

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

**SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA NA IDENTIFICAÇÃO DE  
COMPARTIMENTOS DA PAISAGEM E INDICADOR DE  
QUALIDADE DO SOLO EM ÁREAS SOB CULTIVO  
DE CANA-DE-AÇÚCAR**

**Mariana dos Reis Barrios  
Tecnóloga em Saneamento Ambiental**

JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL

Dezembro de 2011

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

**SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA NA IDENTIFICAÇÃO DE  
COMPARTIMENTOS DA PAISAGEM E INDICADOR DE  
QUALIDADE DO SOLO EM ÁREAS SOB CULTIVO  
DE CANA- DE-AÇÚCAR**

**Mariana dos Reis Barrios**

**Orientador: Prof. Dr. José Marques Júnior**

**Coorientador: Prof. Dr. Newton La Scala Júnior**

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

**JABOTICABAL – SÃO PAULO – BRASIL**

**Dezembro de 2011**

B276s Barrios, Mariana dos Reis  
Suscetibilidade magnética na identificação de compartimentos da paisagem e indicador de qualidade do solo em áreas sob cultivo de cana-de-açúcar./ Mariana dos Reis Barrios. - - Jaboticabal, 2011. ix, 63 f. : il. ; 28 cm

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, 2011  
Orientador: José Marques Júnior  
Banca examinadora: Zigomar Menezes de Souza , Afonso Lopes  
Bibliografia

1. Formas de relevo 2. Sistemas de manejo 3. Cana Queimada  
4. Estatística Multivariada I. Título. II. Jaboticabal-Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias.

CDU 631.41:633.61

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

### CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

**TÍTULO:** SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA NA IDENTIFICAÇÃO DE COMPARTIMENTOS DA PAISAGEM E INDICADOR DE QUALIDADE DO SOLO EM ÁREAS SOB CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR

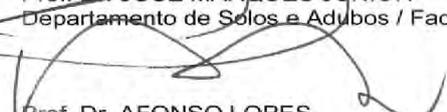
**AUTORA:** MARIANA DOS REIS BARRIOS

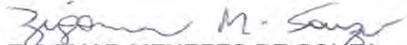
**ORIENTADOR:** Prof. Dr. JOSE MARQUES JUNIOR

**CO-ORIENTADOR:** Prof. Dr. NEWTON LA SCALA JUNIOR

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

  
Prof. Dr. JOSE MARQUES JUNIOR  
Departamento de Solos e Adubos / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal

  
Prof. Dr. AFONSO LOPES  
Departamento de Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias de Jaboticabal

  
Prof. Dr. ZIGOMAR MENEZES DE SOUZA  
Departamento de Água e Solo / Universidade Estadual de Campinas

Data da realização: 16 de dezembro de 2011.

## **DADOS CURRICULARES DO AUTOR**

MARIANA DOS REIS BARRIOS – nascida em 25 de maio de 1985 em Jaboticabal – SP, graduada em Tecnologia em Saneamento Ambiental pela Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP) (2007). Foi bolsista na Prefeitura Municipal de Limeira, trabalhando na vigilância epidemiológica e projetos relacionados à biodegradação no landfarming - Replan/ Petrobras e microbiologia e ecotoxicologia aquática e limnologia. Em julho de 2009, ingressou no Curso de Mestrado em Agronomia (Ciência do Solo) na Universidade Estadual Paulista (UNESP/FCAVJ), sendo bolsista CAPES. Nesse período, atuou na área de Agronomia, com ênfase em Gênese, Morfologia e Classificação dos Solos, trabalhando principalmente nos seguintes temas: geoestatística, análise multivariada, mapeamento de áreas de manejo específico com base na relação solo-relevo e técnicas pedométricas. Membro ativo do grupo de pesquisa Caracterização do Solo para fins de Manejo Específico (CSME) da UNESP, Câmpus de Jaboticabal.

O Senhor é o meu pastor, de nada terei falta.  
Em verdes pastagens me faz repousar e me conduz a águas tranquilas,  
restaura-me o vigor. Guia-me nas veredas da justiça por amor do seu nome.  
Mesmo quando eu andar por um vale de trevas e morte, não temerei perigo algum, pois  
tu estás comigo, a tua vara e o teu cajado me protegem.  
Preparas um banquete para mim à vista dos meus inimigos.  
Tu me honras, unguendo a minha cabeça com óleo e fazendo transbordar o meu cálice.  
Sei que a bondade e a fidelidade me acompanharão todos os dias da minha vida,  
e voltarei à casa do Senhor enquanto eu viver.

Salmos 23:1-6.

## **OFEREÇO**

Aos meus pais:

João Aparecido Barrios e Teonila Maria dos Reis

(Mãe, você é a luz em minha vida)

e a meu irmão

João Gilberto dos Reis Barrios

## **DEDICO**

A todo o povo brasileiro, exemplo de força e perseverança, responsável por fornecer alicerce financeiro ao País, possibilitando a concessão de bolsa-auxílio a jovens pesquisadores como eu.

## AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me iluminar, orientar e dar forças para jamais desanimar frente a quaisquer obstáculos; ao meu orientador, Prof. Dr. José Marques Júnior, pela confiança, ensinamento, compreensão e paciência ao longo desses anos. Pessoa de grande criatividade e espírito inovador, capaz de contribuir de forma plausível para o desenvolvimento na área científica. Realmente, com o decorrer do tempo e da convivência, o orientador acaba por representar a figura de um pai.

Agradeço ainda ao coorientador Newton La Scala Júnior, que me auxiliou com informações de grande valia para que este trabalho fosse concretizado com êxito.

Aos meus queridos amigos Alan Rodrigo Panosso e Diego Silva Siqueira, vulgo Pimpão, pela grande amizade e ensinamentos a mim concedidos, desde o início até a conclusão de meu estudo. Ambos estiveram sempre ao meu lado, compartilhando desde questões relacionadas ao mestrado, como questões pessoais, sempre com uma palavra amiga e tornaram-se desta forma, grandes colaboradores para o meu aprimoramento intelectual, pessoal e espiritual.

Aos meus grandes amigos de graduação Fellipe dos Santos Poltronieri, Pedro Henrique de Souza Oliveira e Nathalia Sgariboldi pela grande amizade e momentos agradáveis ao longo de todo este trajeto. Amizade concretizada na simplicidade e honestidade, alimentada pela sintonia e mantida pela confiança.

Às amigas Graziela Aparecida Barbieri e Ana Luíza Longo, que sempre estiveram ao meu lado, tanto nos períodos de primavera quanto de inverno, transmitindo segurança e paz: irmãs de minha alma.

Às amigas Sísara e Yolanda, pelos momentos agradáveis e saudáveis. Sempre muito alegres e cativantes, valores dignos de pessoas especiais.

Aos amigos Liziane de Figueiredo Brito e Diogo Mazza Barbieri, por sempre me auxiliarem, fornecendo informações de grande valia a respeito das áreas abordadas no presente estudo.

Aos funcionários do Departamento de Solos e Adubos, por suprirem minhas dúvidas, no que se refere às análises laboratoriais.

## SUMÁRIO

<b>RESUMO.....</b>	viii
<b>SUMMARY.....</b>	ix
<b>CAPÍTULO 1. CONSIDERAÇÕES GERAIS.....</b>	01
1.1. INTRODUÇÃO.....	01
1.2. REVISÃO DE LITERATURA.....	03
1.2.1. Compartimentos da paisagem.....	03
1.2.2. Qualidade do solo e sistemas de manejo em cana-de-açúcar: cana crua e cana queimada.....	05
1.2.3. Suscetibilidade magnética do solo.....	06
1.2.4. Estatística multivariada.....	10
1.3. REFERÊNCIAS.....	11
<b>CAPÍTULO 2. SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA NA IDENTIFICAÇÃO DE COMPARTIMENTOS DA PAISAGEM EM ESCALA DETALHADA.....</b>	19
2.1. INTRODUÇÃO.....	20
2.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	22
2.2.1. Localização, caracterização e amostragem da área.....	22
2.2.2. Avaliação dos atributos do solo.....	23
2.2.3. Análise de dados.....	24
2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	25
2.4. CONCLUSÕES.....	35
2.5. REFERÊNCIAS.....	35
<b>CAPÍTULO 3. SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA COMO INDICADOR DE QUALIDADE DO SOLO EM ÁREAS SOB O CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR.....</b>	40
3.1. INTRODUÇÃO.....	41
3.2. MATERIAL E MÉTODOS.....	43
3.2.1. Localização, caracterização e amostragem da área.....	43
3.2.2. Avaliação dos atributos do solo.....	45
3.2.3. Análise de dados.....	46
3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	46
3.4. CONCLUSÕES.....	56
3.5. REFERÊNCIAS.....	57

## **SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA NA IDENTIFICAÇÃO DE COMPARTIMENTOS DA PAISAGEM E INDICADOR DE QUALIDADE DO SOLO EM ÁREAS SOB CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR**

**RESUMO** – O objetivo do estudo foi investigar o potencial da suscetibilidade magnética na identificação de compartimentos da paisagem em escala detalhada e sua capacidade de avaliar condições de qualidade do solo em áreas submetidas ao cultivo de cana-de-açúcar em sistema de manejo com cana crua e cana queimada. Dois experimentos foram realizados. No primeiro, foram amostrados 60 pontos ao longo de duas pedoformas (côncava e linear), subdivididas em três compartimentos da paisagem (encosta superior, meia encosta e encosta inferior), na profundidade de 0,00-0,15 m. Para a medição da suscetibilidade magnética da terra fina seca ao ar ( $SM_{TFSA}$ ) e das frações areia total ( $SM_{AT}$ ) e argila ( $SM_{Arg}$ ), utilizou-se uma balança analítica adaptada. A distinção dos compartimentos da paisagem na análise de componentes principais foi similar ao agrupamento obtido na análise de cluster, porém neste utilizou-se atributos previamente selecionados. A análise de cluster, a partir da SM, evidenciou a capacidade da SM em identificar compartimentos da paisagem, pois os agrupamentos estão em acordo com a divisão dos compartimentos. No segundo experimento, foram retiradas 20 amostras de solo de duas áreas, sendo a primeira submetida ao sistema de manejo com cana crua (CC), enquanto na outra, distando 100 m, vigora o sistema de manejo com cana queimada (CQ). Foram avaliados atributos químicos, físicos e a suscetibilidade magnética (SM). A submissão da  $SM_{TFSA}$  e  $SM_{Arg}$ , à análise de cluster, possibilitou a formação de dois grupos, que coincidem com a divisão de diferentes condições de qualidade do solo. A SM pode ser utilizada como indicador de qualidade (geofísico) em ambientes sob sistemas de manejo em cana-de-açúcar, podendo ser a ferramenta que irá viabilizar estudos de caracterização detalhada da variabilidade espacial em grandes áreas.

**Palavras-chave:** pedoformas, sistemas de manejo, análise de componentes principais e análise de cluster

## MAGNETIC SUSCEPTIBILITY IN THE IDENTIFICATION OF COMPARTMENTS AND LANDSCAPE INDICATOR OF SOIL QUALITY IN AREAS UNDER CULTIVATION OF SUGAR CANE

**ABSTRACT** – The objective of the study was to investigate the potential of magnetic susceptibility in the identification of landscape compartments detailed scale and its ability to assess soil quality conditions in areas subject to the cultivation of cane sugar handling system with sugarcane and sugar burned. Two experiments were conducted. At first, 60 points were sampled over two landforms (concave, linear), subdivided into three compartments of the landscape (upper slope, middle slope and lower slope) in depth from 0.00 to 0.15 m. For measuring the magnetic susceptibility of air dried soil ( $SM_{TFSA}$ ) and total sand fractions ( $SM_{AT}$ ) and clay ( $SM_{ARG}$ ), we used an adapted analytical balance. The distinction of landscape compartments in principal component analysis was similar to the grouping obtained in cluster analysis, but this was used previously selected attributes. The cluster analysis, from the MS, the MS showed the ability to identify landscape compartments, because the clusters are in agreement with the division of the compartments. In the second experiment, we removed 20 soil samples from two areas, the first being submitted to the management system with sugarcane (CC), while in another, distant 100 m, there exists a system of management with burnt cane (CQ). We evaluated chemical attributes, physical and magnetic susceptibility (MS). The submission of  $SM_{TFSA}$   $SM_{ARG}$  and, to a cluster analysis, allowed the formation of two groups, which coincide with the division of different conditions of soil quality. The SM can be used as an indicator of quality (geophysicist) environments under management systems in cane sugar, which can be the tool that will enable detailed studies to characterize the spatial variability over large areas

**Keywords:** landforms, management systems, principal component analysis and cluster analysis.

## **Capítulo 1. CONSIDERAÇÕES GERAIS**

### **1.1. INTRODUÇÃO**

O Brasil destaca-se como o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, sendo que o Estado de São Paulo contribui com a produção de 54,23% do total produzido (CONAB, 2011). A importância da agroindústria canavieira no contexto econômico nacional motiva estudos que visam aprimorar informações a respeito da qualidade e da produção da cana-de-açúcar (ALVES & BACCHI, 2004), atendendo aos preceitos da sustentabilidade. Desta forma, é de grande valia a avaliação da expectativa de desempenho de sistemas agrícolas por meio da aplicação de indicadores quantitativos de caráter pedométrico (VIDAL-TORRADO et al., 2005), ou seja, que possibilitem a estimativa de atributos do solo a partir da medição de atributos economicamente mais vantajosos, precisos e de fácil empregabilidade.

Estudos voltados à variabilidade espacial em nível de escala detalhada, que levam em conta a posição do solo ao longo da paisagem, são de grande importância, uma vez que promovem a caracterização minuciosa do solo e possibilitam a tomada de decisões para fins de manejo específico (MARQUES JÚNIOR, 2009). É importante elucidar que os atributos do solo são influenciados tanto pela forma do relevo quanto pelo material de origem (SOUZA et al., 2004; EPRON et al., 2006; MONTANARI et al., 2008; BRITO et al., 2010). Além disso, estudos sobre a influência que os sistemas de manejo em cana-de-açúcar exercem sobre os atributos do solo, denotando diferentes condições de qualidade ao solo, também oferecem subsídios importantes para a tomada de decisões em sistemas agrícolas (LA SCALA et al., 2000; PANOSSO et al., 2009; PANOSSO et al., 2011; BARBIERI, 2011).

A variabilidade espacial, na maioria dos países, inclusive nos que constituem a América do Sul, é pouco aplicada devido ao alto custo decorrente do elevado contingente amostral necessário (McBRATNEY et al., 2003; DEMATTÊ et al., 2007). De acordo com VIDAL-TORRADO et al. (2005), a utilização de atributos com valor pedométrico é de grande importância para o avanço em pesquisa de solos, visto que

estas possibilita o conhecimento perspicaz do solo de forma simplificada, além de ser economicamente viável.

MARQUES JÚNIOR (2009) ressalta a possibilidade da suscetibilidade magnética do solo em estimar, indiretamente, atributos do solo e, conseqüentemente, colaborar para a caracterização do solo para fins de manejo específico. Desta forma, considerando que a suscetibilidade magnética corresponde ao produto dos processos ocorrentes no solo (HANESCH & SCHOLGER, 2005; SILVA et al., 2010), acredita-se que a posição do solo na paisagem, bem como os diferentes sistemas de manejo a que uma área é submetida, interfira na suscetibilidade magnética do solo. A suscetibilidade magnética é ideal para a realização de estudos que requerem grande quantidade de amostras, visto que o preço para a realização de tal análise é viável e ambientalmente correto, sendo que a quantidade de produtos químicos envolvidos para a obtenção de tal atributo é baixa ou mesmo nula, dependendo das frações do solo que se objetiva estudar (DEARING et al., 1996).

HANESCH & SCHOLGER (2005) demonstram em seu estudo a correlação existente entre a suscetibilidade magnética e os atributos químicos e físicos do solo, além de fazer inferência à influência que as diferentes posições do solo no relevo, bem como o material de origem do solo, fluxo de água e ação antrópica exercem sobre a suscetibilidade magnética do solo. MATHÉ et al. (2006) denotaram a capacidade desta ferramenta em possibilitar o acesso a informações no que se refere às diversas condições a que o solo é submetido, inclusive quando este é submetido a altas temperaturas. CAMPBELL et al. (1997) relatam que o fogo, possivelmente, pode ser responsável pela transformação do mineral Ferri-hidrita (mineral amorfo) em minerais de maghemita e magnetita, na fração argila do solo, consideradas as condições de alta temperatura e matéria orgânica existentes no solo. Desta forma, considerando que a fração argila responde por parte do magnetismo, pode-se dizer que o solo, mediante altas temperaturas na presença de carvão mineral e glicose, propicia condições para que a suscetibilidade magnética do solo seja alterada (MULLINS, 1977).

Uma ferramenta que vem sendo muito utilizada é a estatística multivariada, que analisa de forma simultânea vários atributos, tanto no aspecto social, biológico e em

áreas médicas, como no próprio solo, dentre outras (NETO, 2004). A análise de componentes principais (ACP) explica a estrutura de variância dos dados avaliados, levando-se em conta um conjunto menor de variáveis não correlacionadas entre si, provenientes de combinações lineares entre as variáveis originais (MANLY, 2008). Já a análise de cluster é expressa por meio de dendrogramas, também conhecidos por gráfico em árvore, que visa a agrupar elementos com características mais similares, análise classificada como método hierárquico (HAIR, 2005).

O objetivo do presente estudo foi investigar o potencial da suscetibilidade magnética na identificação de compartimentos da paisagem em escala detalhada e sua capacidade de avaliar condições de qualidade do solo em áreas submetidas ao cultivo de cana-de-açúcar em sistema de manejo com cana crua e cana queimada.

## **1.2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **1.2.1. Compartimentos da paisagem**

Estudos que relatam a importância do conhecimento das formas do relevo são importantes, pois auxiliam para um melhor entendimento das relações existentes no que se refere ao sistema solo-paisagem. As diversas formas influenciam no tempo de exposição dos materiais de origem do solo, bem como na intensidade e fluxo de água no perfil do solo, ocasionando, por conseguinte, uma heterogeneidade dos processos pedogenéticos, influenciando por fim nos atributos do solo ali existentes (SOUZA et al., 2003; SOUZA et al., 2004a,b,c; CUNHA et al., 2005; MONTANARI et al., 2005; CAMARGO et al., 2008; BARBIERI et al., 2009; SANCHES et al., 2009).

É importante ressaltar que o modelo de paisagem estabelecido por TROEH (1965), que associa perfil e curvatura do terreno, denota que mesmo pequenas alterações na paisagem, não perceptíveis por homem desprovido de conhecimento conciso, podem influenciar na característica dos diversos atributos do solo, sendo um importante fator a ser levado em conta no levantamento de solos. Tal autor apresentou nove tipos básicos de pedoforma, sendo representados pelas combinações entre perfil

e curvatura do terreno, letras C (curvatura) e P (perfil), onde os sinais positivos (+) indicam pedoformas côncavas, enquanto o sinal negativo (-) indica pedoformas convexas, enquanto 0 infere-se à linearidade.

De acordo com TROEH (1965), informações sobre a forma de relevo, até então utilizadas como questões qualitativas, devem ser abordadas de forma quantitativa. Sendo assim, por meio do aprimoramento de modelagem matemática/estatística, iniciam-se estudos voltados à estimativa de diferentes tipos de escoamento que a água pode ter ao longo de uma paisagem, de acordo com a curvatura do relevo que o contém. Desta forma, tal autor atribui que o escoamento da água, ao longo de um terreno, pode ser lateral, quando a inclinação do terreno for linear; escoamento convergente, em locais com inclinação côncava; e escoamento divergente, em locais com inclinação convexa. Segundo RUHE (1975), os solos apresentam limites passíveis de serem mapeados, no caso os diferentes tipos de pedoforma. A forma com que a água flui na superfície do solo acarreta condições erosivas ou deposicionais no solo (HALL, 1983).

CHRISTOFOLETTI (1980) aborda a possibilidade de se dividir uma pedoforma linear de acordo com sua inclinação, bem como sua posição na paisagem. Desta forma, a pedoforma linear pode ser dividida em encosta superior e encosta inferior. Tal autor embasou-se nos trabalhos desenvolvidos por DARLYMPLE et al. (1968) que, por sua vez, escoam sobre alguns critérios que podem ser aplicados em segmentos de vertentes. A segmentação de vertentes é muito importante, na medida em que facilita a percepção de como os diversos atributos do solo se apresentam de forma heterogênea ao longo da paisagem. Em alguns trabalhos, os resultados sugerem que o relevo esteja influenciando na produtividade de culturas (IQBAL et al., 2005; LEÃO et al., 2010).

A identificação dos tipos de pedoforma ao longo da paisagem e em escala mais detalhada, compartimentação, oferece subsídios para a compreensão mais minuciosa dos processos ocorrentes no solo, bem como uma delimitação precisa de áreas mais homogêneas, colaborando, por conseguinte, para o mapeamento de áreas mais homogêneas, objetivando o manejo específico, concordando com os preceitos da agricultura de precisão, uma vez que os conhecimentos adquiridos podem ser

transferidos para uma localidade similar à respectiva área de estudo (VIDAL-TORRADO et al., 2005; MARQUES JÚNIOR, 2009; SIQUEIRA et al., 2010a).

### **1.2.2. Qualidade do solo e sistemas de manejo em cana-de-açúcar: cana crua e cana queimada.**

A qualidade do solo corresponde à capacidade de adaptação às condições impostas a ele, de maneira que funcione de forma harmônica, ou seja, de responder aos limites impostos pelo ecossistema, ou mesmo pelo homem, de forma que a qualidade do meio ambiente seja mantida, juntamente à produtividade biológica, propiciando condições favoráveis para o desenvolvimento da fauna e da flora (DORAN & PARKIN., 1994). Nesse sentido, a perda da qualidade do solo corresponde à diminuição da capacidade do solo em exercer suas funções diversas, considerando a deterioração da qualidade química, física e biológica do solo (AGUIAR, 2008). Os sistemas de manejo em culturas de cana-de-açúcar alteram o equilíbrio do ecossistema, e os constituintes do solo passam então a se adaptar a essas novas condições impostas a ele, visando ao equilíbrio dinâmico de todos os processos que ocorrem no respectivo local (COSTA et al., 2003).

Os sistemas de manejo em culturas de cana-de-açúcar incidem sobre questões ambientais, uma vez que os sistemas de manejo: com cana crua (CC), marcado pela manutenção da palhada na superfície do solo e colheita mecanizada; e sistema de manejo com cana queimada (CQ), na qual se tem a queima do canavial, no período pré-colheita e colheita manual, interferem nos atributos químicos, físicos e biológicos, inclusive no desprendimento de dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>) a partir do solo, no que se refere ao desprendimento do gás no sistema solo-atmosfera (PANOSSO et al., 2009; PANOSSO et al., 2011). PANOSSO et al. (2011) inferem-se à possível influência dos sistemas de manejo da cultura de cana-de-açúcar no grau de humificação da matéria orgânica do solo, além de enfatizar a relação existente entre este e a emissão de CO<sub>2</sub> do solo.

De acordo com LA SCALA et al. (2000), a emissão de CO<sub>2</sub> do solo correlaciona-se negativamente com o atributo químico ferro ditionito, sugerindo uma possível influência dos óxidos de ferro na maior mitigação da emissão de gases do efeito estufa pelo solo, no caso o dióxido de carbono (CO<sub>2</sub>). A preservação da palhada na superfície do solo, no sistema de manejo com cana crua (CC), é abordada por BARBIERI (2011) que, em seus estudos, verificou nítida mudança da mineralogia do solo em duas áreas submetidas a sistemas de manejo de cana-de-açúcar diferentes, sendo uma submetida à manutenção da palhada na superfície do solo, com posterior colheita mecanizada, e outra marcada pela queima prévia da cultura de cana-de-açúcar, seguida do processo de colheita manual.

Atributos responsáveis pela produtividade, como o fósforo disponível, têm sido reportados como suscetíveis às alterações no meio em razão do tipo de manejo a que a cultura presente no mesmo é submetida (MENDONZA et al., 2000; MC COOL et al., 2008). FAVORETTO et al. (2008) ressaltam que o maior teor de fósforo disponível no sistema de manejo com cana queimada, possivelmente, seja oriundo de maior mineralização da matéria orgânica, quando da queima do solo, porém, pelo fato de este sistema de cultura ser submetido à queima prévia do canavial, esta vantagem far-se-á presente somente nos períodos subsequentes à queima, sendo a real situação, na escala de tempo a longo prazo, caracterizada por um solo possivelmente mais suscetível à lixiviação e à precariedade na disposição de fósforo (P<sub>Disp</sub>) para a cultura de cana-de-açúcar, uma vez que este não será disposto ao solo de forma gradual e, sim, pontual.

### **1.2.3. Suscetibilidade magnética do solo**

Em meio aos elementos presentes na crosta terrestre, o ferro corresponde ao único capaz de designar um momento magnético (SILVA et al., 2010). Desta forma, a presença de minerais de óxidos de ferro com caráter magnético (óxidos, hidróxidos e oxí-hidróxidos), nas frações granulométricas do solo (argila, silte e argila), conota ao

solo caráter magnético. A suscetibilidade magnética do solo faz inferência à magnitude do comportamento magnético destes minerais no solo.

A suscetibilidade magnética é definida como a intensidade de magnetização de um material, quando um campo magnético externo é colocado em contato com este material magnetizado. Na fração areia, normalmente, o principal mineral de caráter magnético responsável por designar magnetismo ao solo é a magnetita, caracterizado como mineral primário (litogênico), enquanto em relação à fração argilosa têm-se os minerais secundários (pedogênicos) magnetita, maghemita, goetita e hematita (FABRIS et al., 1998). Quanto aos minerais de óxidos de ferro presentes na fração silte, KÄMPF & CURI (2000) relatam a possível presença de magnetita bem como maghemita na respectiva fração granulométrica.

Dentre os principais tipos de comportamento magnético, têm-se: diamagnetismo, paramagnetismo, ferromagnetismo, ferrimagnetismo e antiferromagnetismo. Nos minerais diamagnéticos, a cela unitária do mineral possui átomos, que, por sua vez, possuem suas camadas eletrônicas totalmente preenchidas. Quando da indução por campo magnético externo, os spins contidos na estrutura deste mineral, que, por sua vez, encontram-se alinhados, obedecendo a uma proporcionalidade de sentidos opostos, não são modificados, entretanto o movimento dos elétrons, conhecido por movimento orbital, é influenciado por esta indução magnética, como, por exemplo, o mineral quartzo (MARQUES JÚNIOR, 2009; MATIAS, 2010; SIQUEIRA, 2010).

Ao contrário dos minerais diamagnéticos, nos paramagnéticos, as camadas eletrônicas não se encontram totalmente preenchidas, assim, no momento da submissão destes a um campo magnético externo, nota-se o alinhamento dos spins bem como a permanência de alguns spins mesmo após a retirada do campo magnético indutivo, sendo que estes possuem suscetibilidade positiva com fraca magnitude, como, por exemplo, o mineral olivina. Os minerais ferromagnéticos são um caso especial de paramagnetismo, resultando da interação entre spins desemparelhados de átomos vizinhos. Após a retirada do campo magnético, os spins permanecem alinhados, fazendo com que o mineral possua um grande valor de magnetização remanescente e caracteriza-se por ter suscetibilidade magnética positiva e de grande magnitude

(Exemplo: ferro e cobalto). Nos minerais ferrimagnéticos os spins não estão emparelhados e assim prevalece o momento magnético do maior número de spins no mesmo sentido (Exemplo: magnetita). Os minerais antiferrimagnéticos apresentam propriedades magnéticas muito baixas ou, em alguns casos, até mesmo nula, ou seja, são caracterizados por momentos magnéticos neutros (Exemplo: goethita e hematita) (MARQUES JÚNIOR, 2009; MATIAS, 2010; SIQUEIRA, 2010). Sendo assim, tais minerais, por sua vez, são caracterizados como importantes marcadores pedoambientais, visto que apresentam diferentes tipos de comportamento magnético, cuja magnitude depende de características específicas do solo, dentre as quais algumas são: temperatura, umidade e teor de matéria orgânica (KAMPF & CURI, 2000).

Em solos tropicais e subtropicais, pelo fato de serem altamente intemperizados, os minerais de óxido de ferro, como a hematita e goetita, são os mais predominantes (FONTES & WEED, 1991; MUGGLER, 1998; BARBIERI, 2011), sendo sua presença detectada por meio da difratometria de raio-x, ou por métodos indiretos, como pela suscetibilidade magnética dos solos. A goethita, tal como a hematita apresentam um ferromagnetismo superimposto, entretanto de menor intensidade quando comparados aos minerais de maghemita e magnetita, considerando-se uma possível submissão de todos a um mesmo campo magnético.

Os minerais de magnetita e maghemita também são encontrados nestes solos, porém, em uma alíquota inferior. Uma grande dificuldade na determinação exata de tais minerais, por métodos habitualmente empregados, como a difratometria de raio-x, ocorre devido à grande similaridade de suas estruturas cristalinas, uma vez que a estrutura cristalina da magnetita é idêntica à da maghemita (SILVA et al., 2010).

Mediante essas informações, nota-se o quão a suscetibilidade magnética é uma técnica vantajosa para a detecção da possível presença de tais minerais no solo, uma vez que o magnetismo entre estes é altamente diferente, sendo o magnetismo da magnetita, bem como da maghemita, por serem minerais ferrimagnéticos (SILVA et al., 2010), muito superior ao magnetismo dos minerais de óxidos de ferro goetita e hematita, de caráter antiferrimagnético (DEARING, 1999), quando submetidos a um mesmo campo magnético externo.

É importante salientar que, em alguns locais, o mineral amorfo Ferri-hidrita pode transformar-se em minerais de caráter magnético, adquirindo estrutura cristalográfica ordenada, quando da presença de altas temperaturas e matéria orgânica presentes (MULLINS, 1977; CAMPBELL et al., 1997). Alguns dos fatores que controlam a formação dos óxidos de ferro no solo são: temperatura, umidade, pH, tempo de reação e posição do relevo (HANESCH & SCHOLGER, 2005). Desta forma, a suscetibilidade magnética corresponde a um atributo do solo que vem sendo utilizado em grande escala em estudos voltados nas mais diversas áreas. JORDANOVA et al. (2011), em uma topossequência na Bulgária, utilizaram a suscetibilidade magnética como indicadora das condições erosivas do solo e constataram a possibilidade em se utilizar esse atributo do solo, por meio de modelos empíricos, capaz de refletir não apenas o efeito da chuva, vento e material de origem, mas também o tipo de manejo e implementos adotados na área.

Alguns autores abordam a suscetibilidade magnética, no que se refere à sua capacidade sobre gênese e classificação dos solos (FABRIS et al., 1998; FONTES et al., 2000; PREETZ et al., 2008). Já DURŽA (1999) relata a importância da utilização da suscetibilidade magnética na detecção de áreas contaminadas por metais pesados, provenientes de indústrias metalúrgicas. Preocupados com a caracterização de áreas mais homogêneas, visando à exatidão na utilização dos solos, alguns autores propõem a utilização da suscetibilidade magnética na quantificação indireta de atributos do solo, uma vez que estes encontraram em seus estudos correlações significativas entre a suscetibilidade magnética do solo com alguns atributos químicos, físicos, bem como mineralógicos, que por sua vez são importantes conhecimento para o conhecimento a nível mais detalhado do solo (MARQUES JÚNIOR, 2009; MATIAS, 2010; SIQUEIRA et al., 2010b).

Existem outras técnicas de quantificação indireta de atributos do solo, como, por exemplo, os métodos geofísicos de condutividade eletromagnética e resistividade elétrica (JOHNSON et al., 2001; BRENNING et al., 2008); no entanto, essas técnicas não expressam resultados confiáveis, uma vez que o teor de água no solo pode influenciar nos resultados obtidos pelo pesquisador. A suscetibilidade magnética é

amplamente utilizada em estudos ambientais que visam a detectar a poluição de solos por metais pesados e, conseqüentemente, mapear áreas contaminadas (HANESCH et al., 2007; CAMBAY et al., 2010). Partindo da premissa de que a metodologia empregada na detecção do magnetismo do solo é altamente sensível, estudos voltados ao magnetismo do solo, são de grande valia, uma vez que pesquisas neste âmbito ainda são pouco exploradas no Brasil.

#### **1.2.4. Estatística multivariada**

As diversas áreas da ciência têm por objetivo alcançar resultados que favoreçam a percepção científica, fomentando informações em prol da sociedade, bem como do meio ambiente. Neste âmbito, a estatística multivariada é uma técnica estatística relevante, uma vez que possibilita a análise de um fenômeno, levando-se em conta todos os fatores que o constituem de forma integrada, possibilitando uma visão mais global, que, por sua vez, não é possível de ser verificada quando da análise de estatística univariada (NETO, 2004).

De acordo com FIKDALSK & SCAPIM (2007), estudos voltados à caracterização do solo, bem como à sua qualidade, necessitam de análises estatísticas multivariadas, uma vez que, quando da utilização apenas da estatística univariada, leva-se em conta somente as variáveis de maneira isolada, enquanto na estatística multivariada os resultados obtidos se baseiam no conjunto de dados, favorecendo, por conseguinte, informações mais consistentes em relação aos processos ocorrentes no solo.

A análise multivariada de componentes principais consiste em um método que possibilita explicar a variância do conjunto de dados originais, levando-se em conta um conjunto menor de variáveis, as componentes principais (CP) originadas a partir de combinações lineares entre as variáveis originais, conservando a maior quantidade de informações a despeito dos dados (variáveis) em questão (VICINI, 2005; MANLY, 2008; OLIVEIRA SILVA et al., 2008; GUEDES et al., 2010). Essa técnica permite, ainda, a visualização das variáveis de maior poder discriminatório dentro de cada componente principal (SENA et al., 2002), permitindo, na área de ciência do solo, que se verifique

quais os atributos que se destacam, por exemplo, nos processos pedogenéticos (SIQUEIRA, 2010).

VALLADARES et al. (2008) aplicaram a análise de componentes principais para analisar atributos qualitativos de diferentes perfis de solos amostrados e perceberam a discriminação de diferentes grupos de solo, denotando a importância desta ferramenta estatística para auxiliar na taxonomia do solo, potenciais produtivos de solo, aptidões e risco ambiental. MELÉM JÚNIOR et al. (2008) utilizaram a análise de componentes principais e obtiveram informações referentes à fertilidade dos solos nos municípios pertencentes ao Estado do Amapá. SIQUEIRA et al. (2010b) submeteram atributos químicos, mineralógicos e a suscetibilidade magnética do solo à análise de componentes principais e observaram ser a suscetibilidade magnética do solo o atributo de maior contribuição dentro do primeiro componente principal, sendo considerado um importante fator no estabelecimento de condições específicas do solo.

A análise de cluster consiste no agrupamento hierárquico de uma população heterogênea em subgrupos mais homogêneos, sendo tal método expresso por meio de dendogramas, também conhecido por gráfico em árvore (LOPES et al., 2004), por meio do agrupamento de elementos com maior similaridade intragrupos e dissimilaridade nos intergrupos (HAIR, 2005; ALBUQUERQUE et al., 2006; BUENO et al., 2010). Em estudo de área localizada no Estado de São Paulo, CAMPOS et al. (2006) aplicaram o método hierárquico por meio da análise de cluster, a fim de confirmar os limites estabelecidos em campo.

### 1.3. REFERÊNCIAS

AGUIAR, M. I. **Qualidade física do solo em sistemas agriflorestais**. 2008. 91f. Dissertação (Mestrado em Solos e Nutrição de Plantas) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2008.

ALBUQUERQUE, M. A.; FERREIRA, R. L. C.; SILVA, J. A. A.; SOUZA SANTOS, E.; STOSIC, B.; SOUZA, A. L. Estabilidade em análise de agrupamento: estudo de caso em ciência florestal. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 30, n. 2, p. 257-265, 2006.

ALVES, R. A.; BACCHI, M. R. P. Oferta de exportação de açúcar do Brasil. **Revista Brasileira de Estudos Regionais**, Rio de Janeiro, v. 42, n. 1, p. 09-33, 2004.

BARBIERI, D. M.; MARQUES JR., J.; ALLEONI, L. R. F.; GARBUIO, F. J.; CAMARGO, L. A. Hillslope curvature, clay mineralogy, and phosphorus adsorption in an Alfisol cultivated with sugarcane. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 66, n. 6, p. 819-826, 2009.

BARBIERI, D. M. **Atributos físicos, químicos e mineralógicos de um Latossolo Vermelho eutroférrico sob dois sistemas de colheita de cana-de-açúcar**. 2011. 86f. Tese (Doutrado em Produção Vegetal) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2011.

BRITO, L. F.; MARQUES JR., J.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA JR, N. Spatial variability of soil CO<sub>2</sub> emission in different topographic positions. **Bragantia**, Campinas, v. 69, supl. 0, p. 19-27, 2010.

BRENNING, A.; KOSZINSKI, S.; SOMMER, M. Geostatistical homogenization of soil conductivity across field boundaries. **Geoderma**, Amsterdam, v. 143, n. 3-4, p. 254-260, 2008.

BUENO, C. R. P.; ARRAES, C. L.; PEREIRA, G. T.; CORÁ, J. E.; CAMPOS, S. Análise multivariada na determinação do risco de erosão em solos sob irrigação. **Revista Irriga**, Botucatu, v. 15, n. 1, p. 23-35, 2010.

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, MG, v. 32, n. 6, p. 2279-2288, 2008.

CANBAY, M.; AYDIN, A.; KURTULUS, C. Magnetic susceptibility and heavy-metal contamination in topsoils along the Izmit Gulf coastal area and IZAYTAS (Turkey). **Journal of Applied Geophysics**, Amsterdam n. 1, v. 70, p. 46-57, 2010.

CAMPBELL, A. S.; SCHWERTMANN, U.; CAMPBELL, P. A. Formation of cubic phases on heating ferrihydrite. **Clay Minerals**, London, v. 32, p. 615-622, 1997.

CAMPOS, M. C. C. **Relação solo-paisagem em uma área de transição arenito-basalto na região de Pereira-Barreto (SP)**. 2006. 133f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2006.

CAMPOS, M.C.C.; RIBEIRO, M.R.; SOUZA JÚNIOR, V.S.; RIBEIRO FILHO, M.R.; COSTA, E.U.C. Segmentos de vertente e atributos do solo de uma topossequência na região de Manicoré, AM. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 41, n. 4, 2010 .

CHRISTOFOLETTI, A. **Geomorfologia**. 2. ed. São Paulo: Edgar Blücher, 1980. 188p.

CONAB. **Acompanhamento de safra brasileira:** cana-de-açúcar, terceiro levantamento, janeiro/2011. Brasília: Companhia Nacional de Abastecimento, 2011. Disponível em: [http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11\\_01\\_06\\_09\\_14\\_50\\_boletim\\_cana\\_3o\\_lev\\_safra\\_2010\\_2011..pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11_01_06_09_14_50_boletim_cana_3o_lev_safra_2010_2011..pdf).

COSTA, F. S.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; FONTOURA, S. M. V.; WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelo sistema plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 3, p. 527-535, 2003.

CUNHA, P.; MARQUES JR., J.; NILTON, C.; PEREIRA, G. T.; LEPSCH, I. F. Superfícies geomórficas e atributos de Latossolos em uma sequência Arenítico-Basáltica da região de Jaboticabal (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, n. 1, p. 81-90, 2005.

DARLYMPLE, J. B.; BLONG, R. J.; CONACHER, A. J. A hypothetical nine unit land surface model. **Geomorphologie**, Zeitschrift für, v. 12, n. 1, p. 60-76, 1968.

DEARING, J.A.; HAY, K.L.; BABAN, S.M.K.; HUDDLESTON, A.S.; WELLINGTON, E.M. H.; LOVELAND, P.J. Magnetic susceptibility of soil: an evaluation of conicting theories using a national data set. **Geophysical Journal International**, Oxford, v.127, p.728–734, 1996.

DEMATTÊ, J. A. M.; GALDOS, M. V.; GUIMARÃES, R.; GENÚ, A.M.; NANNI, M.R.; ZULLO JR., J. Quantification of tropical soil attributes from ETM+/Landsat-7 data. **International Journal of Remote Sensing**, London, v. 8, p. 3813-3829, 2007.

DORAN, J. W.; PARKIN, T. B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J. W.; COLEMAN, D. C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B.A. (ed). **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: SSSAJ, 1994. p. 3-32.

DURZA, O. Heavy contamination and magnetic susceptibility in soils around metallurgical plant. **Physics and Chemistry of the Earth (A)**, Amsterdam, v. 24, n. 6, p. 541–543, 1999.

EPRON, D.; BOSCH, A.; BONAL, D.; FREYCON, V. Spatial variation of soil respiration across a topographic gradient in a tropical rain forest in French Guiana. **Journal of Tropical Ecology**, Cambridge, v. 22, n. 5, p. 565-574, 2006.

FABRIS, J.D.; COEY, J. M. D.; MUSSEL, W. N. Magnetic soils from mafic lithodomains in Brazil. **Hyperfine Interactions**, v. 113, p. 249–258, 1998.

FAVORETTO, C. M.; GONÇALVES, D.; MILORI, D. M. B. P.; ROSA, J. A.; LEITE, W. C.; BRINATTI, A. M. M.; SAAB, S. C. Determinação da humificação da matéria orgânica de um Latossolo e de suas frações organominerais. **Química Nova**, São Paulo, v. 31 n .8, 2008.

FIDALSKI, J.; TORMENA, C.A.; SCAPIM, C.A. Espacialização vertical e horizontal dos indicadores de qualidade para um Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 1, p. 9-19, 2007.

FONTES, M. P. F.; WEED, S. B. Iron oxides in selected Brazilian Oxisols: I. mineralogy. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 55, p.1143-1149, 1991.

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

GUEDES, R. V. S.; LIMA, F. J. L.; AMANAJÁS, J. C.; BRAGA, C. C. Análise em componentes principais da precipitação pluvial no Estado do Piauí e agrupamento pelo método de ward. **Revista de Geografia**. Recife, v. 27, n. 1, 2010.

HALL, G. Pedology and geomorphology. In: **Pedogenesis and soil taxonomy. concepts and interactions**. Amsterdam: Elsevier, 1983. p. 117- 140.

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

HANESCH, M.; RANTITSCH, G.; HEMETSBERGER, S.; SCHOLGER, R. Lithological and pedological influences on the magnetic susceptibility of soil: Their consideration in magnetic pollution mapping. **Science of the Total Environment**, Amsterdam, v. 382, p.351-367, 2007.

IQBAL, J.; READ, J. J.; THOMASSON, A. J.; JENKINS, J. N. Relationships between Soil-Landscape and Dryland Cotton Lint Yield. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 69, p. 872-882, 2005.

JOHNSON, C. K.; DORAN, J. W.; DUKE, H. R.; WIENHOLD, B. J.; ESKRIDGE, K. M.; SHANAHAN, J. F. Field-scale electrical conductivity mapping for delineating soil condition. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 65, p. 1829– 1837, 2001.

JORDANOVA, D.; JORDANOVA, N.; ATANASOVA, A.; TSACHEVA, T.; PETROV, P. Soil tillage erosion estimated by using magnetism of soils—a case study from Bulgaria. **Environmental monitoring and assessment**, Dordrecht, v. 183, n. 1-4, p. 381-394, 2011.

KÄMPF, N.; CURI, N. Óxidos de ferro: indicadores de ambientes pedogênicos. In: NOVAIS, R.F. et al. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. cap. 4, p. 107-138.

LA SCALA JÚNIOR, N.; MARQUES JR., J.; PEREIRA, G.T.; CORA, J. E. Carbon dioxide emission related to chemical properties of a tropical bare soil. **Soil Biology & Biochemistry**, Exeter, v. 32, n. 10, p. 1469-1473, 2000.

LEÃO, M. G. A.; MARQUES JR., J.; SOUZA, Z. M.; SIQUEIRA, D. S.; PEREIRA, G. T. O relevo na interpretação da variabilidade espacial dos teores de nutrientes em folha de citros. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 14, n. 11, p. 1152-1159, 2010.

LOPES, M. C.; CLOVIS, R. H.; ELIO, J. S.; LONGHI, S. J.; ROSSO, S.; DENIS, L. G.; FERNANDES, MENEZES, L. F. Agrupamento de árvores matrizes de eucalyptus grandis em função das variáveis dendrométricas e das características tecnológicas da madeira. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 14, n. 2, p. 133-144, 2004.

MANLY, B. J. F. **Métodos estatísticos multivariados** - uma introdução – 3.ed. Porto Alegre: Bookman, 2008.

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

MATHÉ, V.; LÉVÊQUE, F.; MATHÉ, P. E.; CHEVALLIER, C.; PONS, Y. Soil anomaly mapping using a caesium magnetometer: Limits in the low magnetic amplitude case. **Journal of Applied Geophysics**, Amsterdam, v.58, n. 3, p.202–217, 2006.

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

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

MCCOOL, D. K.; PANNKUK, C. D.; KENNEDY, A. C.; FLETCHER, P. S. Effects of burn/low-till on erosion and soil quality. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 101, n. 1-2, p. 2-9, 2008.

MELÉM JÚNIOR, N. J.; FONSECA, I. C. B.; BRITO, O. R.; DECAËNS, T.; CARNEIRO, M. M.; MATOS, M. F. A.; GUEDES, M. C.; QUEIROZ, J. A. L.; BARROSO, K. O. Análise de componentes principais para avaliação de resultados analíticos da fertilidade de solos do Amapá. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 29, n.3, p. 499-506, 2008.

MENDOZA, H. N. S.; LIMA, E.; ANJOS, L. H. C.; SILVA, L. A.; CEDDIA, M. B.; ANTUNES, M. V. M. Propriedades químicas e biológicas de solo de tabuleiro cultivado com cana-de-açúcar com e sem queima da palhada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v.24, n. 1, p.201-207, 2000.

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

MONTANARI, R.; PEREIRA, G. T.; MARQUES JR., J.; SOUZA, Z. M.; PAZETO, R. J.; CAMARGO, L. A. Variabilidade espacial de atributos químicos em Latossolos e Argissolos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 5, p. 1266-1272, 2008.

MUGGLER, C.C. **Polygenetic oxisols on tertiary surfaces, Minas Gerais, Brazil**. 1998. 186f. Tese (Doutorado) – Wageningen Agriculture University, Wageningen, 1998.

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

NETO, J. M. M. **Estatística multivariada. uma visão didática-metodológica. Crítica-Filosofia da Ciência**. 2004. Disponível em: <[http://www.mat.ufrgs.br/~viali/cursos/ceea/multi/textos/Moita\\_Neto.pdf](http://www.mat.ufrgs.br/~viali/cursos/ceea/multi/textos/Moita_Neto.pdf)>. Acesso em: 20 de maio de 2011.

OLIVEIRA SILVA, M.; FREIRE, M. B. G. S.; MENDES, A. M. S.; FREIRE, F. J.; CAMPOS, M. C. C.; AMORIM, L. B. Discriminação de quatro classes de solos irrigados com águas salinas, com o uso de análise multivariada. Manejo e conservação do solo no contexto de mudanças ambientais. In: XVII REUNIÃO BRASILEIRA DE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO E DA ÁGUA, 17, 2008, Rio de Janeiro. Disponível em: <[http://www.cpatsa.embrapa.br/public\\_eletronica/downloads/OPB2272.pdf](http://www.cpatsa.embrapa.br/public_eletronica/downloads/OPB2272.pdf)>. Acesso em: 14 de março de 2010.

PANOSSO, A. R.; MARQUES JR., J.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA JÚNIOR, N. Spatial and temporal variability of soil CO<sub>2</sub> emission in a sugarcane area under green and slash-and-burn managements. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 105, p. 275–282, 2009.

PANOSSO, A. R.; MARQUES JR., J.; MILORI, D. M. B. P.; FERRAUDO, A. S.; BARBIERI, D. M.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA, N. Soil CO<sub>2</sub> emission and its relation to soil properties in sugarcane areas under Slash-and-burn and Green harvest. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 111, p. 190-196, 2011.

PREETZ, H.; ALTFELDER, S.; IGEL, J. Tropical Soils and Landmine Detection - An Approach for a Classification System. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.72, p.151-159, 2008.

RUHE, R.V. **Geomorphology**. Boston : Houghton Mifflin, 1975.

SANCHEZ, R. B.; MARQUES JR., J.; SOUZA, Z. M.; PEREIRA, G. T.; MARTINS FILHO, M. V. Variabilidade espacial de atributos do solo e de fatores de erosão em diferentes pedoformas. **Bragantia**, Campinas, v. 68 n. 4, p. 1095-1103, 2009.

SENA, M. M.; FRIGHETTO, R. T. S.; VALARINI, P. J.; TOKESHI, H.; POPPI, R. J. Discrimination of management effects on soil parameters by using principal component analysis: a multivariate analysis case study. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 67, n. 2, p. 171-181, 2002.

SILVA, A. R.; SOUZA JUNIOR, I. G.; COSTA, A. C. S. Suscetibilidade magnética do horizonte B de solos do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 34, n. 2, 2010.

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 Produção Vegetal) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2010.

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

SIQUEIRA, D. S.; MARQUES JR., J.; MATIAS, S. S. R.; BARRON, V.; TORRENT, J.; BAFFA, O.; OLIVEIRA, L. C. Correlation of properties of Brazilian Haplustalfs with magnetic susceptibility measurements. **Soil Use and Management**, Amsterdam, v. 26, p. 425-431, 2010b.

SOUZA, C. K.; MARQUES JR., J.; MARTINS FILHO, M. V.; PEREIRA, G. T. Influência do relevo na variação anisotrópica dos atributos químicos e granulométricos de um Latossolo em Jaboticabal-SP. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 23, n. 3, p. 486-495, 2003.

SOUZA, Z. M.; MARQUES JR., J.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial da estabilidade de agregados e matéria orgânica em solos de relevos diferentes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 5, p. 491-499, 2004a.

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

SOUZA, Z. M.; MARQUES JR., J.; PEREIRA, G. T.; MOREIRA, L. F. Influencia da pedoforma na variabilidade espacial de alguns atributos físicos e hídricos de um Latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Irriga**, Botucatu, v. 9, n. 1, p. 1-11, 2004c.

TROEH, F. R. Landform equations fitted to contour maps. **American Journal of Scienci**, New Haven, v. 263, n. 3, p. 616-627, 1965.

VALLADARES, G. S.; GOMES, E. G.; SOARES DE MELLO, J. C. C. B.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C.; EBELING, A. G.; BENITES, V. M. Análise dos componentes principais e métodos de multicritérios ordinais no estudo de organossolos e solos afins. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 1, p. 285-296, 2008.

VICINI, L. **Análise multivariada da teoria à prática**. Santa Maria : UFSM, CCNE, 2005. 215 p.

VIDAL-TORRADO, P.; LEPSCH, I. F.; CASTRO, S. S. Conceitos e aplicações das relações pedologia-geomorfologia em regiões tropicais úmidas. In: VIDAL-TORRADO, P.; ALLEONI, L. R. F.; COOPER, M.; SILVA, A. P.; CARDOSO, G. J. (Ed). **Tópicos em ciências do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2005. v. 4, p. 145 – 192.

## **CAPÍTULO 2. SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA NA IDENTIFICAÇÃO DE COMPARTIMENTOS DA PAISAGEM EM ESCALA DETALHADA**

**RESUMO** - A avaliação e a adequação do potencial agrícola são realizadas com base na visão unidimensional do perfil do solo, porém a produção sustentável tem estimulado estudos sobre técnicas e métodos de avaliação do potencial agrícola em escalas detalhadas, que sejam mais rápidos, precisos e econômicos. Assim, o objetivo deste trabalho foi investigar o potencial da suscetibilidade magnética do solo na identificação de compartimentos da paisagem em escala detalhada. A área estudada possui duas formas de relevo: pedofoma côncava e pedofoma linear, sendo tal área subdividida em três compartimentos da paisagem: encosta superior (ES), meia encosta (ME) e encosta inferior (EI). Foram amostrados 20 pontos em cada compartimento, de forma aleatória, a partir de um banco de dados composto por 207 amostras oriundas de um gradeado amostral regular instalado em cada compartimento da paisagem. Foram avaliados os atributos físicos, químicos, a emissão de CO<sub>2</sub> (FCO<sub>2</sub>) e a suscetibilidade magnética (SM), representada por: suscetibilidade magnética da terra fina seca ao ar (SM<sub>TFSA</sub>), suscetibilidade magnética da fração areia total (SM<sub>AT</sub>) e suscetibilidade magnética da fração argila (SM<sub>ARG</sub>) na profundidade de 0,00-0,15 m. Os resultados obtidos por meio da análise de componentes principais demonstram que a SM foi um importante atributo, pois apresentou altos valores de correlação dentro do componente principal 1. A distinção dos compartimentos da paisagem na análise de componentes principais foi similar ao agrupamento formado na análise de cluster, utilizando-se somente dos atributos de maior poder discriminatório. O agrupamento observado na análise de cluster, utilizando-se da SM, evidencia a possibilidade de a SM ser utilizada como uma ferramenta que facilite a identificação de compartimentos da paisagem, em escala detalhada, e viabilize o mapeamento de áreas mais homogêneas.

**Palavras-chave:** formas de relevo, componentes principais, análise de cluster.

## 2.1. INTRODUÇÃO

A produção sustentável tem estimulado estudos sobre técnicas e métodos de avaliação do potencial agrícola em escalas detalhadas, que sejam mais rápidos, precisos e econômicos. Desta forma, a avaliação da expectativa de desempenho em sistemas agrícolas deve ser aprimorada por meio da aplicação de indicadores quantitativos, como os de suscetibilidade magnética do solo (SIQUEIRA et al., 2010) que permitam comparações objetivas e auxiliem na identificação dos limites de precisão no campo.

De forma geral, o desenvolvimento agrícola nos trópicos necessita de caracterização e mapeamento preciso do solo antes de gerar recomendações adequadas, no que se refere ao sistema de manejo a ser empregado (SHEPHERD & WALSH, 2007). Para atender a essas necessidades, estudos abordam a eficácia na utilização de ferramentas matemáticas associada a modelos de paisagem (PENNOCK et al., 2001; KRAVCHENKO et al., 2005; BARBIERI et al., 2009; LEÃO et al., 2010). Estudos que fazem inferência sobre as relações existentes entre os processos geomórficos e pedológicos são necessários, e corroboram um melhor entendimento dos processos sinérgicos ocorrentes no solo, possibilitando, assim, o planejamento de práticas de manejo mais adequado (YOUNG & HAMMER, 2000; BUI, 2004; VIDAL-TORRADO et al., 2005).

As formas do relevo influenciam nas condições de pedoforma, propiciando condições distintas para o estabelecimento dos atributos físicos e mineralógicos do solo (SOUZA et al., 2009). O mapeamento do solo, quando caracterizado como livre ou categórico, embasa-se no conhecimento das diferentes formas de relevo presentes em um local de interesse (LEGROS, 2006). Tais estudos, além de subsidiar informações para a caracterização de áreas mais homogêneas, possibilitam a transferência de conhecimento para locais de mesmo domínio pedogeomórfico (MARQUES JÚNIOR, 2009).

MARQUES JÚNIOR (2009) propôs a utilização da suscetibilidade magnética (SM) para auxiliar na identificação dos limites de precisão entre diferentes formas da

paisagem, ressaltando a possibilidade do uso desse atributo para avaliar, de forma indireta, alguns atributos do solo em nível quantitativo. A suscetibilidade magnética é uma característica dos minerais que possuem o elemento químico ferro em sua constituição (SOUZA JÚNIOR et al., 2010). Tais minerais encontram-se nas rochas, nos sedimentos e no solo, cuja magnitude depende da concentração e das características dos minerais: composição, estrutura espacial e tamanho do cristal (VEROSUB & ROBERTS, 1995; FONTES et al., 2000; BLUNDELL et al., 2009; SILVA et al., 2010).

A suscetibilidade magnética é um importante atributo do solo, capaz de colaborar com o avanço de conhecimento detalhado do solo, além de ser de determinação rápida e de baixo custo, sendo muito utilizada em diversas áreas, como no monitoramento ambiental, na paleoclimatologia, na limnologia, na arqueologia, na estratigrafia e na pedologia (CHAPARRO et al., 2008; LOURENÇO & GOMES, 2010). Em estudo para verificar as correlações existentes entre os atributos do solo com a  $SM_{TFSA}$ , em Argissolo Vermelho-Amarelo eutrófico, com material de origem arenítico, na profundidade de 0,00-0,20 m, submetido ao sistema de colheita pós-queimada há mais de 20 anos, no município de Catanduva-SP, SIQUEIRA et al. (2010) verificaram correlações significativas existentes entre a  $SM_{TFSA}$  com: teor de argila, matéria orgânica, saturação por bases e teor de hematita. Essa informação é útil para os sistemas de classificação de solos existentes, pois pode direcionar o desenvolvimento de critérios de mapeamento detalhado do solo.

O mapeamento da suscetibilidade magnética é ideal para a realização de estudos que requerem grande quantidade de amostras, como os de variabilidade espacial (DEARING et al., 1996). O emprego da estatística multivariada possibilita informações de grande valia, que, por sua vez, não são obtidas quando do emprego da estatística univariada (JOHNSON & WICHERN, 2002). Assim, o objetivo deste trabalho foi investigar o potencial da suscetibilidade magnética na identificação de compartimentos da paisagem em escala detalhada, em uma área localizada no município de Jaboticabal-SP, sob o cultivo de cana-de-açúcar, com colheita mecanizada.

## 2.2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.2.1. Localização, caracterização e amostragem da área

O experimento foi conduzido na região de Jaboticabal, nordeste do Estado de São Paulo, com coordenadas geográficas 21° 17' de latitude sul e 48°08' de longitude, localizada no Planalto Ocidental Paulista. O clima da região foi classificado como Aw, tropical de verão chuvoso e inverno seco, segundo Köppen.

Foram mapeadas duas formas de relevo: pedoforma côncava e pedoforma linear (TROEH, 1965). Aumentando a escala do mapeamento, a área foi subdividida em três compartimentos, classificados de acordo com o tipo de encosta: encosta superior (ES), meia encosta (ME) e encosta inferior (EI), segundo DARLYMPLE et al. (1968) (Figura 2.1.).

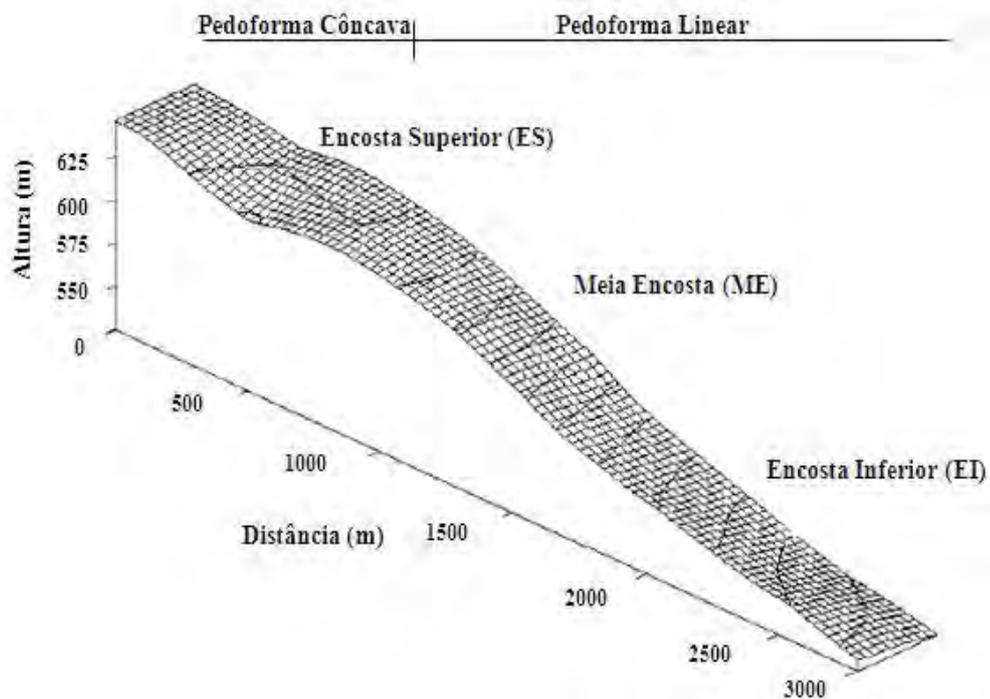


Figura 2.1. Perfil altimétrico identificando os compartimentos da paisagem encontrados na área de estudo (Modificado de BRITO et al., 2010).

A área está localizada numa região de transição litoestratigráfica entre Basaltos da Formação Serra Geral do grupo São Bento e arenitos da Formação Adamantina, grupo Bauru. O solo da área foi classificado como Latossolo Vermelho eutrófico textura argilosa (LVef), porém, na encosta superior, em uma área consideravelmente pequena, notou-se a presença do Latossolo Vermelho eutrófico textura argilosa (LVe) (EMBRAPA, 2006). O relevo é predominantemente suave ondulado com declividade média variando de 3 a 8% e altitude média de 600 m.

A área utilizada neste estudo apresenta um histórico com mais de 60 anos sob cultivo de cana-de-açúcar, dentre os quais, nos últimos 14 anos, vem sendo manuseada por meio da colheita mecanizada (sistema de manejo com cana crua). Em cada compartimento da paisagem, estabeleceu-se uma malha amostral de 90 x 90 m, com 49 pontos distribuídos em intervalos regulares de 15 m e onde foram adicionados 5 pontos em cada um dos 4 quadrantes da malha amostral, totalizando 69 pontos de amostragem por compartimento da paisagem, na profundidade de 0,00-0,15 m.

A amostragem de solo para a análise do teor de ferro total ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ) foi realizada na profundidade de 0,00 a 0,15m, com cinco repetições em cada compartimento da paisagem, por meio do ataque sulfúrico (EMBRAPA, 1997). O teor de ferro total ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), nos compartimentos da paisagem (ES, ME e EI), na profundidade de 0,00-0,15 m, foi de 15,35 %, 19,25 % e 21,00 %, respectivamente.

### **2.2.2. Avaliação dos atributos do solo**

A granulometria (teor de areia total - AT; teor de argila – Arg; teor de silte – Silt) foi obtida por meio do emprego da metodologia proposta pela EMBRAPA (1997). A estabilidade dos agregados, referente ao Diâmetro Médio Geométrico (DMG), foi determinada segundo metodologia proposta por KEMPER & ROSENAU (1986). O volume total de poros (VTP) foi calculado com base no valor de densidade do solo. A umidade do solo (U) foi determinada pelo método gravimétrico, de acordo com GARDNER (1986). Para a medição da emissão de  $\text{CO}_2$  pelo solo ( $\text{FCO}_2$ ), foi utilizado o sistema portátil LI-6400-09 (HEALY et al., 1996). A matéria orgânica (MO), potencial

hidrogeniônico (pH), fósforo disponível ( $P_{\text{Disp}}$ ) e saturação por bases (V%) foram obtidos segundo RAIJ et al. (1987).

A suscetibilidade magnética da terra fina seca ao ar ( $SM_{\text{TFSA}}$ ) foi avaliada utilizando-se de uma balança analítica adaptada (CARNEIRO et al., 2003; SIQUEIRA et al., 2010). Para a medição da suscetibilidade magnética da fração areia total ( $SM_{\text{AT}}$ ) e suscetibilidade magnética da fração argila ( $SM_{\text{ARG}}$ ), por meio da balança analítica adaptada, as amostras de solo foram tratadas com NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup> e submetidas à agitação mecânica por 10 min para a dispersão das partículas. Após esse tratamento, a fração areia foi retirada em peneira de 0,05 mm. A separação da fração silte ocorreu por centrifugação (1.600 rpm), e o tempo da operação foi determinado pela temperatura das amostras no momento da análise. A suspensão de argila foi floculada com HCl concentrado e centrifugada (2.000 rpm, por 2 min).

### **2.2.3. Análise de dados**

Os resultados foram apresentados em termos da estatística descritiva (média e coeficiente de variação). Inicialmente, foi avaliado o teste F da ANOVA e, posteriormente o teste de Tukey, a 5%, expressou a diferença entre as médias dos atributos nos compartimentos da paisagem. As análises multivariadas foram realizadas após a padronização dos atributos do solo, com média 0 e variância 1.

A análise de componentes principais (ACP) foi aplicada, considerando-se os atributos do solo provenientes dos compartimentos da paisagem, a fim de explicar a estrutura de variância dos dados avaliados, levando-se em conta um conjunto menor de variáveis e não correlacionadas entre si (CP), provenientes de combinações lineares entre as variáveis originais (HAIR, 2005). Essa análise selecionou um conjunto de atributos do solo, posteriormente utilizadas na análise de cluster (SENA et al., 2002). A análise de cluster é uma análise de agrupamento hierárquico, capaz de agrupar acessos mais similares (MANLY, 2008; FREDDI et al., 2008). No presente estudo, foram utilizados a distância euclidiana e o algoritmo de Ward. A estatística descritiva foi

conduzida no programa MINITAB 14, enquanto para a realização da estatística multivariada utilizou-se o programa STATISTICA 7.0.

### 2.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A encosta superior apresentou os maiores valores no que se refere ao teor de argila (Tabela 2.1.). A posição de meia encosta apresentou os maiores valores de  $SM_{AT}$ , U, MO, V% e pH, enquanto a encosta inferior apresentou os maiores valores de AT, Silt,  $SM_{TFSA}$ ,  $SM_{Arg}$ ,  $FCO_2$ , DMG e VTP. Possivelmente, a variação de tais atributos, ressalvo  $FCO_2$ , nos compartimentos, está relacionada ao material de origem, bem como pela própria posição do solo ao longo da paisagem (DANIELS & NELSON, 1987). A emissão de  $CO_2$  do solo corresponde a um atributo do solo de extrema complexidade no sistema, dependente da forma do relevo, porém a magnitude é influenciada pela variação temporal (BRITO et al., 2010). Os maiores valores da  $SM_{TFSA}$ ,  $SM_{Arg}$  e Ferro total ( $Fe_2O_3$ ) na encosta inferior, provavelmente, indicam maior proximidade deste compartimento da paisagem com o basalto (MATIAS, 2010), confirmando a influência do material de origem na maior suscetibilidade magnética do solo (FONTES et al., 2000).

O conhecimento da SM e sua relação com o material de origem dos solos têm grande importância para as regiões de transição litoestratigráfica como a do presente estudo. A cor é um atributo diagnóstico utilizado pelo Sistema Brasileiro de Classificação do Solo no 2º nível taxonômico (subordem). Em função desse atributo, é possível identificar somente um ambiente na área de estudo. No entanto, considerando-se a informação magnética, nota-se a existência de três ambientes. Regiões tropicais e subtropicais são favoráveis à neoformação de suscetibilidade magnética de origem pedogênica, propiciando o aprimoramento magnético na fração argila (TORRENT et al., 2006), tornando os minerais presentes em tal fração importantes marcadores pedoambientais (TORRENT et al., 2010).

Com exceção do atributo  $P_{Disp}$ , houve diferença significativa na média dos atributos entre os compartimentos identificados. Os atributos que apresentaram

diferença significativa nos três compartimentos foram: teor de argila, teor de silte,  $SM_{TFSA}$ ,  $SM_{AT}$ ,  $FCO_2$  e  $V\%$ . Os atributos cujas médias diferiram significativamente somente entre dois compartimentos foram: teor de areia total,  $SM_{Arg}$ ,  $U$ ,  $DMG$ ,  $VTP$ ,  $MO$  e  $pH$ . Isso indica que o levantamento de solo, utilizando valores médios, pode não representar adequadamente a variabilidade espacial dos atributos do solo, principalmente quando os limites dos compartimentos da paisagem não são levados em consideração.

Tabela 2.1. Estatística descritiva referente aos compartimentos encosta superior (ES), meia encosta (ME) e encosta inferior (EI), em área sob o cultivo de cana-de-açúcar, na profundidade de 0,00-0,15 m.

Atributo	Encosta Superior		Meia Encosta		Encosta Inferior	
	Média	CV <sup>1</sup>	Média	CV <sup>1</sup>	Média	CV <sup>1</sup>
AT (g Kg <sup>-1</sup> )	170,49 b	23,58	170,36 b	4,05	210,34 a	7,39
Arg (g Kg <sup>-1</sup> )	590,70 a	5,80	580,49 b	2,77	500,31 c	5,45
Silt (g Kg <sup>-1</sup> )	238,81 c	14,38	249,15 b	5,33	289,35 a	11,39
$SM_{TFSA}$ (m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> 10 <sup>-5</sup> )	4,27 c	13,00	5,56 b	5,40	7,60 a	6,98
$SM_{AT}^*$ (m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> 10 <sup>-5</sup> )	6,84 c	17,86	9,97 a	13,79	7,85 b	10,57
$SM_{Arg}^*$ (m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> 10 <sup>-5</sup> )	1,80 b	12,10	1,81 b	6,39	4,70 a	8,84
$U$ (%)	26,00 b	9,23	27,00 a	5,67	25,00 b	6,13
$FCO_2$ (μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	1,80 b	30,50	1,42 c	34,17	2,12 a	24,53
$DMG$ (mm)	2,59 b	9,30	3,74 a	13,33	3,83 a	11,78
$VTP$ (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	0,54 b	5,13	0,53 b	5,10	0,55 a	4,29
$MO$ (g dm <sup>-3</sup> )	28,58 b	16,31	32,36 a	12,92	28,61 b	12,58
$P_{Disp}$ (mg dm <sup>-3</sup> )	47,57 a	52,12	49,64 a	31,03	42,77 a	56,34
$V$ (%)	58,45 b	18,29	64,41 a	8,80	51,30 c	19,75
$pH$	5,17 a	6,29	5,27 a	3,56	4,93 b	5,83

N=69; Atributo: AT (teor de areia total); Arg (teor de Argila); Silt (teor de Silte);  $SM_{TFSA}$  (susceptibilidade magnética da terra fina seca ao ar);  $SM_{AT}$  (susceptibilidade magnética da fração areia total);  $SM_{Arg}$  (susceptibilidade magnética da fração argila);  $U$  (umidade do solo);  $FCO_2$  (emissão de  $CO_2$  do solo);  $DMG$  (diâmetro médio geométrico);  $VTP$  (volume total de poros);  $MO$  (matéria orgânica do solo);  $P_{Disp}$  (fósforo disponível);  $V\%$  (saturação por bases);  $pH$  (potencial hidrogeniônico). Média<sup>3</sup> estatística do teste de Tukey significativo a 5% ( $p < 0,05$ ). Médias seguidas pela mesma letra não se diferenciam entre si, pelo teste de Tukey. CV<sup>1</sup>: coeficiente de variação.  $SM_{AT}^*$ ;  $SM_{Arg}^*$ : amostragem de 20 pontos aleatórios, em cada compartimento, N=20.

A variação da SM medida nas frações do solo, nos compartimentos da paisagem (ES, ME e EI), é demonstrada na Figura 2.2. Analisando a figura, pode-se concluir que tanto a  $SM_{AT}$ , quanto a  $SM_{TFSA}$  podem ser utilizadas como atributo auxiliar na

identificação dos compartimentos da paisagem. Isso mostra o grande potencial desse atributo do solo na identificação de áreas sob influência de diferentes materiais de origem ou em locais de transição litoestratigráfica.

Embora haja diferença estatística entre atributos diagnósticos, Arg e V%, nos compartimentos da paisagem, em campo, o estabelecimento de limites, baseado na leitura do mapeador, quando da análise da argila, dificilmente possibilitaria a exatidão de diferentes compartimentos dentro de uma mesma área. Assim, o emprego de outros possíveis atributos diagnósticos para o refinamento do ambiente se faz necessário.

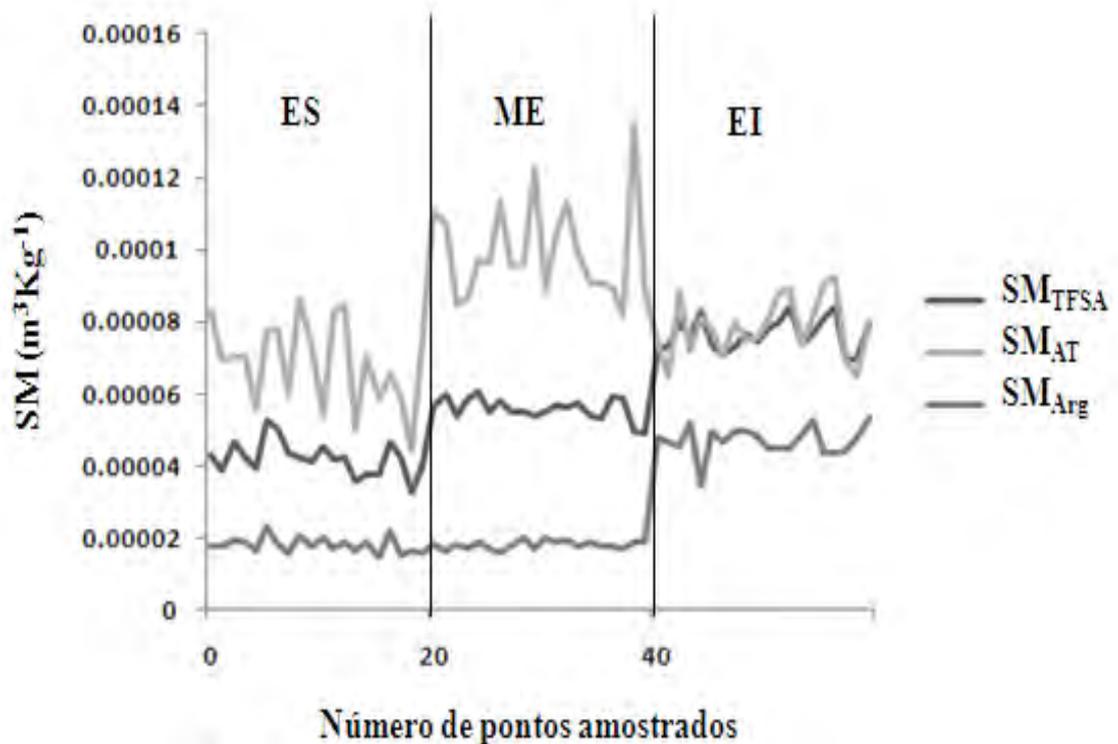


Figura 2.2. Distribuição da suscetibilidade magnética (SM): suscetibilidade magnética da terra fina seca ao ar ( $SM_{TFSA}$ ); suscetibilidade magnética da fração areia total ( $SM_{AT}$ ), e suscetibilidade magnética da fração argila ( $SM_{Arg}$ ), considerando-se 20 pontos amostrados em cada compartimento da paisagem (encosta superior – ES; meia encosta – ME, e encosta inferior - EI), N=60.

O compartimento ES foi o que apresentou maior número de atributos na classe moderada ( $12\% < CV < 60\%$ ), segundo os critérios de WARRICK & NIELSEN (1980).

Nota-se que os atributos teor de argila e V%, utilizados como atributos diagnósticos, apresentaram coeficiente de variação (CV) baixo ( $CV < 12\%$ ) e moderado ( $12\% < CV < 60\%$ ). Estudos utilizam o CV para inferir a variabilidade espacial dos atributos do solo e relatam maior variabilidade espacial de atributos químicos e físicos, em pedoformas côncavas, em relação a lineares, bem como convexas (SOUZA et al., 2004; MONTANARI et al., 2008; SOUZA et al., 2009). SANCHES et al. (2009), relatam a influência que os fluxos de água superficiais ou subsuperficiais, no solo (horizontal ou vertical), exercem sobre os processos de variabilidade dos atributos do solo, levando-se em conta diferentes formas do relevo. CUNHA et al. (2005), quando do estudo em uma área de transição litoestratigráfica arenito/basalto em Latossolo, comprovam a veracidade em se estabelecer limites no campo, na medida em que tais limites oferecem subsídio para o levantamento de solos, bem como pedogênese, de forma mais consistente.

Os quatro primeiros componentes principais, CP1, CP2, CP3 e CP4, cujos autovalores são superiores à unidade (KAISER, 1958), conseguiram explicar 74,91% da variabilidade dos atributos do solo, nos três compartimentos estudados (Tabela 2.2). O primeiro componente principal, CP1, explicou 30,50% da variância total dos atributos do solo, CP2 explicou 22,06%, enquanto CP3 explicou 13,44%, e 8,90% foram explicados por CP4. De acordo com CARVALHO et al. (2008), os componentes principais, quando capazes de explicar a partir de 70% da variância dos atributos, são pertinentes para auxiliar na compreensão da área em questão.

Tabela 2.2. Autovalores e porcentagem de variação explicada pelos quatro primeiros componentes principais e coeficientes de correlação entre os atributos originais e os componentes principais. Ordem de importância dos atributos originais na discriminação dos compartimentos da paisagem.

Componente Principal	CP1		CP2		CP3		CP4	
	Correlação	Ordem de importância						
Autovalor*	4,27	5	3,08	10	1,88	3	1,24	2
Percentual Explicado	30,50	2	22,06	12	13,44	11	8,90	14
Autovalor* Acumulado	4,27	4	7,35	5	9,24	12	10,48	4
Percentual (%) explicado <sup>AC</sup>	30,50	3	52,56	9	66,00	10	74,91	10
<b>Atributo</b>	<b>Correlação</b>	<b>Ordem de importância</b>						
AT	0,58	5	-0,29	10	0,51	3	0,44	2
Arg	-0,93	2	-0,21	12	-0,18	11	0,00	14
Silt	0,70	4	0,49	5	-0,18	12	-0,35	4
SM <sub>TFSA</sub>	0,88	3	0,31	9	-0,22	10	0,13	10
SM <sub>AT</sub>	-0,12	13	0,67	3	-0,37	7	0,06	11
SM <sub>Arg</sub>	0,95	1	-0,05	14	-0,11	13	0,02	13
U	-0,33	9	0,26	11	-0,57	2	-0,28	6
FCO <sub>2</sub>	0,38	7	-0,31	8	0,39	6	-0,44	3
DMG	0,57	6	0,50	4	-0,28	8	0,29	5
VTP	0,36	8	-0,17	13	-0,11	14	-0,67	1
MO	-0,20	12	0,48	7	-0,21	9	0,28	7
P <sup>Disp</sup>	-0,061	14	0,49	6	0,58	1	-0,05	12
V%	-0,26	11	0,82	1	0,43	5	-0,13	9
pH	-0,26	10	0,77	2	0,48	4	-0,14	8

N=60. \*Autovalores maiores que a unidade estabelecida por Kaiser (1958). <sup>AC</sup>:Acumulado.

No primeiro componente principal (CP1) e por ordem de importância, as propriedades que apresentaram maiores coeficientes de correlação, ou seja, maior poder discriminatório, foram  $SM_{Arg}$ , Arg,  $SM_{TFSA}$ , Silt, AT, DMG,  $FCO_2$  e VTP, enquanto no segundo componente principal (CP2) e por ordem de importância, têm-se as variáveis V%, pH,  $SM_{AT}$ , DMG, Silt,  $P_{Disp}$  e MO (Tabela 2.2.).

No presente estudo, os dois primeiros componentes principais (CP1 e CP2) foram utilizados a fim de gerar um gráfico bidimensional do espaço amostral original, denominado gráfico biplot, onde é possível explicar a estrutura de variáveis direcionando feixes de variáveis nas regiões de máxima variabilidade (Figura 2.3.). Esses dois componentes principais conseguiram reter, em conjunto, 52,56% da variabilidade dos atributos do solo, nos três compartimentos estudados (ES, ME e EI). SIQUEIRA et al. (2010), ao estudar a capacidade da SM em prever atributos do solo, encontraram que o primeiro componente principal explicou 41,92% da variância do conjunto de atributos do solo estudados, sendo a SM o atributo de maior poder discriminatório dentro da CP1.

A correlação dos atributos com os componentes principais (CP1 e CP2) expressa a formação de, pelo menos, três grupos: ES, localizado no lado esquerdo do gráfico biplot, na parte inferior do gráfico, sendo que alguns de seus pontos estão sobrepostos a amostras que caracterizam o grupo ME, também localizado à esquerda do gráfico biplot, porém, na parte superior do gráfico, e o grupo EI localizado à direita do gráfico (Figura 2.3.).

As correlações dos atributos do solo com os componentes principais CP1 e CP2 são representadas pelas setas de cada atributo do solo, onde  $SM_{Arg}$ ,  $SM_{TFSA}$  apresentaram correlação positiva com CP1, correspondendo a importantes atributos do solo responsáveis pela discriminação do grupo EI (Figura 2.3.). Quanto aos outros atributos do solo, também responsáveis pela discriminação do grupo EI, têm-se o Silt, AT, DMG,  $FCO_2$  e VTP. Por outro lado, o grupo ME foi discriminado basicamente por V%, pH,  $SM_{AT}$ ,  $P_{Disp}$  e MO, que apresentam correlação positiva com CP2. É importante salientar que o atributo Arg apresentou coeficiente de correlação negativa com CP1, sendo o atributo responsável pela separação do grupo que caracteriza a EI, dos grupos

que caracterizam a ME e ES, ou seja, separação no sentido vertical do gráfico biplot. A umidade do solo (U) apresentou correlação negativa com CP1. Nota-se que a  $SM_{TFSA}$ ,  $SM_{AT}$  e  $SM_{Arg}$  ocuparam lugar de destaque, na ordem de importância, para distinguir os três compartimentos (Tabela 2.2.).

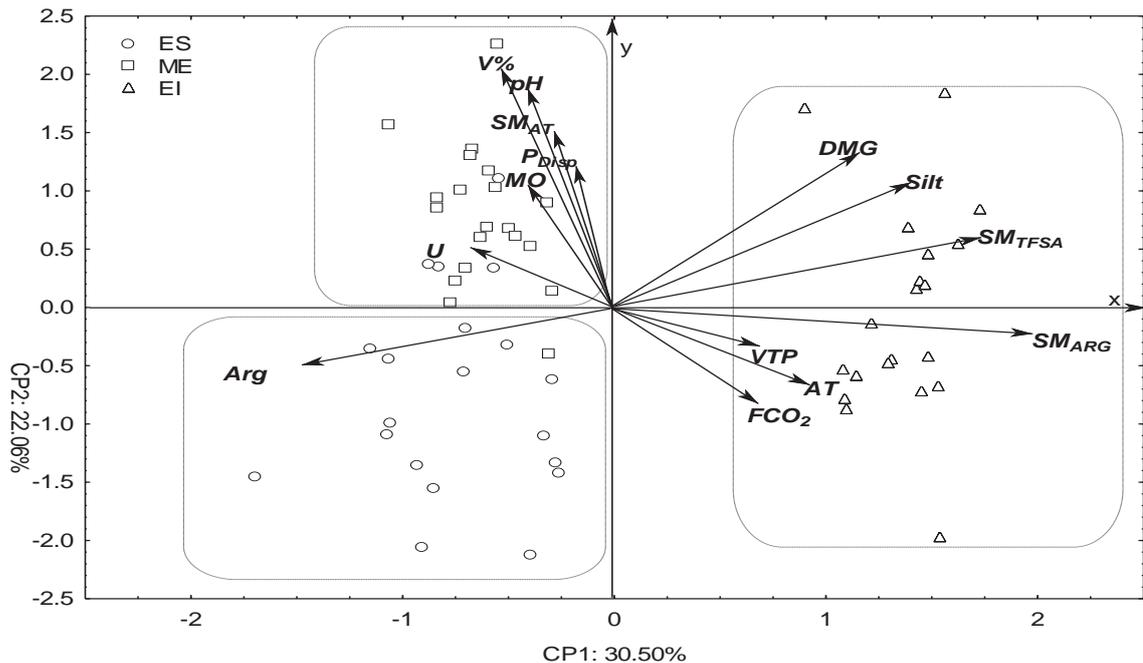


Figura 2.3. Gráfico de dispersão biplot das componentes principais CP1 e CP2: AT (teor de areia total); Arg (teor de argila); Silt (teor de silte);  $SM_{TFSA}$  (susceptibilidade magnética da terra fina seca ao ar);  $SM_{AT}$  (susceptibilidade magnética da fração areia total);  $SM_{Arg}$  (susceptibilidade magnética da fração argila); U (umidade do solo);  $FCO_2$  (emissão de  $CO_2$ ); DMG (diâmetro médio geométrico); VTP (volume total de poros); MO (matéria orgânica do solo);  $P_{Disp}$  (fósforo disponível); V% (saturação por bases); pH (potencial hidrogeniônico). Compartimentos: ES (encosta superior); ME (meia encosta), e EI (encosta inferior); N=60.

Uma possível causa de tal similaridade entre alguns pontos da ES, com pontos da ME, pode ser atribuída ao fato de ambos os compartimentos da paisagem estarem situados em uma região de transição, com pedoforma côncava para pedoforma linear (Figura 2.3.). A pedoforma côncava, pelo fato de caracterizar-se pelo fluxo de água convergente, possivelmente, pode favorecer maior fluxo de água nesta área, no sentido

vertical, sendo esta pedoforma mais suscetível a processos deposicionais (MCKENZIE & GALLANT, 2007).

Estudos envolvendo a suscetibilidade magnética, aliada a atributos químicos e físicos, em diferentes compartimentos da paisagem, utilizando a análise de componentes principais, são inexistentes até o presente momento. PANOSSO et al. (2011), ao estudarem a emissão de CO<sub>2</sub> do solo e sua relação com os atributos do solo, em uma área submetida a diferentes sistemas de colheita em área classificada como Latossolo Vermelho eutroférico, sob o cultivo de cana-de-açúcar, na cidade de Guariba, localizada na mesma região do presente trabalho, observaram que, no primeiro componente principal (CP1), o teor de argila foi o atributo com maior poder discriminatório, discriminando o sistema de colheita com manutenção da palhada na superfície do solo e colheita mecanizada.

O dendograma, obtido por meio da análise de agrupamento hierárquico, é demonstrado na Figura 2.4. Nota-se a formação de dois grupos, sendo que o grupo GI agrupou amostras provenientes da EI, enquanto o GII agrupou amostras oriundas da ES e ME. O teste de centroides de médias (formados pelas variáveis SM<sub>TFSA</sub>, SM<sub>AT</sub>, SM<sub>Arg</sub>, Arg, V% e pH) de Hotelling foi significativo ao nível de 5% de probabilidade, confirmando a discriminação entre os grupos GI e GII, observados na análise de cluster.

O resultado da análise de agrupamento (Figura 2.4.) demonstra que 100% dos pontos originalmente pertencentes à EI se encontram agrupados dentro do grupo GI. Em relação às amostras oriundas originalmente da ES e ME, estas são representadas em sua totalidade (100%) dentro do GII. A análise de cluster (Figura 2.4) foi aplicada com êxito na verificação e separação dos compartimentos da paisagem. Estudos realizados em uma topossequência, no município de Pereira Barreto – SP, confirmam a interdependência existente entre os diferentes horizontes diagnósticos, pois a análise de cluster agrupou acessos oriundos de diferentes superfícies geomórficas (CAMPOS et al., 2007).

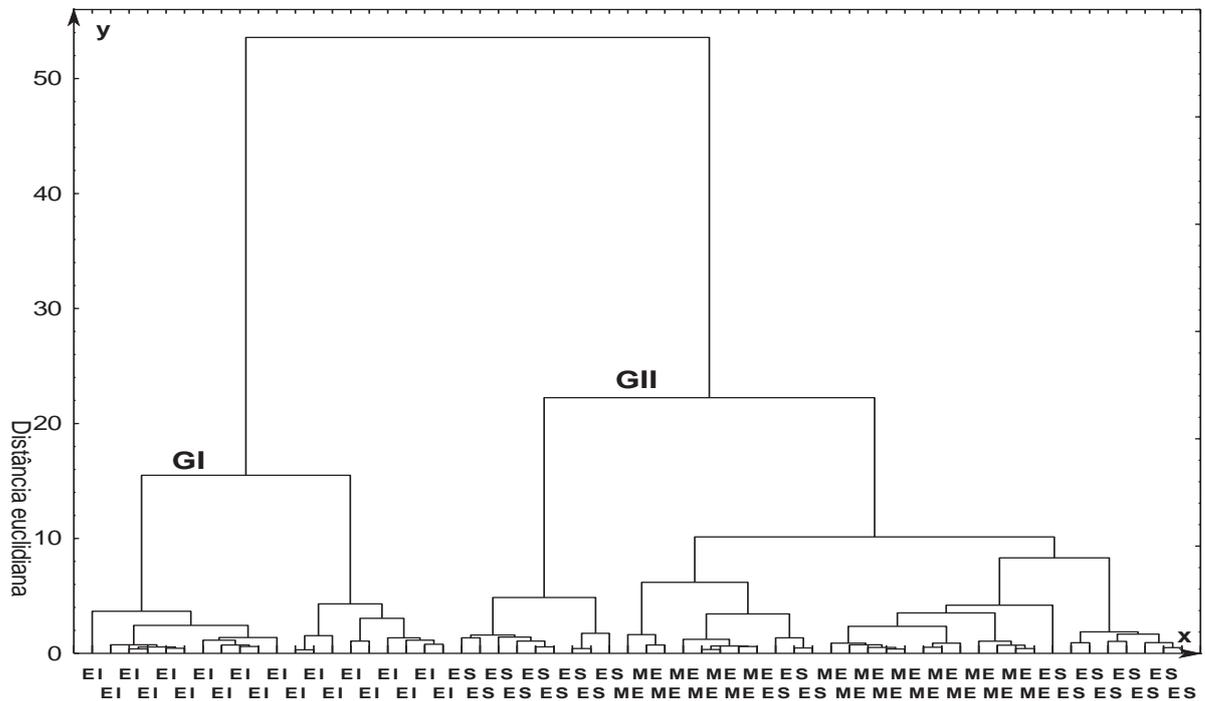


Figura 2.4. Dendrograma das inter-relações dos três compartimentos da paisagem (ES, ME e EI), obtidos por meio da análise de agrupamento utilizando a distância euclidiana, e o algoritmo de Ward, referente aos atributos  $SM_{TFSA}$  (susceptibilidade magnética da terra fina seca ao ar);  $SM_{AT}$  (susceptibilidade magnética da fração areia total);  $SM_{Arg}$  (susceptibilidade magnética da fração argila); Arg (teor de argila); V% (saturação por bases), e pH (potencial hidrogeniônico); N=60.

A Figura 2.5. indica a formação de três grupos, considerando-se o conjunto das três susceptibilidades magnéticas ( $SM_{TFSA}$ ,  $SM_{AT}$  e  $SM_{Arg}$ ). O grupo um (GI) corresponde ao grupo formado por amostras oriundas do compartimento EI (em sua totalidade 100%), GII do compartimento ME (em sua totalidade 100%) e GIII do compartimento ES (em sua totalidade 100%). O teste de centroides de médias (formados pelas variáveis  $SM_{TFSA}$ ,  $SM_{AT}$  e  $SM_{Arg}$ ) de Hotelling foi significativo ao nível de 5% de probabilidade, confirmando a discriminação entre os grupos GI, GII e GIII, observados na análise de cluster.

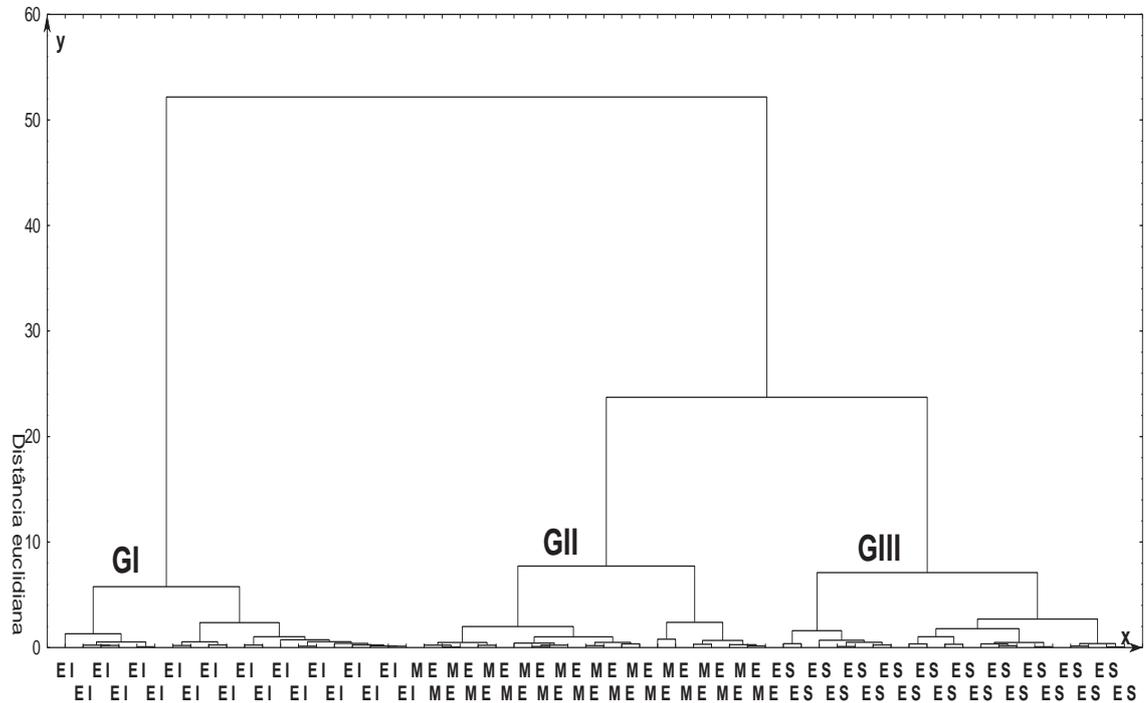


Figura 2.5. Dendrograma das inter-relações dos três compartimentos da paisagem (ES, ME e EI), obtidos por meio da análise de agrupamento utilizando a distância euclidiana e o algoritmo de Ward, referente aos atributos  $SM_{TFSA}$  (susceptibilidade magnética da terra fina seca ao ar);  $SM_{AT}$  (susceptibilidade magnética da fração areia total);  $SM_{Arg}$  (susceptibilidade magnética da fração argila);  $N=60$ .

O emprego da susceptibilidade magnética do solo para o mapeamento de áreas mais homogêneas fica evidente, em áreas de transição litoestratigráfica arenito-basalto, em Latossolos. Logo, pode-se afirmar, com base nos resultados obtidos na estatística descritiva, bem como na estatística multivariada, que a susceptibilidade magnética corresponde a um atributo do solo capaz de auxiliar na identificação de compartimentos da paisagem, e oferecer subsídios para o conhecimento de solos a nível de escala detalhada, tendo em vista as discussões atuais para o estabelecimento de critérios no mapeamento, em nível de série.

## 2.4. CONCLUSÕES

A estatística univariada e a estatística multivariada, por meio da análise de componentes principais e dendogramas, demonstraram que a suscetibilidade magnética corresponde a um atributo de destaque, no que se refere à divisão de compartimentos da paisagem. Desta forma, o atributo proposto para o auxílio na identificação de compartimentos da paisagem, suscetibilidade magnética, mostrou-se pertinente para auxiliar na delimitação de compartimentos da paisagem, em escala detalhada, em áreas de Latossolos de transição litoestratigráfica arenito-basalto.

## 2.5. REFERÊNCIAS

BARBIERI, D. M.; MARQUES JR., J.; ALLEONI, L. R. F.; GARBUIO, F. J.; CAMARGO, L. A. Hillslope curvature, clay mineralogy, and phosphorus adsorption in a n Alfisol cultivated with sugarcane. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 66, n. 6, p. 819-826, 2009.

BLUNDELL, A.; HANNAM, J. A.; DEARING, J. A.; BOYLE, J. F. Detecting atmospheric pollution in surface soils using magnetic measurements: A reappraisal using an England and Wales database. **Environmental Pollution**, Oxford, v. 157, n. 10, p. 2878–2890, 2009.

BRITO, L. F.; MARQUES JR., J.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA JR., N. Spatial variability of soil CO<sub>2</sub> emission in different topographic positions. **Bragantia**, Campinas, SP, v. 69, supl. 0, p. 19-27, 2010.

BUI, E. N. Soil survey as a knowledge system. **Geoderma**, Amsterdam v. 120, n. 2, p. 17-26, 2004.

CAMPOS, M. C. C.; MARQUES JR., J.; PEREIRA, G. T.; MONTANARI, R.; CAMARGO, L. A. Relações solo-paisagem em uma litossequência arenito-basalto na região de Pereira Barreto, SP. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 31, n. 3, p. 519-529, 2007.

CARNEIRO, A. A. O.; TOUSO, A. T.; BAFFA, O. Avaliação da susceptibilidade magnética usando uma balança analítica. **Química Nova**, São Paulo, v. 26, n. 6, p. 952-956, 2003.

CARVALHO JUNIOR, W.; SCHAEFER, C. E. G. R.; SILVA CHAGAS, C.; FERNANDES FILHO, E. I. Análise multivariada de Argissolos da faixa atlântica brasileira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 5, p. 2081-2090, 2008.

CHAPARRO, M. A. E.; CHAPARRO, M. A. E.; MARINELLI, C.; SINITO, A. M. Multivariate techniques as alternative statistical tools applied to magnetic proxies for pollution: a case study from Argentina and Antarctica. **Environmental Geology**, Berlim, v. 54, p. 365-371, 2008.

CUNHA, P.; MARQUES JR., J.; CURI, N.; PEREIRA, G. T.; LEPSCH, I. F. Superfícies geomórficas e atributos de Latossolos em uma sequência arenítico-basáltica da região de Jaboticabal (SP). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 29, n. 1, p. 81-90, 2005.

DANIELS, R. B.; NELSON, L. A. Future variability and productivity: Future developments. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 51, n. 2, p. 279-291, 1987.

DARLYMPLE, J. B.; BLONG, R. J.; CONACHER, A. J. A hypothetical nine unit land surface model. **Geomorphologie**, Zeitschrift für, v. 12, n. 1, p. 60-76, 1968.

DEARING, J. A.; HAY, K. L.; BABAN, S. M. K.; HUDDLESTON, A. S.; WELLINGTON, E. M. H.; LOVELAND, P. J. Magnetic susceptibility of soil: an evaluation of connecting theories using a national data set. **Geophysical Journal International**, Oxford, v. 127, p. 728-734, 1996.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. **Manual de métodos de análise do solo**. Rio de Janeiro, 1979.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Brasília, 1997. 212p.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, 1999. 412 p.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, 2006. 412p.

FONTES, M. P. F.; OLIVEIRA, T. S.; COSTA, L. M.; CAMPOS, A. A. G. Magnetic separation and evaluation of magnetization of Brazilian soils from different parent materials. **Geoderma**, Amsterdam, v. 96, n. 1-2, p. 81-99, 2000.

FREDDI, O. S.; FERRAUDO, A. S.; CENTURION, J. F. Análise multivariada na compactação de um Latossolo Vermelho cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, MG, v. 32, p. 953-961, 2008.

GARDNER, W. H. Water content. In: KLUTE, A. (Ed.). **Methods of soil analyses**. Madison: ASA, 1986. p. 493-541. (Agronomy Monography, 9).

HAIR, J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. Análise multivariada de dados. Porto Alegre: Bookman, 2005.

HEALY, R. W.; STRIEGL, R. G.; RUSSEL, T. F.; HUTCHINSON, G. L.; LIVINGSTON, G. P. Numerical evaluation of static-chamber measurements of soil-atmosphere gas exchange: identification of physical processes. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 60, n. 3, p. 740-7, 1996.

JOHNSON, R. A.; WICHERN, D. W. **Applied multivariate statistical analysis**, 5.th. Upper Saddle River: Prentice Hall, 2002.

KAISER, H. F. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. **Psychometrika**, Urbana, v.23, n.3, p.187-200, 1958.

KEMPER, W. D.; ROSENAU, R. C. Aggregate stability and size distribution. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis**. Physical and mineralogical methods. 2.nded. Madison: ASA, 1986. p. 425-441. (Agronomy Monography, 9).

KRAVCHENKO, A. N.; ROBERTSON, G. P.; THELEN, K. D.; HARWOOD, R. R. Management, topographical, and weather effects on spatial variability of crop grain yields. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, n. 2, p. 514-23, 2005.

LEAO, M. G. A.; MARQUES JR., J.; SOUZA, Z. M.; PEREIRA, G. T. Variabilidade espacial da textura de um Latossolo sob cultivo de citros. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 34, n. 1, p. 121-131, 2010.

LEGROS, J. P. **Mapping of the soil**. Lausanne: Presses Polytechniques et Universitaires Romandes, 2006. 411 p.

LOURENÇO, A. M.; GOMES, C. R. Caracterização de solos superficiais na região de Coimbra, Portugal central: um estudo de magnetismo ambiental. In: CONGRESSO NACIONAL DE GEOLOGIA, 8., 2010, Anais Braga, **Universidade de Minho**, 2010.

MANLY, B. J. F. **Métodos estatísticos multivariados** - uma introdução – 3.ed. Porto Alegre: Bookman, 2008.

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

- MCKENZIE, N. J.; GALLANT, J. C. Digital Soil Mapping With Improved Environmental Predictors and Models of Pedogenesis. In: LAGACHERIE, P.; MCBRATNEY, A.B.; VOLTZ, M. (Ed). **Developments in Soil Science**. Amsterdam, v. 31, p. 327-349, 2007.
- MONTANARI, R.; PEREIRA, G. T.; MARQUES JR., J.; SOUZA, Z. M.; PAZETO, R. J.; CAMARGO, L. A. Variabilidade espacial de atributos químicos em Latossolo e Argissolos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 5, p. 1266-1272, 2008.
- PANOSSO, A. R.; MARQUES JR., J.; MILORI, D. M. B. P.; FERRAUDO, A. S.; BARBIERI, D. M.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA JR., N. Soil CO<sub>2</sub> emission and its relation to soil properties in sugarcane areas under Slash-and-burn and Green harvest. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 111, n. 2, p. 190-196, 2011.
- PENNOCK, D. J.; CORRE, M. D. Development and application of landform segmentation procedures. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 58, n. 3-4 , p. 151-162, 2001.
- RAIJ, B. V.; QUAGGIO, J. A.; CANTARELLA, H.; FERREIRA, M. E.; LOPES, A. S.; BATAGLIA, C. O. **Análise química do solo para fins de fertilidade**. Campinas: Fundação Cargill, 1987, 170p.
- SANCHEZ, R. B.; MARQUES JR., J.; SOUZA, Z. M.; PEREIRA, G. T.; MARTINS FILHO, M. V. Variabilidade espacial de atributos do solo e de fatores de erosão em diferentes pedoformas. **Bragantia**, Campinas, v. 68, n. 4, p. 1095-1103, 2009.
- SENA, M. M.; FRIGHETTO, R. T. S.; VALARINI, P. J.; TOKESHI, H.; POPPI, R. J. Discrimination of management effects on soil parameters by using principal component analysis: a multivariate analysis case study. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 67, n. 2, p. 171-181, 2002.
- SHEPHERD, K. D.; WALSH, M. G. Infrared spectroscopy - enabling an evidence based diagnostic surveillance approach to agricultural and environmental management in developing countries: **Journal of Near Infrared Spectroscopy**, v. 15, p. 1-19, 2007.
- SILVA, A. R.; SOUZA JUNIOR, I. G.; COSTA, A. C. S. Suscetibilidade magnética do horizonte B de solos do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 34, n. 2, p. 329-338, 2010.
- 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 Management**, Oxford, v. 26, n. 4, p. 425-431, 2010.
- SOUZA, Z. M.; MARQUES, JR., J.; PEREIRA, G. T.; MOREIRA, L. F. Variabilidade espacial do pH, Ca, Mg e V% do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 6, p. 1763-1771, 2004.

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

SOUZA JUNIOR, I. G.; COSTA, A. C. S.; VILAR, C. C.; HOEPERS, A. Mineralogia e susceptibilidade magnética dos óxidos de ferro do horizonte B de solos do Estado do Paraná. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 3, p. 513-519, 2010.

TORRENT, J.; LIU, Q. S.; BARRÓN, V. Magnetic minerals in Calcic Luvisols (Chromic) developed in a warm Mediterranean region of Spain: origin and paleoenvironmental significance. **Geoderma**, Amsterdam, v. 154, n. 3-4, p. 465–472, 2010.

TORRENT, J.; BARRÓN, V.; LIU, Q. S. Magnetic enhancement is linked to and precedes hematite formation in aerobic soil. **Geophysical Research Letters**, Washington, v. 33, p. L02401, 2006.

TROEH, F.R. Landform equations fitted to contour maps. **American Journal of Science**, New Haven, v. 263, n. 3, p. 616-627, 1965.

VALLADARES, G. S.; GOMES, E. G.; MELLO, J. C. C. B. S.; PEREIRA, M. G.; CUNHA DOS ANJOS, L. H.; EBELING, A. G.; BENITES, V. M. Análise dos componentes principais e métodos multicritério ordinais no estudo de organossolos e solos afins. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 1, p. 285-296, 2008.

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

VIDAL-TORRADO, P.; LEPSCH, I. F.; CASTRO, S. S. Conceitos e aplicações das relações pedologia-geomorfologia em regiões tropicais úmidas. In: VIDAL-TORRADO, P.; ALLEONI, L. R. F.; COOPER, M.; SILVA, A. P.; CARDOSO, G. J. (Ed). **Tópicos em ciências do solo**. v. 4, p. 145 – 192, 2005.

WARRICK, A. W.; NIELSEN, D. R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (Ed.). Applications of soil physics. New York: Academic Press, 1980. p. 319-341.

YOUNG, F. J.; HAMMER, R. D. Defining geographic soil bodies by landscape position, soil taxonomy, and cluster analysis. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 64, n. 3, p. 989-998, 2000.

### **CAPÍTULO 3. SUSCETIBILIDADE MAGNÉTICA COMO INDICADOR DE QUALIDADE DO SOLO EM ÁREAS SOB CULTIVO DE CANA-DE-AÇÚCAR**

**RESUMO** – Os tipos de manejo empregados na cultura da cana-de-açúcar (cana crua - CC e cana queimada – CQ) interferem na dinâmica dos atributos do solo, dentre os quais a suscetibilidade magnética (SM). Assim, o objetivo do trabalho foi avaliar o potencial da suscetibilidade magnética como indicador de qualidade do solo em áreas sob cultivo de cana-de-açúcar. Foram coletados 20 pontos em cada sistema de manejo (CC e CQ). O solo foi classificado como Latossolo Vermelho eutrófico, textura muito argilosa, e o experimento localiza-se em uma área limítrofe entre o Basalto do Grupo São Bento, Formação Serra Geral, e o Arenito do Grupo Bauru, Formação Adamantina. Foram avaliados os atributos químicos, físicos e a suscetibilidade magnética (SM), expressada por: suscetibilidade magnética da terra fina seca ao ar ( $SM_{TFSA}$ ), suscetibilidade magnética da fração areia total ( $SM_{AT}$ ) e suscetibilidade magnética da fração argila ( $SM_{ARG}$ ). A submissão da  $SM_{TFSA}$  e  $SM_{ARG}$ , à análise de cluster, possibilitou a formação de dois grupos, que coincidem com a divisão de diferentes condições de qualidade do solo. Observando a análise de componentes principais, percebe-se que a suscetibilidade magnética ocupou importante lugar no componente principal 2 (CP2). A SM pode ser utilizada como indicador de qualidade (geofísico) em ambientes sob sistemas de manejo, em cana-de-açúcar, podendo ser a ferramenta que irá viabilizar estudos de caracterização detalhada da variabilidade espacial em grandes áreas.

**Palavras-Chave:** sistemas de manejo, estatística multivariada, cana crua, cana queimada.

### 3.1. INTRODUÇÃO

O solo apresenta-se como um ambiente heterogêneo, cuja base de equilíbrio pode ser afetada por fatores bióticos e abióticos que o constituem. Tais fatores podem ser monitorados com indicadores de qualidade preestabelecidos (VIDAL-TORRADO et al., 2005), que possibilitam a formulação de ações que favoreçam a sustentabilidade do solo e torne mais eficiente a decisão sobre as medidas a serem tomadas (SLUKLA & EBINGER, 2006). Isso permite a adoção da melhor estratégia agrícola para a manutenção das ciclagens de nutrientes, assim como para a fixação do nitrogênio e o sequestro do carbono (ZAGAL et al., 2009; STAMATI et al., 2011). Resultados de estudos recentes mostram que, em sistemas de manejo, com cultivo de cana-de-açúcar, onde a palhada é mantida na superfície do solo (CC), as condições físicas, químicas, biológicas e mineralógicas do solo são diferentes das condições encontradas no sistema de manejo cujo solo não é recoberto por palhada, onde o canavial é submetido a queima no período que antecede a colheita (CQ) (RAZAFIMBELO et al., 2006; CERRI et al., 2009; PANOSSO et al., 2011; BARBIERI, 2011).

Considerando que todos os sistemas produtivos atuais estão cada vez mais dinâmicos, exigindo maior número de informações, maior precisão e velocidade na troca destas informações, faz-se necessária a busca por novos indicadores, capazes de prever características de grande impacto, referentes à qualidade do solo (CASALINHO et al., 2007; BASTIDA et al., 2008). Dessa maneira, o aprimoramento de conhecimentos técnicos no setor sucroenergético é de grande importância, uma vez que este representa grande destaque no contexto econômico nacional (ALVES & BACCHI, 2004; CONAB, 2011).

Os atributos que podem ser considerados indicadores biológicos de qualidade do solo são: biomassa microbiana do solo, respiração do solo e fixação biológica do nitrogênio; quanto aos indicadores químicos, têm-se: pH, carbono orgânico, CTC efetiva, N, P, K, Ca, Mg, condutividade elétrica, sais solúveis totais, aqueles que indicam a capacidade do solo de realizar troca iônica (como, por exemplo: tipo de argila, CTC, CTA, óxidos de ferro e óxidos de alumínio), aqueles que indicam

contaminação ou poluição (como, por exemplo: metais pesados, nitrato, fosfato e agrotóxicos). Já os indicadores físicos são: textura, estrutura, resistência do solo à penetração, profundidade de enraizamento, percolação da água e capacidade de água disponível (SCHLOTTER & MUNCH, 2003; APARÍCIO & COSTA, 2007; REYNOLDS et al., 2007; FLIEßBACH et al., 2007; FRANCHINI et al., 2007; MOTA et al., 2008; IMAZ et al., 2010). Os indicadores físicos estabelecem relações fundamentais com os processos hidrológicos, tais como: taxa de infiltração; escoamento superficial; drenagem e erosão. Possuem também função essencial no suprimento e no armazenamento de água, de nutrientes e de oxigênio no solo (REYNOLDS et al., 2009).

A desvantagem é que cada indicador possui um método específico para sua avaliação, o qual geralmente apresenta maior demanda de tempo para sua execução. Isso dificulta os estudos de caracterização detalhada da variabilidade solo tornando essa prática inexecutável por empresas do setor agrícola. Segundo MINASNY & MCBRATNEY (2007), a determinação de atributos encontrados em baixos teores no solo pode conter maior erro analítico laboratorial.

Alguns pesquisadores têm utilizado indicadores geofísicos, como a suscetibilidade magnética (SM), que, por sua vez, reflete diretamente a composição e estrutura dos minerais presentes no solo (COSTA et al., 2008; SILVA et al., 2010). Considerando que toda dinâmica física e química do solo é coordenada pela sua mineralogia (CAMARGO et al., 2008), a SM corresponde a um importante indicador capaz de subsidiar informações para o planejamento e a sustentabilidade agrícola, auxiliando com veracidade o conhecimento acurado em campo (MARQUES JÚNIOR, 2009; SIQUEIRA et al., 2010).

A análise estatística multivariada corresponde a uma importante ferramenta estatística, capaz de detectar e avaliar diversos tipos de variáveis ao mesmo tempo, por meio de combinações lineares, subsidiando informações relevantes, que, por sua vez, não são possíveis de se verificar por meio da estatística univariada (FERREIRA, 2008; MANLY, 2008). Esta análise estatística possibilita a formulação de hipótese, levando-se em conta fatores bióticos e abióticos que interferem na qualidade do solo (MALUCHE-BARETTA et al., 2006). Assim, o objetivo do trabalho foi avaliar o potencial da

suscetibilidade magnética como indicador de qualidade do solo em áreas sob cultivo de cana-de-açúcar.

## 3.2. MATERIAL E MÉTODOS

### 3.2.1. Localização, caracterização e amostragem da área

A área de estudo localiza-se no município de Guariba, sudeste do Estado de São Paulo, em área pertencente à Usina São Martinho, com coordenadas geográficas de 21° 24' de latitude sul e 48° 09' de longitude oeste. O local encontra-se a uma altitude média de 550 m acima do nível do mar (Figura 3.1.).

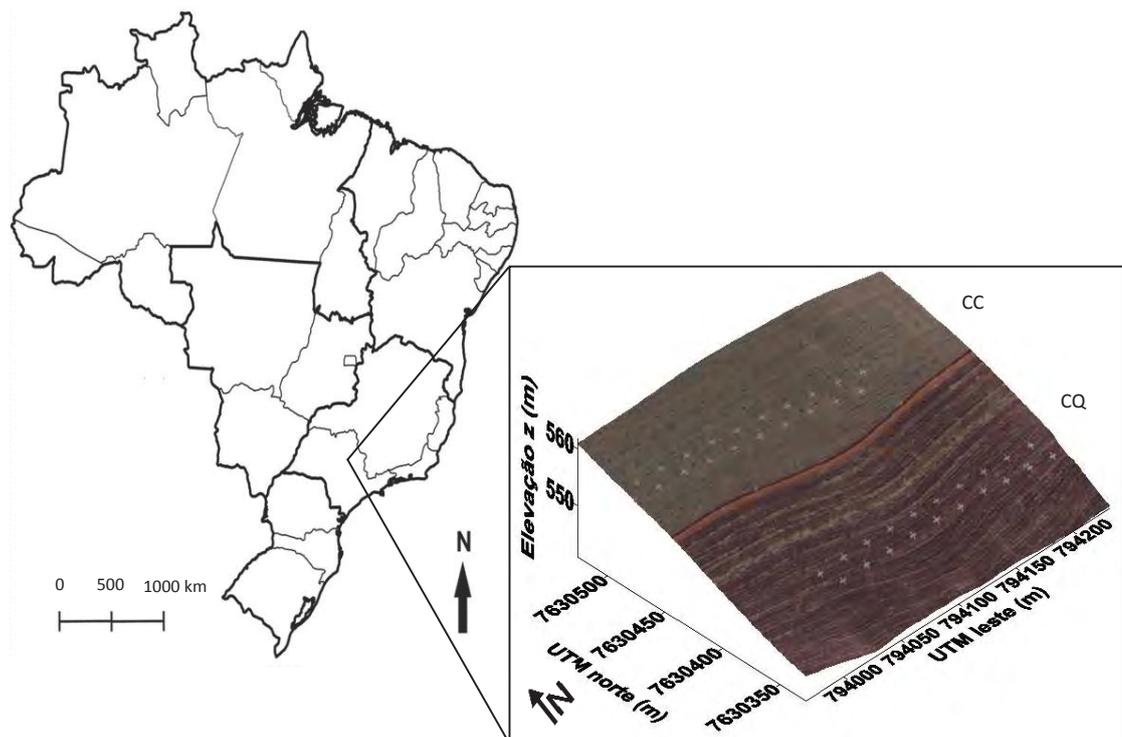


Figura 3.1. Levantamento topográfico com a localização da área amostral e modelo de elevação digital, nos sistemas de manejo, com cana crua (CC) e cana queimada (CQ).

De acordo com a EMBRAPA (2006), o solo da área é classificado como Latossolo Vermelho eutroférico, textura muito argilosa (LVef). Essa área localiza-se na província geomorfológica do Planalto Ocidental Paulista, próximo ao limite das Cuestas Basálticas no divisor litoestratigráfico arenito-basálto, área limítrofe entre o Basalto do Grupo São Bento, Formação Serra Geral, e o Arenito do Grupo Bauru, Formação Adamantina (IPT, 1981).

As áreas analisadas neste estudo foram localizadas em dois talhões vizinhos, com baixa declividade (3 a 4%), com diferentes históricos de manejo: cana crua (CC), com sete anos de colheita mecanizada, com grande quantidade de resíduos da cultura sobre a superfície do solo (média de  $12 \text{ t ha}^{-1}$ ), e última operação de colheita realizada no dia 16 de maio de 2007; cana queimada (CQ), com histórico de queima e colheita manual da cultura desde 1970, sendo a última queima realizada no dia 9 de junho de 2007. Deve-se salientar que, anteriormente à conversão para o sistema de cana crua, ambas as áreas apresentavam o mesmo histórico de manejo. A variedade de cana-de-açúcar plantada nos dois talhões, nos anos anteriores, foi a CTC-6. No dia 25 de junho de 2007, duas malhas amostrais regulares e idênticas, de  $190 \times 10 \text{ m}$ , contendo 20 pontos, foram instaladas nas áreas experimentais, uma em cada talhão, com mínima distância entre os pontos de 13,3 m (Figura 3.1.), onde se amostrou solo na profundidade de 0,00 – 0,25 m, pois nesta profundidade a influência do fogo nos atributos do solo é de relevante importância.

No ano de 2006, os canaviais foram renovados, realizando-se uma operação de subsolagem e a erradicação química da soqueira. Em seguida, foram aplicadas  $2 \text{ t ha}^{-1}$  de calcário dolomítico e  $1 \text{ t ha}^{-1}$  de gesso agrícola para a correção do solo, em área total, sem a incorporação dos mesmos. Realizou-se a adubação na sulcação, sendo utilizados  $500 \text{ kg ha}^{-1}$  da fórmula 10-25-25, e o plantio realizado de forma manual. Aplicaram-se  $100 \text{ m}^{-3}$  de vinhaça em soqueira,  $300 \text{ kg ha}^{-1}$  de ureia na cana queimada e  $200 \text{ kg ha}^{-1}$  de nitrato de amônia na cana crua. A incorporação do adubo na cana queimada foi a aproximadamente 20 cm de profundidade, enquanto na área de cana crua a aplicação é realizada superficialmente ao lado da linha de plantio.

### 3.2.2. Avaliação dos atributos do solo

A análise granulométrica, para a determinação do teor de areia total (Areia Total) e teor argila (Argila), foi realizada pelo método da pipeta, com dispersante químico NaOH 0,1 mol L<sup>-1</sup> e agitação mecânica de baixa rotação, por 16 horas (EMBRAPA, 1997). A distribuição de poros por tamanho, referente à microporosidade (Micro), foi determinada utilizando-se de funil de placa porosa em amostras previamente saturadas. A determinação do teor de matéria orgânica (MO) e de fósforo disponível (P<sub>Disp</sub>) foi extraído utilizando-se do método da resina trocadora de íons (RAIJ, 2001). O teor de Ferro Ditionito (Fe<sub>Dit</sub>), referente aos óxidos de ferro pedogênicos mais cristalizados, foi extraído com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB), segundo metodologia de MEHRA & JACKSON (1960), sendo a dosagem do ferro realizada por meio da espectrofotometria de absorção atômica. O grau de humificação da matéria orgânica do solo (Hum) foi determinado de acordo com a metodologia proposta por MILORI et al. (2006). A emissão de CO<sub>2</sub> do solo (FCO<sub>2</sub>) foi registrada com um sistema automatizado portátil de fluxo de CO<sub>2</sub> do solo LI-8100, durante os estágios iniciais do crescimento da cultura da cana-de-açúcar.

A suscetibilidade magnética da terra fina seca ao ar (SM<sub>TFSA</sub>) foi avaliada utilizando-se de uma balança analítica adaptada (CARNEIRO et al., 2003; SIQUEIRA et al., 2010). Para a medição da suscetibilidade magnética da fração areia total (SM<sub>AT</sub>) e suscetibilidade magnética da fração argila (SM<sub>Arg</sub>) por meio da balança analítica adaptada, as amostras de solo foram previamente tratadas com NaOH 0,5 mol L<sup>-1</sup> e submetidas à agitação mecânica por 10 min para a dispersão das partículas. Após esse tratamento, a fração areia foi retirada em peneira de 0,05 mm. A separação da fração silte ocorreu por centrifugação (1.600 rpm), e o tempo da operação foi determinado pela temperatura das amostras no momento da análise. A suspensão de argila foi floculada com HCl concentrado e centrifugada (2.000 rpm, por 2 min).

### 3.2.3. Análise de dados

As análises estatísticas empregadas foram: estatística descritiva (média e coeficiente de variação) e estatística multivariada (análise de componentes principais e análise de cluster). Foi realizado o teste F da ANOVA e, posteriormente, o teste de *t* de *student*, ao nível de 1% de probabilidade, que expressaram a diferença entre as médias nos sistemas de manejo (CC e CQ). As análises multivariadas foram realizadas após a padronização de todos os atributos do solo, com a média 0 e variância 1.

A análise de cluster corresponde a uma análise de agrupamento hierárquico, que agrupa registros com maior similaridade entre si e separa aqueles com considerável dissimilaridade (MANLY, 2008). No presente estudo, a análise de cluster foi empregada com a utilização da distância euclidiana e o algoritmo de Ward como método de agrupamento. A análise de componentes principais (ACP) foi aplicada a fim de explicar a estrutura de variância dos dados avaliados, levando-se em conta um conjunto menor de variáveis não correlacionadas entre si, denominadas componentes principais (CP), provenientes de combinações lineares entre as variáveis originais. O gráfico Biplot dos dois primeiros componentes principais corresponde a um gráfico bidimensional, que representa o espaço original e demonstra quais os atributos do solo que mais colaboram para a discriminação dos sistemas de colheita (HAIR, 2005; VALLADARES et al., 2008). Utilizou-se o programa estatístico MINITAB 14, para a elaboração da estatística descritiva, enquanto para a realização da análise estatística multivariada empregou-se o programa STATISTICA 7.0 (StatSoft. Inc., Tulsa, OK, USA).

## 3.3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

O sistema de manejo com CC apresentou os maiores valores de teor de argila,  $Fe_{Dit}$  e Hum (Tabela 3.1.), enquanto o sistema de manejo com CQ apresentou os maiores valores para  $SM_{TFSA}$ ,  $FCO_2$ , MO, areia total e  $P_{Disp}$ . Os atributos  $SM_{AT}$ ,  $SM_{Arg}$  e Micro não apresentaram diferença estatística significativa entre os sistema de manejo. Em relação aos teores de areia total e argila, tais resultados podem ser atribuídos tanto

à pedogênese do local, quanto ao processo erosivo, visto que a área do presente estudo apresenta inclinações específicas, bem como condições de proteção superficial, devido à presença ou ausência de palhada na superfície do solo (MIELNICZUK et al., 2003).

A  $SM_{TFSA}$ , com maior média estatística no sistema de manejo com CQ, possivelmente, indique maior expressão deste sistema de manejo do material de origem mais rico em minerais que possuam em sua constituição óxidos de ferro (LU et al., 2008), como o basalto, por exemplo. Cabe ressaltar que, na  $SM_{TFSA}$ , as frações granulométricas areia total, silte e argila respondem pela suscetibilidade magnética. Sendo assim, é importante salientar que a fração silte, provavelmente, também responda por parte da  $SM_{TFSA}$ , pois, assim como na fração areia, o mineral ferrimagnético magnetita é frequentemente encontrado nesta fração (KAMPF & CURTI, 2000).

Observando-se a  $SM_{AT}$ , pode-se dizer que o magnetismo de origem litogênica (minerais primários), sendo a maghemita e a magnetita os minerais possivelmente presentes em tal fração (RODRIGUES & MARCONI, 1990), não possibilita uma diferenciação dos sistemas de manejo em questão. Em relação à  $SM_{Arg}$ , constituída por minerais oriundos dos processos pedogênicos (minerais secundários), também não houve diferença estatística quando comparados os sistemas de manejo. De acordo com COSTA et al. (1999), em solos originados de rochas vulcânicas, a goetita (Gt) e a hematita (Hm) são frequentemente encontradas na fração argila destes solos.

Uma informação de grande valia corresponde ao fato de o sistema de manejo com CQ oferecer condições que favoreçam a neoformação de minerais ferrimagnéticos, uma vez que o solo é submetido a altas temperaturas durante o período de queima do canavial, no período de pré-colheita. Esse fato, associado à presença de carvão mineral e glicose, influencia nas reações de trocas eletroquímicas do solo (reações de oxidação e redução), trocas que, por conseguinte, interferem diretamente no comportamento magnético do solo (MULLINS, 1977; SCHWERTMANN & CORNELL, 1991; CAMPBELL et al., 1997; TORRENT et al., 2006; SILVA & COSTA, 2010).

Tabela 3.1. Estatística descritiva na profundidade de 0,00-0,25 m, nos sistemas de manejo com cana crua (CC) e cana queimada (CQ).

Atributo	Cana Crua		Cana Queimada	
	Média	CV <sup>1</sup>	Média	CV <sup>1</sup>
SM <sub>TFSA</sub> (m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> 10 <sup>-5</sup> )	4,64 b	11,91	5,13 a	10,60
SM <sub>AT</sub> (m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> 10 <sup>-5</sup> )	4,53 a	18,73	5,02 a	14,11
SM <sub>Arg</sub> (m <sup>3</sup> kg <sup>-1</sup> 10 <sup>-5</sup> )	3,99 a	11,06	4,13 a	8,61
FCO <sub>2</sub> (μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )	2,07 b	13,81	2,74 a	23,00
MO (g dm <sup>-3</sup> )	23,79 b	15,90	26,86 a	11,60
Areia Total (g Kg <sup>-1</sup> )	292,00 b	7,91	329,00a	5,24
Argila (g Kg <sup>-1</sup> )	634,38 a	3,63	604,12 b	4,30
Fe <sub>Dit</sub> (g Kg <sup>-1</sup> )	131,03 a	6,52	96,70 b	10,37
Hum (u.a.)	230,53 a	9,01	180,28 b	7,99
Micro (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )	35,46 a	6,76	36,51 a	6,25
P <sub>Disp</sub> (mg dm <sup>-3</sup> )	15,74 b	26,83	109,00 a	35,68

N=20; FCO<sub>2</sub> (emissão de CO<sub>2</sub> do solo); MO (teor de matéria orgânica); Areia Total (Teor de areia total); Argila (Teor de argila); Fe<sub>Dit</sub> (teor de ferro ditionito); SM<sub>TFSA</sub> (susceptibilidade magnética da terra fina seca ao ar); SM<sub>AT</sub> (susceptibilidade magnética da fração areia total); SM<sub>Arg</sub> (susceptibilidade magnética da fração argila); Hum (grau de humificação da matéria orgânica do solo); Micro (microporosidade); P<sub>Disp</sub> (fósforo disponível); u.a. = unidade arbitrária. Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si, pelo teste t de *student*, ao nível de 1% de probabilidade. CV<sup>1</sup>= coeficiente de variação.

É importante elucidar que os teores de hematita e goetita, referentes à área do presente estudo, bem como a cristalinidade dos mesmos, foram estudados por BARBIERI (2011). De acordo com este autor, no que se refere ao diâmetro médio do cristal do mineral hematita (DMC\_Hm), constatou-se que este não apresentou diferença significativa, em ambos os sistemas de manejo (CC e CQ), enquanto em relação ao diâmetro médio do cristal do mineral goethita (DMC\_Gt), a média deste foi significativamente maior na CC em relação à CQ. Isto explica os menores valores de P<sub>Disp</sub> nas áreas de CQ. Considerando que a cristalinidade de um mineral é maior quanto maior for o diâmetro médio do cristal (DMC) (FITSPATRICK & SCHWERTMANN, 1982), pode-se inferir que as diferentes cristalinidades indiquem as diferenças que o sistemas de manejo propiciam à mineralogia do solo (FERREIRA et al., 2003; INDA JUNIOR & KÄMPF, 2005; SILVA NETO et al., 2008; CAMARGO et al., 2008; MONTANARI et al.,

2010), podendo interferir, conseqüentemente, na suscetibilidade magnética do solo (SILVA et al., 2010).

Em relação ao ferro ditionito ( $Fe_{Dit}$ ), pode-se dizer que, no sistema de manejo com CC, ocorre maior teor de minerais pedogenéticos altamente cristalinizados quando comparado ao sistema de colheita com CQ. O maior teor de matéria orgânica do solo (MO) foi encontrado no sistema de manejo com CQ (Tabela 3.1.), corroborando os resultados de BLAIR et al. (2000), que verificaram maior teor de matéria orgânica em área submetida à queima do canavial, no período de pré-colheita. A maior emissão de  $CO_2$  em sistemas de manejo com CQ está relacionada à temperatura específica desta área, bem como ao maior teor de MO e  $P_{Disp}$  existente neste local (PANOSSO et al., 2011). Embora a microporosidade do solo seja altamente influenciada pela textura e pela matéria orgânica (SILVA & KAY, 1997), no presente estudo, tal diferença estatística não foi observada.

Considerando que a matéria orgânica é fonte natural de fósforo, ressaltando os processos biológicos, (ROCHA et al., 2005), e enfatizando que a temperatura do solo interfere diretamente na mineralização da matéria orgânica do solo, influenciando o ambiente a curto prazo, (FAVORETTO et al., 2008), cabe ressaltar que o maior teor de fósforo disponível, no sistema de manejo com CQ, possivelmente, seja decorrente da maior mineralização da matéria orgânica, quando da queima do solo. Embora a disposição de fósforo seja vantajosa para a planta, essa vantagem apresenta-se somente nos períodos subsequentes à queima, sendo a real situação, na escala de tempo a longo prazo, caracterizada por um solo possivelmente mais suscetível à lixiviação e precariedade na disposição de fósforo ( $P_{Disp}$ ) para a cultura de cana-de-açúcar, uma vez que este não será disposto ao solo de forma gradual e, sim, pontual.

Em estudo de Argissolo Amarelo, MENDONZA et al. (2000) verificaram que, no sistema caracterizado pela manutenção da palhada na superfície do solo (CC), a fração húmica e ácidos fúlvicos na matéria orgânica foi maior, considerando uma profundidade de 0,00-0,10 m. De acordo com o tipo de preparo do solo, bem como com os sistemas de colheita a que uma cultura é submetida, o grau de humificação da matéria orgânica do solo (Hum) pode desenvolver-se de forma peculiar em cada ambiente (DEICKOW et

al., 2009). Assim, o sistema de manejo com cana crua propicia a este meio condições estáveis para que a decomposição da matéria orgânica se dê de forma não acelerada, porém constante, abrangendo, possivelmente, todas as fases do processo de decomposição. Pesquisas voltadas à qualidade da matéria orgânica, no âmbito de variações induzidas por sistemas de manejo, são recentes em solos do Brasil (BAYER et al., 2003).

Quanto ao coeficiente de variação (CV), segundo a classificação de WARRICK & NIELSEN (1980), na área de CC, os atributos que se enquadram na classe de CV média ( $12\% < CV < 60\%$ ) são: teor de Fósforo disponível ( $P_{Disp}$ ), moderado: teor de matéria orgânica do solo (MO), emissão de  $CO_2$  pelo solo ( $FCO_2$ ), suscetibilidade magnética da fração areia total ( $SM_{AT}$ ) e CV baixo ( $CV < 12\%$ ): teor de areia total (Areia Total), teor de argila (Argila), teor de ferro ditionito ( $Fe_{Dit}$ ), suscetibilidade magnética da terra fina seca ao ar ( $SM_{TFSA}$ ), grau de humificação da matéria orgânica do solo (Hum), microporosidade (Micro). Na área de CQ, os atributos que se enquadram na classe de CV média ( $12\% < CV < 60\%$ ) são: teor de fósforo disponível ( $P_{Disp}$ ); moderado: emissão de  $CO_2$  pelo solo ( $FCO_2$ ), matéria orgânica do solo (MO), suscetibilidade magnética da fração areia ( $SM_{AT}$ ) e CV baixo ( $CV < 12\%$ ): teor de areia total (Areia Total), teor de argila (Argila), teor de ferro ditionito ( $Fe_{Dit}$ ), suscetibilidade magnética da terra fina seca ao ar ( $SM_{TFSA}$ ), suscetibilidade magnética da fração argila ( $SM_{Arg}$ ), grau de humificação da matéria orgânica do solo (Hum) e microporosidade (Micro).

Em relação aos resultados obtidos por meio da estatística multivariada, será apresentado, inicialmente, o método de agrupamento hierárquico, esboçado por meio do dendograma, construído a partir da análise de cluster, utilizando a distância euclidiana e o método de agrupamento de Ward, demonstrado na Figura 3.2.

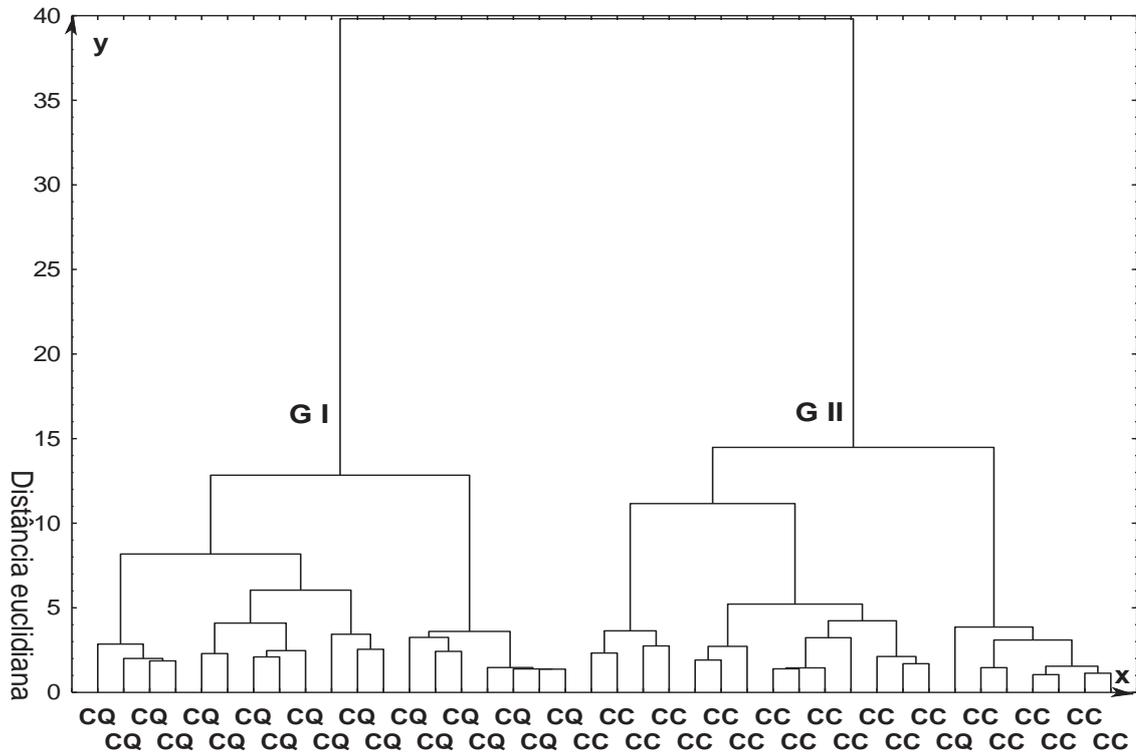


Figura 3.2. Dendrograma das interrelações dos sistemas de manejo (CC e CQ), por meio da análise de agrupamento utilizando a distância euclidiana e o algoritmo de Ward, referente aos atributos  $FCO_2$  (emissão de  $CO_2$  do solo); MO (teor de matéria orgânica); Areia Total (Teor de areia total); Argila (Teor de argila);  $Fe_{Dit}$  (teor de ferro ditionito);  $SM_{TFSA}$  (susceptibilidade magnética da terra fina seca ao ar);  $SM_{AT}$  (susceptibilidade magnética da fração areia total);  $SM_{Arg}$  (susceptibilidade magnética da fração argila); Hum (grau de humificação da matéria orgânica do solo); Micro (microporosidade), e  $P_{Disp}$  (fósforo disponível);  $N=40$ .

Observa-se que essa análise permitiu a formação de 2 grupos distintos (Figura 3.2.). O grupo G I agrupou em sua maioria (99%) atributos provenientes do sistema de manejo com CQ, enquanto o G II agrupou atributos oriundos basicamente (99%) do sistema de manejo com CC. Nesta análise, os atributos do solo oriundos dos sistemas de manejo foram agrupados de acordo com seu grau de semelhança, com o objetivo de classificá-lo em grupos similares.

Utilizando-se somente da  $SM_{TFSA}$  e  $SM_{Arg}$ , para a construção do dendrograma, nota-se a formação de dois grupos distintos, sendo o G I responsável por agrupar 60%

destes atributos amostrados no sistema de manejo com CQ, enquanto o GII agrupou 80% das atributos advindos do sistema de manejo com CC.

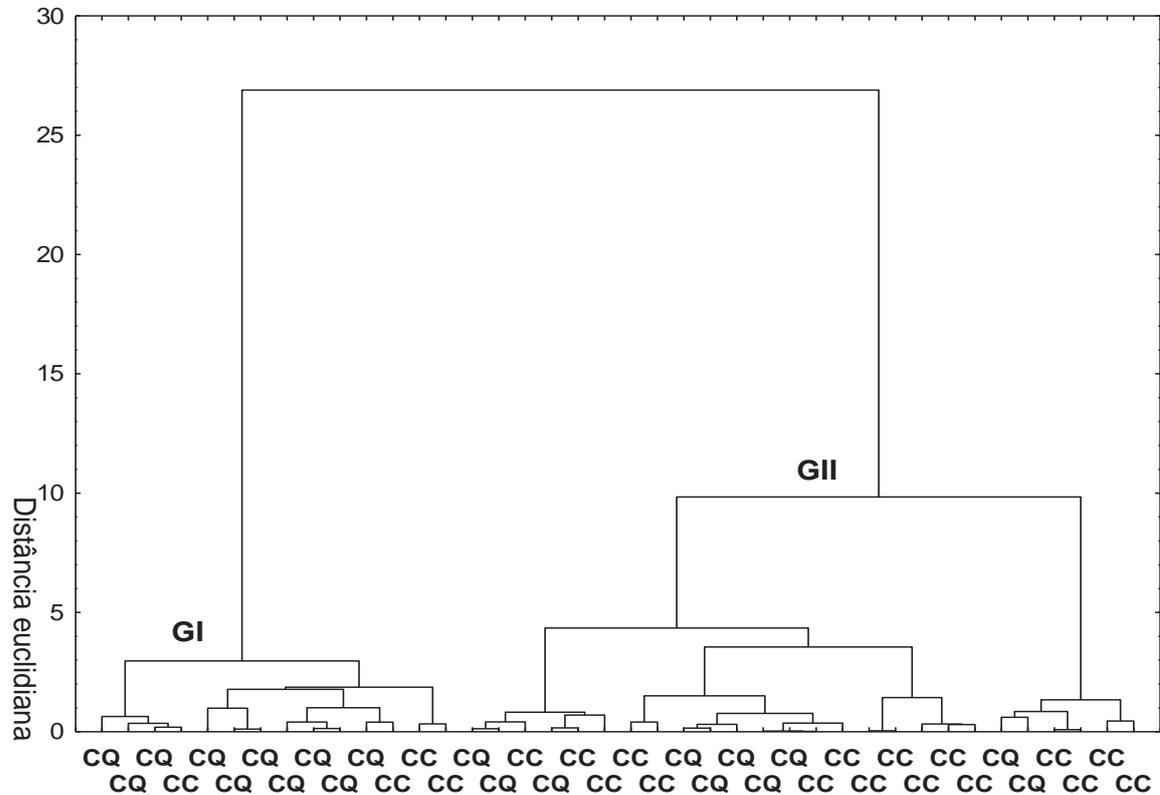


Figura 3.3. Dendrograma das inter-relações obtidas por meio da análise de agrupamento utilizando a distância euclidiana e o algoritmo de Ward, referente aos atributos  $SM_{TFSA}$  (susceptibilidade magnética da terra fina seca ao ar) e  $SM_{Arg}$  (susceptibilidade magnética da fração argila);  $N=40$ .

É importante ressaltar que a divisão dos grupos, com diferentes condições de qualidade do solo, foi possível utilizando-se somente desses dois atributos do solo ( $SM_{TFSA}$  e  $SM_{Arg}$ ) (Figura 3.3.). Tal resultado conota a possibilidade em se levar em conta a susceptibilidade magnética do solo, para indicar áreas com diferentes condições de qualidade do solo, condições estas presente nos dois grupos formados (GI e GII).

Tabela 3.2. Autovalores e porcentagem de variação explicada pelos quatro primeiros componentes principais e coeficientes de correlação entre os atributos originais e os componentes principais. Ordem de importância dos atributos originais na discriminação dos sistemas de manejo.

Componente Principal	CP1		CP2		CP3	
	Autovalor*	Percentual (%) Explicado	Autovalor*	Percentual (%) Explicado	Autovalor*	Percentual (%) Explicado
	4,66	42,34	3,07	27,94	1,11	10,10
Autovalor*	4,66	42,34	7,73	70,27	8,84	80,37
Percentual (%) Explicado <sup>AC</sup>	42,34		70,27		80,37	
Atributo	Correlação	Ordem de importância	Correlação	Ordem de importância	Correlação	Ordem de importância
FCO <sub>2</sub>	0,66	5	-0,10	8	-0,18	4
MO	0,49	7	0,19	6	0,74	1
Areia Total	0,93	1	-0,04	11	-0,03	9
Argila	-0,64	6	-0,56	4	-0,23	3
Fe <sub>Dit</sub>	-0,92	2	-0,12	7	0,16	5
SM <sub>TFSA</sub>	0,36	8	-0,89	2	-0,12	6
SM <sub>AT</sub>	0,24	10	-0,89	3	0,01	11
SM <sub>Arg</sub>	0,11	11	-0,92	1	0,06	8
Hum	-0,88	3	-0,09	9	0,03	10
Micro	0,33	9	0,48	5	-0,63	2
P <sub>Disp</sub>	0,87	4	-0,07	10	0,07	7

N=40. \*Autovalores maiores que a unidade estabelecida por Kaiser (1958). <sup>AC</sup>: Acumulado.

A divisão de grupos, presente nos dendrogramas (Figuras 3.2. e 3.3.), foi testado pelos centroides de médias de Hotelling significativo ao nível de 1% de probabilidade, confirmando a discriminação entre os grupos GI e GII, observados na análise de cluster. Em relação à análise de componentes principais (Tabela 3.2.), os três primeiros componentes foram responsáveis por explicar aproximadamente 80,4% da variabilidade total dos dados, escolhidos de acordo com o critério de KAISER (1958), sendo o primeiro componente principal responsável por explicar aproximadamente 42% da variabilidade total dos atributos avaliados, o segundo componente principal 28%, enquanto o terceiro componente principal explicou aproximadamente 10%. A contribuição de cada um dos atributos do solo, dentro de cada componente principal, foi calculado por meio da correlação linear individual do atributo com o respectivo componente principal (CP1, CP2 e CP3), e esses componentes principais não são correlacionados entre si (Tabela 3.2.).

Em ordem de importância, os atributos do solo que apresentaram maior valor de relação com o CP1 são: Areia Total,  $Fe_{Dit}$ , Hum,  $P_{Disp}$ ,  $FCO_2$ , Argila e MO. As propriedades que se relacionam melhor com CP2 são:  $SM_{TFSA}$ ,  $SM_{AT}$  e  $SM_{Arg}$  (Tabela 3.2.). Essas correlações são demonstradas na Figura 3.4. e são representadas pela seta de cada atributo do solo e sua projeção no gráfico Biplot (Figura 3.4.). O gráfico Biplot corresponde a um gráfico bidimensional, que possibilita a visualização da estrutura dos atributos do solo que explicam a maior variabilidade do conjunto de atributos oriundos dos sistemas de manejo, com CC e CQ.

As correlações dos atributos do solo, contidos nos componentes principais 1 e 2 (CP1 e CP2), representadas pela seta de cada atributo do solo, demonstram que os atributos que apresentaram correlação positiva com a CP1: Areia Total,  $P_{Disp}$ ,  $FCO_2$  e MO foram responsáveis pela caracterização do sistema de manejo com CQ, localizado à direita do gráfico biplot, enquanto os atributos que se correlacionam negativamente com a CP1:  $Fe_{Dit}$ , Hum e Argila caracterizaram o sistema de manejo com CC, localizado à esquerda do gráfico. Considerando-se o CP2, nota-se que os três primeiros atributos de maior poder discriminatório são designados por:  $SM_{TFSA}$ ,  $SM_{AT}$  e  $SM_{Arg}$ , corroborando os resultados da análise de cluster (Figura 3.3.). PANOSSO et al. (2011),

em investigação anterior realizada na mesma área abordada no presente estudo, não incluindo a SM, encontraram que o grau de humificação da matéria orgânica do solo foi um dos atributos de maior ordem de importância dentro do componente principal 1 (CP1).

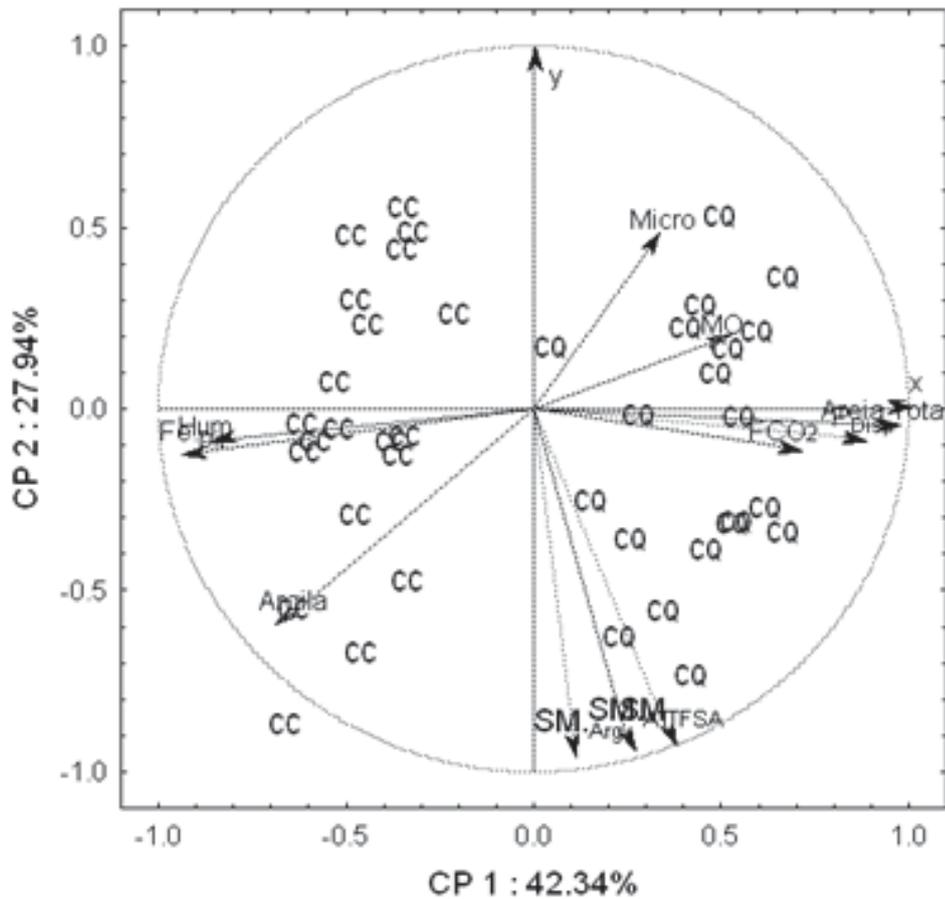


Figura 3.4. Gráfico de dispersão biplot das componentes principais CP1 e CP2. Atributos:  $FCO_2$  (emissão de  $CO_2$  do solo); MO (teor de matéria orgânica); Areia Total (Teor de areia total); Argila (Teor de argila);  $Fe_{Dit}$  (teor de ferro ditionito);  $SM_{TFSA}$  (susceptibilidade magnética da terra fina seca ao ar);  $SM_{AT}$  (susceptibilidade magnética da fração areia total);  $SM_{Arg}$  (susceptibilidade magnética da fração argila); Hum (grau de humificação da matéria orgânica do solo); Micro (microporosidade);  $P_{Disp}$  (fósforo disponível) e u.a = unidade arbitrária. Sistemas de manejo: CC (cana crua); CQ (cana queimada); N=40.

Na análise de componentes principais, a suscetibilidade magnética ocupou lugar de destaque no segundo componente principal. Tal resultado sugere a veracidade na utilização desta como um atributo do solo que poderia auxiliar na avaliação dos efeitos dos sistemas de manejo em Latossolo.

Ao observar a Tabela 3.2. e a Figura 3.4., verifica-se que o grau de humificação da matéria orgânica do solo (Hum), bem como a emissão de CO<sub>2</sub>, localizados no primeiro componente principal, e a suscetibilidade magnética (SM<sub>TFSA</sub>, SM<sub>AT</sub> e SM<sub>Arg</sub>), localizada no segundo componente principal, são atributos que ocuparam destaque na ordem de contribuição para caracterizar os sistemas de manejo. A utilização de aparato instrumental que visa a avaliar a emissão de CO<sub>2</sub> do solo consiste em uma técnica muito precisa e, por consequente, de alta especificidade, porém a medição de CO<sub>2</sub> no campo apresenta algumas limitações, uma vez que a variabilidade temporal influencia na emissão deste gás pelo solo.

Desta forma, considerando que diversas áreas da ciência utilizam a suscetibilidade magnética para mapear áreas contaminadas ou até mesmo utilizam esta como ferramenta auxiliar no estudo da pedologia, o presente trabalho sugere que a suscetibilidade magnética, possivelmente, possa ser utilizada para indicar diferentes condições de qualidade do solo, como por exemplo, emissão de CO<sub>2</sub> do solo.

Portanto, no presente estudo, a suscetibilidade magnética do solo, apresentou alta capacidade de indicar as diferentes condições de qualidade do solo, vigente nos sistemas de manejo, sendo a ação antrópica o possível responsável pelos diferentes índices de qualidade existente em cada sistema.

### **3.4. CONCLUSÕES**

A suscetibilidade magnética pode ser utilizada como indicador geofísico de ambientes sob sistemas de manejo de cana-de-açúcar, podendo ser a ferramenta que irá viabilizar estudos que visam a identificar áreas com possíveis condições distintas no que se refere à qualidade do solo em sistemas de manejo com cana crua e cana queimada, em área de Latossolo.

### 3.5. REFERÊNCIAS

ALVES, R. A.; BACCHI, M. R. P. Oferta de exportação de açúcar do Brasil. **Revista Brasileira de estudos regionais**, Rio de Janeiro, v. 42, n. 01, p. 09-33, 2004.

APARICIO, V.; COSTA, J. L. Soil quality indicators under continuous cropping systems in the Argentinean Pampas. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 96, n. 1-2, p. 155–165, 2007.

BARBIERI, D. M. **Atributos físicos, químicos e mineralógicos de um Latossolo Vermelho eutroférrico sob dois sistemas de colheita de cana-de-açúcar**. 2011. 86. Tese (Doutorado em Produção Vegetal) - Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2011.

BASTIDA, F.; ZSOLNAY, A.; HERNÁNDEZ, T.; GARCÍA, C. Past, present and future of soil quality indices: A biological perspective. **Geoderma**, Amsterdam, v. 147, n. 3-4, p. 159–171, 2008.

BAYER, C.; MARTIN-NET, L.; SAAB, S. C. Diminuição da humificação da matéria orgânica de um cambissolo húmico em plantio direto. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 3, p. 537-544, 2003.

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.

BLAIR, N. Impact of cultivation and sugar-cane green trash management on carbon fractions and aggregate stability for a Chromic Luvisol in Queensland, Australia. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 55, n. 3, p. 183- 191, 2000.

BOYKO, T.; SCHOLGER, R.; STANJEK, H.; TEAM, M. Topsoil magnetic susceptibility mapping as a tool for pollution monitoring: repeatability of in situ measurements. **Journal of Applied Geophysics**, Amsterdam, v. 55, n. 3-4, p. 249-259, 2004.

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, MG, v. 32, n. 6, p. 2279–2288, 2008.

CAMPBELL, A. S.; SCHWERTMANN, U.; CAMPBELL P. A. Formation of cubic phases on heating ferrihydrite. **Clays and Clay Minerals**, Clarkson, v. 32, p. 615–622, 1997.

CANO, M.E.; CORDOVA-FRAGA, T.; SOSA, M.; BERNAL-ALVARADO, J.; BAFFA, O. Understanding the magnetic susceptibility measurements by using an analytical scale. **European Journal of Physics**, Amsterdam , v. 29, n. 2, p. 345-354, 2008.

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

CARNEIRO, A. A. O.; TOUSO, A. T.; BAFFA, O. Avaliação da susceptibilidade magnética usando uma balança analítica. **Química Nova**, São Paulo, v. 26, n. 6, p. 952- 956, 2003.

CASALINHO, H. D.; MARTINS, S. R.; BAPTISTA-SILVA, J.; SILVA-LOPES, A. Qualidade do solo como indicador de sustentabilidade de agroecossistemas. **Revista Brasileira de Agrociência**, Pelotas, v. 13, n. 2, p. 195-203, 2007.

CERRI, C. C.; MAIA, S. M. F.; GALDOS, M. V.; CERRI, C. E. P.; FEIGL, B. J.; BERNOUX, M. Brazilian greenhouse gas emissions: the importance of agriculture and livestock. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 66, n. 6, p. 831-843, 2009.

CONAB. **Acompanhamento de safra brasileira: cana-de-açúcar**, terceiro levantamento, janeiro/2011. Brasília, 2011. Disponível em:<[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11\\_01\\_06\\_09\\_14\\_50\\_boletim\\_cana\\_3o\\_lev\\_safra\\_2010\\_2011..pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/11_01_06_09_14_50_boletim_cana_3o_lev_safra_2010_2011..pdf)>. Acesso em: 14 set 2011.

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 and Clay Minerals**, Clarkson, v. 47, n. 4, p. 466-473, 1999.

COSTA, A. C. S.; SOUZA JUNIOR, I. G.; BATISTA, M. A.; LOPES, D. A.; SILVA, K. L.; BELLINI, J.V.; PAESANO JR., A. Synthesis and thermal transformations of zincsubstituted magnetites. **Hyperfine Interactions**, v. 176, p. 107-111, 2008.

DEARING, J. **Environmental magnetic susceptibility**: Using the Bartington MS2 System. 2.ª ed. Kenilworth, Chi Publishing, 1999. 54p.

DIECKOW, J.; BAYER, C.; CONCEIÇÃO, P. C.; ZANATTA, J. A.; MARTIN-NETO, L.; MILORI, D. B. M.; SALTON, J. C.; MACEDO, M. M.; MIELNICZUK, J.; HERNANI, L. C. Land use, tillage, texture and organic matter stock and composition in tropical and subtropical Brazilian soils. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.60, p.240-249, 2009.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2. ed. Brasília, 1997. 212 p.

EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Brasília, 2006. 412p.

FABRIS, J. D.; COEY, J. M. D.; MUSSEL, W. N. Magnetic soils from mafic lithodomains in Brazil. **Hyperfine Interactions**, v.113, p. 249-258, 1998.

FAVORETTO, C. M.; GONÇALVES, D.; MILORI, D. M. B. P.; ROSA, J. A.; LEITE, W. C.; BRINATTI, A. M. M.; SAAB, S. C. Determinação da humificação da matéria orgânica de um Latossolo e de suas frações organominerais. **Química Nova**, São Paulo, v. 31 n .8, p. 1994-1996, 2008.

FERREIRA, B. A.; FABRIS, J. D.; SANTANA, D. P.; CURI, N. Óxidos de ferro das frações areia e silte de um Nitossolo desenvolvido de basalto. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, Viçosa, MG, v. 27, n. 3, p. 405-413, 2003.

FERREIRA, D. F. Estatística multivariada. 1. ed., Lavras: Editora UFLA, 2008. 662 p.

FITZPATRICK, R. W.; SCHWERTMANN, U. Al-Substituted goethite na indicator of pedogenic and other weathering environments in South Africa. **Geoderma**, Amsterdam, v. 27, p. 335- 347,1982.

FLIEßBACH, A.; OBERHOLZER, H. R.; GUNST, L.; MADER, P. Soil organic matter and biological soil quality indicators after 21 years of organic and conventional farming. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 118, n. 1-4, p.273–284, 2007.

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

FRANCHINI, J. C.; CRISPINO, C. C.; SOUZA, R. A.; TORRES, E.; HUNGRIA, M. Microbiological parameters as indicators of soil quality under various soil management and crop rotation systems in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 92, n. ½, p. 18–29, 2007.

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

HAIR, J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. **Análise multivariada de dados**. Porto Alegre: Bookman, 2005.

IMAZ, M. J.; VIRTO, I.; BESCANSÀ, P.; ENRIQUE, A.; FERNANDEZ-UGALDE, O.; KARLEN, D.L. Soil quality indicator response to tillage and residue management on semi-arid Mediterranean cropland. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 107, n. 1, p. 17–25, 2010.

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, MG, v. 29, n. 6, p.851-866, 2005.

INSTITUTO DE PESQUISAS TECNOLÓGICAS (IPT). **Mapa Geomorfológico do Estado de São Paulo. Escala 1:1.000.000**. São Paulo, 1981.

KAISER, H. F. The varimax criterion for analytic rotation in factor analysis. **Psychometrika**, Williamsburg, v. 23, p. 178-200, 1958.

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, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p.107-138.

LU, S.G.; XUE, Q.F.; ZHU, L.; YU, J.Y. Mineral magnetic properties of weathering sequence of soils derived from basalt in Eastern China. **Catena**, Amsterdam, v. 73, n. 1, p. 23-33, 2008.

MALUCHE-BARETTA, C.R.D.; AMARANTE, C.V.T.; KLAUBERG FILHO, O. Análise multivariada de atributos do solo em sistemas convencional e orgânico de produção de maçãs. **Pesquisa agropecuária brasileira**, Brasília, v. 41, n. 10, p. 1531-1539, 2006.

MARQUES JÚNIOR, J. **Caracterização de áreas de manejo específico no contexto das relações solo-relevo**. 2009. 124. Tese (Livre-Docência) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agrárias e Veterinárias, Jaboticabal, 2009.

MEHRA, O.P.; JACKSON, M.C. Iron oxide removal from soil and clay by dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. In: NATIONAL CONFERENCE ON CLAY MINERALS, 7., 1960. New York.

MENDOZA, H.N.S.; LIMA, E.; ANJOS, L.H.C.; SILVA, L.A.; CEDDIA, M.B.; ANTUNES, M.V.M. Propriedades químicas e biológicas de solo de tabuleiro cultivado com cana-de-açúcar com e sem queima da palhada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 24, n. 1, p. 201-207, 2000.

MIELNICZUK, J. et al. Manejo de solo e culturas e sua relação com os estoques de carbono e nitrogênio do solo. In: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. **Tópicos em Ciência do Solo**, Viçosa, 2007. p. 209-248.

MILORI, D. M. B. P.; GALETI, H. V. A.; MARTIN-NETO, L.; DIECKOW, J.; GONZÁLEZ-PÉREZ, M.; BAYER, C.; SALTON, J. C. Organic matter study of whole soil samples using laser-induced fluorescence spectroscopy. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 70, n. 1, p. 57-63, 2006.

MINASNY, B.; McBRATNEY, A. B. Incorporating taxonomic distance into spatial prediction and digital mapping of soil classes, **Geoderma**, Amsterdam, v. 142, n. 3-4, p. 285-293, 2007.

MONTANARI, R.; MARQUES JR., J.; CAMPOS, M. C. C.; SOUZA, Z. M.; CAMARGO, L. A. Caracterização mineralógica de Latossolos em diferentes feições do relevo na região de Jaboticabal, SP. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 1, n. 2, p. 191-199, 2010.

MOTA, M. C.; VIVAN, G. A.; LUDWIG, R.; BARBOSA, F. S.; QUADRO, M. S. **Utilização dos parâmetros do solo como indicadores físicos, químicos e biológicos da qualidade do solo**. CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 17, ENCONTRO DE PÓS-GRADUAÇÃO, 9., 2008. Disponível em: <[http://www.ufpel.edu.br/cic/2008/cd/pages/pdf/CA/CA\\_01775.pdf](http://www.ufpel.edu.br/cic/2008/cd/pages/pdf/CA/CA_01775.pdf)>. Acesso em: 03 fev 2011.

MULLINS, C.E. Magnetic susceptibility of the soil and its significance in soil science - a review, **Journal Soil Science**, v. 28, p.223–246, 1997.

PANOSSO, A. R.; MARQUES JR., J.; MILORI, D. M. B. P.; FERRAUDO, A. S.; BARBIERI, D. M.; PEREIRA, G. T.; LA SCALA JR., N. Soil CO<sub>2</sub> emission and its relation to soil properties in sugarcane areas under Slash-and-burn and Green harvest. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 111, n. 2, p. 190-196, 2011.

PREETZ, H.; ALTFELDER, S.; IGEL, J. Tropical Soils and Landmine Detection—An Approach for a Classification System. **Soil Science Society of America Journal**, Amsterdam, v. 72, p. 151-159, 2008.

RAIJ, B. van. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico, 2001. 285p.

RAZAFIMBELO, T.; BARTHÈS, B.; LARRÉ-LARROUY, M. C.; DE LUCA, E. F.; LAURENT, J. Y.; CERRI, C. C.; FELLER, C. Effect of sugarcane residue management (mulching versus burning) on organic matter in a clayey Oxisol from southern Brazil. **Agriculture Ecosystem & Environment**, Amsterdam, v. 115, n. 1-4, p. 285-289, 2006.

REYNOLDS, W. D.; DRURY, C. F.; YANG, X. M.; FOX, C. A.; TAN, C. S.; ZHANG, T. Q. Land management effects on the near-surface physical quality of a clay loam soil. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 96, n. 1-2, p. 316–330, 2007.

REYNOLDS, W. D.; DRURY, C. F.; TAN, C. S.; FOX, C. A.; YANG, X.M. Use of indicators and pore volume-function characteristics to quantify soil physical quality. **Geoderma**, Amsterdam, v. 152, n. 3-4, p. 252–263, 2009.

ROCHA, A. T.; DUDA, G. P.; NASCIMENTO, C. W. A.; RIBEIROIL, M. R. Fracionamento do fósforo e avaliação de extratores do P-disponível em solos da Ilha de

Fernando de Noronha. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 9, n. 2, p. 178-184, 2005 .

RODRIGUES, E.M.; MARCONI, A. Mineralogia da fração areia de Latossolo Roxo do município de Piracicaba, SP. **Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz**; Piracicaba, v.47, n.1, p. 221-232, 1990.

SCHLOTTER, M.; DILLY, O.; MUNCH, J.C. Indicators for evaluating soil quality. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 98, n. 1-3, p. 255–262, 2003.

SCHWERTMANN, U.; CORNELL, R.M. **Iron oxides in laboratory**. New York: Cambridge, VCH, 1991. 137p.

SHUKLA, M. K.; LAL, R.; EBINGER, M. Determining soil quality indicators by factor analysis. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 87, n. , p. 194–204, 2006.

SILVA, A. R.; SOUZA JUNIOR, I. G.; COSTA, A. C. S. Suscetibilidade magnética do horizonte B de solos do Estado do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 34, n. 2, p. 329-338, 2010.

SILVA NETO, L. F.; INDA, A. V.; BAYER, C.; DICK, D. P.; TONIN, A. T. Óxidos de ferro em Latossolos tropicais e subtropicais brasileiros em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. 5, p. 1873-1881, 2008.

SILVA, A. P.; KAY, B. D. Estimating the least limiting water range of soils from properties and management. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 61, p. 877-883, 1997.

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 Manag.**, Amsterdam, v. 26, p. 425-431, 2010 .

STAMATI, F. E.; NIKOLAIDIS, N. P.; VENIERI, D.; PSILLAKIS, E.; KALOGERAKIS, N. Dissolved organic nitrogen as an indicator of livestock impacts on soil biochemical quality. **Applied Geochemistry**, Oxford, v. 26, p.S340–S343, 2011.

TORRENT, J.; BARRÓN, V.; LIU, Q. S. Magnetic enhancement is linked to and precedes hematite formation in aerobic soil. **Geophysical Research and Letters**, Washington, v. 33, p. L02401, 2006.

TORRENT, J.; LIU, Q.; BLOEMENDAL, J.; BARRÓN, V. Magnetic enhancement and iron oxides in the upper Luochuan loess–paleosol sequence, Chinese Loess Plateau. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v.71, p.1–9, 2007.

VALLADARES, G. S.; GOMES, E. G.; MELLO, J. C. C. B. S.; PEREIRA, M. G.; CUNHA DOS ANJOS, L. H.; EBELING, A. G.; BENITES, V. M. Análise dos componentes principais e métodos multicritério ordinais no estudo de organossolos e solos afins. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, MG, v. 32, n. , p. 285-296, 2008.

VIDAL-TORRADO, P.; LEPSCH, I.F.; CASTRO, S.S. Conceitos e aplicações da relações pedologia-geomorfologia em regiões tropicais úmidas. In: VIDAL-TORRADO, P.; ALLEONI, L. R.F.; COOPER, M.; SILVA, A.P.; CARDOSO, G.J. (Ed.). **Tópicos em ciências do solo**, Viçosa: UFV, 2005, v. 4, p. 145 – 192.

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

ZAGAL, E.; MUÑOZ, C.; QUIROZ, M.; CÓRDOVA, C. Sensitivity of early indicators for evaluating quality changes in soil organic matter. **Geoderma**, Amsterdam, v. 151, p.191–198, 2009.