

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

**ASSINATURA MAGNÉTICA NA AVALIAÇÃO DA
COMPACTAÇÃO DO SOLO**

**Lucas Aguilar Cortez
Engenheiro Agrônomo**

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

**ASSINATURA MAGNÉTICA NA AVALIAÇÃO DA
COMPACTAÇÃO DO SOLO**

Lucas Aguilar Cortez

Orientador: Prof. Dr. José Marques Júnior

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

2018

C828a

Cortez, Lucas Aguilar

Assinatura magnética na avaliação da compactação do solo /
Lucas Aguilar Cortez. -- Jaboticabal, 2018

62 p. : il., tabs., mapas

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

1. Pedometria. 2. Mineralogia. 3. Suscetibilidade Magnética.
4. Cobertura Vegetal. I. Título.

Sistema de geração automática de fichas catalográficas da Unesp. Biblioteca da
Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal. Dados fornecidos pelo
autor(a).

Essa ficha não pode ser modificada.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA TESE: ASSINATURA MAGNÉTICA NA AVALIAÇÃO DA COMPACTAÇÃO DO SOLO

AUTOR: LUCAS AGUILAR CORTEZ

ORIENTADOR: JOSÉ MARQUES JUNIOR

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



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



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



Prof. Dr. ALAN RODRIGO PANOSSO
Departamento de Ciências Exatas / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal



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

Jaboticabal, 21 de novembro de 2018

DADOS CURRICULARES DO AUTOR

LUCAS AGUILAR CORTEZ – Nascido em 27 de março de 1987 em Ribeirão 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. Ainda nesta instituição, estudando as relações da mineralogia com os atributos físicos do solo concluiu seu Mestrado no Programa de Produção Vegetal (2011-2013). Em 2015, reingressou na FCVA-UNESP como aluno de Doutorado em Ciência do Solo, para dar continuidade nos estudo sobre mineralogia e manejo conservacionista do solo. Paralelamente, desde 2010, atua profissionalmente na Usina São Martinho, localizada em Pradópolis - SP, maior unidade de processamento de cana-de-açúcar do mundo, com capacidade de moagem de 10 milhões de toneladas por safra. Ocupou os cargos de Estagiário, Trainee e Suporte Técnico. A partir de 2016 é Gestor de Plantio da Usina São Martinho, sendo responsável pelos processos agrícolas de preparo do solo, topografia e construção de estradas, adubação orgânica e plantio.

EPÍGRAFE

“Dar o exemplo não é a melhor maneira
de influenciar os outros. É a única”.
Albert Schweitzer

DEDICO

Dedico a minha querida e amada esposa Amanda De Nadai Correa Cortez pelo carinho, apoio, confiança e companheirismo. Dedico também ao meu filho Lucca Correa Cortez, o presente mais valioso que Deus nos confiou.

OFEREÇO

A minha família, em especial, aos meus pais José Carlos Cortez da Silva e Ana Gomes Aguilar da Silva. Ao meu irmão Allan Aguilar Cortez, meu afilhado João Pedro e minha sobrinha Louise. Ofereço também aos meus avós que de uma forma ou de outra sei que sempre estará intercedendo junto a mim: Antônio Gomes Aguilar (*in memoriam*), Ida Aguilar (*in memoriam*), Lídia Cortez (*in memoriam*) e Alcides Rodrigues (*in memoriam*).

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, pela minha família e amigos.

Aos meus estimados mestres, por todo o conhecimento compartilhado no decorrer de toda minha trajetória acadêmica em especial aos meus amigos José Marques Júnior e Diego Silva Siqueira.

À Usina São Martinho, em especial Luis Gustavo Teixeira, pela oportunidade dada, pelo direcionamento e apoio desde o início da minha vida profissional.

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

Aos colegas Gustavo Silva de Sousa, Renan Radaelli dos Santos e Laércio Santos Silva pelo fundamental auxílio no aperfeiçoamento deste trabalho.

Aos membros da banca examinadora Dr. José Marques Junior; Dr. Marcos Guimarães de Andrade Landell; Dr. Alan Rodrigo Panosso; Dr. Walter Maccheroni Junior e Dr. Marcílio Vieira Martins Filho pelas valiosas contribuições e sugestões.

À FCAV/UNESP, por disponibilizar ferramentas, estrutura e docentes para minha capacitação e realização deste trabalho.

A todos os que contribuíram de forma direta ou indireta para minha formação como Doutor em Agronomia

SUMÁRIO

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS	1
2. INTRODUÇÃO	2
3. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
3.1.Compactação do solo.....	4
3.2.Atributos envolvidos na compactação do solo.....	7
3.3.Matéria orgânica e estrutura do solo	8
3.4.Mineralogia da fração argila dos solos tropicais	10
3.5.Susceptibilidade magnética.....	12
3.6.Ensaio de Proctor	15
3.7.Consistência do solo	16
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	17
4.1.Localização, descrição da área e critério de amostragem.....	17
4.2.Análises laboratoriais.....	19
4.3.Ensaio de Proctor e densidade do solo.....	21
4.4.Análises estatísticas.....	23
4.5.Análises Geoestatísticas.....	23
4.6.Krigagem.....	24
4.7.Mapeamento do potencial de compactação	25
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO	26
6. CONCLUSÕES	42
7. REFERÊNCIAS	43

ASSINATURA MAGNÉTICA NA AVALIAÇÃO DA COMPACTAÇÃO DO SOLO

RESUMO – A compactação é um dos principais fenômenos físicos que causam degradação dos solos e perdas de produtividade das culturas. Identificar por meio de técnicas indiretas, rápidas e de baixo custo, locais e umidade do solo com maiores potenciais de compactação é ferramenta importante para o uso sustentável do solo. A proposta é entender o comportamento da compactação do solo com diferentes composições mineralógicas e cobertura vegetal, e com o uso da assinatura magnética do solo (SM) direcionar o manejo em locais e umidade que não condiciona compactação. Foram construídas curvas de compactação pelo ensaio de Proctor para três solos com diferentes teores de ferro, Latossolo Vermelho distrófico (LVd); Latossolo Vermelho eutroférico (LVef); Neossolo Quartzarênico órtico distrófico (RQod). Também foram avaliadas a granulometria, composição mineralógica e SM. Para cada tipo de solo foi testado o grau de compactação em seis diferentes teores de água (6, 12, 18, 24, 30 e 36%) e profundidade (0,0-0,1 m; 0,1 – 0,2 m; 0,2 – 0,3 m; 0,3 – 0,4 m). Foi avaliado também o efeito da cobertura vegetal na qualidade física do solo considerando 4, 8 e 12 t palha/ha. Com teores de água no solo até 18% quando manejados com a mesma energia de compactação, solos com assinatura magnética inferior a $11 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{kg}^1$ compactam até 24% a mais do que solos com valores acima de $50 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{kg}^1$. A assinatura magnética do solo viabilizou a construção de mapas de manejo específico, indicando locais com suscetibilidades distintas à compactação em função da umidade. A cobertura vegetal apresentou importante papel na melhoria estrutural do solo, diminuindo em todos os solos o potencial de compactação. O efeito amortecedor da palha reduziu a densidade do solo em 23% no LVd quando manejado a 6% de umidade e 19% no RQod, a 12% de umidade.

Palavras-chave – pedometria, mineralogia, suscetibilidade magnética, cobertura vegetal.

MAGNETIC SIGNATURE IN THE EVALUATION OF SOIL COMPACTION

ABSTRACT – Compaction is one of the major physical phenomena that cause soil degradation and crop yield losses. Identifying through indirect techniques, fast and low cost, local and soil moisture with higher compaction potentials is an important tool for sustainable soil use. The proposal is to understand the behavior of soil compaction with different mineralogical compositions and vegetation cover, and with the use of the magnetic signature of the soil (SM) to direct the management in places and humidity that does not condition compaction. Compaction curves were constructed by the Proctor test for three soils with different iron contents, Dystrophic Red Latosol (LVd); Eutrophic Red Latosol (LVef); Dystrophic Orthodox quartzenosis (RQod). The granulometry, mineralogical composition and SM were also evaluated. For each soil type, the degree of compaction was tested in six different water contents (6, 12, 18, 24, 30 and 36%) and depth (0,0-0,1 m, 0,1 - 0,2 m; 0.2-0.3 m; 0.3-0.4 m). The effect of the vegetation cover on the physical quality of the soil considering 4, 8 and 12 t straw / ha was also evaluated. With soil water contents up to 18% when handled with the same compaction energy, soils with a magnetic signature less than $11 \times 10^{-6} \text{ m}^3 / \text{kg}^1$ compact up to 24% more than soils with values above $50 \times 10^{-6} \text{ m}^3 / \text{kg}^1$. The magnetic signature of the soil allowed the construction of specific management maps, indicating places with different susceptibilities to compaction as a function of humidity. The vegetation cover had an important role in the soil structural improvement, reducing in all soils the compaction potential. The straw damping effect reduced soil density by 23% in LVd when driven at 6% moisture and 19% at RQod at 12% moisture.

Keywords: pedometry, mineralogy, magnetic susceptibility, vegetal cover.

1. CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O produto deste trabalho tem como objetivo fornecer ao agricultor subsídios práticos que auxiliam na tomada de decisão visando o uso sustentável do solo. Motivado a entender por que um solo aparentemente homogêneo, geralmente apresenta respostas diferentes quando submetido ao mesmo manejo, buscamos aprofundar o conhecimento e nossas pesquisas sempre como o intuito de elucidar as relações de causa e efeito.

Segundo a biblioteca virtual da Fapesp, em pesquisa realizada no mês de outubro de 2018, até esta data são financiados pela fundação 160 projetos que busca aprofundar estudos com compactação do solo. Apesar do elevado numero apenas 4% desses projetos correlacionam à compactação com a mineralogia sendo que nenhum desses projetos ainda objetivou a entender essa relação de causa e efeito com a cobertura vegetal e manejo do solo.

Esses dados orientam para o planejamento estratégico desta pesquisa visto que a principal causa de degradação dos solos agrícolas é a compactação do solo por meio de manejo indevido. Assim buscamos entregar aqui um pacote tecnológico que permita tomadas de decisões mais assertivas no campo, suportadas por uma robusta base técnica e científica.

2. INTRODUÇÃO

Esta pesquisa da continuidade a outros protocolos agrícolas para uso e ocupação sustentável de solos com teores de ferro variáveis, cujo potencial de utilização ampara decisões para 44 mil hectares do estado de São Paulo (Siqueira et al., 2015). Alguns pesquisadores, estudando a mesma área do presente trabalho, direcionaram suas pesquisas no planejamento amostral e potencial de produção de cana-de-açúcar (Siqueira et al., 2010 a e b), relação da erodibilidade com suscetibilidade magnética (Barbosa, 2014), potencial de sorção de herbicida pré-emergente utilizando cor (Peluco, 2016) e emissão de gases utilizando cor e assinatura magnética (Bahia, 2016).

A utilização de máquinas e implementos em áreas agrícolas tem por objetivo facilitar e otimizar o trabalho do homem no campo, entretanto quando a utilização desses equipamentos são realizados sem o devido planejamento o resultado desta interação pode na maioria das vezes causarem danos irreversíveis no solo, como compactação e restrição a produção das culturas (Gubiani et al., 2014; Ortigara et al., 2014). A associação do manejo inadequado em decorrência da falta de conhecimento, junto ao uso do solo em condições impróprias de umidade pode condicionar ao solo um elevado grau de compactação comprometendo sua estrutura, favorecendo sua degradação pelos processos erosivos (Veiga et al., 2007, Van Pham e Smith, 2014; Ifad, 2014).

Uma constatação relevante e preocupante é que grande parte das operações agrícolas são realizadas na consistência friável do solo, umidade esta que na maioria dos casos é onde ocorre a máxima compactação (Silva et al. 2010; Couto et al. 2013; Rossetti, 2015). Segundo Flowers e Lal (1998), a principal causa da compactação em solos agrícolas é o tráfego de máquinas em operações de preparo do solo, semeadura, tratos culturais e colheita.

Diversos estudos buscam entender o comportamento físico do solo, os quais se expressam nas mais distintas formas (Horn et al., 1995; Stone e Ekwue, 1995; Dias Júnior, 1994). Determinados solos têm maior capacidade de suportar cargas, são mais facilmente manejados após períodos de chuva e não têm limitações ao

crescimento vegetal (Reinert, 1990). Para entender o comportamento da física do solo diversos autores apontaram como os principais atributos os diferentes estados de agregação, textura, teor de água, matéria orgânica e às tensões que o solo recebeu no passado (Kondo e Dias Júnior, 1999; Silva et al., 2002).

Avaliando todos esses atributos ainda assim é frequente encontrar locais, considerados homogêneos apresentando comportamento diferente quando submetidos ao mesmo sistema de manejo. Alguns autores preocupados com a sustentabilidade do solo propuseram a criação de classes de compactação observando mais os atributos relacionados à textura do solo (Zinck et al. 2011), conceito que demanda elevadas análises laboratoriais. Buscando ferramentas mais rápidas e de menor custo Seladji et al. (2010) propôs o estudo da compactação por meio da resistividade elétrica do solo, entretanto o teor de água e os elevados teores de óxido de ferro nos solos tropicais podem mascarar os resultados demandando outras análises. Isso acontece porque a variabilidade do solo é expressa pelas diferentes composições mineralógicas, muitas vezes diferentes dentro de uma mesma classificação de solo.

A mineralogia da fração argila é considerada um fator intrínseco do solo que influencia o potencial de alteração dos atributos físicos (Camargo, 2009). Nos solos tropicais os principais minerais que influenciam na qualidade física dos solos são: caulinita, gibbsita, goethita e hematita (Ghidin et al., 2006; Camargo et al., 2008b; Camargo et al., 2013). A composição dos óxidos de ferro e alumínio na constituição de um solo determinam propriedades físicas como permeabilidade, estabilidade dos agregados, resistência à erosão e interfere no grau de compactação do solo.

A estrutura física do solo sofre alterações em função da umidade, cobertura vegetal e manejo do solo. Rossetti, (2015) demonstrou que o teor de água no solo é fundamental para conferir maior ou menor grau de compactação, entretanto ainda é pouco explorado o comportamento físico do solo em função das diferentes composições mineralógicas quando submetido a manejo em diferentes teores de umidade e cobertura vegetal.

Apesar das pesquisas indicarem importantes relações entre a mineralogia com a qualidade física dos solos, a falta de informação e baixa aplicabilidade da mineralogia nas relações de causa e efeito estão relacionadas à complexidade e

custo das análises mineralógicas (Camargo, 2013). Nesse sentido métodos rápidos, de maior precisão e de baixo custo para quantificar os atributos do solo é de suma importância para permitir o mapeamento detalhado, principalmente em regiões tropicais onde há grande variação dos atributos químicos, físicos e mineralógicos (Bahia et al., 2018).

Neste contexto, Cortez, (2013) propôs a utilização da suscetibilidade magnética (SM) para representar variações mineralógicas e diferentes potenciais de compactação em profundidade. A suscetibilidade magnética é uma medida covariativa da mineralogia (Barrón e Torrent, 2013). Assim, a variação dos valores magnéticos pode ser interpretada como uma assinatura magnética dos solos, sensíveis ao tipo e características dos minerais, bem como seu ambiente de formação (gênese).

A assinatura magnética tem sido utilizada em solos de ambiente tropical na análise quali-quantitativa de minerais (Bahia et al., 2015), como indicadora da qualidade ambiental da emissão de CO₂ (Barrios et al., 2012; Leal et al., 2015), descarte de água residuária (Peluco et al., 2013) e potencial de erosão do solo (Santos et al., 2011). Diante dos estudos supracitados, verifica-se que a aplicação da SM na compreensão do comportamento do solo, frentes as forças compactantes, ainda é pouco explorada. Assim é possível que a assinatura magnética possa fornecer o padrão espacial do potencial de compactação do solo, orientando desta forma o planejamento estratégico das operações agrícolas, a partir de mapas de trafegabilidade.

Diante da problemática abordada, o objetivo neste trabalho é utilizar a assinatura magnética para criar cenários de compactação em função da umidade e cobertura vegetal, em solos com diferentes teores de óxidos de ferro.

3. REVISÃO DE LITERATURA

3.1 Compactação do solo

A introdução de sistemas agrícolas em substituição a mata nativa causa um desequilíbrio no ecossistema onde a retirada da cobertura vegetal original e a implantação de culturas, aliadas às práticas de manejo inadequadas, promovem o rompimento do equilíbrio entre o solo e o meio (Richart et al., 2005). Estas alterações ocorrem na medida em que os ecossistemas naturais vão sendo substituídos por atividades voltadas para fins industriais ou para produção de alimentos (Godefroy e Jacquin, 1975; Centurion; Cardoso; Natale, 2001).

De modo geral, o solo mantido em estado natural, sob vegetação nativa, apresenta características físicas adequadas ao desenvolvimento normal das plantas (Andreola; Costa; Olszewski, 2000). Nessas condições, o volume de solo explorado pelas raízes é relativamente grande. À medida que o solo vai sendo submetido ao uso agrícola, as propriedades físicas sofrem alterações, geralmente desfavoráveis ao desenvolvimento vegetal (Spera et al., 2004).

Os impactos do uso e manejo na qualidade física do solo têm sido quantificados, utilizando-se diferentes propriedades físicas relacionadas com a forma e com a estabilidade estrutural do solo, tais como: compactação, densidade, resistência do solo à penetração das raízes, estrutura e porosidade (Lebert, 1994; Rosolem et al., 1999; Beutler et al., 2001; Oliveira et al., 2001; Servadio et al., 2001). As modificações nestas propriedades ocasionadas pelo manejo inadequado resultam em decréscimo de produção (Radford et al., 2001; Dauda Samari, 2002), aumento da suscetibilidade do solo a erosão e aumento da potência necessária para o preparo do solo.

A compactação do solo tem sido destacada, em nível mundial, como sendo um dos fatores limitantes da qualidade física das terras agrícolas (Canillas e Salokhe, 2002; Rücknagel et al., 2013; Mazurana et al., 2017), prejudicando a obtenção de maiores índices de produtividade. O termo compactação do solo refere-se ao processo que descreve o decréscimo de volume de solos não saturados quando uma determinada pressão externa é aplicada, a qual pode ser causada pelo tráfego de máquinas agrícolas, equipamentos de transporte ou animais (Lima, 2004). Para a Pedologia, a compactação do solo é definida como uma alteração no arranjo de suas partículas constituintes do solo (Camargo e Alleoni, 1997). Em solos compactados, o desenvolvimento das plantas é menor e isto tem sido atribuído ao

impedimento mecânico ao crescimento radicular, o qual resulta em menor volume de solo explorado, menor absorção de água e nutrientes e, conseqüentemente, menor produção das culturas (Mundstock, 1999; Guimarães; Stone; Moreira, 2002).

Uma das principais causas da compactação do solo é o tráfego de máquinas agrícolas (Pankhurst et al., 2003), situação agravada atualmente com a modernização da agricultura, aumento do peso das máquinas e equipamentos e aumento da intensidade do uso do solo. Esse processo não foi acompanhado por um aumento proporcional do tamanho e largura dos pneus, resultando em significativas alterações nas propriedades físicas do solo.

O aumento progressivo das cargas externas, combinado com a insuflagem inadequada dos rodados, contribui para a degradação das camadas do solo em profundidade, implicando no rearranjo das partículas do solo, e, conseqüentemente, alterações na estrutura. Outro agravante é que os pneus usualmente utilizados nos tratores e colhedoras possuem a parte lateral rígida, sendo chamados de pneus de banda diagonal. Essa rigidez impede que o pneu se molde ao solo de acordo com as irregularidades do terreno e, por isso, a sua área de contato fica reduzida, aumentando a pressão na superfície do solo (Silva; Curi; Blancaneaux, 2000).

De acordo com Alakukku e Elomen (1994) e Ball et al. (1997), a densidade do solo é significativamente elevada após o tráfego de máquinas agrícolas, com redução da macroporosidade e conseqüente diminuição da condutividade hidráulica. Way et al. (1995) verificaram aumento significativo da densidade do solo abaixo da linha de tráfego, sendo esse aumento tanto maior quanto maior o número de carregamentos. Wood et al. (1993) constataram que, antes do preparo, o tráfego de quatro passadas de uma carreta graneleira provocou decréscimos de até 50 % na porosidade e permeabilidade nas profundidades de 0,20 a 0,40 m, quando comparados com o efeito provocado por uma única passada. Constatações semelhantes foram feitas por Novak et al. (1992), Bailey et al. (1993).

Horn, (1995) afirmou que não somente a pressão estática causa compactação, mas também forças dinâmicas causadas pela vibração do trator arrastando implementos e pelo patinamento. A aplicação de cargas dinâmicas por rodados e implementos agrícolas no solo produz tensões na interface solo/pneu e

solo/implemento em superfície e em profundidade, respectivamente. Essas tensões compactam as diferentes camadas do solo e caso este carregamento dinâmico exceda a resistência interna do solo, mudanças nas propriedades físicas das camadas mais profundas ocorrerão (Horn, 1988).

3.2. Atributos envolvidos na compactação do solo

Os principais atributos relacionados ao suporte de carga dos solos são energia de compactação, textura, teor de matéria orgânica, umidade e história de tensão devido ao manejo que o solo foi submetido no passado (Dias Junior, 1994; Ekwue e Stone, 1995; Pierce, 1996). A textura do solo apresenta grande importância no processo de compactação. Quando determinada pressão externa é aplicada ao solo ocorre um novo arranjo das partículas, diminuindo a porosidade, aumentando a densidade, resistência à penetração e consequentemente a compactação (Soane, 1986; Horn e Lebert, 1994).

A resistência e a resiliência do solo a determinada prática agrícola dependem da textura e da mineralogia do solo (Seybold; Herrick; Brejda, 1999). O teor e o tipo de argila também afetam o funcionamento compressivo do solo, determinando, portanto a profundidade de transmissão e a persistência da compactação (Mcbride e Watson, 1990). Assim, quanto maior o teor de argila, maior a profundidade a qual a pressão é transmitida e maior a espessura da camada compactada (Horn, 1988).

Dias Junior e Miranda (2000), trabalhando com cinco tipos de solos da região de Lavras, MG, coletou amostras deformadas na profundidade de 0 – 30 cm e observaram que os valores das densidades máximas atingidas pelos solos obedeceram a seguinte ordem decrescente de valores: Cambissolo distrófico > Latossolo Vermelho- Amarelo distrófico > Podzólico Vermelho-Amarelo distrófico > Latossolo Vermelho-Escuro distrófico > Latossolo Roxo distrófico. Esse aumento da densidade do solo segue a mesma tendência da fração areia e pode ser devido à maior capacidade de empacotamento das partículas do solo devido à forma irregular dos grãos de areia.

Assim, com base nos resultados do ensaio de Proctor normal, espera-se que o Cambissolo tenha problemas de compactação a umidades mais baixas do que os demais solos, enquanto o Latossolo Roxo atingirá a sua densidade máxima a

maiores umidades do que os outros. Resultados similares foram encontrados por Ohu, Ayotamuno e Folorunso (1987), que observaram que solos com classe textural areia- franca são mais susceptíveis à compactação do que os solos franco-arenosos, devido ao teor de areia do primeiro ser maior.

Numa mesma condição, o fator que governa a quantidade de deformação que poderá ocorrer no solo é a umidade (Dias Junior, 1994). Assim, quando os solos estão mais secos, sua capacidade de suporte de carga pode ser suficiente para aguentar as pressões aplicadas e a compactação do solo pode não ser significativa. Entretanto, sob condições de alta umidade, o solo deforma-se mais facilmente, ocorrendo à formação de camadas compactadas (Swan; Moncrief; Voohees, 1987). A água no solo atua como lubrificante entre as partículas, permitindo o deslocamento das mesmas. Desta forma, o movimento das partículas de solo é favorecido pelo aumento da umidade. Este processo continua até que a água sature praticamente todos os poros do solo. A partir desse momento, a cada incremento no conteúdo de água não corresponderá um incremento na densidade, visto que a água não pode ser comprimida (Smith, Johnston, Lorents, 1997; Silva; Reinert; Reichert, 2000a).

3.3. Matéria orgânica e estrutura do solo

O teor de matéria orgânica (MO) é caracterizado como um dos fatores responsáveis pela manutenção das boas condições físicas do solo, influenciando também na resposta dos solos à compactação (Assouline, Tavares Filho, Tessier, 1997; Dias Junior et al., 1999). O uso de coberturas mortas ou fertilizantes orgânicos que venham a promover a manutenção e o aumento de MO no solo são um importante aliado contra o processo de compactação (Camargo e Alleoni, 1997).

Segundo Soane, (1990) existem cinco mecanismos pelos quais a MO influencia a capacidade dos solos em resistir às forças de compactação, sendo eles: A força de união entre partículas e entre agregados, elasticidade, efeito de diluição, efeito de cargas elétricas e efeito na fricção. Dentre estes mecanismos, a estabilidade dos agregados é o fator determinante na susceptibilidade do solo à compactação. Conforme explicam Costa et al. (2004), no solo ocorre um efeito sinérgico entre o aumento dos estoques de MO e os processos que levam ao

aumento da estabilidade dos agregados, ou seja, pode-se estabelecer uma relação causa-efeito entre agregação e a MO, na qual o aumento da estabilidade de agregados do solo é ao mesmo tempo uma causa e uma consequência dos maiores estoques de matéria orgânica do solo (Six, Elliot, Paustian, 1999).

Neste sentido, Zhang, Hartge e Ringe (1997) e McBride e Bober (1989) afirmam que a susceptibilidade do solo à compactação decresce com o incremento no teor de carbono orgânico no solo devido à redução da faixa de umidade na qual o solo exibe propriedades plásticas. Portanto, os autores apontam que um bom aporte de matéria orgânica ao solo poderá favorecer a estrutura do solo e diminuir os efeitos da compactação do solo.

Albuquerque et al. (1995) afirmaram que dentre as propriedades físicas do solo, a estrutura é uma das propriedades mais sensíveis ao manejo e sua qualidade pode ser analisada segundo variáveis relacionadas com sua forma e estabilidade (Campos et al., 1995). Um dos efeitos da compactação é a modificação da estrutura do solo, onde os macroagregados são destruídos e esta desagregação pode limitar a adsorção e a absorção de nutrientes, infiltração e a distribuição de água, resultando em problemas no estabelecimento e no crescimento das raízes (Flowers e Lal, 1998; Imhoff, 2002; Barbosa, Tavares Filho e Fonseca, 2002).

Geralmente, as práticas de manejo têm maior impacto sobre as propriedades físicas de solos arenosos do que de solos argilosos. Silva e Mielniczuk (1997) verificaram redução do diâmetro médio ponderado (DMP) dos agregados de 71% em um Argissolo Vermelho (220 g kg^{-1} de argila) e de 47% no Latossolo Roxo (680 g kg^{-1} argila), quando passaram de uma condição de campo nativo para preparo convencional com culturas anuais, submetidos à aração e gradagem. Por outro lado, os mesmos autores verificaram aumento da estabilidade de agregados em ambos os solos quando submetidos ao sistema plantio direto. O DMP dos agregados passou de 0,61 mm, no Argissolo, e de 1,76 mm, no Latossolo, em preparo convencional, para 0,91 e 1,90 mm, respectivamente, em plantio direto. Em termos relativos, o aumento ocorrido na estabilidade de agregados do solo em plantio direto foi de 49 e 8%, respectivamente, no Argissolo franco-arenoso e no Latossolo argiloso.

A adoção de sistemas conservacionistas de manejo do solo tem sido apresentada como uma opção para assegurar a sustentabilidade do uso agrícola

dos solos, pois com a utilização de práticas de manejo que mantém a proteção do solo através do contínuo aporte de resíduos orgânicos é fundamental para a manutenção da estrutura do solo (Silva et al., 2000a).

3.4. Mineralogia da fração argila dos solos tropicais

Os minerais da fração argila estão intimamente relacionados com os atributos físicos e químicos do solo. Estes minerais possuem influência em atributos do solo como estrutura, cor, adsorção de cátions e ânions importantes na nutrição e na contaminação do solo (Camargo, 2013). Em regiões tropicais e subtropicais predominam em diferentes proporções óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio além de minerais de grade 1:1 na fração argila dos solos (Schaefer et al., 2008). Dentre os óxidos e hidróxidos de ferro, a goethita e hematita são os minerais de maior ocorrência nestes solos, podendo ocorrer sob forma de materiais amorfos até minerais altamente cristalizados e, devido a sua abundância e diversidade em grau de cristalinidade, influenciam propriedades físicas e químicas dos solos (Mcneal et al., 1968; Bahia Filho, 1982; Vitorino et al., 2003; Ghidin et al., 2006a,b)

A maior solubilidade do silício em relação ao Fe e ao Al explicam a presença de goethita, hematita, caulinita e gibbsita em grandes quantidades na fração argila de solos altamente intemperizados em detrimento de outros minerais silicatados (Schaefer et al., 2008). Segundo Kämpf e Curi (2000), os óxidos e hidróxidos de ferro são importantes indicadores pedogenéticos por terem sua formação influenciada pelas condições do ambiente e por persistirem por longo tempo no solo. Esses minerais são considerados diagnósticos, pois refletem o teor de ferro dos solos e não são alterados com o tempo. Consequentemente, os demais atributos são considerados covariativos, pois refletem a variação destes minerais. Portanto, os óxidos de ferro podem ser utilizados no estudo de outros atributos ainda difíceis de caracterizar, como o carbono do solo.

Há grande diversidade entre os óxidos e hidróxidos de ferro e de alumínio devido aos diferentes ambientes pedogenéticos (Camargo, 2009). Estudos realizados por Schwertmann e Kämpf (1985) evidenciam diferenças entre as características de goethitas e hematitas nos solos das regiões sul e central do Brasil. A diferença entre as populações dos óxidos e dos hidróxidos de ferro pode ser

encontrada até mesmo em uma microescala, fato este relevante nos estudos de caracterização destes minerais (Schwertmann e Taylor, 1989).

A estabilidade dos agregados do solo está relacionada com o teor e os atributos dos óxidos de ferro, como hematita e goethita (Schwertmann e Kämpf, 1985). Segundo Cornell, (1973) a íntima relação de goethitas de pior cristalinidade com a estabilidade do agregado é atribuída à maior área de superfície específica desse mineral. Este fenômeno proporciona aumento no número de grupos hidroxilas disponível para interação com os demais compostos que favorecem a estabilidade dos agregados. Quanto maior o teor de hematita, de goethita e de gibbsita, maior é a macroporosidade e a porosidade total, e menor a densidade do solo, para Latossolo Bruno ácrico e Latossolo Vermelho distrófico (Ghidin et al., 2006b).

Outros importantes minerais que também influenciam nas características físicas do solo são caulinita e gibbsita. De acordo com Ferreira, Fernandes e Curi (1999b), a caulinita e a gibbsita são os constituintes mineralógicos com maior influência sobre os atributos físicos dos Latossolos da região sudeste do Brasil.

A caulinita interfere em vários processos físico-químicos do solo, como na formação de agregados, porosidade, retenção de água, drenagem, lixiviação, adsorção de cátions em baixos pH, entre outros (Melo e Wypych, 2009). Já, em relação à gibbsita, Resende et al. (2011) citam a presença considerável deste mineral nos Latossolos geomorfologicamente mais velhos do planalto central brasileiro, nas regiões sul e sudeste. Assim como a caulinita, a gibbsita também exerce influência significativa nas propriedades dos solos, como na formação de micro agregados estáveis, favorecendo a drenagem do solo.

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

Este resultado pode estar relacionado com a participação do $\text{Al}(\text{OH})_3$ como agente de ligação entre as partículas, justificando a positiva interferência da gibbsita na estabilidade do agregado (Pedrotti, 2000). Estes minerais não são importantes somente na agregação do solo, uma vez que a densidade do solo (D_s) também é

afetada, apresentando correlação positiva entre caulinita e Ds, e o inverso ocorre com a gibbsita (Pedrotti et al., 2003; Ghidin et al., 2006b). Valores de densidade do solo mais baixos para Latossolos gibbsíticos, e mais altos para Latossolos caulíníticos têm sido reportados na literatura (Silva et al., 1995; Chagas et al., 1997; Cortez 2013). Ressalta-se que estas relações foram estudadas majoritariamente em Latossolos, havendo relativa carência de dados para Argissolos.

Os atributos mineralógicos podem, também, variar de acordo com as características da paisagem. De acordo com Camargo et al. (2008), os atributos mineralógicos apresentam dependência espacial e relacionam-se com pequenas variações do relevo. Por exemplo, altas concentrações de gibbsita são encontradas em solos com estágio avançado de intemperismo, como os Latossolos e os Argissolos (Soil Survey Staff, 1996). Nesse sentido o conhecimento da mineralogia da fração argila mostra-se de extrema importância, pois possibilita a predição do comportamento dos atributos do solo e é ferramenta importante para entender as relações de causa e efeito entre a paisagem e o solo (Bahia, 2016).

3.5. Suscetibilidade magnética

O solo é a expressão da interação de um conjunto de fatores como ambiente de formação, material de origem, clima, relevo, tempo, flora e fauna, onde essa interação resulta em variabilidade espacial dos atributos que o compõem. Um dos atributos intrínsecos do solo é a suscetibilidade magnética, que também tem sua expressão em função do material de origem.

A suscetibilidade magnética dos minerais presentes nos sedimentos e no solo depende da concentração e das características dos minerais, tais como: composição, estrutura espacial do cristal e tamanho (Verosub e Roberts, 1995). Segundo Maher e Thompson (1999), os minerais com capacidade magnética armazenam arquivos naturais contendo registros dos fatores e processos de formação do solo.

Os solos podem conter materiais que apresentam cinco comportamentos magnéticos diferentes como: ferromagnético, ferrimagnético, antiferromagnético, diamagnético e paramagnético (Figura 1). Os minerais ferromagnéticos apresentam seus spins altamente ordenados em uma mesma direção e sentido, mesmo após ter

seu campo magnético, permanecendo magnetizado (Exemplo: ferro). Os materiais ferrimagnéticos, apesar de também possuírem momentos magnéticos ordenados, apresentam forças magnéticas desiguais (Spins); assim, prevalece o momento magnético do maior número de spins no mesmo sentido (Exemplo: magnetita). Os materiais antiferromagnéticos apresentam momento magnético neutro. Os diamagnéticos e paramagnéticos apresentam momentos magnéticos desordenados, sendo os materiais diamagnéticos (Exemplo: quartzo) aqueles ligeiramente repelidos pelos ímãs e os paramagnéticos os atraídos (Exemplo: olivina) (Dearing, 1999).

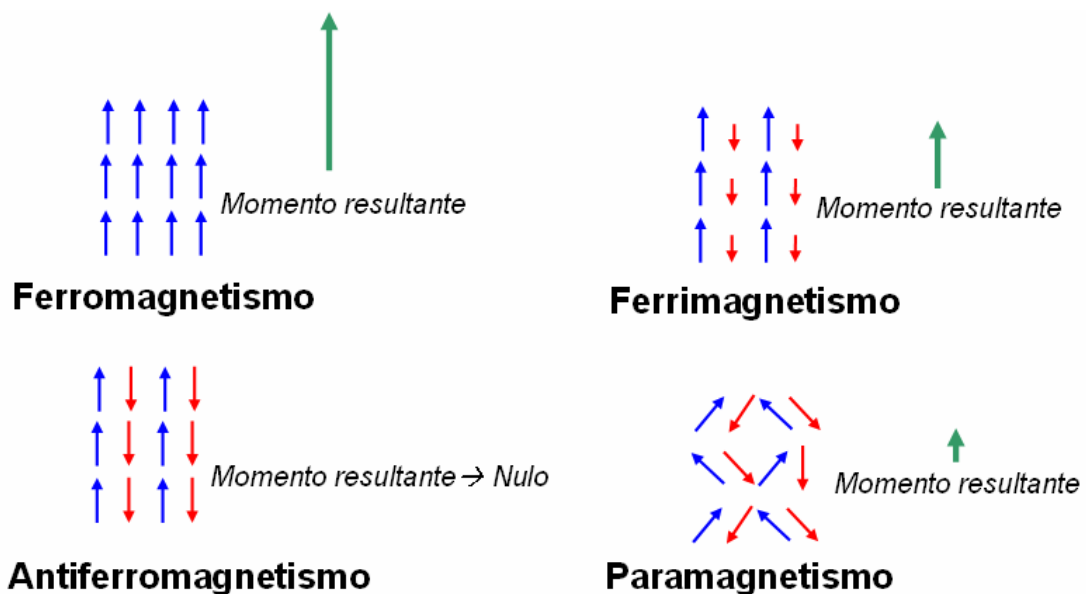


Figura 1. Esquema dos diferentes tipos de comportamento magnético (Luque, 2008).

O comportamento dos minerais presentes no solo está em função do seu campo magnético, e os principais minerais magnéticos presentes no solo são os óxidos de ferro, como a magnetita, maghemita, ferridrita, hematita e a goethita. A magnetita é um mineral ferrimagnético com ordenação magnética espontânea, sendo o íon Fe^{+2} responsável pela magnetização dentro da sua estrutura, porém quando presente também o íon Fe^{+3} ocorre à anulação do momento magnético, promovendo a não magnetização do solo. A sua presença está também ligada à ocorrência de micronutrientes como o Zn, Cu e Mn. A suscetibilidade magnética desse mineral varia de acordo com o valor de saturação magnética.

A ferridrita é um mineral paramagnético, cuja presença no solo está associada à matéria orgânica. A hematita é um óxido de comportamento também paramagnético, cuja presença em solos tropicais está muito ligada à ocorrência de ferro no solo. A goethita é um oxi-hidróxido que possui características antiferromagnéticas, com pequeno poder magnético devido à imperfeição da sua estrutura (Guyodo et al. 2006).

Buscando encontrar algumas relações entre essas características dos minerais com a variabilidade dos atributos que compõem o solo alguns autores vêm estudando a suscetibilidade magnética do solo como funções de pedotransferência (Mcbratney et al., 2002), as quais são definidas como modelos matemáticos que são utilizados na agricultura moderna para estimar, indiretamente, atributos do solo de maneira simples, rápida e confiável.

Pesquisas têm utilizado com êxito a suscetibilidade magnética (SM) na quantificação indireta de propriedades físicas, químicas e mineralógicas do solo (Siqueira et al., 2010). Estudando medições de SM em solo de florestas contendo material de origem semelhante, Wang et al. (2008) verificaram que esta técnica permite separar os solos de acordo com o regime hídrico e a composição de plantas, possibilitando a identificação de espécies capazes de suportar diferentes variações de clima e a escolha do tipo de solo ideal para cada espécie. Eles observaram também que a SM pode diferenciar solos hidromórficos de outros tipos de solo, mesmo em períodos de seca, por meio da neoformação dos minerais ferromagnéticos que resulta em valores inferiores de suscetibilidade magnética.

Para cada solo estudado, a técnica de suscetibilidade magnética pode necessitar de adaptações, tais como aumento no campo magnético, para medir com maior precisão. O comportamento da suscetibilidade magnética em solos de diferentes materiais de origem foi avaliado por Fontes et al. (2000), que concluíram que a suscetibilidade magnética estava relacionada com a magnetita na fração areia e maghemita na fração argila. Becegato e Ferreira (2005), em seus estudos, identificaram os limites de solo com o auxílio da suscetibilidade magnética, constituindo uma ferramenta importante na análise e descrição detalhada de áreas homogêneas, permitindo o entendimento entre o processo geomorfológico e os atributos do solo.

Alguns autores vêm estudando comportamentos importantes no solo com o auxílio da suscetibilidade magnética como a compactação do solo (Cortez, 2013) erodibilidade (Barbosa, 2014; Teixeira, 2017), potencial de sorção de herbicida (Peluco, 2016) emissão de gases do solo (Bahia, 2016). Sendo assim, a suscetibilidade magnética é ideal para a realização de estudos que requerem uma grande quantidade de amostras, por ser menos destrutiva comparada com os métodos químicos e físicos utilizados em laboratórios (Dearing, 1999). Segundo esse autor, a vantagem do uso da suscetibilidade é a possibilidade da utilização em todas as classes de solo, o baixo custo, ser relativamente sensível, rápida e com impacto ambiental nulo, no que diz respeito ao uso de reagentes químicos. Outra vantagem é que as medidas podem ser realizadas no laboratório ou no campo, as quais podem ser empregadas como complemento de outros tipos de análises.

3.6. Ensaio de Proctor

O termo Proctor é homenagem ao engenheiro Ralph Proctor, que através de suas pesquisas em 1933, demonstrou que a densidade de um solo para um esforço de compactação, depende da quantidade de água presente nesse solo durante a compactação. Segundo Proctor, (1933) em um solo argiloso com umidade inferior à umidade crítica de compactação (U_{gc}), há ocorrência de forças capilares elevadas, que são responsáveis por ligações fortes entre partículas que se opõem às forças de compactação, originando, assim, um volume de vazios elevado. Para esse autor, aumentos na umidade do ramo seco da curva de compactação do solo são responsáveis por reduções nas forças capilares, diminuindo as forças de ligação entre partículas, possibilitando maior facilidade de alterar suas posições relativas e, conseqüentemente, de reduzir o volume de vazios e provocar um aumento da densidade do solo.

Assim o ensaio de Proctor é o método para determinar a relação entre o teor de umidade e a massa específica aparente seca do solo. Proctor, (1933) propôs esse procedimento que posteriormente foi normatizado nos Estados Unidos pela A.A.S.H.O – American Association of State Highway Officials e no Brasil sua execução segue a norma ABNT NBR 7182/1986 - Ensaio de Compactação.

Este ensaio consiste basicamente em compactar amostras de solos dentro de recipientes cilíndricos e soquetes padronizados. Repete-se este ensaio para diferentes teores de umidade obtendo-se assim seu respectivo peso específico aparente seco. Com estes pontos traça-se uma curva denominada “curva de compactação” onde na abscissa têm-se os teores de umidade e nas ordenadas os pesos específicos aparentes secos. O teor de umidade ótimo e o peso específico aparente seco máximo é extraído do vértice da curva obtida. Por meio desse ensaio é possível determinar a umidade ótima de compactação e a densidade máxima do solo para a mesma energia de compactação aplicada.

Muito utilizada na engenharia civil, o ensaio de compactação de Proctor Normal permite determinar a máxima compactação possível sendo importante para ser utilizada em diversos tipos de obras, como: barragens, aeroportos, estradas, dentre outras (Santos, 2008). Elevadas densidades e compactação, tão almejadas na engenharia civil a fim da realização das obras de arte é oposto do que se busca na agricultura. Assim conhecer o tipo de solo e as umidades ótimas de compactação é importante para não cometer equívocos no manejo compactando e degradando os ambientes agricultáveis.

O tráfego de máquinas em áreas agrícolas tem como finalidade facilitar o trabalho do homem no campo, entretanto se esse tráfego ocorrer em condições nas quais o conteúdo de água no solo estiver inadequado pode ocorrer compactação superficial do solo, sendo esta mais evidente próxima à camada de 0,10m. Silva et al. (2010) salientam que o conteúdo de água no qual ocorre a máxima compactação pode estar na consistência friável, que é a condição de água no solo, em que são realizadas diversas operações agrícolas.

3.7. Consistência do solo

A consistência do solo é característica usada no estudo de mecânica do solo para descrever o estado físico, ou seja, o grau de ligação entre as partículas do solo (Vasconcelos et al., 2010; Braidá et al., 2006). A consistência é reflexo das manifestações de forças físicas de adesão e coesão que atuam variando com a umidade do solo. Segundo Forsythe (1985), essas forças são expressas por meio do comportamento do solo ante a ação da gravidade, das tensões de tração e de

compressão, do empuxo e da tendência do solo em aderir à superfície dos órgãos ativos dos implementos agrícolas.

Segundo Seed et al. (1964b), a consistência do solo pode ser avaliada analisando três limites: Liquidez (LL), plasticidade (LP) e contração (LC), também conhecido como limites de Atterberg. O limite de liquidez (LL) corresponde a umidade abaixo da qual o solo se comporta como material plástico; é a umidade de transição entre os estados líquido e plástico do solo. Já o limite de plasticidade (LP) é entendido como o teor de umidade em que o solo deixa de ser plástico, tornando-se quebradiço; é a umidade de transição entre os estados plástico e semissólido. Por último, tem-se o limite de contração (LC), que indica o valor de umidade no qual o solo passa do estado semissólido para o estado sólido, isto é, o teor no qual qualquer perda de umidade não provocará uma diminuição de volume.

Um solo pode apresentar vários estados de consistência, conforme o conteúdo de água. É na condição de solo friável (abaixo do limite plástico) que se recomenda a realização das operações mecanizadas, em função da mínima coesão entre as partículas e da menor adesão do solo às ferramentas de preparo e de semeadura (Corrêa, 1982). Operações agrícolas realizadas numa condição de solo muito úmido, desenvolverá a capacidade de não recuperar sua forma original ao cessar a ação da força externa deformante (Luciano et al, 2012).

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Localização, descrição da área e critério de amostragem.

A área de estudo localiza-se no município de Guatapará, estado de São Paulo – Brasil (Figura 2A), as coordenadas centrais são 21°28'40"S e 48°01'38"O, com altitude variando de 649 a 519 m. Segundo Thornthwaite (1948), o clima da região é definido como B1rB'4a', Tipo Mesotérmico Úmido, com pequena deficiência hídrica, sendo a evapotranspiração de verão menor que 70% da evapotranspiração anual. A vegetação natural local era constituída por floresta tropical subcaducifólia.

A área localiza-se em uma transeção geológica entre Basalto do Grupo São Bento Formação Serra Geral (SG), Depósito Colúvio-Eluvionar (ECD) e Depósito Aluvionar (AD) (Instituto de pesquisas tecnológicas do estado de São Paulo, IPT, 1981; Geobank, 2014) (Figura 2B).

De acordo com o mapa de solos (escala 1:12000) gerado pelo Centro de Tecnologia Canaveieira (CTC), a área registra a ocorrência de cinco classes de solo: Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (LVAd); Latossolo Vermelho distrófico (LVd); Latossolo Vermelho distroférico (LVdf); Latossolo Vermelho eutroférico (LVef); Neossolo Quartzarênico órtico distrófico (RQod), (Figura 2C). O teor de ferro total (Fe_2O_3) na área varia de 200 g kg^{-1} no topo de paisagem a 10 g kg^{-1} na parte mais baixa (Siqueira et al., 2015). Os maiores valores de Fe_2O_3 e consequentemente os teores de argila e suscetibilidade magnética são observados no topo da paisagem onde prevalece o LVef, hematítico, e os menores valores na parte mais baixa da paisagem onde prevalece o RQod e LVAd, mais goethíticos Teixeira (2015) (Figuras 2D e 2E). Atualmente, a área é cultivada com cana-de-açúcar sob o sistema de colheita mecanizada há mais de 15 anos.

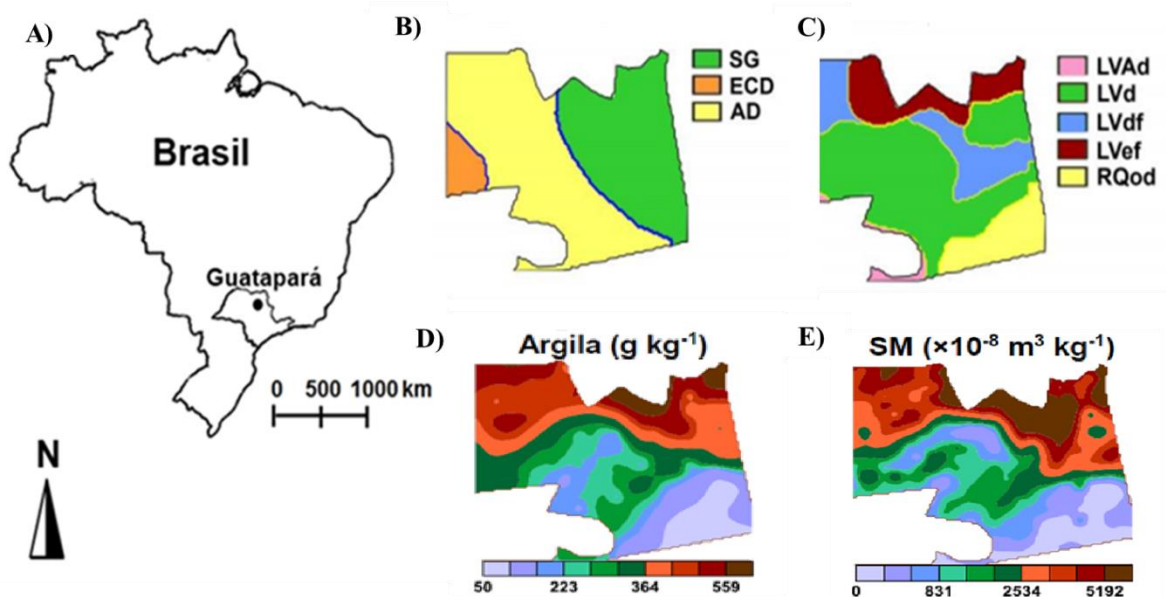


Figura 2. Caracterização da área de estudo. (A), Localização da área amostral (B); mapa geológico (SG – Serra Geral; ECD – Depósito Colúvio Eluvionar; AD – Depósito Aluvionar) (C); mapa de solos, (D); Teor de argila (E); Padrão espacial da suscetibilidade magnética (E). Adaptado de Teixeira (2015).

Foram coletadas quatro amostras em pontos representativos de três classes de solos em quatro profundidades (0,0-0,1 m; 0,1 – 0,2 m; 0,2 – 0,3 m; 0,3 – 0,4 m). Estes três solos são representativos de três classes de ferro total: hipoférrico, o qual apresenta baixos teores de óxidos de ferro, sendo menores que 80 g kg^{-1} de solo; mesoférrico, cujo possui teores medianos de óxidos de ferro, variando de 80 a 180 g kg^{-1} de solo; e férrico, o qual apresenta altos teores de óxidos de ferro, variando de 180 a 360 g kg^{-1} de solo.

4.2 Análises laboratoriais.

O teor de argila foi determinado pelo método da pipeta, utilizando solução de NaOH $0,1 \text{ mol L}^{-1}$ como dispersante químico e agitação mecânica em aparato de baixa rotação por 16 horas (Embrapa, 1997). O teor de areia foi obtido por tamisagem. A fração silte foi calculada pela diferença das demais frações.

Os óxidos de ferro livres (Fed) foram extraídos com ditionito-citrato-bicarbonato (Mehra e Jackson, 1960) e o ferro mal cristalizado (Feo) foi extraído com oxalato ácido de amônio, de acordo com a metodologia descrita por Camargo et al. (1986) e adaptada por Schwertmann, (1973).

A eliminação dos óxidos de ferro da fração argila foi feita utilizando o método ditionito-citrato-bicarbonato (DCB), segundo Mehra e Jackson (1960). A análise da fração argila desferrificada foi realizada por meio da difratometria de raios-X (DRX). A caracterização da goethita (Gt) e da hematita (Hm), por meio da DRX, foi feita após tratamento da fração argila com NaOH 5 mol L^{-1} (1g argila/100 ml solução), para a concentração dos mesmos, segundo método de Norrish e Taylor (1961) modificado por Kämpf e Schwertmann (1982).

A DRX foi realizada com as amostras preparadas pelo método do pó, em aparelho MINIFLEX equipado com cátodo de Cu, para a difração da Hm e Gt. A velocidade de varredura empregada foi de $1^\circ 2\theta/\text{minuto}$ e amplitude de 23 a 49° . Foram utilizados para avaliação mineralógica os reflexos da hematita (012 e 110) e da goethita (110 e 111).

O diâmetro médio do cristal (DMC) da Hm e Gt foram calculados a partir da largura meia altura (LMA) e da posição dos reflexos dos minerais Hm (110) e Gt (110). Foi utilizada a equação de Scherrer (Schulze, 1984) para o cálculo do DMC:

$$\text{DMC} (\text{\AA}) = (k\lambda 57,3)(\beta \cdot \cos\Theta) \dots \dots \dots (1)$$

em que DMC ($\text{\AA}$) é a distância perpendicular ao plano basal do reflexo (hkl) em angstrom; K é a constante de forma; λ é o comprimento de onda conforme o cátodo usado; 57,3 é a conversão de graus para radiano ($180/\pi$); θ é o ângulo de incidência; $\beta = B - b$, onde β é a LMA corrigida, B a LMA da amostra e b o LMA padrão em graus 2θ .

Foi construído um gráfico entre LMA (graus 2θ) e o ângulo de incidência (graus 2θ) para se obter o valor b, correção do alargamento instrumental do aparelho de DRX, já que as LMA das amostras padrão não foram constantes.

No cálculo do teor de substituição isomórfica do ferro pelo alumínio na goethita foram utilizados os procedimentos sugeridos por Schulze (1984), que propõe a seguinte equação:

$$\text{mol Al\%} = 1730 - 572 \cdot c \dots \dots \dots (2)$$

$$\text{em que, } c = 1 / (1/d_{1112} - 1/d_{1102})^{1/2}$$

Já, para a hematita foi utilizada a equação proposta por Schwertmann et al. (1979):

$$\text{mol Al\%} = 3098,8 - 615,12 a_0 \dots \dots \dots (3)$$

$$\text{em que } a_0 = 2 d_{110}$$

A razão Gt/(Gt+Hm) foi obtida após o cálculo das áreas dos reflexos da hematita (012) e goethita (110) nos reflexos dos difratogramas, e nesse caso foi multiplicada a área do pico da goethita (110) pelo valor 0,35, devido a intensidade de 35% da hematita (012) (Kämpf & Schwertmann, 1998).

Para a obtenção do teor de goethita (%Gt), foi multiplicado por 1,59 o produto entre a razão goethita/(goethita+hematita) e o teor de ferro ditionito (Fed), como segue:

$$\% \text{Gt} = 1,59 [\text{Gt}/(\text{Gt} + \text{Hm})] \% \text{Fed} \dots \dots \dots (4)$$

Já o teor de hematita (%Hm) foi determinado como (DICK, 1986):

$$\% \text{Hm} = 1,43 (\% \text{FeGt} - \% \text{Fed}) \dots \dots \dots (5)$$

O sistema caulinita (Ct) - gibbsita (Gb) foi obtido pelo método de análise da fração argila desferrificada, por difração de raios X, pelo método do pó (Camargo et al., 1986). O difratômetro utilizado foi o HZG-4/B, empregando-se cátodo de Cu com filtro de Ni e radiação K (20 mA, 30 Kv), com velocidade de varredura empregada de $1^\circ 2\theta \text{ min}^{-1}$. A relação $Ct/(Ct + Gb)$ foi calculada empregando-se as áreas dos reflexos Ct (001) e Gb (002). O DMC da Gb e da Ct foi calculado a partir da LMA das reflexões 002 e 001, respectivamente, em amostra desferrificada (tratadas com DCB). De maneira análoga aos óxidos de Fe, o DMC foi obtido pela equação de Scherrer.

Para determinação da estabilidade dos agregados do solo as amostras foram levemente destorroadas, de forma manual, e passadas em peneira de 7,93 mm de diâmetro de malha sendo retidas na peneira de 4,0 mm. Após a primeira separação as amostras foram secadas à sombra, para as análises relativas à agregação. A separação e estabilidade dos agregados foram determinadas segundo Kemper e Chepil (1965), com base na umidade e nas seguintes classes de diâmetro: >2,0; 2,0-1,0; 1,0-0,25; 0,25-0,10; 0,10-0,05 e <0,05 mm de cada amostra. Foram pesadas 50 gramas do agregado retido entre as peneiras de 7,93 e 4,0 mm, e posteriormente os agregados foram colocados em contato com a água sobre a peneira de 4,0 mm por quinze minutos, a massa do material retido em cada peneira foi transferida para sua respectiva latinha e as mesmas colocadas na estufa a 105°C por 24 horas. Os resultados foram expressos em diâmetro médio ponderado (DMP). A matéria orgânica do solo foi determinada de acordo com proposto pela Embrapa (2011).

A suscetibilidade magnética (SM_{lf}) foi determinada na TFSA (terra fina seca ao ar) no laboratório utilizando equipamento Bartington MS2, acoplado ao sensor Bartington MS2B. A avaliação foi feita em baixa frequência (lf: 0,47 kHz) (Dearing, 1994; Costa et al., 1999). Segundo estes autores, as medições de dupla frequência (alta – 4,7 kHz e baixa) devem ser utilizadas em estudo de caráter qualitativo para indicar a presença de minerais magnéticos de domínio simples e múltiplos. No caso de única leitura, para obtenção de resultados mais precisos é indicado o uso da baixa frequência (Bartington, 2013).

4.3 Ensaio de Proctor e densidade do solo

Para a avaliação do ensaio de Proctor Normal as amostras deformadas foram secas ao ar em ambiente protegido do sol e passadas em peneira de 4,0 mm (Nogueira, 1998), em conformidade com o método descrito pela norma NBR 7182 (ABNT, 1986). A determinação da densidade máxima do solo ($D_{sm\acute{a}x}$) foi obtida a partir da densidade do solo. Neste trabalho foi testado o grau de compactação do solo em seis umidades (6, 12, 18, 24, 30 e 36%) para cada tipo de solo e camada.

Visando avaliar o efeito da palhada de deposição na redução da compactação do solo, procedeu-se também o ensaio de Proctor no solo sob palha da cana-de-açúcar. Para isso, fragmentos da palhada com 3 a 4 cm de comprimento e com $0,12\text{kg}^{-1}$ de umidade gravimétrica foram picadas, nas quantidades correspondentes a 4, 8 e 12 toneladas por hectare de matéria seca.

Quando colocada à primeira camada de solo dentro do cilindro do aparelho de Proctor, adicionava-se a quantidade de palha correspondente ao tratamento em questão. Logo, fazia-se a compactação da camada e, depois, retirava-se a palha. Repetindo-se tal procedimento três vezes. Para evitar a mistura demasiada da palha com o solo, antes de adicionar a mesma, o solo foi levemente compactado manualmente, segundo metodologia de Braida et al., (2006).

Para cada amostra foram obtidos seis pares de valores de umidade (U_g) e densidade do solo (D_s), e assim foram analisadas na equação:

$$D_s = a + bU_g + cU_g^2 \dots\dots\dots (6)$$

em que, D_s é a densidade do solo (Mg m^{-3}); U_g , a umidade gravimétrica do solo (kg kg^{-1}); a , b e c , os parâmetros da equação.

A partir da derivada da equação 6 foi obtida a umidade crítica para máxima compactação ou umidade crítica de compactação (U_{gc}):

$$U_{gc} = -b/2a \dots\dots\dots (7)$$

Dessa forma, a $D_{sm\acute{a}x}$ pode ser calculada seguindo a equação da ordenada máxima:

$$D_{sm\acute{a}x} = -(b^2 - 4ac)/4a \dots\dots\dots (8)$$

A densidade relativa do solo (D_r) foi obtida pela divisão da densidade do solo determinada no campo pela $D_{sm\acute{a}x}$ obtida no ensaio de Proctor normal.

As amostras de solo foram submetidas a 25 golpes de um soquete de 2,5 kg caindo a uma altura de 0,3 m, correspondendo a uma energia de 560 kPa. O número

de batidas simula uma passada do trator de 10 t (Rossetti, 2015) Figura 3. Para avaliar a influência da palha no horizonte superficial do solo, 0,0-0,20 m, foi realizado também três situações simulando uma camada de palha correspondente a 4, 8 e 12 toneladas por hectare de matéria seca sobre o solo dentro do cilindro.

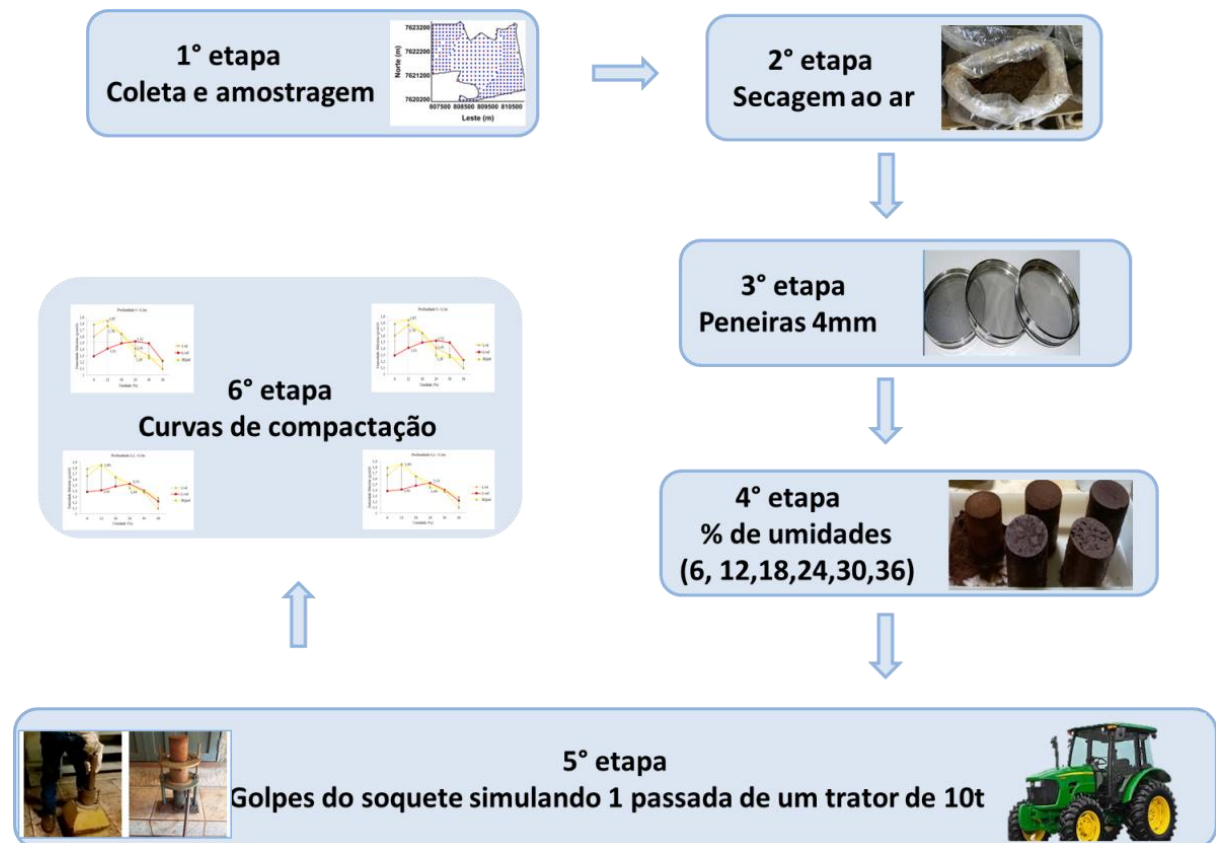


Figura 3. Etapas do ensaio de Proctor.

4.4 Análises estatísticas

A variabilidade dos atributos do solo foi previamente descrita por meio dos cálculos da média, intervalo de confiança de 95%, utilizando o programa Minitab 14 (Minitab, 2000).

4.5 Análises Geoestatísticas

Para caracterização da suscetibilidade magnética e teor de argila foi considerado os estudos feito por Teixeira, (2015). Na área experimental foi instalada uma malha de amostragem regular contendo 371 pontos separados por distâncias

mínimas variando de 145 m a 174 m, abrangendo uma área total de 870 ha, representando toda variação das classes de solos.

Em cada ponto da malha amostral foram coletadas amostras na profundidade de 0-0,25 m para a determinação da suscetibilidade magnética (SM) e teor de argila. Esta profundidade foi escolhida por ser utilizada para a determinação do manejo do solo no setor sucroenergético paulista (Siqueira et al., 2014).

A variabilidade espacial dos atributos avaliados foi determinada por meio do cálculo e modelagem do variograma experimental, com base na teoria das variáveis regionalizadas e nos princípios da hipótese intrínseca (Isaaks e Srivastava, 1989). O variograma descreve a continuidade espacial das variáveis como função das distâncias entre duas localizações, sendo estimado por:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i + h)]^2 \dots\dots\dots (9)$$

Em que,

$\gamma(h)$: é a variância estimada;

$N(h)$: é o número de pares experimentais de dados separados pelo vetor h ;

Z : representa os valores medidos para atributos do solo.

O variograma normalmente é representado pelo gráfico de $\gamma(h)$ versus h . Ele começa no valor chamado de variância pepita (C_0) e vai aumentando obedecendo a semivariância, até uma distância conhecida como alcance (a), onde atinge o patamar ($C_0 + C_1$)

Neste estudo foram testados modelos esféricos, exponenciais e gaussianos. A escolha do melhor modelo ajustado aos variogramas utilizados baseou-se na 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 (Teixeira, 2015) (dados não apresentados no trabalho).

4.6 Krigagem

A estimativa de valores em pontos não amostrados a partir de seus vizinhos é realizada por um método geoestatístico de interpolação. Essa interpolação de dados

é conhecida como krigagem. Isso se torna possível com o conhecimento do comportamento espacial da variável, o que é proporcionado pelo variograma. Neste estimador, pontos com maior proximidade do lugar onde foi realizada a amostragem de dados tem maior peso quando comparadas à pontos mais distantes. Da mesma forma ocorre com pontos agrupados e isolados, os primeiros tem um peso maior na estimativa do que os segundos (Vieira et al., 1983; Borgelt et al., 1994).

O valor estimado para os locais não amostrados pode ser definido pela equação 10.

$$\hat{Z}(x_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(x_i) \dots\dots\dots(10)$$

Em que,

$\hat{Z}(x_0)$: é o valor estimado para locais não amostrados (x_0);

λ_i : é o peso atribuído a cada valor amostrado $Z(x_i)$;

N : é o número de pontos vizinhos usados na estimativa;

$Z(x_i)$: é o valor da variável Z no local x_i .

A construção dos mapas de distribuição espacial da SM e dos teores de argila foram realizados a partir da definição de isovalores definidos pela krigagem. Essas informações são extremamente importantes para a tomada de decisão sobre o manejo específico a ser adotado em cada área delimitada pelos mapas (Burgess e Webster, 1980).

4.7 Mapeamento do potencial de compactação

Com base em visitas técnicas de campo e trabalhos de caracterização do magnetismo e classes de solos da área em estudo (Siqueira et al., 2015, Teixeira, 2015) foi elaborado o mapeamento do potencial de compactação em função das isolinhas (limites das classes do mapa magnético e classes de solo). Os limites de compactação foram mapeados utilizando o programa Surfer 2010. Esta abordagem segue uma tendência moderna de utilização e reaproveitamento de dados legados já validados técnica e cientificamente.

Os limites para caracterização da compactação seguiram os valores propostos por Reichert et al. (2003) onde os autores propuseram densidade do solo crítica para algumas classes texturais: 1,30 a 1,40 Kg/m³ para solos argilosos, 1,40 a 1,50 Kg/m³ para os franco-argilosos e de 1,70 a 1,80 Kg/m³ para os franco-arenosos. Assim visando abranger todas as classes de solos valores de densidade inferiores a 1,4 Kg/m³ foram considerados como baixo potencial de compactação, densidades entre 1,4 a 1,5 Kg/m³ foram consideradas moderadas e valores superior a 1,5 Kg/m³ foi considerada como alta potencial de compactação, indicando desta forma restrições ao desenvolvimento das plantas.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

No topo da área, onde se localiza o Latossolo Vermelho eutroférico (LVef), o solo apresentou textura variando de argilosa a muito argilosa. Na vertente do terreno, onde há o predomínio do Latossolo Vermelho distrófico (LVd), a textura foi classificada como média em todas as camadas. Já na encosta do terreno, onde está localizado o Neossolo Quartzarênico órtico distrófico (RQod) a textura foi classificada como arenosa (Embrapa, 2006) (Tabela 1).

O diâmetro médio ponderado (DMP) apresentou valores decrescentes na seguinte ordem: LVef>LVd>RQod. Segundo Bronick e Lal (2005), além de aspectos como manejo e clima, a textura é outro fator que está associado à agregação do solo, o que também foi visto neste trabalho, tal que solos que apresentaram textura mais argilosa tiveram maiores valores de DMP em relação aos com textura arenosa.

Avaliando os valores de matéria orgânica na camada superficial do solo observa-se com destaque a classe LVef, a qual o conteúdo é 32,3% superior ao LVd e 54,7% ao RQod. Esta evidência pode ser explicada pelo fato das partículas de argila aumentarem a estabilidade dos materiais orgânicos e pela biossíntese microbiana (Vezzani, 2001, Spera et al., 2010), sendo assim os solos mais argilosos têm maior proteção da MO, onde parte fica protegida dentro dos agregados formados (Gomes et al., 2017). O aumento no teor de argila, principalmente, argilas

oxídicas também favorecem a manutenção e o acúmulo de MO no solo pela formação de complexos organo-minerais (Trigueiro, 2006). Diferentemente do RQod, que segundo Santos et al. (2011), horizontes arenosos dificultam a proteção física da MO, impedindo a formação de agregados.

Tabela 1. Granulometria e diâmetro médio ponderado (DMP) das três classes de solos nas profundidades 0-0,1m; 0,1-0,2m; 0,2-0,3m; e 0,3-0,4m.

Amostra	Profundidade m	Areia	Argila	Silte	MO* g dm ⁻³	DMP mm
LVef	0,00-0,10	16,73	52,00	31,27	30,72	3,63
	0,10-0,20	15,67	60,60	23,73		2,95
	0,20-0,30	15,70	62,30	22,00	-	1,69
	0,30-0,40	15,29	52,75	31,96	-	1,37
Média		15,85	56,91	27,24	-	2,32
LVd	0,00-0,10	79,37	15,25	5,38	20,77	3,13
	0,10-0,20	78,23	19,80	2,97		2,43
	0,20-0,30	76,45	20,55	3,00	-	1,63
	0,30-0,40	75,48	21,50	3,02	-	0,76
Média		77,38	19,28	3,59	-	2,03
RQod	0,00-0,10	93,55	5,75	0,70	13,93	4,04
	0,10-0,20	94,15	4,50	1,35		1,51
	0,20-0,30	93,84	4,70	1,46	-	1,43
	0,30-0,40	94,48	3,40	2,12	-	1,16
Média		94,01	4,59	1,41	-	1,47

*MO obtida apenas na camada de 0,00-0,20m. LVef - Latossolo Vermelho eutroférico; LVd - Latossolo Vermelho distrófico; RQod – Neossolo Quartzarênico órtico distrófico; Diâmetro médio ponderado (DMP).

A matéria orgânica possui uma ação de estabilização mais significativa na macroagregação, enquanto a composição mineralógica teria ação mais pronunciada sobre os microagregados (Stevenson, 1994; Oades, 1984; Camargo, 2009). Os macroagregados são mais evidentes em solos arenosos (Albuquerque et al., 1996), sendo assim a matéria orgânica se torna fundamental na agregação destes solos. O

alto valor de DMP apenas na camada superficial do RQod, deveu-se ao incremento de matéria orgânica nesta camada oriundo da colheita de cana crua (aproximadamente 12t palha/ano) associado ao manejo da aplicação de torta de filtro na adubação. Esses resultados demonstram a importância do incremento de matéria orgânica especialmente nesses ambientes melhorando substancialmente as condições físico/químicas do solo.

Aprofundando os estudos na fração argila do solo, observa-se que a mineralogia do solo é constituída predominantemente por goethita (Gt), hematita (Hm), Caulinita (Ct) e Gibbsita (Gb) (Tabela 2). Embora os solos estejam geograficamente próximos à diferença do material de origem acarretou em proporções diferentes desses minerais, resultando em ambientes completamente distintos, o que sugere um estudo mais completo sobre a mineralogia do solo para o refinamento da transição desses ambientes.

O grau de cristalinidade da Gb, também acompanhou o mesmo comportamento dos teores de argila e óxidos de ferro, ou seja, no topo da vertente (LVef) é onde a Gb apresenta maior cristalinidade. Para esse hidróxido de Al, a LMA aumenta na seguinte ordem $LVef < LVd < RQod$, onde é importante ressaltar que a cristalinidade e os valores de LMA, são inversamente proporcionais, assim quanto menor o valor de LMA, maior é a cristalinidade, evidenciando que as condições pedoambientais do LVef favorece o crescimento dos cristalitos de Gb, esta é uma constatação de relevância visto a influência que este mineral pode apresentar. Camargo et al 2013 sugerem que a cristalinidade da Gb afeta as propriedades físicas, refletindo a qualidade do solo. Segundo Mbagwu e Schwertmann (2006), os óxidos de Al são mais eficazes que os óxidos de Fe para agregação em alguns solos tropicais.

No estudo a substituição isomórfica da Gt no LVef foi a que apresentou maior valor, Cortez, (2013) e Camargo et al., (2013) concluíram que goethita com alta substituição de alumínio aumenta o tamanho e a porosidade do agregado e diminui a densidade e a resistência à penetração do solo. Analisando o efeito da profundidade na SI, verificou-se que os valores de SI para Gt diminuíram com a profundidade, exceto no RQod (Tabela 2). Provavelmente em decorrência da maior atividade de Al na subsuperfície desses solos, tendência também reportada por

estudos desenvolvidos em solos tropicais (Melo et al., 2002b; Torrent et al., 1994).

Os valores de DMC e LMA encontrados estão em consonância com resultados de estudos anteriores em solos tropicais (Curi e Franzmeier, 1984; Inda Junior e Kämpf, 2005; Ghidin et al., 2006b; Camargo et al., 2008; Camargo et al., 2013; Silva, 2016).

O LVd e LVef foram caracterizados pela mineralogia mais oxídica, com teores de Hm variando de 98 - 140 g kg⁻¹ e 112 – 158 g kg⁻¹ e Gt de 23 – 43 g kg⁻¹ e 2 – 46 g kg⁻¹, respectivamente. Em contrapartida, o RQod apresentou teores de Hm variando de 39 – 62 g kg⁻¹ e para Gt de 24 – 51 g kg⁻¹. A diferença de amplitude dos teores de Hm e Gt devem-se ao substrato geológico bem como o grau de intemperismos dos solos.

Tabela 2. Parâmetros cristalográficos e teor de goethita (Gt), hematita (Hm), Caulinita (Ct) e Gibbsita (Gb) das três classes de solos nas profundidades 0,0 – 0,1 m, 0,1 – 0,2 m, 0,2 – 0,3 m e 0,3 – 0,4 m.

		DMC				LMA		ASE		SI		Teor		Ct/ (Ct + Gb)	Hm/(Hm + Gt)
Solo	Profundidade	Gt ₁₁₀	Gt ₁₁₁	Hm ₁₁₀	Hm ₀₁₂	Ct	Gb	Gt	Hm	Gt	Hm	Hm	Gt		
	M			°2 θ				m ² g ⁻¹		mol%		g kg ⁻¹			
LVef	0,0 – 0,10	21,01	37,00	35,71	24,10	0,81	0,31	91,56	89,70	33,24	8,98	112,00	46,00	0,69	0,71
	0,10 – 0,20	21,12	37,04	35,63	24,17	0,83	0,22	79,81	48,50	32,01	4,13	158,00	2,00	0,73	0,99
	0,20 – 0,30	21,41	37,03	35,87	24,21	0,83	0,27	94,79	104,40	16,39	14,53	121,00	42,00	0,71	0,74
	0,30 – 0,40	21,27	37,04	35,74	24,26	0,77	0,24	82,87	73,60	24,60	8,34	133,00	34,00	0,73	0,80
	Média	21,20	37,03	35,74	24,19	0,81	0,26	87,26	79,05	26,56	9,00	131,00	31,00	0,72	0,81
LVd	0,0 – 0,10	21,34	37,03	35,65	24,13	0,78	0,30	115,43	68,10	20,12	0,82	111,00	29,00	0,68	0,79
	0,10 – 0,20	21,26	37,00	35,64	24,09	0,76	0,28	100,60	80,90	23,22	3,76	98,00	23,00	0,69	0,81
	0,20 – 0,30	21,30	36,90	35,68	24,13	0,77	0,27	130,18	48,60	15,54	8,56	116,00	43,00	0,70	0,73
	0,30 – 0,40	21,38	36,91	35,72	24,00	0,76	0,27	330,40	36,10	10,96	6,81	140,00	30,00	0,69	0,80
	Média	21,32	36,96	35,67	24,09	0,77	0,28	169,15	58,43	17,46	4,99	116,25	31,25	0,69	0,78
RQod	0,0 – 0,10	21,32	36,89	35,64	24,12	0,51	0,32	82,90	72,60	12,92	1,99	49,00	24,00	0,65	0,67
	0,10 – 0,20	21,36	37,03	35,54	24,04	0,49	0,29	103,62	60,80	20,77	7,09	49,00	27,00	0,67	0,64
	0,20 – 0,30	21,30	37,04	35,65	23,97	0,57	0,48	159,74	205,90	24,18	4,46	62,00	24,00	0,44	0,72
	0,30 – 0,40	21,37	37,16	35,59	23,99	0,59	0,28	234,35	94,20	28,19	3,38	39,00	51,00	0,69	0,43
	Média	21,34	37,03	35,61	24,03	0,54	0,34	145,15	108,38	21,52	4,23	49,75	31,50	0,61	0,62

DMC: diâmetro médio do cristal, LMA: Largura à meia altura, ASE: área de superfície específica, SI: substituição isomórfica.

De forma geral, ao analisar a relação $Ct/(Ct + Gb)$ e $Hm/(Hm + Gt)$ (Tabela 2) assim como Silva, (2016) usou na diferenciação de solos provenientes de diversos materiais de origem e evolução no Planalto Ocidental Paulista, fica consolidado que no LVd e LVef os óxidos de ferro correspondem quase que a totalidade dos minerais pedogênicos da fração argila, como indicado na relação $Hm/(Hm + Gt) > 70$. Aliado aos óxidos de ferro tem-se a Ct correspondendo ao segundo mineral, de natureza silicatada, mais abundante desses solos, e em menores proporções a Gb, conforme revelado pela relação $Ct/(Ct + Gb) > 60$. Entretanto, vale ressaltar que apesar dos minerais coexistirem nos solos e profundidade avaliadas, houve predominância de Ct mais cristalinas no RQod e Hm nos LVd e LVef, sobretudo este último. Os teores de goethita não variaram muito com as classes de solo, fazendo jus a cor vermelha intensa dos respectivos solos, mesmo no RQod, onde a Hm é levemente superior a Gt. Comportamento que confirma o potencial da Hm em pigmentar o solo e mascara a presença de Gt a olho nu (Ker, 1995).

Diferentemente dos Latossolos, no RQod a Hm prevaleceu sobre Gt até a profundidade de 0,30 m, dominando Gt na maior profundidade estudada (Tabela 2). Isso decorre porque o RQod é proveniente de rocha arenítica, com baixo teor de Fe_2O_3 na sua composição. Assim, quanto mais próximo da rocha maior a expressão da Gt (Curi e Franzmeier, 1984). Outro fator importante é o posicionamento do RQod na paisagem, situado nas áreas de menores cotas (baixada) da paisagem, onde pode atuar como sítio de acumulação. Possivelmente o solo das camadas superficiais podem não ser do material de origem que o sustenta, mas trazido de outros ambientes, fenômeno denominado de solos alóctones (Embrapa, 2013). Motivo que acarretou na mudança e predomínio da Hm sobre Gt.

Os valores de Fe extraídos dos minerais apresentam diferenças significativas dos solos devido à grande variação na sua amplitude, isso reforça a tese dos diferentes materiais de origens (Tabela 3). Os maiores teores de Fe encontrados no topo e na vertente do terreno (LVef e LVd), indicam solos mais desenvolvidos e sem restrições hídricas. Em contrapartida na parte baixa do terreno onde se encontra o RQod, os solos são rasos com drenagem imperfeita, assim, a cristalização dos óxidos de ferro não é favorecida (Schaefer et al., 2008).

Tabela 3. Valores dos teores de ferro extraídos dos óxidos de ferro cristalino (Fed) e menos cristalinos (Feo) e suscetibilidade magnética em baixa frequência das três classes de solos, nas profundidades 0,0-0,1m; 0,1-0,2m; 0,2-0,3m e 0,3-0,4 m.

Amostra	Prof. M	Fed g kg ⁻¹	Feo g kg ⁻¹	χBF (10 ⁻⁶ m ³ kg ⁻¹)
LVef	0,00-0,10	142,00	5,83	65,99
	0,10-0,20	121,00	6,32	68,50
	0,20-0,30	100,00	6,85	69,12
	0,30-0,40	160,00	6,97	69,63
Média		131,00	6,49	68,31
LVd	0,00-0,10	51,00	1,11	10,53
	0,10-0,20	53,00	1,11	11,24
	0,20-0,30	60,00	1,20	11,47
	0,30-0,40	60,00	1,09	11,94
Média		56,00	1,12	11,30
RQod	0,00-0,10	1,35	0,81	0,45
	0,10-0,20	0,96	0,49	0,25
	0,20-0,30	0,56	0,46	0,14
	0,30-0,40	0,68	0,39	0,10
Média		0,89	0,54	0,23

χBF – Suscetibilidade Magnética em baixa frequência; LVef – Latossolo Vermelho Eutroférico; LVd – Latossolo vermelho Distrófico; RQod – Neossolo Quartzarênico.

O comportamento e a distribuição dos teores de ferro nos diferentes ambientes podem ser correlacionados à variabilidade da suscetibilidade magnética (SM) do solo. A SM reflete a presença de minerais de óxidos de ferro com magnetização espontânea, como magnetita litogênica (Mt=Fe₃O₄) e maghemita (Mh=Fe₂O₃), de origem pedogênica. Assim, verifica-se que a SM seguiu o mesmo comportamento do teor de argila e teor de ferro (Tabelas 1 e 3), crescendo na seguinte ordem: RQod.< LVd < LVef. Esse comportamento revela a participação efetiva da Mh, cuja sua ocorrência se dá na fração argila, comumente associado a Hm (Fernandes et al., 2004), ao contrário da Mt com ocorrência registrada na fração mais grosseira como areia (Costa et al, 1999).

Os valores de SM permite ainda discriminar as classes de solo por substrato geológico que lhe deu origem. Os maiores valores de SM, média de $68,31 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$, constatado no LVef indica, irrefutavelmente, que este solo é proveniente de rochas basálticas, e os valores baixos no RQod, em média de $0,23 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$, refletiram o material origem que derivou o respectivo solo, ou seja, Depósito Aluvionar, sedimentos com baixos teores de ferro. Nesse sentido cada solo possui uma “assinatura magnética”, onde conhecendo as mesmas torna-se possível fazer inferências sobre outros atributos, especialmente sobre os mineralógicos (Bahia et al., 2018; Fernandes et al., 2017; Siqueira et. al., 2010; Siqueira et. al., 2015).

Com o embasamento prévio da textura do solo e mineralogia propôs-se a esclarecer o comportamento do solo quando manejado a diferentes teores de água. As curvas de compactação, obtidas pelo ensaio de Proctor normal para os solos LVef, LVd e RQod, nas profundidades avaliadas, são representadas na Figura 4.

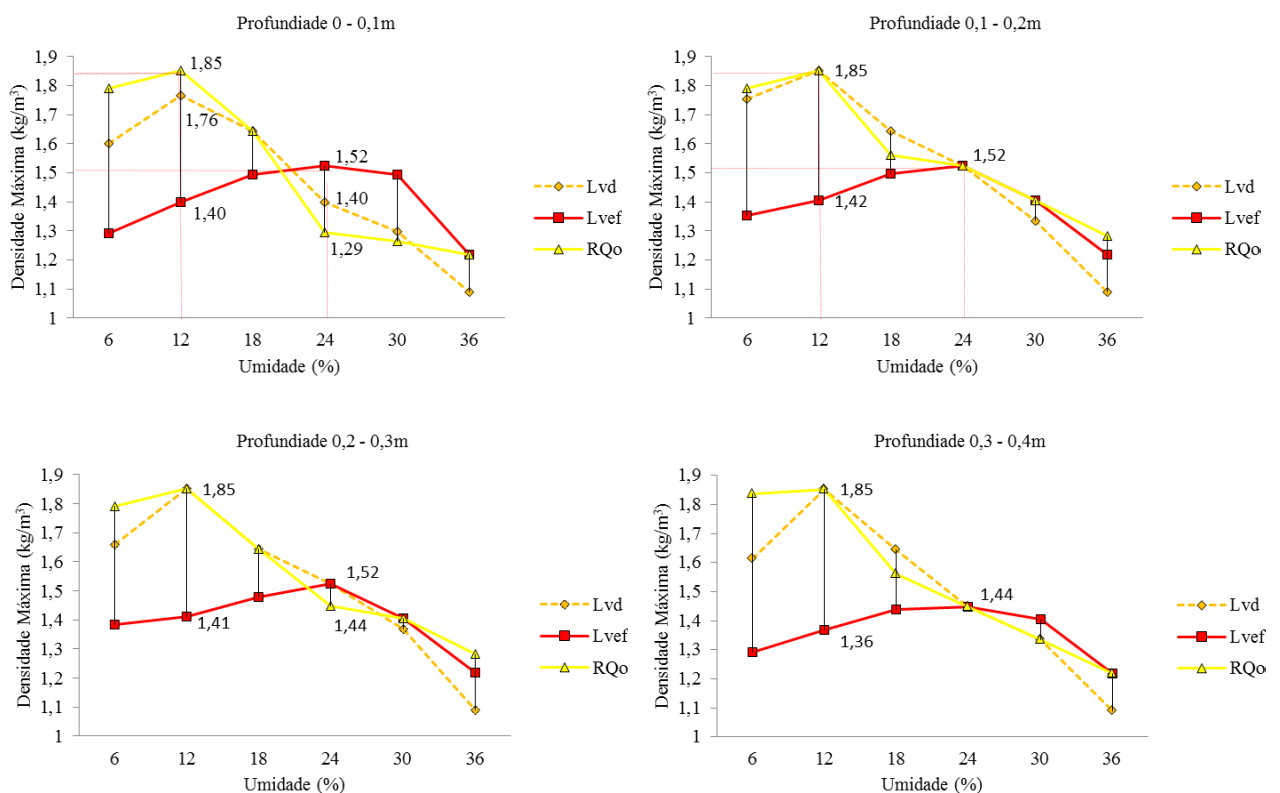


Figura 4 - Curvas de compactação para a classes LVef (elevada SM), LVd (media SM) e RQod (baixa SM) em quatros profundidades 0,0-0,10m; 0,10-0,20m; 0,20-0,30m e 0,30-0,40m.

Analisando o comportamento das curvas de compactação, verifica-se que para todos os solos a D_s aumentou com a umidade, até alcançar a umidade ótima de compactação ($\Theta = \theta_t$). Depois de alcançar a umidade ótima, nota-se que a D_s decai, isso porque o solo entra num estado denominado de plástico, onde sua estrutura é perdida, inviabilizando qualquer mobilidade agrícola (Vasconcelos et al., 2010; 2012; 2014).

Embora, o LVef, solo com elevada SM e o LVd, solo com mediana SM, pertençam a mesma classe de solo, assumiram comportamento bem distintos, uma vez que as curvas de compactação do LVd se mostrou mais similar ao RQod, solo com baixa SM. Tal evidência reforça a ideia supracitada por vários autores (Braida et al., 2006, Luciano et al., 2012), que essa diferença está associada ao tipo de mineralogia, densidade de partícula e a estabilidade de agregado. A aparente igualdade na coloração dos solos a olhos desarmado nos causam um falso sentimento de homogeneidade, onde essas diferenças foram sensivelmente capturadas pela variação da SM dos solos onde se verifica que o LVef possui SM seis vezes maior que o LVd (Tabela 3).

As curvas de compactação para o LVef, solo com maior SM, alcançaram o valor de densidade máxima do solo igual a $1,52 \text{ kg/m}^3$ na umidade ótima de compactação 24%, enquanto que para os solos com menor SM a umidade ótima de compactação foi igual a 12%. Tal comportamento evidencia que para mesma energia de compactação e umidade de até 18%, o LVef resiste mais as forças externas de compactação aplicadas pelo manejo adotado. De acordo com Braida et al. (2006), solos de textura argilosa e com mineralogia da fração argila mais oxídicas, favorecem a formação de agregados mais estáveis, uma vez que a fração argila é um agente cimentante natural, consequentemente apresentam menor $D_{sm\acute{a}x}$.

Na maior parte do perfil do solo (0 - 0,4m) para mesma energia de compactação, os solos LVd e RQod apresentaram $D_{sm\acute{a}x}$ de $1,85 \text{ kg/m}^3$, sendo que em ambos a umidade crítica de compactação foi em 12%, já o LVef, nesta mesma condição de umidade apresenta $D_{sm\acute{a}x}=1,41 \text{ kg/m}^3$, ou seja, nas mesmas condições de umidade (12%) o LVd e RQod (solos com menor SM) quando manejados podem

compactar 24% a mais do que o LVef (solo como elevada SM). Rossetti (2015) encontrou valores críticos de umidade igual a 22% em LVef e 13% no LVd.

O LVef apresentou maior compactação na umidade $\Theta = ot$ de 24% ($Dsm_{\acute{a}x}=1,52 \text{ Kg/m}^3$). Nessas mesmas condições de umidade na camada mais superficial do solo o LVd e RQod respectivamente apresentaram $Dsm_{\acute{a}x}=1,40 \text{ Kg/m}^3$ e $Dsm_{\acute{a}x}=1,29 \text{ Kg/m}^3$, ou seja 9% e 15% menor que o LVef, valores semelhantes foram obtidos por Rossetti (2015).

As diferenças na granulometria e mineralogia do solo, especialmente no teor de areia e de argila, auxiliam a entender porque a $Dsm_{\acute{a}x}$ e a umidade ótima de compactação ($\Theta = ot$) variam entre os solos e as camadas. Solos de textura argilosa, maior SM, e com mineralogia da fração argila mais oxídicas, favorecem a formação de agregados mais estáveis, o que conferem maior volume de poros, resultando na redução da densidade. Nos solos com menor SM o comportamento foi inverso, ambos os solos apresentaram formas mais cristalinas da Ct, o que explica o maior potencial de compactação visto sua estrutura ser mais susceptível a compactação em razão da sobreposição das lâminas de Ct (Ferreira et al. 1999).

Transformar esses dados em mapas a fim de estabelecer zonas de manejo específico torna-se uma ferramenta importante para redução dos impactos ambientais e melhorar uso do solo. Com o propósito de estabelecer locais com diferentes potenciais de compactação, levando em consideração a camada superficial do solo (local onde se encontra a maior parcela das raízes das plantas), foi estudado o comportamento das curvas de compactação do solo em função da umidade.

Para digitalizar as zonas de manejo específico foram realizadas duas técnicas complementares, sendo a primeira utilizando as classes de solos (Figura 5) e a segunda utilizando a distribuição espacial da suscetibilidade magnética do solo (Figura 6) (adaptado de Teixeira, 2015). Dessa forma pretende-se estabelecer limites mais preciso diminuindo o erro das faixas de transição das classes.

Valores de densidade inferiores a $1,4 \text{ Kg/m}^3$ foram considerado como baixo potencial à compactação, densidades entre $1,4$ a $1,5 \text{ Kg/m}^3$ foram consideradas moderadas e valores superiores a $1,5 \text{ Kg/m}^3$ foi considerada como alta potencial a compactação, indicando restrições ao desenvolvimento das plantas. Esses valores

de densidade para caracterização da compactação do solo estão em consonância com os estudos proposto por Reichert et al. (2003).

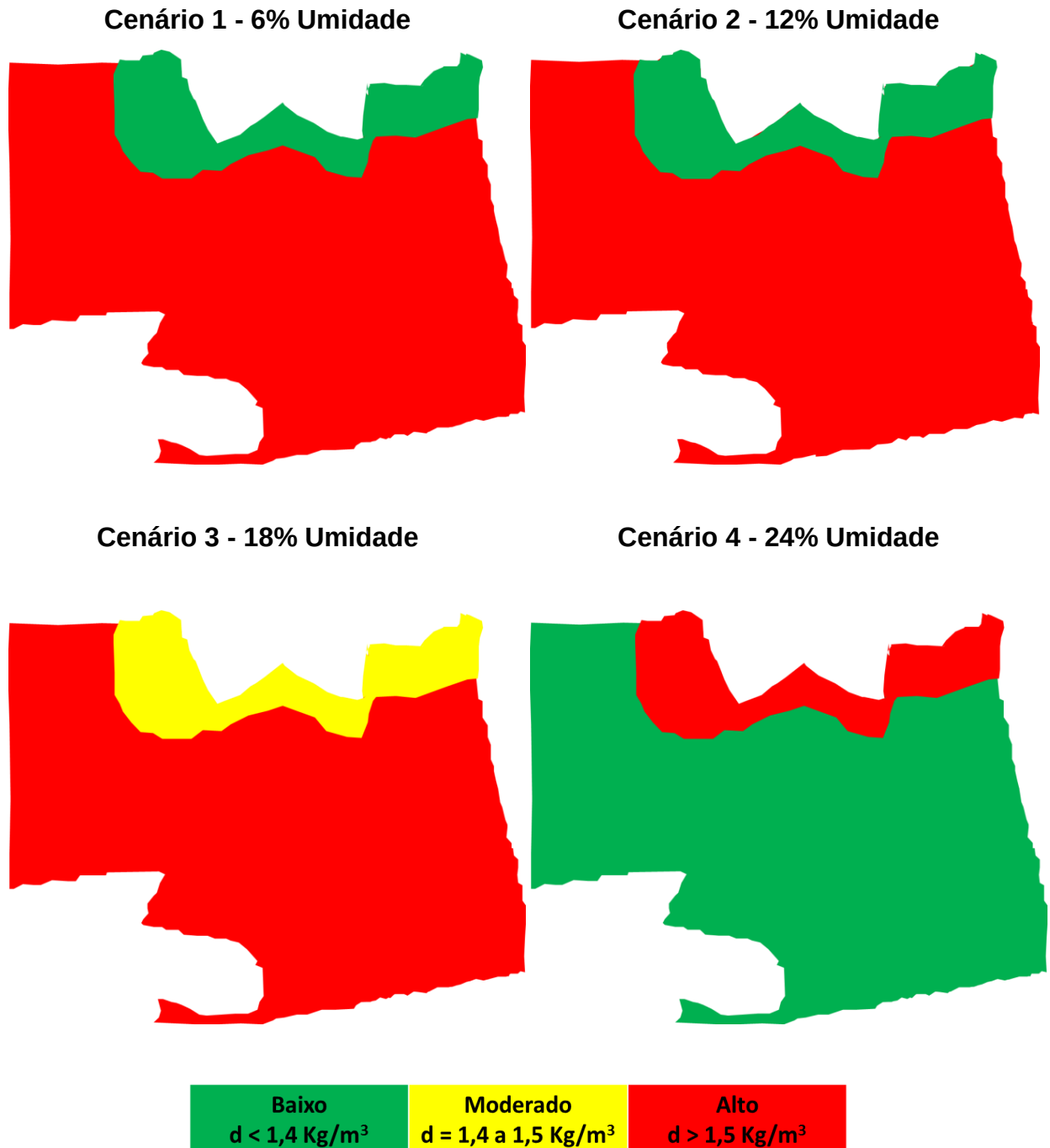


Figura 5 – Cenários de compactação em função da umidade do solo, mapeados de acordo com as classes de solo; d=Densidade do solo.

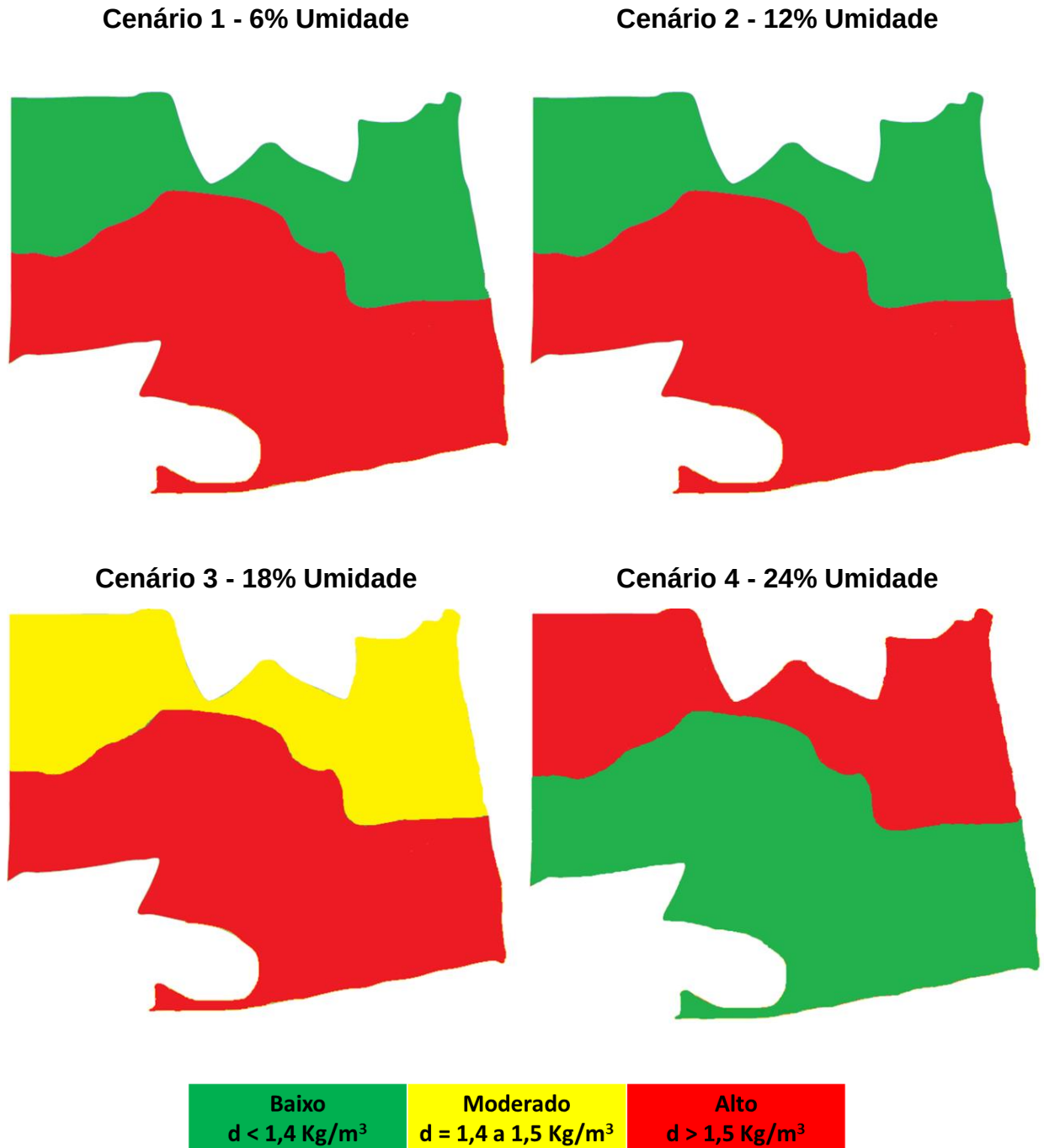


Figura 6 – Cenários de compactação em função da umidade do solo, mapeados de acordo com a distribuição espacial da SM; d=Densidade do solo.

De acordo com as figuras 5 e 6 verifica-se que para a maior parte das situações, com umidade inferior a 18% o potencial de compactação para solos com maior SM ($60 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$) quando submetido ao mesmo manejo é inferior ao solo com menor SM (valores inferiores a $11 \times 10^{-6} \text{ m}^3 \text{ kg}^{-1}$). Ou seja, não é recomendado o

manejo logo após as precipitações (elevada umidade do solo) visto o maior potencial de compactação. O inverso ocorre na posição mais baixa da vertente, onde os solos com menor SM o potencial de compactação indica que o manejo mais assertivo em função de evitar danos físicos ao solo é acima de 18% de umidade, sendo assim o melhor local para retomada das operações pós chuva.

Além da umidade que o solo apresenta no momento do manejo outra importante característica intrínseca do solo é a consistência, forma usada para escrever seu estado físico. Estudando esta característica em Latossolos Vermelhos de textura semelhante a do presente trabalho alguns pesquisadores encontraram valores de umidade para caracterizar o limite plástico igual a 19% para Latossolos Vermelhos de textura média e 32% para Argilosos (Filho, et al. 2015). Esses resultados corroboram com a umidade de recomendação indicada nos mapas de manejo, onde caracteriza a condição de solo friável (abaixo do limite plástico). Condição esta que se recomenda a realização das operações mecanizadas, em função da mínima coesão entre as partículas do solo e da menor adesão do solo às ferramentas de preparo e de semeadura (Corrêa, 1982).

O mapeamento por meio da SM possibilita um refinamento da transição das classes de solo, e por ser uma técnica indireta, pratica e de custo reduzido permite a realização de um maior número amostral minimizando os erros das transições das classes. Este mapeamento torna-se uma ferramenta de grande valia no sentido de adequar o manejo do solo de forma a minimizar os danos físicos e a consequente degradação dos solos causados por operações realizadas sem o devido planejamento e fora do momento ideal de umidade.

Além da umidade, outra importante variável nos estudos da compactação do solo é a cobertura vegetal. Diversos autores apontam que a suscetibilidade do solo à compactação, avaliada pelo ensaio de Proctor decresce com aumento do material orgânico do solo (Silva, et al. 1986, Ekwue e Stone, 1997, Mendonza et al., 2000). Assim para tornar o manejo ainda mais assertivo é importante correlacionar as variáveis: Solo, teor de água e cobertura vegetal (Figura 7).

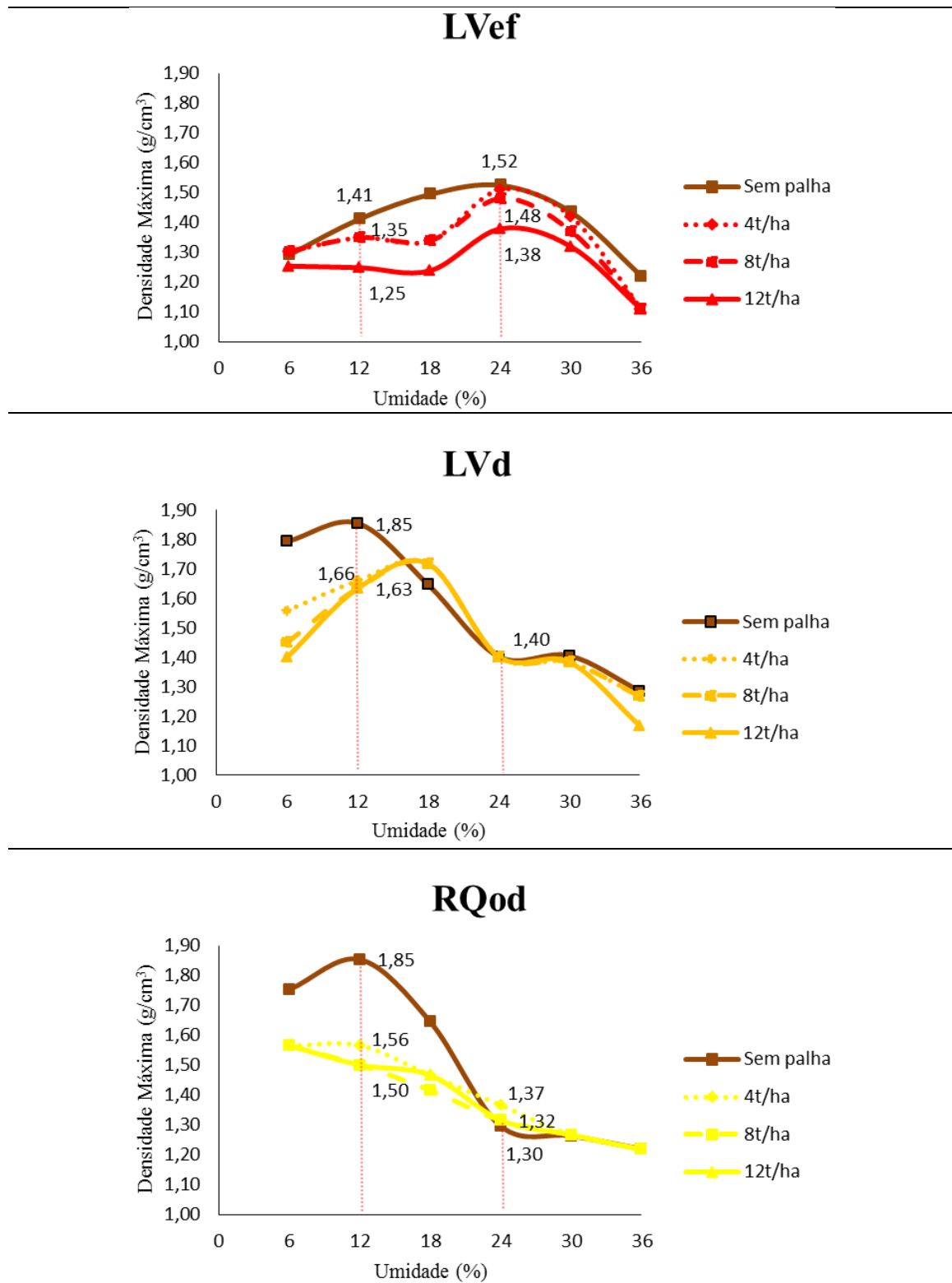


Figura 7 - Curvas de compactação para a classes LVef (elevada SM), LVd (media SM) e RQod (baixa SM) no horizonte superficial em função da cobertura vegetal.

Para todos os solos observa-se que a densidade diminui na medida em que a cobertura vegetal é adicionada. De acordo com Braida et al. (2006), a palha de cana-de-açúcar possui uma baixa densidade e suscetibilidade à deformação e elasticidade, sendo assim possui a capacidade em atenuar o efeito de cargas externas aplicadas aos solos. O caráter elástico da palhada pode ser constatado pelas curvas mais onduladas, indicando um comportamento mais moldável frente às forças compressivas, ou seja, deformadoras do solo (Figura 7). Esse comportamento é de grande importância para manutenção e melhoria das propriedades físicas, já que o tráfego agrícola intenso altera as características físico-hídricas e reduz a eficiência dos sistemas de produção agrícola da cana-de-açúcar (Luca et al., 2008; Garbiate et al., 2011).

As curvas de compactação para o LVef alcançaram umidade ótima de compactação com umidade em $U_{cc}=24\%$ e $D_{smáx}=1,52 \text{ Kg/m}^3$, sem a presença de palha de cana-de-açúcar na superfície do solo. Entretanto com a presença de palha a densidade máxima diminuiu para todos os tratamentos (4, 8 e 12 t/ha), atingindo $D_{smáx}=1,51 \text{ Kg/m}^3$, $D_{smáx}=1,48 \text{ Kg/m}^3$, e $D_{smáx}=1,38 \text{ Kg/m}^3$, respectivamente, corroborando os estudos de Vasconcelos et al. (2012). A densidade máxima obtida diminuiu 9,1% quando o solo apresenta uma camada de palha correspondendo a 12 toneladas por hectare, contudo a umidade crítica de compactação (U_{cc}) seguiu o mesmo comportamento para o solo sem a palhada, ou seja, $U_{cc}=24\%$.

As maiores amplitudes evidenciando o efeito amortecedor da palha foram para os solos com menores SM, LVd e o RQod. Nota-se que no LVd para 6% de umidade a densidade reduziu 23%, já no RQod, com 12% de umidade a redução da densidade foi de 19%, ambas com incremento de 12 toneladas de palha por hectare. Sobre esse aspecto, Braida et al. (2006), concluíram que o acúmulo de matéria orgânica em diferentes sistemas de manejo do solo, reduziu a densidade máxima e aumentou a umidade crítica de compactação do solo, significando que ele se tornou mais resistente à compactação.

Segundo Vasconcelos et al. (2010; 2014), a matéria orgânica do solo repercute no valor da densidade do solo tanto pela melhoria na estabilidade estrutural do solo como pela densidade da mesma ser menor do que a dos sólidos do solo. Krzic et al. (2004) comprovaram, investigando o efeito da matéria orgânica

do solo sobre o grau de compactação, que o incremento de 1% no teor de carbono orgânico reduz, independentemente da textura do solo, a densidade relativa máxima do solo em 11%. Esses resultados confirmam a importância da adoção de sistemas de manejo que promovam o aumento no teor da matéria orgânica do solo (Nascimento et al., 2009).

Objetivando complementar os mapas de potenciais de compactação em função da amplitude magnética do solo e umidade de manejo foi proposto à criação de uma matriz, ou carta de recomendação de uso sustentável do solo, a qual mostra o comportamento esperado da compactação em função da amplitude magnética e umidade com a cobertura vegetal do solo (Tabela 4).

Tabela 4. Matriz do potencial de compactação em função da umidade, amplitude magnética e cobertura vegetal.

Classe Solo	Magnetismo $10^{-6} \text{m}^3/\text{kg}$	Condição	Potencial de Compactação em função da umidade			
			6%	12%	18%	24%
LVef	50-70	Sem Palha				
		4t/ha				
		8t/ha				
		12t/ha				
LVd	10-25	Sem Palha				
		4t/ha				
		8t/ha				
		12t/ha				
RQod	0,1-08	Sem Palha				
		4t/ha				
		8t/ha				
		12t/ha				

LVef – Latossolo Vermelho Eutroférico; LVd – Latossolo vermelho Distrófico; RQod – Neossolo Quartzarênico. Verde: Baixo Potencial de compactação ($d < 1,4 \text{ Kg/m}^3$); Laranja: Moderado ($d = 1,4 \text{ a } 1,5 \text{ Kg/m}^3$); Vermelho: Alto. ($d > 1,5 \text{ Kg/m}^3$).

O comportamento esperado da compactação foi profundamente alterado em função da cobertura vegetal, sendo essa uma importante variável para manejar o solo sem comprometer sua qualidade física. Neste estudo verificou-se que solos com valores magnéticos acima de $50 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{kg}^{-1}$ com o incremento de 12t de palha por hectare independente da umidade do solo o potencial de compactação é sempre baixo, considerando um manejo cuja energia de compactação seja de até 560 Kpa (uma passada de trator de 10t).

Os resultados desta matriz indicam que aumentando o volume de palha na superfície maior é o suporte de carga que o solo apresenta, desta forma qualquer manejo que propicie acúmulo de material orgânico em superfície torna-se um importante aliado na melhoria física do solo. O incremento anual de palha nas lavouras de cana de açúcar esta em função da produtividade, variedade, ciclo da cultura (número de cortes), umidade e temperatura para mineralização e limpeza realizada no momento da colheita.

Segundo levantamento realizado pelo Pecege (ESALQ) os custos médios para implantação do canavial Safra 2017/18 totalizaram R\$7.282,00 por hectare reformados. Considerando a compactação do solo como uma das principais causas para queda de produtividade e reforma prematura do canavial, a interpretação e aplicação desta matriz pode fornecer ao agricultor subsídios práticos que auxiliam na tomada de decisão visando o uso sustentável e rentável do solo.

6. CONCLUSÕES

1. A mineralogia da fração argila determinou o comportamento das curvas de compactação dos solos e a suscetibilidade magnética do solo foi sensível as mudanças mineralógicas.

2. Com teores de água no solo de até 18%, quando manejados com a mesma energia de compactação, solos com suscetibilidade magnética inferiores a $11 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{kg}^{-1}$ compactam até 24% a mais do que solos com suscetibilidade

magnética acima de $50 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{kg}^1$.

3. A suscetibilidade magnética do solo possibilitou a construção de mapas de manejo específico, indicando locais com suscetibilidades distintas à compactação em função da umidade do solo.

4. A cobertura vegetal apresentou importante papel na melhoria estrutural do solo, diminuindo em todos os solos o potencial de compactação.

5. O efeito amortecedor da palha reduz a densidade do solo em 23% no LVd quando manejado a 6% de umidade e 19% no RQod, a 12% de umidade

7. REFERÊNCIAS

Alakukku, I.; Elomen, p. Long-term effects of a single compaction by heavy field traffic on yield and nitrogen uptake of annual crops. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.36, p.141-152, 1994.

Albuquerque, J.A.; Reinert, D.J.; Fiorin, J.E.; Ruedell, J.; Petrere, C.; Fontinelli, F. Rotação de culturas e sistemas de manejo do solo: efeito sobre a forma da estrutura do solo ao final de sete anos. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v.19, p.115-119, 1995.

Albuquerque, J.A; Reinert, D.J. & Fiorin, J.E. Variabilidade de solo e planta em Podzólico Vermelho-Amarelo. **R. Bras. Ci. Solo**, 20:151-157, 1996.

Almeida, C.X.; Centurion, J.F.; Freddi, O.S.; Jorge, R.F. & Barbosa, J.C. Funções de pedotransferência para a curva de resistência do solo à penetração. **R. Bras. Ci. Solo**, 32:2235-2243, 2008.

Andrade R.S.; Stone, L.F.; Godoy, S.G. Estimativa da resistência do solo à penetração baseada no índice S e no estresse efetivo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. v.17, n.9, p.932–937, 2013.

Andreola, f.; Costa, I.m.; Olszewski, n. Influência da cobertura vegetal de inverno e da adubação orgânica e, ou, mineral sobre as propriedades físicas de uma Terra Roxa Estruturada. **Revista Brasileira Ciência do Solo** Viçosa, v.24, p.857-865, 2000.

ASAE. American Society of Agricultural Engineers, ASAE Standards: Standards engineering practices data. San Joseph, 1999.

Assis, R.L.; Lazarini, G.D.; Lanças, K.P.; Cargnelutti Filho, A. Evaluation of soil resistance to penetration in different soils with varying moisture contents. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.29, n.4, p. 558-568, 2009.

Assouline, S.; Tavares Filho, J.; Tessier, D. Effects of compaction on soil physical and hydraulic properties: experimental results modeling. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.61, p.390-398, 1997.

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

Bahia, A. S. R. S.; Marques Júnior, J.; Panosso, A. R.; Camargo, L. A.; Siqueira, D. S.; Teixeira, D. B.; La Scala JR., N. Field-scale spatial correlation between contents of iron oxides and CO₂ emission in an Oxisol cultivated with sugarcane. **Scientia Agrícola** (USP. Impresso), v. 72, p. 157-166, 2015.

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

Bahia, R.S., Marques Jr; La Scala, N; Cerri, P; Camargo, L. (2018). Prediction and Mapping of Soil Attributes using Diffuse Reflectance Spectroscopy and Magnetic Susceptibility, **Soil Science Society Of America Journal** Abstract – Pedology, Vol. 81 No. 6, p. 1450-1462 – 2018

Bahia Filho, A. F. C. **Índices de disponibilidade de fósforo em Latossolo do Planalto Central com diferentes características texturais e mineralógicas**. 1982. 179 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 1982.

Bailey, A.C.; Raper, R.L.; Johnson, C.E.; Burt, E.C. An integrated approach to soil compaction prediction. **Journal Agriculture Engineering Research** London, v.61, p.73-80, 1993.

Ball, B.C.; Campbell, D.J.; Douglas, J.T.; Henshall, J.K.; O'sullivan, M.F. Soil structural quality, compaction and land management. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.48, p.593-601, 1997.

Barbieri, D. M.; LA Scala Jr, N.; Marques Júnior, J.; Pereira, G. T.; Siqueira, D. S.; Panosso, A. R. Comportamento dos óxidos de ferro da fração argila e do fósforo adsorvido, em diferentes sistemas de colheita de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 37, n. 6, p. 1557-1568, 2013.

Barbosa, Ronny Sobreira. **Erodibilidade de latossolos predita pela suscetibilidade magnética e espectroscopia de reflectância difusa**. 2014. xiii, 65 p. Tese (doutorado) - Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2014.

Barbosa, G.M.C.; Tavares Filho, J.; Fonseca, I.C.B. Avaliações das propriedades físicas em Latossolo Vermelho eutroférrico tratado com lodo de esgoto por dois anos consecutivos. **Sanare**, Curitiba, v.17, p.94-101, 2002.

Barrios, m. R.; La Scala jr, n.; Marques Júnior, j.; Siqueira, D. S.; Panosso, A. R. Magnetic susceptibility to identify landscape segments on a detailed scale in the region of Jaboticabal, São Paulo, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 2, p. 1073-1082, 2012.

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

Bartington. Operation Manual for MS2 Magnetic Susceptibility System Disponível em: <<http://www.bartington.com/Literaturepdf/Operation%20Manuals/om0408%20MS2.pdf>>; Acessado em: 24 de jan. 2013.

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

Beulter, A.N.; Silva, M.L.N.; Curi, N.; Ferreira, M.M.; Cruz, J.C.; Pereira Filho, I.A. Resistência à penetração e permeabilidade de Latossolo Vermelho distrófico típico sob sistemas de manejo na região dos cerrados. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, p.167-177, 2001

Braida, J. A.; Reichert, J. M.; Veiga, M.; Reinert, D. J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio Proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.30, n.4, p.605-614, 2006.

Brindley, G.W.; Kao, Chih-Chun; Harrison, J.L.; Lipscas, M.L. & Raythatha, R. Relation between structural disorder and other characteristics of kaolinite and dickites. **Clays Clay Miner.**, 34:239-249, 1986.

Bronick, C.J. & LAL, R. Soil structure and management: A review. **Geoderma**, 124:3-22, 2005.

Camargo, L. **Mineralogia da argila e atributos físicos de um argissolo em curvaturas de relevo**. Jaboticabal, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 111f, 2009. (Dissertação de Mestrado).

Camargo, L. A. **Mineralogia da argila por difração de raios x e espectroscopia de reflectância difusa em Latossolos sob diferentes superfícies geomórficas**. 2013. 125 52 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**, Amsterdam, v., 100, n. 1, p. 100-106, 2013.

Camargo, L. A.; Marques JR, J.; Pereira, G. T.; Horvat, R. A. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um latossolo sob diferentes formas do relevo. II - correlação espacial entre mineralogia e agregados. **Rev. Bras. Ciênc. Solo** 32, 2279-2288, 2008.

Camargo, L. A.; Marques JR., J.; Pereira, G. T.; Horvat, R. A. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um latossolo sob diferentes formas do relevo. II - correlação espacial entre mineralogia e agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 6, p. 2279-2288, 2008b.

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**. Campinas, Instituto Agronômico, 96 p, 1986. (Boletim Técnico 106).

Camargo, O.A.; Alleoni, L.R.F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba, SP: ESALQ, 1997. 132p.

Campos, P. M; Lacerda, M. P. C; Papa, R. A.; Guimarães, E. M.; Costa Neto, F. Difractometria de raios X aplicada na identificação de gibbsita e caulinita em latossolos do Distrito Federal. In: Simpósio Nacional cerrado, 9.; Simpósio Internacional savanas tropicais 2., 2008, Brasília. **Anais...** Brasília, p. 01-07, 2008.

Canillas, E. C.; Salokhe, V. M. A decision support system for compaction assessment in agricultural soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.65, n.2, p.221-230, 2002.

Castro, P. H. M.; Vendrame, P. R. S.; Pinese, J. P. P. **Mineralogia da fração argila de solos localizados em ilhas no alto Rio Paraná, PR/MS**. Seminário Ciências Exatas e Tecnológicas, Londrina, v. 35, n. 2, p. 181-188, jul./dez. 2014.

Centurion, J.F.; Cardoso, J.P.; Natale, W. Efeito de formas de manejo em algumas propriedades físicas e químicas de um Latossolo Vermelho em diferentes agroecossistemas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.5, n.2, p.254-258, 2001.

Collares, G.L.; Reinert, D.J.; Reichert, J.M. & Kaiser, D.R. Compactação de um Latossolo induzida pelo tráfego de máquinas e sua relação com o crescimento e produtividade de feijão e trigo. **R. Bras. Ci. Solo**, 32:933-942, 2008.

CORRÊA, J.C. Limites de consistência de solos da Amazônia Central e sua importância agrícola. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, 17:917-921, 1982.

Cornell, R. M.; Schneider, W. **Formation of goethite from ferrihydrite at physiological pH under the influence of cysteine**. Polyhedron, Oxford, v. 8, n. 2, p. 149– 155, 1989.

Cortez, L.A. **Subsolagem em profundidade variada com base no mapeamento de áreas de manejo específico**. Jaboticabal, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 57p, 2013. (Dissertação de Mestrado).

Costa, A.C.S.; Bigham, J.M.; Rhoton, F.E. & Traina, S.J. **Quantification and characterization of maghemite in soils derived from volcanic rocks in southern Brazil**. *Clays Clay Miner.*, 47:466-473, 1999.

Costa, F.S.; Bayer, C.; Albuquerque, J.A.; Fontoura, S.M.V. Aumento de matéria orgânica num latossolo bruno em plantio direto. **Ciência Rural** , Santa Maria, v.34, n.2, p.587-589, 2004.

Couto, R. F., Reis, E. F., Viana, P. M. F., Holtz, V., Oliveira, L. A., & Alves, S. M. F. (2013). Compactação e recalque superficial de um Latossolo Vermelho em condição de campo e laboratório. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, 17(11), 1239-1245. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662013001100016>

Curi, N. & Franzmeier, D.P. Toposequence of Oxisols from the central plateau of Brazil. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 48:341-346, 1984.

Dauda, A.; Samari, A. Cowpea yield response to soil compaction under tractor on a sandy loam soil in the semi- arid region of northern Nigeria. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.68, n.1, p.17-22, 2002.

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

Dias Junior, M.S. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic**. 1994. 114f. Tese (Doutorado em Solos e Culturas) - East Lansing State University.

Dias Junior, M.S.; Ferreira, M.M.; Fonseca, S.; Silva, A.R.; Ferreira, D.F. Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural dos solos em sistemas florestais na região de Aracruz-ES. **Revista Árvore**, Viçosa, v.23, n.4, p.371-380, 1999.

Dias Junior, M.S.; Miranda, E.E.V. Comportamento da curva de compactação de cinco solos da região de lavras (MG). **Ciência Agrotécnica** , Lavras, v.24, n.2, p.337- 346, 2000.

Dias Junior, M.S.; Pierce, F.J. A simple procedure for estimating preconsolidation pressure from soil compression curves. **Soil Technology**, Amsterdam, v.8, n.2, p.139-151, 1995.

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

Dick, D. P.; Gonçalves, C. N.; Dalmolin, R. S. D.; Knicker, H.; Klamt, E.; Kögel-Knabner, I.; Simoes, M. L.; Martin-Neto, L. Characteristics of soil organic matter of different Brazilian Ferralsols under native vegetation as a function of soil depth. **Geoderma**, Amsterdam, v. 124, n. 3–4, p. 319–333, 2005.

Ekwue, E. I.; Stone, R. J. **Organic matter effects on strength properties of compacted agricultural soils**. Transactions of the ASAE, St. Joseph, v.38, n.2, p.357-367, 1995.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Manual de métodos de análise de solo. 2. ed. Brasília: Ministério da Agricultura e do Abastecimento / EMBRAPA-CNPQ, 212 p, 1997.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. Sistema Brasileiro de Classificação de Solos. 2 ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2006.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Sistema brasileiro de classificação de solos. 3.ed. Brasília, 353p, 2013.

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 Ciências do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 2, p. 245–257, 2004.

Ferreira, M. M.; Fernandes, B.; Curi, N. Mineralogia da fração argila e estrutura de Latossolos na região sudeste do Brasil. **Revista Brasileira De Ciência Do Solo**, Campinas, v. 23, p. 507-514, 1999.

FILHO, Oswaldo Julio Vischi et al . Capacidade de suporte de carga de Latossolo Vermelho cultivado com cana-de-açúcar e efeitos da mecanização no solo. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília , v. 50, n. 4, p. 322-332, abr. 2015.

Fitzpatrick, R.W. & Schwertmann, U. Al-substituted goethite – an indicator of pedogenic and other weathering environments in South Africa. **Geoderma**, 27:335-347, 1982.

Flowers, M.D., LAL, R. Axle load and tillage effects on soil physical properties and soybean grain yield on a mollic ochraqualf in northwest Ohio. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.48, p.21-35, 1998.

Fontes, M. P. F.; Oliveira, T. S. de; Costa, L. M; Campos, A. A. G. Magnetic separation and evaluation of magnetization of Brazilian soils from different parent materials. **Geoderma**, Amsterdam, v. 96, n. 3, p. 81–99, 2000.

Forsythe, W.M. Manual de laboratório de física de solos. San José, IICA, 1985. 216p.

Garbiate, M.V.; Vitorino, A. C. T.; Tomasini, B. A.; Bergamin, A. C.; Panachuki, E. Erosão entre sulcos em área cultivada com cana crua e queimada sob colheita manual e mecanizada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, p.2145-2155, 2011.

Gardner, W. R. Representation of soil aggregate-size distribution by a logarithmic-normal distribution¹, 2. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 20, n. 2, p. 151-153, 1956.

GEOBANK. Serviço Geológico do Brasil – CPRM. Available in <http://geobank.sa.cprm.gov.br/>, 2014.

Ghidin, A. A.; Melo, V. F.; Lima, V. C. Topossequência de Latossolos originados de rochas basálticas no Paraná. I – Mineralogia da fração argila. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 2, p. 293-306, 2006a.

Ghidin, A.A.; Melo, V.F.; Lima, V.C. & Lima, J.M.J.C. Topossequências de Latossolos originados de rochas basálticas no Paraná. II - Relação entre mineralogia da fração argila e propriedades físicas dos solos. **R. Bras. Ci. Solo**, 30:307-319, 2006.

Gomes, R. P.; Campos, M. C. C.; Soares, M. D. R.; Silva, D. M. P.; Cunha, J. M.; Franciscan, U.; Silva, L. S.; Oliveira, I. A.; Brito, W. B. M. Spatial variability of aggregates and organic carbon under three different uses of indian black earth in southern Amazonas. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v. 33, n. 6, p.1513-1522, 2017.

Gubiani, P. I., Reichert, J. M., & Reinert, D. J. (2014). Interação entre disponibilidade de água e compactação do solo no crescimento e na produção de feijoeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 38(3), 765-773. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000300008>

Guimarães, C.M.; Stone, L.F.; Moreira, A.A.J. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. II: efeito sobre o desenvolvimento radicular e da parte aérea. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, p.213-218, 2002.

Guyodo, Y.; Banerjee, S. K.; Penn, R. L.; Burleson, D.; Berquó, T. S.; Seda, T.; Solheid, P. **Magnetic properties of synthetic six-line ferrihydrite nanoparticles. Physics of the Earth and Planetary Interiors**, Amsterdam, v. 154, n. 1, 2006, 222p.

Ifad. The Rural Poverty Report 2011; International Fund for Agricultural Development: Rome, Italy, 2010. 3. Leon J, Osorio N. Role of Litter Turnover in Soil Quality in Tropical Degraded Lands of Colombia. **Science World Journal**. 2014; 13, doi:10.1155/2014/693981.

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

Imhoff, S.C. **Indicadores de qualidade estrutural e trafegabilidade de Latossolos e Argissolos Vermelhos**.2002. 104p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP.

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, p.851-866, 2005.

Instituto de pesquisas tecnológicas do estado de São Paulo (IPT). Geomorphological Map of the State of São Paulo, 1981.

Horn, R. Compressibility of arable land. **Catena**, Jerusalém, v.11, p.53-71, 1988.

Horn, R., Domzal, H., Slowinskajurkiewicz, A., et al. Soil compaction processes and their effects on the structure of arable soils and the environment. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.35, p.23-26, 1995.

Kämpf, N. & Schwertmann, U. Avaliação da estimativa de substituição de Fe por Al em hematitas de solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 22, p.209-213, 1998.

Kämpf, N. & Schwertmann, U. Goethite and hematite in a climosequência in Southern Brazil and their application in classification of kaolinitic Soils. **Geoderma**, Amsterdam, v. 29, p.27-39, 1982.

Kämpf, N.; CURI, N. **Óxidos de ferro: indicadores de atributos e ambientes pedogenéticos e geoquímicos**. In: Novais, R.F.; Alvarez V., V.H.; Schaefer, C.E.G.R. (Ed.). Tópicos em Ciência do Solo. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do solo, p.107-138, 2000.

Kemper, W. D.; Rosenau, R. C. **Aggregate stability and size distribution**. In: KLUTE, A. (Ed.). Methods of soil analysis. Madison, WI, p. 425-442. Part I, 1986.

Kemper, W.D.; Chepil, W.S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C.A. (Ed.). Methods of soil analysis. Madison: American Society Agronomy, p.499-510, 1965.

Ker, J. C. **Mineralogia, sorção e dessorção de fosfato, magnetização e elementos traços de Latossolos do Brasil**. Viçosa, MG, UFV, 181p, 1995. (Tese de Doutorado.)

Kondo, M. K.; Dias Junior, M. S. Compressibilidade de três Latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, p.211-218, 1999.

Krzic, M.; Buhner, C. E.; Teste, F.; Dompter, L.; Rahman, S. Soil properties influencing compactability of forest soils in British Columbia. **Canadian Journal Soil Science**, v.84, p.219-236, 2004.

Lebert, M.; Horn, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.19, p.275-286, 1991.

Lima, C.L.R. **Compressibilidade de solos versus intensidade de tráfego em um pomar de laranja e pisoteio animal em pastagem irrigada**. 2004. 70p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Departamento de Solos e Nutrição de Plantas, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, SP.

Leal, F. T.; França, A. B. C.; Siqueira, D. S.; Teixeira, D. D. B.; Marques Júnior, J.; La Scala Jr., N. Characterization of potential CO₂ emissions in agricultural areas using magnetic susceptibility. **Scientia Agricola**, Piracicaba, 2015.

Luca, E. D.; Feller, C.; Cerri, C. C.; Barthès, B.; Chaplot, V.; Campos, D.C.; Manechini, C. Avaliação de atributos físicos e estoques de carbono e nitrogênio em solos com queima e sem queima de canavial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.789-800, 2008.

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

Luciano, R.V.; Albuquerque, J.A.; Costa, A.; Batistella, B. & Warmling, M. T. Atributos físicos relacionados à compactação de solos sob vegetação nativa em região de altitude no sul do **Brasil**. **R. Bras. Ci. Solo**, 36:1733-1744, 2012.

Maher, B. A.; Thompson, R. Palaeomonsoons I: **The magnetic record of palaeoclimate in the terrestrial loess and palaeosol sequences, in quaternary climates, environments and magnetism**, Cambridge: University Press, 1999. p. 81– 125.

Mazurana, M., Levien, R., Inda Junior, A. V., Conte, O., Bressani, L. A., & Müller, J. (2017). **Soil susceptibility to compaction under use conditions in southern Brazil**. *Ciência e Agrotecnologia*, 41(1), 60–71. doi:10.1590/1413-70542017411027216

Mcbratney, A. G.; Mendonça Santos, M. L.; Minasny, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, Amsterdam, v. 117, n. 1-2, p. 3–52, 2003.

Mcbride, R.A.; Watson, G.C. An investigation of reexpansion of unsaturated, structured soils during cycles static loading. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.17, n.3/4, p.241-253, 1990.

Mcneal, B. L.; Layfiel, D. A.; Norvell, W. A.; Rhoades, J. D. Factor influencing hydraulic conductivity of soils in the presence of mixed salt solution. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 32, n. 2, p. 187-190, 1968.

Mehra, O. P., Jackson, M. L. **Iron oxide removal from soils and clays by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate**. In: SWINEFORD, A. D. A. (Ed.) National conference on clays and clay mineral, Washington, Proceedings Pergamon Press, 317-342, 1960.

Melo, V.F.; Novais, R.F.; Schaefer, C.E.G.R.; Fontes, M.P.F. & Singh, B. Mineralogia das frações areia, silte e argila de sedimentos do Grupo Barreiras no município de Aracruz, estado do Espírito Santo. **R. Bras. Ci. Solo**, 26:29- 41, 2002b.

Merotto, A.J.; Mundstock, C.M. Wheat root growth as affected by soil strength. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, p.197-202, 1999.

Mestdagh, M.M.; Vielvoye, L. & Herbillon, A.J. Iron in kaolinite: II. **The relationship between kaolinite crystallinity and iron content**. *Clay Miner.*, 15:1-13, 1980

MINITAB. Minitab-Minitab statistical software, release 13.1. Pennsylvania, State College, USA: Minitab Inc, 2000.

Nogueira, J.B. Mecânica dos solos. Ensaios de Laboratório. São Carlos, EESC-USP, 248p, 1998.

Nascimento, J. B.; Carvalho, G. D.; Cunha, E. Q.; Ferreira, E. P. D. B.; Leandro, W. M.; Didonet, A. Determinação da biomassa e atividade microbiana do solo sob cultivo orgânico do feijoeiro-comum em sistemas de plantio direto e convencional após cultivo de diferentes espécies de adubos verdes. **Revista Brasileira de Agroecologia**, Porto Alegre, v. 4, n. 2, 2009.

Norrish, k. & Taylor, R.M. The isomorphous replacement of iron by aluminium in soil goethites. **Journal of Soil Science**, v. 12, p.294-306, 1961.

Novak, L.R.; Montovani, E.C.; Martyn, P.J.; Fernandes, B. Efeito do tráfego de trator e da pressão de contato pneu/solo na compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro Álico, em dois níveis de umidade. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.27, p.1587- 1595, 1992.

Oades, J. M. Soil organic matter and structural stability: mechanisms and implications for management. **Plant and Soil**, 76:319 -337, 1984.

Olu, J.O; Ayotamuno, M.B.; Folorunso, O.A. Compaction characteristics of prominent agricultural soil in Borno State of Nigeria. **American Society of Agricultural Engineering**, St. Joseph, v.30, p.1575-1577, 1987.

Oliveira, J.O.A.P.; Vidigal Filho, P.S.; Tormena, C.A.; Pequeno, M.G.; Scapim, C.A.; Muniz, A.S.; Sagrilo, E. Influência de sistemas de preparo do solo na produtividade da mandioca (*Manihot esculenta*, Crantz). **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, p.443-450, 2001.

Ortigara, C., Koppe, E., Luz, F. B. D., Bertollo, A. M., Kaiser, D. R., & Silva, V. R. D. (2014). Soil use and physical-mechanical properties of a Red Oxisol. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 38(2), 619-626. <https://doi.org/10.1590/S0100-06832014000200026>

Pedrotti, A. **Relação entre os atributos físicos e alumínio no solo**. 2000. 60 f. Tese (Doutorado em Agronomia), Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2000.

PROCTOR, R. R. Fundamental principles of soil compaction. *Engen. News Rec.*, 5: 286-289, 1933.

Peluco, R. G.; Marques Júnior., J.; Siqueira, Diego S.; Barbosa, R. S.; Teixeira, D. B.; Cortez, L. A.. Suscetibilidade magnética do solo e estimação da capacidade de suporte à aplicação de vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** (1977. Impressa), v. 48, p. 661-672, 2013.

Peluco, R.G. **Magnetismo e cor na identificação de solos com diferentes potenciais de sorção de imazaquim**. 2016. 105 f. Tese (Doutorado em Agronomia)

– Universidade Estadual Paulista ‘Júlio de Mesquita Filho’ Câmpus de Jaboticabal, Jaboticabal, 2016.

Reichert, J.M.; Reiner T, D.J. & Braidá, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **R. Ci. Amb.**, 27:29-48, 2003.

Reinert, D.J.; Albuquerque, J.A.; Reichert, J.M.; Aita, c.; Andrada, M.M.C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.32, p.1805-1816, 2008.

Reinert, D.J. **Soil structural form and stability induced by tillage in a typic hapludalf**. 1990. 128f. Tese (Doutorado em solos e Culturas) - Michigan State University.

Resende, M. **Aplicações de conhecimentos pedológicos à conservação de solos**. Inf. Agropecuário, v. 11, p. 3-18, 1985.

Richart, A., & Tavares Filho, J., & Rodrigues Brito, O., & Fuentes Llanillo, R., & Ferreira, R. (2005). **Compactação do solo: causas e efeitos**. *Semina: Ciências Agrárias*, 26 (3), 321-343

Rossetti, K.V. **Qualidade estrutural em Latossolos compactados cultivados com milho**. Jaboticabal, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 90p, 2015. (Tese de Doutorado).

Rücknagel, J., Götze, P., Hofmann, B., Christen, O., & Marschall, K. (2013). **The influence of soil gravel content on compaction behaviour and pre-compression stress**. *Geoderma*, 209-210, 226–232. doi:10.1016/j.geoderma.2013.05.030

Santana, M.B.; Silva Souza, L.; Duarte Souza, L. & Fontes, L.E.F. Atributos físicos do solo e distribuição do sistema radicular de citros como indicadores de horizontes coesos em dois solos de Tabuleiros Costeiros do Estado da Bahia. **R. Bras. Ci. Solo**, 30:1-12, 2006.

Santos, A. J. **Obras geotécnicas - Compactação**. Instituto superior técnico – Departamento de engenharia civil e arquitetura. Lisboa, 2008.

Santos, H. L.; Marques Júnior., J.; Matias, S. S. R.; Siqueira, D. S.; Pereira, G. T. Suscetibilidade magnética na identificação de compartimentos da paisagem em uma vertente. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 6, n. 4, p. 710-716, 2011.

Schaefer, C. E. G. R.; Fabris, J. D.; Ker, J. C. Minerals in the clay fraction of brazilian latosols (oxisols): a review. **Clay Minerals**, Twickenham, v. 43, n. 1, p. 137–154, 2008.

Schaefer, C. E. G. R.; Gilkes, R. J.; Fernandes, R. B. A. EDS/SEM study on microaggregates of Brazilian Latosols, in relation to P adsorption and clay fraction attributes. **Geoderma**, Amsterdam, v. 123, n. 1-2, p. 1-33, 2004.

Schulze, D. G. The influence of aluminium on iron oxides VIII. Unit-cell dimension of Al-substituted goethites and estimation of Al from them. **Clays and Clay Minerals**, New York, v.32, n. 1, p.36-44, 1984.

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

Schwertmann, U.; Fitzpatrick, R. W.; Taylor, R. M.; Lewis, D.G. The influence of aluminium on iron oxides. Part II: Preparation and properties of Al substituted hematites. **Clays and Clay Minerals**, New York, v.27, p.105-12, 1979.

Schwertmann, U.; Kämpf, N. Properties of goethite and hematite in kaolinitic soils of southern and central Brazil. **Soil Science**, Baltimore, v.139, p. 344-350, 1985.

Schwertmann, U.; Taylor, R. M. Iron oxides. In: DIXON, J. B.; WEED, S. B. (Ed.). **Minerals in Soil Environments**. 2. ed. Madison: SSSA, 1989. p. 379–438.

STEVENSON, F.J. Humus chemistry: genesis, composition, reactions. 2. ed. New York, John Wiley, 1994. 496p.

Seladji, S; Cosenzaa, P; Tabbagha, A J. Rangerd & G. Richardb The effect of compaction on soil electrical resistivity: a laboratory investigation in European **Journal of Soil Science**, December 2010, 61, 1043–1055

Servadio, P.; Marsili, A.; Pagliai, M.; Pellegrini, S.; Vignozzi. Effect on some clay soil qualities following the passage of rubbertracked and wheeled tractors in central Italy. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.61, n.3/4, p.143-155, 2001.

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

Siqueira, D.S.; Marques JR., J.; Matias, S.S.R.; Barrón, V.; Torrent, J.; Baffa, O.; Oliveira, L.C. Correlation of properties of Brazilian haplustalfs with magnetic susceptibility measurements. **Soil Use and Management**, Oxford, v.26, p.425-431, 2010a.

Siqueira DS, Marques JRJ, Pereira GT, Teixeira DB, Vasconcelos V, Carvalho Júnior OA, Martins Es. Detailed mapping unit desing based on soil-landscape relation and spatial variability of magnetic susceptibility and soil color. **Catena**. 2015; 135: 149-162.

Seybold, C.A.; Herrick, J.E.; Brejda, J.J. Soil resilience: a fundamental component of soil quality. **Soil Science**, New Brunswick, v.164, p.224-234, 1999.

Silva, A. P.; Kay, B. D.; Perfect, E. Characterization of the least limiting water range of soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, p.1775-1781, 1994.

Silva, A. P.; Libardi, P.L.; Camargo, O.A. Influência da compactação nas propriedades físicas de dois Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.10, p.91-95, 1986.

Silva, I. F.; Mielniczuk, J. Ação do sistema radicular de plantas na formação e estabilização de agregados do solo. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, p.113-117, 1997.

Silva, A.P.; Tormena, C.A.; Dias Júnior, M.S.; Imhoff, S. & Klein, V.A. **Indicadores da qualidade física do solo**. In: JONG VAN LIER, Q., ed. Física do solo. Viçosa, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p.241-281, 2010.

Silva, I.F.; Andrade, A.P.; Campos Filho, O.R. Erodibilidade de seis solos do semi-árido paraibano obtida com chuva simulada e método nomográfico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.10, n.3, p.283-287, set./dez. 1986.

Silva, L. S. **Mineralogia da fração argila dos solos do Planalto Ocidental Paulista** – Jaboticabal, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 68p, 2016. (Dissertação de Mestrado).

Silva, V. R. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação**. Santa Maria: UFSM, 171p, 2003. (Tese Doutorado)

Silva, V. R.; Reichert, J.M.; Reinert, D.J. Susceptibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.4, p.239- 249, 2000a.

Silva, V.R. et al. Fatores controladores da compressibilidade de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico e de um Latossolo Vermelho distrófico típico. I – Estado inicial de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.1-8, 2002.

Silva, M. L .N.; Curi, N.; Blancaneaux, P. Sistemas de manejo e qualidade estrutural de Latossolo Roxo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, p.2485-2492, 2000.

Souza, Z. M.; Campos, M. C. C.; Cavalcante, I. H. L.; Marques Júnior, J.; Cesarin, L. G.; Souza, S. R. Dependência espacial da resistência do solo à penetração e do teor de água do solo sob cultivo contínuo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 1, p. 128-134, 2006.

Six, J.; Elliot, E.T.; Paustian, K. Aggregate and organic matter dynamics under conventional and no tillage systems. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.63, p.1350-1358, 1999.

Smith, C.W.; Johnston, M.A.; Lorents, S. Assessing the compaction susceptibility of South African forestry soils. I. The effect of soil type, water content and applied pressure on uni-axial compaction. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.41, n.1/2, p.53-73, 1997.

Soane, B.D. **Process of soil compaction under vehicular traffic and means of alleviating it.** In: LAL, R.; Sanchez, P.A.; Cummings, R.W. Land clearing and development in the tropics . Rotterdam: Balkema Publisher, 1986. p.265-297.

Spera, S.T.; Santos, H.P.; Fontaneli, R.S.; Tomm, G.O. Efeitos de sistemas de produção de grãos envolvendo pastagens sob plantio direto nos atributos físicos de solo e na produtividade. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, p.533-542, 2004.

Stone, R.J.; Ekwue, E.I. Compressibility of some Trinidadian soils affected by the incorporation of peat. *J Agric Eng Res*, v.60, p.15-24, 1995.

Streck, C.A.; Reinert, D.J.; Reichert, J.M. & Kaiser, D.R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **C. Rural**, 34:755-760, 2004.

Tanaka, E.M. & souza. Junior, W.C. Solo duro. Paraguaçu Paulista, Escola Superior de Agricultura de Paraguaçu Paulista, 2007. (Boletim Técnico).

Taylor, H.M. **Effect of soil strength on seedling emergence, root growth and crop yield.** In: Barnes, K.K., org. compaction of agricultural soils. Madison, American Society of Agricultural Engineers, 1971. p. 292-305, 1971. (ASAE Monograph)

Taylor, H.M.; Roberson, G.M.; Parker Jr., J.J. Soil strength-root penetration relations to medium to coarse-textured soil materials. **Soil Science**, Baltimore, v.102, n.1, p.18-22, 1966.

Thornthwaite, C.W. An **aproach towards a rational classification of climate.** **Geographical Review** 38, 55-94, 1948.

Tisdall, J.M. & Oades, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, 33:141-163, 1982.

Tormena, C. A.; Barbosa, M. C.; Costa, A. C. S. Densidade, porosidade e resistência a penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Sciencia Agrícola**, v.59, n.4, p.795-801, 2002.

Tormena, C.A.; Silva, A.P.; Libardi, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, p.573-581, 1998.

Torrent, J.; Schwertmann, U. & Barron, V. Phosphate sorption by natural hematites. *Europ. J. Soil Sci.*, 45:45-51, 1994.

Trigueiro, R. M. **Efeito de dregs e grits nos atributos de um Neossolo Quartzarênico e na produção volumétrica de eucalipto**. 2006. 85 f. Tese (Doutorado 56 em Agronomia) - Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2006.

Troeh, F.R.; Hobbs, J.A. & Donahue, R.L. Soil and water conservation for productivity and environmental protection. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1980.

Van Bavel, C. H. M. Mean weight diameter of soil aggregates as a statistical index of aggregation. **Soil Science Society of America Proceedings**, Madison, v. 14, n. 1, p. 20-23, 1949.

Van Pham L, Smith C. Drivers of agricultural sustainability in developing countries: A review. **Environment Systems and Decisions**. 2014; 34: 326–341.

Vasconcelos, R. F. B.; Cantalice, J. R. B.; Moura, G. B. DE A.; Rolim, M. M.; Montenegro, C. E. DE V. Compactabilidade de um Latossolo Amarelo distrocoeso dos tabuleiros costeiros de Alagoas sob diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar. **Rev. Bras. Ciênc. Solo**, Viçosa , v. 36, n. 2, p. 537-545, Abril. 2012.

Vasconcelos, R. F. B.; Cantalice, J. R. B.; Oliveira, V. S.; Costa, Y. D. J.; Cavalcante, D. M. Estabilidade de agregados de um Latossolo Amarelo Distrocoeso de Tabuleiro Costeiro sob diferentes aportes de resíduos orgânicos da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.34, p.309-316, 2010.

Vasconcelos, R. F. B.; Souza, E. R.; Cantalice, J. R. B.; Silva, L. S. Qualidade física de Latossolo Amarelo de tabuleiros costeiros em diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, p.381-386, 2014.

Veiga, M., Horn, R., Reinert, D. J., & Reichert, J. M. (2007). Soil compressibility and penetrability of an Oxisol from southern Brazil, as affected by long-term tillage

systems. **Soil and Tillage Research**, 92(1-2), 104-113.
<https://doi.org/10.1016/j.still.2006.01.008>

Vezzani, F. M. **Qualidade do sistema solo na produção agrícola**. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 184p, 2001. (Tese de Doutorado).

Vieira, M.J.; Muzilli, O. Características físicas de um Latossolo Vermelho Escuro sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.19, p.873-882, 1984.

Vitorino, A. C. T.; Ferreira, M. M.; Curi, N.; Lima, J. M.; Silva, M. L. N.; Motta, P. E. F. Mineralogia, química e estabilidade de agregados do tamanho de silte de solos da região Sudeste do Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 1, p.133-141, 2003.

Way, T.R.; Bailey, A.C.; Raper, R.L.; Burt, E.C. Tire lug height effect on soil stresses and bulk density. **American Society Agricultural Engineering**, St. Joseph, v.38, p.669-674, 1995.

Williams, J.; Coventry, R. J. **The contrasting hydrology of red and yellow earths in a landscape of low relief**. In: Symposium International Hydrology Of Areas Of Low Precipitation, 128., 1979, Canberra. Proceedings Canberra: International Association of Hydrological Science. p. 385-395, 1979.

Zink, A; Fleige, H; Horn, R. Verification of harmful subsoil compaction in loess soils in **Soil & Tillage Research** 114 (2011) 127–134.

Zhang, H.; Hartge, K.H.; Ringe, H. Effectiveness of organic matter incorporation in reducing soil compactability. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.61, n.1, p.239-245, 1997.