendon Press, 1986.

CABRAL, L.J.R.S.; VALLADARES, G.S.; AQUINO, R. de. Susceptibilidade à erosão das terras do alto curso do Rio Banabuiú, no sertão central do Ceará, usando lógica nebulosa. **ACTA Geográfica**, Boa Vista, p.103-113, 2016. Número especial.

CAMARGO, L.A. **Mineralogia da argila e atributos físicos de um argissolo em curvaturas de relevo**. 2009. 128f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita filho”, Jaboticabal, 2009.

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**, Amsterdam, v.100, p.100-106, 2013.

CAMARGO, L.A.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G.T.; HORVAT, R.A. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um Latossolo sob diferentes formas de relevo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.32, p.2269-2277, 2008.

CAMARGO, L.A.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T.; BAHIA, A.S.R.S. Clay mineralogy and magnetic susceptibility of Oxisols in geomorphic surfaces. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.71, p.244-256, 2014.

CAMARINHA, P.I.M.; SIMÕES, S.J.C.; BERNARDES, G.P.; TRANNIN, I.C.B. Correlating soil porosity and respective geological unit in Paraíba do Sul Valley, Brazil - a geostatistical methodology proposal. **Soils & Rocks**, São Paulo, v.35, p.209-222, 2012.

CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R.F.; KONOPKA, A.E. Field-scale variability of soil properties in Central Iowa Soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.5, p.1501-1511, 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, MG, v.28, p.853-863, 2004.

CAÑASVERAS, J.C.; BARRÓN, V.; DEL CAMPILLO, M.C.; VISCARRA ROSSEL, R.A. Reflectance spectroscopy: a tool for predicting oil roperties related to the incidence of Fe chlorosis. **Spanish Journal of Agricultural Research**, Madrid, v.10, n.4, p.1133-1142, 2012.

CANTALICE, J.R.B. **Escoamento e erosão em sulcos e entressulcos em distintas condições de superfície do solo**. 2001.140 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

CANTALICE, J.R.B.; CASSOL, E.A.; REICHERT, J.M.E.; BORGES, A.L .de O. Hidráulica do escoamento e transporte de sedimentos em sulcos em solo de Franco-Argilo-Arenoso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.29, p.597-607, 2005.

CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; RAIJ, B. Van.; ABREU, M.F. Variability of soil analysis in commercial laboratories: implications for lime and fertilizer recommendations. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, London, v.37, n.15-20, p.2213-2225, 2006.

CARMO, D.A.B.; JÚNIOR, J.M.; SIQUEIRA, D.S.; BAHIA, A.S.R.S.; 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, DF, 2016 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 Environment Journal**, New York, v.179, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2016.03.025>>.

CHAGAS, C.S.; CURI, N.; DUARTE, M.N.; MOTTA, P.E.R.; LIMA, J.M. Orientação das camadas de rochas metapelíticas pobres na gênese de latossolos sob cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v.32, p.539-548, 1997.

CHESTERS, G.; ATTOE, O.J.; ALLEN, O.N. Soil aggregation in relation to various soil constituents. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, p.272- 277, 1957.

CHILÉS, J.P.; DELFINER, P **Geostatistics: modeling spatial uncertainty**. New York: John Wiley and Sons, 1999. p.695.

CORNELL, R.M. The film-forming abilities of iron-oxides and oxyhydroxides. **Clay Minerals**, Londres, v.10, p.209-213, 1973.

CPRM - Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais. Serviço Geológico do Brasil. Geobank - **Mapa geológico do estado de São Paulo, na escala 1:750000**. 2012. Disponível em: <<http://geobank.sa.cprm.gov.br/>>. Acesso em: 29 dez.2012.

CUNHA, P. **Superfícies geomórficas e variabilidade de Latossolos em uma vertente sobre arenito-basalto em Jaboticabal (SP)**. 2000. 149 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Jaboticabal, 2000.

DALMOLIN, R.S.D.; GONÇALVES, C.N.E.; DICK, D.P. Relação entre os constituintes do solo e seu comportamento espectral. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.35, p.481-489, 2005.

DANTAS, J.S.; FILHO, M.V.M.; JÚNIOR, J.M.; RESENDE, J.M.A.; TEIXEIRA, 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, DF, v.49, p.700-707, 2014.

DAVIS, J C. **Statistics and data analysis in geology**. 2 ed. New York: John Wiley; 1986.

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, p.590-597, 2011.

DENARDIN, J.E. **Erodibilidade do solo estimado por meio de parâmetros físicos e químicos**. 1990. 114 f. Tese (Doutorado) – Escola Superior de Agricultura “Luis de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1990.

DICK, D.P. **Caracterização de óxidos de ferro e adsorção de fósforo na fração argila de horizontes B Latossólicos**. 1986.196p. Dissertação (Mestrado em Solos) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1986.

EDUARDO, E.N. **Determinação da erodibilidade e do fator cobertura e manejo do solo sob condições de chuva natural e simulada**. 2012. 56 f. Tese (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro, Seropédica, 2012.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solo**. 2ed. Rio de Janeiro, 1997.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Revisão sobre funções de pedotransferência (PTFs) e novos métodos de predição de classes e atributos do Solo**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003. 50p. (Documentos, 45).

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária Centro Nacional e Pesquisa em Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, DF: Embrapa-SPI; Rio de Janeiro: Embrapa-Solo, 2006.

ESRI - Environmental Systems Research Institute. **ArcGIS. Professional GIS for the desktop, versão 10.2**. Redlands: Environmental Systems Research Institute, 2010.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **The state of food and agriculture**. Rome, 1980.

FERNANDES, C. **Conservação do solo e da água**. Jaboticabal: Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, 2003. 60 p. Apostila.

FERNANDES, E.; BASTOS, L.C.; MELLO, R. Apoio à decisão ao planejamento do uso do espaço com a utilização de sistemas de informações geográficas e lógica difusa. **Revista Brasileira de Cartografia**, Rio de Janeiro, v.62, p.43-54, 2010.

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, MG, v.28, p.245-257, 2004.

FERREIRA, M.M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Influência da mineralogia da fração argila nas propriedades físicas de Latossolos da região Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.23, p.515-524, 1999a.

FERREIRA, M.M.; FERNANDES, B.; CURI, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de latossolos da região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.23, p.507-514, 1999b.

FERREIRA, R.A. **Padrão espacial da erodibilidade e tensão cisalhante crítica de um Argissolo**. 2015. Monografia (Trabalho de graduação em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Jaboticabal, 2015.

FLANAGAN, D.C.; ASCOUGH, I.J.C; NICKS, A.D.; NEARING, M.A.; LAFLEN, J.M. **USDA- water erosion prediction project hillslope profile and watershed model documentation NSERL**. West Lafayette: National Soil Research Laboratory & USDA – Agricultural Research Service, 1995. (Report, 10).

FLANAGAN, D.C.; LIVINGSTON, S.J. **USDA - Water erosion prediction project: WEEP user summary**. West Lafayette: National Soil Research Laboratory & USDA – Agricultural Research Service, 1995. p.25-26. (Report, 11).

FONSECA, L.A.M.; LANI, J.L.; FILHO, E.I.F.; SANTOS, G.R.; FERREIRA, W.P.M.; SANTOS, A.M.R.T. Variability in soil physical properties in landslide-prone areas. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.39, n.1, p.109-118, 2017.

FOSTER, G.R. Modeling the erosion process. In: HANN, C.T.; JOHNSON, H.P.; BRAKENSIEK, D.L. (Ed.). **Hydrologic modeling of small watersheds**. St.Joseph: American Society of Agricultural Engineering, 1982. p.297-380.

FREIRE, O.; GODOY, M.C.T.F.; CARVALHO, W.A. Erodibilidade de alguns solos do oeste do Estado de São Paulo. **Revista de Geografia**, São Paulo, n.11, p.77-87, 1992.

FREITAS, L. **Qualidade e erodibilidade de Latossolos sob mata e cultivo de cana-de-açúcar**. 2014. 110 f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Jaboticabal, 2014.

GALETI, P.A. **Práticas de controle a erosão**. São Paulo: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1973.

GEE, G.W.; BAUDER, J.W. Particle-size analysis. In: PAGE, A.L. (Ed.). **Methods of soil analysis. Part1 – Physical and mineralogical methods**. Madison: American Society of Agronomy, Soil Science Society of America, 1986. p.383-411.

GHIDIN, A.A.; MELO, V.F.; LIMA, V.C.; LIMA, J.M.J.C. Topos sequências de Latossolos originados de rochas basálticas no Paraná.II – Relação entre mineralogia da fração argila e propriedades físicas dos solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.30, p.307-319, 2006b.

GHIDIN, A.A.; MELO, V.F.; LIMA, V.C.; LIMA, J.M.J.C. Topossequência de Latossolos originados de rochas basálticas no Paraná.II – Relação entre mineralogia da fração argila e propriedades físicas dos solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.30, p.307-319, 2006b.

GIUSTI, E.; LIBELLI, S.M. A fuzzy decision support system for irrigation and water conservation in agriculture. **Environmental Modelling & Software**, Oxford, v.63, p.73-86, 2015.

GOYAL, M.K.; BHARTI, B.; QUILTY, J.; ADAMOWSKI, J.; PANDEY, A. Modeling of daily pan evaporation in sub-tropical climates using ANN, LS-SVR, fuzzy logic and ANFIS. **Expert systems With Applications**, Oxford, v.43, p.5267-5276, 2014.

GREGO, C.R.; DE OLIVEIRA, R.P., VIEIRA, S.R. Geoestatística aplicada a agricultura de precisão. In: BERNARDI, A.C.C.; NAIME, J.M.; RESENDE, A.V.; BASSOI, L.H.; INAMASU, R.Y. (Org.). **Agricultura de precisão: resultados de um novo olhar**. 2.ed. Brasília, DF: Embrapa, 2014. v.1, p.74-83.

GRISSINGER, E.H. Resistance of selected clay systems to erosion by water. **Water Resources Research**, Washington, v.2, p.131-138, 1966. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1029/WR002i001p00131>>.

GUERRA, A.J.T. O início do processo erosivo. In: GUERRA, A.J.T.; SILVA, A.S.; BOTELHO, R.G.M. (Org.). **Erosão e conservação de solos**. 7.ed. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2012. p.17-56.

GUPTA, A.; DAS, B.S.; KUMAR, A.; CHAKRABORTY, P; MOHANTY, B. Rapid and non invasive assessment of atterberg limits using diffuse reflectance spectroscopy. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.80, n.5, p.1283-1295, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi:10.2136/sssaj2015.11.0402>>.

GÚZMAN, G.; QUINTON, J.N.; NEARING, M.A.; MABIT, L.; GÓMEZ, J.A. Sediment tracers in water erosion studies: current approaches and challenges. **Journal of Soil and Sediments**, New York, v.13, n.4, p.816-833, 2013.

HASTIE, T.; TIBSHIRANI, R.; FRIEDMAN, J. **The elements of statistical learning: data mining, inference and prediction**. New York: Springer Series in Statistics, 2001.

HEUVELINK, G.B.M.; BURROUGH, P.A.; STEIN, A. Propagation of erros in spatial modelling with GIS. **International Journal of Geographical Information Systems**, London, v.3, n.4, p.303-322, 1989.

IBÁÑEZ, J.J.; MONTANARELLA, L. **Magic Numbers: a meta-analysis for enlarging the scope of a universal soil classification system**. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2013.135p.

IBIAPINA, T.V. **Processo de erosão de um argissolo utilizando o modelo WEPP**. 2015. 55f. Tese (Doutorado em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Jaboticabal, 2015.

IFAD - International Fund for Agricultural Development. The Rural Poverty Report. Rome, 2014. In: LEON, J.; OSORIO, N. Role of litter turnover in soil quality in tropical degraded lands of Colombia. **Science World Journal**, Kadume, v.13, p.1-11, 2014. Disponível em: <doi:10.1155/2014/693981>.

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

IZIDORIO, R.; MARTINS FILHO, M.V.; MARQUES JÚNIOR, J.; SOUZA, Z.M.; PEREIRA, G.T. Perdas de nutrientes por erosão e sua distribuição espacial em área sob cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.25, n.3, p.660-670, 2005.

JANIK, L.J.; MERRY, R.H.; SKJEMSTAD, J.O. Can mid infra-red diffuse reflectance analysis replace soil extractions? **Australian Journal Experimental Agriculture**, Melbourne, v.38, n.7, p.681-696, 1998.

KÄMPF, N.; CURI, N. Óxidos de ferro: indicadores de atributos e ambientes pedogenéticos 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, Viçosa, 2000. p.107-138.

KÄMPF, N.; SCHWERTMANN, U. Goethite and hematite in a climo sequence in Southern Brazil and their application in classification of kaolinitic soils. **Geoderma**, New York, v.29, p.27-39, 1982.

KARATHANASIS, A.D.; HAJEK, B.F. Revised methods for quantitative determination of minerals in soil clays. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.46, p.419-425, 1982.

KEMPEN, B.; BRUS, D.J.; STOORVOGEL, J.J. Three-dimensional mapping of soil organic matter content using soil type-specific depth functions. **Geoderma**, Amsterdam, v.162, p.107-123, 2011.

KEMPEN, B.; HEUVELINK, G.B.M.; BRUS, D.J.; STOORVOGEL, J.J. Pedometric mapping of soil organic matter using a soil map with quantified uncertainty. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.61, p.333-347, 2010.

KLIR, G.J.; YUAN, B. **Fuzzy sets and fuzzy logic: theory and applications**. New Jersey: Prentice Hall, 1995. 574 p.

KNAPEN, A.; POESEN, J. Soil erosion resistance effects on rill and gully initiation points and dimensions. **Earth Surface Processes and Landforms**, New York, v.35, p.217-228, 2010.

KNAPEN, A.; POESEN, J.; GOVERS, G.; GYSSELS, G.; NACHTERGAELE, J. Resistance of soils to concentrated flow erosion: A review. **Earth Science Reviews**, New York, v.80, p.75-109, 2007.

KOSMAS, C.S.; CURI, N.; BRYANT, R.B. Characterization of iron oxide minerals by second-derivative visible spectroscopy. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.48, p.401-405, 1984.

KROTH, E.M.; PAGE, J.B. Aggregate formation in soils with special reference to cementing substances. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v.11, p.27-34, 1947.

KUBELKA, P.; MUNK, F. Einbeitrag zur Optik der farbanstriche. **Zeitschrift für technische Physik**, Leipzig, v.12, p.593-620, 1931.

LA SCALA JÚNIOR, N.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G.T.; CORÁ, J.E. Short-term temporal changes in the spatial variability model of CO₂ emissions from a Brazilian bare soil. **Soil Biology & Biochemistry**, Exeter, v.32, n.10, p.1459-1462, 2000.

LAFLEN, J.M.; LANE, L.J.; FOSTER, G.R. The water erosion prediction project – a new generation of erosion prediction technology. **Journal of Soil and Water Conservation**, v.46, n.1, p.34-38, 1991.

LAL, R. Erodibility and erosivity. In: LAL, R. et al. **Soil erosion research methods**. Washington: Soil and Water Conservation Society, 1988, p.141-160.

LANE, L.J.; RENARD K.G.; FOSTER, G.R.; LAFLEN, J.M. Development and application of modern soil erosion prediction technology. **Australian Journal of Soil Research**, Melbourne, v.30, n.6, 1992.

LE BISSONNAIS, Y.; SINGER M.J. Seal formation, runoff, and interrill erosion from seventeen California soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.57, p.224-229, 1993.

LEÃO, M.G.A. **Relação entre atributos de uma vertente com Latossolos e qualidade de frutos cítricos**. 2004. 119 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2004.

LEMONS, P.O.; LUTZ, J.F. Soil crusting and some factors affecting it. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v.12, n.6, p.485-491, 1957.

LEPSCH, I.F. **Formação e conservação dos solos**, São Paulo: Oficina de Textos, 2002.

LI, W.; ZHOU, J.; XIONG, X.; LU, J. A statistic-fuzzy technique for clustering load curves. **Transactions on Power Systems**, New York, v.22, n.2, 2007.

LIMA, J.M. **Relação entre erosão, teor de ferro, parâmetros físicos e mineralógicos de solos da região de Lavras (MG)**. 1987. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras 1987.

LIMA, L. **Aplicação dos métodos semiautomático e lógica fuzzy para o mapeamento de solos da bacia do Sarandi**. 2013. 124 f. Dissertação (Mestrado em Geociências) - Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

LIMA, P.M.P.; ANDRADE, H. Erodibilidade entres sulcos e atributos de solos com b textural e b latossólico do sul de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.23, p.463-474, 2001.

LONGLEY, P.A.; GOODCHILD, M.E.; MAGUIRE, D.J.; RHIND, D.W. **Geographic information systems and science**. New York: John Wiley, 2011. 560 p.

LUCA JÚNIOR, P.R.; MARTINS FILHO, M.V. Relações entre erodibilidade em sulcos, tensão cisalhante crítica e propriedades físicas de um latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar. In: 16º SIICUSP - SIMPÓSIO INTERNACIONAL DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA DA USP, 2008, Piracicaba. Universidade de São Paulo, 2008.

LUTZ, J.F. The relation of free iron in the soil to aggregation. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v.1, p.43-45, 1936.

MADDAHI, Z.; JALALIAN, A.; ZARKESH, M.M.K.; HONARJO, N. Providing a soil fertility map using geographic information system, geostatistical techniques and fuzzy logic. **AES Bioflux**, Cly-Napoca, v.7, n.1, p.131 – 138, 2015.

MALLEY, D.F.; MARTIN, P.D.; BEN-DOR, E. Application in analysis of soils. In: ROBERTS, C.A.; WORKMAN, J.; REEVES, J.B.I.I.I. (Ed.). **Near-Infrared spectroscopy in agriculture**. Fitchburg: Soil Science Society of America, 2004. p.729–784.

MARQUES, J.J.G.S.M.; ALVARENGA, R.C.; CURI, N.; SANTANA, D.P.; SILVA, M.L.N. Índices de erosividade da chuva, perdas de solo e fator erodibilidade para dois solos da região dos cerrados - primeira aproximação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.21, p.427-434, 1997.

MATHERON, G. Principles of geostatistics. **Economic Geology**, Littleton, v.58, n.8, p.1246-1266, 1963.

McBRATNEY, A.B.; WEBSTER, R. Choosing functions for semivariograms of soil properties and fitting them to sample estimates. **Journal Soil Science**, Oxford, v.37, p.617-637, 1986.

McBRATNEY, A.G.; MENDONÇA SANTOS, M.L.; MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, Amsterdam, v.117, n.1-2, p.3-52, 2003.

MEYER, L.D.; HARMON, W.C. Susceptibility of agricultural soils to interrill erosion. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.48, p.1152- 1157, 1984.

MINITAB. **Release making data analysis easier**: version 13.1. 2000.

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

MONTANARI, R.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T.; SOUZA, Z.M. Forma da paisagem como critério para otimização amostral de latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília- DF, v.40, n.1, p.69-77, 2005.

MONTESINOS, M.G.; CÁMARA, J.M.F.; TOMÉ, J.M.; CÁMARA, M.A.O.; GARCÍA, F.H.; VICENTE, R.M.; DÍEZ, M.B. Número de submuestras necesarias para la obtención de una muestra de suelo representativa. **Agrícola Vergel**, Valencia, v.241, p.9-18, 2002.

MORAES, I.C. **Avaliação dos modelos de predição da erosão hídrica MEUPS e WEPP**: contribuição em Bacias Hidrográficas. 2016. 191 f. Tese (Doutorado em Geografia) - Instituto de Geociências e Ciências Exatas do Câmpus de Rio Claro, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho, Rio Claro, 2016.

MUGGLER, C.C.; CURI, N.; SILVA, M.L.N.; LIMA, J.M. Características pedológicas de ambientes agrícolas nos Chapadões do Rio Corrente, sudoeste da Bahia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v.31, p.221-232, 1996.

NOLASCO-CARVALHO, C.C.; FRANCA-ROCHA, W.; UCHA, J.M. Mapa digital de solos: Uma proposta metodológica usando inferência fuzzy. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.13, n.1, p.46-55, 2009.

OLIVEIRA, J.F.; GRIEBELER, N.P.; CORRECHEL, V.; SILVA, V.C. Erodibilidade e tensão crítica de cisalhamento em solos de estradas não pavimentadas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.13, p.955-960, 2009.

ORTEGA, N.R.S. **Aplicação da teoria da Lógica Fuzzy a problemas de biomedicina**. 2001. 153 f. Tese (Doutorado em Física) – Instituto de Física, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2001.

PANOSSO, A.R.; PEREIRA, G.T.; MARQUES JUNIOR, J.; LA SCALA JÚNIOR, N. Variabilidade espacial da emissão de CO₂ em latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar em diferentes sistemas de manejo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.28, n.2, p.227-236, 2008.

PEDROTTI, A. **Relação entre os atributos físicos e alumínio no solo**. 2000. 60 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2000.

PEDROTTI, A.; FERREIRA, M.M.; CURI, N.; SILVA, M.L.N.; LIMA, J.M.; CARVALHO, R. Relação entre atributos físicos, mineralogia da fração argila e formas de alumínio no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.27, p.1-9, 2003.

PEDRYCZ, W.; GOMIDE, F. **An introduction to fuzzy sets: analysis and design**. Bradford: Imprensa Cambridge, 1998. 465 p.

PELUCO, R.G. **Magnetismo e cor na identificação de solos com diferentes potenciais de sorção de imazaquim**. 2016. 105 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista ‘Júlio de Mesquita Filho’ Câmpus de Jaboticabal, Jaboticabal, 2016.

PELUCO, R.G.; JÚNIOR, J.M.; 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, DF, v.50, n.3, 2015. Disponível em: < <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2015000300010>>.

PELUCO, R.G.; MARQUES JÚNIOR, J.; SIQUEIRA, D.S.; PEREIRA, G.T.; BARBOSA, R.S.; TEIXEIRA, D.B.; ADAME, C.R.; CORTEZ, L.A. Suscetibilidade magnética do solo e estimação da capacidade de suporte à aplicação de vinhaça **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v.48, p.661-672, 2013.

PERCIVAL, J.B.; WILLIAMSON, M.C. Mineralogy and spectral signature of reactive gossans, Victoria Island, NT, Canada. **Applied Clay Science**, Amsterdam, v.119, n.2, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2015.05.026>>.

PERUZZI, N.J.; SCALA, N.L., MACARI, M., FURLAN, R.L., MEYER, A.D., FERNANDEZ-ALARCON, M.F., KROETZ NETO, F.L., SOUZA, F.A. Fuzzy modeling to predict chicken egg hatchability in commercial hatchery. **Poultry Science**, Champaign, p.2710- 2717, 2012.

PITERBARG, L.I. Parameter estimation from small biased samples. **Fuzzy Sets and Systems**, Amsterdam, v.170, p.1-21, 2011.

PUTTI, F.F.; GABRIEL FILHO, L.R.A.; SILVA, A.O. da; LUDWIG, R.; GABRIEL, C.P.C. Fuzzy logic to evaluate vitality of *Catasetum fimbriatum* species (Orchidaceae). **Irriga, Botucatu**, v.19, n.3, p.405-413, 2014.

RACZKOWSKI, C.W.; MUELLER, J.P.; BUSSCHER, W.J.; BELL, MCGRAW, M.L. Soil physical properties of agricultural systems in a large-scale study. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.119, p.50- 59, 2012.

RAHMAN, R.M.; SHI, Z.H.; CHONGFA, C. Soil erosion hazard evaluation: an integrated use of remote sensing, GIS and statistical approaches with biophysical parameters towards management strategies. Amsterdam. **Ecological Modelling**, New York, v.220, p.1724–1734, 2009.

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

RENARD, K.G.; FOSTER, G.R.; WEESIES, G.A.; MCCOOL, D.K.; YODER, D.C. **Predicting soil erosion by water – A guide to conservation planning with Revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)**. Washington: US Gov. Print Office, 1997. (Agricultural Handbook, 703).

RESENDE, J.M.do A. **Caracterização pedométrica de atributos de Argissolos coesos do leste maranhense**. 2013. 83 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2013.

RESENDE, M. **Minerology, chemistry, morphology and geomorphology of some soils of the Central Plateau of Brazil**. 1976. Thesis (PhD) – Purdue University, Purdue, 1976.

RIBACIONKA, F. **Sistemas computacionais baseados em lógica fuzzy**. 1999. 118 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Elétrica) - Universidade Presbiteriana Mackenzie, São Paulo, 1999.

ROBERTSON, G.P. **GS+ Geostatistics for the environmental sciences – GS+ user´s guide**. Plainwell: Gamma Desing Software, 2004. 152 p.

ROCHA, W.W. **Resistência ao cisalhamento e estabilidade de taludes de voçorocas em solos da região de Lavras, MG**. 2003. 101f.Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2003.

ROSS, T.J. **Fuzzy logic: with engineering applications**. 3th ed. Chichester: Wiley, 2010. 607p.

ROSSETTI, K.V. **Qualidade estrutural em Latossolos compactados cultivados com milho**. 2015. 90 f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista ‘Júlio de Mesquita Filho’ Campus de Jaboticabal, Jaboticabal, 2015.

SANCHEZ, M.G.B. **Relação solo relevo em áreas sob cultivo de café no sudoeste de Minas**. 2009. 90 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2009.

SANTOS, H.L.; MARQUES JÚNIOR, J.; MATIAS, S.S.R.; SIQUEIRA, D.S.; PEREIRA, G.T. Suscetibilidade magnética na identificação de compartimentos da paisagem em uma vertente. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v.6, n.4, p.710-716, 2011.

SANTOS, H.L.; MARQUES JÚNIOR, J.; MATIAS, S.S.R.; SIQUEIRA, D.S.; PEREIRA, G.T. Erosion factors and magnetic susceptibility in different compartments of a slope in Gilbués-PI, Brazil. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.33, n.1, p.64-74, 2013.

SANTOS, R.S.; FRANCO, L.B.; SILVA, S.A.; SODRÉ, G.A.; MENEZES, A.A. Spatial variability of soil fertility and its relation with coco a yield. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.21, p.88-93, 2017.

SCHAEFER, C.E.G.R.; FABRIS, J.D.; KER, J.C. Minerals in the clay fraction of Brazilian (Oxisols): a review. **Clay Minerals**, Londres, v.43, p.1-18, 2008.

SCHÄFER, M.J.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; CASSOL, E.A. Erosão em entressulcos em diferentes preparos e estados de consolidação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.25; p.431-441, 2001.

SCHEINOST, A.C.; CHAVERNAS, A.; BARRÓN, V.; TORRENT, J. Use and limitations of second-derivative diffuse reflectance spectroscopy in the visible to near infrared range to identify and quantify Fe oxides in soils. **Clays and Clay Minerals**, Elmsford, v.46, p.528-536, 1998.

SCHEINOST, A.C.; SCHWERTMANN U. Color identification of iron oxides and hydroxysulfates: use and limitations. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.63, n.5, p.1463-1471, 1999.

SCHULZE, D.G. The influence of aluminium on iron oxides VIII. Unit-cell dimension of Al-substituted goethites and estimation of Al from them. **Clays and Clay Minerals**, Elmsford, v.32, p.36-44, 1984.

SCHWERTMANN, U.; KÄMPF, N. Properties of goethite and hematite in kaolinitic soils of Southern and Central Brazil. **Soil Science**, Baltimore, p.139, v.344-350.1985.

SCHWERTMANN, U.; TAYLOR, R.M. Iron oxides. In: DIXON, J.B.; WEED, S.B. (Ed.). **Minerals in soil environments**. 2nd ed. Madison: SSSA, 1989. p.379-438. (Book Series, 1).

SHEPHERD, K.D.; WALSH, M.G. Development of reflectance spectral libraries for characterization of soil properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.66, p.988-998.2002.

SILVA, A.C. **Relação entre voçorocas e solos na região de Lavras (MG)**. 1990. 124 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1990.

SILVA, A.F.; PEREIRA, M.J.; ZIMBACK, C.R.L.; LANDIM, P.M.B.; SOARES, A. Simulação sequencial de atributos diagnósticos do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.19, n.5, p.418-425, 2015.

SILVA, A.M.; SCHULS, H.E.; CAMARGO, P.B. **Erosão e hidrossedimentologia em bacias hidrográficas**. São Carlos: Rima, 2004. 140p.

SILVA, M.L.N. **Erodibilidade e impacto direto das gotas de chuva simulada sobre a superfície de latossolos sob cerrado**. 1994.109 f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1994.

SILVA, M.L.N.; CURI, N.; MARQUES, J.J.G.S.M; LIMA, L.A.; FERREIRA, M.M.; LIMA, J.M. Resistência ao salpico provocado por impacto de gotas de chuva simulada em latossolos e sua relação com características químicas e mineralógicas, **Ciência e Prática**, Lavras, v.19, p.182-188, 1995.

SILVA, M.L.N.; CURI, N.; OLIVEIRA, M.S.; FERREIRA, M.M.; LOMBARDI NETO, F. Comparação de métodos direto e indiretos para determinação da erodibilidade em latossolos sob cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v.29, n.11, p.1751-1761, 1994.

SILVA, S.A.; LIMA, J.S.S. Lógica Fuzzy no mapeamento de variáveis indicadoras de fertilidade do solo. **Idesia**, Arica, v.27, n.3, p.41-46, 2009.

SILVEIRA, C.T.; OKA-FIORI, C.; SANTOS, L.J.C.; SIRTOLI, A.E.; SILVA, C.R. Pedometria apoiada em atributos topográficos com operações de tabulação cruzada por álgebra de mapas. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, Uberlândia, v.13, p.125-237, 2012.

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

SIMÕES, M.G.; SHAW, I.S. **Controle e modelagem Fuzzy**. São Paulo: Editora Edgard Blucher, 2011.

SIMÕES, S.J.C.; GOMES, L.; MENDES, R.M.; MENDES, T.S. Sig e modelos de escorregamentos: avaliando métodos para reduzir as incertezas de dados de solos e precipitação. **Revista Brasileira de Cartografia**, São José dos Campos, p.1737-1746, 2016.

SIQUEIRA, D.S. **Suscetibilidade magnética para a estimativa de atributos do solo e mapeamento de áreas sob cultivo de cana-de-açúcar**. 2010.75 f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista “Julio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 2010b.

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, p.425-431, 2010a.

SIQUEIRA, D.S.; MARQUES, JR.J.; PEREIRA, G.T.; TEIXEIRA, D.B.; VASCONCELOS, V.; CARVALHO JÚNIOR, O.A.; MARTINS, E.S. Detailed mapping unit desing based on soil-landscape relation and spatial variability of magnetic susceptibility and soil color. **Catena**, Amsterdam, v.135, p.149-162.2015.

SKOOG, D.A.; LEARY, J.J. **Principles of instrumental analysis**. Philadelphia: Saunders College Publishing, 2002.

SOIL SURVEY STAFF. **Keys to soil taxonomy**. 7.ed. Washington: USDA, 1996.

SOUZA, Z.M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. Spatial variability of the physical and mineralogical properties of the soil from the areas with variation in landscape shapes. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v.52, n.2, p.305-316, 2009.

SOUZA, Z.M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T.; MOREIRA, L.F. Variabilidade espacial do pH, Ca, Mg e V% do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.6, p.1763-1771, 2004.

STEVENSON, F.C.; KNIGHT, J.D.; WENDROTH, O.; KESSEL, C.V.; NIELSEN, D.R. A comparison of two methods to predict the landscape-scale variation of crop yield. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.58, n.3-4, p.163-181, 2001.

SUMMERFIELD, M.A. **Global geomorphology**. Singapore: Longman Scientific & Technical, 1991. 535 p.

TANAKA, K. **An introduction to fuzzy logic for practical applications**. Tokyo: Springer, 1997.138 p.

TEIXEIRA, D.B. **Suscetibilidade magnética e análise de incertezas em mapeamento de solos**. 2015. 88 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho", Jaboticabal, 2015.

TEN CATEN, A.; DALMOLIN, R.S.D.; PEDRON, F.A.; QUOOS, J.H. Mapeamento digital: probabilidade associada à distribuição espacial de classes de solos. **Revista Brasileira de Geomatica**, Curitiba, v.4, n.2, p.87-97, 2009.

THORNTHWAITE, C.W. An approach towards a rational classification of climate. **Geographical Review**, Calcuta, v.38, p.55-94.1948.

TISCARENO-LOPEZ, M.; LOPES, V.L.; STONE, J. J.; LANE, L.J. **Sensitivity analysis of the WEPP watershed model for rangeland applications**. In: Hill slope process. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.36, n.6, p.1659-1672, 1993.

TORRENT, J.; BARRÓN, V. Diffuse reflectance spectroscopy. In: ULERY, A.L.; REES, L.R.D. (Ed.). **Methods of soil analysis. Part 5. Mineralogical methods**. Fitchburg: Soil Science Society of America, 2008. p.367-387. (Book Series, 5)

TRANGMAR, B.B.; YOST, R.S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial studies of soil properties. **Advances in Agronomy**, New York, v.38, n.1, p.45-93, 1985.

VAN PHAM, L.; SMITH, C. Drivers of agricultural sustainability in developing countries: A review. **Environment Systems and Decisions**, New York, v.34, p.326–341. 2014.

VEIGA FILHO, A.A.; SOUZA, M.V.M; MARTINS, N.B.; YANAGUISH, C.T.; MATSUNAGA, M. Análise de investimentos em adoção de tecnologias e conservação do solo no estado de São Paulo. **Agricultura em São Paulo**, São Paulo, v.39, p.133-154.1992.

VIEIRA, S.R.; HATFIELD, J.L.; NIELSEN, D.R.; BIGGAR, J.W. Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties. **Hilgardia**, Berkeley, v.51, n.3, p.1-75, 1983.

VIEIRA, S.R.; LOMBARDI NETO, F. Variabilidade espacial do potencial de erosão das chuvas do Estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v.54, n.2, p.405-412, 1995.

VIERTL, R. **Statistical methods for fuzzy data**. Austria, 2011. p.1-270, 2011.

VISCARRA ROSSEL, R.A.; RIZZO, R.; DEMATTÊ, J.A.M.; BEHRENS, T. Spatial modelling of a soil fertility index using vis–NIR spectra and terrain attributes. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.74, p.1293-1300, 2010.

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, n.1-2, p.59–75, 2006.

VITORINO, A.C.T.; FERREIRA, M.M.; CURI, N.; LIMA, J.M.; SILVA, M.L.N.; MOTTA, P.E.F. Mineralogia, química e estabilidade de agregados do tamanho de silte de solos da região Sudeste do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v.38, p.133-141, 2003.

WISCHMEIER, W.H.; JOHNSON, C.B.; CROSS, B.V. A soil erodibility nomograph for farmland and construction sites. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v.26, n.5, p.189-193, 1971.

WISCHMEIER, W.H.; MANNERING, J.V. Relation of soil properties to its erodibility. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v.33, n.1, p.131-137, 1969.

WISCHMEIER, W.H.; SMITH, D.D. **Predicting rain fall erosion losses - a guide to conservation planning**. Washington: USDA, 1978. 58p. (Agriculture handbook, 537).

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

XIE, H.T.; YANG, X.M.; DRURY, C.F.; YANG, J.Y.; ZHANG, X.D. Predicting soil organic carbon and total nitrogen using mid- and near-infrared spectra for Brookston clay loam soil in Southwestern Ontario, Canada. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v.91, p.53- 63, 2011.

XIMENES, A.C.; ALMEIDA, C.M.; AMARAL, S.; ESCADA, M.I.S.; AGUIAR, A.P.D. Modelagem dinâmica do desmatamento na Amazônia. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v.14, n.3, p.370-391, 2008.

YAMAMOTO, J.K.; LANDIM, P.M.B. **Geoestatística: conceitos e aplicações**. São Paulo: Oficina de Textos, 2013.

YANG, P.; BYRNE, J.M.; YANG, M. Spatial variability of soil magnetic susceptibility, organic carbon and total nitrogen from farmland in northern China. **Catena**, Amsterdam, v.145, p.92-98, 2016. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1016/j.catena.2016.05.025>>.

ZADEH, L.A. Fussy sets. **Information and Control**, Berkeley, v.8, n.1, p.338-353,1965.

ZADEH, L.A. Toward a theory of fuzzy information granulation and its centrality in human reasoning and fuzzy logic. **Fuzzy Sets and Systems**, New York, v.90, n.2, p.111–127, 1997.

ZAHO, J. Applicability of Mohr-Coulomb and Hoek-Brown strength criteria to the dynamics strength of brittle rock. **International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences**, Amsterdam, v.37, p.1115-1121, 2000.

ZEJUN, T.; TINGWU, L.; QINGWEN, Z.; JUN, Z. The sealing process and crust formation att soil surface under the impacts of raindrop and polycrylamine. In: ISCO CONFERENCE, 12, 2002, China. **Anais China Agriculture University**, Beijing, 2002.

ZHU, A.X. Measuring uncertainty in class assignment for natural resource maps under Fuzzy logic. **Photogrammetric Engineeringand Remote Sensing**, Bethesda, v.63, n.10, p.1195-1202, 1997.

APÊNDICE

Apêndice I. Regras de Inferência da lógica fuzzy na determinação de áreas mais ou menos suscetíveis à erosão do solo.

K_i	K_r	τ_c	Predisposição à erosão
Muito Alta	Muito Alta	Muito Baixa	Muito Alta
Muito Alta	Muito Alta	Baixa	Muito Alta
Muito Alta	Muito Alta	Média	Muito Alta
Muito Alta	Muito Alta	Alta	Muito Alta
Muito Alta	Muito Alta	Muito Alta	Muito Alta
Muito Alta	Alta	Muito Baixa	Muito Alta
Muito Alta	Alta	Baixa	Muito Alta
Muito Alta	Alta	Média	Muito Alta
Muito Alta	Alta	Alta	Muito Alta
Muito Alta	Alta	Muito Alta	Alta
Muito Alta	Média	Muito Baixa	Muito Alta
Muito Alta	Média	Baixa	Muito Alta
Muito Alta	Média	Média	Muito Alta
Muito Alta	Média	Alta	Alta
Muito Alta	Média	Muito Alta	Média
Muito Alta	Baixa	Muito Baixa	Muito Alta
Muito Alta	Baixa	Baixa	Muito Alta
Muito Alta	Baixa	Média	Alta
Muito Alta	Baixa	Alta	Média
Muito Alta	Baixa	Muito Alta	Baixa
Muito Alta	Muito Baixa	Muito Baixa	Muito Alta
Muito Alta	Muito Baixa	Baixa	Alta
Muito Alta	Muito Baixa	Média	Média
Muito Alta	Muito Baixa	Alta	Baixa
Muito Alta	Muito Baixa	Muito Alta	Muito Baixa
Alta	Muito Alta	Muito Baixa	Muito Alta
Alta	Muito Alta	Baixa	Muito Alta
Alta	Muito Alta	Média	Muito Alta
Alta	Muito Alta	Alta	Muito Alta
Alta	Muito Alta	Muito Alta	Alta
Alta	Alta	Muito Baixa	Muito Alta
Alta	Alta	Baixa	Muito Alta
Alta	Alta	Média	Muito Alta
Alta	Alta	Alta	Alta
Alta	Alta	Muito Alta	Média
Alta	Média	Muito Baixa	Muito Alta
Alta	Média	Baixa	Muito Alta
Alta	Média	Média	Alta
Alta	Média	Alta	Média
Alta	Média	Muito Alta	Baixa

Continua...

Apêndice I. Regras de Inferência da lógica fuzzy na determinação de áreas mais ou menos suscetíveis à erosão do solo. Continuação...

K_i	K_r	τ_c	Predisposição à erosão
Alta	Baixa	Muito Baixa	Muito Alta
Alta	Baixa	Baixa	Alta
Alta	Baixa	Média	Média
Alta	Baixa	Alta	Baixa
Alta	Baixa	Muito Alta	Muito Baixa
Alta	Muito Baixa	Muito Baixa	Alta
Alta	Muito Baixa	Baixa	Média
Alta	Muito Baixa	Média	Baixa
Alta	Muito Baixa	Alta	Muito Baixa
Alta	Muito Baixa	Muito Alta	Muito Baixa
Média	Muito Alta	Muito Baixa	Muito Alta
Média	Muito Alta	Baixa	Muito Alta
Média	Muito Alta	Média	Muito Alta
Média	Muito Alta	Alta	Alta
Média	Muito Alta	Muito Alta	Média
Média	Alta	Muito Baixa	Muito Alta
Média	Alta	Baixa	Muito Alta
Média	Alta	Média	Alta
Média	Alta	Alta	Média
Média	Alta	Muito Alta	Baixa
Média	Média	Muito Baixa	Muito Alta
Média	Média	Baixa	Alta
Média	Média	Média	Média
Média	Média	Alta	Baixa
Média	Média	Muito Alta	Muito Baixa
Média	Baixa	Muito Baixa	Alta
Média	Baixa	Baixa	Média
Média	Baixa	Média	Baixa
Média	Baixa	Alta	Muito Baixa
Média	Baixa	Muito Alta	Muito Baixa
Média	Muito Baixa	Muito Baixa	Média
Média	Muito Baixa	Baixa	Baixa
Média	Muito Baixa	Média	Muito Baixa
Média	Muito Baixa	Alta	Muito Baixa
Média	Muito Baixa	Muito Alta	Muito Baixa
Baixa	Muito Alta	Muito Baixa	Muito Alta
Baixa	Muito Alta	Baixa	Muito Alta
Baixa	Muito Alta	Média	Alta
Baixa	Muito Alta	Alta	Média
Baixa	Muito Alta	Muito Alta	Baixa
Baixa	Alta	Muito Baixa	Muito Alta

Continua...

Apêndice I. Regras de Inferência da lógica fuzzy na determinação de áreas mais ou menos suscetíveis à erosão do solo. Continuação...

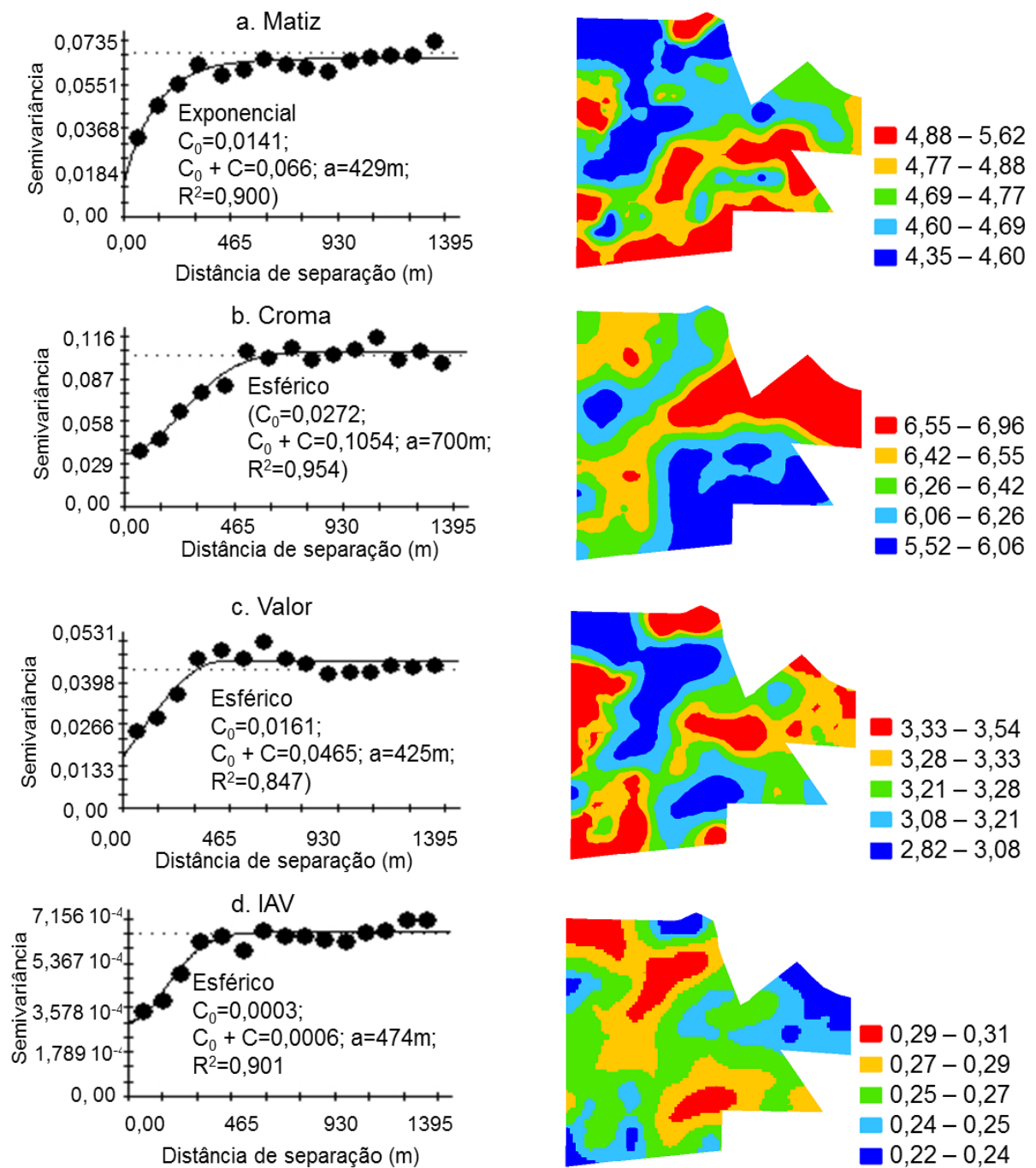
K_i	K_r	τ_c	Predisposição à erosão
Baixa	Alta	Baixa	Alta
Baixa	Alta	Média	Média
Baixa	Alta	Alta	Baixa
Baixa	Alta	Muito Alta	Muito Baixa
Baixa	Média	Muito Baixa	Alta
Baixa	Média	Baixa	Média
Baixa	Média	Média	Baixa
Baixa	Média	Alta	Muito Baixa
Baixa	Média	Muito Alta	Muito Baixa
Baixa	Baixa	Muito Baixa	Média
Baixa	Baixa	Baixa	Baixa
Baixa	Baixa	Média	Muito Baixa
Baixa	Baixa	Alta	Muito Baixa
Baixa	Baixa	Muito Alta	Muito Baixa
Baixa	Muito Baixa	Muito Baixa	Baixa
Baixa	Muito Baixa	Baixa	Muito Baixa
Baixa	Muito Baixa	Média	Muito Baixa
Baixa	Muito Baixa	Alta	Muito Baixa
Baixa	Muito Baixa	Muito Alta	Muito Baixa
Muito Baixa	Muito Alta	Muito Baixa	Muito Alta
Muito Baixa	Muito Alta	Baixa	Alta
Muito Baixa	Muito Alta	Média	Média
Muito Baixa	Muito Alta	Alta	Baixa
Muito Baixa	Muito Alta	Muito Alta	Muito Baixa
Muito Baixa	Alta	Muito Baixa	Alta
Muito Baixa	Alta	Baixa	Média
Muito Baixa	Alta	Média	Baixa
Muito Baixa	Alta	Alta	Muito Baixa
Muito Baixa	Alta	Muito Alta	Muito Baixa
Muito Baixa	Média	Muito Baixa	Média
Muito Baixa	Média	Baixa	Baixa
Muito Baixa	Média	Média	Muito Baixa
Muito Baixa	Média	Alta	Muito Baixa
Muito Baixa	Média	Muito Alta	Muito Baixa
Muito Baixa	Baixa	Muito Baixa	Baixa
Muito Baixa	Baixa	Baixa	Muito Baixa
Muito Baixa	Baixa	Média	Muito Baixa
Muito Baixa	Baixa	Alta	Muito Baixa
Muito Baixa	Baixa	Muito Alta	Muito Baixa
Muito Baixa	Muito Baixa	Muito Baixa	Muito Baixa
Muito Baixa	Muito Baixa	Baixa	Muito Baixa

Continua...

Apêndice I. Regras de Inferência da lógica fuzzy na determinação de áreas mais ou menos suscetíveis à erosão do solo.

K_i	K_r	τ_c	Predisposição à erosão
Muito Baixa	Muito Baixa	Média	Muito Baixa
Muito Baixa	Muito Baixa	Alta	Muito Baixa
Muito Baixa	Muito Baixa	Muito Alta	Muito Baixa

K_i : erodibilidade em entressulcos (kg s m^{-4}); K_r : erodibilidade em sulcos (s m^{-1}); τ_c : tensão cisalhante crítica do solo (N m^{-2})

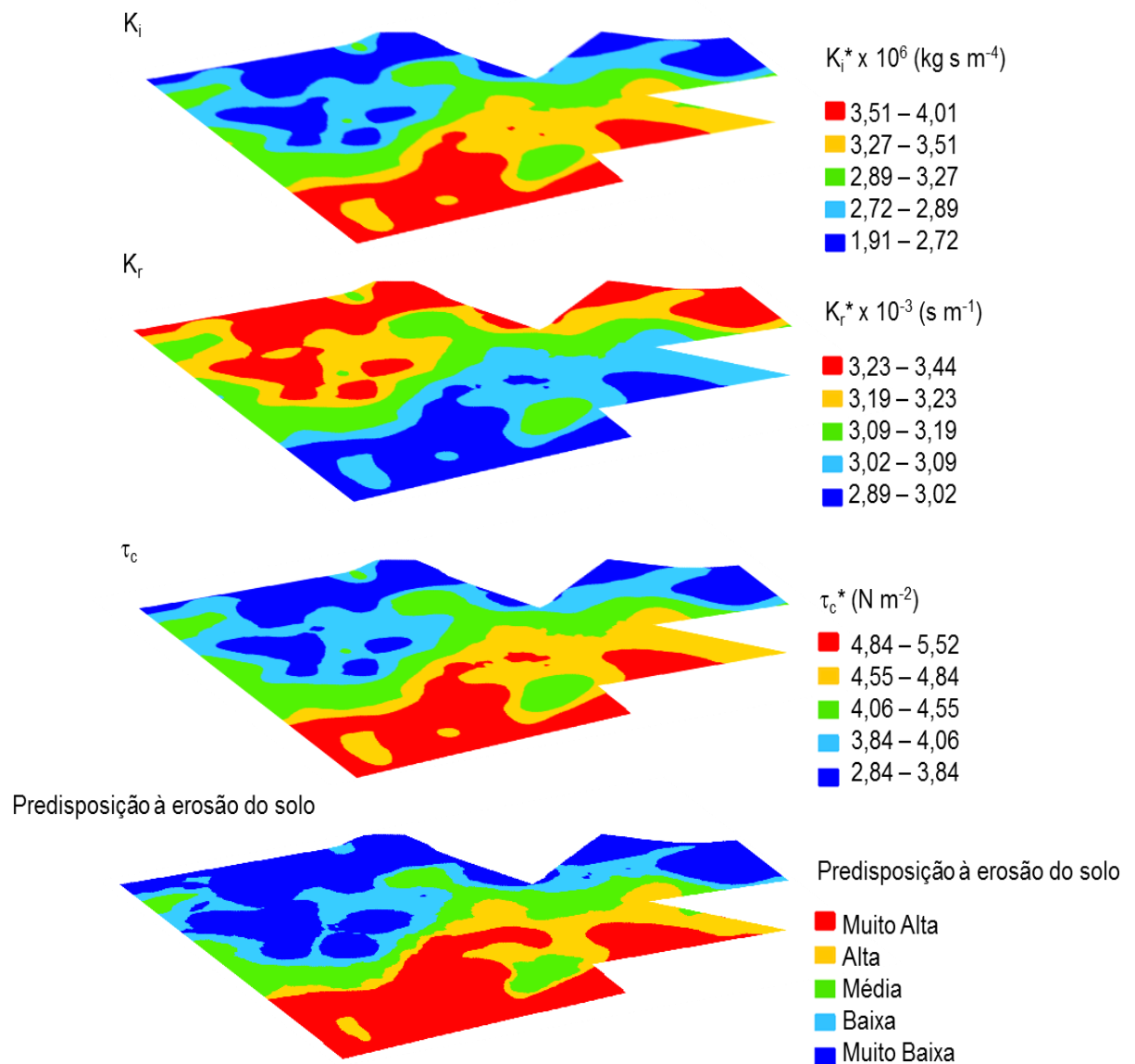


Apêndice II. Semivariogramas simples e mapas de variabilidade espacial para Matiz, Cromo, Valor e IAV. Extraído de Peluco (2016).

Apêndice III. Geoestatística para os atributos dos solos estudados (Semivariogramas).

Variável	Modelo	Efeito Pepita	Patamar	Alcance	GDE ⁽¹⁾	R ²
		(C ₀)	(C ₀ +C ₁)	(m)	(%)	
Matiz (YR)	Exponencial	0,0141	0,066	429	21,36	0,900
Croma	Esférico	0,0272	0,1054	700	25,81	0,954
Valor	Esférico	0,0161	0,0465	425	34,62	0,847
IAV	Esférico	0,0003	0,0006	474	50,00	0,901
K _i *	Esférico	1 10 ⁸	6,33 10 ⁹	361	1,58	0,815
K _r *	Esférico	1 10 ⁻⁴	4,15 10 ⁻⁶	408	24,09	0,818
τ _c *	Esférico	0,0004	0,0988	415	0,40	0,818

⁽¹⁾ GDE, grau de dependência espacial $[C_0 / (C_0 + C_1)] \times 100$; *Atributo gerado pelo mineral hematita; IAV, Índice de Avermelhamento; K_i, erodibilidade em entressulcos (kg s m⁻⁴); K_r, erodibilidade em sulcos (s m⁻¹); τ_c, tensão cisalhante crítica do solo (N m⁻²).



Apêndice IV. Álgebra de mapas para determinação de área com predisposição à erosão.