

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

**MAGNETISMO E COR NA IDENTIFICAÇÃO DE SOLOS COM
DIFERENTES POTENCIAIS DE SORÇÃO DE IMAZAQUIM**

Rafael Gonçalves Peluco
Engenheiro Agrônomo

2016

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

**MAGNETISMO E COR NA IDENTIFICAÇÃO DE SOLOS COM
DIFERENTES POTENCIAIS DE SORÇÃO DE IMAZAQUIM**

Rafael Gonçalves Peluco

**Orientador: Prof. Dr. José Marques Júnior
Co - orientador: Dr. Diego Silva Siqueira**

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

2016

P393m Peluco, Rafael Gonçalves
Magnetismo e cor na identificação de solos com diferentes potenciais de sorção de imazaquim / Rafael Gonçalves Peluco. -- Jaboticabal, 2016
xiii, 92 p. : il. ; 29 cm

Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2016

Orientador: José Marques Júnior

Co-orientador: Diego Silva Siqueira

Banca examinadora: Luís Reynaldo Ferracciú Alleoni, Marcilio Vieira Martins Filho, Pedro Luís da Costa Aguiar Alves, Walter Maccheroni Júnior

Bibliografia

1. Espectroscopia de reflectância difusa. 2. Suscetibilidade magnética. 3. Geoestatística. 4. Herbicida. 5. Pedometria. I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.4:528.4



UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA

Câmpus de Jaboticabal



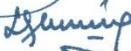
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

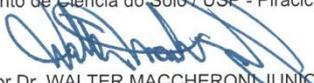
TÍTULO: MAGNETISMO E COR NA IDENTIFICAÇÃO DE SOLOS COM DIFERENTES
POTENCIAIS DE SORÇÃO DE IMAZAQUIM

AUTOR: RAFAEL GONÇALVES PELUCO
ORIENTADOR: 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. JOSÉ MARQUES JUNIOR
Departamento de Solos e Adubos / FCAV / UNESP - Jaboticabal


Prof. Dr. LUÍS REYNALDO FERRACCIÚ ALLEONI
Departamento de Ciência do Solo / USP - Piracicaba, SP


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


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


Prof. Dr. PEDRO LÚIS DA COSTA AGUIAR ALVES
Departamento de Biologia Aplicada à Agropecuária / FCAV / UNESP - Jaboticabal

Jaboticabal, 24 de novembro de 2016.

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

RAFAEL GONÇALVES PELUCO – Filho de José Luiz Peluco e Marilza Gonçalves Peluco, nascido em 12 de junho de 1987 em São José do Rio Preto - SP. Graduado em Engenharia Agrônômica pela Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” - FCAV/UNESP Jaboticabal (2010). Foi bolsista de iniciação científica pela FAPESP no período de 2007 a 2010. Participou da Consultoria Agropecuária Júnior (CAP Jr), Empresa Júnior da Unesp Jaboticabal, exercendo as funções de Trainee (2008), Diretor de Marketing (2009) e Diretor do Conselho Administrativo (2010). Mestre em Agronomia, Produção Vegetal (Bolsista CAPES) pela FCAV/UNESP Jaboticabal (2013). Iniciou o Doutorado no curso de Pós-Graduação em Agronomia, Ciência do Solo pela FCAV/UNESP Jaboticabal em março de 2013. Atua na área de Engenharia Agrônômica, com ênfase em Agricultura de Precisão e Mineralogia do Solo, trabalhando principalmente nos seguintes temas: geoestatística, mapeamento de áreas de manejo específico com base na relação solo-relevo e técnicas pedométricas (suscetibilidade magnética e espectroscopia de reflectância difusa). Membro ativo do grupo de pesquisa Caracterização do Solo para fins de Manejo Específico (CSME) da UNESP Campus de Jaboticabal. Também atua no setor privado como Suporte Técnico Agrônômico, na área de Qualidade Agrícola (Controle de Pragas; Experimentação Agrônômica; Auditorias Agrícolas; Amostragem e Mapeamento de Solos; Geoprocessamento; Planejamento e Controle Agrícola) da Usina São Martinho S/A. Responsável pelos setores de Automação Agrícola e Geotecnologias do Grupo São Martinho.

*"Não desanimes. Persiste mais um tanto.
Não cultives o pessimismo. Centraliza-te no bem a fazer.
Esquece as sugestões do medo destrutivo.
Segue adiante, mesmo varando a sombra dos próprios erros.
Avança ainda que seja por entre lágrimas.
Trabalha constantemente. Edifica sempre.
Não consintas que o gelo do desencanto te entorpeça o coração.
Não te impressiones à dificuldade.
Convence-te de que a vitória espiritual é construção para o dia a dia.
Não desistas da paciência.
Não creias em realização sem esforço.
Silêncio para a injúria. Olvido para o mal.
Perdão às ofensas.
Recorda que os agressores são doentes.
Não permitas que os irmãos desequilibrados te destruam o trabalho ou te apaguem a esperança.
Não menosprezes o dever que a consciência te impõe.
Se te enganaste em algum trecho do caminho, reajusta a própria visão e procura o rumo certo.
Não contes vantagens nem fracassos.
Estuda buscando aprender.
Não se voltes contra ninguém.
Não dramatizes provações ou problemas.
Conserva o hábito da oração para que se te faça luz na vida íntima.
Resguarda-te em Deus e persevera no trabalho que Deus te confiou.
Ama sempre, fazendo pelos outros o melhor que possas realizar.
Age auxiliando. Serve sem apego.
E assim vencerás".*

Emmanuel

(Mensagem psicografada pelo médium Francisco Candido Xavier - Chico Xavier - do livro "Astronautas do além" - edição GEEM)

DEDICO

À minha amada amiga, namorada, esposa, companheira, luz da minha vida,
Cássia Rita Adame, pelo amor, carinho, parceria, paciência, apoio e incentivo
constantes...

" Uma vida boa é aquela inspirada pelo amor e guiada pelo conhecimento."

Bertrand Arthur William Russell

OFEREÇO

Aos meus amados pais José Luiz Peluco e Marilza Gonçalves Peluco e à minha irmã Juliana Gonçalves Peluco. Ao meu sogro Wanderlei Adame (*in memoriam*) e minha sogra Alice Aparecida Pansani Adame (Chinha). Aos meus avós paternos, Santo Peluco (*in memoriam*) e Jeni Maria Veronez Peluco, e avós maternos, Mário Gonçalves (*in memoriam*) e Julia Marques Gonçalves, e a todos os tios, tias, primos e primas. Todos vocês são meu "porto seguro", base de amor, carinho, e inspiração da minha vida.

" A vida é como andar de bicicleta.

Para manter seu equilíbrio você deve continuar em movimento."

Albert Einstein

AGRADECIMENTOS

À Deus pelo dom da vida, pela oportunidade de evolução intelectual e moral e pela oportunidade de realizar essa obra.

Ao Prof. Dr. José Marques Júnior e ao Dr. Diego Silva Siqueira, pela paciência, orientação, ensinamentos e amizade.

Aos membros da banca do Exame Geral de Qualificação, que muito contribuíram com ideias e sugestões, Prof. Dr. José Marques Júnior, Profa. Dra. Carolina Fernandes, Prof. Dr. Glauco de Souza Rolim, Dra. Mariluce Pascoína Nepomuceno, e Dr. Marcos Antonio Kuva.

Aos membros da banca examinadora da Defesa da Tese de Doutorado, pelas valiosas contribuições, correções e ideias, Prof. Dr. José Marques Júnior, Prof. Dr. Luís Reynaldo Ferracciú Alleoni, Dr. Walter Maccheroni Júnior, Prof. Dr. Marcilio Vieira Martins Filho e Prof. Dr. Pedro Luís da Costa Aguiar Alves.

À todos os amigos integrantes do Grupo de Pesquisa CSME, em especial, Lucas Aguilar Cortez, Luis Gustavo Teixeira, Daniel De Bortoli Teixeira, Danilo Almeida Baldo do Carmo, Prof. Dr. Newton La Scala Júnior, Prof. Dr. Gener Tadeu Pereira, Prof. Dr. Ronny Sobreira Barbosa, Livia Arantes Camargo, Angélica S. R. de Souza Bahia, Frederico Luiz Siansi, Ana Beatriz Coelho França, Laercio Santos Silva, Milene Moara Reis Costa, Ivanildo Amorim de Oliveira, Mara Regina Moitinho, Renato Eleotério de Aquino, Ricardo de Oliveira Bordonal, Elienai Ferreira da Silva, Kathleen Lourenço Fernandes, Ludmila Freitas, Bruno Barbosa Mialichi, Romário Gomes, Vinícius Augusto Filla, Adrien Dorvalino Ferroni, e Yves Soares Menon pela boa convivência e apoio nos trabalhos.

Aos amigos Thiaguinho de Barros Sylvestre, Daniel Tannus Ferreira (Bazzinga), Lucas Aparecido Gaion, Paulinho Martineli, Danilo Franco (Pokacoisa),

Felipe Batistela Filho (Gordo), Fabio Tirabochi Leal (Fivelinha), Jivago de Oliveira Rosa, José Luiz Carvalho de Souza Dias e Marcos Antônio Marcari.

Aos amigos Bruno Máximo (Urso), Eduardo Maniezo Rodriguez (Biripelo), Luma Torres (Serena), Victor de Paula Campos Fábio (Sabão), Everton Sbrama Perressim (JacaGay), Fábio Cunha de Andrade (Krrapixão), Silvio Aparecido Marcussi (Cúpin), Eduardo Ribeiro (Cíndrome), Lucas Quilice (Didown) e toda turma da Agronomia 2006 da FCAV - UNESP JABOTICABAL.

Aos amigos Luís Fernando Moretti (in memoriam), Cintia Carvalho Alves (in memoriam), João Gustavo Spinola, Adalto Bianco, Vagner Silva (Ingreis), Silvinho Pereira, Everton Donadi, Diego Frigo, Renan Passetto (Bigato), Renan Conceição (Bolacha), Paulinho Adame, Thales Antonietti, Igor Toledo, Marcelo Lula, Fernando Lopes, Fernando Rosa, Rogerinho Bedan, Leonan Rafael Toledo, Zé Renato Franco Alves, Tarciso Martins, Guilherme David, Paulinho Hidalgo da Célinha, Iguinho Carvalho do Poca, Matheus Pansani do Pin e toda turma de TABAPUÃ-SP, vocês dispensam comentários... Simplesmente fazem parte de minha história.

À todos os amigos dos Departamentos de Ciências Exatas e Solos e Adubos, responsáveis por parte da minha formação pessoal, científica e profissional.

À todos os amigos da Usina São Martinho, com os quais tenho a oportunidade de aprender e evoluir pessoal e profissionalmente dia a dia.

À Usina São Martinho S/A pelo apoio e incentivo na realização dos trabalhos e pela concessão da área de estudo.

À FCAV - UNESP JABOTICABAL, pela estrutura fornecida para minha graduação e pós-graduação.

Finalmente, à todos que de maneira direta ou indireta contribuíram para realização deste trabalho.

" Todo grande progresso da ciência resultou de uma nova audácia da imaginação."

John Dewey

SUMÁRIO

| | |
|---|----|
| CAPÍTULO 1 - Considerações gerais..... | 1 |
| 1.1 Introdução..... | 1 |
| 1.2 Revisão de Literatura | 3 |
| 1.2.1 Meta-análise | 3 |
| 1.2.2 Comportamento dos herbicidas nos solos..... | 5 |
| 1.2.3 Suscetibilidade magnética e os atributos do solo..... | 11 |
| 1.2.4 Espectroscopia de reflectância difusa e os atributos do solo..... | 14 |
| 1.3 Referências | 15 |
| CAPÍTULO 2 - Assinatura magnética do solo para identificação de áreas com diferentes potenciais de sorção de imazaquim..... | 21 |
| 2.1 Introdução..... | 22 |
| 2.2 Material e Métodos | 25 |
| 2.2.1 Descrição da área de amostragem..... | 25 |
| 2.2.2 Análises laboratoriais | 26 |
| 2.2.3 Meta-análise | 27 |
| 2.2.4 Análise dos dados | 29 |
| 2.3 Resultados e Discussão..... | 31 |
| 2.4 Conclusões..... | 48 |
| 2.5 Referências | 49 |
| CAPÍTULO 3 - Cor do solo para identificação de áreas com diferentes potenciais de sorção do herbicida imazaquim..... | 56 |
| 3.1 Introdução..... | 57 |
| 3.2 Material e Métodos | 59 |
| 3.2.1 Descrição da área de amostragem..... | 59 |
| 3.2.2 Análises laboratoriais | 61 |
| 3.2.3 Meta-análise | 62 |
| 3.2.4 Análise dos dados | 64 |
| 3.3 Resultados e Discussão..... | 65 |
| 3.4 Conclusões..... | 80 |
| 3.5 Referências | 81 |
| CAPÍTULO 4 - Considerações finais | 92 |

MAGNETISMO E COR NA IDENTIFICAÇÃO DE SOLOS COM DIFERENTES POTENCIAIS DE SORÇÃO DE IMAZAQUIM

RESUMO - O conhecimento da variabilidade dos atributos do solo é importante para recomendação racional de herbicidas, contribuindo para prática da agricultura de maneira mais sustentável. Objetivou-se com este estudo avaliar a utilização da suscetibilidade magnética e da cor do solo, obtida por espectroscopia de reflectância difusa, para identificação de solos com diferentes potenciais de sorção de herbicida. Para medição da espectroscopia de reflectância difusa, foram coletadas 86 amostras de solo a cada 30 m, em uma transeção de 2600 m, seguindo o espigão da paisagem ao longo da área, e mais 155 pontos em uma malha de densidade amostral de 1 ponto a cada 2,5 ha, na profundidade de 0,00 - 0,25 m totalizando 241 amostras de solo em uma área experimental de 380 ha. A partir dos componentes de cor do solo (matiz, valor e croma) foi calculado um índice de avermelhamento. Foram selecionados 12 pontos da transeção para realização das análises mineralógicas do solo. Para medição da suscetibilidade magnética e determinação dos teores de ferro ditionito (Ferro livre, pedogenético) e oxalato (Ferro amorfo, de baixa cristalinidade), foram coletadas 374 amostras de solo na profundidade de 0,00 - 0,25 m, numa malha com densidade amostral de 1 ponto a cada 2,4 ha, em outra área experimental, desta vez com dimensão de 908 ha. Em todos os pontos amostrais, de ambas as áreas, foram determinados o pH, os teores de matéria orgânica e os teores de argila do solo. O coeficiente de Freundlich para sorção do herbicida imazaquim foi determinado indiretamente a partir do teor de argila, por meio da metodologia da meta-análise. Foram construídos modelos de regressão da suscetibilidade magnética e dos componentes de cor com os demais atributos estudados. Os dados foram submetidos à análise estatística descritiva, e também foram calculadas as médias de cada atributo conforme as classes de solo e compartimentos geológicos e foi aplicado o teste de Tukey a 5%. A análise da dependência espacial dos dados foi feita por meio da geoestatística, utilizando-se o variograma. Também foram construídos mapas de padrão espacial. Os resultados indicam que o uso da suscetibilidade magnética possibilita a quantificação indireta da sorção do herbicida imazaquim. Solos com maior expressão magnética apresentam características de maior sorção do herbicida imazaquim. A assinatura magnética dos solos pode auxiliar no mapeamento e na identificação de áreas com diferentes potenciais de aplicação de herbicidas. Dentre os componentes da cor, obtidos por espectroscopia de reflectância difusa, o mais eficiente na estimativa do coeficiente de sorção do herbicida imazaquim foi o croma (98% de precisão), seguido pelo matiz (85%) e valor (54%). A cor obtida pela espectroscopia de reflectância difusa foi eficaz na identificação de áreas com diferentes potenciais de sorção do herbicida imazaquim. Estes resultados podem balizar futuros estudos para planejamento estratégico de manejo de herbicidas pré-emergentes em grandes áreas.

Palavras-chave: espectroscopia de reflectância difusa, suscetibilidade magnética, geoestatística, herbicida, pedometria

MAGNETISM AND COLOR IN THE IDENTIFICATION OF SOILS WITH DIFFERENT POTENTIALS OF IMAZAQUIM SORPTION

ABSTRACT - The knowledge of the soil attributes variability is important for the herbicides rational recommendation, contributing to the practice of a more sustainable agriculture. The aim of this study was to evaluate the use of magnetic susceptibility and soil color, obtained by diffuse reflectance spectroscopy, to identify areas with different herbicide sorption potential. For measuring the diffuse reflectance spectroscopy, 86 soil samples were collected every 30m on a transect of 2600m, following the crest of landscape along the area, and more 155 points were collected into a grid of sample density of 1 point per 2.5ha, in the depth 0.00 to 0.25m, totaling 241 soil samples on an experimental area of 380ha. From the soil color components (hue, value and chroma) it was calculated a redness index. We selected 12 points from the transect for carrying out soil mineralogical analysis. For measuring the magnetic susceptibility and the determination of dithionite (Free iron, pedogenic) and oxalate (Amorphous iron, of low crystallinity) iron content, 374 soil samples were collected in the depth 0.00 to 0.25m, into a grid of sample density of 1 point per 2.4ha in another experimental area, which dimension is 908ha. The pH, soil organic matter and soil clay content were determined in all soil sampling points. The Freundlich coefficient for imazaquim herbicide sorption was determined indirectly from the clay content, using the methodology of meta-analysis. Regression models of the magnetic susceptibility and color components with the other soil studied attributes were built. Data were analyzed using descriptive statistics, and the attributes average values were also calculated for each soil class and geological compartments and the Tukey test at 5 % was applied. The spatial dependence analysis of data was performed using geostatistics by the variograms. Spatial pattern maps were also constructed. The results indicate that use of magnetic susceptibility enables the indirect quantification of imazaquim herbicide sorption. Soils with higher magnetic expression have characteristics of increased imazaquim herbicide sorption. The soil magnetic signature can assist in mapping and identifying areas with different potential of herbicides application. Among the components of the color obtained by diffuse reflectance spectroscopy, the more efficient estimate of the herbicide imazaquim sorption coefficient, was chroma (98% accuracy), followed by hue (85%) and by value (54%). The color obtained by diffuse reflectance spectroscopy was effective in identifying areas with different imazaquim herbicide sorption potential. These results can beacon future studies for strategic planning management of pre-emergent herbicides over large areas.

Keywords: diffuse reflectance spectroscopy, magnetic susceptibility, geostatistics, herbicide, pedometrics

CAPÍTULO 1 - Considerações gerais

1.1 Introdução

O crescimento da população mundial remete à necessidade de aumento da produção de alimentos e da demanda de matéria prima de origem agropecuária, para produção dos mais diversos produtos. A expansão das fronteiras agrícolas sem causar danos ao meio ambiente e o aumento de produtividade das culturas são fundamentais para suprir essa demanda crescente, e para isso são necessárias a implantação de novas tecnologias e o aprimoramento dos manejos já adotados.

Os desafios para a agricultura também vem aumentando, devido às mudanças climáticas, intensificação da ocorrência de doenças, e aparecimento de novas pragas e plantas daninhas. Deste modo, é necessário o gerenciamento e o controle destes fatores visando reduzir ao máximo, de maneira sustentável, o impacto de cada um deles na agricultura. O controle químico de plantas daninhas, por exemplo, enfrenta o aparecimento de plantas resistentes às moléculas de herbicidas, e o potencial de poluição do solo e da água por estes produtos fitossanitários. Por ser o produto químico mais usado mundialmente na agricultura (HE et al. 2012), devido sua grande importância para diminuição da matocompetição, favorecendo o aumento da produtividade das culturas, e seu potencial de impacto ambiental (LAPWORTH; GOODDY, 2006), o manejo com herbicidas merece uma atenção específica.

O solo é o destino final das moléculas de herbicidas, independentemente se o produto for aplicado em pós-emergência ou em pré-emergência das plantas daninhas, diretamente no solo (OLIVEIRA; BRIGHENTI, 2011). Logo, entender a dinâmica e o comportamento das moléculas de herbicidas no solo é importante para assegurar uma ação eficiente no controle das plantas daninhas e minimizar as possibilidades de contaminação dos recursos naturais.

No solo, os herbicidas podem sofrer os processos de retenção, lixiviação, volatilização, fotodegradação, decomposição química e microbiológica, transporte como escoamento superficial e de absorção pelas plantas (BAILEY; WHITE, 1970). E, de maneira geral, os atributos do solo como matéria orgânica, pH, a quantidade e

o tipo de argila, e mineralogia influenciam na sorção dos herbicidas (ROCHA et al., 2003).

Estudar a variabilidade espacial dos atributos do solo que influenciam direta e/ou indiretamente na dinâmica dos herbicidas, passa ser essencial para o entendimento mais amplo e ações mais assertivas no manejo de plantas daninhas. No entanto, estudos sobre variabilidade espacial requerem um elevado número de pontos de observação (LEGROS, 2006), o que pode aumentar consideravelmente os custos destes estudos. Diante desta situação, pesquisadores buscam técnicas alternativas como a aplicação de funções de pedotransferência (MCBRATNEY et al., 2002), na estimativa de atributos do solo, a partir de outros atributos medidos com maior facilidade e baixo custo.

A cor e o magnetismo do solo, obtidos, respectivamente, pelas técnicas de espectroscopia de reflectância difusa (ERD) (TORRENT; BARRÓN, 2008) e suscetibilidade magnética (SM) (GRIMLEY; VEPRASKAS, 2000), são atributos de fácil medição que podem ser utilizados em funções de pedotransferência. A utilização da SM e da ERD nos estudos de variabilidade especial dos atributos do solo, pode tanto auxiliar no planejamento agrícola (por exemplo, no manejo de plantas daninhas, a partir da identificação de áreas com diferentes potenciais de sorção de herbicidas), quanto contribuir para a minimização de possíveis riscos ambientais, inerentes à aplicação de substâncias químicas.

Assim como no estudo de variabilidade espacial, o estudo de sorção de moléculas de herbicidas nos solos, principalmente por meio de moléculas radioativamente marcadas (^{14}C), também são muito dispendiosos. Desta forma, a utilização de técnicas alternativas como a meta-análise (LUIZ, 2002), passa a ser interessante e fundamental para viabilizar a realização de trabalhos nessa área do conhecimento.

O conhecimento do processo de sorção de herbicidas nos solos é uma das condições para fazer recomendações seguras desses produtos, tanto do ponto de vista técnico quanto ambiental (LAPWORTH; GOODDY, 2006). Nesse sentido, o objetivo desse estudo foi avaliar a utilização da cor, obtida pela espectroscopia de reflectância difusa, e da suscetibilidade magnética do solo para identificação de áreas com diferentes potenciais de sorção de herbicida.

1.2 Revisão de Literatura

1.2.1 Meta-análise

O Brasil é um país ainda subdesenvolvido, carente em áreas como o saneamento básico, saúde pública e ensino fundamental, e tais áreas tão prioritárias à população competem por verbas com a pesquisa científica. Tal situação aumenta a responsabilidade de pesquisadores brasileiros em realizar uma boa gestão dos recursos financeiros destinados à pesquisa, bem como realizar uma boa gestão e organização estruturada dos resultados obtidos, pois estes podem ser a base da solução para muitos problemas da população e ainda ponto de partida para novos trabalhos, sem haver necessidade de cientistas refazerem o que já foi feito em pesquisas anteriores, otimizando assim tempo e recursos (LUIZ, 2002).

É necessário garantir que os dados gerados durante o processo de descoberta e resultados obtidos por instituições públicas ou em projetos financiados por verba pública sejam disponibilizados à comunidade científica. Esse novo banco de dados pode inspirar diversas iniciativas com os mais variados objetivos e hipóteses, gerando resultados originais ou ao menos tornando as conclusões anteriores mais robustas e gerais (LUIZ, 2002).

A metodologia pela qual um pesquisador adota um novo enfoque ao reunir resultados e conclusões a partir de outros trabalhos de pesquisa, aplicando técnicas quantitativas, é denominada meta-análise (LUIZ, 2002). A aplicação desta metodologia em algumas áreas do conhecimento vem crescendo no cenário internacional, enquanto no Brasil a meta-análise é pouco conhecida, em especial na pesquisa agropecuária.

Várias razões podem justificar o ingresso tardio das ciências agrárias na meta-análise, sendo que algumas delas, mais conceituais, têm origem na estrutura evolutiva da ciência, baseada essencialmente num paradigma cartesiano. Outras resultam de nossa formação educacional, que tem dificuldade em definir e executar planos pedagógicos inter e multidisciplinares. Mas as demandas dos pesquisadores e também dos usuários das tecnologias estão estimulando e forçando o uso de alternativas para metodologias analíticas da literatura que demonstrem visões globais e quantitativas dos resultados experimentais (LOVATTO et al., 2007).

A meta-análise visa extrair informação adicional de dados preexistentes por meio da união de resultados de diversos trabalhos e aplicação de uma ou mais técnicas estatísticas. É um método quantitativo que permite combinar os resultados de estudos realizados de forma independente (geralmente extraídos de trabalhos publicados) e sintetizar as suas conclusões ou mesmo extrair uma nova conclusão (LUIZ, 2002).

O termo meta-análise foi utilizado pela primeira vez no ano de 1976 (FINNEY, 1995), pelo estatístico Gene V. Glass, em um artigo intitulado “Primary, secondary and meta-analysis of research”, na revista *Educational Research*, volume 5. Anteriormente a essa publicação, outros trabalhos já vinham utilizando técnicas estatísticas para reunir ou combinar dados já publicados ou utilizados em outros estudos, no entanto não havia sido mencionado um termo específico para definir esta metodologia (LUIZ, 2002).

Cerca de 40 anos antes da criação do termo meta-análise, Fisher (1935) afirmou que ao realizar testes de probabilidades independentes, um ou nenhum podem ser significativos, mas a associação deles dá a impressão de que as probabilidades são em geral mais baixas que se fossem obtidas por acaso. No entanto, desde 1932, este autor sugeria um método para combinar os valores da probabilidade de significância, revelando o conceito de valores de probabilidade acumulativos. Cochran (1954) realizou os primeiros trabalhos sobre a problemática da combinação dos resultados de vários experimentos independentes, e 5 anos mais tarde, a metodologia proposta em um artigo de Mantel e Haenszel (1959) se tornou um dos principais nessa área. Inúmeros pesquisadores acreditam que isso serviu como base estatística da moderna meta-análise (LOVATTO et al., 2007).

Vários testes estatísticos podem ser utilizados em meta-análises, variando com a natureza dos dados e dos objetivos propostos nos estudos (PEREIRA, 1996). Qualquer área do conhecimento pode aplicar a meta-análise na resolução de problemáticas cujos levantamentos e experimentação científica têm fortes impedimentos práticos ou são muito dispendiosos. Ela pode ser aplicada na resolução de problemas originados das ciências sociais (WOLF, 1986), da medicina (COLLINS et al., 2000), ecologia (BINI et al., 2001) e agricultura (RAIJ, 1998).

A meta-análise, como toda ferramenta não é infalível ou perfeita (WOLF, 1986), mas é uma ferramenta poderosa que permite que pesquisadores tratem simultaneamente e de forma quantitativa, os mais diversos bancos de dados obtidos de maneira independente. A meta-análise possui seu campo de aplicação e deve sim ser utilizada, uma vez que proporciona vantagens claras quanto à relação custo/benefício na pesquisa, sendo de responsabilidade dos pesquisadores conhecerem esta metodologia para aplicá-la da maneira correta e conveniente (LUIZ, 2002).

1.2.2 Comportamento dos herbicidas nos solos

A área de proteção de plantas envolve a aplicação de produtos fitossanitários para controle de pragas, nematoides, doenças e plantas daninhas; e o solo acaba sendo o destino final dos produtos químicos usados no manejo agrônômico, sejam eles aplicados diretamente no solo ou na parte aérea das plantas (OLIVEIRA; BRIGHENTI, 2011). No manejo de plantas daninhas, os herbicidas ao entrarem em contato com o solo, estão sujeitos a processos físico-químicos que regulam seu destino no ambiente. Exemplos destes processos são o transporte pelo escoamento superficial, a decomposição química e microbiológica, a lixiviação, a volatilização, a fotodegradação, a retenção, e a absorção pelas plantas (BAILEY; WHITE, 1970) (Figura 1).

O complexo fenômeno de retenção, por meio dos processos de adsorção e dessorção, influencia direta ou indiretamente a magnitude dos efeitos dos outros fatores. A complexidade dos processos de retenção deve-se primariamente à heterogeneidade físico-química dos solos e suas inter-relações com os sistemas biológicos, atmosféricos e aquáticos. Portanto, um requisito básico para entender os processos de retenção é conhecer a composição do solo (OLIVEIRA; BRIGHENTI, 2011).

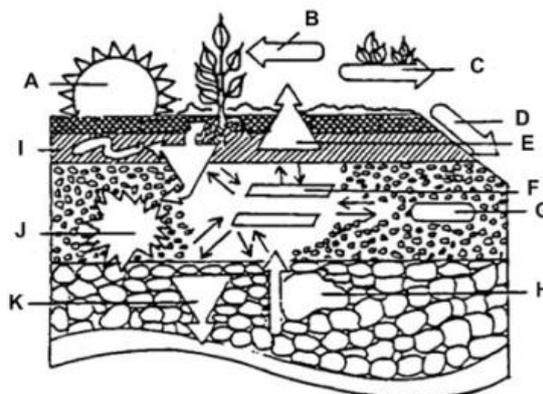


Figura 1. Destino dos pesticidas aplicados na agricultura. A: Fotodegradação; B: Decomposição pelas plantas; C: Remoção pelas plantas; D: "Runoff"; E: Volatilização; F: Adsorção; G: Degradação microbológica; H: Fluxo capilar; I: Absorção; J: Degradação química; K: Lixiviação. Fonte: adaptado de Appleby e Dawson (1994) e Oliveira e Brighenti (2011).

O sistema solo é constituído pelas fases gasosa, líquida e sólida, as quais são representadas basicamente por ar, água, materiais minerais e materiais orgânicos. A fase sólida do solo é amplamente composta de matéria orgânica e minerais presentes nas frações areia, silte e argila, e a taxa de cada um desses determinará as características específicas do solo (Tabela 1). Os Latossolos e Argissolos constituem os grupamentos de solos de maior expressão geográfica no território brasileiro, sendo a caulinita, a gibbsita, a goethita e a hematita, em diferentes proporções, os principais minerais da fração argila que possuem participação efetiva na formação da estrutura destes solos bem como influenciam suas propriedades químicas (INDA JUNIOR; KÄMPF, 2005).

Tabela 1. Área superficial e diâmetro de partículas do solo. Fonte: adaptado de EMBRAPA (1989).

| Tipo de Partícula | Diâmetro (mm) | Área Superficial (cm ² g ⁻¹) |
|-------------------|---------------|---|
| Cascalho | > 2,0 | 11 |
| Areia grossa | 2 - 0,2 | 34 |
| Areia fina | 0,2 - 0,05 | 159 |
| Silte | 0,05 - 0,002 | 454 |
| Argila | < 0,002 | 8.106 |

Um solo de textura média, de acordo com Brady (1974), apresenta como composição ideal para o crescimento das plantas, em torno de 25% de ar, 25% de água, de 1 a 5% de matéria orgânica e 45% de minerais, sendo que cada solo apresentará variações de seus constituintes. Kämpf e Curi (2001) concluíram que a

variabilidade de pedoambientes, condicionando a distribuição de diversos óxidos de ferro, constatada regionalmente, também se verifica ao longo de um perfil do solo, conforme a variação da atividade biológica, teor de matéria orgânica, pH, hidrologia (fluxos verticais e laterais), intemperismo, profundidade do solo, etc. Por exemplo, nos horizontes superficiais, a presença de matéria orgânica, atuando na complexação do ferro, pode impedir a precipitação da ferrihidrita, suprimindo, assim, a formação da hematita e favorecendo a da goethita, enquanto nos horizontes subsuperficiais ocorre hematita, dada a menor influência da matéria orgânica.

De maneira geral, solos com níveis altos de argila e matéria orgânica apresentam melhor estrutura em relação a solos com baixos teores de matéria orgânica e altos teores de areia e silte (WHEELER; RUSH, 2001). Deste modo, as propriedades mineralógicas e físicas dos solos estão relacionadas com suas características químicas, influenciando na dinâmica de retenção de compostos (Tabela 2).

Tabela 2. Algumas propriedades de constituintes do solo com capacidade de adsorção. Fonte: Bailey e White (1970).

| Constituintes do solo | Capacidade de troca catiônica ($\text{cmol}_c \text{ kg}^{-1}$) | Superfície específica ($\text{m}^2 \text{ g}^{-1}$) |
|-----------------------|--|--|
| Matéria orgânica | 200 - 400 | 500 - 800 |
| Vermiculita | 100 - 150 | 600 - 800 |
| Montmorilonita | 80 - 150 | 600 - 800 |
| Ilita | 10 - 40 | 65 - 100 |
| Clorita | 10 - 40 | 25 - 40 |
| Caulinita | 3 - 15 | 7 - 30 |
| Óxidos e Hidróxidos | 2 - 6 | 100 - 800 |

O estudo da interação pesticida-solo, seja utilizando os processos de sorção-dessorção empregando-se o coeficiente de Freundlich, seja por ensaios biológicos, deve ser realizado analisando-se conjuntamente todas as variáveis descritivas do solo, visando conhecer e quantificar o efeito destas variáveis nos processos de interação. Esse tipo de análise permite não apenas conhecer os efeitos isolados de cada propriedade do solo, mas as possíveis interações dos diversos fatores num único modelo, visto que as propriedades do solo são intercorrelacionadas (OLIVEIRA; BRIGHENTI, 2011).

A quantidade sorvida de agroquímicos no solo pode ser ajustada à isoterma de adsorção, aplicando a equação de Freundlich (HASSETT; BANWART, 1989; KOSKINEN; HARPER, 1990):

$$X = K_f C^n \quad [1]$$

em que: X é a quantidade do agroquímico adsorvido ($\mu\text{g g}^{-1}$ solo); C é a concentração de equilíbrio do agroquímico em solução ($\mu\text{g mL}^{-1}$) e K_f e n são constantes para determinado solo. O valor de K_f , coeficiente de sorção de Freundlich, diz respeito à afinidade da molécula com o solo, ou seja, a força de adsorção do agroquímico pelo solo. O valor de n, comumente referido como $1/n$, está relacionado com a linearidade do modelo (SCHWARZENBACH et al., 1992).

Além da retenção, fatores bióticos e abióticos também podem interferir na atividade dos herbicidas sobre as plantas. O conhecimento destes fatores, assim como das características físico-químicas das moléculas de herbicida, como solubilidade em água, pressão de vapor, coeficiente de partição octanol-água (K_{ow}), constante de equilíbrio de ionização do ácido (pK_a) ou da base (pK_b) e meia-vida ($t_{1/2}$), poderão direcionar as ações dos técnicos e produtores no sentido de evitar que fatores ambientais reduzam a eficiência dos produtos (OLIVEIRA; BRIGHENTI, 2011).

As principais características físico-químicas dos herbicidas, relacionadas com seu comportamento são explicadas por Oliveira e Brighenti (2011), da seguinte forma:

- Constante de equilíbrio de ionização do ácido (pK_a) ou da base (pK_b)

Esta constante relaciona-se com a possibilidade de ionização das moléculas em soluções com diferentes valores de pH. As formas ionizadas de herbicidas se comportam diferentemente das não ionizadas (neutras). Conforme a constante de equilíbrio de ionização, os herbicidas podem ser classificados em:

➤ herbicidas ácidos, que são aqueles cujas formas moleculares (neutras) são capazes de doar um próton e formar íons carregados negativamente. Quanto maior for o valor do pK_a do herbicida, mais fraca é a sua força ácida; logo, menor a chance de o herbicida ficar aniônico. Para esses herbicidas, se o pH da solução do solo for igual ao pK_a do herbicida, as concentrações das formas não dissociada (molecular) e dissociada (ionizada, nesse caso, aniônica) são iguais. Se o pH da

solução do solo for menor que o pKa do herbicida, a concentração da forma não dissociada será maior que a da forma dissociada ou aniônica. O herbicida, ficando na forma original (neutra), terá comportamento semelhante às substâncias não iônicas. Por outro lado, se o pH da solução do solo for maior que o pKa do herbicida, a concentração da forma não dissociada (molecular) será menor que a da forma aniônica. Isto ocorre principalmente com uma ou mais unidades de pH acima do valor do pKa do herbicida ácido. O herbicida, ficando na forma aniônica, terá mais chances de ser transportado livremente através da solução do solo, a não ser que ele forme reações de complexação.

➤ herbicidas básicos, que são aqueles cujas formas neutras (moleculares) são capazes de receber prótons e formar íons carregados positivamente. Uma vez que é comum encontrarmos valores de pKa indistintamente para herbicidas ácidos ou básicos, deve-se considerar que a espécie química protonada é um ácido conjugado do herbicida básico. Por isto, será usada a mesma notação (pKa) para os herbicidas básicos, para os quais, quanto maior for o valor de pKa do herbicida (ou menor valor de pKa) mais fraca é a sua força básica, isto é, menor a chance de o herbicida ficar catiônico. Se o pH da solução for igual ao pKa do herbicida, as concentrações das formas não dissociada (molecular ou neutra) e associada (catiônica ou protonada) são iguais. Por outro lado, se o pH da solução do solo for menor que o pKa do herbicida, a concentração da forma catiônica (protonada) será maior do que a da forma neutra. Isto ocorre principalmente com uma ou mais unidades de pH abaixo do valor do pKa do herbicida básico. Nestas condições, o herbicida tem grandes probabilidades de ficar adsorvido aos componentes do solo e não ser transportado para outras partes do ambiente. Mas, se o pH da solução for maior que o pKa do herbicida básico, a concentração da forma neutra será maior que a da forma protonada ou catiônica. Os herbicidas paraquat e diquat (derivados da amônia quaternária) comportam-se como base forte em solução, apresentando-se com carga positiva em solução. São fortemente adsorvidos quando em contato com o solo, com praticamente nenhuma dessorção. Já os herbicidas do grupo das triazinas comportam-se como base fraca em solução.

➤ herbicidas não iônicos, que são aqueles que não doam e nem recebem prótons em solução, permanecendo em sua forma molecular. Metolachlor, trifluralin e EPTC são exemplos de herbicidas não iônicos.

- Coefficiente de partição para o teor de carbono orgânico (Koc)

O Koc reflete a tendência de adsorção do herbicida pelo carbono orgânico do solo. Quanto mais hidrofóbica uma molécula, maior sua tendência de partição da água para a fase orgânica. Quando a ligação hidrofóbica é a principal responsável pela adsorção de determinada molécula orgânica, os valores de Koc serão bem constantes entre diferentes solos.

- Coefficiente de partição octanol-água (Kow)

Este coeficiente refere-se à medida da intensidade da afinidade da molécula pela fase polar (representada pela água) e apolar (representada pelo 1-octanol). É uma medida da lipofilicidade da molécula. Valores de Kow são adimensionais, sendo expressos normalmente na forma logarítmica (log Kow) e são constantes para uma certa molécula, a uma dada temperatura.

- Solubilidade em água

Esta propriedade indica a quantidade máxima de uma molécula que se dissolve em água pura a uma determinada temperatura. A solubilidade em água pode ser considerada como a partição de uma molécula entre ela mesma e a água. Quanto maior a quantidade de grupos hidrofílicos que possuir a substância (mais polar), maior será sua afinidade pela água, logo, maior sua solubilidade. Seu valor é expresso em miligramas do herbicida por litro de água (normalmente, a 25°C).

Alguns grupos de herbicidas, como as imidazolinonas apresentam solubilidade em água variando de acordo com o pH da solução. Isto porque esses herbicidas possuem grupos funcionais ionizáveis em sua estrutura que, de acordo com o pH do meio, podem apresentar-se protonados (forma molecular) ou desprotonados (forma ionizada). Assim, em valores de pH superiores ao seu pKa, as moléculas encontram-se ionizadas, portanto, com maior solubilidade em solventes polares, como a água. Ao contrário, em valores de pH inferiores ao seu pKa,

encontram-se na forma molecular, apresentando maior afinidade por solventes de natureza apolar, como o octanol.

- Pressão de vapor

Trata-se de uma medida da tendência de volatilização no seu estado normal puro (sólido ou líquido). A pressão de vapor é uma função direta da temperatura e não indica em qual taxa o herbicida se volatilizará. A pressão de vapor de um herbicida é importante para avaliar sua distribuição ou transferência no ambiente. É a principal propriedade do herbicida a ser usada no cálculo de sua volatilização e prevê se está entrando na atmosfera em concentrações significantes. A temperatura, a velocidade do vento e as condições do solo de um lugar em particular, assim como as características de adsorção e a solubilidade na água do composto, afetarão a taxa de volatilidade. Compostos com pressão de vapor $< 10^{-8}$ mm Hg estarão primariamente associados ao material particulado, enquanto aqueles com pressão de vapor $> 10^{-4}$ mm Hg se encontrarão na fase de vapor. Compostos com pressão de vapor entre estes dois valores poderão se apresentar nas duas fases.

- Fotodegradação ou degradação fotoquímica

Ocorre devido à absorção de luz pelo herbicida, especialmente a ultravioleta que é mais destrutiva (RADOSEVICH et al., 1997), resultando na excitação de seus elétrons e, por consequência, no rompimento de determinadas ligações nas moléculas. Portanto, a degradação fotoquímica de determinado herbicida ocorrerá somente se houver presença de luz com capacidade de excitar seus elétrons, sendo específica para cada herbicida.

1.2.3 Suscetibilidade magnética e os atributos do solo

Pode-se definir a suscetibilidade magnética (SM) como o grau de magnetização de um material em resposta a um campo magnético aplicado. A SM é resultado da translação e rotação dos elétrons que constituem alguns minerais que estão presentes nos solos, nos sedimentos e nas rochas (LUQUE, 2008). Fatores como clima (MAHER et al., 2003), material de origem (HANESCH et al., 2001),

relevo (JONG et al., 2000), regime hídrico (MAHER, 1998), fauna/flora (DEARING; LEES; WHITE, 1995), erosão, influência antrópica (HANESCH; SCHOLGER, 2005) e tempo (WHITE; WALDEN, 1997), podem afetar a SM.

Desta maneira, a SM é sensível às variações dos fatores e processos de formação do solo, e pode ser expressa nas propriedades cristalográficas dos minerais presentes nos sedimentos e no solo (MAHER; THOMPSON 1999). Uma vez que esses fatores e processos são específicos para cada local, a SM mostra-se uma promissora ferramenta no mapeamento destes locais (SIQUEIRA, 2010c), bem como na quantificação indireta de propriedades físicas, químicas e mineralógicas do solo (SIQUEIRA et al., 2010a), principalmente nos solos tropicais.

Cinco tipos básicos de comportamento magnético podem ser considerados: diamagnetismo, paramagnetismo, ferromagnetismo, ferrimagnetismo e antiferromagnetismo. Nos minerais diamagnéticos os átomos que compõem a cela unitária do mineral possuem as camadas eletrônicas preenchidas. Assim, o número de spins eletrônicos alinhados numa direção é igual ao número de spins eletrônicos na direção oposta. O campo magnético externo não exerce influência sobre os spins nesse caso, mas inverte o movimento orbital dos elétrons (exemplo: quartzo) (SANTOS, 2010). Nos minerais paramagnéticos, as camadas eletrônicas estão incompletas. A presença de um campo magnético externo faz com que os spins se alinhem e, mesmo após a retirada do campo magnético, alguns spins permanecem alinhados (exemplo: olivina) (SANTOS, 2010).

Quanto aos minerais ferromagnéticos, esses são considerados um caso especial de paramagnetismo. Após a retirada do campo magnético, os spins permanecem alinhados, fazendo com que o mineral possua um grande valor de magnetização remanescente (exemplo: ferro e cobalto). Nos minerais ferrimagnéticos os spins não estão emparelhados e assim prevalece o momento magnético do maior número de spins no mesmo sentido (exemplo: magnetita). Por fim, os minerais antiferromagnéticos não apresentam propriedades magnéticas (SIQUEIRA, 2010c).

Pode-se dizer que as propriedades magnéticas dos minerais do solo dependem essencialmente do teor Fe, pois esse é o elemento mais abundante dentre os elementos magnéticos da crosta terrestre (COEY, 1987). Os minerais

magnéticos mais importantes nos solos são a magnetita (Fe_3O_4), presente na fração silte e areia fina, e a maghemita ($\gamma\text{-Fe}_3\text{O}_4$), presente na fração argila. Quando estes conferem baixa expressão magnética aos solos, o comportamento magnético do solo passa a ser expresso pela hematita ($\alpha\text{-Fe}_3\text{O}_4$) e pela goethita, ambos presentes na fração argila (MULLINS et al., 1977).

A SM do solo pode ser utilizada em estudos sobre a identificação da poluição do solo (LECOANET; L'EVÊQUE; AMBROSI, 2001), investigação de climas pretéritos registrados por paleossolos (MAHER et al., 2003), identificação de limites mais precisos entre diferentes compartimentos do relevo (MATIAS, 2010), delineamento de áreas de solos hidromórficos (GRIMLEY; ARRUDA; BRAMSTEDT, 2004) e delimitação de áreas de manejo específico na agricultura (SIQUEIRA, 2010c).

O mapeamento da SM também vem se destacando como um dos métodos mais utilizados para fins ambientais (GRIMLEY et al., 2004). Porém, segundo Becegato e Ferreira, (2005), no Brasil as pesquisas geofísicas em solos agrícolas ainda são muito incipientes. As propriedades magnéticas já foram utilizadas, nas décadas de 60 e 70, nos primeiros levantamentos de solos do estado de São Paulo, mas, com fins qualitativos, unicamente para distinguir solos provenientes de diferentes materiais de origem.

Atualmente a SM já pode ser utilizada como ferramenta alternativa na quantificação indireta dos atributos do solo. No entanto, o desenvolvimento de funções de pedotransferência, que podem ser definidas como modelos matemáticos utilizados para fazer estimativas de atributos dos solos, a partir de outros atributos medidos com maior facilidade e baixo custo (MCBRATNEY et al., 2002), é uma tarefa difícil para aplicações em locais diferentes dos que elas foram desenvolvidas. Não se recomenda a utilização de funções de pedotransferência para além da região geomórfica, tipo de solo ou área de manejo específico, a partir da qual foi desenvolvida (McBRATNEY et al., 2002). Desta maneira, é importante a realização de estudos com o objetivo de investigar a correlação espacial da SM com atributos do solo em diferentes locais.

1.2.4 Espectroscopia de reflectância difusa e os atributos do solo

A espectroscopia de reflectância difusa (ERD) é o resultado de múltiplos processos de absorção e dispersão da luz, em todas as direções, que se produzem sobre a superfície dos componentes do solo, sendo a cor do solo resultante da capacidade dos pigmentos para absorver mais a luz de determinados comprimentos de onda em relação a outros (TORRENT; BARRÓN 2008).

Esta técnica consiste na aquisição quali-quantitativa de dados por meio da transmissão ou absorção da energia radiante incidente em uma amostra. As energias dos diferentes comprimentos de onda do espectro são absorvidas pelas moléculas e com base na Lei de Beer-Lambert é feita análise quali-quantitativa da amostra. Então, os resultados quantitativos, sofrem um tratamento matemático e novas amostras são estimadas a partir do modelo criado (TORRENT; BARRÓN 2008).

Visando aumentar o número de pontos coletados, sem elevação dos custos e tempo de análise, Viscarra Rossel; McBratney (2008), utilizaram a ERD na quantificação indireta de atributos do solo. A EDR, quando utilizada em conjunto com técnicas estatísticas e geoestatísticas, pode ser uma alternativa interessante para reforçar os métodos convencionais de análise do solo, por ser rápida, menos dispendiosa, não destrutiva, simples e, por vezes, mais precisa do que análises convencionais (TITTONEL et al., 2008).

O potencial de uso da ERD tem sido comprovado em diversos trabalhos mediante o uso de dados espectrais na faixa do visível (VIS), infravermelho próximo (NIR), infravermelho médio (MIR) e combinando espectros, de forma eficiente para estimativa dos teores de areia, silte, argila, carbono orgânico e estudos pedológicos (VISCARRA ROSSEL et al., 2006; BEN-DOR et al., 2008b; DU et al., 2008).

A forte relação entre a cor dos solos e os óxidos de Fe pode fornecer informações muito úteis em diversas áreas da pedologia, além de permitir a identificação ou mesmo a quantificação destes minerais (FERNANDES et al., 2004). Barrón (1985) relataram a existência de antigos índices de avermelhamento (IAV), e Torrent, Schwertmann e Schulze (1980) comprovaram a utilidade do IAV, baseados na notação Munsell, para predizer o conteúdo de hematita em solos espanhóis.

Outro IAV foi utilizado com sucesso para estimar a concentração de hematita em solos do Brasil (MADEIRA et al., 1997).

Esses índices são baseados em coordenadas de sistemas de notação de cores (CAMPOS, DEMATTÊ E QUARTAROLI, 2003), como o sistema Munsell e os espaços de cores propostos pela CIE (Commission Internationale de l'Éclairage, 1931), como o XYZ e o L*a*b*, estabelecidos em 1976 (McLAREN, 1976). Ben-Dor, Heller e Chudnovsky (2008a) desenvolveram um sistema óptico, adaptado a um espectrômetro, com a finalidade de realizar a classificação de solos de forma mais rápida, econômica e precisa. Com este sistema encontraram que o número de amostras a ser enviadas ao laboratório, pode diminuir consideravelmente, sendo conveniente identificar claramente a transição entre um e outro perfil do solo.

Trabalhos demonstraram que o espectro de reflectância difusa fornece informações sobre os atributos mineralógicos, físicos e químicos do solo, indicando o potencial desta técnica na quantificação indireta desses atributos (VISCARRA ROSSEL et al., 2006; DU; LINKER; SHAVIV, 2008). Todavia, são necessárias informações adicionais que elucidem com mais exatidão a aplicabilidade dessas novas técnicas de mapeamento da variabilidade. Segundo Sousa Junior, Demattê e Genu (2008), esse tipo de informação é de extrema importância, visto que parte da variabilidade da produção agrícola está associada, dentre outros fatores, com os atributos do solo.

1.3 Referências

APPLEBY, A.P.; DAWSON, J.H. Microbial and non-microbial breakdown of herbicides in soil. In: **Intensive course on the activity, selectivity, behavior, and fate of herbicides in plants and soils**. West Lafayette, USA: Purdue University, Departments of Horticulture, Agronomy, Botany and Plant Pathology, and Forestry and Natural Resources, 1994. p. 446-462.

BAILEY, G.W.; WHITE, J.L.; Factors influencing the adsorption, desorption and movement of pesticides in soil. In: **Residue Review, The Triazines Herbicides**. New York, USA: Springer Verlag, 1970. p. 29-92, v. 32.

BARRÓN, V. **Influencia de los óxidos de hierro en el color de los suelos**. Córdoba, Universidade de Córdoba, 1985. 200p. (Tese de Doutorado)

BECEGATO, V. A.; FERREIRA, F. J. F. Gamaespectrometria, resistividade elétrica e susceptibilidade magnética de solos agrícolas no noroeste do estado do Paraná. **Revista Brasileira de Geofísica**, São Paulo v. 23, n. 4, p. 371-405, 2005.

BEN-DOR, E.; HELLER, D.; CHUDNOVSKY, A. A novel method of classifying soil profiles in the field using optical means. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 72, n. 4, p. 1113-1123, 2008a.

BEN-DOR, E.; TAYLOR, R. G.; HILL, J.; DEMATTE, J. A. M.; WHITING, M. L.; CHABRILLAT, S.; SOMMER S., Imaging spectrometry for soil applications. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 97, p. 321-392, 2008b.

BINI, L. M.; COELHO, A. S. G.; DINIZ-FILHO, J. A. F. Is the relationship between population density and body size consistent across independent studies? A meta-analytical approach. **Revista Brasileira de Biologia**, São Carlos, v. 61, n. 1, p. 1-6, 2001.

BRADY, N.C. **Natureza e Propriedades dos Solos**. New York. McMillan. 1974.

CAMPOS, R. C.; DEMATTÊ, J. A. M.; QUARTAROLI, C. Determinação indireta do teor de hematita no solo a partir de dados de colorimetria e radiometria. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 4, p. 521-528, 2003.

COCHRAN, W. G. The combination of estimates from different experiments. **Biometrics**, v.10, p.101-129, 1954.

COEY, J. M. D. Magnetic properties of iron in soil iron oxides and clay minerals. In: STUCKI, J.W., GOODMAN, B. A.; SCHWERTMANN, U. (Ed.). **Iron in soils and clay minerals**. Dordrecht: Reidel Publishing Corporation, 1987. p. 217, 397-466.

COLLINS, A.; ENNIS, S.; TAPPER, W.; MORTON, N. E. Mapping oligogenes for atopy and asthma by meta-analysis. **Genetics and Molecular Biology**, Ribeirão Preto, v. 23, n. 1, p. 1-10, 2000.

DEARING, J. A., LEES, J. A.; WHITE, C. Mineral magnetic properties of acid gleyed soils under oak and Corsican pine, **Geoderma**, n. 68, v. 68, p. 309–319. 1995.

DU, C.; LINKER, R.; SHAVIV, A. Identification of agricultural Mediterranean soils using mid-infrared photoacoustic spectroscopy. **Geoderma**, Amsterdam, v. 143, n. 1, p. 85-90, 2008.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Normas e Critérios para levantamentos Pedológicos**. Rio de Janeiro, RJ: Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos, 1989. 94 p.

FERNANDES, R. B. A.; BARRÓN, V.; TORRENT, J. FONTES, M. P. F. Quantificação de óxidos de ferro de latossolos brasileiros por espectroscopia de refletância difusa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 245-257, 2004.

FINNEY, D. A statistician at meta-analysis. **Journal of Clinical Epidemiology**, New Haven, v. 48, n. 1, p. 87-103, 1995.

FISHER, R. A. **The design of experiments**. Edinbrough: Oliver and Boyd, 1935. 260p.

GRIMLEY, D. A.; VEPRASKAS, M. J. Magnetic Susceptibility for Use in Delineating Hydric Soils. Madison, **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 6, p. 2174-2180, 2000.

GRIMLEY, D.A.; ARRUDA, N.K.; BRAMSTEDT, M.W. Using magnetic susceptibility to facilitate more rapid, reproducible and precise delineation of hydric soils in the midwestern USA. **Catena**. v.58, p.183–213, 2004.

HANESCH, M., SCHOLGER, R.; DEKKERS, M. J. The application of fuzzy c –means cluster analysis and non-linear mapping to a soil data set for the detection of polluted sites, **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 26, p. 885–891. 2001.

HANESCH, M. & SCHOLGER, R. The influence of soil type on the magnetic susceptibility measured throughout soil profiles. **Geophysical Journal International**, Oxford, v.161, n.1, p.50–56, 2005.

HASSETT, J.J.; BANWART, W.L. The sorption of nonpolar organics by soils and sediments. In: SAWHNEY, B.L.; BROWN, K. (Eds.), **Reactions and movement of organic chemicals in soils**. Madison, EUA: Soil Science Society of America, 1989. v. 22, p. 31-44.

HE, H.; YU, J.; CHEN, G.; LI, W.; HE, J.; LI, H. Acute toxicity of butachlor and atrazine to freshwater green alga *Scenedesmus obliquus* and cladoceran *Daphnia carinata*. **Ecotoxicology and Environmental Safety Journal**, v. 80, p. 91-96, 2012a.

INDA JUNIOR, A.V.; KÄMPF, N. Variabilidade de goethita e hematita via dissolução redutiva em solos de região tropical e subtropical. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 6, p. 851-866, 2005.

JONG, E.; PENNOCK, D. J.; NESTOR, P. A. Magnetic susceptibility of soils in different slope positions in Saskatchewan, Canada, **Catena**, Amsterdam, v. 40, n. 3, p. 291-305, 2000.

KÄMPF, N.; CURTI, N. Óxidos de ferro: indicadores de ambientes pedogênicos e geoquímicos. In: Novais, R.F.; Alvarez, V.H.; Schaefer, C.E.G.R. **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: SBCS, 2001. v. 1 p. 107-138.

KOSKINEN, W.C.; HARPER, S.S. The retention process: mechanisms. In: CHENG, H.H. (Ed.), **Pesticides in the soil environment: processes, impacts, and modeling**. Madison, EUA: Soil Science Society of America, 1990. p. 51-77.

LAPWORTH, D. J.; GOODDY, D. C. Source and persistence of pesticides in a semi-confined chalk aquifer of southeast England. **Environmental Pollution**, v. 144, n. 3, p. 1031-1044, 2006.

LECOANET, H., L'ÉVÊQUE, F.; AMBROSI, J. P. Magnetic properties of saltmarsh soils contaminated by iron industry emissions (southeast France), **Journal of Applied Geophysics**. v. 48, p. 67–81. 2001.

LEGROS, J. P. **Mapping of the Soil**. Enfield, Jersey, Plymouth: Science Publishers. 411 pp. 2006.

LOVATTO, P.A.; LEHNEN, C.R.; ANDRETTA, I.; CARVALHO, A.D.; HAUSCHILD, L. Meta-análise em pesquisas científicas - enfoque em metodologias. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v.36, p.285-294, 2007.

LUIZ, A. J. B. Meta-análise: definição, aplicações e sinergia com dados espaciais. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, v.19, n. 3, p.407-428, 2002.

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

MADEIRA, J.; BÉDIDI, A. & CERVELLE, B. Visible spectrometric indices of hematite (Hm) and goethite (Gt) content in lateritic soils: the application of a Thematic Mapper (TM) image for soil-mapping in Brasilia, Brazil. **International Journal of Remote Sensing**, v. 18, p. 2835-2852, 1997.

MAHER, B. A. Magnetic properties of modern soils and Quaternary loessic paleosols: paleoclimatic implications, **palaeogeography. palaeoclimatology. palaeoecology**. v. 137, n. 30, p. 25–54, 1998.

MAHER, B. A.; ALEKSEEV, A.; ALEKSEEVA, T. Magnetic mineralogy of soils across the Russian Steppe: climatic dependence of pedogenic magnetite formation, **Palaeogeography. palaeoclimatology. Palaeoecology**. v. 201, p. 321– 341, 2003.

MAHER, B. A.; ALEKSEEV, A.; ALEKSEEVA, T. Magnetic mineralogy of soils across the Russian Steppe: climatic dependence of pedogenic magnetite formation, **Palaeogeography. palaeoclimatology. Palaeoecology**. v. 201, p. 321– 341, 2003.

MAHER, B. A.; THOMPSON, R. The magnetic record of palaeoclimate in the terrestrial loess and palaeosol sequences, in Quaternary Climates. In: **Environments and Magnetism** (eds MAHER, B.A. & THOMPSON, R.). University Press, Cambridge, p. 81–125, 1999.

MANTEL, N.; HAENSZEL, W. M. Statistical aspects of the analysis of data from retrospective studies of disease. **Journal of the National Cancer Institute**, v.22, p.719-748, 1959.

MATIAS, S. S. R. **Suscetibilidade magnética e sua associação com atributos do solo e do relevo em uma topossequência de latossolos**. 2010. 111f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2010.

McBRATNEY, A.; MYNASNY, B.; STEPHEN R. CATTLE, R. WILLEM VERVOORT. From pedotransfer functions to soil inference systems. **Geoderma**, Amsterdam. v. 109, p. 41-73. 2002.

McLAREN, K. The development of the CIE 1976 (L*a*b*) uniform colour-space and colour-difference formula. **Journal of the Society of Dyers and Colourists**, v. 92, p. 338-341, 1976.

MULLINS, B. A. Magnetic susceptibility of the soil and its significance in soil science - a review. **Journal of Soil Science**, v.28, p.223-246, 1977.

OLIVEIRA, M. F.; BRIGHENTI, A. M.; Comportamento de herbicidas no ambiente. In: OLIVEIRA JR., R. S.; CONSTANTIN, J.; INOUE, M. H. (eds.) **Biologia e Manejo de Plantas Daninhas**. Curitiba. Ompipax, 2011. p. 263-304. ISBN 978-85-64619-02-9

PEREIRA, M. C. A. **Elementos de meta-análise**. 1996. 65 p. Dissertação (Mestrado) – Departamento de Estatística, Universidade de Brasília, Brasília.

RADOSEVICH, S.; HOLT, J.; GHERSA, C. **Weed Ecology: implications for management**. 2ª edição. New York, EUA: John Wiley & Sons, 1997. 589 p.

RAIJ, B. van. Bioavailable tests: alternatives to standard soil extractions. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 29, n. 11-14, p.1553-1570, 1998.

ROCHA, W. S. D.; ALLEONI, L. R. F.; REGITANO, J. B. Energia livre da sorção de imazaquim em solos ácidos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, p.239-246, 2003.

SANTOS, H. L. **Variabilidade espacial dos atributos do solo, erosão e suscetibilidade magnética de uma vertente em Gilbués-PI**. 2010. 74 f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2010.

SCHWARZENBACH, R.P.; GSCHWEND, P.M.; IMBODEN, D.M. **Environmental organic chemistry**. New York, EUA: John Wiley & Sons, 1992. 657 p.

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. **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, Jaboticabal, 2010c.

SOUSA JUNIOR, J. A.; DEMATTE, J. A. M.; GENU, A. M. Comportamento espectral dos solos na paisagem a partir de dados coletados por sensores terrestre e orbital. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 2 p. 727-738, 2008.

TITTONELL, P.; SHEPHERD, K. D.; VANLAUWE, B.; GILLER, K. E. Unravelling the effects of soil and crop management on maize productivity in smallholder agricultural systems of western Kenya - an application of classification and regression tree analysis. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 123, n. 1-3, p. 137–150, 2008.

TORRENT, J.; BARRÓN, V. Diffuse Reflectance Spectroscopy. In: Ulery, A.L.; DREES, L. R. (Eds.), **Methods of Soil Analysis**. Part 5. Mineralogical Methods, SSSA Book Series, vol. no. 5. Soil Science Society of American, pp. 367–387, 2008.

TORRENT, J.; SCHWERTMANN, U.; SCHULZE, D. G. Iron oxide mineralogy of some soils of two river terrace sequences in Spain. **Geoderma**, v. 23, p. 191-208, 1980.

VISCARRA ROSSEL R.A.; MCBRATNEY A.B. Diffuse reflectance spectroscopy as a tool for digital soil mapping. In: HARTEMINK A.E, MCBRATNEY A.B and MENDONÇA-SANTOS L. Eds. Amsterdam, Springer, **Digital soil mapping with limited data**. p. 381-396, 2008.

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.

WHEELER, T.; RUSH, C.M. Soilborne diseases. In: MALOY, O.C.; MURRAY, T.D. (Eds.) **Encyclopedia of Plant Pathology**. New York. JohnWiley & Sons. 2001. p.935-947.

WHITE, K.; WALDEN, J. The rate of iron oxide enrichment in arid zone alluvial fan soils, Tunisian southern atlas, measured by mineral magnetic techniques, **Catena**, v. 30, 215- 227. 1997.

WOLF, F. M. **Meta-analysis: quantitative methods for research synthesis**. Newbury Park, CA: Sage, 1986. 65p. (Series, 07-059).

CAPÍTULO 2 - Assinatura magnética do solo para identificação de áreas com diferentes potenciais de sorção de imazaquim

RESUMO - É imprescindível que o aumento da produção agrícola mundial seja realizado de forma sustentável, minimizando efeitos ambientais negativos causados, dentre outros motivos, pelo uso de herbicidas. Objetivou-se com este estudo avaliar o potencial de uso da assinatura magnética do solo para identificação de áreas com diferentes capacidades de sorção do herbicida imazaquim. Para determinação da matéria orgânica, pH, teores de ferro ditionito e oxalato, teor de argila, cálculo do coeficiente de Freundlich para sorção do herbicida imazaquim e da medição da suscetibilidade magnética, foram coletadas 374 amostras de solo na profundidade de 0,00 - 0,25 m, numa malha com densidade amostral de 1 ponto a cada 2,4 ha, na área experimental de 908 ha. Foi realizada análise estatística descritiva, análise de correlação de Pearson entre os atributos estudados e foi construído modelo de regressão para estimar o coeficiente de sorção do herbicida a partir da suscetibilidade magnética. A fim de verificar diferença estatística entre os valores médios dos atributos estudados, conforme as classes de solo e classes magnéticas da área experimental, foi aplicado o teste de Tukey a 5%. Foi feita análise da dependência espacial dos dados, por meio da geoestatística, e construídos mapas de padrão espacial e variogramas cruzados, no sentido de averiguar a correlação espacial entre a suscetibilidade magnética e os atributos estudados. Os resultados indicaram que o uso da suscetibilidade magnética possibilita a quantificação indireta da sorção do herbicida imazaquim. Solos com maior expressão magnética apresentam características de maior sorção do herbicida imazaquim. A assinatura magnética dos solos pode auxiliar no mapeamento e na identificação de áreas com diferentes potenciais de aplicação de herbicidas.

Palavras-chave: geoestatística, pedotransferência, herbicida, suscetibilidade magnética

2.1 Introdução

Aumentar a produção de alimentos a fim de atender às necessidades de segurança alimentar é um grande desafio desde o início da Revolução Verde, e que hoje continua incitando cientistas agrícolas, ainda mais considerando que a população segue crescendo em muitos países em desenvolvimento. No entanto, é imprescindível que esse aumento da produção agrícola seja realizado de forma sustentável, minimizando efeitos ambientais negativos (HOBBS, 2007).

Estratégias de uso e ocupação do solo devem levar em conta a preservação do ar, do solo e da água, baseado em atividades relacionadas à economia de baixo carbono (LEAL et al., 2015), práticas conservacionistas, como o revolvimento mínimo do solo (IAMAGUTI et al., 2015) e o manejo racional de insumos agrícolas, dentre eles os resíduos da agroindústria (PELUCO et al., 2013), fertilizantes e corretivos do solo (CAMARGO et al., 2015; MARQUES JR et al., 2015), inseticidas (MASUTTI; MERMUT, 2007) e, principalmente, herbicidas (KEMPENAAR; LOTZ, 2004).

Os herbicidas podem ser elencados dentre os insumos mais aplicados na agricultura mundial, sendo considerados por alguns autores como o insumo agrícola mais amplamente utilizado de longa data, tanto em termos de volumes quanto de áreas tratadas (CONACHER; CONACHER, 1986; FREEMARK; BOUTIN, 1995).

A aplicação de herbicidas pode ser realizada tanto em pré quanto em pós-emergência das plantas daninhas, alvos do controle. As moléculas dos herbicidas quando aplicadas no solo apresentam reações químicas de sorção e dessorção, variando com as características físicas e químicas da própria molécula e com as características químicas, físicas e mineralógicas do solo, que vão ser determinantes, ou para a ação eficiente do herbicida, ou para riscos de contaminação ambiental (HERWIG et al., 2001; LAPWORTH; GOODDY, 2006).

A retenção de um determinado pesticida em solos depende da intensidade da sua adsorção à fase sólida do solo, de processos de absorção (feita por micro-organismos, plantas e a própria matriz do solo) e precipitação do composto no solo (KOSKINEN; HARPER, 1990). Os mesmos autores utilizam o termo sorção como um termo geral que abrange todos os processos de retenção; isso se justifica pelo

fato de ser muito difícil estabelecer a distinção entre processos de adsorção, absorção e precipitação, dada a diversidade de classes de solo e sua heterogeneidade. Todavia, a adsorção é considerada a principal forma de retenção e sua intensidade depende do tipo de interação existente entre o adsorvato e o adsorvente.

Uma vez que estudos envolvendo a sorção de herbicidas nos solos, principalmente por meio de moléculas radioativamente marcadas (^{14}C), são muito dispendiosos, atingindo valores de US\$ 15.000,00 por molécula radioativamente marcada e mais US\$ 5.000,00 para o teste de sorção por amostra de solo, a utilização da meta-análise apresenta-se como alternativa interessante para viabilizar a realização de estudos nessa área do conhecimento.

A meta-análise visa extrair informação adicional de dados preexistentes através da união de resultados de diversos trabalhos e aplicação de uma ou mais técnicas estatísticas. É um método quantitativo que permite combinar os resultados de estudos realizados de forma independente (geralmente extraídos de trabalhos publicados) e sintetizar as suas conclusões ou mesmo extrair uma nova conclusão (LUIZ, 2002).

O imazaquim, conforme Barizon et al. (2005), é um herbicida sistêmico, pré-emergente, pertencente ao grupo químico das imidazolinonas, sendo considerado uma molécula anfótera, que possui como grupos funcionais um ácido carboxílico e uma piridina (MANGELS, 1991), utilizado no controle de um amplo espectro de dicotiledôneas e algumas monocotiledôneas na cultura da soja (BHALLA et al., 1991).

Embora o uso do imazaquim, que é recomendado para aplicação em pré-emergência, tenha diminuído em função do uso da soja transgênica, resistente ao glifosato, que permite a aplicação em pós-emergência desta molécula, existe uma tendência de retomada do uso do imazaquim, devido ao fato de várias plantas daninhas estarem desenvolvendo resistência ao glifosato (FERNANDO et al., 2016).

O comportamento das imidazolinonas no solo, de acordo com Oliveira et al. (2004), é fortemente afetado pela textura (LOUX et al., 1989), pela mineralogia (FERREIRA et al., 2002), pelos teores de carbono orgânico (CHE et al., 1992), pelo pH (LOUX; REESE, 1992) e retenção de água pelo solo (GOETZ et al., 1986), sendo

que a eficiência no controle de plantas daninhas e a mobilidade deste herbicida geralmente aumentam com a diminuição da sorção pelos colóides do solo.

A variabilidade espacial das características químicas, físicas e mineralógicas do solo podem ocasionar uma retenção diferencial dos herbicidas, causando variação na disponibilidade do imazaquim na solução do solo (OLIVEIRA et al., 2004), acarretando uma possível variabilidade do potencial de lixiviação dos herbicidas (OLIVEIRA JUNIOR et al., 1999) e do controle das plantas daninhas (GERSTL, 2000).

A geoestatística é uma importante ferramenta no estudo da variabilidade espacial dos atributos do solo (McBRATNEY et al., 2003), que pode auxiliar no planejamento agrícola e no uso racional e sustentável de herbicidas, possibilitando o melhor entendimento da dinâmica do imazaquim no solo. No entanto estudos geoestatísticos demandam elevado número de amostras, gerando aumento dos custos e do tempo dispendidos com amostragem de solo e análises laboratoriais.

A utilização de funções de pedotransferência (McBRATNEY et al., 2002), estimando atributos dos solos a partir de outros atributos medidos com maior facilidade e baixo custo, por meio de modelos matemáticos, torna-se interessante. Nesse contexto novas abordagens e protocolos de mapeamento de atributos dos solos têm sido propostos para região tropical utilizando a assinatura magnética via a suscetibilidade magnética (SM) (SIQUEIRA et al., 2015).

A SM pode ser definida como a medida da facilidade com que um material magnetiza na presença de campo magnético. Essa propriedade depende das concentrações e características (estrutura do cristal, composição, tamanho, morfologia e domínio) dos minerais magnéticos presentes na rocha ou no solo (VEROSUB; ROBERT, 1995), que podem ser considerados como micro-marcadores de atributos do solo. Deste modo, correlações entre a SM e atributos do solo podem ser estabelecidas (MATHÉ et al., 2006).

Sendo a suscetibilidade magnética (SM) um atributo com tais características de facilidade de medição e baixo custo, e que é covariativa de atributos mineralógicos, físicos e químicos do solo (GRIMLEY; VEPRASKAS, 2000; ROYAL, 2001; HANESCH; SCHOLGER, 2005), os mesmos que influenciam no processo de

sorção do herbicida imazaquim, a utilização do magnetismo pode auxiliar no estudo do comportamento deste herbicida nos solos.

Com este trabalho objetivou-se avaliar o potencial de uso da assinatura magnética do solo para identificação de áreas com diferentes capacidades de sorção do herbicida imazaquim.

2.2 Material e Métodos

2.2.1 Descrição da área de amostragem

A área de estudo, escolhida devido grande variação das classes de solos e transição geológica arenito-basalto, está localizada no município de Guatapar-SP, Brasil (Figura 1a). As coordenadas geográficas centrais da área são 2128'45"S e 4801'01"O, com altitude variando de 519 m a 649 m. Inserida na província geomorfológica do Planalto Ocidental Paulista, próxima ao limite das Cuestas Basálticas no divisor litoestratigráfico arenito-basáltico. O clima da região experimental, de acordo com Thornthwaite (1948), pode ser definido como B1rB'4a', Tipo Mesotérmico mido, com pequena deficiência hídrica, sendo a evapotranspirao de verão menor que 48% da evapotranspirao anual.

A vegetao natural local era constituída por floresta tropical subcaducifólia. Atualmente, a área  cultivada com cana-de-aocar sob sistema de colheita mecanizada de cana crua há mais de 15 anos, com sistema de rotao de culturas, com plantio de soja, no período de renovao do canavial.

Uma malha de amostragem regular contendo 374 pontos separados por distâncias mínimas variando de 142 m a 174 m foi instalada na área experimental de 908 ha (Figura 1b). A densidade amostral resultante (0,4 amostra/ha) está de acordo com o indicado pelos Procedimentos Normativos de levantamentos pedológicos (EMBRAPA, 1995). Sob cada ponto da malha amostral foram coletadas amostras na profundidade de 0,00-0,25m para a determinao da suscetibilidade magnética (SM), teores de argila, matéria orgânica (MO), ferro ditionito (Fed), ferro oxalato (Feo), potencial hidrogeniônico do solo (pH) e Coeficiente de Freundlich para soro do herbicida imazaquim (K_f).

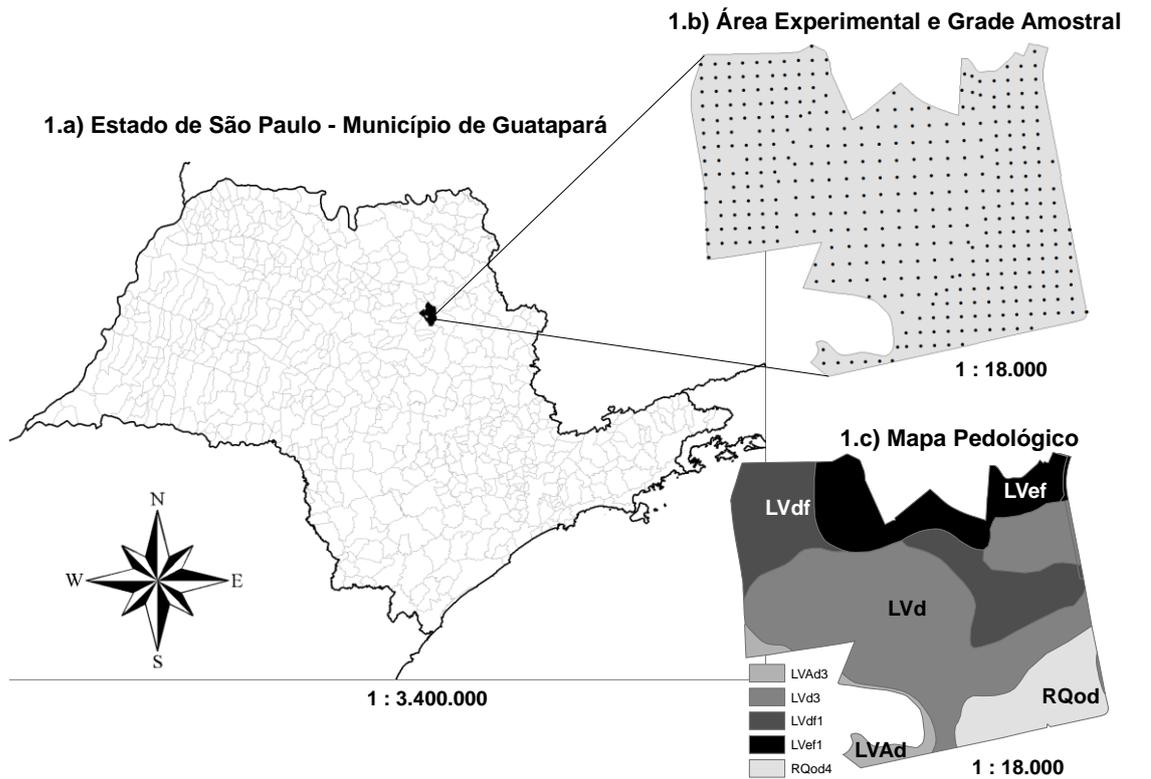


Figura 1. Mapa de localização da área experimental (1.a), grade amostral (1.b) e mapa pedológico (1.c). RQ_{od4}, Neossolo Quartzarênico Órtico Distrófico, textura arenosa; LVA_{d3}, Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura média; LV_{d3}, Latossolo Vermelho Distrófico, textura média; LV_{df1}, Latossolo Vermelho Distroférico, textura argilosa; LV_{ef1}, Latossolo Vermelho Eutroférico, textura argilosa.

O mapa pedológico (escala 1:12000) gerado pelo Centro de Tecnologia Canaveira (CTC) (Figura 1c) registra a ocorrência das seguintes unidades de mapeamento: Latossolo Vermelho Amarelo distrófico textura média (LVA_{d3}); Latossolo Vermelho distrófico textura média (LV_{d3}); Latossolo Vermelho distroférico textura argilosa (LV_{df1}); Latossolo Vermelho eutroférico textura argilosa (LV_{ef1}); e Neossolo Quartzarênico órtico distrófico textura arenosa (RQ_{od4}) (EMBRAPA, 2006).

2.2.2 Análises laboratoriais

A suscetibilidade magnética (SM) em baixa frequência (0,47 kHz) foi determinada em 10 g de terra fina seca ao ar utilizando o equipamento Bartington

MS2, acoplado ao sensor Bartington MS2B (Bartington Instruments Ltd., Oxford, Inglaterra) (DEARING, 1994).

O teor 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 determinação dos atributos químicos do solo, potencial hidrogeniônico (pH) e matéria orgânica (MO), de acordo com Raij et al. (2001). A determinação dos teores de ferro relativo à totalidade dos óxidos de ferro pedogenéticos extraídos por ditionito-citrato-bicarbonato (Fed) seguiu a metodologia de Mehra; Jackson (1960). A determinação dos teores de ferro extraídos por oxalato de amônio (Feo) relativos aos óxidos de ferro pedogenéticos de baixa cristalinidade seguiu a metodologia citada por Camargo et al. (1986) adaptado de Schwertmann (1973).

2.2.3 Meta-análise

Para obtenção do potencial de sorção das moléculas do imazaquim ao solo, utilizou-se a metodologia da meta-análise. Foi utilizada a base de dados SciELO - Scientific Electronic Library Online, realizando uma busca pela palavra chave imazaquim; sendo encontrados 51 trabalhos, dos quais foram filtrados os que estudaram a relação de atributos do solo com a sorção deste herbicida e, por fim, foram selecionados três trabalhos: Regitano et al.(2001), Barizon et al. (2005) e Oliveira et al. (2006), que apresentaram 23 solos estudados com tipo e amplitude dos teores de argila semelhantes aos da área experimental.

Estes três trabalhos apresentaram estudo de isotermas de sorção, sendo utilizados solos com diferentes teores de argila e concentrações do imazaquim, com sua molécula radioativamente marcada no grupo carboxílico com isótopo radioativo ¹⁴C, e os resultados de sorção foram ajustados à equação de Freundlich (GREEN; KARICKHOFF, 1990), sendo então obtido o coeficiente de Freundlich para sorção do herbicida imazaquim (K_f).

Após a organização do banco de dados foi construído um modelo matemático a partir da análise de regressão entre o teor de argila com o K_f , sendo que do total

dos 23 solos encontrados na meta-análise, 13 foram utilizados para geração do modelo matemático ($\text{Argila}_{\text{meta-análise}} \times K_f$) e 10 para a validação do modelo (K_f modelo $\times K_f$ laboratório) (Figura 2 a,b).

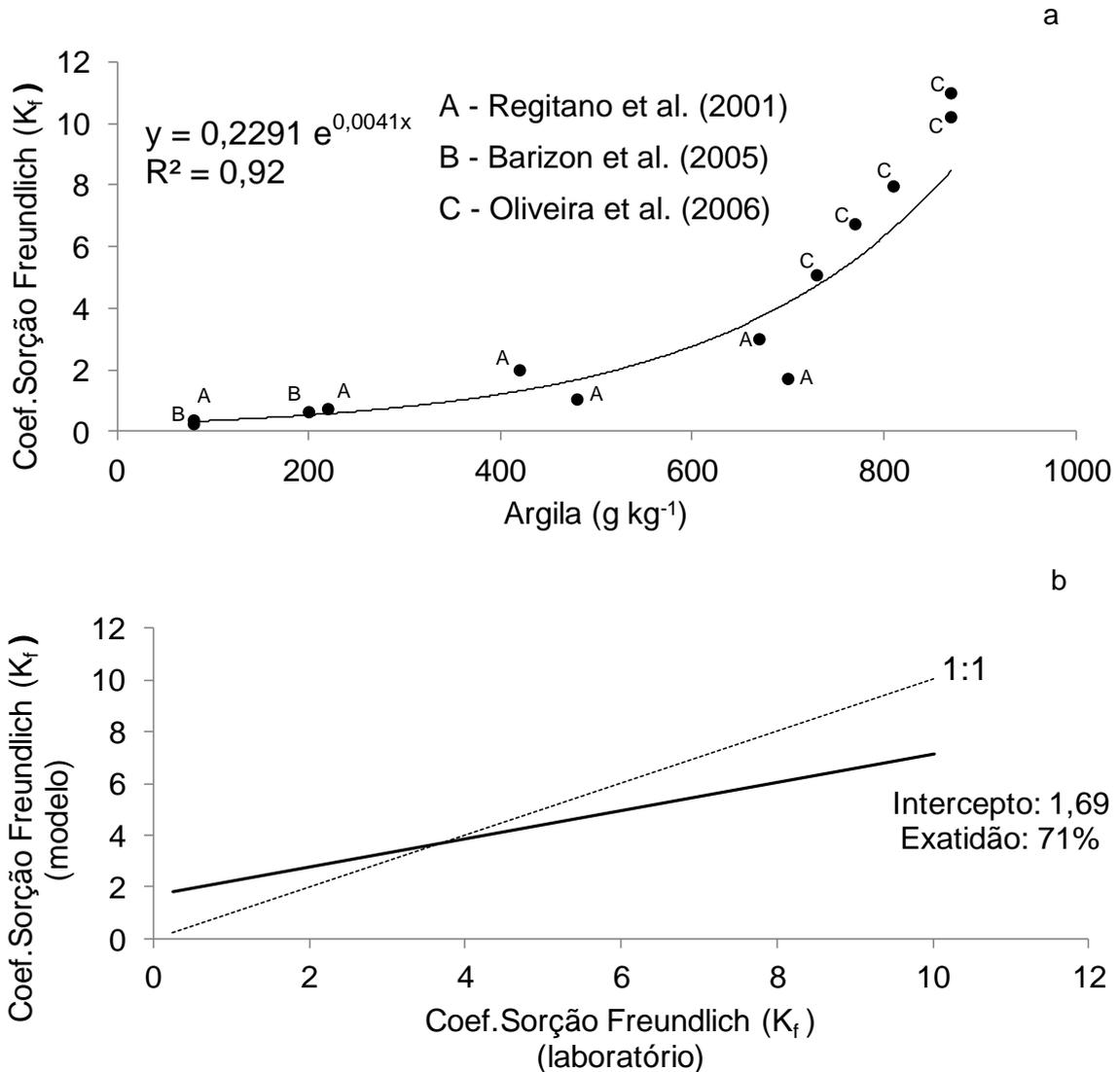


Figura 2. Modelo matemático e gráfico de regressão, entre o coeficiente de Freundlich para sorção do herbicida imazaquim e o teor de argila (a). Modelo de validação dos dados (b).

Após a obtenção do modelo matemático que estima o K_f , a partir dos teores de argila da meta-análise, o modelo foi aplicado e foram calculados os valores de K_f , utilizando os teores de argila observados em cada um dos 374 pontos da área experimental.

2.2.4 Análise dos dados

2.2.4.1 Estatística descritiva

Os dados foram analisados pela estatística descritiva, obtendo-se os valores de média, mediana, coeficiente de variação, máximo, mínimo, assimetria e curtose. Foi realizada a análise de correlação de Pearson, a fim de verificar a direção e grau de correlação linear entre os atributos estudados.

Após visitas ao campo, observações *in loco* do solo, análise dos mapas pedológicos, e com base no trabalho de Siqueira et al. (2015), realizado neste mesmo local, com o objetivo de identificar áreas de paisagem com diferentes padrões de variabilidade utilizando um protocolo estatístico com dados de susceptibilidade magnética, teor de ferro total, mineralogia e cor do solo, foram escolhidos 8 pontos da grade amostral, de forma a representarem a variação dos atributos na área do experimento. A partir desses pontos foi construído um modelo de regressão linear simples entre a SM e o K_f , por meio da utilização do software estatístico Minitab, versão 13.1 (MINITAB, 2000). A SM foi utilizada para obtenção da função de pedotransferência, por meio do modelo de regressão obtido, para estimar o K_f , para cada ponto amostral ($K_{f \text{ estimado}}$).

A dose recomendada pelos fabricantes do herbicida imazaquim na formulação Concentrado Solúvel - SL, é de 1 L p.c. ha⁻¹, sem variações de dose, independentemente das características dos solos (Em todas as formulações dos produtos comerciais desta molécula, a dose do ingrediente ativo recomendada pelos fabricantes é sempre fixa, para todos os tipos de solos). Considerando a dose convencional do imazaquim, formulação SL, (1L p.c. ha⁻¹) para o valor médio do K_f (1,2) e $K_{f \text{ estimado}}$ (1,1) de toda área experimental, foi calculado, por regra de três, nova dose do herbicida, de acordo com o K_f e $K_{f \text{ estimado}}$ para cada ponto da grade amostral, obtendo doses conforme o potencial de sorção do solo.

Com base no mapa pedológico da área experimental, a partir dos pontos amostrais contidos em cada classe de solo, foram calculados os valores médios dos atributos estudados e também da dose convencional recomendada pelo fabricante do herbicida imazaquim, das doses recomendadas com base no K_f e $K_{f \text{ estimado}}$, e dos

consumos do herbicida. Os valores médios entre as classes pedológicas foram comparados pelo teste de Tukey, a 5%.

Com base no mapa de padrão espacial da SM, foram geradas 5 classes magnéticas (baixa, média-baixa, média, média-alta, e alta), aplicando a técnica dos quantis, medida separatriz que corresponde a uma proporção acumulada dos valores. A partir dos pontos amostrais contidos em cada classe magnética, foram calculados os valores médios do K_f , $K_{f \text{ estimado}}$, da dose convencional recomendada pelo fabricante do herbicida imazaquim, das doses recomendadas com base no K_f e $K_{f \text{ estimado}}$ e dos consumos do herbicida imazaquim. Os valores médios foram comparados, entre as classes magnéticas e entre os métodos de recomendação (convencional, K_f e $K_{f \text{ estimado}}$), pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade.

2.2.4.2 Geoestatística

A análise da dependência espacial dos dados foi feita por meio da geoestatística (VIEIRA et al., 1983), utilizando-se os variogramas que foram estimados com base nas pressuposições de estacionariedade da hipótese intrínseca. Os variogramas foram modelados com o auxílio do software GS+ - Geostatistics for Environmental Sciences (ROBERTSON, 1998) e os modelos matemáticos ajustados aos variogramas experimentais, a partir dos quais foi determinado o grau de dependência espacial de cada atributo estudado.

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 as propriedades em que foi identificada a presença de tendência, 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).

Os valores interpolados por meio da krigagem foram usados para construção de mapas de padrão espacial dos atributos estudados por meio do software Surfer (1999). As correlações espaciais da SM com os atributos estudados foram avaliadas por variogramas cruzados. Também foi avaliada, por meio do variograma cruzado, a correlação espacial entre o K_f e o $K_{f \text{ estimado}}$.

Os variogramas experimentais foram escolhidos com base no número de pares envolvidos no cálculo da semivariância dos primeiros lags, presença de patamar claramente definido, valor do R^2 para o modelo ajustado e validação cruzada, coeficiente linear e angular da regressão entre valores observados e estimados, e soma de quadrado dos resíduos (SQR) obtidos para o ajuste do modelo.

2.3 Resultados e Discussão

A comparação inicial entre os atributos estudados e verificação da heterogeneidade dos dados pode ser realizada por meio do coeficiente de variação (CV) (SOUZA et al., 2007), o qual é classificado, de acordo com Warrick; Nielsen (1980), em alto ($CV \geq 24\%$), moderado ($12\% < CV < 24\%$), e baixo ($CV \leq 12\%$). Com exceção do pH que se enquadra na classe baixa, todos os atributos estudados se enquadram na classe alta (Tabela 1).

Tabela 1. Estatística descritiva para os atributos dos solos estudados.

| Variável | Média | Mediana | CV (%) | Mínimo | Máximo | Assimetria | Curtose |
|----------------------------|--------|---------|--------|--------|--------|------------|---------|
| SM ($10^{-8}m^3kg^{-1}$) | 2429 | 1503 | 87,15 | 14 | 7458 | 0,57 | -0,98 |
| K_f | 1,21 | 0,82 | 70,72 | 0,28 | 3,96 | 0,89 | -0,22 |
| Argila ($g Kg^{-1}$) | 343,51 | 312,25 | 51,28 | 49 | 695 | 0,12 | -1,28 |
| MO ($g dm^{-3}$) | 24,97 | 25 | 27,57 | 11,81 | 50 | 0,30 | -0,39 |
| pH | 5,30 | 5,20 | 9,33 | 4,20 | 6,80 | 0,49 | -0,26 |
| Fed ($g Kg^{-1}$) | 55,75 | 43,52 | 73,11 | 1,99 | 184,75 | 0,62 | -0,42 |
| Feo ($g Kg^{-1}$) | 2,14 | 2,01 | 69,11 | 0,04 | 7,44 | 0,48 | -0,11 |

CV, Coeficiente de variação; SM, suscetibilidade magnética; K_f , Coeficiente de Freundlich para sorção do herbicida imazaquim; MO, teor de Matéria Orgânica do solo; Fed, Teor de ferro ditionito; Feo, Teor de ferro oxalato.

O menor CV, em relação aos atributos estudados, e menor diferença entre os valores de mínimo e máximo foram registrados para o pH do solo. Souza et al. (2004) estudando a variabilidade do pH em Latossolo também verificaram um baixo CV para esta variável. Resultados semelhantes foram encontrados por Silveira et al. (2000), Carvalho et al. (2002), Carvalho et al. (2003) e Silva et al. (2003). O pH é um importante atributo que influencia tanto a sorção quanto a atividade das moléculas de herbicida, porque afeta as características iônicas do solo, da matéria orgânica e da argila (OLIVEIRA et al., 2006).

A SM apresenta o maior CV e a maior amplitude dos dados, o que pode estar relacionado à variação dos materiais de origem dos solos presentes na área experimental. Isto reflete a grande sensibilidade deste atributo aos processos do solo que variam continuamente na paisagem, fato que, segundo Mathé et al. (2006), possibilita o uso da SM como micro indicadora das condições do solo. Todos os atributos apresentaram valores de assimetria e curtose próximos a zero e valores próximos das médias e medianas, caracterizando distribuição simétrica dos dados e mostrando-se adequados para a aplicação das técnicas geoestatísticas (WARRICK; NIELSEN, 1980).

Avaliando a matriz de correlação de Pearson (Tabela 2), verifica-se que todos os atributos apresentam correlação a 1%. A correlação mensura a direção e o grau da relação linear entre duas variáveis quantitativas (MOORE, 2007).

Tabela 2. Matriz de correlação de Pearson (r), entre os atributos estudados.

| | SM | Fed | Feo | Argila | MO | pH |
|----------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
| Fed | 0,922 ** | | | | | |
| Feo | 0,855 ** | 0,847 ** | | | | |
| Argila | 0,905 ** | 0,9 ** | 0,851 ** | | | |
| MO | 0,729 ** | 0,759 ** | 0,726 ** | 0,783 ** | | |
| pH | -0,357 ** | -0,359 ** | -0,291 ** | -0,414 ** | -0,228 ** | |
| K _f | 0,903 ** | 0,886 ** | 0,824 ** | 0,958 ** | 0,703 ** | -0,383 ** |

SM, suscetibilidade magnética; K_f, Coeficiente de Freundlich para sorção do herbicida imazaquim; MO, teor de Matéria Orgânica do solo; pH, Potencial hidrogeniônico; Fed, Teor de ferro ditionito; Feo, Teor de ferro oxalato; **, Significativo ao nível de 1% de probabilidade.

A SM apresentou, em ordem decrescente de coeficiente de correlação de Pearson (r), correlação com o teor de Fed, teor de argila, K_f, teor de Feo, teor de MO e, por último, com o pH do solo, sendo esta última correlação negativa.

As leituras de ferro ditionito (Ferro livre, pedogenético) expressam indiretamente a quantidade de minerais mais cristalizados formados grande parte na fase sólida do solo, especialmente hematita (antiferrimagnética), maghemita e ferridrita (ferrimagnética). As leituras de ferro oxalato (Ferro amorfo, de baixa cristalinidade), por sua vez, expressam indiretamente a quantidade de minerais mal cristalizados formados grande parte das vezes na solução do solo, especialmente goethita e ferridrita não magnética (antiferrimagnéticas) (BARRÓN; TORRENT,

2013). Assim, pode-se considerar que o Fed expressa indiretamente a quantidade de minerais pedogenéticos.

Correlações significativas da SM com atributos químicos e físicos dos solos também foram encontradas por Hanesch; Scholger (2005). A MO favorece aumento da SM, pois proporciona condições para a redução do ferro no solo, uma vez que, oxidações sucessivas de Fe^{2+} em Fe^{3+} , possibilitam a transformação de magnetita em hematita, cuja expressão magnética nos solos é menor (SANTANA et al., 2001). A expressão magnética também é menor em solos com menor teor de argila e maior teor de areia, pois solos mais argilosos favorecem a oxidação da magnetita em maghemita, enquanto na fração areia a magnetita é oxidada diretamente em hematita, óxido de ferro com menor SM que a maghemita (FONTES et al., 2000).

Os valores do coeficiente de correlação de Pearson (r) para o K_f , no presente estudo, foram maiores para os atributos físicos e mineralógicos (Argila, Fed e Feo, respectivamente) do que para os atributos químicos (MO e pH), sendo a correlação com o pH do solo negativa e com os demais atributos positiva. Regitano et al. (1997, 2001), Oliveira (1998), Ferreira et al. (2002) e Oliveira et al. (2004) também verificaram resultados similares para a sorção do imazaquim em solos brasileiros. O segundo maior valor de r para o K_f foi encontrado com a SM do solo, sendo uma correlação positiva ($r=0,903$).

Em trabalhos desenvolvidos sobre a sorção do imazaquim em solos de clima temperado, Loux et al. (1989) e Regitano et al. (1997) encontraram que o pH e teor de carbono orgânico foram os principais atributos responsáveis pela sorção deste herbicida. No entanto esses mesmos autores afirmaram que em solos de clima tropical, as condições edafoclimáticas favorecem a formação de minerais de argila do tipo 1:1 e óxidos de Fe e Al, que podem exercer grande influencia na sorção do imazaquim.

Em geral, o comportamento das imidazolinonas no solo é fortemente afetado pela textura do solo, teor de matéria orgânica (REGITANO et al., 2001), pH (OLIVEIRA JÚNIOR et al., 2001; REGITANO et al., 2001), e mineralogia (REGITANO et al., 1997; ROCHA et al., 2003). Como a SM também é covariativa destes atributos (FONTES et al., 2000), existe a possibilidade da utilização da SM como componente da função de pedotransferência para a quantificação indireta da

sorção do imazaquim. Alternativa que se mostra muito interessante, uma vez que estudos envolvendo a sorção de herbicidas nos solos, principalmente por meio de moléculas radioativamente marcadas (^{14}C), são muito dispendiosos.

Após a realização da estimativa do Coeficiente de Freundlich para sorção do herbicida imazaquim em função da SM (K_f estimado), a partir do modelo de regressão obtido (Figura 3), foram calculados os valores médios dos atributos estudados para cada classe de solo da área do experimento (Tabela 3).

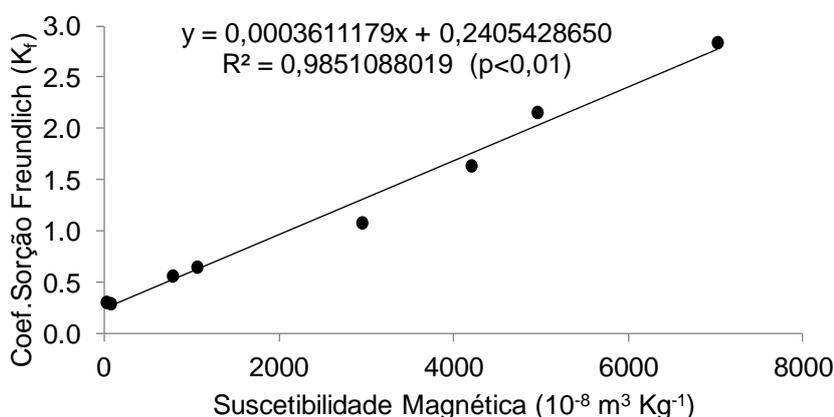


Figura 3. Análise de regressão linear simples entre o coeficiente de Freundlich para sorção do herbicida imazaquim e a Suscetibilidade Magnética.

O LVef1 apresentou os maiores valores para todos os atributos estudados, com exceção do pH do solo, cujos os valores mais elevados foram encontrados no RQod4, apresentando diferenças significativas pelo teste de Tukey a 5% (Tabela 3).

A SM, K_f estimado, Fed, e Feo apresentaram a mesma variação entre as classes de solo, só não apresentando diferença significativa entre os solos RQod4 e LVAd3. O K_f apresentou variação semelhante aos atributos anteriores, mas com o LVAd3 não diferindo dos solos LVd3 e RQod4. As médias dos valores da argila e MO também apresentaram as mesmas diferenciações entre as classes pedológicas, não diferindo entre os solos de textura média.

A sorção do imazaquim, seguindo a classificação proposta por Koskinen; Harper, (1990) pode ser considerada de baixa a moderada, pois tanto o K_f quanto o K_f estimado apresentaram valores médios entre 0,0 e 3,0 (KOSKINEN; HARPER, 1990). Os maiores valores médios do K_f e K_f estimado foram encontrados no LVef1, solo onde se verificaram os maiores teores de MO, ferro, argila, SM e menor valor de pH.

De acordo com Barizon et al. (2005), o imazaquim é um herbicida de natureza anfótera com dois grupos funcionais ionizáveis: um grupo carboxílico (ácido, $pK_a=3,8$) e um grupo quinolina (básico, $pK_a=2,0$) (STOUGAARD et al., 1990). Nos valores de pH dos solos utilizados neste experimento (variando de 4,2 a 6,8), a maioria das moléculas do imazaquim apresenta-se predominantemente na forma aniônica, sendo repelidas pelos sítios com cargas negativas dominantes na superfície destes solos intemperizados, contribuindo para uma redução na sorção.

Tabela 3. Médias dos atributos estudados por classe de solo⁽¹⁾.

| Solo | SM $10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$ | K_f | $K_f \text{ est}$ | Argila g Kg^{-1} | MO g dm^{-3} | pH | Fed ----- g Kg^{-1} ----- | Feo |
|--------|---|--------|-------------------|------------------------------|--------------------------|--------|---------------------------------------|-------|
| RQod4 | 192d | 0,36d | 0,31d | 110,2d | 16,13d | 5,71a | 9,71d | 0,22d |
| LVAAd3 | 424d | 0,73cd | 0,39d | 276,9c | 23,79c | 5,28bc | 20,27d | 0,85d |
| LVd3 | 1833c | 1,03c | 0,90c | 311,3c | 23,31c | 5,27b | 45,94c | 1,96c |
| LVdf1 | 3647b | 1,51b | 1,56b | 436,8b | 29,44b | 5,30b | 80,14b | 2,89b |
| LVEf1 | 4810a | 2,15a | 1,98a | 528,8a | 31,62a | 5,03c | 98,93a | 3,59a |

⁽¹⁾ Médias seguidas de letras iguais, na coluna, não diferem pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade. RQod4, Neossolo Quartzarenico Ortico Distrófico, textura arenosa; LVAAd3, Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura média; LVd3, Latossolo Vermelho Distrófico, textura média; LVdf1, Latossolo Vermelho Distroférico, textura argilosa; LVEf1, Latossolo Vermelho Eutroférico, textura argilosa; SM, suscetibilidade magnética; K_f , Coeficiente de Freundlich para sorção do herbicida imazaquim; $K_f \text{ est}$, Coeficiente de Freundlich para sorção do herbicida imazaquim estimado em função da Suscetibilidade Magnética; MO, teor de Matéria Orgânica do solo; Fed, Teor de ferro ditionito; Feo, Teor de ferro oxalato.

A repulsão causada pelas forças eletrostáticas não pode ser considerada o único mecanismo envolvido na baixa sorção do imazaquim em solos (BARIZON et al., 2005). A baixa afinidade do imazaquim com a matriz do solo pode estar relacionada também com a redução de sua hidrofobicidade (REDDY; LOCKE, 1996). Isto se deve ao aumento da solubilidade em água do imazaquim, em razão da grande quantidade de moléculas dissociadas ($pH_{\text{solo}} > pK_a \text{ imazaquim}$). O aumento da solubilidade em água diminui a hidrofobicidade e, com isso, a capacidade de sorção do imazaquim nos colóides orgânicos do solo.

A sorção do imazaquim depende da especiação da molécula (REGITANO et al., 2001), sendo influenciada tanto por interações hidrofóbicas com a matéria orgânica do solo, quanto por interações não-hidrofóbicas com a fração mineral do solo (REGITANO et al., 1997). Em solos com baixo teor de MO, a fração mineral não se apresenta recoberta pelo húmus do solo, mas sim por minerais acessórios, que

podem contribuir com a sorção de moléculas ionogênicas orgânicas (STEVENSON, 1976; KHAN et al., 1979; HASSET et al., 1981; BASKARAN et al., 1996; REGITANO et al., 1997). Goetz et al. (1986) e Rocha et al. (2002) encontraram que os óxidos de Fe e Al (hematita e gibbsita) e a caulinita foram as principais frações do solo responsáveis pela sorção do imazaquim em solos com baixo teor de MO.

De acordo com Oliveira et al. (2004), como o pH no ponto de carga zero (pH PCZ) desses minerais varia de 6 a 8,5 (PARKS; BRUYN, 1962), nos valores de pH abaixo do pH PCZ, tais minerais apresentam formação de cargas positivas, tendo influência na sorção de herbicidas ácidos fracos (SHEA, 1986), sobretudo se o pH é igual ou superior ao pKa do herbicida. No entanto, nas amostras com maiores valores de pH, a grande maioria das moléculas do imazaquim apresentam-se com carga negativa e, portanto, a sorção pode ocorrer por sítios carregados positivamente na superfície dos minerais de argila (ROCHA et al., 2002).

Os valores médios de K_f e $K_{f \text{ estimado}}$ apresentaram variação entre as classes de solo, com sorção em torno de 6 vezes (K_f : 5,9 vezes; e $K_{f \text{ estimado}}$: 6,4 vezes) superior no LVef1 em relação ao RQod4 (Tabela 4). No entanto, a recomendação do herbicida imazaquim realizada pelo fabricante é de 1L p.c. ha⁻¹, sem variações, independentemente das características dos solos.

Considerando a dose do herbicida imazaquim recomendada pelo fabricante (1L p.c. ha⁻¹) para o valor da média geral de todos os pontos da área experimental do K_f (1,2) e $K_{f \text{ estimado}}$ (1,1), é possível simular o quanto a dose de imazaquim poderia se alterar em função da variação da sorção deste herbicida dentre as classes pedológicas, conforme os valores médios de K_f e $K_{f \text{ estimado}}$, para cada solo (Tabela 4).

Tabela 4. Médias dos valores de K_f , $K_{f \text{ estimado}}$, dose convencional, doses recomendadas com base no K_f e $K_{f \text{ estimado}}$ ⁽¹⁾, e consumo do herbicida Imazaquim por classes de solo.

| Solo | Área (ha) | Dose _{conv} (L ha ⁻¹) | Consumo _{conv} (L) | K_f | Dose _{K_f} (L ha ⁻¹) | Consumo _{K_f} (L) | $K_{f \text{ est}}$ | Dose _{$K_{f \text{ est}}$} (L ha ⁻¹) | Consumo _{$K_{f \text{ est}}$} (L) |
|--------|--------------|---|--------------------------------|-------|---|--|---------------------|---|--|
| RQod4 | 105 | 1,00a | 105,00 | 0,36 | 0,30b | 31,73 | 0,31 | 0,28b | 29,12 |
| LVAAd3 | 33 | 1,00a | 33,00 | 0,73 | 0,60b | 19,87 | 0,39 | 0,35c | 11,62 |
| LVd3 | 434 | 1,00a | 434,00 | 1,03 | 0,86ab | 371,07 | 0,90 | 0,81b | 350,37 |
| LVdf1 | 198 | 1,00b | 198,00 | 1,51 | 1,25a | 247,64 | 1,56 | 1,39a | 275,85 |
| LVef1 | 138 | 1,00b | 138,00 | 2,15 | 1,79a | 246,36 | 1,98 | 1,77a | 244,12 |
| Total | 908 | | 908,00 | | | 916,66 | | | 911,08 |

⁽¹⁾ Médias seguidas de letras iguais, na linha, não diferem pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade; RQod4, Neossolo Quartzarenico Ortico Distrófico, textura arenosa; LVAAd3, Latossolo Vermelho-Amarelo distrófico, textura media; LVd3, Latossolo Vermelho Distrófico, textura media; LVdf1, Latossolo Vermelho Distroferrico, textura argilosa; LVef1, Latossolo Vermelho Eutroferrico, textura argilosa; SM, suscetibilidade magnética; K_f , Coeficiente de Freundlich para sorção do herbicida imazaquim; $K_{f \text{ est}}$, Coeficiente de Freundlich para sorção do herbicida imazaquim estimado em função da Suscetibilidade Magnética; Dose_{conv}, Dose convencional recomendada pelo fabricante do herbicida; Dose _{K_f} , Dose calculada com base no K_f ; Dose _{$K_{f \text{ est}}$} , Dose calculada com base no $K_{f \text{ estimado}}$; Consumo_{conv}, Consumo em litros do herbicida imazaquim, obtido com base na dose convencional recomendada e área de aplicação; Consumo _{K_f} , Consumo em litros do herbicida imazaquim, obtido com base na dose recomendada calculada a partir do K_f e área de aplicação; Consumo _{$K_{f \text{ est}}$} , Consumo em litros do herbicida imazaquim, obtido com base na dose recomendada calculada a partir do $K_{f \text{ estimado}}$ e área de aplicação.

Comparando o consumo total do herbicida para a área do experimento, pelo método convencional, recomendado pelo fabricante, com os calculados com base no K_f e $K_{f \text{ estimado}}$, por classe de solo, verifica-se um incremento de 0,95% (8,7L) e 0,34% (3,1L), respectivamente (Tabela 4). Embora os valores sejam relativamente pequenos, considerar o potencial de sorção de cada solo pode apresentar diferença em relação à recomendação convencional, que pode significar uma ação mais eficiente do herbicida no controle de plantas daninhas. Tal fato pode ser ainda mais evidente na comparação entre os métodos de recomendação dentro das classes de solo.

Para o Neossolo Quartzarenico textura arenosa, houve diferença significativa a nível de 5% de probabilidade, entre a recomendação convencional e as recomendações com base no K_f e $K_{f \text{ estimado}}$. Neste caso, a aplicação da dose de 1 L ha^{-1} se mostra superior ao coeficiente de sorção do solo, gerando um custo e consumo de produto mais elevados, além de gerar riscos de contaminação ambiental pela lixiviação do produto. Caso similar é observado para o Latossolo Vermelho-Amarelo textura média, em que a dose convencional se mostra superior ao coeficiente de sorção para este solo. Ainda nesta classe pedológica, a dose calculada com base no K_f se mostrou superior e significativamente diferente da dose calculada com base no $K_{f \text{ estimado}}$.

O conhecimento do processo de sorção de herbicidas nos solos é uma das condições para fazer recomendações seguras do ponto de vista técnico e ambiental desses compostos. Entre os produtos fitossanitários, os herbicidas são os mais frequentemente encontrados em águas superficiais e subsuperficiais (LAPWORTH; GODDY, 2006).

Para o Latossolo Vermelho distrófico textura média, a dose convencional foi superior ao poder de sorção e significativamente diferente da dose calculada com base no K_f estimado. Já a dose calculada com base no K_f não diferiu significativamente das doses obtidas com os outros dois métodos.

Os solos argilosos (LVdf1 e LVef1) apresentaram padrão diferente, com as doses calculadas com base no K_f e $K_{f \text{ estimado}}$ superiores e significativamente diferentes da dose convencional, que nesse caso se apresenta mais baixa em relação ao valor médio do coeficiente de Freundlich para sorção do imazaquim, e

com possibilidade de ser ineficiente para o controle das plantas daninhas, pelo fato da sorção das moléculas do herbicida ao solo.

A interação solo-herbicida altera a disponibilidade do produto na solução do solo e é governada pelos processos de retenção desses compostos. O processo de sorção de herbicidas no solo influencia sua absorção pelas raízes das plantas e também os processos de dissipação, como degradação biológica, volatilização, lixiviação e transporte por erosão hídrica (HERWIG et al., 2001).

A recomendação das doses conforme as classes de solo pode levar ao uso mais eficiente do herbicida imazaquim, no entanto as classes pedológicas não são homogêneas (MONTANARI et al., 2005), apresentando variabilidade dos atributos que interferem na sorção de moléculas de herbicida. Desta maneira, a aplicação de técnicas geoestatísticas pode auxiliar na melhor compreensão da variabilidade e dos limites de campo (McBRATNEY et al., 2003), garantindo uma racionalização mais efetiva na recomendação do herbicida.

Com intuito de verificar a dependência espacial, foram gerados variogramas experimentais para SM, argila, Fed, Feo, pH, MO, K_f , $K_{f \text{ estimado}}$ e doses recomendadas a partir do K_f e $K_{f \text{ estimado}}$ (Tabela 5).

Tabela 5. Geoestatística para os atributos dos solos estudados (Variogramas).

| Variável | Modelo | Efeito Pepita | Patamar | Alcance | GDE ⁽¹⁾ | R ² |
|---|-------------|---------------|--------------|---------|--------------------|----------------|
| | | (C0) | (C0+C1) | (m) | (%) | |
| SM ($10^{-8} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$) | Esférico | 85000,0000 | 1831000,0000 | 1060 | 4,64 | 0,971 |
| Argila (g Kg^{-1}) | Esférico | 1790,0000 | 14720,0000 | 1430 | 12,16 | 0,982 |
| Fed (g Kg^{-1}) | Gaussiano | 265,0000 | 738,3000 | 880 | 35,89 | 0,981 |
| Feo (g Kg^{-1}) | Exponencial | 0,1760 | 0,9400 | 1359 | 18,72 | 0,984 |
| MO (g dm^{-3}) | Exponencial | 4,0300 | 20,4300 | 792 | 19,73 | 0,971 |
| pH | Exponencial | 0,1198 | 0,2406 | 1629 | 49,79 | 0,954 |
| K_f | Exponencial | 0,0230 | 0,3880 | 1350 | 5,93 | 0,956 |
| $K_{f \text{ est}}$ | Esférico | 0,0147 | 0,2394 | 1098 | 6,14 | 0,974 |
| Dose K_f (L ha^{-1}) | Esférico | 0,0020 | 0,6070 | 2135 | 0,33 | 0,964 |
| Dose $K_{f \text{ est}}$ (L ha^{-1}) | Esférico | 0,0010 | 0,5740 | 2181 | 0,17 | 0,976 |

⁽¹⁾ GDE, grau de dependência espacial $[(C0 / (C0 + C1))] \times 100$; SM, suscetibilidade magnética; Fed, ferro ditionito; Feo, ferro oxalato; MO, matéria orgânica; K_f , Coeficiente de Freundlich para sorção do herbicida imazaquim; $K_{f \text{ est}}$, Coeficiente de Freundlich para sorção do herbicida imazaquim estimado em função da Suscetibilidade Magnética; Dose K_f , Dose calculada com base no K_f ; Dose $K_{f \text{ est}}$, Dose calculada com base no $K_{f \text{ estimado}}$.

Verificou-se dependência espacial para todos os atributos avaliados e os modelos que apresentaram melhores ajustes à estrutura da variabilidade espacial dos dados, com base no número de pares envolvidos no cálculo da semivariância

dos primeiros lags, presença de patamar claramente definido, valor de R^2 para o modelo ajustado próximo a 1 e validação cruzada (BURROUGH; McDONNEL, 1998), foram o gaussiano, o exponencial e o esférico.

Estudos sobre modelos de ajuste aos variogramas para atributos do solo, indicam os modelos exponencial e esférico como os mais encontrados (MCBRATNEY; WEBSTER, 1986), sendo este último modelo considerado o mais adequado para descrever a variação de atributos do solo (CAMBARDELLA et al., 1994). No presente trabalho, a SM, o teor de argila, o K_f estimado e as doses de imazaquim calculadas com base no K_f e K_f estimado apresentaram melhor ajuste ao modelo esférico. Marques Junior et al. (2014), estudando a variabilidade espacial de atributos químicos e físicos do solo na região sudeste do Brasil, verificaram ajustes dos variogramas da SM, argila, MO e pH do solo ao modelo esférico.

O modelo esférico é associado à representação da continuidade espacial de atributos com características de transição abrupta, que são mais facilmente identificados no campo, enquanto atributos representados pelo modelo exponencial ou gaussiano apresentam transição mais sutil (BURGESS; WEBSTER, 1980).

O grau de dependência espacial (GDE) dos variogramas da SM, argila, Feo, MO, K_f , K_f estimado, Dose K_f e Dose K_f estimado, foram inferiores a 25%, isto é, mostraram dependência espacial forte, enquanto o Fed e o pH, mostraram dependência espacial média (CAMBARDELLA et al., 1994). De acordo com esses autores, valores de GDE menores ou iguais a 25% indicam dependência espacial forte; entre 25% e 75%, média; e maior que 75%, fraca.

O alcance é um importante parâmetro dos variogramas, e representa a distância máxima em que uma variável está correlacionada espacialmente à outra; ou seja, avaliações com distâncias maiores que o alcance têm distribuição aleatória e, portanto, são independentes. Neste caso, deve-se aplicar a estatística clássica. No presente trabalho o maior alcance foi observado para a Dose de imazaquim calculada com base no K_f estimado (2181m) enquanto o menor alcance foi verificado para a MO (792m). Os alcances da argila, K_f e K_f estimado foram próximos do alcance da SM do solo, o que indica um padrão de variabilidade semelhante entre esses atributos e reforça a possibilidade de uso da SM para auxiliar em mapeamentos taxonômicos e técnicos dos solos (CORTEZ et al., 2011). Marques Júnior (2009)

também encontrou valores semelhantes de alcances dos variogramas da SM e de atributos físicos e químicos de Latossolos.

Para estudar a variabilidade e a fim de verificar a existência de correlação espacial foram construídos mapas de padrão espacial (Figura 4), e variogramas cruzados dos atributos estudados em função da SM do solo (Figura 5). Segundo Os variogramas cruzados podem assumir valores positivos, indicando que o aumento em um dos atributos é acompanhado pelo aumento do outro, como negativos, indicando que quando ocorre o aumento de um dos atributos, ocorre o decréscimo do outro (BHATTI et al., 1991),.

Os mapas dos atributos estudados apresentaram padrão semelhante ao mapa pedológico. Também é possível verificar grande similaridade do padrão espacial do K_f e da SM com a argila, Fed, Feo, MO e pH. Sendo que nas áreas de maiores teores de argila, Fed, Feo, MO e menores valores de pH, são encontradas as áreas de maior potencial de sorção do imazaquim e maior magnetismo do solo. Siqueira et al. (2010) encontraram correlações positivas da SM com a argila e MO do solo. Rocha et al. (2002) e Oliveira et al. (2006) apontaram em seus estudos maior sorção do imazaquim em áreas com maiores teores de óxidos de Fe, Al e de argila.

Oliveira et al. (2004) trabalhando com técnicas geoestatísticas para avaliar o efeito da variabilidade do pH e da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho distrófico, textura argilosa, sob diferentes manejos, na retenção do herbicida imazaquim, também encontraram que a retenção do herbicida foi maior nas áreas com menores valores de pH e altos teores de matéria orgânica, explicando que o pH afetou a retenção do imazaquim por controlar a natureza iônica dos componentes do solo, matéria orgânica e minerais de argila.

A distribuição espacial e comportamento dos atributos do solo evidenciam o potencial da utilização da SM para predição do K_f , ou seja, a SM pode auxiliar no mapeamento de áreas com diferentes potenciais de sorção do herbicida imazaquim. Na análise dos mapas é possível observar a forte correspondência entre os mapas do K_f e k_f estimado, com grande semelhança dos padrões de isolinhas dos mapas e das zonas de maior e menor sorção do herbicida.

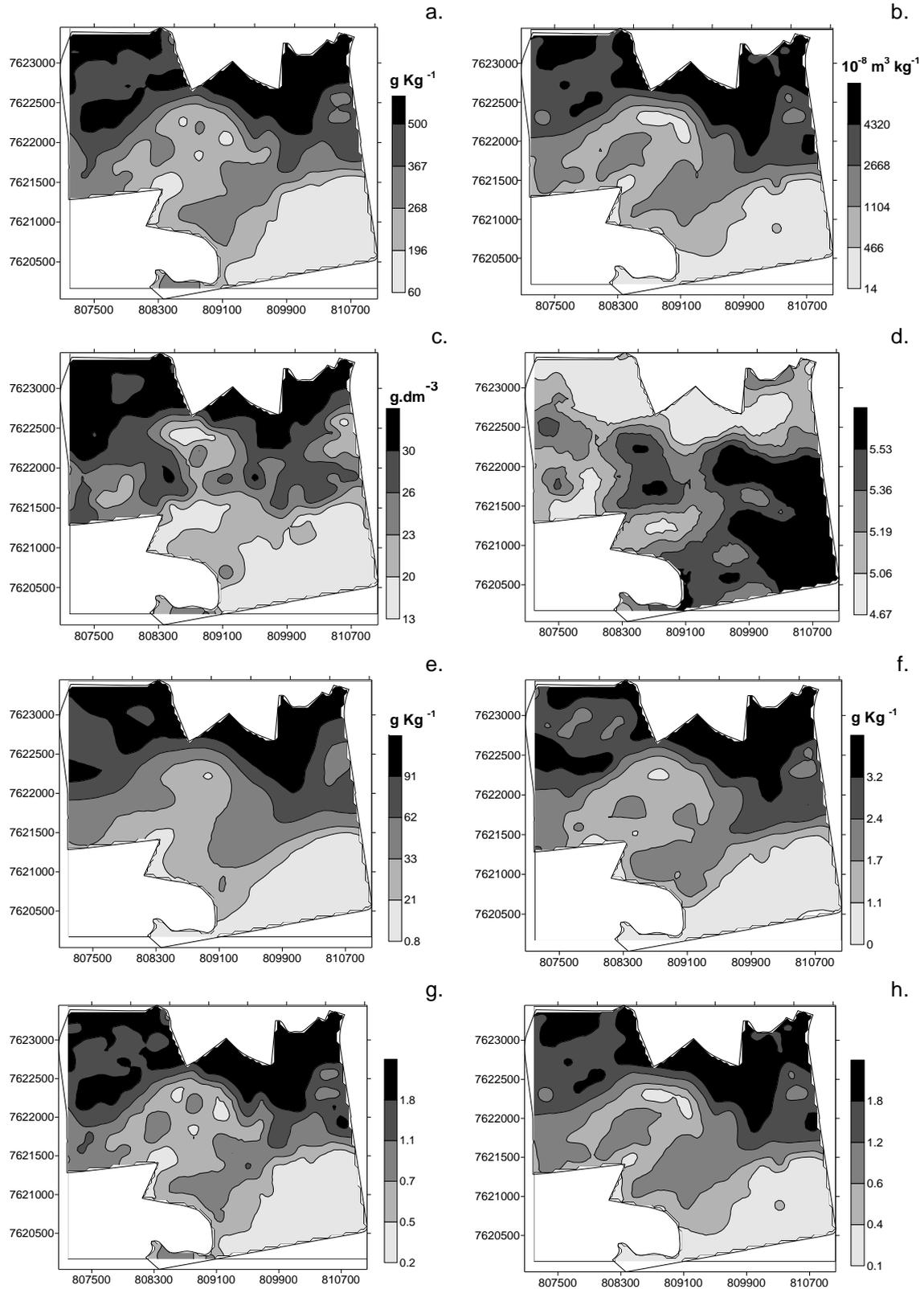


Figura 4. Mapas de padrão espacial. a., Argila; b., Suscetibilidade magnética; c., Matéria orgânica; d., pH; e., Ferro ditionito; f., Ferro oxalato; g., Coeficiente de Freundlich para sorção do herbicida imazaquim; h., Coeficiente de Freundlich para sorção do herbicida imazaquim estimado em função da SM.

Todos variogramas cruzados apresentaram correlação espacial definida, sendo esta correlação positiva para a argila, MO, Fed, Feo, K_f e K_f estimado, indicando que com o aumento da SM ocorre aumento destes atributos, e correlação espacial negativa entre a SM e o pH do solo, indicando que nas áreas de maior SM encontram-se menores valores de pH. Tais resultados estão de acordo com os encontrados na matriz de correlações de Pearson (Tabela 2) e validam as observações realizadas nos mapas de padrões espaciais dos atributos do solo.

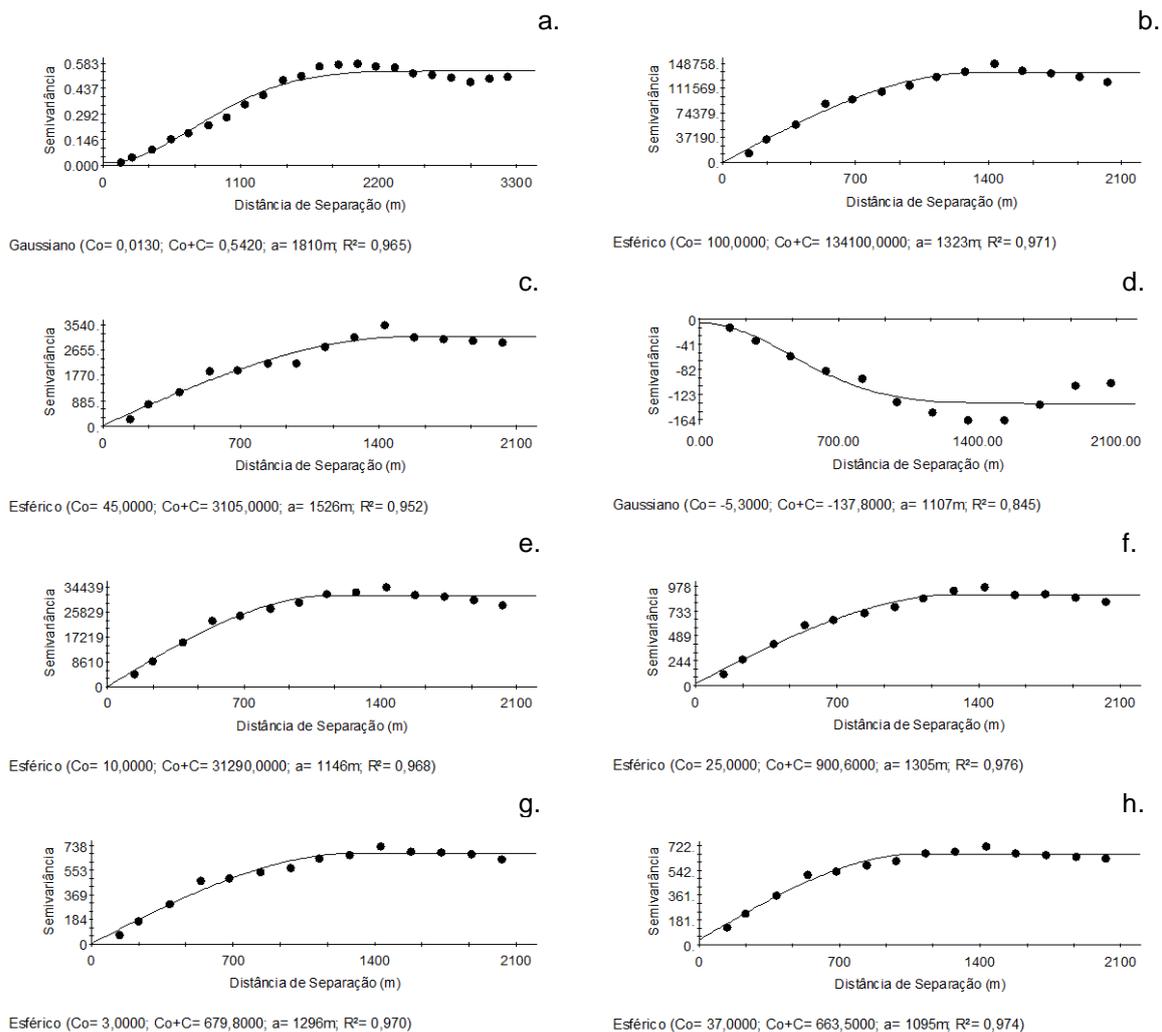


Figura 5. Variogramas cruzados para os atributos estudados. a., Dose K_f x Dose K_f estimado; b., Argila x Suscetibilidade Magnética; c., Matéria Orgânica x Suscetibilidade Magnética; d., pH x Suscetibilidade Magnética; e., Ferro ditionito x Suscetibilidade Magnética; f., Fe oxalato x Suscetibilidade Magnética; g., Coeficiente de Freundlich para Sorção do herbicida imazaquim x Suscetibilidade Magnética; h., Coeficiente de Freundlich para sorção do herbicida imazaquim estimado com base na suscetibilidade magnética x Suscetibilidade Magnética.

Foi observado forte grau de dependência espacial (CAMBARDELLA et al., 1994) para todos os variogramas cruzados (Tabela 6). Ressalta-se a correlação espacial positiva do K_f e $K_{f \text{ estimado}}$ com a SM, o que novamente reforça a ideia de que a SM pode ser utilizada como ferramenta para auxiliar no mapeamento de áreas com diferentes potenciais de sorção do herbicida imazaquim.

Tabela 6. Parâmetros dos variogramas cruzados dos atributos estudados.

| Variável | Modelo | Efeito Pepita | Patamar | Alcance | GDE ⁽¹⁾ | R ² |
|---------------------------------|-----------|---------------|-------------|---------|--------------------|----------------|
| | | (C0) | (C0+C1) | (m) | (%) | |
| Argila x SM | Esférico | 1000,0000 | 134100,0000 | 1323 | 0,75 | 0,971 |
| Fed x SM | Esférico | 10,0000 | 31290,0000 | 1146 | 0,03 | 0,968 |
| Feo x SM | Esférico | 25,0000 | 900,6000 | 1305 | 2,78 | 0,976 |
| MO x SM | Esférico | 45,0000 | 3105,0000 | 1526 | 1,45 | 0,952 |
| pH x SM | Gaussiano | -5,3000 | -138,8000 | 1107 | 3,82 | 0,845 |
| K_f x SM | Esférico | 3,0000 | 679,8000 | 1296 | 0,44 | 0,970 |
| $K_{f \text{ est}}$ x SM | Esférico | 37,0000 | 663,5000 | 1095 | 5,58 | 0,974 |
| D K_f x D $K_{f \text{ est}}$ | Gaussiano | 0,0130 | 0,5420 | 1810 | 2,40 | 0,965 |

⁽¹⁾ GDE, grau de dependência espacial $[C_0 / (C_0 + C_1)] \times 100$; SM, suscetibilidade magnética; Fed, ferro ditionito; Feo, ferro oxalato; MO, matéria orgânica; K_f , Coeficiente de Freundlich para sorção do herbicida imazaquim; $K_{f \text{ est}}$, Coeficiente de Freundlich para sorção do herbicida imazaquim estimado em função da Suscetibilidade Magnética; DK_f , Dose do herbicida imazaquim recomendada com base no K_f ; $DK_{f \text{ est}}$, Dose do herbicida imazaquim recomendada com base no $K_{f \text{ estimado}}$.

A continuidade espacial da Dose K_f é muito similar à continuidade espacial da Dose $K_{f \text{ estimado}}$, e ambos os mapas apresentam o mesmo padrão espacial da SM (Figura 6). Tal semelhança entre as Doses K_f e $K_{f \text{ estimado}}$, é validada pela observação do variograma cruzado (Figura 5a), que apresenta correlação espacial definida positiva entre esses atributos, com forte grau de dependência espacial (CAMBARDELLA et al., 1994) (Tabela 6), denotando novamente o grande potencial do magnetismo do solo expressar a sorção do herbicida estudado.

A partir do mapa de padrão espacial da SM, é possível criar classes de magnetismo do solo (assinatura magnética) na área experimental (Figura 6d), e estudar o comportamento da sorção e das doses recomendadas para cada classe magnética, comparando as doses variáveis, recomendadas com base no potencial de sorção do herbicida no solo, com a dose fixa, recomendada pelo fabricante (1 L p.c. ha⁻¹ imazaquim) (Tabela 7).

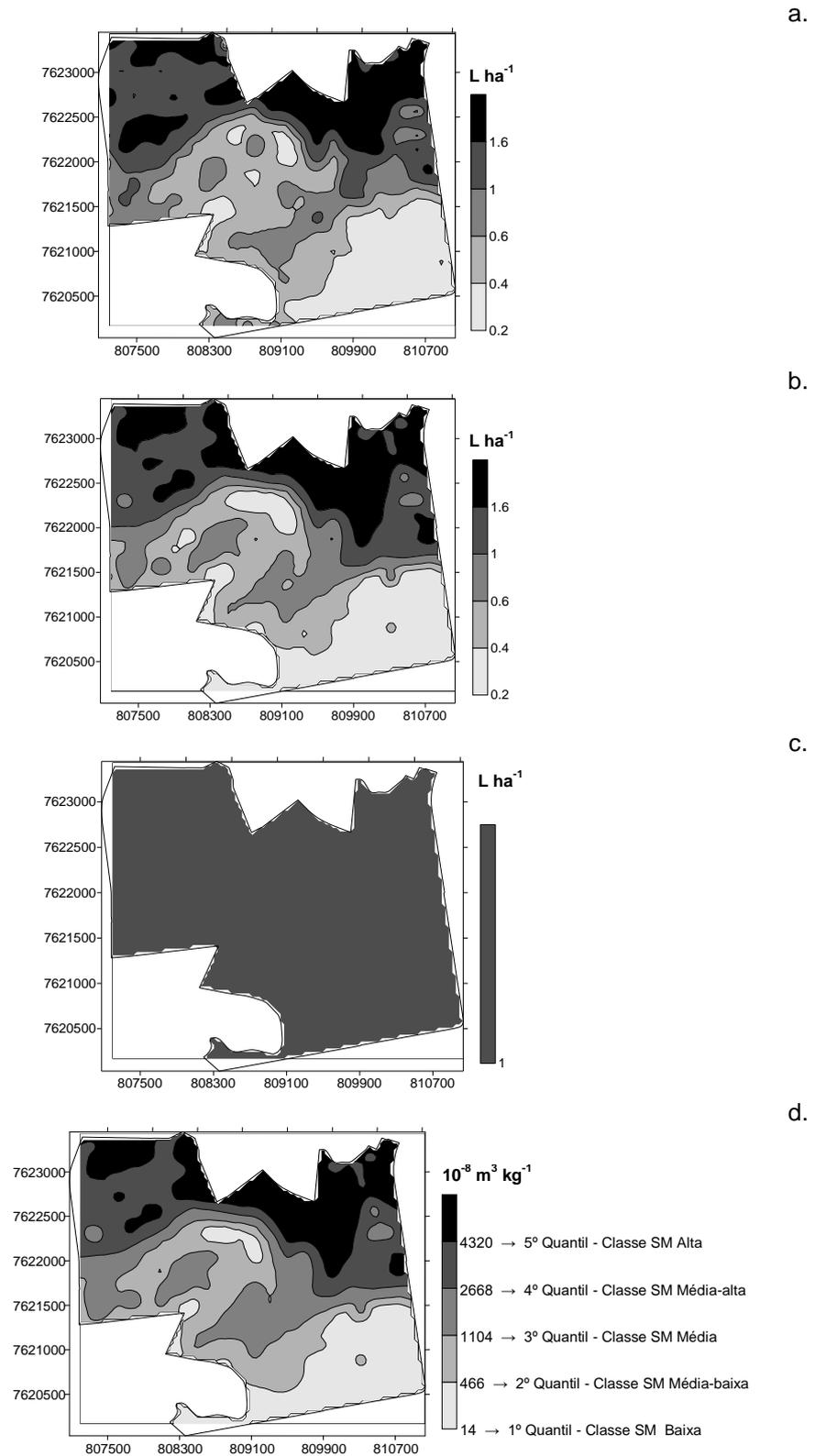


Figura 6. Mapas de padrão espacial, a., Dose do herbicida imazaquim calculada com base no K_f ; b., Dose do herbicida imazaquim calculada com base no K_f estimado; c., Dose do herbicida imazaquim recomendada pelo fabricante; d., Classes da Suscetibilidade Magnética.

A SM, o K_f , o K_f estimado, e as doses calculadas com base no K_f e K_f estimado, apresentaram diferença significativa entre as classes magnéticas pelo teste de Tukey ao nível de 5%, decrescendo da classe alta para a baixa (Tabela 7), reforçando a representatividade da sorção do herbicida no solo pela SM.

O K_f não diferiu significativamente do K_f estimado, nas zonas de média, média-alta e alta SM, já nas zonas de baixa e média-baixa SM houve diferença significativa entre esses atributos ao nível de 5%. Nestas duas classes magnéticas mais baixas, as doses de herbicida aumentaram, do método de recomendação calculado com base no K_f estimado, para o método de recomendação calculado com base no K_f , para o método de recomendação convencional, respectivamente, apresentando diferença significativa entre os métodos. Já na classe média, as doses de herbicida recomendadas com base no K_f e K_f estimado, não apresentaram diferença entre si, mas foram inferiores e significativamente diferentes da dose recomendada convencionalmente. Nas classes média-alta e alta SM, a dose de herbicida foi menor para a recomendação convencional, diferindo estatisticamente das recomendações com base no K_f e K_f estimado, que não apresentaram diferença estatística entre si.

Diante dos resultados obtidos, verifica-se que a aplicação da dose convencional do imazaquim pode ser considerada acima do necessário nas áreas de baixa, média-baixa e média SM e insuficiente para as áreas de média-alta e alta SM. Isso pode gerar aumento de custo desnecessário com o uso do herbicida, maiores riscos de lixiviação e contaminação ambiental, nas zonas de baixa, média-baixa e média SM, e ineficiência no controle de plantas daninhas nas zonas de média-alta e alta SM, devido a maior retenção das moléculas do herbicida imazaquim no solo. A maior retenção do imazaquim pelo solo indica menor disponibilidade do herbicida para o controle de plantas daninhas havendo, em princípio, a necessidade de aumentar a dose a ser aplicada (OLIVEIRA et al., 2004).

Na comparação do consumo total do herbicida imazaquim, pelo método convencional com os métodos calculados com base no K_f e K_f estimado, por classe magnética, é possível observar diminuição de 3,5% (30,5L) e 4% (34,5L), respectivamente. Desta maneira, levar em consideração o magnetismo do solo para prever o potencial de sorção do imazaquim viabiliza um manejo mais racional e sustentável do herbicida para o controle de plantas daninhas.

Tabela 7. Médias dos valores de SM, K_f , $K_{f \text{ estimado}}$, dose convencional, doses recomendadas com base no K_f e $K_{f \text{ estimado}}$ ⁽¹⁾ ⁽²⁾, valores mínimos e máximos da suscetibilidade magnética e consumo do herbicida imazaquim por classes da suscetibilidade magnética.

| Classes SM | Área | SM média | SM mínimo | SM máximo | Dose conv | Consumo conv | K_f | Dose K_f | Consumo K_f | $K_{f \text{ est}}$ | Dose $K_{f \text{ est}}$ | Consumo $K_{f \text{ est}}$ |
|-------------|------|-------------------------|-------------------------|-------------------------|-----------------------|--------------|----------|-----------------------|---------------|---------------------|--------------------------|-----------------------------|
| | (ha) | ($10^{-8}m^3kg^{-1}$) | ($10^{-8}m^3kg^{-1}$) | ($10^{-8}m^3kg^{-1}$) | (L ha ⁻¹) | (L) | | (L ha ⁻¹) | (L) | | (L ha ⁻¹) | (L) |
| Baixa | 181 | 220 e | 14 | 465 | 1,00 a A | 181,00 | 0,41 e A | 0,34 e B | 62,26 | 0,31 e B | 0,28 e C | 50,39 |
| Média-Baixa | 186 | 795 d | 466 | 1103 | 1,00 a A | 186,00 | 0,60 d A | 0,50 d B | 92,89 | 0,51 d B | 0,45 d C | 84,57 |
| Média | 186 | 1599 c | 1104 | 2667 | 1,00 a A | 186,00 | 0,86 c A | 0,71 c B | 132,23 | 0,81 c A | 0,72 c B | 134,07 |
| Média-Alta | 176 | 3641 b | 2668 | 4319 | 1,00 a B | 176,00 | 1,61 b A | 1,34 b A | 235,35 | 1,54 b A | 1,38 b A | 242,09 |
| Alta | 179 | 5390 a | 4320 | 7458 | 1,00 a B | 179,00 | 2,39 a A | 1,98 a A | 354,83 | 2,26 a A | 2,02 a A | 362,40 |
| Total | 908 | | | | | 908,00 | | | 877,56 | | | 873,52 |

⁽¹⁾ Médias seguidas de letras minúsculas iguais, na coluna, não diferem pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade; ⁽²⁾ Médias seguidas de letras maiúsculas iguais, na linha, não diferem pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade; SM, suscetibilidade magnética; K_f , Coeficiente de Freundlich para sorção do herbicida imazaquim; $K_{f \text{ est}}$, Coeficiente de Freundlich para sorção do herbicida imazaquim estimado em função da Suscetibilidade Magnética; Dose conv, Dose convencional recomendada pelo fabricante do herbicida; Dose K_f , Dose calculada com base no K_f ; Dose $K_{f \text{ est}}$, Dose calculada com base no $K_{f \text{ estimado}}$; Consumo conv, Consumo em litros do herbicida imazaquim, obtido com base na dose convencional recomendada e área de aplicação; Consumo K_f , Consumo em litros do herbicida imazaquim, obtido com base na dose recomendada calculada a partir do K_f e área de aplicação; Consumo $K_{f \text{ est}}$, Consumo em litros do herbicida imazaquim, obtido com base na dose recomendada calculada a partir do $K_{f \text{ estimado}}$ e área de aplicação.

A SM foi em média 25 vezes maior na classe alta em relação à classe baixa, e embora a recomendação convencional do herbicida seja a mesma, independente das características do solo, o K_f , a dose e consumo calculados com base no K_f apresentaram-se 6 vezes superior na zona de alta em relação à de baixa SM, bem como ocorre para o $K_{f \text{ estimado}}$, dose e consumo calculados com base no $K_{f \text{ estimado}}$ que apresentaram valores 7 vezes superiores na classe mais alta de magnetismo.

Solos com SM da ordem de $5390 \cdot 10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$ possuem em média 6,5 vezes maior potencial de sorção do imazaquim do que os solos com SM da ordem de $220 \cdot 10^{-8} \text{m}^3 \text{kg}^{-1}$. Isso significa que aqueles solos, com valores mais elevados da SM, possibilitam a aplicação de doses de até 2 L ha^{-1} , o dobro da recomendação fixa, indicada pelo fabricante.

Vale ressaltar que para a recomendação dos herbicidas e suas doses, visando o controle eficiente das plantas daninhas, além do conhecimento das características dos solos também deve ser levado em consideração o banco de sementes das plantas daninhas existentes na área, o clima e o tempo de fechamento de dossel da cultura. Estas informações são fundamentais para a adoção de um manejo mais racional e assertivo.

2.4 Conclusões

1. O uso da suscetibilidade magnética possibilita a quantificação indireta da sorção do herbicida imazaquim.
2. Solos com maior expressão magnética apresentam características de maior sorção do herbicida imazaquim.
3. A assinatura magnética dos solos pode auxiliar no mapeamento e na identificação de áreas com diferentes potenciais de aplicação de herbicidas.

2.5 Referências

BARIZON, R. R. M.; LAVORENTI, A.; REGITANO, J. B.; TORNISIELO, V. L. Sorção e dessorção do imazaquim em solos com diferentes características granulométricas, químicas e mineralógicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.695-703, 2005.

BARRÓN, V.; TORRENT, J. Iron, manganese and aluminium oxides and oxyhydroxides. **European Mineralogical Union Notes in Mineralogy** 01/2013; 14:297-336, 2013. DOI: 10.1180/EMU-notes.14.

BASKARAN, S.; BOLAN, N.S.; RAHMAN, A.; TILLMAN, R.W. Pesticide sorption by allophanic and non-allophanic soils of New Zealand. **New Zealand Journal of Agricultural Research**, v.39, p.297-310, 1996.

BHALLA, P.N.; HACKETT, M.; HART, R.G. & LIGNOWSKI, E.M. Imazaquim herbicide. In: SHANER, D.L. & O'CONNOR, S.L., eds. Imidazolinones **herbicides**. Boca Raton, CRC Press, 1991. p.237-245.

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.

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.; MCDONNELL, R. A. **Principles of Geographical Information Systems**. Oxford, Oxford University Press, 1998. 330 p.

CAMARGO, L. A.; MARQUES JUNIOR, J.; BARRÓN, V.; ALLEONI, L. R. F.; BARBOSA, R. S.; PEREIRA, G. T. Mapping of clay, iron oxide and adsorbed phosphate in Oxisols using diffuse reflectance spectroscopy. **Geoderma** (Amsterdam), v. 251-252, p. 124-132, 2015.

CAMARGO, O.A., MONIZ, A.C., JORGE, J.A., VALADARES, L.M.A.S. **Métodos de análise química, mineralógica e física dos solos do Instituto Agronômico de Campinas**. Instituto Agronômico, Campinas, 1986. 96 p.

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.

CARVALHO, J. R. P.; SILVEIRA, P. M.; VIEIRA, S. R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, n.8, p.1151-1159, 2002.

CARVALHO, M. P.; TAKEDA, E. Y.; FREDDI, O. S. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.4, p.695-703, 2003.

CHE, M.; LOUX, M.M.; TRAINA, S.J.; LOGAN, T.J. Effects of pH on sorption and desorption of imazaquim and imazethapyr on clays and humic acid. **Journal of Environmental Quality**, v.21, p.698-703, 1992.

CONACHER, J.; CONACHER, A., 1986. **Herbicides in Agriculture: Minimum Tillage, Science and Society**. GEOWEST. n.22, University of Western Australia, Nedlands, WA, 169 pp.

CORTEZ, L. A.; MARQUES JR., J.; PELUCO, R. G.; TEIXEIRA, D. B.; SIQUEIRA, D. S. Suscetibilidade magnética para identificação de áreas de manejo específico em citricultura. **Energia na agricultura**, Botucatu, v.26, p.60-79, 2011.

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

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

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Normative Procedures for Soil Surveys**. Embrapa, Brasília. 1995. (in Portuguese)

EMBRAPA, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual of soil analysis methods**. Embrapa, Rio de Janeiro. 1997. (in Portuguese)

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA Centro Nacional e Pesquisa em Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa-SPI; Rio de Janeiro: Embrapa-Solos, 2006. 306 p.

FERNANDO, N.; MANALIL, S.; FLORENTINE, S. K.; CHAUHAN, B. S.; SENEWEERA, S. Glyphosate Resistance of C₃ and C₄ Weeds under Rising Atmospheric CO₂. **Frontiers in Plant Science**, v.7, article 910, 2016. doi:10.3389/fpls.2016.00910.

FERREIRA, J.A.; MARTIN-NETO, L.; VAZ, C.M.P.; REGITANO, J.B. Sorption interactions between imazaquim and a humic acid extracted from a typical Brazilian Oxisol. **Journal of Environmental Quality**, v.31, p.1665-1670, 2002.

FONTES, M. P. F.; OLIVEIRA, T. S.; COSTA, L. M.; CAMPOS, A. A. G. Magnetic separation and evaluation of magnetization of Brazilian soils from different parent materials. **Geoderma**. Amsterdam, v.96, p.81-99, 2000.

FREEMARK, K.; BOUTIN, C. Impacts of agricultural herbicide use on terrestrial wildlife in temperate landscapes: A review with special reference to North America. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v.52, p.67-91, 1995.

GERSTL, Z. An update on the K_{oc} concept in regard to regional scale management. **Crop Protection**, v.19, p.643-648, 2000.

GOETZ, A.J.; WEHTJE, G.; WALKER, R.H.; HAJEK, B. Soil solution and mobility characterization of imazaquim. **Weed Science**, v.34, p.788-793, 1986.

GREEN, R.E.; KARICKHOFF, S.W. Sorption estimates for modeling. In: HENG, H.H. (Ed.). **Pesticides in the soil environment: processes, impacts and modeling**. Madison: Soil Science Society of America, 1990. p.79-101.

GRIMLEY, D. A.; VEPRASKAS, M. J. Magnetic Susceptibility for Use in Delineating Hydric Soils. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.64, p. 2174-2180, 2000.

HANESCH, M.; SCHOLGER, R. The influence of soil type on the magnetic susceptibility measured throughout soil profiles. **Geophysical Journal International**, Oxford, v.161, n.1, p.50–56, 2005.

HASSET, J.J.; BANWART, W.L.; WOOD, S.G.; MEANS, J.C. Sorption of α -naphthol: Implications concerning the limits of hydrophobic partitioning. **Soil Science Society of America Journal**, v.45, p.38-42, 1981.

HERWIG, U. et al. Physicochemical interactions between atrazine and clay minerals. **Applied Clay Science**, v. 18, n. 5-6, p. 201-222, 2001.

HOBBS, P. R. Conservation agriculture: what is it and why is it important for future sustainable food production? **Journal of Agricultural Science**, v.145, p.127-137, 2007.

IAMAGUTI, J.L.; MOITINHO, M.R.; TEIXEIRA, D.D.B.; BICALHO, E.S.; PANOSSO, A.R.; LA SCALA, N. Preparo do solo e emissão de CO₂, temperatura e umidade do solo em área de canavial. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, p. 497-504, 2015.

KEMPENAAR, C.; LOTZ, L.A.P. Reduction of herbicide use and emission by new weed control methods and strategies. **Water Science and Technology**. v. 49, n.3, p 135–138, 2004.

KHAN, A.; HASSET, J.J.; BANWART, W.L.; MEANS, J.C.; WOOD, S.G. Sorption of acetophenone by sediments and soils. **Soil Science**, v.128, p.297-302, 1979.

KOSKINEN, W.C.; HARPER, S.S. **The retention process: mechanisms**. In: CHENG, H.H., ed. **Pesticides in the soil environment: process, impacts, and modeling**. 2.ed. Madison, SSSA. WI, 1990. p.51-77.

LAPWORTH, D. J.; GOODDY, D. C. Source and persistence of pesticides in a semi-confined chalk aquifer of southeast England. **Environmental Pollution**, v. 144, n. 3, p. 1031-1044, 2006.

LEAL, F. T.; FRANÇA, A. B. C.; SIQUEIRA, D. S.; TEIXEIRA, D. B.; MARQUES JR, J.; SCALA JÚNIOR, N. Characterization of potential CO₂ emissions in agricultural areas using magnetic susceptibility. **Scientia Agricola**, v. 72, p. 535-539, 2015.

LOUX, M.M.; LIEBL, R.A.; SLIFE, F.W. Adsorption of imazaquim and imazethapyr on soils, sediments, and selected adsorbents. **Weed Science**, v.37, p.712-718, 1989.

LOUX, M.M.; REESE, K.D. Effect of soil pH on adsorption and persistence of imazaquim. **Weed Science**, v.40, p.490-496, 1992.

LUIZ, A. J. B. Meta-análise: definição, aplicações e sinergia com dados espaciais. **Cadernos de Ciência & Tecnologia**, Brasília, v.19, n. 3, p.407-428, 2002.

MANGELS, G. Behavior of the imidazolinone herbicides in soil: A review of the literature. In: SHANER, D.L.; O'CONNOR, S.L. (Ed.). **The imidazolinone herbicides**. Boca Raton: CRC Press, 1991. p.191-209.

MARQUES JR, J. **Caracterização de áreas de manejo específico no contexto das relações solo-relevo**. 2009. 113 f. Tese (Livre-Docência) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2009.

MARQUES JR, J.; ALLEONI, L.R.F.; TEIXEIRA, D.D.B.; SIQUEIRA, D.S.; PEREIRA, G.T. Sampling planning of micronutrients and aluminium of the soils of São Paulo, Brazil. **Geoderma Regional**, v. 4, p. 91-99, 2015.

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

MASUTTI, C. S. M.; MERMUT, A. R. Sorption of fipronil and its sulfide derivative by soils and goethite. **Geoderma** (Amsterdam), v. 140, p. 1-7, 2007.

MATHÉ, V.; LÉVÊQUE, F.; MATHÉ, P. E.; CHEVALLIER, C.; PONS, Y. Soil anomaly mapping using a caesium magnetometer: Limits in the low magnetic amplitude case. **Journal of Applied Geophysics**, Amsterdam, v. 58, n. 3, p.202-17, 2006.

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

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

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.

MEHRA, O. P.; JACKSON, M. L. Iron oxide removed from soils and clays by dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. **Clays and Clay Minerals**, New York, v.7, p.1317-327, 1960.

MINITAB, Release. **Making Data analysis Easier**: version 13.1, 2000.

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, v. 40, n. 1, p. 69-77, 2005.

MOORE, David S. (2007), *The Basic Practice of Statistics*. New York, Freeman.

OLIVEIRA JUNIOR, R.S.; KOSKINEN, W.C.; FERREIRA, F.A. Sorption and leaching potential of herbicides on Brazilian soils. **Weed Research**, v.41, p.97-110, 2001.

OLIVEIRA JUNIOR, R.S.; KOSKINEN, W.C.; FERREIRA, F.A.; KHAKURAL, B.R.; MULLA, D.J.; ROBERT, P.J. Spatial variability of imazethapyr sorption in soil. **Weed Science**, v.47, p.243-248, 1999.

OLIVEIRA, M. F.; COLONNA, I.; PRATES, H. T.; MANTOVANI, E. C.; GOMIDE, R. L.; OLIVEIRA JUNIOR, R. S. Sorção do herbicida imazaquim em Latossolo sob plantio direto e convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.8, p.787-793, 2004.

OLIVEIRA, M. F.; PRATES, H. T.; SANTANNA, D. P.; OLIVEIRA JUNIOR, R. S. Imazaquim sorption in surface and subsurface soil samples. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, n.3, p.461-468, 2006.

OLIVEIRA, M.F. de. **Retenção dos herbicidas Flazasulfuron e Imazaquim em solos de diferentes classes e hidrólise do Flazasulfuron em diferentes valores de pH e temperatura**. 1998. 71p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual do Norte Fluminense, Campos dos Goytacazes.

PARKS, G.A.; De BRUYN, P.L. The zero point of charge of oxides. **Journal of Physical Chemistry**, v.66, p.967-973, 1962.

PELUCO, R.G.; MARQUES JUNIOR, J.; SIQUEIRA, D.S.; PEREIRA, G.T.; BARBOSA, R.S.; TEIXEIRA, D.D.B.; ADAME, C.R.; CORTEZ, L.A.. Suscetibilidade magnética do solo na estimação da capacidade de suporte à aplicação de vinhaça.. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 48, n. 6, 661-672, 2013.

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

REDDY, K.N.; LOCKE, M.A. Imazaquim spray retention, foliar washoff and runoff losses under simulated rainfall. **Pest. Science**, 48:179-187, 1996.

REGITANO, J.B.; ALLEONI, L.R.F.; TORNISIELO, V.L. Atributos de solos tropicais e a sorção de imazaquim. **Scientia Agricola**, v.58, p.801-807, 2001.

REGITANO, J.B.; BISCHOFF, M.; LEE, L.S.; REICHERT, J.M.; TURCO, R.F. Retention of imazaquim in soil. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v.16, p.397-404, 1997.

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

ROCHA, W.S.D.; ALLEONI, L.R.F.; REGITANO, J.B. Energia livre da sorção de imazaquim em solos ácidos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, p.239-246, 2003.

ROCHA, W.S.D.; REGITANO, J.B.; ALLEONI, L.R.F.; TORNISIELO, V.F. Sorption of imazaquim in soils with positive balance of charges. **Chemosphere**, v.49, p.263-270, 2002.

ROYALL, D. Use of mineral magnetic measurements to investigate soil erosion and sediment delivery in a small agricultural catchment in limestone terrain. **Catena**, Amsterdam, v. 46, p. 15-34, 2001.

SANTANA, G. P.; FABRIS, J. D.; GOULART, A. T.; SANTANA, D. P. Magnetite and its transformation to hematite in a soil derived from steatite. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, p.33-42, 2001.

SCHWERTMANN U. Use of oxalate for Fe extraction from soils. **Canadian Journal of Soil Science**. v.53, p. 244-246, 1973.

SHEA, P.J. Chlorsulfuron dissociation and adsorption on selected adsorbents and soils. **Weed Science**, v.34, p.474-478, 1986.

SILVA, V.R. et al. Variabilidade espacial das características químicas do solo e produtividade de milho em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.6, p.1013-1020, 2003.

SILVEIRA, P.M. et al. Amostragem e variabilidade especial de características químicas de um latossolo submetido a diferentes sistemas de preparo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.10, p.2057-2064, 2000.

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, 2010.

SIQUEIRA, D. S.; MARQUES, JR., J.; PEREIRA, G. T.; TEIXEIRA, D. ; VASCONCELOS, V.; CARVALHO JUNIOR, O. A.; MARTINS, E. S. Detailed mapping unit design based on soil-landscape relation and spatial variability of magnetic susceptibility and soil color. **Catena**, v. 135, p.149-162, 2015.

SOUZA, Z. M.; BARBIERI, D. M.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G. T.; CAMPOS, M. C. C. Influência da variabilidade espacial de atributos químicos de um Latossolo na aplicação de insumos para cultura de cana-de-açúcar. **Ciência Agrotecnologia**, Lavras, v. 31, n. 2, p. 371-377, 2007.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JUNIOR, 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.J. Organic matter reactions involving pesticides in soil. In: KAUFMAN, D.D.; STILL, G.G.; PAULSON, G.D.; BANDAL, S.K. (Ed.) **Bound and conjugated pesticide residues**. Washington, DC: American Chemistry Society, 1976. p.180-207. (ACS Symposium Series, 29).

STOUGAARD, R.N.; SHEA, P.J.; MARTIN, A.R. Effect of soil type and pH on adsorption, mobility, and efficacy of imazaquim and imazethapyr. **Weed Science**, v.38, p.67-73, 1990.

SURFER. **Surfer 7.0. Contouring and 3D surface mapping for scientist's engineers: user's guide**. New York: Golden software, p. 619, 1999.

THORNTHWAITE, C.W. An approach towards a rational classification of climate. **Geographical Review**, v.38, p.55-94. 1948.

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

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

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

CAPÍTULO 3 - Cor do solo para identificação de áreas com diferentes potenciais de sorção do herbicida imazaquim

RESUMO - Conhecer a variabilidade dos atributos do solo relacionados à sorção de herbicidas é importante para o manejo sustentável deste insumo. O presente trabalho teve o objetivo avaliar a utilização da cor obtida pela espectroscopia de reflectância difusa para identificação de solos com diferentes potenciais de sorção do herbicida imazaquim. Foram coletadas 241 amostras de solo na profundidade de 0,00 - 0,25m em uma área de 380 ha, com malha de densidade amostral de 1 ponto a cada 2,5 ha. O coeficiente de Freundlich para sorção do herbicida imazaquim foi determinado indiretamente a partir do teor de argila, por meio da metodologia da meta-análise. A partir dos dados de cor do solo (matiz, valor e croma), obtidos por meio da espectroscopia de reflectância difusa (ERD), foi calculado um índice de avermelhamento (IAV). Também foram avaliados teor de argila, teor de matéria orgânica, pH e mineralogia do solo. Os dados foram submetidos à análise estatística de média e desvio padrão de cada atributo conforme grupamentos de pedologia e geologia da área experimental e foi aplicado o teste de Tukey a 5%. Foram construídos modelos de regressão entre o coeficiente de sorção do herbicida e os atributos estudados. A análise da dependência espacial dos dados foi feita por meio da geoestatística, utilizando-se o variograma. Os resultados demonstram que a utilização da cor, obtida pela espectroscopia de reflectância difusa, possibilita a identificação de solos com diferentes potenciais de sorção do herbicida imazaquim. Dentre os componentes da cor obtidos por espectroscopia de reflectância difusa, o mais eficiente na estimativa do coeficiente de sorção do herbicida imazaquim é o croma (98% de precisão), seguido pelo matiz (85%) e valor (54%).

Palavras-chave: geoestatística, assinatura espectral, pedometria, espectroscopia de reflectância difusa, Munsell

3.1 Introdução

Os herbicidas podem ser classificados como o produto fitossanitário mais utilizado em todo o mundo (HE et al. 2012) e seu manejo inadequado pode ocasionar contaminações ambientais (LAPWORTH; GOODDY, 2006). A aplicação de herbicidas na agricultura pode ser realizada tanto em pré, quanto em pós-emergência das plantas daninhas. Quando o herbicida é aplicado no solo, em pré-emergência, as moléculas deste produto fitossanitário podem ser lixiviadas, degradadas por processos biológicos, físicos e químicos, serem absorvidas pelas plantas ou ainda sofrerem o processo de sorção ao solo (ROSSI et al., 2005).

A quantidade de herbicida perdido pela movimentação no perfil do solo encontra-se entre 0,1 e 1% do total aplicado, mas pode chegar a ser superior a 5% (CARTER, 2000). Já a dinâmica de retenção das moléculas na matriz do solo é bastante complexa, devido à heterogeneidade físico-química dos solos e suas inter-relações com os sistemas biológicos, atmosféricos e aquáticos, dependendo diretamente da composição do solo (OLIVEIRA; BRIGHENTI, 2011).

O entendimento da dinâmica de herbicidas pré-emergente em função das características dos solos é importante para planejamento das dosagens adequadas, bem como para evitar efeitos prejudiciais ao ambiente e às culturas subsequentes (BRADY, 1974; RESENDE et al., 1995).

O imazaquim (ácido 2-[4,5-dihidro-4-metil-4-(1- metiletil)-5-oxo-1H-imidazol-2-il]-3-quinolinacarboxílico) é um herbicida utilizado na agricultura brasileira e mundial para controlar plantas daninhas associadas à cultura da soja (ZILLI et al., 2008). Ele pertence ao grupo das imidazolinonas e sua molécula contém dois grupos funcionais ionizáveis: (i) grupo carboxílico (ácido, pKa = 3,8) e (ii) grupo quinolina (básico, pKa = 2,0) (STOUGAARD et al., 1990). Outros herbicidas pertencentes ao grupo das imidazolinonas são: imazapyr, imazapic, imazethapyr, imazamox e imazamethabenz (TAN et al., 2005). Por sua natureza anfótera, o teor de carbono orgânico, pH, a quantidade e o tipo de argila influenciam a sorção do imazaquim (ROCHA et al., 2003).

O mapeamento da variabilidade espacial destes atributos do solo responsáveis por influenciar no comportamento de herbicidas pré-emergentes

poderia auxiliar muito no entendimento da dinâmica de sorção e no planejamento sustentável das práticas agrícolas (BONGIOVANNI; LOWENBERG-DEBOER, 2004). Porém, estudos de variabilidade espacial requerem um elevado número de amostras, aumentando o tempo e os custos, tanto na atividade de amostragem de solo quanto nas análises laboratoriais (McBRATNEY et al., 2002; DEMATTÊ et al., 2007; SIQUEIRA et al., 2014).

Várias alternativas têm sido propostas para viabilizar estudos de variabilidade espacial em grandes áreas e auxiliar nas melhores estratégias de uso e ocupação do solo: (i) técnicas pedométricas, incluindo meta-análise (IBÁÑEZ; MONTANARELLA, 2013); (ii) assinatura magnética (YANG et al., 2016); (iii) assinatura espectral (PERCIVAL; WILLIAMSON, 2016).

A assinatura espectral dos solos pode ser obtida por sensores orbitais (CASTALDI et al., 2016) e proximais, por espectroradiometria (GORE et al., 2016) e espectroscopia de reflectância difusa (GUPTA et al., 2016).

Segundo Torrent; Barrón (2008), a espectroscopia de reflectância difusa (ERD) possui como vantagens principais, a rapidez, economia e a não produção de resíduos. Ela tem sido amplamente adotada para estudos de propriedades primárias e secundárias do solo (JANIK et al., 1998; MALLEY et al., 2004; CAÑASVERAS et al., 2012), podendo ser aplicada tanto em solos da região temperada (ABDI et al., 2016) quanto da tropical (AQUINO et al., 2016).

Em meio às bandas de absorção dos espectros, a banda do visível (350 a 750 nm) pode ser classificada dentre as mais utilizadas em estudos de propriedades dos solos. 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 de grande parte dos minerais presentes nas amostras (VISCARRA ROSSEL et al. 2006; CAÑASVERAS et al. 2012).

Diversos autores (TORRENT; BARRÓN, 2008; VISCARRA ROSSEL et al., 2010) citam que os parâmetros da cor do solo (Matiz, Valor, Cromo), obtidos pela ERD, com leituras realizadas na faixa do visível, podem ser utilizados nos estudos e na estimativa de atributos mineralógicos, físicos e químicos do solo, justamente os

atributos que condicionam os processos de sorção de herbicidas pré-emergentes (OLIVEIRA et al., 2004). Neste contexto, como os estudos sobre sorção de moléculas nos solos são muito onerosos, o presente trabalho teve o objetivo avaliar a utilização da cor obtida pela espectroscopia de reflectância difusa para identificação de solos com diferentes potenciais de sorção do herbicida imazaquim.

3.2 Material e Métodos

3.2.1 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 Guatapar-SP, Brasil (Figura 1). O clima da região, de acordo com Thornthwaite (1948), pode ser definido como B1rB'4a', Tipo Mesotérmico mido, com pequena deficiência hídrica, sendo a evapotranspirao de verão menor que 48% da evapotranspirao anual. Esta rea está inserida na província geomorfológica do Planalto Ocidental Paulista, próximas ao limite das Cuestas Basálticas no divisor litoestratigráfico arenito-basáltico.

Na rea de experimento (Figura 1) 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), e os solos foram classificados, de acordo com o levantamento realizado pelo Centro de Tecnologia Canavieira (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). Nos solos do topo o teor de ferro total (Fe_2O_3)  de aproximadamente 200 g kg^{-1} e na parte mais baixa da paisagem de 10 g kg^{-1} (SIQUEIRA et al., 2015).

A vegetao natural local era constituída por floresta tropical subcaducifólia. Atualmente a área  cultivada com cana-de-aocar sob sistema de colheita mecanizada de cana crua há mais de 15 anos, com sistema de rotao de culturas, com plantio de soja, no período de renovao do canavial.

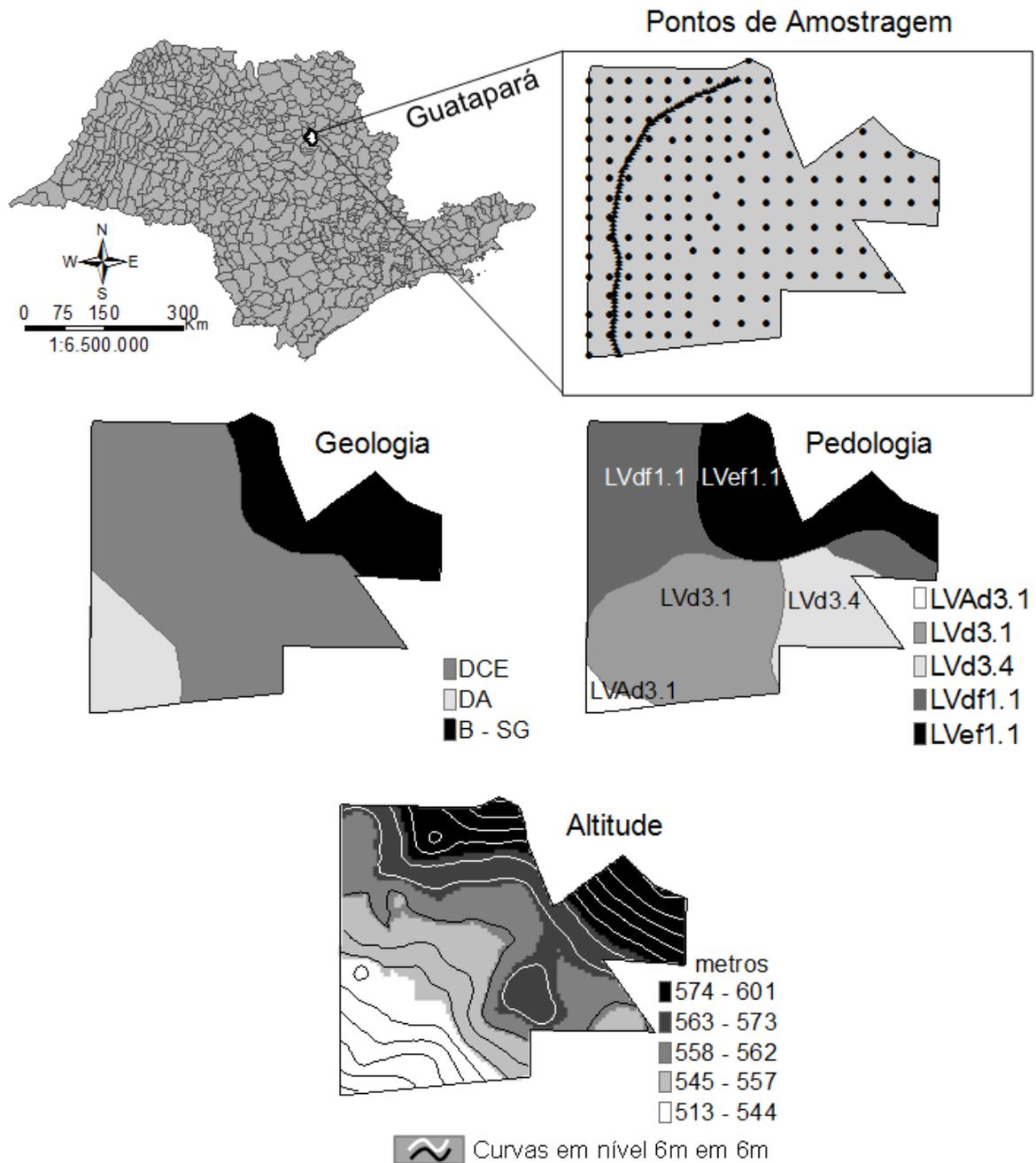


Figura 1. Pontos de amostragem de solo, representaes topográfica, geológica e pedológica.

Foram coletadas 86 amostras de solo a cada 30 m, em uma transeo de 2600 m e 155 pontos em uma malha de densidade amostral de 1 ponto a cada 2,5 ha, totalizando 241 pontos, na profundidade de 0,00-0,25m, na área experimental de 380 ha. Mais detalhes da caracterizao da área estão apresentados em Barbosa, (2014) e Siqueira et al. (2015).

3.2.2 Análises laboratoriais

O teor 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 2,0mm de abertura de malha para determinação dos atributos químicos do solo, potencial hidrogeniônico (pH) e matéria orgânica (MO), de acordo com Raij et al. (2001).

Foram escolhidos 12 pontos da transeção, de forma a representar as classes de solo da área experimental, para determinação da mineralogia da fração argila. Os minerais da fração argila hematita (Hm) e goethita (Gt) foram quantificados pela técnica de Espectroscopia de Reflectância Difusa, conforme descrito por Bahia et al. (2015), e a caulinita (Ct) e gibbsita (Gb) foram quantificadas pela análise termogravimétrica (ATG) (KARATHANASIS; HAJEC, 1982).

Para a obtenção dos espectros de reflectância difusa, as avaliações foram feitas com o sensor de laboratório Lambda 950 (Perkin Elmer Ltd., Waltham, MA, EUA). Foi moída aproximadamente 0,5 g de TFSA em ágata até 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 80mm, a cada 1nm, com um tempo de integração de 0,2 segundos fazendo uma varredura no intervalo de 380 a 780nm. 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, croma e valor utilizando o programa Munsell Conversion versão 6.4, conforme Barrón et al. (2000). Com base nos valores de croma, valor e matiz, obtidos pela análise de espectroscopia de reflectância difusa foi calculado um índice de avermelhamento (IAV), conforme equação 1 (BARRÓN et al. 2000).

$$IAV = \frac{(10 - Matiz) \times Croma}{Valor}$$

[1]

3.2.3 Meta-análise

Para obtenção do potencial de sorção das moléculas do imazaquim ao solo, utilizou-se a metodologia da meta-análise (RAIJ, 1998; BUI et al., 2006; IBÁÑEZ; MONTANARELLA, 2013; BUI, 2016) A partir de busca de artigos na base de dados do “SciELO - Scientific Electronic Library Online” foi construído banco de dados contendo informações do potencial de sorção de herbicidas e informações dos atributos do solo. O processo de montagem e estruturação deste banco de dados ocorreu em diferentes etapas (Figura 2).

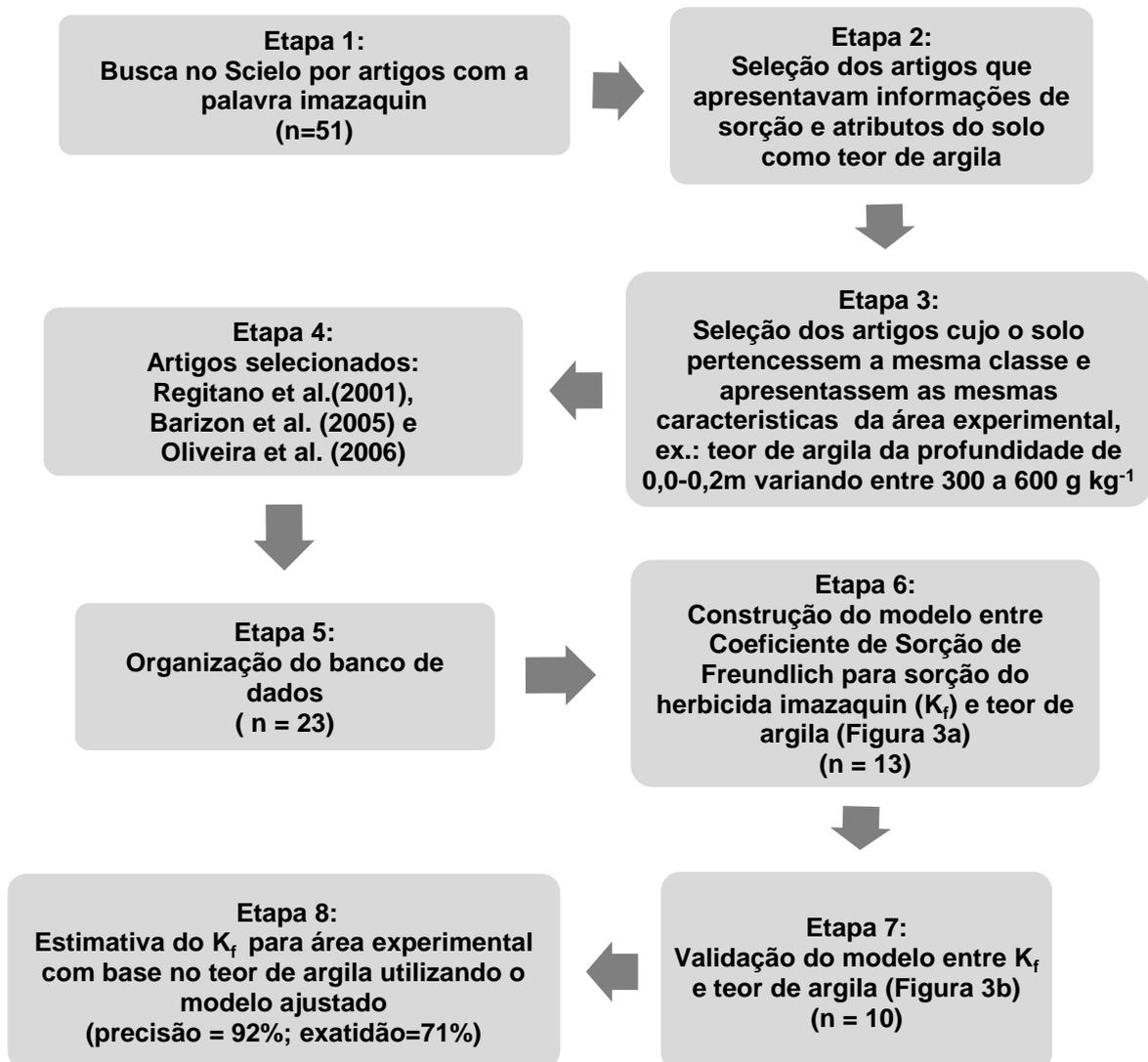


Figura 2. Fluxograma da metodologia de meta-análise, para determinação da sorção do herbicida imazaquim ao solo.

Foi construído modelo matemático a partir da análise de regressão entre o teor de argila com o potencial de sorção do herbicida imazaquim para os dados selecionados e representativos das classes de solo e características da área experimental.

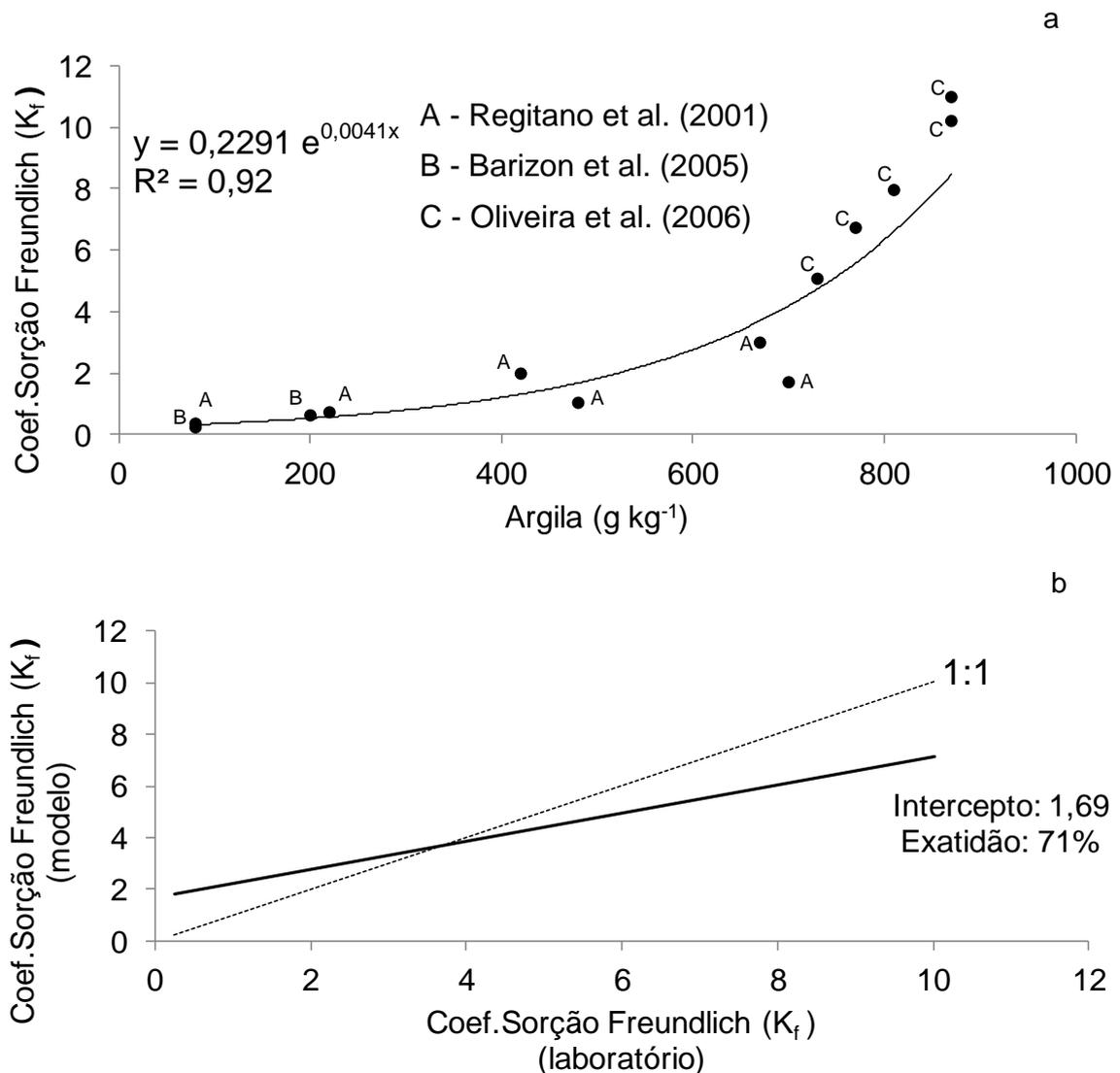


Figura 3. Modelo matemático e gráfico de regressão, entre o coeficiente de Freundlich para sorção do herbicida Imazaquim e o teor de argila (a). Modelo de validação dos dados (b).

Após a obtenção do modelo e validação do matemático que estima a sorção do imazaquim, a partir dos teores de argila da meta-análise, foi calculado o coeficiente de Freundlich para sorção do herbicida imazaquim (K_f) em cada um dos 241 pontos da área experimental utilizando os teores de argila observados.

3.2.4 Análise dos dados

3.2.4.1 Estatística descritiva

Foi calculada a média e o desvio-padrão (DP) para os atributos químicos, mineralógicos, físicos, K_f e da cor dos solos. As médias das variáveis estudadas em relação às classes pedológicas e geológicas foram comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade por meio da utilização do software estatístico Minitab, versão 13.1 (MINITAB, 2000).

Os dados referentes aos atributos da cor, químicos e físico do solo foram hierarquizados em grupos, baseados na técnica dos quantis, medida separatriz que corresponde a uma proporção acumulada, dos valores de K_f : Classe Muito Alta (2,06 a 2,90), Alta (1,67 a 2,05), Moderada (1,24 a 1,66), Baixa (0,83 a 1,22) e Muito Baixa (0,32 a 0,82). Para cada classe de sorção foi calculada a média para Valor, Cromo, Matiz, IAV, pH e MO. Estas informações foram utilizadas para construir gráficos de dispersão e representar a relação da variável dependente (K_f) em função das variáveis independentes. Também foram construídos gráficos de dispersão e obtidos os modelos de regressão entre os atributos mineralógicos e o K_f .

3.2.4.2 Geoestatística

A análise da dependência espacial dos dados foi feita por meio da geoestatística (VIEIRA et al., 1983), utilizando-se os variogramas que foram estimados com base nas pressuposições de estacionariedade da hipótese intrínseca. Os variogramas foram modelados com o auxílio do software GS+ - Geostatistics for Environmental Sciences (ROBERTSON, 1998) e os modelos matemáticos ajustados aos variogramas experimentais, a partir dos quais foi determinado o grau de dependência espacial dos seguintes atributos: pH, MO, Argila, K_f , Matiz, Valor, Cromo e IAV.

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 as propriedades em que foi

identificada a presença de tendência, 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).

Os variogramas experimentais foram escolhidos com base no número de pares envolvidos no cálculo da semivariância dos primeiros lags, presença de patamar claramente definido, valor do R^2 para o modelo ajustado e validação cruzada, coeficiente linear e angular da regressão entre valores observados e estimados, e soma de quadrado dos resíduos (SQR) obtidos para o ajuste do modelo.

Os valores interpolados por meio da krigagem foram usados para construção de mapas de padrão espacial dos atributos estudados por meio do software ArcGIS, versão 10.2 (ESRI, 2010).

3.3 Resultados e Discussão

A razão $Hm/(Hm+Gt)$ apresentou as maiores médias nos solos do DA e a menor média no LVEf1.1 - DCE, os demais grupamentos não diferiram destes (Tabela 1). Kämpf; Curi (2000) afirmaram que os óxidos de Fe são importantes componentes em solos tropicais e assim caracterizam-se como indicadores pedoambientais sensíveis. Os solos estudados são altamente intemperizados e originados a partir de materiais de origem com presença de Fe, favorecendo concomitantemente a formação da argila e óxidos de ferro (HANESCH; SCHOLGER, 2005). Já a razão $Ct/(Ct+Gb)$ não apresentou diferença entre os grupamentos (pedologia + geologia).

Os valores médios das razões $Ct/(Ct+Gb)$ e $Hm/(Hm+Gt)$ são 0,80 e 0,77 respectivamente, resultados estes semelhantes os encontrados por Montanari et al. (2010) em estudos sobre a mineralogia de Latossolos na região nordeste do estado de São Paulo. Tais valores indicam a alta presença de ferro nos materiais de origem da área estudada (SCHWERTMANN; KÄMPF 1985). Essa é uma característica típica dos Latossolos brasileiros, onde os altos níveis de intemperização resultam no acúmulo de óxidos de ferro e alumínio (UEHARA, 1988; ALLEONI; CAMARGO 1995).

Verifica-se que o K_f apresenta seus maiores valores médios nos Latossolos férricos originados de basalto e a menor média de K_f foi encontrada no grupamento LVd3.4 - DCE. A Argila apresentou padrão semelhante ao K_f , com os maiores valores médios nos Latossolos férricos localizados em área de basalto e depósito colúvio eluvionar. Embora o material de origem apresente influências na textura do solo (SIQUEIRA et al., 2014), é esperado maior influência das unidades de mapeamento pedológicas, devido ao teor de argila ser considerado como atributo diagnóstico na identificação destas (EMBRAPA, 2006).

Os maiores teores de MO foram constatados nos Latossolos argilosos, sem apresentar diferença entre os compartimentos geológicos que estes solos ocorreram. Essa relação entre a argila e MO pode ser explicada, dentre outros motivos, devido a menor amplitude térmica e menor aeração dos solos argilosos, sendo estas características desfavoráveis à decomposição da MO; além destes solos com maiores teores de argila apresentarem características de maior armazenamento de água e geralmente, melhor fertilidade do solo, propiciando um maior desenvolvimento de vegetação, resultando em maior quantidade de material vegetal para formação de matéria orgânica.

Os resultados indicam também que a área possui um grande aporte de MO, com média geral em torno de 30 g dm^{-3} (Tabela 1), corroborando os resultados encontrados por Souza et al. (2003) para Latossolos no nordeste paulista. Estes valores podem estar relacionados ao incremento de MO resultante do sistema de colheita de cana crua (SOUZA et al., 2006).

Já o pH apresentou os maiores valores nos solos de textura média (LVd3.1-DCE; LVd3.4-DCE; e LVd3.1DA) diferindo dos solos férricos argilosos (LVef1.1-DCE; LVdf1.1-B), enquanto os demais grupamentos não diferiram destes citados. Diversos autores (SILVEIRA et al., 2000; CARVALHO et al., 2002; CARVALHO et al., 2003; SILVA et al., 2003), relataram ter encontrado em seus estudos baixa variação do pH do solo. De acordo com Oliveira et al. (2006), o pH é um atributo importante, pois influencia tanto na sorção quanto na atividade das moléculas de herbicida, uma vez que afeta as características iônicas do solo, da matéria orgânica e da argila.

Tabela 1. Médias e desvios padrão dos atributos estudados, por compartimentos geológicos e pedológicos⁽³⁾.

| Atributos | Estatística | Geologia | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|-----------------------------|-------------|-----------------------|---------|--------|---------|----------------------------|--------|--------|----|--------------------|--------|---------|----|--------|-----|--------|----|--------|----|
| | | Basalto - Serra Geral | | | | Depósito Colúvio Eluvionar | | | | Depósito Aluvionar | | | | | | | | | |
| | | Pedologia | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| | | LVef1.1 | LVdf1.1 | | LVef1.1 | LVdf1.1 | LVd3.1 | LVd3.4 | | LVdf1.1 | LVd3.1 | LVAd3.1 | | | | | | | |
| K _f ¹ | MÉDIA | 2.03 | a | 1.93 | ab | 1.94 | ab | 1.71 | b | 1.03 | c | 0.56 | d | 0.91 | cd | 1.14 | c | 0.85 | cd |
| | DP | 0.65 | | 0.85 | | 0.44 | | 0.45 | | 0.56 | | 0.17 | | 0.27 | | 0.35 | | 0.16 | |
| Argila ¹ | MÉDIA | 512.73 | a | 491.00 | ab | 511.84 | a | 481.53 | a | 335.04 | b | 207.40 | c | 328.00 | bc | 380.20 | b | 314.50 | b |
| | DP | 115.70 | | 146.20 | | 77.18 | | 69.93 | | 126.02 | | 65.88 | | 81.17 | | 72.05 | | 48.30 | |
| MO ¹ | MÉDIA | 33.06 | a | 26.30 | bc | 32.63 | a | 33.28 | a | 26.80 | b | 21.81 | c | 26.00 | abc | 29.25 | b | 25.89 | bc |
| | DP | 6.71 | | 2.64 | | 5.86 | | 5.08 | | 3.99 | | 4.49 | | 5.57 | | 5.74 | | 3.33 | |
| pH ¹ | MÉDIA | 4.98 | ab | 4.69 | b | 4.87 | b | 5.06 | ab | 5.23 | a | 5.28 | a | 5.00 | ab | 5.24 | a | 5.14 | ab |
| | DP | 0.37 | | 0.27 | | 0.29 | | 0.48 | | 0.41 | | 0.33 | | 0.40 | | 0.42 | | 0.26 | |
| Matiz ¹ | MÉDIA | 4.72 | ab | 4.67 | ab | 4.74 | ab | 4.66 | b | 4.81 | a | 4.87 | a | 4.63 | ab | 4.74 | ab | 4.97 | a |
| | DP | 0.25 | | 0.18 | | 0.27 | | 0.25 | | 0.29 | | 0.31 | | 0.03 | | 0.19 | | 0.24 | |
| Valor ¹ | MÉDIA | 3.28 | ab | 3.34 | ab | 3.27 | ab | 3.24 | ab | 3.15 | b | 3.25 | ab | 3.45 | ab | 3.28 | ab | 3.41 | a |
| | DP | 0.22 | | 0.12 | | 0.23 | | 0.29 | | 0.17 | | 0.13 | | 0.05 | | 0.15 | | 0.09 | |
| Croma ¹ | MÉDIA | 6.58 | ab | 6.81 | a | 6.33 | bc | 6.27 | bc | 6.15 | c | 6.03 | c | 6.45 | abc | 6.40 | b | 6.33 | bc |
| | DP | 0.29 | | 0.18 | | 0.24 | | 0.32 | | 0.31 | | 0.26 | | 0.18 | | 0.20 | | 0.20 | |
| IAV ¹ | MÉDIA | 0.25 | b | 0.23 | b | 0.26 | ab | 0.27 | a | 0.27 | a | 0.26 | ab | 0.24 | ab | 0.25 | b | 0.23 | b |
| | DP | 0.03 | | 0.01 | | 0.03 | | 0.03 | | 0.02 | | 0.02 | | 0.01 | | 0.02 | | 0.01 | |
| Hm/(Hm+Gt) ² | MÉDIA | 0.74 | ab | --- | | 0.68 | b | 0.76 | ab | 0.77 | ab | --- | | --- | | 0.84 | a | 0.92 | a |
| | DP | | | --- | | 0.06 | | 0.03 | | | | --- | | --- | | 0.08 | | | |
| Ct/(Ct + Gb) ² | MÉDIA | 0.77 | a | --- | | 0.78 | a | 0.80 | a | 0.80 | a | --- | | --- | | 0.82 | a | 0.84 | a |
| | DP | | | --- | | 0.01 | | 0.05 | | | | --- | | --- | | 0.02 | | | |

¹ n=241; ² n=12; K_f, Coeficiente de Freundlich para sorção do herbicida imazaquim; MO, Matéria orgânica; IAV, Índice de avermelhamento; Hm, hematita; Gt, Goethita; Ct, Caulinita; Gb, Gibbsita. ⁽³⁾ Médias seguidas de mesma letra na linha, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Avaliando os componentes de cor, matiz (comprimento de onda da luz), valor (brilho ou tonalidade), croma (intensidade ou pureza em relação ao cinza) e IAV (índice formado pela combinação destes três componentes), verifica-se que o IAV, apresentou valores médios mais altos no compartimento geológico DCE. O componente Valor apresentou o nível mais alto no LVd3.1 - DA e o mais baixo no LVd3.1 - DCE. Os valores mais altos de Croma foram observados nos Latossolos férricos argilosos de formação basáltica, enquanto o Matiz apresentou os maiores valores nos grupamentos LVd3.1 - DCE, LVd3.4 - DCE e LVAd3.1 - DA.

Fernandes et al. (2004) sugerem o uso da ERD na caracterização de solos brasileiros, especialmente os Latossolos, por terem alto nível de intemperismo. 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 em níveis categóricos mais altos.

O comportamento espectral do solo depende diretamente de sua composição química, física, biológica e mineralógica. Como os solos apresentam variações em sua composição e com o avanço no conhecimento das relações existentes entre reflectância espectral e as características dos solos, é possível prever de maneira rápida, confiável e não invasiva, várias características mineralógicas, físicas e químicas do solo (SHEPHERD; WALSH, 2002; DALMOLIN et al., 2005), sendo exatamente estas características que influenciam na sorção de herbicidas do grupo das imidazolinonas (REGITANO et al., 2001; OLIVEIRA JÚNIOR et al., 2001; ROCHA et al., 2003). Logo, denota-se a importância de correlacionar o K_f com os componentes de cor, bem como com os atributos mineralógicos, teores de argila, MO e pH do solo, a fim de facilitar o entendimento da dinâmica de sorção desta molécula nos solos (Figuras 4 e 5).

Verifica-se correlação positiva entre o K_f e a MO, e correlação negativa entre o K_f e o pH do solo, com coeficiente de determinação significativo ($p=0,01$) para o pH (Figura 4). A molécula do imazaquim contém dois grupos funcionais ionizáveis: um grupo carboxílico (ácido, $pK_a = 3,8$) e um grupo quinolina (básico, $pK_a = 2,0$) (STOUGAARD et al., 1990). No valor médio de pH dos solos estudados neste experimento (5,1), a maioria das moléculas do imazaquim apresenta-se predominantemente na forma aniônica, sendo repelidas pelos sítios com cargas

negativas dominantes na superfície destes solos intemperizados, contribuindo para uma redução na sorção (BARIZON et al., 2005).

No entanto, estes mesmos autores (BARIZON et al., 2005) mencionam que a repulsão causada pelas forças eletrostáticas não pode ser considerada o único mecanismo envolvido na baixa sorção do imazaquim em solos. A baixa afinidade do imazaquim com a matriz do solo pode estar relacionada também com a redução de sua hidrofobicidade (REDDY; LOCKE, 1996). Tal fato pode ser atribuído ao aumento da solubilidade em água do imazaquim, devido a grande quantidade de moléculas dissociadas ($\text{pH}_{\text{solo}} > \text{pK}_a$ imazaquim). O aumento da solubilidade em água diminui a hidrofobicidade e assim a capacidade de sorção do imazaquim nos colóides orgânicos do solo.

Outros autores também reforçam a ideia que a sorção do imazaquim depende da especiação da molécula, sendo influenciada tanto por interações hidrofóbicas com a matéria orgânica do solo, quanto por interações não-hidrofóbicas com a fração mineral do solo (REGITANO et al., 1997; REGINATO et al., 2001).

Os óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio são importantes constituintes da fração argila dos solos tropicais. As características de superfície e de carga fazem com que essas argilas participem de todas as reações de superfície que ocorrem no solo (KÄMPF; CURI, 1991). A Hm, Gt, Ct e Gb apresentaram correlação positiva com o Kf, com coeficientes de determinação significativos ($p < 0,01$), ou seja, com o aumento do teor destes minerais, aumenta-se o coeficiente de sorção do herbicida imazaquim (Figura 4).

A sorção do herbicida imazaquim é dependente da quantidade de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio existentes nos solos (GOETZ et al., 1986). Novo et al. (1997) também mencionaram que pode haver sorção dessa molécula por óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, principalmente em Latossolos.

O imazaquim é uma molécula de natureza anfótera, isto é, pode agir tanto como ácido, quanto como base. Se estiver na presença de ácido, se comportará como uma base; se estiver na presença de uma base, se comportará como um ácido (LEHNINGER et al., 2002). De acordo com Green (1974) e Loux et al. (1989), o processo de sorção de herbicidas ácidos pelos solos, podem apresentar uma menor contribuição do teor de argila, porém é favorecido pelos óxidos e hidróxidos de ferro

e alumínio e pela caulinita, uma vez que a carga superficial desses minerais de argila é dependente do pH, e a sorção é resultado da troca iônica entre minerais e o herbicida em sua fase aniônica em valores baixos de pH (ROSSI et al., 2005).

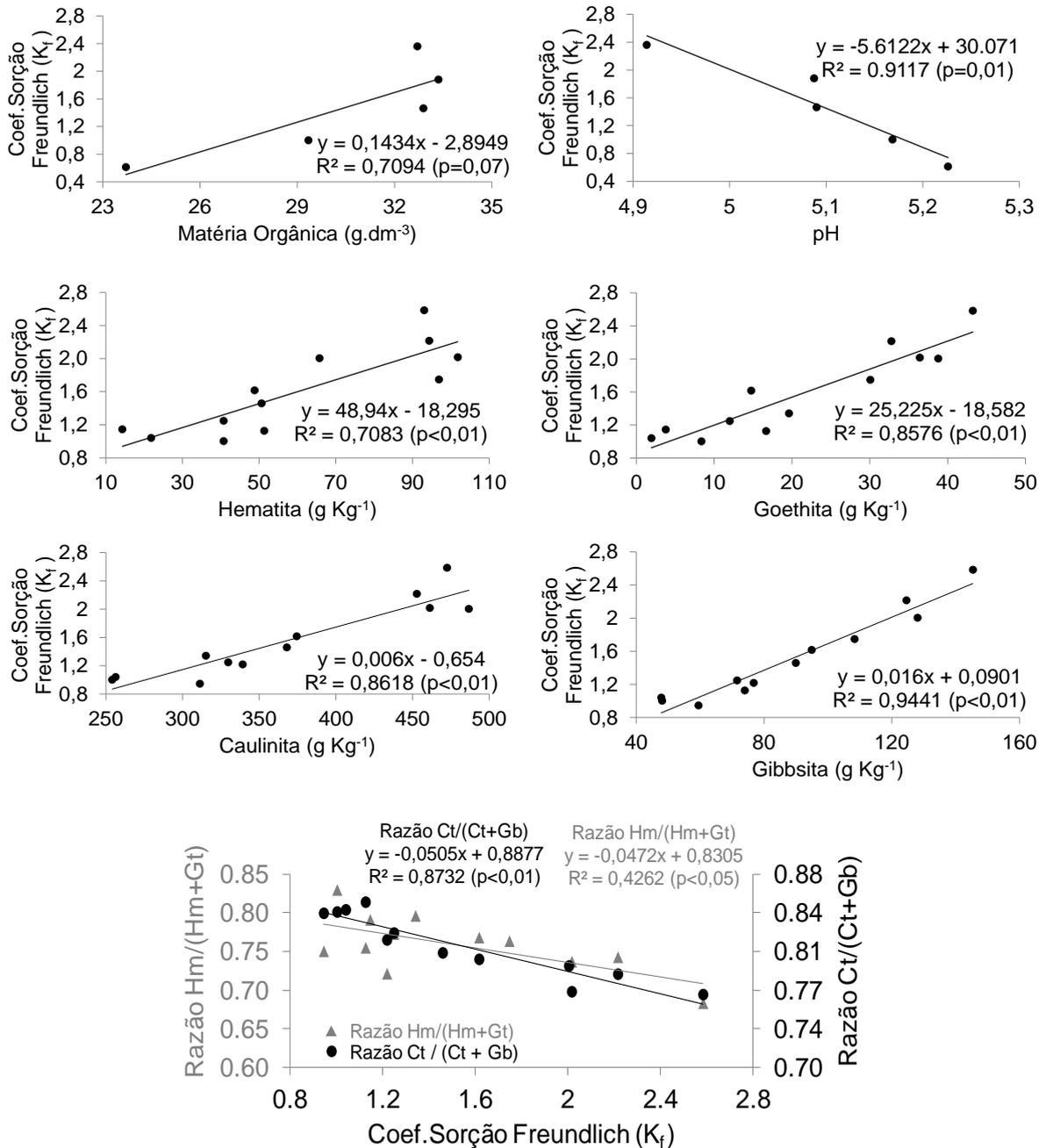


Figura 4. Análise de regressão do coeficiente de sorção de Freundlich para sorção do herbicida imazaquim com matéria orgânica, pH e atributos mineralógicos, do solo.

Algumas propriedades dos solos, como pH, teor de argila, ferro total, matéria orgânica e cristalinidade dos óxidos de ferro, podem reduzir a eficácia dos herbicidas, influenciando as perdas por lixiviação (UPCHURCH, 1966). Paula Neto (1999) estudando a influência de atributos de diferentes classes de solos (LVA, LV, LVdf e NV) na eficácia do sulfentrazone, herbicida de grupo químico diferente do estudado no presente trabalho, no controle da tiririca (*Cyperus rotundus*), observou que a eficácia diminuiu com o aumento no teor de óxidos de ferro e que os teores de argila e de matéria orgânica não afetaram a eficácia, sendo o LVdf e o NV os solos mais limitantes ao uso desse herbicida. Logo o potencial de sorção pode estar mais associado a qualidade do que ao teor da argila; locais com teores de argila próximos, podem ter potencial de sorção muito distintos devido ao tipo dos minerais presentes na fração argila (ROSSI et al., 2005).

Novo et al. (1997) mencionaram que, em geral, os minerais de argila têm carga negativa, mas a caulinita, em pH ácido desenvolve cargas positivas em suas arestas (RAIJ, 1986), porém sua contribuição ao processo de sorção aniônica é pequena devido a sua baixa superfície específica. Por outro lado, os óxidos de ferro e alumínio (hematita, goethita e gibbsita) têm ponto de carga zero (PCZ) próximo ao pH 7,0 (RAIJ, 1986). Isso significa que para pH inferior a 7,0, que foi o encontrado em todas as amostras de solo deste trabalho, ocorre predomínio de cargas positivas favorecendo a sorção iônica do imazaquim, o que foi também demonstrado por Goetz et al. (1986) e Novo et al. (1997).

O gráfico de dispersão entre o K_f com as razões $Hm/(Hm+Gt)$ e $Ct/(Ct+Gb)$ apresenta correlação negativa entre estes atributos, com coeficientes de determinação significativos, $p < 0,05$ e $p < 0,01$, respectivamente. Observa-se que valores mais baixos das relações mineralógicas correspondem a maiores valores de K_f , ou seja, os resultados apontam que solos com predominância de goethita em relação a hematita e com predominância de gibbsita em relação a caulinita tendem a apresentar maior capacidade de sorção do herbicida.

Tal fato pode ser explicado pela área de superfície específica (ASE) destes minerais. Souza Júnior et al. (2007) mencionaram que a magnitude da ASE no solo depende principalmente da textura e da mineralogia da fração argila, afetando, por consequência, a capacidade de troca catiônica - CTC (CURTIN; SMILLIE, 1976;

CHURCHMAN; BURKE, 1991), a capacidade de troca aniônica - CTA (SAMBATTI et al., 2002), a retenção de água em elevados potenciais e a dinâmica de solutos, poluentes e biocidas (CARTER et al., 1986; CHURCHMAN; BURKE, 1991; PETERSEN et al., 1996). Logo, o conhecimento dos valores de ASE das partículas constitui uma importante ferramenta no entendimento dos fenômenos de superfície.

A caulinita, quantitativamente, pode ser considerada, na grande parte dos solos tropicais e subtropicais, o principal componente da fração argila, apresentando ASE entre 5 a 40 m² g⁻¹ (DIXON, 1989). Os óxidos de Fe na fração argila dos solos apresentam elevados valores de ASE, devido seu reduzido tamanho de partícula, sendo a ASE ainda aumentada por imperfeições na estrutura cristalina dos minerais (BORGGAARD, 1983; SAMBATTI et al., 2002). Em tais situações, valores de ASE superiores a 1.000 m² g⁻¹ (BORGGAARD, 1983) são registrados para os óxidos de Fe pouco cristalinos (SOUZA JÚNIOR et al., 2007).

Russel et al. (1974) em seus estudos apontam a ASE de 96 m² g⁻¹ para as faces principais e 8 m² g⁻¹ para as faces das bordas de gibbsitas. Mesquita Filho; Torrente (1993) verificaram em solos do cerrado brasileiro que as gibbsitas apresentavam ASE de 58 m² g⁻¹ e as caulinitas ASE de 53 m² g⁻¹. Siqueira et al. (2015), trabalhando na mesma área experimental do presente estudo, constataram menor diâmetro médio do cristal para as goethitas em relação as hematitas, caracterizando maior ASE para as goethitas.

Rolim Neto et al. (2004), analisando a ASE de minerais de argila do tipo 1:1, óxidos de Fe e Al, em horizonte diagnóstico de solos do estado de Minas Gerais, encontraram valores médios de ASE de 53,34m² g⁻¹ para a hematita, 114,44m² g⁻¹ para a goethita, 55,73m² g⁻¹ para a caulinita e 84,80m² g⁻¹ para a gibbsita.

Além do teor, é importante levar em conta a ASE dos minerais, para não realizar uma análise equivocada. Nas amostras analisadas no presente estudo o teor de hematita variou de 14,32 a 101,81g kg⁻¹ e o K_f de 0,94 a 2,58, sendo que para essa mesma variação de K_f o teor de gibbsita variou de 47,88 a 145,40g kg⁻¹, ou seja, houve uma variação de sete vezes no teor de hematita e somente três vezes no teor de gibbsita, e mesmo assim a gibbsita pode ter o mesmo peso que a hematita na dinâmica de sorção, fato que pode ser explicado por sua maior ASE da gibbsita (ROLIM NETO et al., 2004).

A questão da ASE dos minerais também pode ser relacionada com o efeito residual do herbicida, pois quanto maior a ASE, maior o poder sorção, e mais lentamente o herbicida vai sendo liberado, portanto, maior a probabilidade de se aumentar o efeito residual dos herbicidas, propiciando um maior controle sobre o banco de sementes de plantas daninhas existentes na área. O período no qual um herbicida permanece biologicamente ativo no solo tem grande importância prática na determinação de seu desempenho (HILTBOLD, 1974), mas vale ressaltar que o efeito residual dos herbicidas no solo está relacionado com vários processos combinados, tais como, absorção pelas plantas, volatilização, lixiviação e adsorção no solo, e de processos de transformação, incluindo degradação microbiana, química e fotolítica (RENNER et al., 1988a).

Avaliando os gráficos de dispersão e modelos de regressão entre o K_f e os componentes de cor (Figura 5), verifica-se correlação negativa entre o K_f e a Matiz e entre K_f e o Valor; e correlação positiva do K_f com o Croma e com o IAV. Sendo que somente o Matiz ($p < 0,05$) e Croma ($p < 0,01$) apresentaram coeficientes de determinação significativos.

O matiz do solo está relacionado com as cores vermelha, amarela e das misturas de ambas, estando estas cores relacionadas aos teores de hematita e goethita do solo (EMBRAPA, 2006), que são também responsáveis pela sorção de herbicidas em solos intemperizados tropicais (GOETZ et al. 1986). Já o Valor e Croma estão relacionados com a luminosidade (preto) e a pureza da cor em relação ao cinza, respectivamente (DEMATTÊ et al., 2011), enquanto o IAV se trata de um índice criado a partir destes três componentes da cor, baseados no sistema Munsell (BARRÓN et al. 2000).

Peluco et al. (2015), trabalharam com Latossolos do Estado de São Paulo, utilizando a técnica da Espectroscopia de Reflectância Difusa e não encontraram correlação entre o IAV e a capacidade de sorção dos solos, mas estudando áreas com diferentes potenciais de adsorção de fósforo.

A relação inversa do K_f com a Matiz (Figura 5) indica que neste estudo os solos mais avermelhados apresentaram maior capacidade de sorção do herbicida, o que pode estar relacionado a um alto teor hematita nestas áreas, que garante coloração mais avermelhada aos solos (BARRÓN; TORRENT, 1986).

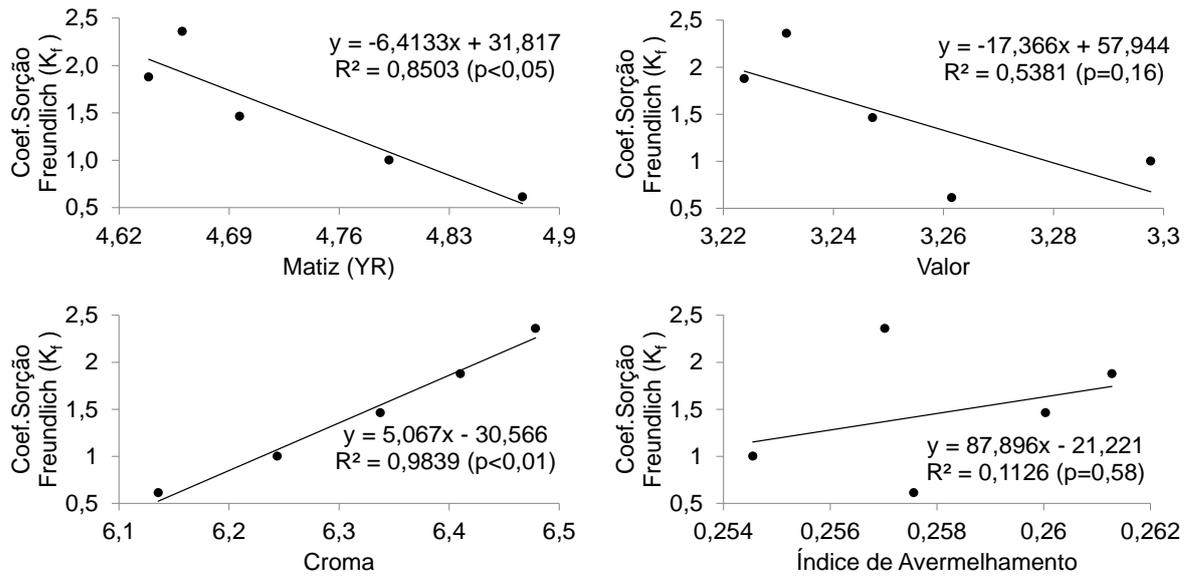


Figura 5. Análise de regressão do coeficiente de sorção de Freundlich para sorção do herbicida imazaquim com componentes de cor do solo.

Todas as variáveis estudadas apresentaram dependência espacial (CAMBARDELLA et al. 1994), sendo que 62,5% dos atributos estudados (K_f , Argila, Valor, Cromas e IAV) apresentaram o modelo esférico com o melhor ajuste à estrutura da variabilidade espacial dos dados, enquanto para 37,5% dos atributos estudados (MO, pH e Matiz) foi o modelo exponencial que apresentou melhor ajuste à estrutura da variabilidade espacial dos dados (Tabela 4). Carmo et al. (2016) trabalhando com a cor do solo na caracterização de áreas específicas de manejo para cultura do café, também encontraram melhor ajuste dos variogramas da argila e dos componentes da cor (Matiz, Valor, Cromas e IAV) ao modelo esférico.

O modelo esférico é o que predomina nos trabalhos em ciência do solo (GREGO; VIEIRA, 2005). Mcbratney; Webster (1986) estudaram modelos de ajuste do semivariograma para os atributos do solo e relataram que quando o modelo esférico se apresenta como a melhor opção para o ajuste do semivariograma, isso indica que ocorrem variações abruptas desses atributos em nível de campo. Outros autores relatam que essas variações podem estar relacionadas aos tipos de material de origem (RAUCH 2011), relevo (CAMARGO et al. 2013) e solo (MONTANARI et al. 2010).

A modelagem dos variogramas é estritamente relacionada à experiência do pesquisador (FRANZEN et al., 2006). A escolha do modelo de variograma, bem

como o ajuste de seus parâmetros, tem um viés de subjetividade, assim como o modelo conceitual. Com o intuito de diminuir este tipo de interferência, são recomendados testes de verificação de ajuste. Os mais utilizados são: R^2 (GALLARDO et al., 2007; GUEDES FILHO et al., 2010) e validação cruzada (GUEDES FILHO et al., 2010; VIEIRA et al., 2010; LU et al., 2012). Nestes trabalhos, os atributos estudados apresentaram bons ajustes, com coeficiente angular e linear próximos de 0 e 1, respectivamente.

Tabela 4. Geoestatística para os atributos dos solos estudados (Variogramas).

| Variável | Modelo | Efeito Pepita | Patamar | Alcance | GDE ⁽¹⁾ | R^2 |
|------------------------------|-------------|---------------|---------------|---------|--------------------|-------|
| | | (C_0) | (C_0+C_1) | (m) | (%) | |
| K_f | Esférico | 0,0470 | 0,2390 | 654 | 19,6653 | 0,977 |
| MO (g.dm ⁻³) | Exponencial | 8,9000 | 26,7600 | 435 | 33,2586 | 0,892 |
| pH | Exponencial | 0,0615 | 0,2030 | 513 | 30,2956 | 0,829 |
| Argila (g.Kg ⁻¹) | Esférico | 16,2000 | 94,1000 | 962 | 17,2157 | 0,955 |
| Matiz (YR) | Exponencial | 0,0025 | 0,0592 | 360 | 4,2230 | 0,915 |
| Valor | Esférico | 0,0143 | 0,0480 | 421 | 29,7917 | 0,833 |
| Croma | Esférico | 0,0249 | 0,1068 | 806 | 23,3146 | 0,987 |
| IAV | Esférico | 0,2020 | 1,3860 | 464 | 14,5743 | 0,888 |

⁽¹⁾ GDE, grau de dependência espacial [$C_0 / (C_0 + C_1)$]*100; MO, matéria orgânica; K_f , Coeficiente de Freundlich para sorção do herbicida imazaquim; IAV, Índice de Avermelhamento.

As estimativas dos parâmetros dos modelos indicam que o valor de C_0 para o teor de argila, foi praticamente o dobro do encontrado para o teor de MO, e ambos foram muito superiores aos valores de C_0 obtidos para os demais atributos estudados. Os valores de C_0 indicam a variação não captada pela estrutura de dependência espacial; consistem na soma das variabilidades devido a erros de medida e daquela existente em escala menor que a avaliada (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989). Assim, o maior C_0 para os teores de argila e MO, podem estar relacionados aos erros nos procedimentos de amostragem de solo e análises laboratoriais. Cerca de 80 a 85% do erro total das práticas de manejo do solo podem ser atribuídos à amostragem no campo e de 15 a 20% ao trabalho de laboratório (HAUSER, 1973). Cantarella et al. (2006) relatam que erros em laboratórios são comuns, e que, no Brasil, o erro de análises químicas está na faixa de 3 a 26%, e das análises granulométricas entre 15 e 32%.

Entretanto, ao se estimar o grau de dependência espacial ($GDE = C_0 / (C_0 + C_1) * 100$), nota-se que o teor de argila apresenta forte dependência espacial ($GDE \leq 25\%$) e o teor de MO apresenta grau de dependência espacial moderado

($25\% < GDE < 75\%$). A forte dependência espacial dos atributos do solo está relacionada a sua interação com os fatores intrínsecos (material de origem, clima, relevo), enquanto a dependência espacial moderada é atribuída aos fatores extrínsecos, como o manejo exercido pelas práticas agrícolas (CAMBARDELLA et al., 1994), por exemplo o sistema de colheita de cana crua, e aplicação de grandes quantidades de composto orgânico para a adubação.

Os demais atributos estudados também se enquadram na no grau de dependência espacial médio (pH, e Valor) e forte (K_f , Matiz, Cromo e IAV). De acordo Cambardella et al. (1994), valores de GDE menores ou iguais a 25% indicam dependência espacial forte; entre 25% e 75%, média; e maior que 75%, fraca.

O alcance do semivariograma pode ser utilizado como indicador da homogeneidade do atributo estudado (MONTANARI et al., 2012). Os valores de alcance indicam a máxima distância em que as amostras apresentam dependência espacial (ISAAKS; SRIVASTAVA, 1989) e são utilizados como indicativos do espaçamento mínimo para futuras amostragens (MARQUES Jr et al., 2015). De forma geral, os alcances encontrados neste estudo foram superiores ao espaçamento entre os pontos amostrados, indicando que as amostras estão correlacionadas umas as outras, o que permite a aplicação da krigagem (VIEIRA, 2000).

O valor de alcance encontrado para teor de argila (962m) está relativamente próximo aos alcances encontrados por Campos et al. (2007) em uma litosequência arenito-basalto (alcance da argila = 1211 m) e Matias et al. (2014) em transição arenito-basalto com influência de lamitos (alcance da argila = 930 m). Já para MO, o valor encontrado neste trabalho foi inferior ao encontrado por Cambule et al. (2013) em transição ente arenitos, riolitos e depósitos aluviais (alcance do carbono orgânico do solo = 1400 m).

Resultados semelhantes foram encontrados por outros autores (MARQUES Jr. et al., 2014), os quais verificam uma menor continuidade espacial por parte dos atributos químicos em relação aos atributos físicos e mineralógicos. A semelhança entre os valores de alcance dos componentes de cor com o pH, MO e Argila, que são atributos que influenciam diretamente na sorção do imazaquim, e com o próprio K_f (principalmente entre K_f e o Cromo), pode ser um indicativo da alta associação

espacial entre estes atributos (PELUCO et al., 2013). Esta associação permite que os componentes de cor sejam utilizados como co-variável em estimativas da sorção do herbicida. Cortez et al. (2011) também encontraram valores semelhantes de alcance entre os variogramas dos atributos físicos e químicos de um Latossolo e o da suscetibilidade magnética, atributo que de forma semelhante à cor também tem grande influência da mineralogia do solo e pode ser utilizada como co-variável em estimativas de atributos dos solos.

Atributos do solo que apresentam dependência espacial podem ser interpolados em mapas (krigagem) e as informações inseridas nestes mapas podem ser usadas para visualizar e entender melhor o padrão de distribuição espacial, além de definir diferentes zonas de manejo em uma determinada área (SOUZA et al. 2007). Nesse sentido, a fim de estudar a distribuição espacial dos atributos estudados, foram construídos mapas de padrão espacial (Figura 6).

Os mapas dos atributos estudados apresentam padrão semelhante ao mapa de relevo. Siqueira et al. (2010b) relatam que o relevo tem grande influência na variabilidade espacial dos atributos do solo. Verifica-se também padrão semelhante aos mapas geológico e pedológico, indicando que utilização da carta de solos pode auxiliar no planejamento agrícola. Entretanto, quando se busca um manejo mais específico, é indispensável à aplicação da geoestatística e geração de mapas de padrão espacial, para estudos mais detalhados da variabilidade dos atributos do solo, pois segundo Corá et al. (2004) e Montanari et al. (2005), mesmo os Latossolos, muitas vezes considerados homogêneos pela literatura, apresentam variabilidade.

Os mapas de unidades de mapeamento pedológico ou táxons são delineados por meio do conhecimento tácito de pedólogos (HUDSON, 1992), os quais objetivam minimizar a variância dentro das classes e maximizar as variâncias entre classes mapeadas (CASTRIGNANÓ et al., 2009). Este conhecimento baseia-se principalmente no paradigma solo-paisagem e nas informações geológicas locais (HUDSON, 1992).

Embora estas informações englobem os principais fatores responsáveis pela variabilidade dos atributos do solo, as informações diretas sobre a continuidade espacial dos mesmos frequentemente é ignorada no momento do delineamento.

Diversos autores (McBRATNEY et al., 2003; LEGROS, 2006) propõem a inclusão do conhecimento da variabilidade espacial dos atributos do solo para a composição dos mapas de unidades de manejo. Trangmar et al. (1985) e Minasny; McBratney (2007) ressaltam a importância da distribuição espacial dos atributos do solo para identificar os limites entre classes taxonômicas.

Todos os atributos apresentaram o mesmo padrão de isolinhas. Os maiores valores de K_f se encontram nas áreas com maiores teores de argila e MO e menores valores de pH. Também nas zonas de menores valores dos componentes da cor Matiz e Valor, e maiores valores de Cromo, são observados os locais de maior potencial de sorção do herbicida. A observação dos mapas de padrão espacial corroboram os resultados das correlações estabelecidas nos gráficos de dispersão e modelos de regressão do coeficiente de sorção de Freundlich para sorção do herbicida imazaquim com os atributos estudados (Figuras 3 e 4).

Embora não tenha sido constatada correlação entre o K_f e o IAV (Figura 4), foi constatada pela avaliação dos mapas de padrão espacial, que existe correspondência espacial entre estes atributos, pois se verifica que nas áreas com maior IAV ocorrem os maiores valores de K_f , o que evidencia a importância da geoestatística no aprofundamento dos estudos em ciência do solo. Camargo et al. (2012) apontaram a necessidade de aplicação de técnicas geoestatísticas para estudos de correlação de atributos do solo, enfatizando que a análise de correlação simples aplicada isoladamente é insuficiente nestes tipos de estudos.

A sorção do imazaquim (Figura 6a) vai aumentando da base para o topo, padrão semelhante ao encontrado para o teor de ferro do solo na área experimental, que vai aumentando da parte mais baixa para a parte mais alta (SIQUEIRA et al., 2015), onde se localizam os Latossolos férricos argilosos (Figuras 1). Logo, é esperado que o teor de caulinita diminua da base para o topo, uma vez que Resende (1976) e Dick (1986) relatam que o ambiente pedogenético preferencial da caulinita é aquele com menor teor de ferro.

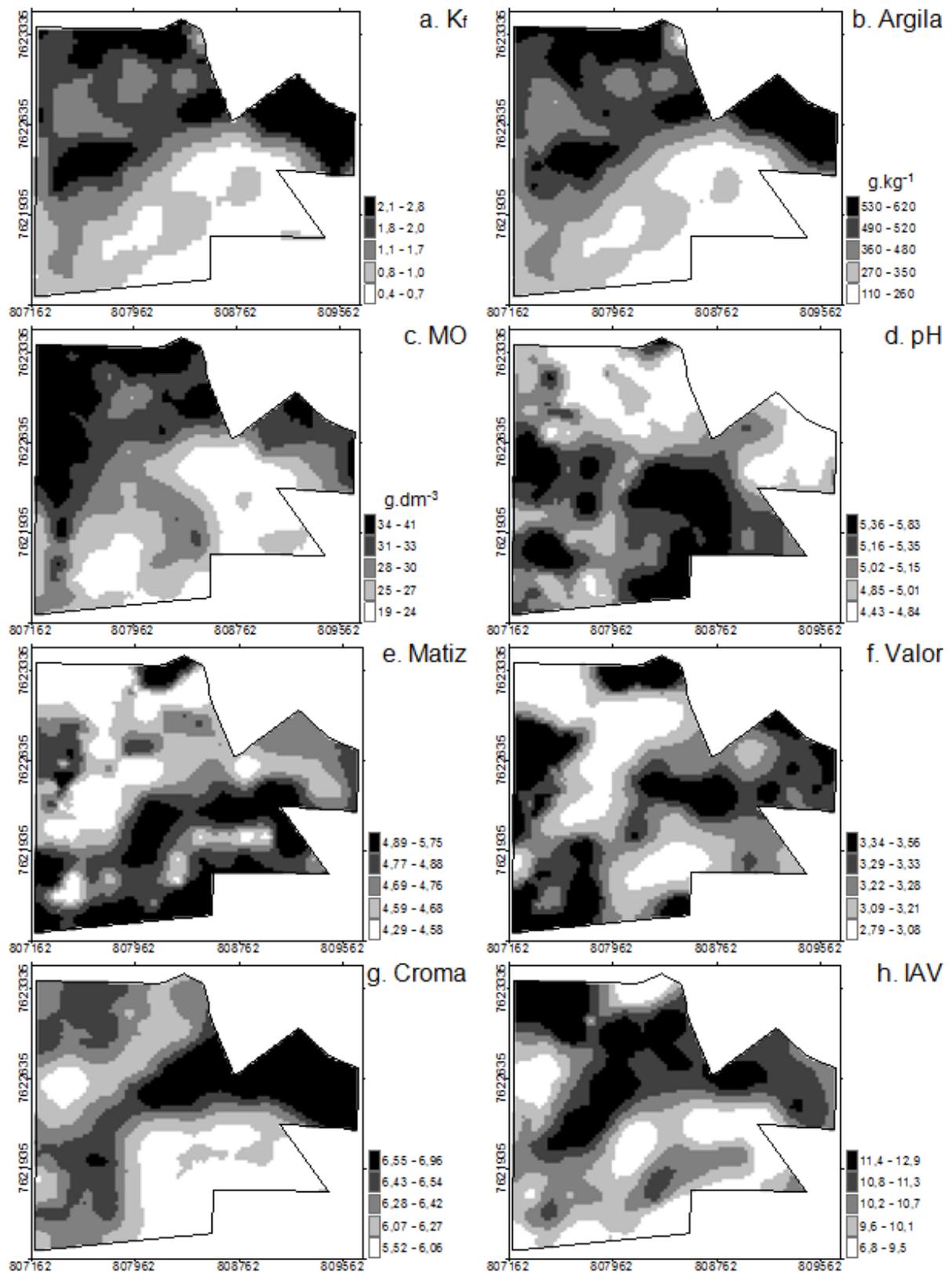


Figura 6. Mapas de variabilidade espacial dos atributos estudados. IAV, Índice de Avermelhamento; K_f , Coeficiente de Freundlich para absorção do herbicida imazaquim; MO, Matéria Orgânica.

O maior teor de Fe favorece a presença de hematita e goethita na área do topo e, são nas áreas maior declividade que são registradas os maiores valores da razão gibbsita/(gibbsita+caulinita) (REATTO et al., 2008), com predominância da gibbsita em posições mais altas na paisagem, o que pode ser explicado pela intensidade dos fluxos hidrológicos que alteram o processo de intemperismo, levando à remoção de silício para posições mais baixas da topossequência (CURI; FRANZMEIER, 1984).

Nas áreas de maiores teores de IAV e Cromo e menores valores de Matiz, são encontrados os maiores teores de Argila, e coincidem com as zonas de maior sorção do herbicida. A espectroscopia de reflectância difusa constitui uma técnica com grande potencial para a determinação rápida e de baixo custo da argila nos solos (SÖRENSEN; DALSGAARD, 2005).

A forte correlação positiva do Cromo com o K_f (Figura 4), pode estar associada ao escurecimento do solo devido à presença de MO (SCHIAVO et al., 2010). Na análise dos mapas de padrão espacial verifica-se que nas zonas de maiores valores de Cromo, estão localizados os maiores teores de MO, coincidindo com os locais de maiores teores de argila e menores valores de pH (Figura 6), porém com o valor mínimo de pH de 4,43, ainda acima que o pKa do imazaquim. Situações estas, todas favoráveis à sorção iônica do imazaquim (GOETZ et al., 1986; NOVO et al., 1997) e demais herbicidas com as mesmas características físico-químicas desta molécula.

3.4 Conclusões

1. A utilização da cor, obtida pela espectroscopia de reflectância difusa, possibilita a identificação de solos com diferentes potenciais de sorção do herbicida imazaquim.
2. Dentre os componentes da cor obtidos por espectroscopia de reflectância difusa, o mais eficiente na estimativa do coeficiente de sorção do herbicida imazaquim é o croma (98% de precisão), seguido pelo matiz (85%) e valor (54%).

3.5 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**, v.7, n.2, p.93-101, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geodrs.2016.02.004>.

ALLEONI, L. R. F.; CAMARGO, A. O. Óxidos de ferro e de alumínio e a mineralogia da fração argila deferrificada de Latossolos Ácricos. **Scientia Agrícola**, v.52, n.3, p.416-421, 1995.

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**, v.262, p.35-44, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.geoderma.2015.07.010>.

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

BARBOSA, R. S. **Erodibilidade de latossolos predita pela suscetibilidade magnética e espectroscopia de reflectância difusa**. 2014. 65 f. Tese - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2014.

BARIZON, R. R. M.; LAVORENTI, A.; REGITANO, J. B.; TORNISIELO, V. L. Sorção e dessorção do imazaquim em solos com diferentes características granulométricas, químicas e mineralógicas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.695-703, 2005.

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

BARRÓN, V.; TORRENT, J. 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.

BONGIOVANNI, R.; LOWENBERG-DEBOER, J. Precision Agriculture and Sustainability. **Precision Agriculture**, v.5, p.359-387, 2004.

BORGGÅRD, O.K. Effect of surface area and mineralogical of iron oxides on their surface charge and anion-adsorption properties. **Clays Clay Mineral**, v.31; p.230-232, 1983.

BRADY, N. C. **The nature and properties of soils**. 8.ed. New York: Macmillan, 1974. 639 p.

BUI, E. N. Data-driven Critical Zone science: A new paradigm. **Science of The Total Environment**, v.568, p.587-593, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.01.202>.

BUI, E. N.; HENDERSON, B. L.; VIERGEVER, K. Knowledge discovery from models of soil properties developed through data mining. **Ecological Modelling**, v.191, p.431-446, 2006. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2005.05.021>.

CAMARGO, L. A. **Mineralogia da argila por difração de raios x e espectroscopia de reflectância difusa em Latossolos sob diferentes superfícies geomórficas**. 2013. 125 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2013.

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

CAMBULE, A. H.; ROSSITER, D. G.; STOOORVOGEL, J. J. A methodology for digital soil mapping in poorly-accessible areas. **Geoderma**, v.192, p.341-353, 2013.

CAMPOS, M. C. C., MARQUES JR., J., PEREIRA, G. T., MONTANARI, R., CAMARGO, L. A. Soil-landscape relationships in a sandstone-basalt lithosequence in Pereira Barreto, São Paulo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.519-529, 2007.

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

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, p. 2213-2225, 2006.

CARMO, D. A. B. ; MARQUES JR, J. ;SIQUEIRA, DIEGO 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** (Online), 2016.

CARTER, A.D. Herbicide movement in soils: principles, pathways and processes. **Weed Research**, v. 40, p.113-122, 2000.

CARTER, D. L.; MORTLAND, M. M.; KEMPER, W. D. Specific surface. In: KLUTE, A., ed. **Methods of soil analysis: Physical and mineralogical methods**. 2.ed. Madison, Soil Science Society of America, 1986. Part 1. p.413-423.

CARVALHO, J. R. P.; SILVEIRA, P. M.; VIEIRA, S. R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, n.8, p.1151-1159, 2002.

CARVALHO, M. P.; TAKEDA, E. Y.; FREDDI, O. S. Variabilidade espacial de atributos de um solo sob videira em Vitória Brasil (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.4, p.695-703, 2003.

CASTALDI, F.; PALOMBO, A.; SANTINI, F.; PASCUCCI S.; PIGNATTI, S.; CASA, R. Evaluation of the potential of the current and forthcoming multispectral and hyperspectral imagers to estimate soil texture and organic carbon. **Remote Sensing of Environment**, v.179, p.54-65, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2016.03.025>.

CASTRIGNANÒ, A.; COSTANTINI, E. A. C.; BARBETTI, R.; SOLLITTO, D. Accounting for extensive topographic and pedologic secondary information to improve soil mapping. **Catena**, n.77, p.28-38, 2009.

CHURCHMAN, G.J.; BURKE, C.M. Properties of subsoil in relation to various measures of surface area and water content. **Journal of Soil Science**, v.42, p.463-478, 1991.

COMPANHIA DE PESQUISA DE RECURSOS MINERAIS - CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. **Geobank - Mapa geológico do estado de São Paulo, na escala 1:750000**. Disponível em: <http://geobank.sa.cprm.gov.br/>. Acesso em 29 dez. 2012.

CORÁ, J.E.; ARAUJO, A.V.; PEREIRA, G.T.; BERALDO, J.M.G. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.1013-1021, 2004.

CORTEZ, L. A.; MARQUES JR., J.; PELUCO, R. G.; TEIXEIRA, D. B.; SIQUEIRA, D. S. Suscetibilidade magnética para identificação de áreas de manejo específico em citricultura. **Energia na agricultura**, Botucatu, v.26, p.60-79, 2011.

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

CURTIN, D.; SMILLIE, G.W. Estimation of components of soil cation exchange capacity from measurements of specific surface and organic matter. **Soil Science Society of American Journal**, v.40, p.461-462, 1976.

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

DAVIS, J.C. **Statistics and data analysis in geology**, second ed. John Wiley, New York. 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**, v.70, p.590-597, 2011.

DEMATTÊ, J. A. M.; GALDOS, M. V.; GUIMARÃES, R.; GENÚ, A. M.; NANNI, M. R.; ZULLO JR., J. Quantification of tropical soil attributes from ETM+/Landsat-7 data. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 8, n. 1, p. 3.813-3.829, 2007.

DICK, D. P. **Caracterização de óxidos de ferro e adsorção de fósforo na fração argila de horizontes B Latossólicos**. Porto Alegre, 1986. 196p. Dissertação (Mestrado em Solos) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul.

DIXON, J.B. Kaolin and serpentine group minerals. In: DIXON, J.B. & WEED, S.B., eds. **Minerals in soil environments**. 2.ed. Madison, Soil Science Society of America, 1989. p.467-525.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA Centro Nacional e Pesquisa em Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: Embrapa-SPI; Rio de Janeiro: Embrapa-Solos, 2006. 306 p.

EMBRAPA. EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Manual de métodos de análise de solo**. 2 ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

Environmental Systems Research Institute - **ESRI. ArcGIS. Professional GIS for the desktop, versão 10.2**. Environmental Systems Research Institute, 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**, v.28, n.2, p.245-257, 2004.

FRANZEN, D. W., NANNA, T.; NORVELL, W. A. A Survey of Soil Attributes in North Dakota by Landscape Position. **Agronomy Journal**, v.98, p. 1015-1022, 2006.

GALLARDO, A.; PARAMÁ, R. Spatial variability of soil elements in two plant communities of NW Spain. **Geoderma**, v.139, p.199-208, 2007.

GOETZ, A.J., WEHTJE, G., WALKER, R.H., HAJEK, B. Soil solution and mobility characterization of imazaquim. **Weed Science**, Champaign, v.34, n.5, p.788-793, 1986.

GORE, R. D.; CHAUDHARI, R. H.; GAWALI, B. W. Creation of Soil Spectral Library for Marathwada Region. **International Journal of Advanced Remote Sensing and GIS**, v.5, n.6, p.1787-1794, 2016.

GREEN, R. E. Pesticide-clay-water interactions. In: GUELZI, W.D. (Ed.) **Pesticides in soil and water**. Madison: SSSA, 1974. p. 3-37.

GREGO, C. R.; VIEIRA, S. R. Variabilidade espacial de propriedades físicas de solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, n.2, p.169-177, 2005.

GUEDES FILHO, O.; VIEIRA, S.R.; CHIBA, M.K.; NAGUMO, C.H.; DECHEN, S.C.F. Spatial and temporal variability of crop yield and some RhodicHapludox properties under no-tillage. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p.1-14, 2010.

GUPTA, A.; DAS, B. S.; KUMAR, A.; CHAKRABORTY, P; MOHANTY, B. Rapid and Noninvasive Assessment of Atterberg Limits Using Diffuse Reflectance Spectroscopy. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, 2016. doi:10.2136/sssaj2015.11.0402.

HANESCH, M., SCHOLGER, R. The influence of soil type on the magnetic susceptibility measured throughout soil profiles. **Geophysical Journal International**, v.161, p.50-56, 2005.

HAUSER, G. F. **The calibration of soil tests for fertilizer recommendation**. Roma, FAO, 1973. 71p. (Soil Bull., 18).

HE, H.; YU, J.; CHEN, G.; LI, W.; HE, J.; LI, H. Acute toxicity of butachlor and atrazine to freshwater green alga *Scenedesmus obliquus* and cladoceran *Daphnia carinata*. **Ecotoxicology and Environmental Safety Journal**, v. 80, p. 91-96, 2012a.

HILTBOLD, A.E. Persistence of pesticides in soil. In: **Pesticides in soil and water**. Madison: Soil Science Society of America, 1974. p.203-222.

HUDSON, B. D. The Soil Survey as Paradigm-Based Science. **Soil Science Society of American Journal**, n.56, p.836-841, 1992.

IBÁÑEZ, J. J.; MONTANARELLA, L. **Magic Numbers: A meta-analysis for enlarging the scope of a universal soil classification system**. European Commission. Joint Research Centre. Institute for Environment and Sustainability. Luxembourg: Publications Office of the European Union, 2013. 135p.

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

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

KÄMPF, N.; CURI, N. Argilominerais e óxidos em solos. In: LEPSCH, I. F. et al. (Eds.) **Gênese, morfologia, classificação e levantamento de solos**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1991.

KÄMPF, N.; CURI, N. Óxidos de ferro: Indicadores de ambientes pedogênicos. In: NOVAIS R. F., ALVAREZ V. V. H.; SCHAEFER, C. E. G. R. **Tópicos em ciência do solo**, Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1. p.107-138, 2000.

KARATHANASIS, A. D.; HAJEK, B. F. Revised methods for quantitative determination of minerals in soil clays. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.46, n.2, p.419-425, 1982.

LAPWORTH, D. J.; GOODDY, D. C. Source and persistence of pesticides in a semi-confined chalk aquifer of southeast England. **Environmental Pollution**, v. 144, n. 3, p. 1031-1044, 2006.

LEGROS, J. P. **Mapping of the Soil**. Enfield, Jersey, Plymouth: Science Publishers. 411 pp. 2006.

LEHNINGER, A. L.; NELSON, D. L.; COX, M. M. **Princípios de bioquímica**. 4. ed. São Paulo: Editora Sarvier, 2002. 975 p.

LOUX, M. M.; LIBEBL, R. A.; SLIFE, F. W. Adsorption of imazaquim and imazethapyr on soils, sediments, and selected adsorbents. **Weed Science**, v. 37, p. 712-718, 1989.

LU, A.; J., WANG, X.; QIN, K.; WANG, P. H.; ZHANG, S. Multivariate and geostatistical analyses of the spatial distribution and origin of heavy metals in the agricultural soils in Shunyi, Beijing, in China. **Science of The Total Environment**, v. 425, p.66-74, 2012.

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. (Eds.), **Near-Infrared Spectroscopy in Agriculture**. Soil Science Society of America, WI:729–784, 2004.

MARQUES JR., J.; ALLEONI, L. R. F.; TEIXEIRA, D. D. B.; SIQUEIRA, D. S.; PEREIRA, G.T. Sampling planning of micronutrients and aluminium of the soils of São Paulo, Brazil. **Geoderma Regional**, n.4, p.91-99, 2015.

MARQUES JR., J.; SIQUEIRA, D. S.; CAMARGO, L. A.; TEIXEIRA, D. D. B.; BARRON, V.; TORRENT, J. Magnetic susceptibility and diffuse reflectance spectroscopy to characterize the spatial variability of soil properties in a Brazilian Haplustalf. **Geoderma**, v.219-220, p.63-71., 2014.

MATIAS, S. S. R.; MARQUES JR., J.; SIQUEIRA, D. S.; PEREIRA, G. T. Outlining precision boundaries among areas with different variability standards using magnetic susceptibility and geomorphic surfaces. **Engenharia Agrícola**. v.34, p.695-706, 2014.

McBRATNEY, A. B.; SANTOS, M. L. M.; MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, v.117, p.3-52, 2003.

McBRATNEY, A. G.; WEBSTER, A. G. Choosing functions for semivariograms and fitting them to sampling estimates. **Journal of Soil Science**, v.37, n.4, p.617-639, 1986.

McBRATNEY, A.; MYNASNY, B.; STEPHEN R. CATTLE, R. WILLEM VERVOORT. From pedotransfer functions to soil inference systems. **Geoderma**, Amsterdam. v.109, p.41-73. 2002.

MESQUITA FILHO, M. V.; TORRENT, J. Phosphate sorption as related to mineralogy of a hydrosequence of soils from the Cerrado region (Brazil). **Geoderma**, v.58, n.1, p.07-123, 1993.

MINASNY, B.; McBRATNEY, A. B. Estimating the Water Retention Shape Parameter from Sand and Clay Content. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v.71, n.4, p. 1105-1110, 2007.

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**, v.41, n.2, 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, v. 40 n. 1, p. 69-77, 2005.

MONTANARI, R.; ZAMBIANCO, E. C.; CORRÊA, A. R.; PELLIN, D. M. P.; CARVALHO, M. P.; DALCHIAVON, F. C. Atributos físicos de um Latossolo Vermelho correlacionados linear e espacialmente com a consorciação de guandu com milho. **Revista Ceres**, v.59, n.1, p.125-135, 2012.

NOVO, M. C. S. S.; CRUZ, L. S. P.; PEREIRA, J. C. V. N. A; TREMOCOLDI, W. A.; IGUE, T. Persistência de imazaquim em latossolo roxo cultivado com soja. **Planta Daninha**, v. 15, n.1, p.30-38, 1997.

OLIVEIRA JUNIOR, R.S.; KOSKINEN, W.C.; FERREIRA, F.A. Sorption and leaching potential of herbicides on Brazilian soils. **Weed Research**, v.41, p.97-110, 2001.

OLIVEIRA, M. F.; BRIGHENTI, A. M.; Comportamento de herbicidas no ambiente. In: OLIVEIRA JR., R. S.; CONSTANTIN, J.; INOUE, M. H. (eds.) **Biologia e Manejo de Plantas Daninhas**. Curitiba. Omnipax, 2011. p. 263-304. ISBN 978-85-64619-02-9.

OLIVEIRA, M. F.; COLONNA, I.; PRATES, H. T.; MANTOVANI, E. C.; GOMIDE, R. L.; OLIVEIRA JÚNIOR, R. S. Sorção do herbicida imazaquim em Latossolo sob plantio direto e convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.8, p.787-793, 2004.

OLIVEIRA, M. F.; PRATES, H. T.; SANTANNA, D. P.; OLIVEIRA JUNIOR, R. S. Imazaquim sorption in surface and subsurface soil samples. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, n.3, p.461-468, 2006.

PAULA NETO, J. F. **Influência de atributos de solos na eficiência do sulfentrazone no controle de tiririca (Cyperus rotundus L.)**. 1999. 80f. Monografia (Trabalho de graduação em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Jaboticabal, 1999.

PELUCO, R. G.; MARQUES JR., J.; SIQUEIRA, D. S.; BARBOSA, R. S.; PEREIRA, G. T.; TEIXEIRA, D. B. Mapeamento do fósforo adsorvido por meio da cor e da suscetibilidade magnética do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.50, p.259-266, 2015.

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**, v.48, n.6, p.661-672, 2013.

PERCIVAL, J. B.; WILLIAMSON, M. C. Mineralogy and spectral signature of reactive gossans, Victoria Island, NT, Canada. **Applied Clay Science**, v.119, n.2, p.431-440, 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.clay.2015.05.026>.

PETERSEN, L. W.; MOLDRUP, P.; JACOBSEN, O. H.; ROLSTON, D. E. Relations between specific surface area and soil physical and chemical properties. **Soil Science**, v.161; p.9-21, 1996.

RAIJ, B. van, **Propriedades eletroquímicas dos solos. In: Simpósio avançado de química e fertilidade do solo**. Campinas: Fundação Cargill. 1986. p.9-41.

RAIJ, B. van. Bioavailable tests: alternatives to standard soil extractions. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 29, n. 11-14, p.1553-1570, 1998.

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

RAUCH, J. N. Global distributions of Fe, Al, Cu, and Zn contained in Earth's derma layers. **Journal of Geochemical Exploration**, v.110, n.2, p.193–201, 2011.

REATTO, A.; BRUAND, A.; MARTINS, E. S.; MULLER, F.; SILVA, E. M.; CARVALHO JR, O. A.; BROSSARD, M. Variation of the kaolinite and gibbsite content at regional and local scale in Latosols of the Brazilian Central Plateau. **Compters Rendus Geoscience**, Paris, v. 340, p. 741-748, 2008.

REDDY, K.N.; LOCKE, M.A. Imazaquim spray retention, foliar washoff and runoff losses under simulated rainfall. **Pest Science**, 48:179-187, 1996.

REGITANO, J.B.; ALLEONI, L.R.F.; TORNISIELO, V.L. Atributos de solos tropicais e a sorção de imazaquim. **Scientia Agricola**, v.58, p.801-807, 2001.

REGITANO, J.B.; BISCHOFF, M.; LEE, L.S.; REICHERT, J.M.; TURCO, R.F. Retention of imazaquim in soil. **Environmental Toxicology and Chemistry**, v.16, p.397-404, 1997.

RENNER, K.A., MEGGITT, W.F., LEAVITT, R.A. Influence of rate, method of application, and tillage on imazaquim persistence in soil. **Weed Science**, Champaign, v.36, n.1, p.90-95, 1988a.

RESENDE, M. et al. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. Viçosa: NEPUT, 1995. 304 p.

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

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

ROCHA, W. S.; ALLEONI, L. R. F.; REGITANO, J. B. Energia livre da sorção de imazaquim em solos ácidos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, p.239-246, 2003.

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

ROSSI, C.V.S., ALVES, P.L.C.A.; MARQUES JÚNIOR, J. Mobilidade do sulfentrazone em latossolo vermelho e em chernossolo. **Planta Daninha**, Viçosa-MG, v. 23, n. 4, p. 701-710, 2005.

RUSSEL, J. D.; PARFITT, R. L.; FRASER, A. R.; FARMER, V. C.; Surface structure of gibbsite, goethite and phosphated goethite. **Nature**, v.248, n.5445, p.220-221, 1974.

SAMBATTI, J.A.; COSTA, A.C.S.; MUNIZ, A.S.; SENGIK, E.; SOUZA JUNIOR, I.G.; BIGHAM, J.M. Relações entre a substituição isomórfica de Fe por Al e as características químicas e mineralógicas de hematitas sintéticas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.117-124, 2002.

SCHIAVO, J. A.; PEREIRA, M, G.; MIRANDA, L. P. M.; DIAS NETO, A. H.; FONTANA, A. Caracterização e classificação de solos desenvolvidos de arenitos da formação Aquidauana-MS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.881-889, 2010.

SCHWERTMANN, U.; KÄMPF, N. Properties of goethite and hematite in kaolinitic soils of Southern and Central Brazil. **Soil Science**, v.139, p.344-350, 1985.

SHEPHERD, K. D.; WALSH, M. G. Development of reflectance spectral libraries for characterization of soil properties. **Soil Science Society of American Journal**, v.66, p.988-998, 2002.

SILVA, V.R. et al. Variabilidade espacial das características químicas do solo e produtividade de milho em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.6, p.1013-1020, 2003.

SILVEIRA, P.M. et al. Amostragem e variabilidade especial de características químicas de um latossolo submetido a diferentes sistemas de preparo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.10, p.2057-2064, 2000.

SIQUEIRA, D. S., MARQUES JR., J., PEREIRA, G. T., BARBOSA, R. S., TEIXEIRA, D. D. B., PELUCO, R. G. Sampling density and proportion for the characterization of the variability of Oxisol attributes on different materials. **Geoderma**, v. 232–234, p.172–182, 2014.

SIQUEIRA, D. S.; MARQUES JR., J.; PEREIRA, G. T.; TEIXEIRA, D. B.; VASCONCELOS, V.; CARVALHO JÚNIOR, O. A.; MARTINS, E. S. Detailed mapping unit design based on soil-landscape relation and spatial variability of magnetic susceptibility and soil color. **Catena**, Cremlingen, v.135, p.149-162, 2015.

SIQUEIRA, D.S., MARQUES JR., J., PEREIRA, G.T. The use of landforms to predict the variability of soil and orange attributes. **Geoderma**, v. 155, 55-66, 2010b.

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

SÖRENSEN, L. K; DALSGAARD, S. Determination of clay and other soil properties by near infrared spectroscopy. **Soil Science Society American Journal**, Madison, 69:159–167, 2005.

SOUZA JUNIOR, I. G.; COSTA, A. C. S.; SAMBATTI, J. A.; PETERNELE, W. S.; TORMENA, C. A.; MONTES, C. R.; CLEMENTE, C. A. Contribuição dos constituintes da fração argila de solos subtropicais à área superficial específica e à capacidade de troca catiônica. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.31, p.1355-1365, 2007.

SOUZA, C. K.; MARQUES JÚNIOR, J.; MARTINS FILHO, M. V.; PEREIRA, G. T. Influência do relevo e erosão na variabilidade espacial de um Latossolo em Jaboticabal (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.27, n.6, p.1067-1074, 2003.

SOUZA, Z. M.; BARBIERI, D. M.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G. T.; CAMPOS, M. C. C. Influência da variabilidade espacial de atributos químicos de um latossolo na aplicação de insumos para cultura de cana-de-açúcar. **Ciência Agrotecnica**, v.31, n.2, p.371-377, 2007.

SOUZA, Z. M.; BEUTLER, A. N.; PRADO, R. M.; BENTO, M. J. C. Efeito de sistemas de colheita de cana-de-açúcar nos atributos físicos de um Latossolo Vermelho. **Científica**, v.34, n.1, p.31-38, 2006.

STOUGAARD, R.N.; SHEA, P.J.; MARTIN, A.R. Effect of soil type and pH on adsorption, mobility, and efficacy of imazaquim and imazethapyr. **Weed Science**, v.38, p.67-73, 1990.

TAN, S; EVANS, R. R.; DAHMER, M. L.; SINGH B. K.; SHANER, D. L. Imidazolinone-tolerant crops: History, current status and future. **Pest Management Science**, v.61, n.3, p.246-257, 2005.

TORRENT, J.; BARRÓN, V. Diffuse reflectance spectroscopy. In: ULERY, A. L.; REES, L. R. D. Editors, **Methods of Soil Analysis**. Part 5. Mineralogical Methods, SSSA Book Series vol. 5, Soil Science Society of America, p. 367-387, 2008.

TRANGMAR, B. B.; YOST, R. S.; UEHARA, G. Application of geostatistics to spatial of soil properties. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 38, n. 1, p. 45-94, 1985.

UEHARA, G. Agronomic properties and their significance to soil classification. In: **International Soil Classification Workshop, 8.**, Rio de Janeiro: Embrapa/Snlcs, p.19-22, 1988.

UPCHURCH, R. P. Behavior of herbicides in soil. **Residue Review**, v.16, p.45-85, 1966.

VIEIRA, S. R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS RF, ALVAREZ VVH, SCHAEFER GR, eds. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.1-54, 2000.

VIEIRA, S. R., CARVALHO, J. R. P.; PAZ-GONZÁLEZ, A. Jack knifing for semivariogram validation. **Bragantia**, 69:97-105, 2010.

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

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**, v.131, n.1-2, p.59-75, 2006.

VISCARRA ROSSEL, R.A.; RIZZO, R.; DEMATTÊ, J.A.M.; AND T. 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.

WYSZECKI, G. AND STILES, W. S. **Color science: concepts and methods, quantitative data and formulae** (2nd edition). John Wiley & Sons. New York, 1982, 976 p.

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

ZILLI, J. E; BOTELHO, G. R.; NEVES, M. C. P.; RUMJANEK, N. G. Efeito de glyphosate e imazaquim na comunidade bacteriana do rizoplano de soja (*Glycine max* (L.) Merrill) e em características microbiológicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, n.2, p.633-642, 2008.

CAPÍTULO 4 - Considerações finais

Os resultados obtidos nesta tese de doutorado, utilizando o magnetismo do solo, via suscetibilidade magnética, e a cor do solo, via espectroscopia de reflectância difusa, podem balizar futuros estudos sobre planejamento estratégico de manejo de herbicidas pré-emergentes em grandes áreas.