

**NINY JOHANA VELANDIA VALERO**

**INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA (IEM) PARA ESTIMAR ATRIBUTOS DE UM  
ARGISSOLO VERMELHO DISTRÓFICO**

**MARINGÁ  
PARANA – BRASIL  
MARÇO- 2011**

**NINY JOHANA VELANDIA VALERO**

**INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA (IEM) PARA ESTIMAR ATRIBUTOS DE UM  
ARGISSOLO VERMELHO DISTRÓFICO**

Dissertação apresentada à  
Universidade Estadual de Maringá,  
como parte das exigências do  
Programa de Pós-graduação em  
Agronomia, na área de concentração  
em Solos e Nutrição de Plantas para  
obtenção do título de Mestre.

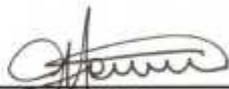
**MARINGÁ  
PARANA – BRASIL  
MARÇO- 2011**

NINY JOHANA VELANDIA VALERO

**INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA (IEM) PARA ESTIMAR ATRIBUTOS DE UM  
ARGISSOLO VERMELHO DISTRÓFICO**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual de Maringá, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Agronomia, área de concentração em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 31 de março de 2011.



Prof. Dr. Cassio Antonio Tormena



Prof. Dr. Marcelo Alessandro Araújo



Prof. Dr. Marcos Rafael Nanni  
(Orientador)

## **AGRADECIMENTOS**

A DEUS,

A meu filho Juan Manuel quem é minha inspiração.

A minha mãe Maria Nubia Valero, e mis Irmãs Maribel Velandia, Rocio Velandia e Yenny Velandia pelo apoio, incentivo e carinho, quem sempre acreditaram em meus sonhos, dando-me forças para a realização destes. A meu esposo Manuel Antonio Camargo pela paciência e apoio para conclusão deste trabalho.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Marcos Rafael Nanni, pela ajuda durante todo meu período acadêmico.

A equipe de trabalho em especial a Fran pela grande ajuda neste trabalho.

Ao Programa de Pós-graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Maringá, pela oportunidade de desenvolvimento deste trabalho.

À Fundação Araucária, pela concessão da bolsa de estudo.

Aos amigos Ivanor, Marlon, Lina, Roman, Pilar, Altair, Angela e Olga pela valorosa amizade.

Aos Professores do Programa de Pós-graduação em Agronomia, pelos preciosos ensinamentos, em especial ao Prof. Dr. Cássio Antonio Tormena pela colaboração e suporte durante a pesquisa.

Aos Funcionários Silvia, Reinaldo e Erika pela ajuda prestada

A todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

## **BIOGRAFIA**

NINY JOHANA VELANDIA VALERO, filha de Ezequiel Velandia Torres e Maria Nubia Valero Vergel, nasceu no município de Otanche Departamento de Boyacá, Colômbia no dia 1 de junho de 1981.

Em março do ano 2001, iniciou o curso Engenharia Florestal na Universidad del Tolima (Colômbia) e, em setembro do 2006, concluiu o curso.

No ano de 2009, iniciou o Programa de Pós-Graduação em Agronomia, em nível de Mestrado, área de concentração Solos e Nutrição de Plantas na Universidade Estadual de Maringá, realizando estudos na área de Solos. No mês de março de 2011 submeteu-se à banca para defesa da dissertação.

## ÍNDICE

<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>1</b>
<b>2 OBJETIVO.....</b>	<b>3</b>
2.1 Geral.....	3
2.2 Específico.....	3
2.3 Hipótese.....	3
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>4</b>
3.1 Condutividade elétrica aparente do solo (ECa).....	4
3.2 Fatores que influenciam a condutividade elétrica no solo.....	5
3.3 Utilização da técnica de indução eletromagnética (IEM) para investigação de solo.....	6
<b>4. MATERIAL E MÉTODOS.....</b>	<b>16</b>
4.1 Caracterização da área experimental.....	16
4.2 Materiais para levantamento e obtenção de dados em campo.....	16
4.3 Preparação da área de amostragem e estabelecimento dos pontos amostrais.....	17
4.4 Coleta das amostras indeformadas e deformadas .....	18
4.5 Levantamento Geofísico.....	19
4.6 Processamento dos dados do condutímetro eletromagnético EM-38...	20
<b>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>22</b>
5.1 Caracterização das propriedades físicas e químicas do solo.....	22
5.2 Uso do método de indução eletromagnética (IEM) para estimar os atributos do solo.....	26
5.3 Mapeamento da condutividade elétrica e as propriedades físicas do solo.....	35
<b>6. CONCLUSÃO.....</b>	<b>37</b>
<b>REFERÊNCIAS.....</b>	<b>38</b>

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1.	Densidade do solo para a avaliação do uso da técnica de indução eletromagnética (IEM) para as diferentes cargas aplicadas com o trator.....	22
Quadro 2.	Porosidade do solo para a avaliação do uso da técnica de indução eletromagnética (IEM) para as diferentes cargas aplicadas com o trator.....	23
Quadro 3.	Umidade base volume do solo para a avaliação do uso da técnica de indução eletromagnética (IEM) para as diferentes cargas aplicadas com o trator.....	24
Quadro 4.	Condutividade elétrica com o condutímetro EM-38 para as diferentes cargas aplicadas com o trator.....	24
Quadro 5.	Propriedades químicas do solo para a avaliação do uso da técnica de indução eletromagnética (IEM) para as diferentes cargas aplicadas com o trator, na profundidade de 0,0 a 0,2 m.....	25
Quadro 6.	Propriedades químicas do solo para a avaliação do uso da técnica de indução eletromagnética (IEM) para as diferentes cargas aplicadas com o trator, na profundidade de 0,2 a 0,4 m.....	26

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1.	Condutivímetro Eletromagnético EM-38 (Geonics Ltd.) .....	8
Figura 2.	Modos de aquisição do equipamento EM-38. a) DMV – Dipolo Magnético Vertical. b) DMH – Dipolo Magnético Horizontal .....	9
Figura 3.	Esquema do princípio físico da indução do método eletromagnético indutivo .....	10
Figura 4.	Sistema vetorial do método eletromagnético indutivo. (adaptado de MACLEAN et al., 1991) .....	11
Figura 5.	Função resposta impulsiva para condutividade aparente no dipolo Horizontal e Vertical sobre um perfil homogêneo (McNEILL, 1980) .....	13
Figura 6.	Função resposta impulsiva para susceptibilidade magnética (McNEILL, 1980) .....	13
Figura 7.	Função cumulativa para a condutividade aparente (McNEILL, 1980) ..	14
Figura 8.	Função cumulativa para a susceptibilidade magnética (McNEILL, 1980) .....	14
Figura 9.	Área de estudo na Fazenda Experimental da Universidade Estadual de Maringá .....	18
Figura 10.	Relação dos dados de condutividade elétrica obtida em campo com o aparelho (CE-EM-38 sem correção) e os dados corrigidos (CE-EM-38 corrigidos) .....	27
Figura 11.	Valores médios de condutividade elétrica medida em campo (EM-38), densidade do solo (Ds), umidade base volume ( $\Theta$ ) e porosidade total (Pt) para as diferentes cargas aplicadas (T1= testemunha, T2=1 passada, T3=2 passadas, T4=4 passadas e T5=8 passadas com o trator). Na profundidade de 0-0,10 m, com suas diferenças significativas ( $p < 0,05$ ) para cada variável .....	28
Figura 12.	Valores médios de condutividade elétrica medida em campo (EM-38), densidade do solo (Ds), umidade base volume ( $\Theta$ ) e porosidade total (Pt) para as diferentes cargas aplicadas (T1= testemunha, T2=1 passada, T3=2 passadas, T4=4 passadas e T5=8 passadas com o trator). Na profundidade de 0,10-0,20 m, com suas diferenças significativas ( $p < 0,05$ ) para cada variável .....	29
Figura 13.	Valores médios de condutividade elétrica medida em campo (EM-38), densidade do solo (Ds), umidade base volume ( $\Theta$ ) e porosidade total (Pt) para as diferentes cargas aplicadas (T1=0 passadas, T2=1 passada, T3=2 passadas, T4=4 passadas e T5=8 passadas com o trator). Na profundidade de 0,20-0,30 m, com suas diferenças significativas ( $p < 0,05$ ) para cada variável .....	29
Figura 14.	Valores médios de condutividade elétrica medida em campo (EM-38), densidade do solo (Ds), umidade base volume ( $\Theta$ ) e porosidade total	

	(Pt) para as diferentes cargas aplicadas (T1= testemunha, T2=1 passada, T3=2 passadas, T4=4 passadas e T5=8 passadas com o trator). Na profundidade de 0,30-0,40 m, com suas diferenças significativas ( $p < 0,05$ ) para cada variável .....	30
Figura 15.	Valores médios de condutividade elétrica medida em campo (EM-38), densidade do solo (Ds), umidade base volume ( $\Theta$ ) e porosidade total (Pt) para as diferentes cargas aplicadas (T1= testemunha, T2=1 passada, T3=2 passadas, T4=4 passadas e T5=8 passadas com o trator). Na profundidade de 0,40-0,50 m, com suas diferenças significativas ( $p < 0,05$ ) para cada variável .....	30
Figura 16.	Correlação da condutividade elétrica obtida com o EM-38 em campo e a condutividade elétrica obtida no laboratório .....	31
Figura 17.	Correlação entre a condutividade elétrica do EM-38 e as propriedades físicas do solo .....	33
Figura 18.	Correlação entre a condutividade elétrica do EM-38 e algumas propriedades químicas do solo .....	34
Figura 19.	Mapas da distribuição da Condutividade elétrica (EM-38), a Conteúdo volumétrico de água ( ) e a densidade do solo (Ds) .....	35

## **LISTA DE SÍMBOLOS, ABREVIATURAS E NOMENCLATURAS**

CE = Condutividade Elétrica

CEa = Condutividade elétrica parente

EM = Sinais Eletromagnéticos

EMBRAPA = Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária

IEM = Indução eletromagnética

GPS = Global Positioning System

DMH = Medição com o equipamento EM-38 no modo Horizontal

DMV = Medição com o equipamento EM-38 no modo Vertical

EM-38 = Condutímetro eletromagnético EM-38

## RESUMO

VELANDIA, NINY J. V Ms. Universidade Estadual de Maringá, março de 2011.  
**INDUÇÃO ELETROMAGNÉTICA (IEM) PARA ESTIMAR ATRIBUTOS DE UM ARGISSOLO VERMELHO DISTRÓFICO**  
Professor Orientador: Dr. Marcos Rafael Nanni

O objetivo deste trabalho foi estudar a utilização da técnica de indução eletromagnética (IEM) para determinar a densidade do solo. A área de estudo foi implantada na Fazenda Experimental de Iguatemi (FEI) da Universidade Estadual de Maringá (UEM), num Argissolo Vermelho Distrófico. A área de estudos foi preparada com uma subsolagem e uma gradagem (sistema convencional de preparo do solo) e submetida a carga por meio da passagem dos rodados de um trator. Os tratamentos consistiram em: testemunha (0 passada), 1 passada, 2 passadas, 4 passadas e 8 passadas de rodados do trator. Foram obtidas amostras de solos deformadas e indeformadas nas profundidades de 0-0,1 m; 0,1-0,2 m; 0,2-0,3 m; 0,3-0,4 m e 0,4-0,5 m para determinação do conteúdo volumétrico de água, porosidade e densidade. Nestes locais foi investigado com o (IEM) a condutividade elétrica do solo. Foi realizada a leitura no dipolo horizontal, já que no dipolo vertical os valores foram negativos de CE. Foi realizada correção para distribuição das diferenças encontradas na linha de base. Os dados IEM foram pouco alterados pela temperatura. Os solos apresentaram valores elevados de densidade entre 1,60 Mg m<sup>-3</sup> a 1,83 Mg m<sup>-3</sup>. A compactação teve efeito somente na superfície (0-0,1 m). Para a profundidade de 0-0,1 m a densidade e porosidade total do solo foi diferente entre os tratamentos (P<0,001); no conteúdo volumétrico de água no solo não foi constatada diferença (P>0,05). O estudo de correlação mostra que a CE medida com o EM-38 não apresenta correlações com as propriedades físicas e químicas do solo, limitando a pesquisa para a estimativa da densidade do solo na área com teores altos de areia.

**Palavras- chave:** EM-38, Condutividade elétrica, Densidade do solo

## ABSTRACT

VELANDIA, NINY J. V. Ms. Universidade Estadual de Maringá (Maringa State University), march, 2011. **ELECTROMAGNETIC INDUCTION (IEM) TO ESTIMATE ATTRIBUTES RED DYSTHROPIC ARGISOL**

Professor Orientador: Dr. Marcos Rafael Nanni

The aim of this study was to use the technique of electromagnetic induction (IEM) to determine the soil density. The study area was carried out on the Experimental Farm of Iguatemi (FEI), Universidade Estadual de Maringá (UEM). In a red dystrophic argisol the study area was prepared with a subsoiling and disking system (conventional tillage) and subjected to charge through the passing wheels of a tractor. The treatments were: control (0 passes), 1 passes, 2 passes, 4 passes and 8 passes of a wheeled tractor. Samples were harvested and undisturbed soils at depths of 0-0.1 m, 0.1-0.2 m, 0.2-0.3 m, 0.3-0.4 m and 0.4-0.5 m for determination volumetric water content, porosity and density. These sites were investigated with the (IEM) soil conductivity. Reading was performed in horizontal dipole, since the vertical dipole estimates were negative for EC. Correction was made for distribution of the differences found at baseline. The IEM data were little altered by instrumental drift due to temperature variation. The soils had elevated density of  $1.60 \text{ Mg m}^{-3}$  to  $1.83 \text{ Mg m}^{-3}$ . Compaction only had effect on the surface (0-0.10 m). For the depth of 0-0.1 m density and total porosity of soil was different between treatments ( $P < 0.001$ ); To the soil water content there was no difference ( $P > 0.05$ ). The correlation study shows that the EC measure with the EM-38 has no associations with the physical and chemical properties of soil, limiting him to search for the estimation of density in the area with high levels of sand.

**Key words:** EM-38, Electrical Conductivity, Soil Density

# 1 INTRODUÇÃO

A Geofísica é o estudo da Terra usando medidas físicas tomadas na sua superfície, também envolve o estudo daquelas partes profundas da terra que não podemos ver através de observações diretas, medindo suas propriedades físicas com instrumentos sofisticados e apropriados, geralmente colocados na superfície. Também inclui a interpretação dessas medidas para se obter informações úteis sobre a estrutura e sobre a composição daquelas zonas inacessíveis de grandes profundidades. Dentre os diversos métodos geofísicos usados para prospecção e pesquisa, um é o Eletromagnético, este método baseia-se na propagação de campos eletromagnéticos de baixas frequências que variam ao longo do tempo, de dentro para fora e de fora para dentro da Terra.

A indução eletromagnética é uma técnica não invasiva que utiliza procedimentos para deduzir o perfil de condutividade elétrica do solo, de acordo com a profundidade por meio de leituras múltiplas obtidas com o instrumento posicionando a alturas variadas sobre a superfície do solo (RHOADES & CORWIN, 1990). Operando no domínio das frequências ("Frequency Domain Electromagnetics – FDEM"), os condutivímetros eletromagnéticos difundiram-se rapidamente no meio técnico e acadêmico dado a sua definição (precisão + exatidão), versatilidade (simplicidade + comodidade de uso) e alto rendimento (baixa relação custo/benefício).

Este método eletromagnético envolve a propagação de campos eletromagnéticos de baixa frequência e baseia-se nos fenômenos físicos de eletricidade e magnetismo. Por tratar-se de uma técnica indutiva, operada desde a superfície do terreno e, portanto, não destrutiva, preserva a integridade estrutural da zona a ser prospectada, proporcionando segurança durante sua utilização, além de permitir uma cobertura praticamente contínua de toda a área estudada.

A medição da condutividade do solo por indução eletromagnética é um método de amostragem rápida para a coleta de informações sobre o solo e distribuição espacial de algumas de suas propriedades.

Na agricultura, a medida da condutividade do solo é utilizada para mapear variações de propriedades importantes, como conteúdo de sais e a umidade do solo (GEONICS, 1999). Os dados de condutividade podem ser plotados em perfis, em função da distância, e um conjunto de perfis permite a confecção de mapas de condutividade aparente, possibilitando a localização e mapeamento de determinada característica ou propriedade.

A medição da condutividade elétrica aparente do solo (ECa) é uma tecnologia que tornou-se uma ferramenta valiosa para identificar as propriedades físico-químicas do solo que influenciam os padrões de produtividade da cultura e para o estabelecimento da variabilidade espacial dessas propriedades do solo (CORWIN et al. 2003).

A classificação do solo usando a condutividade elétrica aparente do mesmo permite uma efetiva base para delinear os atributos físicos, químicos e biológicos que são inter-relacionados e estão expressos como condições para produtividade da colheita e potencial ecológico (PESSOA, 2006). Estas informações são essenciais para o monitoramento temporal da condição do solo, e para uma implementação bem sucedida da gestão em local específico.

## **2 OBJETIVO**

### **2.1 Geral**

O objetivo geral deste trabalho foi avaliar o uso da técnica de indução eletromagnética (IEM) para a estimativa da densidade de um Argissolo Vermelho Distrófico em diferentes cargas.

### **2.2 Específico**

Caracterizar a distribuição espacial da condutividade elétrica do solo, de modo a identificar as associações desta com os atributos físicos e químicos do solo;

Avaliar a densidade do solo em diferentes condições de carga;

### **2.3 Hipótese**

As ferramentas da geofísica (IEM) são capazes de obter resultados positivos em áreas com diferentes densidades do solo e sistema de preparo sendo possível, mapeá-las para fins de manejo. Esperam-se avanços nas pesquisas ligadas à investigação de solo em subsuperfície, de forma não destrutiva, menos onerosa e rápida. Desta forma, é formulada há possibilidade de estimar a densidade do solo, por meio de uso da técnica de indução eletromagnética (IEM).

Com o uso do equipamento eletrocondutivímetro EM-38, espera-se que a condutividade elétrica apresente boa correlação com a umidade do solo e á vez com a porosidade total do solo, sendo estes os parâmetros para estimar a densidade do solo.

### 3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

#### 3.1 Condutividade elétrica aparente do solo (ECa)

A aplicação no campo a escala da condutividade elétrica aparente do solo (ECa) para a agricultura tem sua origem na medição da salinidade do solo, que é um problema de zonas áridas associado com terras agrícolas irrigadas e com áreas com lençol freático superficial. A Investigação nesta área foi realizada principalmente por Rhoades e colegas em 1970 no USDA-ARS Laboratório de Salinidade em Riverside, Califórnia (CORWIN & LESCH, 2005). Segundo estes autores McNeill et. al., (1970) foram os primeiros a estabelecer a relação entre a condutividade elétrica e concentrações molares dos íons na solução do solo.

Tecnologias como técnicas de medição geo-referenciadas da ECa trouxe para agricultura de precisão a partir de um conceito de 1980 como uma ferramenta promissora para alcançar uma agricultura sustentável. (CORWIN & LESCH, 2005). Estudos com o uso da condutividade elétrica do solo têm apontado seu potencial para a mensuração de conteúdo de argila (WILLIAMS & HOEY, 1987), conteúdo de água (KACHANOSKI et al., 1988), capacidade de troca catiônica e teores de cálcio e magnésio trocáveis (McBRIDE et al., 1990), profundidade de camada de impedimento (DOOLITTLE et al., 1994 e CLARK et al., 2000), teor de matéria orgânica (JAYNES, 1996), teor de sais da solução do solo (CAMINHA JUNIOR et al., 1998), dentre outros.

Conseqüentemente, tornou-se comum incluir o mapeamento da ECa na agricultura de precisão, especialmente como base para identificar, no campo a variabilidade do solo e delimitação das zonas de manejo (KITCHEN et al., 2005 e HEDLEY et al., 2004).

Inquestionavelmente, a ECa é uma ferramenta agrícola que fornece informações espaciais para aplicativos de avaliação da qualidade do solo e agricultura de precisão, incluindo a delimitação das unidades de manejo específicas do local. (CORWIN & LESCH, 2005)

Por estas razões, a medição da ECa está entre as mais freqüentes ferramentas utilizadas na pesquisa de agricultura de precisão para a

caracterização espaço-temporal das propriedades edáficas e antropogénicas que influenciam o rendimento das culturas (CORWIN & LESCH, 2005)

### **3.2 Fatores que influenciam a condutividade elétrica no solo**

A maioria dos minerais do solo e rocha são isoladores elétricos de resistividade muito alta. No entanto, em raras ocasiões minerais condutores, como a magnetita, hematita, carbono, grafite, pirita e pirrotita ocorrem em quantidades suficientes aumentando assim a sua condutividade global da rocha (McNEILL, 1980)

Os minerais nas frações areia e silte do solo são eletricamente neutros e geralmente são excelentes como isolantes. A argila completamente seca também é um isolante mais com conteúdos de umidade se torna condutora da eletricidade (McNEILL, 1980).

Segundo McNeill (1980), a condutividade elétrica realiza-se através de poros cheios de água e por tanto é determinadas para a rocha e o solo pela porosidade, teor de água, concentração de eletrólitos dissolvidos na água, temperatura e a quantidade e composição dos colóides.

Três vias de fluxo de corrente contribuem para condutividade elétrica do solo: (i) Condutância através de camadas alternantes de partículas do solo e entre os limites de suas soluções, (ii) condutância através de soluções do solo contínuas, e (iii) condutância através ou entre superfícies de partículas do solo em contato direto entre elas (RHOADES et al., 1989).

Sudduth et al., (2001) e Robinson et al., (2004) observaram que quando ocorre uma variação de temperatura, a condutividade aparente do meio, medida pelo equipamento, também varia. A temperatura influencia a E<sub>Ca</sub> assim, tendendo como referencia uma temperatura média de 25 °C a condutividade elétrica aumenta a uma taxa de aproximadamente 1,9% por cada 1 °C de aumento na temperatura. Habitualmente (U.S. Salinity Laboratory Staff, 1954). A dependência da temperatura da condutividade elétrica é quase em sua totalidade devido à dependência da temperatura da viscosidade do líquido, que, por sua vez, afeta diretamente a mobilidade iônica (McNEILL, 1980).

Em geral a condutividade elétrica aparente do solo é influenciada por uma combinação de propriedades físico-químicas, incluindo sais solúveis, teor de argila e mineralogia, conteúdo de água no solo, densidade do solo, matéria orgânica, temperatura do solo.

### **3.3 Utilização da técnica de indução eletromagnética (IEM) para investigação de solo**

Medidas de condutividade elétrica foram utilizadas pela primeira vez em meados dos anos 1900 em Geofísica. A indução eletromagnética é uma técnica não invasiva que pode ser empregada para avaliar a condutividade elétrica aparente do solo CEa, segundo Rhoades & Corwin (1990). Os métodos para medir a condutividade elétrica foram testados por (FRITZ et al., 1998); (SUDDUTH et al., 1998); (BUCHLEITER & FARAHANI, 2002). Medindo-se a condutividade elétrica em contato com o solo ao fazer passar uma corrente elétrica em eletrodos isolados, ou indiretamente com o uso de corrente induzida por um campo magnético, mostraram resultados parecidos (HARTSOCK et al., 2000).

A indução eletromagnética tem sido utilizada pela Agronomia para estimar a salinidade de solos (RHOADES & CORWIN, 1981); (WILLIAMS & BAKER, 1982); (WOLLENHAUPT et al., 1986); (WILLIAMS & HOEY, 1987); (CORWIN & RHOADES, 1990); o conteúdo de umidade (KACHANOSKI et al., 1988); para mapear o efeito do sódio nos solos (AMMONS et al., 1989); (HENDRICKX et al., 1992); (CANNON et al., 1994); (NETTLETON et al., 1994) e diferenças regionais na mineralogia destes (DOOLITTLE et al., 1995).

A condutividade tem sido utilizada também para determinar a profundidade de sistemas argilosos endurecidos (DOOLITTLE et al., 1994) e para indicar descontinuidade textural dentro dos perfis (WILLIAMS et al., 1990); (WOLLENHAUPT et al., 1986). Esta técnica também foi usada para mapear estratos geológicos (ZALASIEWICZ et al., 1965 e BRUS et al., 1992), recarga de aquíferos (COOK et al., 1992 e MCNEILL 1991), contaminação de aquíferos (GREENHOUSE & SLAINE, 1983) e mapeamento de redes de interferência (SANTOS, 2010) entre outros.

A condutividade elétrica do solo (CE) é uma medição baseada em sensores que podem fornecer um indicador indireto das propriedades do solo. Fatores que influenciam CE incluem a salinidade do solo, teor de argila e capacidade de troca catiônica (CTC), mineralogia, tamanho dos poros do solo e distribuição, conteúdo de umidade do solo e temperatura (McNEILL, 1992; RHOADES ET AL, 1999).

Williams & Baker (1982) observaram que, em áreas de solos afetados por sais, o 65-70% da variação nas medições de CE pode ser explicada pela concentração de sais solúveis. No entanto, em solos não salinos, variação da condutividade é primariamente uma função do tamanho de partículas do solo, teor de água, e CTC. Kachanoski et al., (1988) e Rhoades et al., (1989) apresentaram um modelo que forneceram uma base teórica da relação entre CE e as propriedades físicas do solo. No modelo, a CE foi descrito como uma função do teor de água no solo, a condutividade elétrica da água no solo, densidade do solo e da condutividade elétrica da fase sólida do solo.

O estudo do teor de água com métodos eletromagnéticos mostraram que as áreas mais úmidas são coincidentes com áreas mais condutivas. Este fato é importante ao agricultor, pois a Geofísica permite medir a condutividade elétrica e a umidade do solo *in situ* e de maneira não destrutiva (OLIVEIRA, 2004).

Para complementar o estudo geofísico, é importante tomar uma amostra de solo ou de medição da compactação em alguns pontos. Características físicas do solo e as medições de umidade irão auxiliar na interpretação do que está causando a variação da CE do solos. A amostragem deve ser feita ao mesmo tempo como o estudo geofísico (GRISSO et al., 2009).

Mapas das medicoes de CE serão uma base para relacionar as propriedades do solo de interesse na agricultura de precisão. Por exemplo, Sheets & Hendrickx (1995) mediram a CE durante um período de 16 meses e encontraram uma relação linear entre condutividade elétrica e teor de água no perfil do solo. Williams e Hoey (1987) usaram CE para estimar variações dentro de campo do teor de argila do solo. McBride et al. (1990) observaram que a CE relaciona-se com a CTC e teores de Ca e Mg.

Mapas mais precisos de propriedade do solo são necessários para implementar com sucesso a agricultura de precisão. Amostragem inadequada,

alto custo da amostragem convencional e análise do solo podem limitar a definição de unidades de gerenciamento. No entanto, o uso de medidas da CE do solo representa uma alternativa para amostragem de solo intensivo e pode melhorar tanto a resolução (maior densidade de amostragem) e reduzir o custo dos mapas de solos. (GRISSE et al., 2009).

Sensores portáteis para medição da CE foram utilizados pela primeira vez na agricultura para avaliar variações na salinidade do solo (RHOADES, 1993). Dois modelos básicos têm sido utilizados - um sensor dependente do contacto com o solo e um sensor de indução eletromagnética não-invasiva (IEM).

O equipamento utilizado neste trabalho foi o EM-38 (Figura 1), fabricado pela empresa canadense Geonics Limited (GEONICS, 1998). O equipamento é constituído de duas bobinas espaçadas de 1 metro, opera em uma frequência de 14,6 kHz, pode ser operado no modo de medida Dipolo Magnético Vertical - DMV (bobinas na horizontal), proporcionando um alcance de 1,5 metros e no modo de medida Dipolo Magnético Horizontal – DMH (bobinas na vertical) e assim gera uma profundidade de investigação de aproximadamente de 0,75 metros (Figura 2).



Figura 1. Equipamento Condutivimetro eletromagnético EM-38 (Geonics Ltd.).

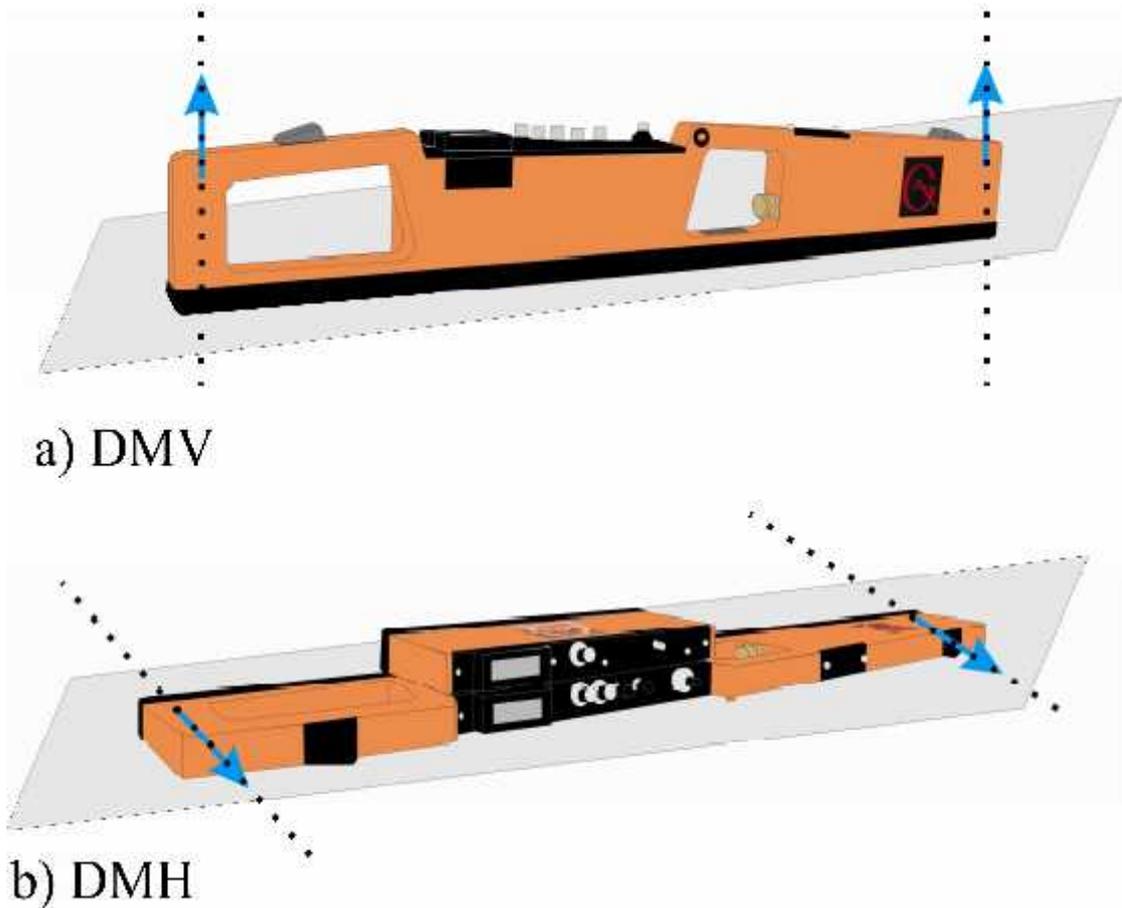


Figura 2. Modos de aquisição do equipamento EM-38. a) DMV – Dipolo Magnético Vertical. b) DMH – Dipolo Magnético Horizontal.

O EM-38 é um sensor leve e pode ser facilmente manipulado por um único indivíduo, tornando-se útil para pequenas áreas. O sensor trabalha sobre o princípio da indução eletromagnética (IEM). Um sensor no dispositivo mede o campo eletromagnético que induz a corrente. A força deste campo eletromagnético secundário é proporcional ao CE do solo (GRISSE et al., 2009). Com este equipamento é adquirida a condutividade elétrica e a susceptibilidade magnética do meio por isso, umas de suas principais aplicações é na agricultura de precisão fazendo o mapeamento da condutividade do solo (KITCHEN et al., 1996; SUDDUTH et al., 2001; SUDDUTH et al., 2003).

O princípio do método eletromagnético indutivo é medir diretamente a condutividade elétrica e a susceptibilidade magnética dos materiais em subsuperfície através dos campos elétricos e magnéticos, ao passar corrente elétrica, através de uma bobina, gera-se um campo magnético nas adjacências primário ( $\vec{H}_p$ ) ou indutor nas proximidades, causando um fluxo de correntes secundárias em algum material condutor. Ao fluir esta corrente é provocado um campo magnético secundário ( $\vec{H}_s$ ), que leva as informações do condutor (Figura 3). O campo resultante, captado pela bobina receptora, é diferente do campo primário em intensidade, fase e direção e isso permite detectar materiais condutores. Esse processo é conhecido como indução magnética. A teoria EM requer que a componente do campo eletromagnético secundário esteja defasada de não menos que  $90^\circ$  em relação ao campo primário e se o campo secundário tiver origem de um ótimo condutor a defasagem será de aproximadamente  $180^\circ$ .

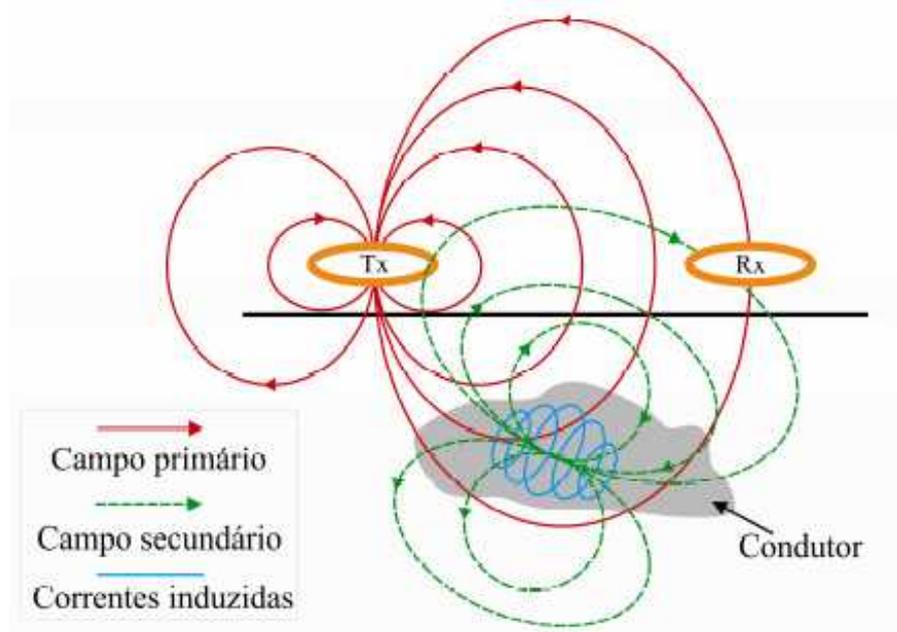


Figura 3. Esquema do princípio físico da indução do método eletromagnético indutivo.

Os vetores mencionados estão representados na Figura 4 quando a bobina transmissora e a receptora estão do mesmo lado do condutor, os vetores  $\vec{H}_p$  e  $\vec{H}_s$  serão somados, e o campo resultante é maior do que o medido na ausência de um condutor. Entretanto, quando eles estão em lados opostos, o vetor  $\vec{H}_s$  se opõe a  $\vec{H}_p$ , e o resultado é uma anomalia “negativa” (MACLEAN et al., 1991).

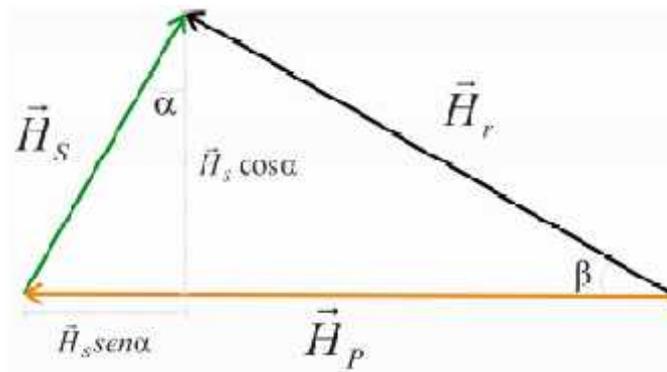


Figura 4. Sistema vetorial do método eletromagnético indutivo. (adaptado de MACLEAN et al., 1991).

A magnitude de  $\vec{H}_s$  pode ser descrita como uma porcentagem de  $\vec{H}_p$  proveniente da bobina transmissora. O ângulo de fase é obtido entre  $\vec{H}_p$  e  $\vec{H}_r$  (vetor resultante de  $\vec{H}_p$  com  $\vec{H}_s$ ). A parte real, ou em fase de  $\vec{H}_s$ , é representada pela projeção dele no eixo horizontal e que está 180° fora de fase com  $\vec{H}_p$ . Já a projeção de  $\vec{H}_s$  no eixo Y, representa um vetor componente que está 90° fora de fase com  $\vec{H}_p$ . Essa é a componente quadratura (imaginária) ou fora de fase.

O *skin depth* é a profundidade máxima até onde o equipamento consegue fazer leituras. Para o método eletromagnético a atenuação da onda pode ser quantificada através do *skin depth*, que depende da frequência da onda e da condutividade elétrica do terreno. *Skin depth* é a profundidade em

que a amplitude do sinal é reduzida em  $\frac{1}{e}$  (37%) do seu valor na superfície e representa a profundidade máxima de penetração de uma onda eletromagnética (TELFORD *et al.*, 1990). O *skin depth* é dado por:

$$\delta = \frac{503.8}{\sqrt{\sigma f}} \quad (1)$$

com “*f*” sendo a frequência da onda eletromagnética (Hz), “ $\sigma$ ” a condutividade elétrica aparente e “ $\delta$ ” é o *skin depth* medido em metros.

O estudo da sensibilidade do método eletromagnético indutivo é importante devido à confirmação se os materiais adjacentes são mais ou menos condutivos entre si. Para isso analisamos a contribuição da camada estudada e das possíveis camadas subjacentes.

Considere uma camada horizontal fina localizada a profundidade “*h*” e o espaçamento entre as bobinas do equipamento “*s*”. A profundidade normalizada “*z*” é dada por  $z = \frac{h}{s}$  e a partir daí temos duas contribuições para as respostas desta camada: a contribuição relativa desta camada no campo magnético secundário ( $H_s$ ) é indicada pela *função resposta impulsiva* - *S* (Figuras 5 e 6) e a contribuição que quantifica o material abaixo da profundidade *z* é chamada de *função cumulativa* - *R* (Figuras 7 e 8) (McNEILL, 1980 e REYNOLDS, 1997).

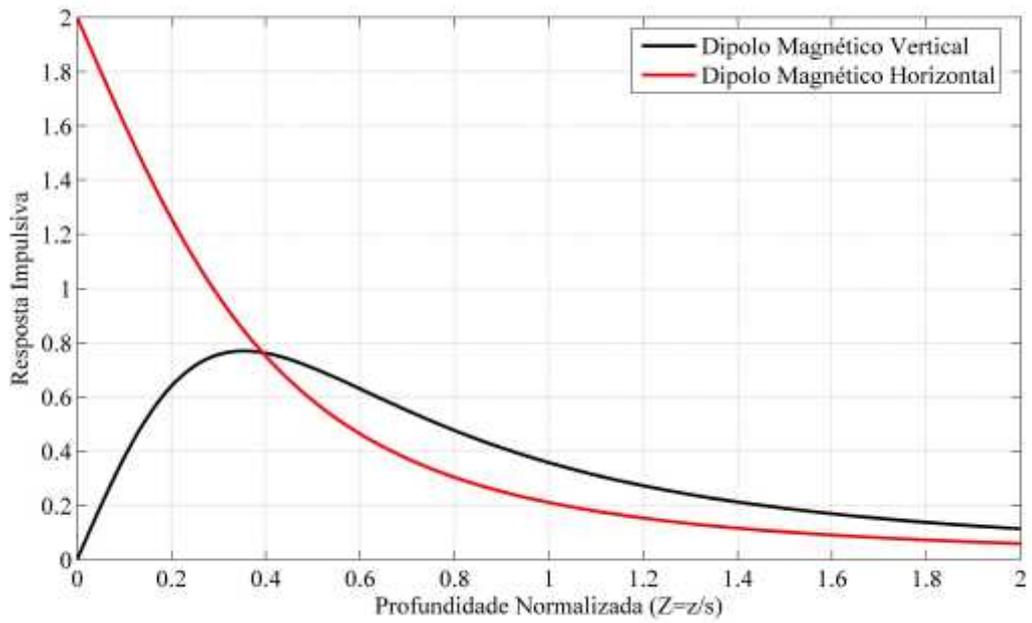


Figura 5. Função resposta impulsiva para condutividade aparente no dipolo Horizontal e Vertical sobre um perfil homogêneo (McNEILL, 1980).

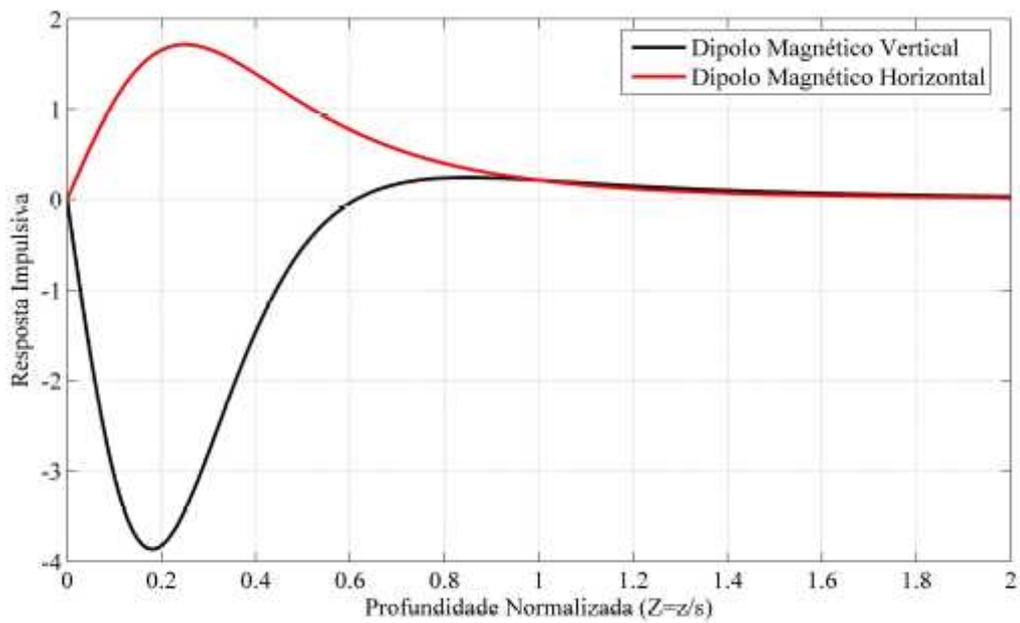


Figura 6. Função resposta impulsiva para susceptibilidade magnética (McNEILL, 1980).

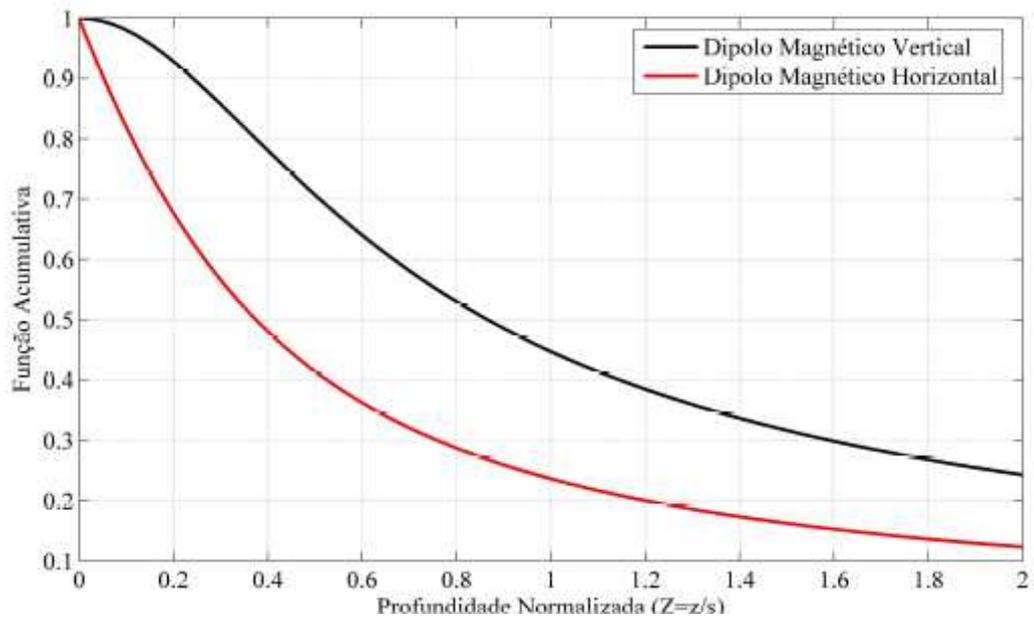


Figura 7. Função cumulativa para a condutividade aparente (McNEILL, 1980).

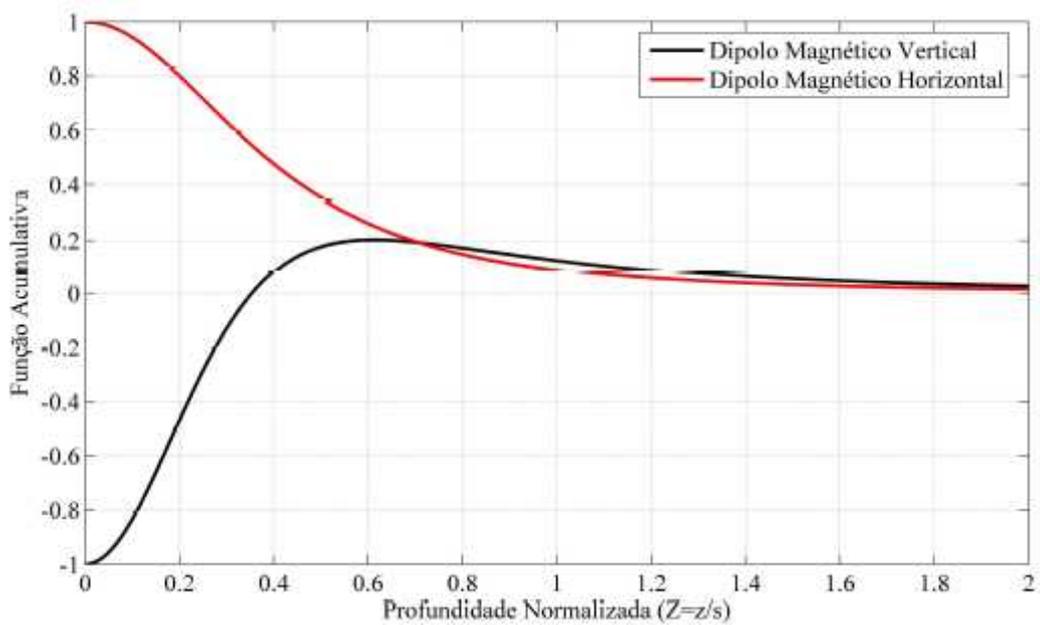


Figura 8. Função cumulativa para a susceptibilidade magnética (McNEILL, 1980).

Segundo McNeill (1980) as relações que constituem a sensibilidade do método para a resposta impulsiva no modo DMV ( $S_{DMV}$ ) e DMH ( $S_{DMH}$ ) para a condutividade aparente e susceptibilidade magnética são apresentadas em função da profundidade normalizada.

A resposta impulsiva mostra que a contribuição, no caso do dipolo vertical, é pequena próxima à superfície. Assim, esta configuração de bobinas é relativamente indiferente às estruturas rasas. Por outro lado, a resposta relativa para o dipolo horizontal diminui com o aumento da profundidade, sendo máxima próxima à superfície. Já a função cumulativa é uma função peso que controla a contribuição das camadas para a condutividade medida na superfície.

Segundo Santos (2009), a diferença de sensibilidade permite um rápido método para determinar se o material próximo da superfície é mais ou menos condutivo do que o material mais profundo. Para tanto, lê-se a condutividade do solo no modo DMV e DMH, se a segunda leitura for maior que a primeira o material mais próximo da superfície é mais condutivo e vice-versa. Se ambas as leituras são essencialmente as mesmas, a condutividade do solo é uniforme até a profundidade de aproximadamente 1,5 metros.

## **4 MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.1 Caracterização da área experimental**

A área de estudo está localizada na Fazenda Experimental de Iguatemi (FEI) da Universidade Estadual de Maringá (UEM), no município de Maringá, região noroeste do estado do Paraná (Latitude 23° 21' S e Longitude 52° 03' W). O solo de estudo é classificado como Argissolo Vermelho Distrófico textura areno/média (EMBRAPA, 2006). O material de origem deste solo provém de resíduos intemperizados do Arenito Caiuá da Série São Bento no período Cretáceo, com retrabalhamento de materiais meteorizados do basalto da mesma formação. Nesta região, o tipo climático dominante é o Cfa na classificação de Köppen. O relevo é praticamente plano ou suave ondulado, com altitudes variando de 350-550 m (EMBRAPA, 1984).

A área foi cultivada por cerca de 30 anos com o sistema convencional de preparo do solo (aração e gradagem) alternado com preparo mínimo do solo por meio de escarificação. Diferentes culturas foram cultivadas na área; sendo as mais comuns o milho, aveia, sorgo, soja e mandioca. No último ano foi plantada aveia forrageira no inverno e no verão milho para ensilagem.

### **4.2 Materiais para levantamento e obtenção de dados em campo**

Para a coleta de dados em campo, foram utilizados os seguintes instrumentos e equipamentos:

- Condutímetro Eletromagnético modelo EM-38 da Geonics Limited;
- Computador portátil;
- Cilindro volumétrico;
- Amostrador de solo;
- Trado tipo holandês;
- Macaco hidráulico;
- Cadernetas e material necessário para anotações, registros de amostras e sua identificação;
- Sacos plásticos para coleta de amostras;

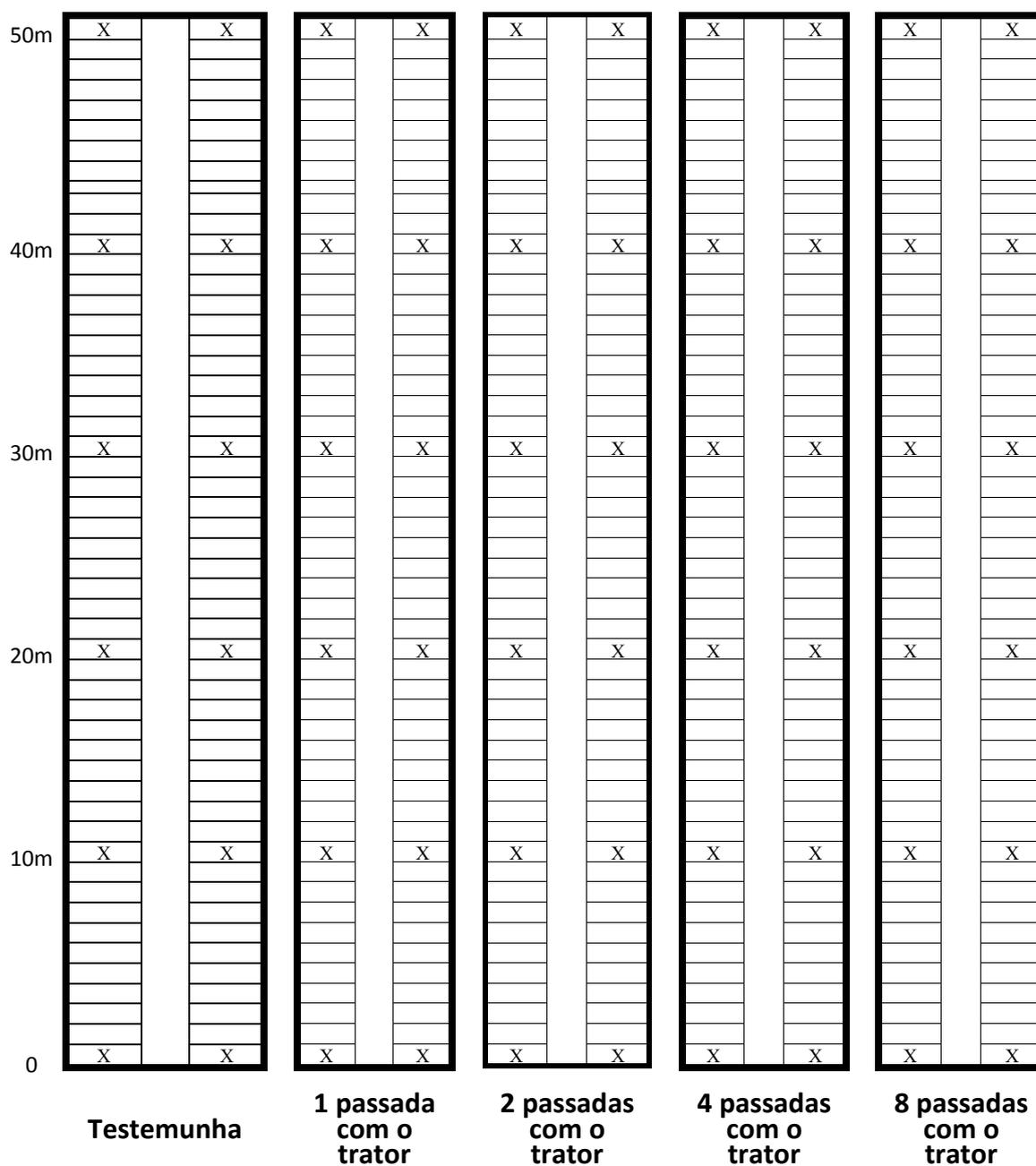
- Câmera fotográfica digital;
- Sistema de Posicionamento Global (GPS);

### **Especificações do condutímetro eletromagnético EM-38:**

- Unidades de medida: condutividade aparente do terreno em miliSiemens por metro ( $\text{mS m}^{-1}$ );
- Escala:  $1,000 \text{ mS m}^{-1}$  ( 4 dígitos);
- Mensuração de precisão:  $\pm 0,1\%$  da deflexão da escala completa;
- Fonte primária de campo: transmissor autônomo;
- Sensor: receptor dipolo autônomo;
- Espaçamento entre as bobinas: 1 metro;
- Frequência de operação: 14,6 KHz;
- Temperatura:  $-30^{\circ}\text{C}$  ate  $+50^{\circ}\text{C}$ .

### **4.3 Preparação da área de amostragem e estabelecimento dos pontos amostrais**

A área de amostragem foi preparada em setembro de 2010. Para o preparo da área foi utilizado o sistema convencional de preparo do solo, com grade pesada de 14 discos e grade niveladora de 36 discos (aração e gradagem). Na sequência transitu-se com um trator 4x4 (JOHN DEERE 7515) com um peso de 8000 kilogramos em uma área de  $1000 \text{ m}^2$  com a finalidade de realizar os cinco tratamentos (testemunha, 1 passada, 2 passadas, 4 passadas e 8 passadas). Em cada tratamento foi marcada uma grade de 10 m de espaçamento para um total de 60 pontos em toda a área. Em cada ponto foram coletadas 5 amostras nas profundidades de 0-0,1 m; 0,1-0,2 m; 0,2-0,3 m; 0,3-0,4 m e 0,4-0,5 m para um total de 300 amostras (Figura 9).



x = Pontos amostrais

Figura 9. Área de estudo na Fazenda Experimental da Universidade Estadual de Maringá.

#### 4.4 Coleta das amostras indeformadas e deformadas

Foram coletadas amostras de solo indeformadas nas profundidades de 0-0,1 m; 0,1-0,2 m; 0,2-0,3 m; 0,3-0,4 m e 0,4-0,5 m com amostrador de solo e

cilindros volumétricos de 5 cm de altura e 5 cm de diâmetro, auxiliados por um macaco hidráulico. Após a coleta, as amostras de solo foram envolvidas em folhas de papel alumínio e acondicionadas em caixas plásticas, sendo, posteriormente, transportadas para o Laboratório de Física de Solo da UEM. Após a secagem das amostras em estufa ( $\pm 105^{\circ}\text{C}$  por 24h) a densidade do solo foi determinada de acordo com Grossman & Reinsch (2002).

Nestes mesmos locais foram coletadas amostras deformadas com trado tipo holandês e transportadas ao Laboratório de Química de Solo da UEM para análises químicas (Macro nutrientes) e condutividade elétrica. As análises químicas foram feitas assim: Para Ca, Mg, Al - *extraídos com KCl 1mol L<sup>-1</sup>*; P, K - *extraídos com Mehlich 1*; H+Al- *método SMP*; C - *método Walkley & Black* e SB – *Soma de bases*. A condutividade elétrica em laboratório foi realizada por o método de extratos 1:2 de Sonneveld et al., (1990).

#### **4.5 Levantamento Geofísico**

Previamente a cada levantamento o equipamento EM-38 ficou ligado por 15 minutos para estabilizar a temperatura ambiente. Após foi realizada a calibração do equipamento. Esta calibração deve ser realizada com o equipamento a pelo menos 1,5 m de altura da superfície para evitar que campos magnéticos provenientes do solo influenciem no processo de calibração (GEONICS, 1999).

Os dados foram obtidos com o Condutímetro Eletromagnético EM-38 em cada ponto assinalados na Figura 9 de forma indireta pela indução de ondas eletromagnéticas. O aparelho foi apoiado na superfície do solo, na forma horizontal e vertical, A resposta relativa para o dipolo horizontal diminui com o aumento da profundidade; sendo máxima próxima à superfície (McNeill, 1980). Durante a obtenção dos dados com o EM-38 foi estabelecida uma linha base (fora da área estudada deve ser livre de interferências magnéticas) para posteriormente corrigir *drift* do instrumento. Este procedimento é uma leitura realizada na linha base no início e no final do levantamento de campo (SUDDUTH et al., 2001 & ROBINSON et al., 2004).

Ao mesmo tempo da obtenção dos dados geofísicos foram coletadas também amostras de solo com trado tipo holandês para determinar a umidade. As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e armazenadas em caixas de poliestireno para impedir perda de umidade; sendo posteriormente transportada ao Laboratório de Solos da UEM para análise. No laboratório, as amostras foram pesadas, secas em estufa por 24 h a 105°C (EMBRAPA, 1997) e pesadas novamente para estimar a massa de água.

Após a determinação do resultado laboratorial, os dados foram convertidos em umidade gravimétrica pela seguinte equação:

$$u = \frac{m_a}{m_s} \quad \left( \frac{kg}{kg} \right) \quad (2)$$

em que  $m_a$  é a massa de água presente em uma amostra de solo cuja massa de sólidos ou de solo seco é expressada por  $m_s$ . Embora a medida de  $u$  seja relativamente simples, nos processos de troca no sistema solo - água é freqüente trabalhar com volume. Desta forma, foi determinado o teor de água em base volume por meio da seguinte equação:

$$\theta = u \quad \left( \frac{d_{ss}}{d_{ag}} \right) \quad \left( \frac{m^3}{m^3} \right) \quad (3)$$

em que  $u$  é a umidade gravimétrica determinada pela expressão 2,  $d_{ss}$  é a densidade do solo seco determinada para cada ponto de amostragem em diferentes profundidades e  $d_{ag}$  é a densidade da água (1.000 kg m<sup>-3</sup>).

#### 4. 6 Processamento dos dados do condutímetro eletromagnético EM-38

Para retirar o efeito causado pela variação da temperatura ambiente é necessário corrigir os dados em relação à linha base. Os dados da linha base antes e depois da leitura é a diferença da variação nos valores. Estas diferenças nos dados são distribuídas de acordo com a equação 4.

$$\sigma_c = \sigma_{EM38} - i \cdot f_c \quad (4)$$

onde:

$\sigma_c$  = condutividade corrigida;

$\sigma_{EM38}$  = condutividade observada no equipamento EM-38;

$i$  = Ponto da medida ( $i_0, i_1, i_2, i_3, \dots, i_x$ );

$f_c$  = fator de correção.

A correção da linha de base limita-se a determinar a diferença de condutividade na primeira e última leitura, i.e., base inicial e base final.

$$f_c = \frac{Lb_2 - Lb_1}{Ti} \quad (5)$$

$Lb_2$  = valor de condutividade na linha base final;

$Lb_1$  = valor de condutividade na linha base inicial;

$Ti$  = número total de medidas

Normalmente essa correção pode ser realizada linearmente por métodos estatísticos. Ainda, essa correção não precisa ser realizada com resultados satisfatórios (ROBINSON et al., 2004).

### **Análises estatísticas**

Os resultados foram analisados estatisticamente em um delineamento Inteiramente casualizado (DIC). Foi realizado ANOVA pelo programa estatístico SAS. Posteriormente foi feito teste média (teste T), a um nível de 5%.

Para estudar a existência de possíveis associações entre a condutividade elétrica medida em campo com o aparelho EM-38 e as propriedades físicas e químicas do solo, foram realizadas correlações de acordo com PROC CORR (SAS, 1999).

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 5.1 Caracterização das propriedades físicas e químicas do solo

As análises granulométricas indicaram teores de areia grossa = 580 g kg<sup>-1</sup>, de areia fina = 180 g kg<sup>-1</sup>; de silte = 10 g kg<sup>-1</sup> e de argila = 230 g kg<sup>-1</sup>; sendo a classe textural considerada como média (EMBRAPA, 2006).

Os valores médios para a densidade do solo para o tratamento T1 foi de 1,60 Mg m<sup>-3</sup> e no tratamento T5 foi de 1,83 Mg m<sup>-3</sup> mostrando valores muito altos comparados aos valores médios de densidade de solos arenosos (1,2 a 1,4 Mg m<sup>-3</sup>) estudados por Camargo et al., (2006). Estes resultados estão próximos dos observados por Araújo (2004) em áreas semelhantes com valores entre 1,35 a 1,85 Mg m<sup>3</sup> (Quadro 1).

Quadro 1. Densidade do solo para a avaliação do uso da técnica de indução eletromagnética (IEM) para as diferentes cargas aplicadas com o trator

Profundidade (m)	Densidade do solo (Mg m <sup>-3</sup> )					CV	P>F
	T1	T2	T3	T4	T5		
0,0-0,1	1,63 c	1,62 c	1,69 b	1,72 b	1,84 a	3,32	0,0001
0,1-0,2	1,82 a	1,87 a	1,85 a	1,82 a	1,83 a	2,32	0,2500
0,2-0,3	1,74 c	1,81 b	1,89 a	1,87 ba	1,81 b	2,86	0,0005
0,3-0,4	1,67 b	1,74 ba	1,79 a	1,82 a	1,77 a	4,18	0,0151
0,4-0,5	1,68 c	1,67c	1,76 ba	1,82 a	1,74 bc	3,88	0,0024

T1- Testemunha; T2- Uma passada com o trator; T3- Dois passada com o trator; T4- Quatro passada com o trator; T5- Oito passada com o trator.

\*Valores seguidos pela mesma letra não diferem significativamente, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Como mostra o Quadro 1, as profundidades (0-0,10 m; 0,2-0,3 m; a densidade do solo foi diferente entre os tratamentos (P<0,05), Foi bem evidente a diferença de densidade do solo quando o trator passo 8 vezes na superfície (profundidade 0-0,1 m). O uso intensivo de arados e grades,

associado a outras práticas de cultivo, levando à pulverização da camada arável e à compactação da camada superficial (Freitas, 1992).

A porosidade total teve diferença significativa ( $P < 0,05$ ) para todas as profundidades, exceto a profundidade de 0,1-0,2 m. Tormena et al. (1998) e Cruz et al. (2003) salientaram que o tráfico de máquinas reduz a porosidade total do solo. A testemunha na profundidade de 0-0,1 m mostra-se diferentes aos demais tratamentos (Quadro 2). De acordo com Grego & Vieira (2005), há uma homogeneização do processo de formação de poros durante o revolvimento do solo pela aração e gradagem, o que pode justificar os resultados obtidos.

Quadro 2. Porosidade do solo para a avaliação do uso da técnica de indução eletromagnética (IEM) para as diferentes cargas aplicadas com o trator

Profundidade (m)	Porosidade total ( $m^3 m^{-3}$ )					CV	P>F
	T1	T2	T3	T4	T5		
<b>0,0-0,1</b>	0,35 <b>a</b>	0,33 <b>ab</b>	0,31 <b>cb</b>	0,34 <b>ab</b>	0,29 <b>c</b>	<b>7,26</b>	<b>0,0047</b>
<b>0,1-0,2</b>	0,26 <b>ba</b>	0,24 <b>ba</b>	0,24 <b>b</b>	0,28 <b>a</b>	0,28 <b>ba</b>	<b>13,96</b>	<b>0,1700</b>
<b>0,2-0,3</b>	0,32 <b>a</b>	0,27 <b>b</b>	0,27 <b>b</b>	0,29 <b>ba</b>	0,32 <b>a</b>	<b>8,55</b>	<b>0,0015</b>
<b>0,3-0,4</b>	0,31 <sup>a</sup>	0,30 <b>a</b>	0,27 <b>ba</b>	0,25 <b>b</b>	0,27 <b>ba</b>	<b>12,16</b>	<b>0,0412</b>
<b>0,4-0,5</b>	0,33 <b>a</b>	0,32 <b>a</b>	0,29 <b>ba</b>	0,25 <b>b</b>	0,28 <b>ba</b>	<b>14,44</b>	<b>0,0180</b>

T1- Testemunha; T2- Uma passada com o trator; T3- Dois passada com o trator; T4- Quatro passada com o trator; T5- Oito passada com o trator.

\*Valores seguidos pela mesma letra não diferem significativamente, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

No conteúdo volumétrico de água só foi constatada diferença significativa entre os tratamentos ( $P > 0,05$ ) na profundidade de 0,3 a 0,4 m (Quadro 3). Os Sistemas de preparo do solo provocam maior revolvimento do solo e, portanto, aumentam o seu volume, armazenam menos água na camada revolvida comparado à outra camada idêntica sem revolvimento (Vieira, 1984).

Quadro 3. Umidade base volume do solo para a avaliação do uso da técnica de indução eletromagnética (IEM) para as diferentes cargas aplicadas com o trator

Profundidade (m)	Umidade base volume (m <sup>3</sup> m <sup>-3</sup> )					CV	P>F
	T1	T2	T3	T4	T5		
<b>0,0-0,1</b>	0,14 a	0,14 a	0,14 a	0,14 a	0,16 a	<b>14,30</b>	<b>0,5800</b>
<b>0,1-0,2</b>	0,16 a	0,18 a	0,15 a	0,15 a	0,18 a	<b>19,23</b>	<b>0,2200</b>
<b>0,2-0,3</b>	0,16 b	0,18 ba	0,18 ba	0,16 b	0,19 a	<b>14,10</b>	<b>0,1400</b>
<b>0,3-0,4</b>	0,16 b	0,17 b	0,20 a	0,21 <sup>a</sup>	0,21a	<b>11,18</b>	<b>0,0014</b>
<b>0,4-0,5</b>	0,19 ba	0,18 b	0,19 ba	0,20 ba	0,21a	<b>15,43</b>	<b>0,2700</b>

T1- Testemunha; T2- Uma passada com o trator; T3- Dois passada com o trator; T4- Quatro passada com o trator; T5- Oito passada com o trator.

\*Valores seguidos pela mesma letra não diferem significativamente, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Estes dados mostram que o trafico de maquinas afetou a densidade e a porosidade total do solo na camada superior de 0-0,1 m (Quadro 1 e 2). A testemunha apresenta menor densidade do solo e maior porosidade total, nas camadas 0 ate 0,4 m de profundidade, comparada com os outros tratamentos. Silveira et al. (1994) observaram que, após quatro anos de aração a 0,30 m de profundidade, houve redução dos valores de densidade do solo e aumento os de porosidade total (Quadro 1 e 2).

Quadro 4. Condutividade elétrica com o condutímetro EM-38 para as diferentes cargas aplicadas com o trator

Profundidade (m)	Tratamentos					CV	P>F
	T1	T2	T3	T4	T5		
<b>0,0-0,1</b>	5,20 c	7,00 ab	7,37 a	6,37 ab	6,00 cb	<b>14,08</b>	<b>0,0030</b>
<b>0,1-0,2</b>	5,54 b	8,50 a	8,38 a	6,54 b	5,83 b	<b>17,27</b>	<b>0,0002</b>
<b>0,2-0,3</b>	5,21 c	7,00 ba	7,38 a	6,38 ba	6,00 bc	<b>14,08</b>	<b>0,0030</b>
<b>0,3-0,4</b>	5,54 b	8,50 a	8,38 a	6,54 b	5,83 b	<b>17,27</b>	<b>0,0002</b>
<b>0,4-0,5</b>	5,21c	7,00 ba	7,38 a	6,38 ba	6,00 bc	<b>14,08</b>	<b>0,0030</b>

T1- Testemunha; T2- Uma passada com o trator; T3- Dois passada com o trator; T4- Quatro passada com o trator; T5- Oito passada com o trator.

\*Valores seguidos pela mesma letra não diferem significativamente, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Quadro 5. Propriedades químicas do solo para a avaliação do uso da técnica de indução eletromagnética (IEM) para as diferentes cargas aplicadas com o trator, na profundidade de 0,0 a 0,2 m.

Variáveis	Tratamentos					CV	P>F
	T1	T2	T3	T4	T5		
Na	0,009 a	0,007 b	0,010 a	0,010 a	0,010 a	27,84	0,0080
pH (CaCl <sub>2</sub> )	5,18 c	5,52b a	5,64 a	5,78 a	5,33 bc	6,31	0,0007
pH (H <sub>2</sub> O)	6,08 c	6,37 ba	6,50 a	6,61 a	6,18 bc	4,80	0,0003
Al <sup>3+</sup>	0,016 a	0,00 a	0,00 a	0,00 a	0,008 a	433,45	0,2400
H <sup>++</sup> Al <sup>3+</sup>	2,24 a	2,13 ba	2,10 ba	2,06 b	2,23 a	8,72	0,9900
Ca <sup>2+</sup>	1,07 b	1,62 a	1,44 a	1,63 a	1,47 a	25,56	0,0030
Mg <sup>2+</sup>	0,47 b	0,68 a	0,62 a	0,66 a	0,64 a	19,84	0,0006
K <sup>+</sup>	0,14 a	0,12 a	0,14 a	0,13 a	0,12 a	31,65	0,6400
SB	1,68 b	2,42 a	2,20 a	2,42 a	2,23 a	19,91	0,0005
CTC	3,91 b	4,55 a	4,30 a	4,48 a	4,45 a	9,54	0,0031
P	15,04 ba	17,84 ba	27,02 a	24,53 ba	12,82 b	79,51	0,1300
C	4,84 a	5,38 a	5,20 a	4,65 a	5,18 a	23,03	0,5400
V	42,20 b	52,82 a	50,84 a	53,64 a	49,85 a	12,51	0,0003
Ca	26,75 b	35,08 a	33,31 a	36,07 a	32,78 a	18,12	0,0030
Mg	11,82 b	15,06 a	14,33 a	14,58 a	14,37 a	16,35	0,0100
K	3,62 a	2,69 b	3,19 ba	2,99 ba	2,70 b	31,34	0,1100
M	1,40 a	0,00 b	0,00 b	0,00 b	0,55 ba	434,13	0,1900
CE*	0,05 a	0,04 a	0,04 a	0,04 a	0,05 a	31,05	0,2100

\*Condutividade elétrica estimada no laboratório

T1- Testemunha; T2- Uma passada com o trator; T3- Dois passada com o trator; T4- Quatro passada com o trator; T5- Oito passada com o trator.

\*Valores seguidos pela mesma letra não diferem significativamente, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

Quadro 6. Propriedades químicas do solo para a avaliação do uso da técnica de indução eletromagnética (IEM) para as diferentes cargas aplicadas com o trator, na profundidade de 0,2 a 0,4 m

Variáveis	Tratamentos					CV	P>F
	T1	T2	T3	T4	T5		
Na	0,010 a	0,009 ba	0,008 b	0,010 a	0,010 a	25,71	0,0560
pH (CaCl <sub>2</sub> )	5,24 ba	5,16 b	4,90 b	5,57 a	4,97 b	8,31	0,0030
pH (H <sub>2</sub> O)	6,13 ba	6,01 b	5,76 b	6,45 a	5,81b	7,62	0,0038
Al <sup>3+</sup>	0,03 ba	0,03 ba	0,18 a	0,0 b	0,10 ba	258,48	0,1300
H <sup>++</sup> Al <sup>3+</sup>	2,27 ba	2,24 ba	2,42 a	2,13 b	2,31 ba	11,50	0,1000
Ca <sup>2+</sup>	1,18 a	1,39 a	1,23 a	1,39 a	1,16 a	32,64	0,4800
Mg <sup>2+</sup>	0,56 b	0,59 b	0,55 b	0,74 a	0,57 b	24,82	0,0160
K <sup>+</sup>	0,09 a	0,06 a	0,10 a	0,06 a	0,06 a	75,99	0,2000
SB	1,82 a	2,04 a	1,88 a	2,19 a	1,79 a	27,41	0,3300
CTC	4,09 a	4,28 a	4,31 a	4,32 a	4,10 a	9,91	0,4800
P	8,69 a	4,82 ba	3,66 ba	7,82 a	1,87 b	114,77	0,1800
C	4,01 a	4,14 a	4,37 a	4,17 a	4,40 a	22,77	0,8400
V	44,03 ba	47,15 ba	42,70 b	50,64 a	42,48 b	21,25	0,2000
Ca	28,30 a	31,91 a	27,63 a	32,25 a	27,37 a	26,29	0,3500
Mg	13,49 b	13,78 b	12,65 b	17,07a	13,60 b	20,77	0,0060
K	2,24 ba	1,47 ba	2,42 a	1,31 b	1,51 ba	74,69	0,1700
M	2,47 a	1,98 a	10,22 a	0,00 a	8,60 a	271,39	0,2100
CE*	0,038 b	0,038 b	0,046 a	0,038 b	0,042 ba	21,31	0,0700

\*Condutividade elétrica estimada no laboratório

T1- Testemunha; T2- Uma passada com o trator; T3- Dois passada com o trator; T4- Quatro passada com o trator; T5- Oito passada com o trator.

\*Valores seguidos pela mesma letra não diferem significativamente, a 5% de probabilidade, pelo teste de Tukey.

## 5.2 Uso do método de indução eletromagnética (IEM) para estimar os atributos do solo.

O sensor por indução eletromagnética apresentou dificuldades operacionais com frequente necessidade de calibração, atribuída à variação da temperatura ambiente ao longo do período. Por tanto se opto por fazer calibrações do equipamento e pontos de controle (linha base) em períodos menores de 2 horas. Essa característica, associada ao fato de que o sensor não possui coletor de dados, e pose uma escala grande (1,000 mS m<sup>-1</sup>) para solos com condutividade elétrica baixa limitando-se a pesquisa.

De acordo com a correção dos dados de condutividade elétrica CE, foi observada que os dados corrigidos não variaram com respeito aos dados sem



solo. Nas Figuras 11 á 15 são apresentadas as relações do método IEM com as propriedades físicas do solo nas profundidades 0-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,30 m, 0,30-0,40 m e 0,40-0,50 m. Embora medida de CE com o EM-38 apresenta diferença (Quadro 4) a mesma não mostra correlação com a umidade ( $R^2 = 0,0049$ ), com a densidade do solo  $R^2 = 0,0449$  e com a porosidade total  $R^2 = 0,0842$ . De acordo com Richards (1954) a alteração da condutividade elétrica é um reflexo da mudança no conteúdo de água e/ou diluição da solução no solo. Na ausência de sais dissolvidos nas soluções do solo contínuas, condutividade, textura e umidade se correlacionam bem (RHOADES et al., 1989).

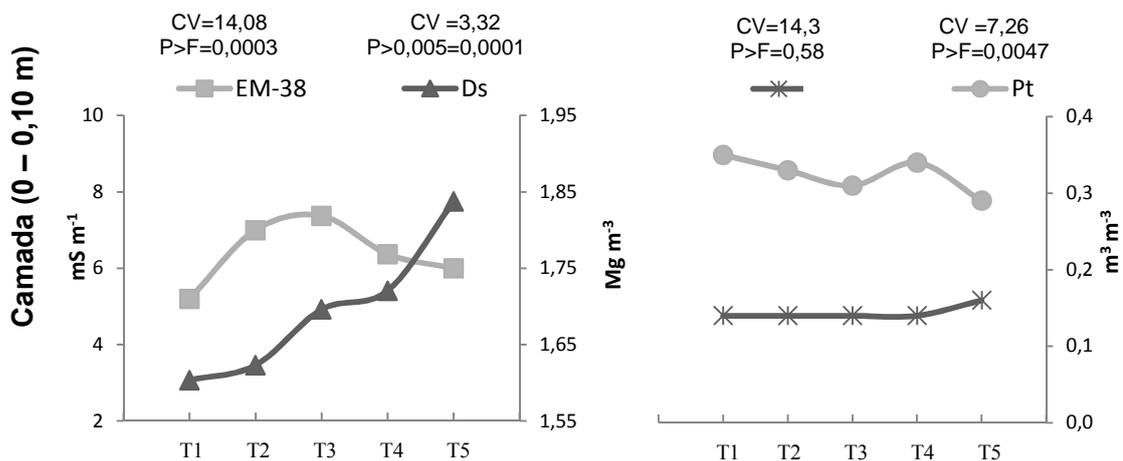


Figura 11. Valores médios de condutividade elétrica medida em campo (EM-38), densidade do solo (Ds), umidade base volume ( ) e porosidade total (Pt) para as diferentes cargas aplicadas (T1=0 passadas, T2=1 passada, T3=2 passadas, T4=4 passadas e T5=8 passadas com o trator). Na profundidade de 0-0,10 m, com suas diferenças significativas ( $p < 0,05$ ) para cada variável

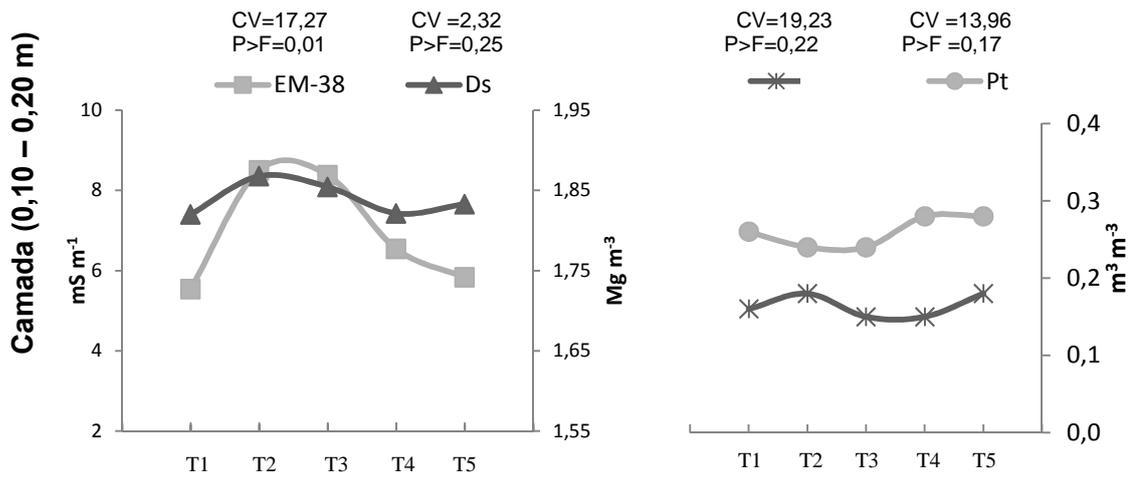


Figura 12. Valores médios de condutividade elétrica medida em campo (EM-38), densidade do solo (Ds), umidade base volume ( ) e porosidade total (Pt) para as diferentes cargas aplicadas (T1=0 passadas, T2=1 passada, T3=2 passadas, T4=4 passadas e T5=8 passadas com o trator). Na profundidade de 0,10-0,20 m, com suas diferenças significativas ( $p<0,05$ ) para cada variável.

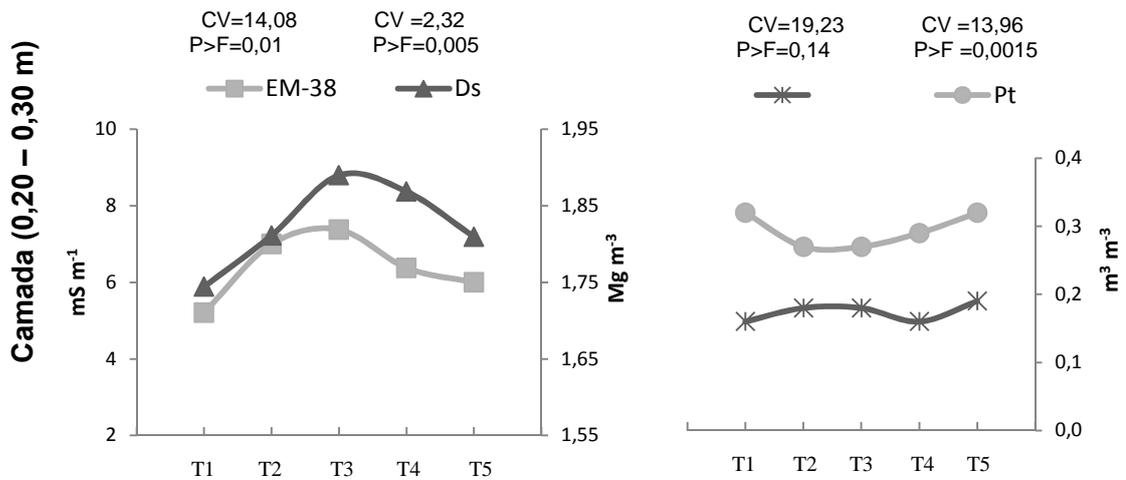


Figura 13. Valores médios de condutividade elétrica medida em campo (EM-38), densidade do solo (Ds), umidade base volume ( ) e porosidade total (Pt) para as diferentes cargas aplicadas (T1=0 passadas, T2=1 passada, T3=2 passadas, T4=4 passadas e T5=8 passadas com o trator). Na profundidade de 0,20-0,30 m, com suas diferenças significativas ( $p<0,05$ ) para cada variável.

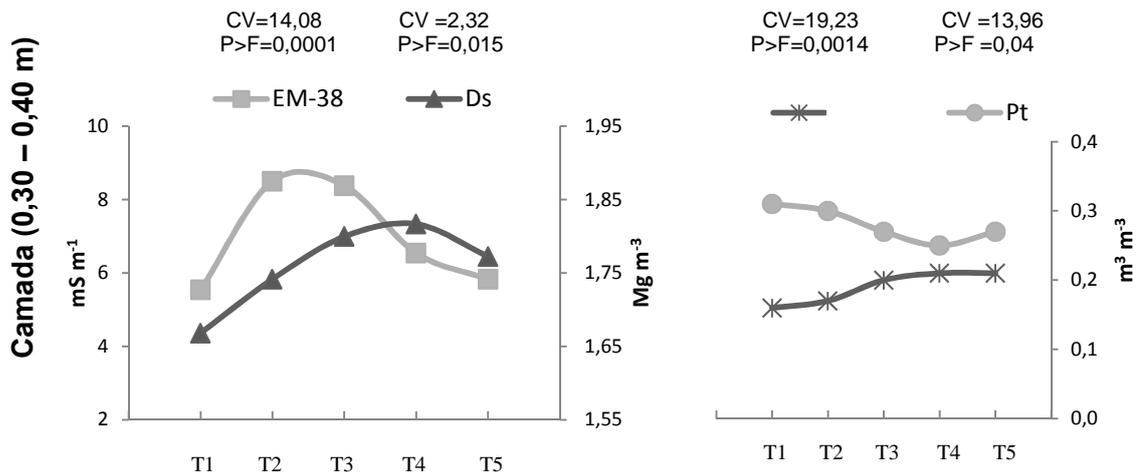


Figura 14. Valores médios de condutividade elétrica medida em campo (EM-38), densidade do solo (Ds), umidade base volume ( ) e porosidade total (Pt) para as diferentes cargas aplicadas (T1=0 passadas, T2=1 passada, T3=2 passadas, T4=4 passadas e T5=8 passadas com o trator). Na profundidade de 0,30-0,40 m, com suas diferenças significativas ( $p < 0,05$ ) para cada variável.

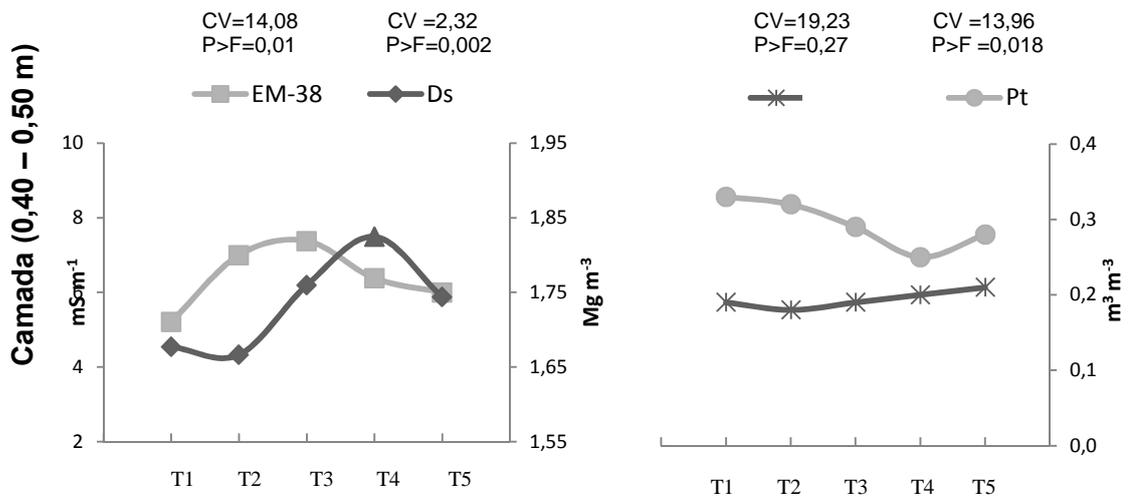


Figura 15. Valores médios de condutividade elétrica medida em campo (EM-38), densidade do solo (Ds), umidade base volume ( ) e porosidade total (Pt) para as diferentes cargas aplicadas (T1= testemunha, T2=1 passada, T3=2 passadas, T4=4 passadas e T5=8 passadas com o trator). Na profundidade de 0,40-0,50 m, com suas diferenças significativas ( $p < 0,05$ ) para cada variável.

A condutividade elétrica (CE) do solo, obtida por contato ou por indução eletromagnética, tem sido utilizada como uma variável que se

correlaciona com as características do solo (McNEILL, 1992; RHOADES ET AL, 1999). Os dados de condutividade aparente CEa obtidos com o EM-38 mostraram certas limitações do equipamento em um solo com bastante areia que prejudicaram a avaliação do potencial. A Figura 16 mostra a correlação da CEa medida em campo com o EM-38 e a CEa medida no laboratório.

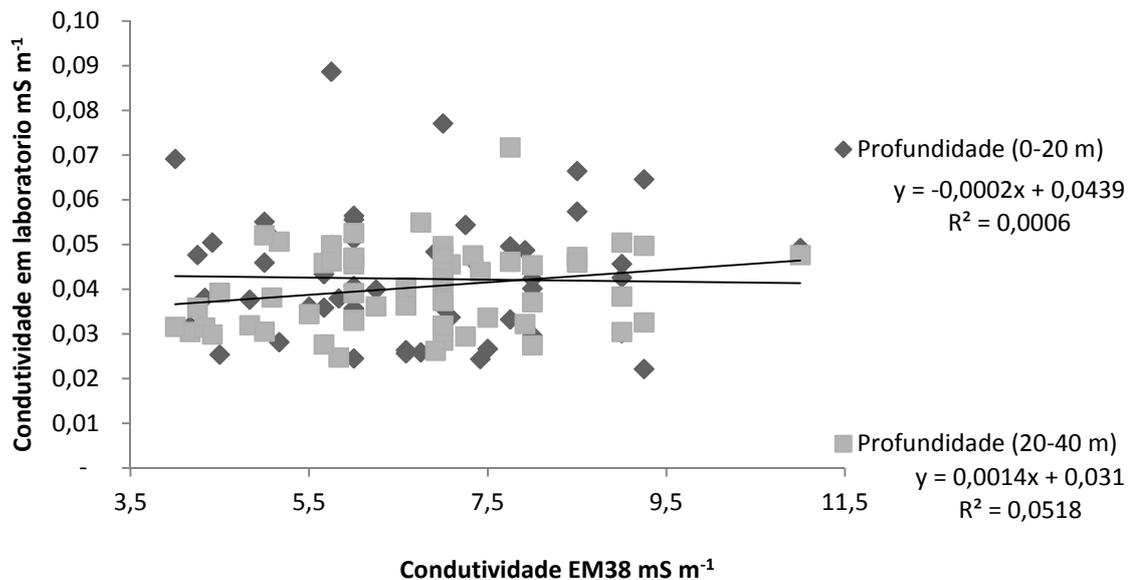


Figura 16. Correlação da condutividade elétrica obtida com o EM-38 em campo e a condutividade elétrica obtida no laboratório.

A ausência de correlação entre os dois métodos de medição de CE (laboratório e campo) poderia ser explicada por as análises de textura do solo, onde se evidencia 76% de areia, 23% de argila e 10% de silte. Isto mostra que a condutividade elétrica em baixos conteúdos de água não possibilitou ao equipamento checar o perfil estudado. Segundo Davis & Annan (1989), a areia saturada permite uma condutividade máxima de  $1 \text{ mS m}^{-1}$ , o silte  $100 \text{ mS m}^{-1}$  e a argila de  $1000 \text{ mS m}^{-1}$ . A condutividade elétrica do solo varia de acordo com a quantidade de umidade na posse de partículas do solo, por conseguinte, CE correlaciona fortemente com o tamanho das partículas do solo e textura

(GRISSE et al., 2009). Da mesma forma, os parâmetros de textura e a condutividade elétrica estão relacionados com o fluxo de elétrons no meio poroso (McNEILL, 1980 & GEONICS, 1999).

No entanto, estudos de mensuração da condutividade elétrica do solo por indução realizados por Molin et al. (2005) mostraram que a correlação entre a CE e o teor de argila na camada de 0 a 0,20 m foi de apenas 0,15. Já na camada mais profunda, de 0,20 a 0,40 m, a correlação foi de 0,33. Banton et al. (1997) observaram correlações de mensuração da condutividade elétrica do solo por indução de 0,64 e 0,53 entre a resistência elétrica, para teor de argila em solo seco e úmido, respectivamente. Dalgaard et al. (2001) observaram resultados onde a CE explicava 79% da variabilidade do teor de argila do solo.

A Figura 17 mostra a baixa correlação entre a condutividade elétrica medida em campo com o EM-38 e as propriedades físicas do solo. O  $R^2$  máximo encontrado foi de 0,0842 na porosidade total. Poderia esperar que a máxima correlação fosse apresentada no conteúdo volumétrico de água; isto por que porosidade total média do solo foi de  $0,29 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  e o conteúdo volumétrico médio da água durante a investigação geofísica foi de  $0,18 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ . Estes valores evidenciam que a porosidade não estava saturada em sua capacidade máxima. Quanto maior a porosidade total do solo, mais facilmente ele conduz eletricidade, solos com alto teor de argila tem mais espaço poroso total que solos mais arenosos, isto quando outros parâmetros do solo se mantêm constantes (GRISSE et al., 2009). Segundo Oliveira (2006) o teor de umidade com métodos eletromagnéticos, mostraram que as áreas mais úmidas são coincidentes com áreas mais condutivas. Sheets & Hendrickx (1995) encontraram uma relação linear entre condutividade elétrica e teor de água no perfil do solo.

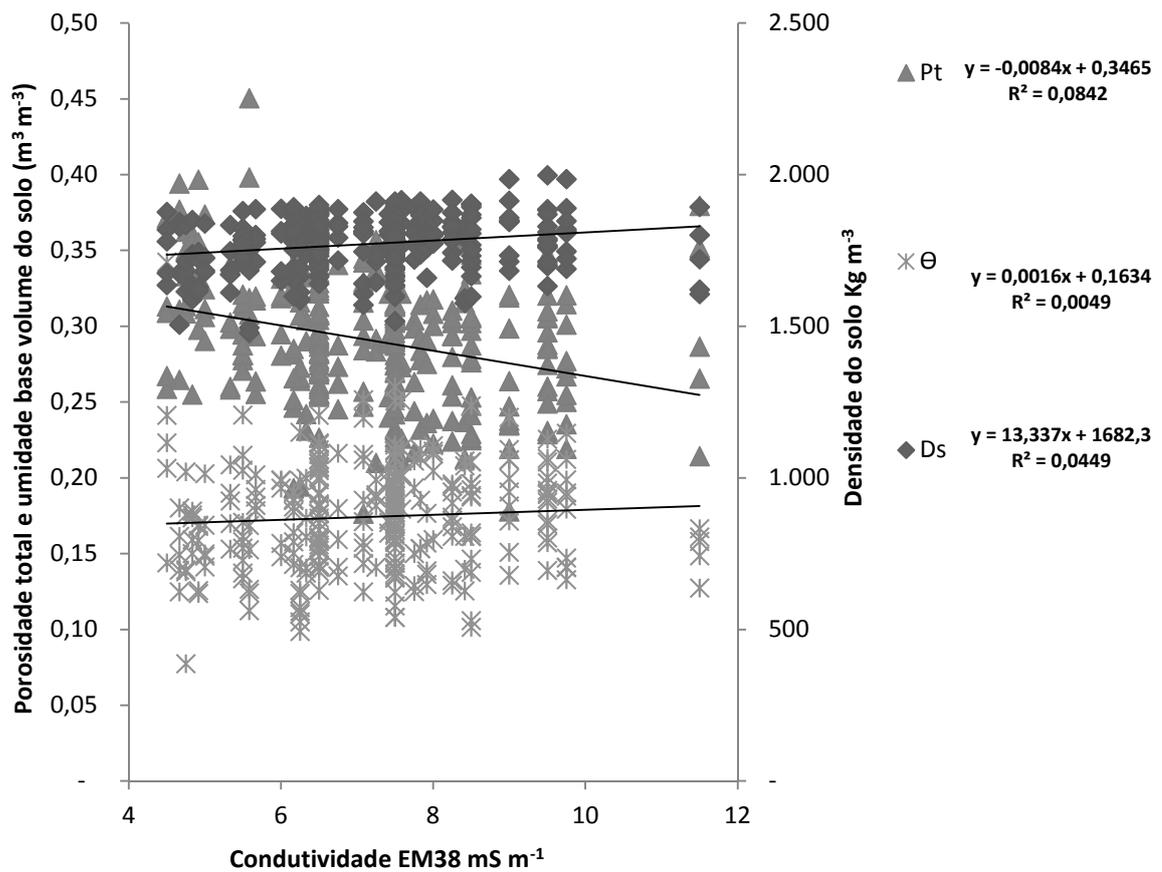


Figura 17. Correlação entre a condutividade elétrica do EM-38 e as propriedades físicas do solo.

A Figura 18 mostra as correlações entre a CE medida com EM-38 e as análises químicas do solo.

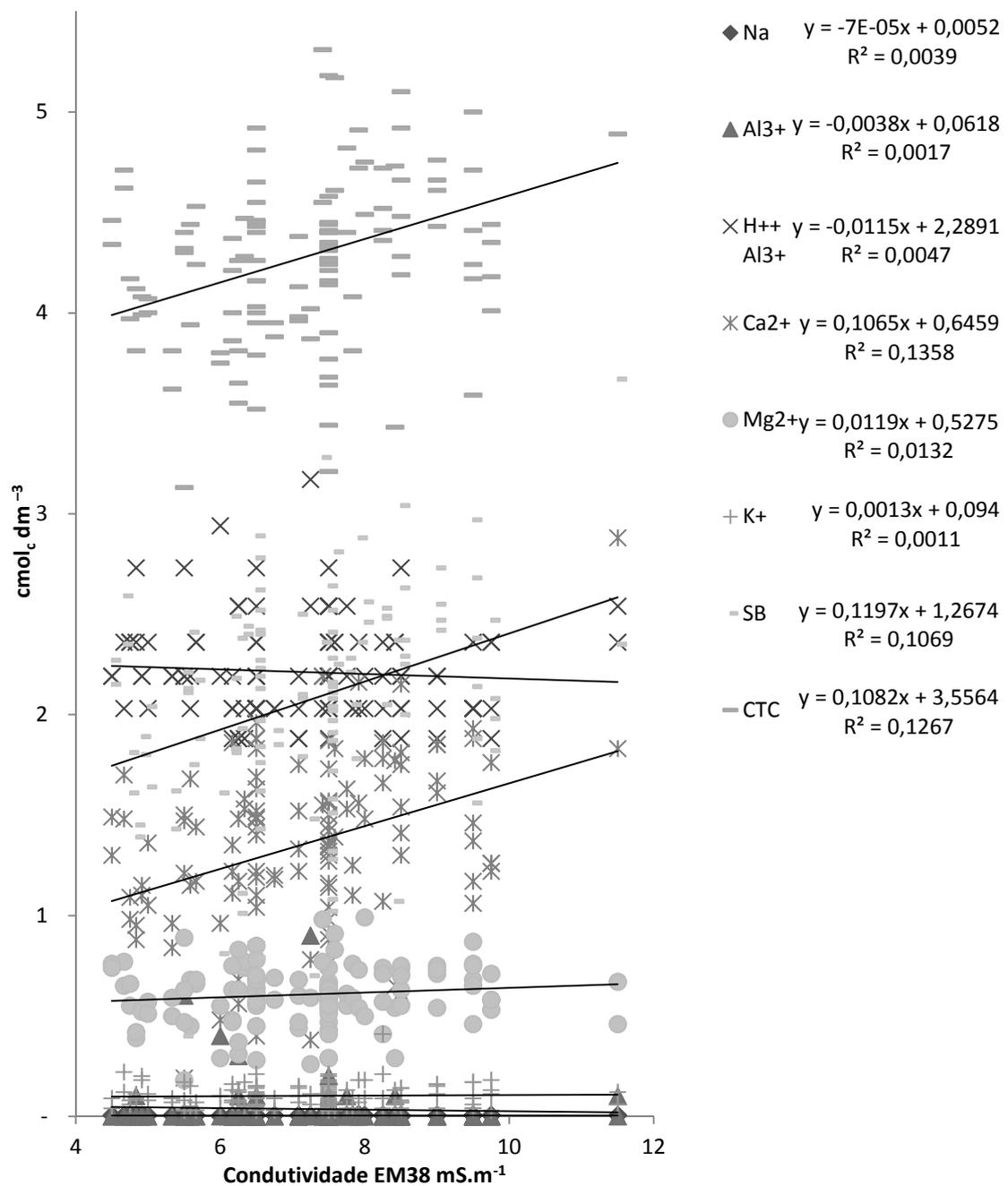


Figura 18. Correlação entre a condutividade elétrica do EM-38 e algumas propriedades químicas do solo.

As correlações entre os valores de CE e os atributos químicos analisados também foram baixas com  $R^2$  máximo de 0,13 para cálcio (Figura 18). As análises químicas do solo dependem da amostragem (SANTANA, 2006). Além disso, as análises de laboratório têm o inconveniente de destruir a

estrutura do solo, podendo apresentar valores diferenciados dos reais, aumentando a proporção dos erros na comparação dos índices.

### 5.3 Mapeamentos da condutividade elétrica e as propriedades físicas do solo.

Geonics, (1999) e Molin et al, (2005) sugerem que mesmo que na análise pontual destes parâmetros não estejam correlacionáveis a comparação de mapas é o único modo de relacionar estes índices. Na Figura 19 é mostrada a distribuição no espaço dos valores médios dos conteúdos volumétricos de água no momento da investigação geofísica, a densidade do solo e a CE observadas com o equipamento EM-38 no dipolo horizontal, com medidas em distância a cada 10 m no eixo vertical e 2 m no eixo horizontal (Figura 19).

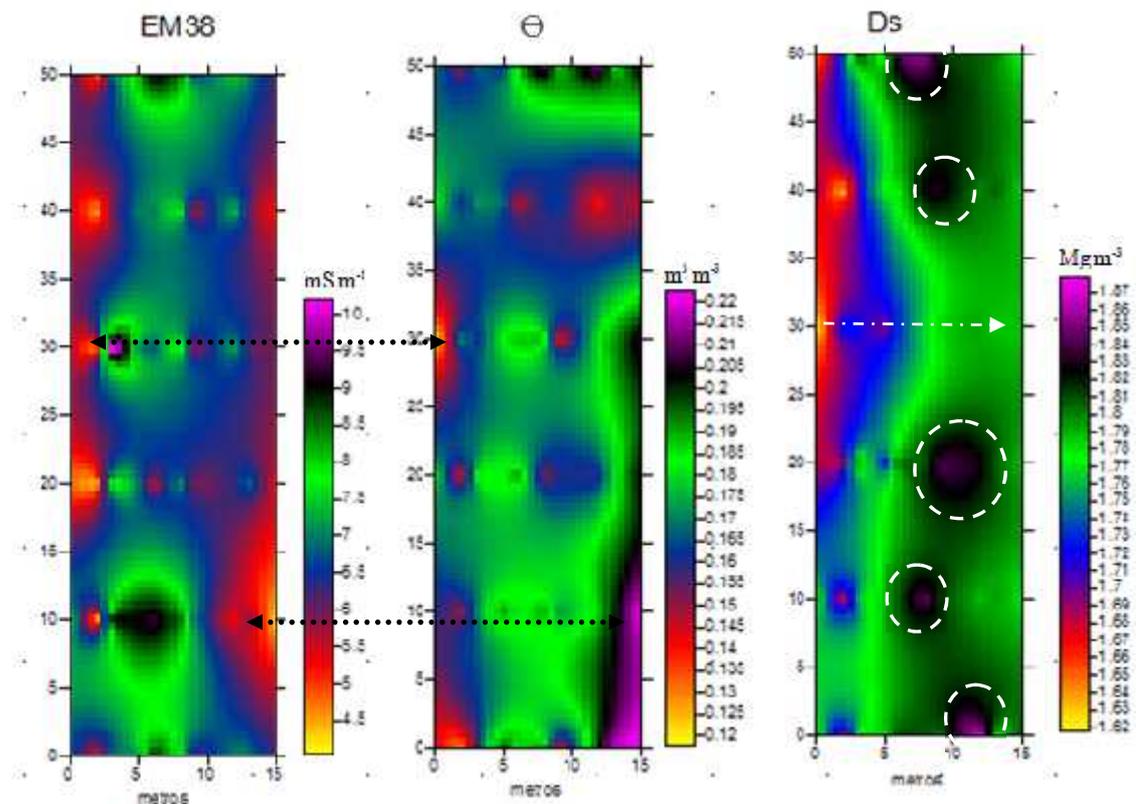


Figura 19. Mapas da distribuição da Condutividade elétrica (EM-38), a Conteúdo volumétrico de água ( $\theta$ ) e a densidade do solo (Ds).

Nota-se que em alguns locais, a CE e o conteúdo de água se mostram positivamente proporcionais e, em outros locais se mostram inversamente proporcionais. O mapa de Ds mostra o um leve aumento da densidade do solo com a passagem do sistema rodante do trator, desde o amarelo e vermelho até o verde onde a carga foi 8 vezes maior, também se observam valores discrepantes de Ds onde o trator passo 2 e 4 vezes (cor rosa e preto) Figura 19.

Mapas mais precisos das medicoes de CE serão uma base para relacionar as propriedades do solo de interesse na agricultura de precisão. No entanto, o uso de medidas da CE do solo representa uma alternativa para amostragem de solo intensivo e pode melhorar tanto a resolução (maior densidade de amostragem) e reduzir o custo dos mapas de solos. (GRISSE et al., 2009).

## **6 CONCLUSÃO**

O condutímetro eletromagnético EM-38 não teve suficiente sensibilidade para medir as alterações dos solos do Noroeste do Paraná nas condições físicas e químicas do solo durante o desenvolvimento do estudo.

Não houve correlação entre a condutividade medida com o condutímetro EM-38 e a condutividade elétrica medida em laboratório, as propriedades físicas e químicas do solo.

## REFERÊNCIAS

- AMMONS, J. T.; TIMPSON, M. E.; NEWTON, D. L. Application of aboveground electromagnetic conductivity meter to separate natraqualfs and ochraqualfs in gibson county, tennessee. *Soil Survey Horizons*, v. 30, p. 66 –70, 1989.
- ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A. P. Propriedades físicas de um Latossolo Vermelho distrófico cultivado sob mata nativa. *R. Bras. Ci. Solo*, v. 28, p. 337-345, 2004.
- ARCHIE, G. E. The electric resistivity log as an aid in determining some reservoir characteristics. *Trans. Am. Inst. Min. Metall. Pet. Eng.*, v. 146, p. 54–62, 1942.
- BANTON, O.; SEGUIN, M. K.; CIMON, M.A. Mapping field-scale physical properties of soil with electrical resistivity. *Soil Science Society of American Journal*, Madison, v. 61, p. 1010-17, 1997.
- BARBIERI, J. L.; ALLEONI, L. R. F.; DONZELLI, J. L. Avaliação agronômica e econômica de sistemas de preparo de solo para cana-de-açúcar. *R. Bras. Ci. Solo*, v. 21, p. 89-98, 1997.
- BRADY, NYLE C.; WEIL, RAY R. *The nature and properties of soils*: twelfth edition. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 1999. 881p.
- BUCHLEITER, G.W.; FARAHANI, H. *Comparison of electrical conductivity measurements from two different sensing technologies*. St. Joseph: ASAE, 2002. 9 p. (Paper 021056).
- BULLOCK, D. S.; BULLOCK, D. G. Economic optimality of input application rates in precision farming. *Precision Agriculture*, v 2, p. 71–101, 2000.
- CALLEGARY, J. B.; FERRÉ, T. P. A.; GROOM, R. W. Vertical spatial sensitivity and exploration depth of low-induction-number electromagnetic-induction instruments. *Vadose Zone Journal*, v. 6, p.158–167, 2007.
- CAMARGO, O. A; ALLEONI, L. R. F., RECONHECIMENTO E MEDIDA DA COMPACTAÇÃO DO SOLO; *Infobibos – Informações Tecnológicas*, 2006; < [http://www.infobibos.com/Artigos/2006\\_2/C6/Index.htm](http://www.infobibos.com/Artigos/2006_2/C6/Index.htm)>. Acesso em 2 março 2011.
- CAMINHA JUNIOR, I. C.; SERAPHIM, O. J.; GABRIEL, L. R. A. Caracterização de uma área agrícola irrigada com efluente agroindustrial, através de análises químicas e da resistividade do solo. *Energia na Agricultura*, Botucatu, v. 13, n. 4, p. 40-54, 2000.
- CANNON, M. E.; MCKENZIE, R. C.; LACHAPELLE, G. Soil salinity mapping with electromagnetic induction and satellite based navigation methods. *Canadian journal soil science*, v. 74, p. 335–343, 1994.

CORWIN, D. L.; LESCH, S. M. Apparent soil electrical conductivity measurements in agriculture. *Elsevier, Computers and Electronics in Agriculture*, v. 46, p. 11–43, 2005.

CORWIN, D. L.; RHOADES, J. D. Establishing soil electrical conductivity – depth relations from electromagnetic induction measurements. *Commun. Soil Sci. Plant Anal*, v. 21, n. (11–12), p. 861–901, 1990.

CRUZ, A. C. R.; PAULETTO, E. A.; FLORES, C. A.; SILVA, J. B. Atributos físicos e carbono orgânico de um Argissolo Vermelho sob sistemas de manejo. *R. Bras. Ci. Solo*, v. 27, p. 1105-1112, 2003.

DALGAARD, M.; HAVE, H.; NEHMDAHL, H. Soil clay mapping by measurement of electromagnetic conductivity. EUROPEAN CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 3., 2001, Montpellier. *Proceedings ... Montpellier: Agro Montpellier*, 2001. 1 CD-ROM.

DANE, J. H.; TOPP, C. (Ed.). *Methods of soil analysis: physical methods*. Madison: *Soil Science Society of America*, v. 4, p. 201-228, 2002.

DOOLITTLE, J. A.; EALY, G.; SECRIST, G.; RECTOR, D.; CROUCH, M. Reconnaissance soil mapping of a small watershed using EM and GPS techniques. *Soil Survey Horizons*, v. 36, p. 36–94, 1995.

DOOLITTLE, J. A.; SUDDUTH, K. A.; KITCHEN, N. R.; INDORANTE, S. J. Estimating depth to clay pans using electromagnetic inductive methods. *Journal Soil Water Conservation*, v. 49, p. 552–555, 1994.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Manual de métodos de análises de solos*. 2.ed. Rio de Janeiro, 1997. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. *Sistema brasileiro de classificação de solos*. 2.ed. Brasília, 2006. 412p.

FREITAS, P.L. Manejo físico do solo. In: SIMPÓSIO SOBRE MANEJO E CONSERVAÇÃO DO SOLO NO CERRADO, 1., 1990, Goiânia. Anais... Campinas: Fund. Cargill, 1992. p.117-139.

FRITZ, R.M.; MAIO D.D.; SCHUMACHER, T.E.; CLAY, D.E.; CARLSON, C.G.; ELLSBURY, M.M.; DALSTED, K.J. Field comparison of two soil electrical conductivity measurement systems. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4., 1998, St Paul. Proceedings... St Paul: ASA; CSSA; SSSA, 1998. p. 1211-1217.

GEONICS. *EM-38 ground conductivity meter operating manual*. Geonics Ltd, Mississauga, Ont. Canada, 1998. 27p.

GEONICS. *EM-38 Ground conductivity meter operating manual*. Ontário: Geonics Ltd. 1999. 69p.

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

GROSSMAN, R. B.; REINSCH, T. G. Bulk density and linear extensibility. In: HARTSOCK, N.J.; MUELLER, T.G.; THOMAS, G.W.; BARNHISEL, R.I.; WELLS, K.L.; SHEARER, S.A. Soil electrical conductivity variability. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 5., 2000, Minneapolis. *Proceedings....* Madison: American Society of Agronomy, 2000. 1 CD-ROM.

HEDLEY, C. B.; YULE, I. Y.; EASTWOOD, C. R.; SHEPHERD, T. G.; ARNOLD, G. Rapid identification of soil textural and management zones using electromagnetic induction sensing of soils. *Australian Journal of Soil Research*, v. 42, p. 389–400, 2004.

HENDRICKX, J. M. H.; BAERENDS, B.; RAZA, Z. I.; SADIG, M.; CHAUDHRY, M. A. Soil salinity assessment by electromagnetic induction of irrigated land. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v. 56, p. 1933–1941, 1992.

HENDRICKX, J. M. H.; KACHANOSKI, R.G. Solute content and concentration – indirect measurement of solute concentration – nonintrusive electromagnetic induction. In: Dane, J.H., Topp, G.C. (Eds.), *Methods of Soil Analysis, Part 4 – Physical Methods*. Soil Sci. Soc. Am. Book Ser. 5. Soil Science Society of America, Madison, WI, USA, pp. 1297–1306. 2002.

KACHANOSKI, R. G.; GREGORICH, E. G.; VAN WESENBEECK, I. J. Estimating spatial variations of soil water content using non contacting electromagnetic inductive methods. *Canadian Journal Soil Science*, v. 68, p. 715–722, 1988.

KELLER, G. V. *Rock and mineral properties*. Investigations in Geophysics, no 3. Electromagnetic Methods in Applied Geophysics. Society of Exploration Geophysicists, Ed. Misac N. Nabighian, v. 1, p. 13-51, 1987

KELLER, V. G.; FRISCHKNECHT, F. C. *Electrical methods in geophysical prospecting*. Oxford, Pergamon Press, 1966. 17 p.

KERTZMAN, F.F. *Modificações na estrutura do solo e no comportamento de um Latossolo Roxo provocado pela compactação do solo*. 1996. 176f. Tese (Tese de Doutorado)- Universidade de São Paulo, São Paulo. 1996

KITCHEN, N. R.; SUDDUTH, K. A.; MYERS, D. B.; DRUMMOND, S. T.; HONG, S. Y. Delineating productivity zones on clay pan soil fields using apparent soil electrical conductivity. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 46, p. 285–308, 2005.

KITCHEN, N. R.; SUDDUTH, K. A.; DRUMMOND, S.T. Mapping of sand deposits from 1993 Midwest floods with electromagnetic induction measurements. *J. Soil Water Conserv.*, v. 51 p. 336 -340, 1996.

MACLEAN, H. D.; DICKERSON, J. W.; HASBROUCK, J. C.; COTTER, E. T. Geophysical Surveys for Underground Storage Tank Locations Hickam Air Force Base, Hawaii: A Case Study. In: PROCEEDINGS OF THE SYMPOSIUM ON THE APPLICATION OF GEOPHYSICS TO ENGINEERING AND ENVIRONMENTAL PROBLEMS, Knoxville, USA, p. 323 – 341. 1991.

McBRIDE, R. A.; GORDON, A.M.; SHRIVE, S.C. Estimating forest soil quality from terrain measurements of apparent electrical conductivity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v. 54, p. 290–293, 1990.

McNEILL, J. D. *Electromagnetics terrain conductivity measurement at low induction numbers*. Tech. Note TN-6, Geonics Ltd, Mississauga, Ont., Canadá, 1980. 13p.

McNEILL, J. D. RAPID, ACCURATE MAPPING OF SOIL SALINITY BY ELECTROMAGNETIC GROUND CONDUCTIVITY METERS. In: ADVANCES IN MEASUREMENT OF SOIL PHYSICAL PROPERTIES: Bringing Theory Into Practice. Spec. Publ. 30, SSSA, Madison, WI, p. 209–229. 1992.

MOLIN, J. P.; GIMENEZ, L. M.; PAULETTI, V.; SCHMIDHALTER, U.; HAMMER, J. MENSURAÇÃO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA DO SOLO POR INDUÇÃO E SUA CORRELAÇÃO COM FATORES DE PRODUÇÃO. *Eng. Agríc., Jaboticabal*, v. 25, n. 2, p. 420-426, 2005.

NETTLETON, W. D.; BUSHUE, L.; DOOLITTLE, J. A.; ENDRES, T. J.; INDORANTE, S. J. Sodium-affected soil identification in south-central illinois by electromagnetic induction. *Soil Science society of America Journal*, v. 56, p. 1190–1193, 1994.

OLIVEIRA, C. *Caracterização Geofísica do Solo para uso em Agricultura de Precisão*. 2006. 140f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, SP.

PESSOA, A. L. *Uma abordagem Bayesiana para estudo estatístico e geoestatístico de estimativas de salinidade do solo utilizando sensor de indução eletromagnética*. 2006. 475f. Dissertação (Mestrado em Biometria) – Pós Graduação em Biometria, Universidade Rural de Pernambuco, Recife. 2006.

REYNOLDS, J.M. *An introduction to applied and environmental geophysics*. John Wiley; Sons Ltd., 1997. 806p.

RHOADES, J. D.; CORWIN, D. L. Determining soil electrical conductivity depth using an inductive electromagnetic soil conductivity meter. *Soil Science society of America Journal*, v. 45, p. 255–260, 1981.

RHOADES, J. D.; CORWIN, D. L. Soil electrical conductivity: effects of soil properties and application to soil salinity appraisal. *Commun. Soil Sci. Plant Anal.* v. 21, p. 837–860, 1990.

RHOADES, J. D.; MANTEGHI, N. A.; SHOUSE, P. J.; ALVES, W. J. Soil electrical conductivity and soil salinity: new formulations and calibrations. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v. 53, p. 433–439, 1989.

RHOADES, J. D.; CHANDUVI, F.; LESCH, S. M. Soil Salinity Assessment: *Methods and Interpretation of Electrical Conductivity Measurements*. FAO Irrigation and Drainage. Food and Agricultural Organization of the United Nations, Rome, Italy, 1999, 57p.

ROBINSON, D. A.; LEBRON, I.; LESCH, S.; SHOUSE, P. Temperature effects on EM-38 instrument response used for bulk soil electrical conductivity mapping. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v. 68, p. 339 – 345, 2004.

SANTANA, G. S. et al. Estimativa da condutividade elétrica da solução do solo a partir do teor de água e da condutividade elétrica aparente do solo. *Engenharia Agrícola, Jaboticabal*, v. 26, n. 3, 2006.

SANTOS, V. R. N. *Emprego dos métodos eletromagnético indutivo e GPR no mapeamento de redes de interferências instaladas no Sítio Controlado de Geofísica Rasa do IAG/USP*. 2009. 146f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, SP.

SHEETS, K. R., HENDRICKX, J. M. H. Noninvasive soil water content measurement using electromagnetic induction. *Water Resour. Res.*, v. 31, n. 10, p. 2401–2409, 1995.

SILVA, A. P.; KAY, B. D. Estimating the least limiting water range of soils from properties and management. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v. 61, p. 877-883, 1997.

SUDDUTH, K. A.; DRUMMOND, S. T.; KITCHEN, N. R. Accuracy issues in electromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture. *Elsevier, Computers and Electronics in Agriculture*, v. 31, p. 239 - 264, 2001.

SUDDUTH, K. A.; KITCHEN, N. R.; BOLLERO, G. A.; BULLOCK, D. G.; WIEBOLD, W. J. Comparison of electromagnetic induction and direct sensing of soil electrical conductivity. *Agron. J.*, v. 95, p. 472 -482, 2003.

SUDDUTH, K.A.; KITCHEN, N.R.; DRUMMOND, S.T. Soil conductivity sensing on clay pan soils: comparison of electromagnetic induction and direct methods. In: INTERNATIONAL CONFERENCE ON PRECISION AGRICULTURE, 4., 1998, Minneapolis. *Proceedings...* Minneapolis: Ed. P.C. Robert, 1998. p. 979-90.

TELFORD, W. M.; GELDART, L. P.; SHERIFF, R. E. *Applied Geophysics*. Second Edition, Cambridge University Press, United Kingdom, 1990. 770p.

TORMENA, C. A.; ARAÚJO, M. A.; FIDALSKI, J.; COSTA, J. M. Variação temporal do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico sob sistema de plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 31, n. 2, p. 211-219, 2007.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P.L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, v. 22, p. 573-581, 1998.

U.S. SALINITY LABORATORY STAFF. Diagnosis and improvement of saline and alkali soils, USDA Handbook 60. U.S. Government Printing Office, Washington, DC, USA, 1954. 160p.

VIEIRA, M.J. O preparo do solo e o comportamento da planta. *Plantio Direto*, Ponta Grossa, v.1, n.5, p. 4 -5, 1984.

WILLIAMS, B. G.; BAKER, G. C. An electromagnetic induction technique for reconnaissance surveys of soil salinity hazards. *Australian Journal of Soil Research*, v. 20, p. 107–118, 1982.

WILLIAMS, B. G.; HOEY, D. The use of electromagnetic induction to detect the spatial variability of the salt clay contents of soils. *Australian Journal of Soil Research*, v. 25, p. 21–27, 1987.

WILLIAMS, B. G.; RICHARDSON, D. P.; WALKER, J. *Spatial variability of apparent electrical conductivity*. Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization (CSIRO), Canberra, Australia, 1990.

WOLLENHAUPT, N. C.; RICHARDSON, J. L.; FOSS, J. E.; DOLL, E.C. A rapid method for estimating weighted soil salinity from apparent soil electrical conductivity measured with an aboveground electromagnetic induction meter. *Can. J. Soil Sci*, v. 66, p. 315–321, 1986.