

**LEONARDO RUBIM REIS**

**UTILIZAÇÃO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA PARA ESTABELECIMENTO DE  
ZONAS DE MANEJO EM UM LATOSSOLO AMARELO-ESCURO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

**VIÇOSA  
MINAS GERAIS – BRASIL  
2005**

**Ficha catalográfica preparada pela Seção de Catalogação e  
Classificação da Biblioteca Central da UFV**

T

R375u      Reis, Leonardo Rubim, 1975-  
2005      Utilização da condutividade elétrica para estabelecimento  
de zonas de manejo em um latossolo amarelo-escuro /  
Leonardo Rubim Reis. – Viçosa : UFV, 2005.  
xi, 58f. : il. ; 29cm.

Inclui apêndice.

Orientador: Luciano Baião Vieira.  
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de  
Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 45-53.

1. Agricultura de precisão. 2. Solos - Manejo.  
3. Condutividade elétrica. 4. Sistema de Posicionamento  
Global. 5. Solos - Análise. I. Universidade Federal de Viçosa.  
II. Título.

CDD 22.ed. 631.3

**LEONARDO RUBIM REIS**

**UTILIZAÇÃO DA CONDUTIVIDADE ELÉTRICA PARA ESTABELECIMENTO DE  
ZONAS DE MANEJO EM UM LATOSSOLO AMARELO-ESCURO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 11 de fevereiro de 2005.

---

**Prof. Nerilson Terra Santos  
(Conselheiro)**

---

**Prof. Haroldo Carlos Fernandes**

---

**Prof. Ricardo Capúcio de Resende**

---

**Pesq. Evandro Chartuni Mantovani  
(Conselheiro)**

---

**Prof. Luciano Baião Vieira  
(Orientador)**

A meus pais

José Reginaldo Figueiredo Reis

Eloísa Rubim Reis (In memoriam)

Às minhas irmãs

Tatiana Rubim Reis

Luciana Rubim Reis

Adriana Rubim Reis

A minha querida filha

Aléxia v. R. Reis

DEDICO

Para  
Aléxia e Reginaldo

OFEREÇO

## AGRADECIMENTOS

Sempre temos o que agradecer, pelo fôlego da vida, pelo Dom de Deus, pela oportunidade única de viver melhor a cada dia evitando os erros do dia anterior e valorizando as pessoas a nossa volta que, direta ou indiretamente, ajudam em nossa jornada

Meus agradecimentos:

Ao meu pai José Reginaldo “Naldinho”, pelo apoio, pelo incentivo de continuar, mesmo nas horas de grandes dificuldades, pelo amor e carinho.

As minhas irmãs Tati, Lu e Dri pela amizade e incentivo, em especial a Dri pelo “auxílio moradia” durante o experimento.

A minha filha “Baixinha” Aléxia pela fonte de inspiração e amor incondicional.

A minha saudosa mãe Eloísa que mesmo distante me acompanha e está muito feliz com minhas vitórias.

Aos demais familiares que, de maneira direta ou indireta, colaboraram para a realização deste sonho.

A Universidade Federal de Viçosa, pela oportunidade oferecida para a realização do curso.

A EMBRAPA, Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo, unidade de Sete Lagoas-MG, pela oportunidade de realização dos trabalhos de campo.

A CAPES, pelo auxílio financeiro ao longo do curso.

Ao professor Dr. Luciano Baião Vieira pela orientação, amizade, ensinamentos e estímulos;

Ao pesquisador Dr. Evandro Chartuni Mantovani, pelos conselhos, orientação, pelos conhecimentos adquiridos, pela oportunidade, pela ajuda no desenvolvimento do trabalho em campo e pela amizade;

Ao professor Dr. Nerilson Terra Santos, pela ajuda durante todo o período do trabalho, pela orientação na parte de estatística e pela amizade;

Ao professores Dr. Daniel Marçal de Queiroz, Dr. Hugo Alberto Ruiz, pelos conhecimentos adquiridos, pelos conselhos e amizade.

Aos funcionários da EMBRAPA/CNPMS pela ajuda durante os trabalhos de campo, em especial ao “Seu Levi”, pela força e ajuda nas retiradas das amostras de solo.

Aos amigos de curso em especial a Arlindo e Alcir, pela companhia e ajuda durante os trabalhos de campo.

Aos colegas da sala de pós-graduação pelos momentos de solidariedade e alegria compartilhados dentro e fora da universidade.

A secretária do curso de pós-graduação da Engenharia Agrícola, Edna, por sua atenção, paciência e amizade.

## **BIOGRAFIA**

LEONARDO RUBIM REIS, filho de José Reginaldo Figueiredo Reis e Eloísa Rubim Reis, nasceu no dia vinte e um de março de 1975, em São Sebastião do Paraíso, M.G.

Em março de 1999, formou-se em Engenharia Agrônômica pela Universidade Federal de Viçosa.

Em setembro de 2002, iniciou o Curso de Mestrado em Engenharia Agrícola, área de concentração em Mecanização Agrícola, na Universidade Federal de Viçosa.

Em fevereiro de 2005, submeteu-se à defesa de tese.

*“Devemos suportar nossas cargas e agir de acordo com as nossas responsabilidades. Só então poderemos chegar a um acordo com a vida e com tudo o que ela traz. Não há atalho, nem droga, nem ritual, nem método de “cinco-minutos-por-dia” para encontrar o caminho verdadeiro. A vida é uma experiência total e a realidade surge do nosso interior.”*

## ÍNDICE

<b>RESUMO.....</b>	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>x</b>
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>2 REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>3</b>
2.1 Agricultura de precisão .....	3
2.2 Geoestatística.....	4
2.2.1 Semivariograma .....	6
2.2.2 Krigagem.....	10
2.2.3 Validação cruzada.....	13
2.3 Condutividade elétrica .....	15
2.3.1 História e usos do mapeamento de condutividade elétrica .....	15
2.3.2 Medida da condutividade elétrica.....	17
2.3.3 Princípio do sistema de quatro pontos .....	17
2.4 Zonas de manejo.....	20
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>22</b>
3.1 Campo experimental .....	22
3.2 Irrigação.....	22
3.3 Medidas da condutividade elétrica do solo (C.E).....	22
3.4 Medidas da umidade das amostras do solo .....	26
3.5 Medidas das propriedades químicas, orgânicas e texturais das amostras do solo.....	26
3.6 Análise Estatística dos dados.....	27
3.7 Zonas de manejo.....	27
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>29</b>
4.1 Análise descritiva dos parâmetros físico-químicos do solo.....	29
4.2 Análise descritiva da condutividade elétrica do Solo .....	29
4.3 Análise da variabilidade espacial da condutividade elétrica .....	31
4.4 Análise da correlação da condutividade elétrica com características físico-químicas do solo. ....	36
4.5 Análise das médias e da correlação entre umidade e medidas de condutividade elétrica ao longo dos dez dias avaliados para os 30 pontos demarcados.....	39
4.6 Definição das zonas de manejo.....	41
<b>5 RESUMO E CONCLUSÕES .....</b>	<b>44</b>
<b>6 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>45</b>
<b>7 APÊNDICE .....</b>	<b>54</b>

## RESUMO

REIS, Leonardo Rubim, M.S. Universidade Federal de Viçosa, fevereiro de 2005.  
**Utilização da condutividade elétrica para estabelecimento de zonas de manejo em um latossolo amarelo-escuro.** Orientador: Luciano Baião Vieira.  
Conselheiros: Evandro Chartuni Mantovani, Daniel Marçal de Queiroz, Nerilson Terra Santos e Hugo Alberto Ruiz

A agricultura nos últimos anos tem passado por mudanças, começando na década de 60 com a revolução verde. Essa mudança nas técnicas agrícolas impõem um novo ritmo para agricultura, assim se torna evidente que o uso de tecnologias está sempre presente e tem um papel relevante para o avanço e crescimento da agricultura. O momento atual é a evolução desse ciclo, com a contribuição da área da eletrônica, informática, sensoriamento remoto e sistema geográfico de informações para o uso de alta tecnologia na produção agrícola. Este trabalho teve por objetivo avaliar o uso da condutividade elétrica do solo como uma ferramenta para elaborar zonas de manejo e assim viabilizar práticas normalmente adotadas em tecnologias de agricultura de precisão. Em uma área experimental do Centro Nacional de Pesquisa Milho e Sorgo – EMBRAPA – no município de Sete Lagoas, MG – com latossolo amarelo escuro, foram marcados e georreferenciados 30 pontos num gride de 22,00 m x 6,00 m, nos quais foram realizadas 10 medições da umidade do solo ao longo do período de 20 dias. No mesmo período foi avaliada a condutividade elétrica do solo, utilizando-se o equipamento Veris 3100. Para o monitoramento da umidade do solo, após a medição da condutividade elétrica, foram retiradas amostras nas profundidades de 0 a 0,15 metros e de 0,15 a 0,30 metros nos 30 pontos demarcados. Para a análise de solo foram retiradas quatro amostras simples num raio de 1,50 metros do ponto central, para formar as amostras compostas, georreferenciado nas profundidades de 0 a 0,15 metros e de 0,15 a 0,30 metros. Foram analisados pH, CTC, teor de argila e matéria orgânica. Não houve correlação entre teor de argila, matéria orgânica com a condutividade elétrica. Por outro lado, entre condutividade elétrica com capacidade de troca catiônica e pH houve correlação satisfatória. Com o uso da geoestatística foi possível detectar e modelar a variabilidade espacial da condutividade elétrica do

solo nas diferentes umidades. Os mapas de condutividade elétrica do solo foram de maneira geral semelhantes para todos os dias, mesmo com a umidade variando, essa característica nos permite usar estes mapas para definição de zonas de manejo.

## ABSTRACT

REIS, Leonardo Rubim, M.S. Universidade Federal de Viçosa, february of 2005.  
**Using electric conductivity to establish management zones in a Yellow Latosol.** Adviser: Luciano Baião Vieira. Committee members: Evandro Chartuni Mantovani, Daniel Marçal de Queiroz, Nerilson Terra Santos and Hugo Alberto Ruiz

Agriculture has been passing through changes in the last years, starting in the decade of 1960, with the green revolution. These changes in agriculture techniques impelled a new rhythm for agriculture, therefore it is evident that the use of technologies is always present and it has a relevant role for agriculture growth. The present moment is the evolution of this cycle, the use of electronics, computer technology, remote sensing and geographical information systems are examples of high technology applied for agricultural production. The objective of this work was to evaluate the use of soil electrical conductivity as a tool to define management zones, therefore improve the potential of general techniques adopted for precision agriculture. The experiments were done in a field that has a Yellow Latosol, at the “Centro Nacional de Pesquisa Milho e Sorgo” – EMBRAPA – in Sete Lagoas, Minas Gerais, Brasil. Thirty points were marked and geo-referenced in the field to create a 22 x 6 meters grid, where it was accomplished 10 measures of soil moisture during 20 days. At the same period, soil electrical conductivity was evaluated, using the Veris 3100 equipment. To monitor soil moisture after electrical conductivity measurements, soil samples were collected at 0,00 to 0,15 m and 0,15 to 0,30 m depths, at the 30 marked points. For soil analysis, it was collected four simple samples in a radius of 1,50 m around the central point, to make each combined sample. They were geo-referenced at 0,00 to 0,15 m and 0,15 to 0,30 m depths. It was analyzed pH, CEC, clay and organic matter content. There was no correlation between clay and organic matter content with electric conductivity. On the other side, between CEC and pH with electric conductivity there was satisfactory correlation. The spatial variability of soil electric conductivity, for distinct levels of soil moisture, was detected and modeled using geo-statistics. The soil electric conductivity maps were, in general, similar for all days, even with variable soil

moisture. This characteristic makes it possible to use these maps to define management zones.

## 1 INTRODUÇÃO

O sistema agrícola é altamente dinâmico no espaço e no tempo e é influenciado por fatores inerentes à planta, ao solo, ao clima e às ações antrópicas. Aliado a isto, a globalização da economia e a necessidade de competitividade têm levado à otimização, cada vez mais necessária, deste sistema.

Uma destas otimizações, associada ao conceito de agricultura de precisão, está relacionada à aplicação de insumos, principalmente agrotóxicos e fertilizantes que, quando aplicados de maneira ineficiente geram problemas ambientais e aumento do custo de produção. A procura da otimização destes bens de produção tem influenciado a busca de novas alternativas tecnológicas e novos conceitos para operacionalização do processo produtivo, aliados à necessidade do manejo de grandes volumes de informações, que variam no espaço e no tempo.

Segundo Lamparelli et al. (2001), dentre estas novas tecnologias encontram-se os avanços da eletrônica e da informática, bem como aquelas ligadas ao geoprocessamento – as chamadas geotecnologias.

A tecnologia inerente à agricultura de precisão baseia-se na coleta de informações sobre produtividade, atributos químicos e físicos dos solos, condições da cultura e do terreno, associando-as a sua localização, as quais, podem ser expressas na forma de mapas digitais. Além disto, estas informações são, geralmente, coletadas em forma de amostragem que, neste caso, apresentam uma dependência espacial, o que exige adequação do seu tratamento estatístico.

Entretanto, a amostragem em uma grade uniforme e pequena a cada 25 m, é economicamente inviável em sistemas produtivos. Os mapas de condutividade elétrica (CE) do solo, apesar de não excluírem a análise de amostras em laboratório, fornecem uma orientação para realizar amostragens pela diferenciação dos mapas de solo.

A obtenção de zonas de manejo permitem a princípio a aplicação racional de insumos de acordo com as reais necessidades de cada zona de manejo minimizando assim os custos de produção e agressão ao meio ambiente e maximizando o rendimento da cultura. Este trabalho teve por objetivo estudar a variabilidade espacial da condutividade elétrica e sua correlação com atributos do solo com o objetivo final de estabelecimento de zonas de manejo diferenciadas obtidas a partir dos mapas de condutividade elétrica.

## **2 REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1 Agricultura de precisão**

O primeiro conceito de agricultura de precisão foi mencionado em 1929, nos Estados Unidos, quando pesquisadores tentaram fazer uma aplicação localizada de calcário, como forma de minimizar o uso deste insumo durante a aplicação (HURN, 1989).

No final do século XX STRAUCH (2002) define a agricultura de precisão como um conjunto de tecnologias capaz de auxiliar o produtor rural a identificar as estratégias a serem adotadas para aumentar a eficiência no gerenciamento da agricultura, maximizando a rentabilidade das colheitas, tornando o agronegócio mais competitivo. Isto possibilita otimizar o uso dos recursos edafoclimáticos e minimizar os insumos utilizados no sistema de produção de um local.

Agricultura de Precisão segundo PIERCE e SADLER, (1997), citados por MARQUES JÚNIOR (1998) e CORÁ (1997), é um conceito baseado em princípios onde os insumos seriam aplicados de acordo com condições localizadas no campo, evitando-se assim excesso ou falta de insumos em locais específicos da área. Ou seja, a correção ou a forma que se passa a interagir com o solo, é de forma “personalizada”, não se visualiza o solo ou corrige-se de forma homogênea, e sim de acordo com a sua situação e necessidade.

BAKSH (1997) considera a agricultura de precisão um promissor método de melhora da produtividade agrícola adequado às necessidades ambientais. Este método consiste na aplicação localizada dos insumos agrícolas em função da necessidade específica de cada região de solo. O talhão é progressivamente dividido em áreas menores com o objetivo de aumentar a produtividade através da identificação de áreas homogêneas em relação à necessidade de nutrientes, disponibilidade de água, tipo de solo, de produção e de declividade. Este conceito se contrapõe ao de que, na agricultura, áreas maiores estão relacionadas a maiores produtividades.

A agricultura de precisão é a tecnologia cujo objetivo consiste em aumentar a eficiência, com base no manejo diferenciado de áreas na agricultura. A tecnologia, que se encontra em constante desenvolvimento, modifica as técnicas existentes e incorpora novas técnicas que fornecem ferramentas aos especialistas em manejo agrícola. Integra, significativamente, a computação, a eletrônica e elevados níveis de controle. Portanto, agricultura de precisão não consiste simplesmente na habilidade em aplicar tratamentos que variam de local para local, porém, ela deve ser considerada como a habilidade em monitorar e assessorar a atividade agrícola, (DIAS et al, 1998).

## **2.2 Geoestatística**

A geoestatística é um tópico especial da estatística aplicada que trata de problemas referentes às variáveis regionalizadas, aquelas que tem comportamento espacial mostrando características intermediárias entre as variáveis verdadeiramente aleatórias e as totalmente determinísticas (LANDIM, 1998).

Métodos clássicos de análise estatística de dados geralmente supõem que, as realizações das variáveis aleatórias são independentes entre si, ou seja, que observações vizinhas não exercem influências umas sobre as outras. Fenômenos naturais apresentam-se freqüentemente com uma certa estruturação nas variações entre vizinhos, desta forma pode-se dizer que as variações não são aleatórias e, portanto, apresentam algum grau de dependência espacial (LANDIM, 1998).

A análise espacial de dados apresenta-se como uma alternativa e/ou como uma complementação da análise clássica de dados, sendo que este tipo de análise considera as correlações entre as observações quando se faz estimativas. A literatura apresenta alguns procedimentos de análise espacial de dados, sendo que, nos últimos tempos, uma metodologia de análise denominada “geoestatística” ganhou ênfase neste tipo de estudo (LANDIM, 1998).

A preocupação com a dependência espacial ou temporal de observações realizadas para um determinado atributo é bastante antiga, sendo comprovado este fato por trabalhos científicos datados do início do século XX. Em algumas áreas da ciência, como a agricultura, a partir da metade do século XX adotou-se a metodologia de análise de dados proposta por Fisher. Esta metodologia considera,

no seu desenvolvimento e aplicação, as seguintes suposições: normalidade da variável, independência de erros e homocedasticidade de variância (homogeneidade de variância).

A normalidade da variável e a homogeneidade de variâncias podem ser testadas facilmente em programas de estatísticas por meio de testes específicos como por exemplo Shapiro-Wilk para normalidade e F máximo de Hartley para homogeneidade de variâncias. Se for observada não normalidade de dados e/ou não homogeneidade de variâncias, procedimento como a transformação de dados pode ser adotada para que a variável atenda estas hipóteses básicas da metodologia de análise não espacial proposta por Fisher.

Já a independência não pode ser testada por métodos simples e a solução deste problema, proposta pela metodologia não espacial, é a repetição e a aleatorização das observações. Esta solução, em muitos casos, não garante a independência entre as observações, isto porque algumas variáveis apresentam forte dependência espacial (autocorrelação entre as observações) que não é desfeita com este procedimento (GUIMARÃES, 2001).

Trabalhando com dados de concentração de ouro, KRIGE (1951) concluiu que somente a informação dada pela variância é insuficiente para explicar o fenômeno em estudo. Para tal, é necessário levar em consideração a distância entre as observações. A partir daí surgiu o conceito da geoestatística, que leva em consideração a localização geográfica e a dependência espacial.

A teoria das variáveis regionalizadas, também denominada geoestatística por sua aplicação nos estudos de Geologia e Mineralogia, foi um importante passo no conhecimento humano. Segundo GUERRA (1988), entende-se como variáveis regionalizadas, uma função que varia de um lugar a outro no espaço com certa aparência de continuidade. São variáveis cujos valores estão relacionados de algum modo com a posição espacial que ocupam. Os fundamentos teóricos da geoestatística podem ser encontrados nos trabalhos desenvolvidos por MATHERON (1963) e MATHERON (1971).

A análise espacial de dados, utilizando a geoestatística, ganhou impulso em áreas diferentes da mineração e da geologia a partir de 1980, com grande

aplicabilidade na ciência do solo. Uma justificativa para tal fato é a facilidade computacional que viabilizou alguns cálculos relativamente trabalhosos nesta metodologia. No Brasil destaca-se trabalho pioneiro nesta área desenvolvido pelos pesquisadores Sidney Rosa Vieira, Paulo Libardi e Klaus Reichardt ainda na década de 80. Atualmente a aplicabilidade e a utilização da geoestatística como metodologia de análise de dados no espaço ou no tempo está difundida em vários ramos da ciência, envolvendo áreas de ciências humanas, biológicas e exatas.

Em linhas gerais podemos dizer que a geoestatística está interessada em determinar a dependência espacial das observações de uma variável e recebeu tal denominação devido aos trabalhos desenvolvidos por Krige na África do Sul. Este pesquisador é homenageado com o nome do método de interpolação utilizado na geoestatística, a krigagem.

A teoria fundamental da geoestatística é a esperança de que, na média, as amostras próximas no tempo e espaço sejam mais similares entre si do que as que estiverem distantes (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989).

### **2.2.1 Semivariograma**

Alguns métodos estimadores da autocorrelação espacial usados como ferramentas de continuidade espacial são o variograma ou semivariograma, o covariograma e o correlograma. Essas ferramentas são usadas para investigar a magnitude da correlação entre as amostras e sua similaridade ou não, com a distância.

Segundo GUERRA (1988), ocorrem três tipos de semivariogramas: observado ou experimental (obtido a partir das amostras colhidas no campo), verdadeiro (real, mas desconhecido) e teórico (de referência, utilizado para o ajuste do modelo).

As definições teóricas dessas ferramentas são baseadas na Teoria das Funções Aleatórias (JOURNEL & HUIJBREGTS, 1978; ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989 e BRAGA, 1990), que apresenta a estimativa experimental dessas estatísticas. Supondo que  $Z(x)$  represente o valor da variável para o local  $x$ , onde  $x$  é o vetor  $(x,y)$  e  $Z(x+h)$  representa o valor da mesma variável para alguma distância  $h$  (ou "lag"), em qualquer direção. O variograma resume a continuidade

especial para todos os pareamentos (comparação de dois valores) e para todos os  $h$  significativos.

A dependência espacial é analisada, segundo ISAACS & SRIVASTAVA (1989), mostrada na equação 1.

$$y(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [z_{(x_i)} - z_{(x_i+h)}]^2 \quad (1)$$

Em que  $y(h)$  é o valor do semivariograma estimado para a distância  $h$ ,  $N(h)$  é o número de pares de valores medidos,  $x$  é a medida de posição,  $h$  é a distância entre medições e  $Z_{(x_i)}$ ,  $Z_{(x_i+h)}$ , separado pela distância  $h$ , se a variável for escalar.

O gráfico de  $y(h)$  versus os valores correspondentes de  $h$ , chamado semivariogramas, é uma função do vetor  $h$  e, portanto depende de ambos, magnitude e direção de  $h$ . Modelos matemáticos devem ser ajustados aos semivariogramas, os quais permitem visualizar a natureza da variação espacial das variáveis estudadas, além de serem necessários para outras aplicações, como por exemplo, krigagem.

A análise e o ajuste do semivariograma experimental a um teórico denomina-se Análise Estrutural, que pode ser representado pela figura 1.

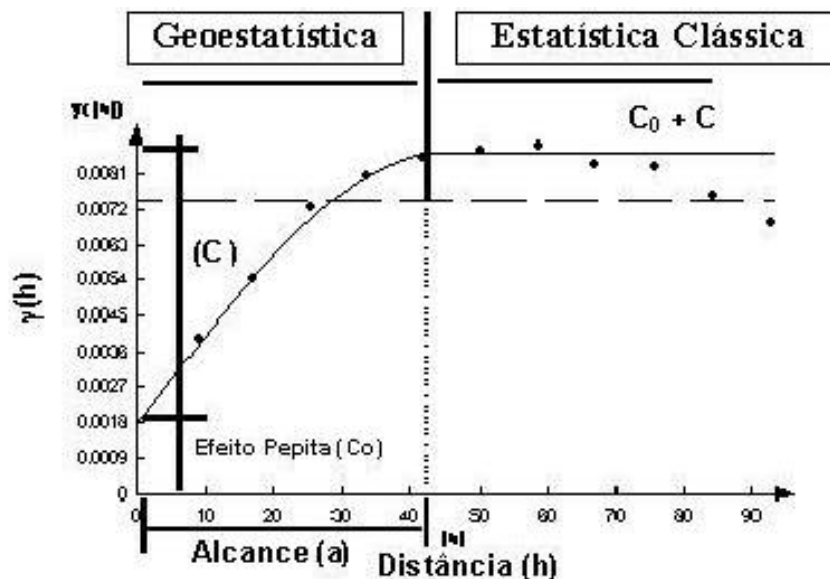


Figura 1. Exemplo de semivariograma e seus componentes.

Em que  $y(h)$  é a semivariância,  $h$  é a distância,  $C_0$  é o efeito pepita,  $C$  é a semivariância estrutural ou espacial,  $C+C_0$  é o patamar ou soleira e  $a$  é o alcance.

O Efeito Pepita ( $C_0$ ) corresponde à cota do ponto onde o semivariograma corta o eixo das ordenadas. Segundo VALENTE (1989), este ponto reflete as microestruturas não captadas pela menor escala da amostragem, erros de amostragem, de análises laboratoriais, etc.

O Alcance ( $a$ ) corresponde ao conceito da Zona de Influência ou de Dependência Espacial de uma amostra, marcando a distância a partir da qual as amostras tornam-se independentes (GUERRA, 1988).

O Patamar ( $C+C_0$ ) corresponde ao ponto onde toda semivariância da amostra é de influência aleatória, correspondendo à variância total ( $S^2$ ) obtida pela estatística clássica (TRANGMAR et al., 1985). Quando o Efeito Pepita ( $C_0$ ) for aproximadamente igual ao Patamar ( $C+C_0$ ), denomina-se Efeito Pepita Puro demonstrando que a amostra não recebe influência espacial (TRANGMAR et al., 1985).

Os seguintes modelos matemáticos são alguns de uma série de modelos que podem ser ajustados a semivariogramas experimentais:

a) Modelo esférico:

$$y(h) = C_0 + C \left[ \frac{3}{2} \left( \frac{h}{a} \right) - \frac{1}{2} \left( \frac{h}{a} \right)^3 \right], \quad 0 < h < a;$$

$$y(h) = (C_0 + C), h \geq a \quad (2)$$

b) Modelo exponencial:

$$y(h) = C_0 + C \left[ 1 - \exp \left( -3 \left( \frac{h}{a} \right) \right) \right], \quad 0 < h < d; \quad (3)$$

Em que  $d$  é a máxima distância na qual o semivariograma é definido

c) Modelo gaussiano

$$y(h) = C_0 + C \left[ 1 - \exp \left( -3 \left( \frac{h}{a} \right)^2 \right) \right], \quad 0 < h < d \quad (4)$$

Para os três modelos citados,  $C_0$  é o efeito pepita,  $C_0 + C$  é o patamar e  $a$  é o alcance do semivariograma.

Ainda, TRANGMAR et al. (1985) sugeriram o uso da % da semivariância do Efeito Pepita para mensurar a dependência espacial, sendo que CAMBARDELLA et al. (1994) (Equação 5) propuseram os seguintes intervalos para avaliar a % da semivariância do Efeito Pepita:

- 25% - forte dependência espacial;
- entre 25% e 75% - moderada dependência espacial e;
- 75% - fraca dependência espacial, denominado de IDE (Índice de Dependência Espacial):

$$IDE = \frac{C_0}{C + C_0} \cdot 100 \quad (5)$$

ZIMBACK (2001) propôs a inversão dos fatores, como visto na equação 6:

$$IDE = \frac{C}{C + C_0} \cdot 100 \quad (6)$$

Sendo a dependência espacial fraca para valores < 25%; entre 25% e 75%, moderada e > 75% dependência forte.

Os semivariogramas expressam o comportamento espacial da variável regionalizada ou de seus resíduos e mostra o tamanho da zona de influência em torno de uma amostra, a variação nas diferentes direções do terreno e mostrando também continuidade da característica estudada no terreno (LANDIM, 1998).

A escolha do modelo de semivariograma que será utilizado é um dos aspectos mais importantes da geoestatística. Todos os cálculos da geoestatística dependem do modelo de semivariograma ajustado e, conseqüentemente, se o modelo ajustado estiver incorreto, todos os cálculos seguintes também estarão incorretos, portanto o ajuste de semivariograma é uma fase crucial na análise geoestatística e deve receber uma atenção especial.

Vários métodos são utilizados para verificar a qualidade do ajuste do semivariograma aos dados experimentais. VIEIRA et al (1983) sugerem o método de ajuste por tentativa e erro (ajuste a critério do observador) associado a avaliação do modelo pela técnica de validação cruzada ou autovalidação (“jack-Knifing”). MACBRATNEY e WEBSTER (1986) sugerem o método do Critério de Informação de Akaike (AIC) para avaliar o modelo. Já PANNATIER (1996) sugere a utilização do Índice de Ajuste (IGF).

A descrição de cada método de seleção pode ser encontrado nos respectivos trabalhos originais dos autores e cada programa de análise geoestatística de dados apresenta um critério de seleção. O programa GS+ aplica a metodologia dos mínimos quadrados para os ajustes dos modelos e utiliza como critérios para seleção do modelo: I) o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), que, lembrando os conceitos de análise de regressão, é uma relação entre a soma de quadrados devido ao modelo ajustado e a soma de quadrados total (mede a variação dos dados devido ao modelo ajustado em relação à variação total dos dados) e quanto mais próximo do valor um estiver o valor de  $R^2$  melhor será o modelo ajustado; II) Soma de quadrados de resíduos (SQR) – quanto menor for este valor, melhor será o modelo de semivariograma. O GS+ utiliza este resultado para a seleção do modelo e, por meio de combinações dos parâmetros do modelo, minimiza esta soma de quadrados de resíduos. O autor do programa alega que a utilização desse critério na seleção do modelo é preferido, por ser este mais sensível e mais robusto quando comparado com o coeficiente de determinação ( $R^2$ ).

### **2.2.2 Krigagem**

O semivariograma é a ferramenta da geoestatística que permite verificar e modelar a dependência espacial de uma variável. Uma aplicação imediata do semivariograma é a utilização das informações geradas por ele na interpolação, ou seja, na estimativa de dados e posterior mapeamento da variável. O interpolador que utiliza o semivariograma em sua modelagem é chamado de krigagem.

O termo “Krigagem” foi usado por Matheron, em 1965, em homenagem ao Engenheiro de Minas Sul-Africano Daniel G. Krige, que primeiro formulou e

implementou essa forma de interpolação, em 1951. A Krigagem pode ser usada em variáveis discretas e contínuas e é, por isso, sensível para a estimação de variáveis binárias na presença ou ausência da característica estudada (ROSSI et al., 1994).

A krigagem é um processo que estima valores de variáveis espacialmente distribuídas a partir de valores adjacentes interdependentes considerando todos os principais fatores necessários para se ter uma boa acurácia. Como os métodos tradicionais de interpolação de pontos (como a ponderação da distância inversa, a triangulação e a média das amostras locais), a krigagem pode fornecer a estimativa para um local específico. Frequentemente, os métodos tradicionais podem ser tão acurados mas consomem muito mais tempo do que a Krigagem (ISAACS & SRIVASTAVA, 1989).

LANDIM (1998) descreve a Krigagem como uma série de técnicas de análise de regressão que procura minimizar a variância da estimativa, a partir de um modelo prévio, que leva em conta a dependência estocástica entre os dados distribuídos no espaço. Segundo ROSSI et al. (1994), três características da krigagem a distinguem dos outros métodos de interpolação. Primeiro, a krigagem pode fornecer uma estimativa que é maior ou menor do que os valores da amostra, sendo que as técnicas tradicionais estão restritas a faixa de variação das amostras. Segundo, enquanto os métodos tradicionais usam distâncias Euclidianas para avaliar as amostras, a krigagem tem vantagem de usar a distância e a geometria (relação de anisotropia) entre as amostras. Terceiro, diferentemente dos métodos tradicionais, a krigagem leva em conta a minimização da variância do erro esperado, por meio de um modelo empírico da continuidade espacial existente ou do grau de dependência espacial com a distância ou direção, isto é, através do variograma, covariograma ou correlograma.

Para a aplicação da krigagem assume-se: que sejam conhecidas as realizações  $Z(t_1)$ ,  $Z(t_2)$ , ...,  $Z(t_n)$  da variável  $Z(t)$ , nos locais  $t_1$ ,  $t_2$ , ...,  $t_n$ ; que o semivariograma da variável já tenha sido determinado; e que o interesse seja estimar um valor  $Z^*$  na posição  $t_0$ .

O valor estimado  $Z^*(t_0)$  é calculado pela equação 7:

$$Z(t_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i Z(t_i) \quad (7)$$

Em que:  $n$  é o número de amostras de  $Z(t)$  envolvidas na estimativa de  $Z(t_0)$ , e  $\lambda_i$  são os pesos associados a cada valor medido,  $Z(t_i)$ .

A melhor estimativa de  $Z^*(t_0)$  é obtida quando:

a) o estimador é não tendencioso, equação 8

$$E \{Z^*(t_0) - Z(t_0)\} = 0 \quad (8)$$

b) a variância da estimativa é mínima, equação 9

$$\text{Var} [Z(t_0) - Z(t_i)] = \text{mínimo} \quad (9)$$

Para que  $Z^*$  seja uma estimativa não tendenciosa de  $Z$ , a soma dos pesos das amostras tem que se igualar a 1 (Equação 10).

$$\sum \lambda_t = 1 \quad (10)$$

E para obter a variância mínima sob a condição de  $\sum \lambda_t = 1$ , introduz-se o multiplicador de Lagrange para a dedução das equações e o sistema de krigagem resultante é visto na equação 11.

$$\sum_{i=1}^n \lambda_t \gamma(t_i, t_j) + \mu = \gamma(t_i, t_j); \quad (11)$$

Em que:  $m$  é o multiplicador de Lagrange.

A variância de estimativa é calculada a partir da equação 12:

$$\sigma_E^2 = \mu + \sum \lambda_i \gamma(t_i, t_0) \quad (12)$$

O sistema de equações da krigagem contém n+1 equações e n+1 incógnitas e uma única solução produz n pesos e um multiplicador de Lagrange .

### 2.2.3 Validação cruzada

Para a comparação dos métodos de interpolação alguns critérios são utilizados, como por exemplo: quadrado médio do erro (WARRICK et al., 1988), quadrado da soma dos erros (LASLETT et al., 1987) e coeficiente de correlação entre os valores observados e estimados obtidos pela Validação Cruzada (cross-validation) proposta por LEENAERS et al. (1990).

Com toda a subjetividade e variabilidade de resultados nos cálculos dos parâmetros do variograma, é importante que se tenha um meio para checar se o modelo ajustado é satisfatório ou não (DAVID, 1988), bem como para validar o plano de Krigagem antes do seu uso na construção de mapas.

O método da reutilização da amostra utilizado por SCHUCANY (1981) que tem o propósito de predição de locais não amostrados, foi empregado por GEISSER (1975) pela primeira vez.

Mais tarde, DAVIS (1987) descreveu o método de “deixar um dado de fora” (leavingone-out), ressaltando a diferença da validação cruzada com outro método, muito confundido em inúmeros trabalhos, que tem função distinta que é o “Jackknife”.

É muito importante destacar as diferenças entre os dois métodos: validação cruzada é um método de verificação dos dados estimados e “Jackknife” é um estimador introduzido por Quenouille, em 1956, para reduzir a tendência; sendo que Tukey, em 1958, estendeu o seu uso para construir o intervalo de confiança da amostra (DAVIS, 1987).

O processo de validação cruzada, de acordo com MYERS (1997), é bastante simples: 1) Remove-se um dado do conjunto de dados amostrais e,

usando-se um estimador e função ponderada relacionada com a distância, estima-se o valor retirado, utilizando-se as amostras remanescentes. 2) O erro da estimação é então calculado pela diferença entre o valor real e o estimado, sendo repetido para cada local amostrado.

O módulo de validação cruzada do programa GS+ (GS+, 2000) avalia o ajuste pelo método do quadrado mínimo, descrito em uma equação de regressão linear, sendo o erro padrão da estimação definido pela equação 13:

$$DP\ est. = DP\ real. (1 - R^2)^{0,5} \quad (13)$$

Em que DP est. é o desvio padrão da estimação, DP real é o desvio padrão dados atuais,  $R^2$  é o coeficiente de determinação.

O erro padrão de estimação avalia quantitativamente o ajuste do variograma e os erros dele decorrentes na krigagem, utilizando-se dos conceitos definidos por DAVIS (1987).

Um fator que afeta o cálculo de precisão do método de interpolação é o número de amostragens vizinhas usadas para a estimação (GOOVAERTS, 1997). O raio de pesquisa onde serão avaliadas as amostras, também, é muito importante para uma boa estimação e, conseqüentemente, uma boa validação, como o definido por KANE et al. (1982).

Deve ser ressaltado que, a estimação do valor depende do modelo variográfico escolhido, aquele que teve o melhor ajuste (ISAACS & SRIVASTAVA, 1989). Alguns autores descreveram o emprego e vantagens da validação cruzada sobre outros métodos na avaliação do ajuste do modelo do semivariograma e na exatidão da Krigagem, entre eles: DUNN (1983), AGTERBERG (1984) e DAVIS (1986), HAMLETT et al. (1986), DAVID (1988), GUERRA (1988), ISAACS & SRIVASTAVA (1989) e GOOVAERTS (1999).

## **2.3 Condutividade elétrica**

### **2.3.1 História e usos do mapeamento de condutividade elétrica**

Os métodos de sondagem geofísica que medem diferenças em condutividade elétrica (CE) estimada, são usados desde os anos 70 para mapear características geológicas.

As aplicações práticas incluem determinação do tipo e profundidade das rochas, posição de agregado e sedimentos de argila, medida de extensão do lençol freático, salinidade, detecção de contaminação em lençol freático, posição de áreas geotérmicas, e caracterização de sítios arqueológicos. Mais recentemente, mapeamento da CE tem sido útil em diagnosticar problemas de salinidade relacionados em solos irrigados no norte das Grandes Planícies. Pesquisadores dos Estados Unidos, no sudoeste, também usaram CE para medir ou estimar outras substâncias químicas e propriedades físicas de solos não salinos, incluindo teor de água, conteúdo de argila, capacidade de troca de cátions, Ca e Mg trocável, profundidade da camada de argila, matéria orgânica e comportamento de herbicida no solo, (LUND et al. 1999).

Os agricultores praticantes da agricultura de precisão, agora podem coletar informações mais detalhadas sobre as operações agrícolas. Além de mapas de produtividade e limite de atributo no campo, novos sensores eletrônicos, mecânicos e químicos estão sendo desenvolvidos para medir e mapear propriedades dos solos.

A medida da condutividade elétrica do solo é simples e rápida disponível para os agricultores adeptos a agricultura de precisão. A medição da condutividade elétrica do solo baseada em sensores tem sido usada para descrever a variabilidade das propriedades físicas e químicas do campo (SUDDTH et al., 2002), e tem sido também correlacionado com variações no rendimento da cultura (KITCHEN et al., 1999). Em aplicações tradicionais de agricultura de precisão, a variabilidade da fertilidade do solo tem sido caracterizada por gride de amostragem de solo e análises de laboratório. Esses procedimentos são caros, consomem tempo e fornecem resolução relativamente baixa. Métodos que podem estimar essas propriedades do solo mais eficientemente seriam vantajosos.

Medidas da condutividade elétrica referenciada com GPS em tempo real, estão sendo usadas para delinear zonas baseadas nas propriedades do solo, que afetam o rendimento da cultura (SUDDUTH et al., 1996; JONHSON et al., 2001). A medição espacial da condutividade pode, quando adequadamente calibrada, fornecer indicadores dos parâmetros do solo importantes para o manejo de culturas.

Múltiplos fatores contribuem para a variação da condutividade elétrica, fatores que afetam a quantidade e a retenção de água no solo (ex. densidade, estrutura, potencial de água, umidade do solo), agregados do solo (ex. agentes cimentantes como argila e matéria orgânica e a estrutura do solo), eletrólitos na água do solo (ex. salinidade, íons trocáveis, pH, temperatura do solo) e a condutividade da fase do mineral (tipo e quantidade de mineral, grau de substituição isomórfica e íons trocáveis) (DOOLITTLE et al., 1994; JONHSON et al., 2001; SUDDUTH et al., 2001; RHOADES et al., 1989; HARTSOCK et al. 2000; MCNEILL, 1980). Para cada tipo de solos, um ou mais destes fatores influenciará na medida da condutividade elétrica. Pesquisas estão sendo dirigidas para entender as relações local-específicas entre condutividade elétrica do solo e esses fatores que contribuem para a sua medida, inclusive umidade (KHAKURAL e ROBERT, 1998; SHEETS e HENDRICKX, 1995; KACHANOSKI et al., 1988), salinidade (LESCH et al., 1992; RHOADES e CORWIN, 1981; RHOADES e INGVALSON, 1971), e salinidade e conteúdo de argila (WILLIAMS e HOEY, 1987).

A condutividade correlaciona fortemente com granulometria e textura do solo (WILLIAMS & HOEY, 1987), pois areia tem uma baixa condutividade, silte tem uma condutividade média e argila tem alta condutividade (LUND et al., 1999). A resposta da condutividade na presença de argila tem sido usada com precisão para prever a profundidade do solo e camadas de argila por DOOLITTLE *et al.*(1994) e JAYNES (1996).

Em áreas com baixa salinidade a variação espacial do teor de água, freqüentemente, é o fator determinante para a condutividade elétrica. SHEETS e HENDRICKX (1995) mediram a condutividade elétrica ao longo de 1950 metros de

solo, por um período de 16 meses, e encontraram uma correlação linear entre condutividade elétrica e a quantidade de água existente no perfil do solo.

Excesso de sais dissolvidos no solo é prontamente detectado pela condutividade elétrica (KITCHEN *et al.*, 1996). A presença de salinidade a níveis de interesse agrônômico é usualmente evidenciada pelas leituras de condutividade mais altas do que aquelas obtidas em solos não salinos.

### **2.3.2 Medida da condutividade elétrica**

Existem duas técnicas usadas para medir a condutividade elétrica do solo: indução de campo eletromagnético (contato indireto) medido pelo equipamento EM 38, e pelo contato direto dos elétrodos com o solo, como o equipamento Veris modelo 3100. As sondagens de EM são conduzidas introduzindo energia eletromagnética em materiais geológicos usando uma corrente acima da superfície da Terra, não havendo contato físico. Um sensor no dispositivo mede o campo eletromagnético resultante que esta corrente induz. A força deste campo eletromagnético secundário é diretamente proporcional à condutividade elétrica do solo.

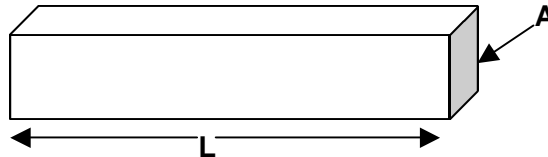
O método de contato direto baseia-se em quatro elétrodos de metal, que penetram na superfície do solo transmitindo uma corrente elétrica. A profundidade em que é medida a condutividade elétrica depende do espaçamento desses eletrodos.

### **2.3.3 Princípio do sistema de quatro pontos**

A maneira geral de medir a resistividade elétrica é usar uma amostra de forma retangular de dimensões conhecidas (Figura 2), utilizando a relação da equação 14:

$$R = \rho \cdot \left( \frac{L}{A} \right) \quad (14)$$

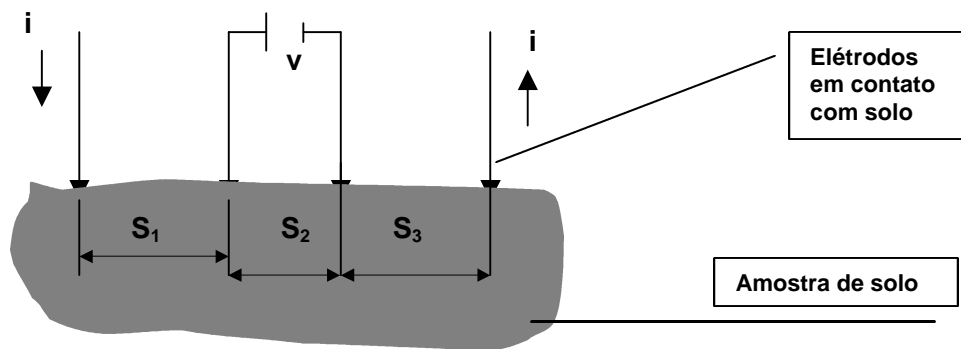
Em que,  $R$  é a resistência elétrica em ohms,  $\rho$  é a resistividade elétrica do material em ohms,  $L$  é o comprimento da amostra em centímetro e  $A$  é a área da seção transversal da amostra em  $\text{cm}^2$ .



**Figura 2.** Amostra retangular de forma conhecida

Uma vez conhecida a resistência elétrica  $R$ , através da aplicação de uma tensão  $V$  (volts) com uma determinada corrente elétrica  $i$  (ampéres), segundo a expressão  $V=R.i$  e conhecendo-se as dimensões  $L$  e  $A$ , tem-se a resistividade  $\rho$  da amostra em questão.

Para mensurar a resistividade de uma amostra de solo, pode-se usar o mesmo procedimento. Porém, em situações de campo este não é um método prático. Para mensuração da resistividade elétrica em amostras não uniformes e de dimensões não definidas, aplica-se um processo usual em geofísica conhecido como “sistema de quatro pontos”. Este método emprega quatro hastes de material condutor de corrente elétrica, alinhados geometricamente (Figura 3).



**Figura 3.** Esquema do modelo de quatro pontos para medir a resistividade elétrica.

Uma corrente elétrica é aplicada entre as hastes mais extremas e a tensão é medida entre as duas mais internas. A resistividade pode então ser calculada pela equação 15:

$$\rho = \frac{2\pi \left( \frac{V}{I} \right)}{\left[ \frac{1}{S_1} + \frac{1}{S_3} - \frac{1}{(S_1 + S_2)} - \frac{1}{(S_2 + S_3)} \right]} \quad (15)$$

Em que V é a tensão aplicada (volts), I é a corrente aplicada (ampére), S<sub>1</sub>, S<sub>2</sub> e S<sub>3</sub> são as distâncias entre os elétrodos (centímetro).

Em um caso particular se S<sub>1</sub> = S<sub>2</sub> = S<sub>3</sub> = S, a equação 15 pode ser simplificada, equação 16:

$$\rho = 2\pi S \left( \frac{V}{i} \right) \quad (16)$$

Em que S é a distância, V é a tensão aplicada (volts) e i é a corrente aplicada (ampére).

Medido o valor da tensão e conhecidas a corrente aplicada e as distâncias entre os elétrodos, através da equação 15 ou 16 tem-se o respectivo valor de resistividade da região entre os elétrodos internos.

A distância S<sub>2</sub> entre os elétrodos internos é correlacionada com a profundidade da região em que se deseja medir a resistividade. Esta região pode ser descrita como uma semicircunferência de raio S<sub>2</sub>/2, situada abaixo da linha de superfície.

Alternativamente, isto pode ser expresso em termos de condutância (C = 1/R (Resistência elétrica), unidade; ohm<sup>-1</sup> = siemens) e condutividade (X = 1/ρ, unidade; ohm<sup>-1</sup> m<sup>-1</sup> = (siemens) Sm<sup>-1</sup>): A equação 17 é para medir a condutividade elétrica (C.E).

$$\chi = \frac{1}{(2\pi \cdot SR)} = \frac{I}{(2\pi \cdot SV)} \quad (17)$$

Em que X é a condutividade elétrica (S/m), S é a distancia em metros e R é a resistência elétrica em ohm (Ω).

## **2.4 Zonas de manejo**

Zona de manejo é uma região que apresenta uniformidade quanto às principais características que afetam a produtividade, permitindo que, dentro dela, as práticas agrônômicas possam ser uniformizadas, gerando resultados semelhantes. A definição das zonas de manejo é o primeiro e fundamental passo para a adoção de técnicas de agricultura de precisão. A partir dela, a estratégia de amostragem de solo ou a identificação de aspectos limitantes devem ser direcionadas. É com esta abordagem que produtores europeus e norte-americanos estão tendo mais sucesso em agricultura de precisão (GEOSAT,2004).

O delineamento das zonas de manejo é simplesmente uma maneira de classificar a variabilidade espacial dentro de um campo, Tabela 1. Para ser bem sucedido, a estratégia de delineamento precisa ser baseada em uma causa verdadeira e uma relação efetiva entre características do solo e rendimento da cultura (DOERGE et al, 1999).

O solo é um sistema complexo onde sua qualidade, segundo VEZZANI (2001), é considerada alta quando a interação entre os subsistemas minerais, plantas e microorganismos estão organizados em nível alto de ordem. Como a interação entre as características químicas, físicas e biológicas não são constantes em todos os pontos de uma lavoura, isso pode refletir nas diferenças de produtividade dentro de uma propriedade.

Haja vista a heterogeneidade na área objetiva-se com ferramentas de Agricultura de Precisão, como mapas de produtividade, definir diferentes zonas de manejo a fim de otimizar a produção através de intervenções que levem em conta as necessidades e potencialidades de cada zona (SCHENATO, 2003).

**Tabela 1.** Tipos de características locais em que as zonas de manejo em agricultura de precisão podem ser baseadas.

Tipo de característica local	Exemplos
Quantitativa, estável	Elevação/topografia, matéria orgânica do solo, pH ou carbonato de cálcio, condutividade elétrica do solo, propriedades hidrológicas
Quantitativa, dinâmica	Densidade e distribuição de plantas daninhas, umidade ou salinidade do solo
Qualitativa, estável	Cor do solo, nutrientes imóveis (P, K), condição de drenagem
Intuitivo, histórico	Conhecimento do agricultor das características do solo, qualidade do solo, rotação de culturas, características do sub-solo.

Fonte : Site-Specific Management Guide-30

### **3 MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1 Campo experimental**

O experimento foi desenvolvido em uma área de 7.000 metros quadrados (0,70 ha) Embrapa Milho e Sorgo, Sete Lagoas, Minas Gerais, às margens da rodovia MG 424, km 65, coordenadas geográficas 19<sup>0</sup>28' Latitude sul, 44<sup>0</sup>15'08" Longitude W GrW. O clima da região segundo Koopen, é do tipo AW, clima de savana com inverno seco, temperatura média 22,9 °C e o relevo plano ondulado. O solo da área experimental foi classificado de acordo com EMBRAPA (1999), como sendo Latossolo Amarelo Escuro.

Os pontos para amostragem de solo foram demarcados em um gride de 22,00 x 6,00 m. Um total de 30 pontos foram demarcados. Para o georreferenciamento da área e dos pontos de amostragem foi utilizado um aparelho de GPS, marca Trimble, modelo PRO XRS.

#### **3.2 Irrigação**

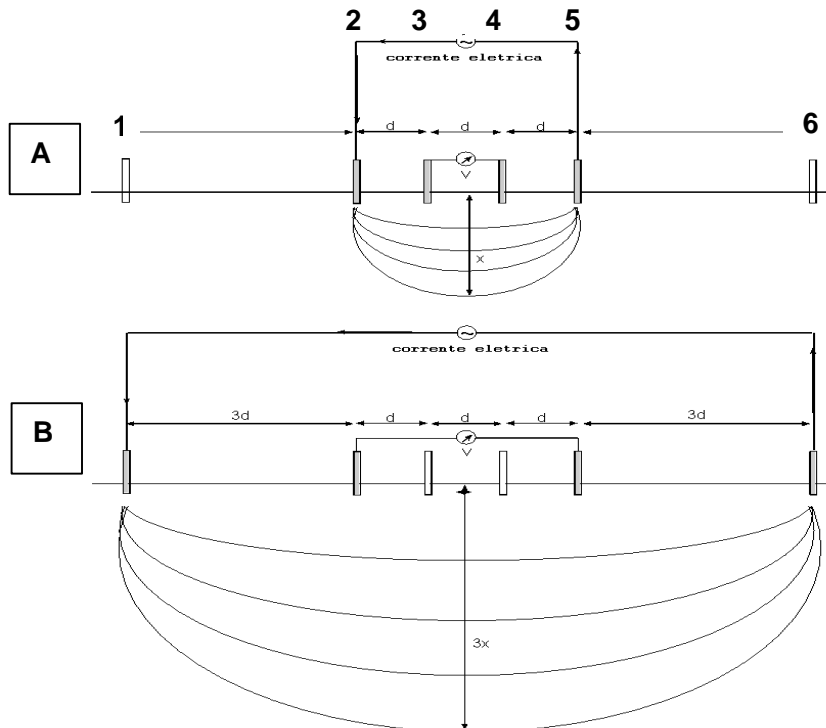
Foi feita uma irrigação com intuito de se atingir a capacidade de campo para o começo do trabalho. O turno de rega teve uma duração de quatro horas.

#### **3.3 Medidas da condutividade elétrica do solo (C.E)**

As medidas de condutividade elétrica para toda área foram feitas utilizando-se o sensor de mapeamento de condutividade elétrica modelo Veris 3100, acoplado a um trator MF 290 4x4, (Figura 7). A marcha utilizada foi segunda simples a 1.600 rpm, que correspondia a 10 km/h.

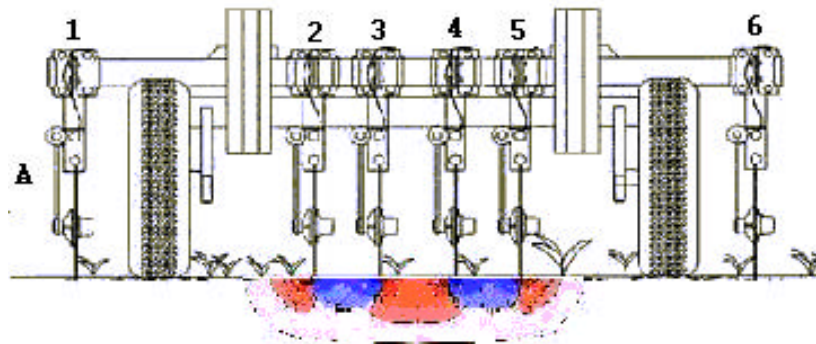
O sistema de mapeamento de condutividade elétrica fabricado pela Veristech<sup>®</sup>, modelo Veris 3100 (Figuras 4, 5 e 6) usa três pares de elétrodos em formas de discos, para determinar a condutividade elétrica do solo. Os discos penetram a superfície do solo a uma profundidade de 6 cm. Um par de elétrodos tem a função de transmitir a corrente elétrica no solo, enquanto os outros dois pares coletam diferenças na corrente elétrica transmitida devido a sua transmissão pelo solo (resistência). A profundidade de medida é baseada no espaçamento dos

discos. O par central de discos capta a resistência entre profundidades de 0,00 a 30,00 cm, enquanto o par externo capta entre 0,00 a 90,00 cm. Os dados de condutividade elétrica do sensor, refletem a conversão da resistência em condutividade ( $1/\text{resistência} = \text{condutância}$ ). O sistema trabalha com duas configurações, (A) rasa e (B) profunda.

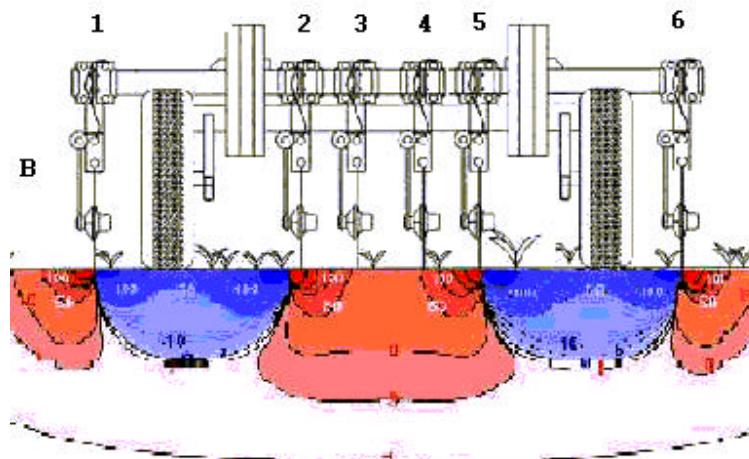


**Figura 4.** Esquema de leitura do equipamento utilizado, A (rasa), B (profunda). **Fonte:** Preliminary results with the VERIS soil electrical conductivity instrument. Australian Centre for Precision Agriculture.

Configuração **A** usa os quatro discos internos (2, 3, 4 e 5). A tensão é medida entre os dois discos internos (3 e 4) que são separados por  $d$ . Na configuração **B** os quatro discos externos (1, 2, 5 e 6) são usados e a tensão é medida entre discos 2 e 5. Quando os elétrodos (discos) são separados por  $d$  metros a condutividade é medida para uma profundidade de aproximadamente  $1.5 \cdot d$  metros.



**Figura 5.** Configuração de 0-30 cm, é alcançada usando discos 2, 3, 4 e 5. **Fonte:** Preliminary results with the VERIS soil electrical conductivity instrument. Australian Centre for Precision Agriculture.



**Figura 6.** Configuração de 0-90 cm, é alcançada usando discos 1, 2, 5 e 6. **Fonte:** Preliminary results with the VERIS soil electrical conductivity instrument. Australian Centre for Precision Agriculture.

Foram colocados dois lastros no Veris um do lado direito e outro do lado esquerdo, para propiciar um maior contato dos discos com o solo, Figura 8, como pode ser observado na Figura 9, os sulcos formados pelos discos de leituras.



Figura 7. Sensor de mapeamento de condutividade elétrica modelo Veris 3100 acoplado ao trator na área experimental.



Figura 8. Foto do sensor de mapeamento de condutividade elétrica com lastro



Figura 9. Detalhe do solo após passagem do sensor.

O sensor de mapeamento de condutividade elétrica foi configurado para gravar os dados, em um intervalo de 1s, e com profundidades de leitura de 0,00 a 30,00 cm e 0,00 a 90,00 cm. Os dados foram armazenados juntos com as coordenadas dos pontos pois o receptor Ag-DGPS 114 da Trimble® (TRIMBLE, 2001) estava conectado ao Veris.

Os dados do GPS foram corrigidos usando o programa específico Pathfinder Office 2.70 da TRIMBLE, e os arquivos de base para correção foram da estação do IBGE localizada em Belo Horizonte.

De posse dos dados de condutividade elétrica e das coordenadas dos pontos, exportadas do Pathfinder para o Excel, foi feito o mapa de isolinhas e o estudo da variabilidade espacial da condutividade elétrica no solo usando o programa de geoestatística GS + for Windows, versão 3.1.

#### **3.4 Medidas da umidade das amostras do solo**

Após cada passada do Veris na área, foram coletadas amostras de solo nos pontos demarcados no gride, com o trado tipo holandês, nas profundidades de 0 a 15,0 cm e de 15,0 a 30,0 cm para determinação da umidade. As amostras foram cuidadosamente armazenadas em recipientes de alumínio e vedadas para posterior determinação da umidade atual do solo. Utilizou-se o método da estufa a 105<sup>0</sup>C por 48 horas, de acordo com o manual de métodos de análise de solo da EMBRAPA. Usando uma balança de precisão, de 0,001g foi efetuada as pesagens das amostras úmidas e depois acondicionadas na estufa a 105<sup>0</sup>C por 48 horas.

#### **3.5 Medidas das propriedades químicas, orgânicas e texturais das amostras do solo**

Com o trado tipo holandês, em torno de cada nó georreferenciado do gride foram retiradas amostras de solo em 4 locais definidos aleatoriamente num raio máximo de 1,50 m, obtendo-se uma amostra composta representativa da camada de 0 a 30 cm de profundidade.

Após a retirada das quatro amostras, estas eram colocadas em um recipiente para homogeneização, armazenadas em sacos plásticos e encaminhadas ao laboratório central da Embrapa Milho e Sorgo. Foram feitas

análises de matéria orgânica, capacidade de troca catiônica (C.T.C), pH, fertilidade, textura e densidade do solo.

### **3.6 Análise Estatística dos dados**

A primeira fase de análise dos resultados limitou-se à análise exploratória dos dados coletados. Essa análise preliminar teve como objetivo descrever as variáveis, teor de argila, pH, capacidade de troca catiônica, matéria orgânica e condutividade elétrica através de estimativas dos parâmetros estatísticos. Foram determinados alguns parâmetros estatísticos, como média, moda, mediana, desvio-padrão, coeficiente de variação, valores mínimo e máximo, coeficiente de assimetria e curtose, sendo estes dois últimos apenas para condutividade elétrica.

Para o estudo da variabilidade espacial da condutividade elétrica foram utilizadas técnicas de geoestatística. Os semivariogramas para a determinação dos parâmetros dos modelos (patamar, alcance e efeito pepita) foram obtidos com a utilização do programa computacional GS+ (Geostatistical for the Environmental Sciences).

Após a seleção do modelo, confeccionaram-se os mapas da variabilidade espacial da condutividade elétrica do solo durante os dias avaliados, usando o método de interpolação por krigagem, com localização georreferenciada. Usou-se no georreferenciamento as coordenadas no Sistema Geodésico Brasileiro, com projeção UTM (Universal Transverso de Mercator) no datum SAD 69 (South American Datum 1969).

### **3.7 Zonas de manejo**

As zonas de manejo foram definidas usando a análise multivariada. O método escolhido foi o de K-means. Essa técnica permite a aglomeração de amostras homogêneas entre si em grupos, chamados de clusters. Os clusters são grupos homogêneos entre si em relação às variáveis que foram utilizadas para a definição desses grupos, no caso específico a condutividade elétrica. Para realizar a análise multivariada os dados da condutividade elétrica foram padronizados pela fórmula (18).

$$t = \frac{(X - \bar{X})}{S(X)} \quad (18)$$

Em que  $t$  é o valor padronizado da condutividade elétrica,  $X$  é o valor original da condutividade elétrica,  $\bar{X}$  é a média amostral da condutividade elétrica e  $S(X)$  é o desvio padrão amostral da condutividade elétrica.

Para a definição do número de clusters foi considerado o tamanho da área total, foram feitas tentativas até que se chegou a um número racional de zonas de manejo que pudessem representar toda a área, não ficando zonas relativamente muito pequenas.

Após a definição das zonas de manejo, foi realizada a elaboração de mapas obtidos após o estudo da dependência espacial da condutividade elétrica e do ajuste de um modelo de semivariograma para tal dependência. Um estudo descritivo da correlação da condutividade elétrica com outras propriedades do solo (capacidade de troca catiônica, pH, textura, e matéria orgânica) também foi realizado para comprovar a definição das áreas de manejo. Para o ajuste de modelos de semivariograma foi utilizado o programa GS+ for Windows.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Análise descritiva dos parâmetros físico-químicos do solo

Avaliando os valores de argila (Tabela 2), pode-se dizer que o solo tem uma textura argilosa (EMBRAPA, 1979), e com elevado teor de matéria orgânica.

**Tabela 2.** Estatísticas descritivas dos parâmetros dos solos

	pH	Argila %	Matéria Orgânica %	Capacidade de troca catiônica cmolc/dm <sup>3</sup>
<b>Maximo</b>	7,70	61,00	2,84	12,83
<b>Média</b>	6,15	54,50	2,34	8,12
<b>Mínimo</b>	5,10	45,00	1,95	6,68
<b>Desvio padrão</b>	0,52	3,21	0,22	1,15
<b>Moda</b>	6,20	55,00	2,60	8,18
<b>Mediana</b>	6,20	55,00	2,34	7,91
<b>Coefficiente de variação %</b>	8,52	5,89	9,50	14,18

Os baixos valores de coeficientes de variação, apresentados na Tabela 2, para as características do solo pH, argila, matéria orgânica e capacidade de troca catiônica, indicam que a área estudada era homogênea em relação a essas características. Tal homogeneidade pode ser atribuída ao fato da área ter sido regularmente utilizada como área experimental para cultivo de milho. Os resultados da análise de solos se encontram no apêndice Quadro 2.

### 4.2 Análise descritiva da condutividade elétrica do Solo

Os resultados das estatísticas descritivas para condutividade elétrica são apresentados na Tabela 3. O valor do coeficiente de curtose indica a intensidade de freqüência na vizinhança dos valores centrais permitindo uma classificação da distribuição dos dados com relação ao grau de seu achatamento. Sendo que um valor igual a zero, o esperado para uma distribuição normal dos dados, classifica a distribuição dos dados como mesocúrtica, já um valor maior que zero classifica

como leptocúrtica e um valor menor que zero classifica-a como platicúrtica (AZEVEDO, 2004). Os dados de condutividade elétrica obtidos no terceiro dia foram descartados, devido a problemas de leitura do equipamento.

**Tabela 3.** Estatísticas descritivas observadas em cada um dos dez dias de coleta de dados para condutividade elétrica.

Dias	Condutividade elétrica S/m			Desvio padrão	Números de pontos coletados	Coeficiente de Curtose	Coeficiente de assimetria	Coeficiente variação %
	Media	Máximo	Mínimo					
<b>1</b>	8,04	16,30	4,70	1,78	477	2,60	1,26	22,2
<b>2</b>	7,79	15,40	4,20	1,90	495	1,50	1,16	24,4
<b>4</b>	7,09	13,90	3,90	1,79	464	1,49	1,08	25,2
<b>5</b>	7,06	13,20	4,00	1,75	459	0,88	0,98	24,8
<b>6</b>	5,75	10,20	2,90	1,41	447	0,58	0,80	24,5
<b>7</b>	5,64	10,50	3,00	1,39	435	0,52	0,76	24,7
<b>8</b>	3,56	7,20	1,80	0,88	420	0,41	0,72	24,8
<b>9</b>	3,11	5,60	0,70	0,77	406	0,58	0,63	24,8
<b>10</b>	8,06	16,30	4,40	1,86	517	2,32	1,09	23,1

Em todos os dez dias avaliados, os valores do coeficiente de curtose (Tabela 3) foram maiores do que zero. Tais coeficientes indicam que, para todos os dias avaliados, a condutividade elétrica tendeu a apresentar uma distribuição de frequência leptocúrtica, ou seja, tendência de maior concentração dos valores observados em torno da média.

O coeficiente de assimetria é geralmente utilizado para inferências sobre a simetria da distribuição de um conjunto de dados. Se o valor observado para o coeficiente de assimetria for maior que zero então pode-se inferir que os dados tendem a apresentar distribuição assimétrica à direita. Se o valor observado for menor que zero então os dados tendem a apresentar distribuição assimétrica à esquerda. Finalmente se o valor observado do coeficiente for igual a zero, tal como no caso de uma distribuição normal dos dados, os dados tendem a apresentar uma distribuição simétrica. Em todos os dias avaliados, os valores observados para o coeficiente de assimetria (Tabela 3) foram maiores do que zero. Tais resultados indicam que houve uma tendência da distribuição assimétrica à direita para a condutividade elétrica em todos os dez dias avaliados. Os valores observados para

os coeficientes de curtose e assimetria nos dez dias avaliados, indicam que a condutividade elétrica não apresentou distribuição normal.

### 4.3 Análise da variabilidade espacial da condutividade elétrica

Os modelos de semivariograma que melhor se ajustaram para descrever a dependência espacial da condutividade elétrica são apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4** – Modelos de semivariograma selecionados para descrever a dependência espacial da condutividade elétrica, respectivas características utilizadas para seleção do modelo e teor médio de umidade do solo obtidos nos dez dias de avaliação

Dias	Teor de água	Modelo	Efeito pepita	Patamar	Alcance	IDE	R <sup>2</sup>	SQR
1	27,00	exponencial	0,01280	0,05740	88,50	0,77	0,99	8,92.10 <sup>-5</sup>
2	26,19	esférico	0,02360	0,07010	86,80	0,66	0,97	5,24.10 <sup>-5</sup>
4	24,20	exponencial	0,00190	0,06760	49,80	0,97	0,97	5,14.10 <sup>-5</sup>
5	23,61	exponencial	0,00700	0,07750	84,30	0,91	0,98	4,70.10 <sup>-5</sup>
6	21,23	exponencial	0,03760	0,09820	291,30	0,62	0,96	2,62.10 <sup>-5</sup>
7	20,50	exponencial	0,01220	0,06670	51,30	0,82	0,96	5,53.10 <sup>-5</sup>
8	19,65	exponencial	0,02740	0,10410	362,70	0,74	0,92	1,02.10 <sup>-4</sup>
9	18,89	exponencial	0,03700	0,08560	181,50	0,57	0,91	9,57.10 <sup>-5</sup>
10	18,76	exponencial	0,03880	0,10710	377,10	0,64	0,99	5,98.10 <sup>-6</sup>

em que R<sup>2</sup> coeficiente de determinação, SQR é a soma dos quadrados dos resíduos, IDE índice de dependência espacial calculado de acordo com ZIMBACK(2001)

Os modelos apresentados na Tabela 4 foram aqueles que satisfizeram um ou mais dos critérios de menor valor para o efeito pepita, menor valor para a soma de quadrados de resíduo do modelo, maior valor do coeficiente de determinação do modelo e coeficiente de regressão próximo de um para a validação cruzada.

Os valores de R<sup>2</sup> dos modelos de semivariograma selecionados apresentaram valores relativamente altos na faixa de 0,91 a 0,99. Tais valores indicam que houve um bom ajuste entre os valores das semivariâncias experimentais e as semivariâncias teóricas obtidas a partir do modelo ajustado. De

acordo com a classificação de dependência espacial estabelecida pelo índice de dependência espacial proposto por ZIMBACK (2001), verificou-se que de acordo com os modelos de semivariograma ajustados para os dias 1, 4, 5 e 7 a condutividade elétrica apresentou forte dependência espacial, pois os valores do IDE ficaram acima de 75% em relação ao patamar (Tabela 4) Por outro lado, nos dias 2, 6, 8, 9 e 10 a condutividade elétrica apresentou moderada dependência espacial, pois os valores do IDE ficaram entre 25 % e 75% em relação ao patamar (Tabelas 4). Esses valores apresentados como porcentagem do patamar facilitam a comparação da dependência espacial (TRANGMAR et al., 1987). A condutividade elétrica, em todos os dias avaliados, apresentou continuidade espacial em seus valores na área avaliada pois no mínimo a dependência espacial observada nos diferentes dias foi moderada. Como o solo em estudo apresentou homogeneidade em relação a argila era de se esperar esse comportamento da condutividade elétrica, que segundo Harstsock et al. 2000, a variabilidade espacial da condutividade elétrica é controlada pela concentração iônica, teor de argila, sendo que essas relações podem variar dependendo do tipo de solo.

O patamar para a condutividade elétrica apresentou o menor e maior valores observados no primeiro (0,05740) e décimo (0,10710) dias de avaliação, respectivamente, com tendência de aumento no seu valor neste mesmo período. Esta tendência conjugada com o decréscimo do teor de umidade indica que os valores de condutividade elétrica foram apresentando maior dispersão. Kachanoski et al. 1998 achou que quando o teor de argila é baixo, a umidade do solo tem um maior impacto sobre a condutividade elétrica.

Nos modelos de semivariogramas, Figura 10, ajustados para a condutividade elétrica, houve uma tendência de aumento no valor observado do alcance nos dias de avaliação sendo que o menor valor do alcance de 49,80 metros foi observado no quarto dia e o maior valor de 377,10 metros foi observado no décimo dia. Amostras separadas por distâncias menores que o valor do alcance são ditas serem correlacionadas espacialmente (ISAAKS & SRIVASTAVA, 1989; JOURNEL & HUIJBREGTS, 1991; VIEIRA, 2000). Portanto, esta tendência de aumento do alcance observado ao longo do período avaliado conjugado com a

tendência de queda no teor de umidade do solo indica que existe um aumento do alcance da continuidade espacial à medida que o solo perde.

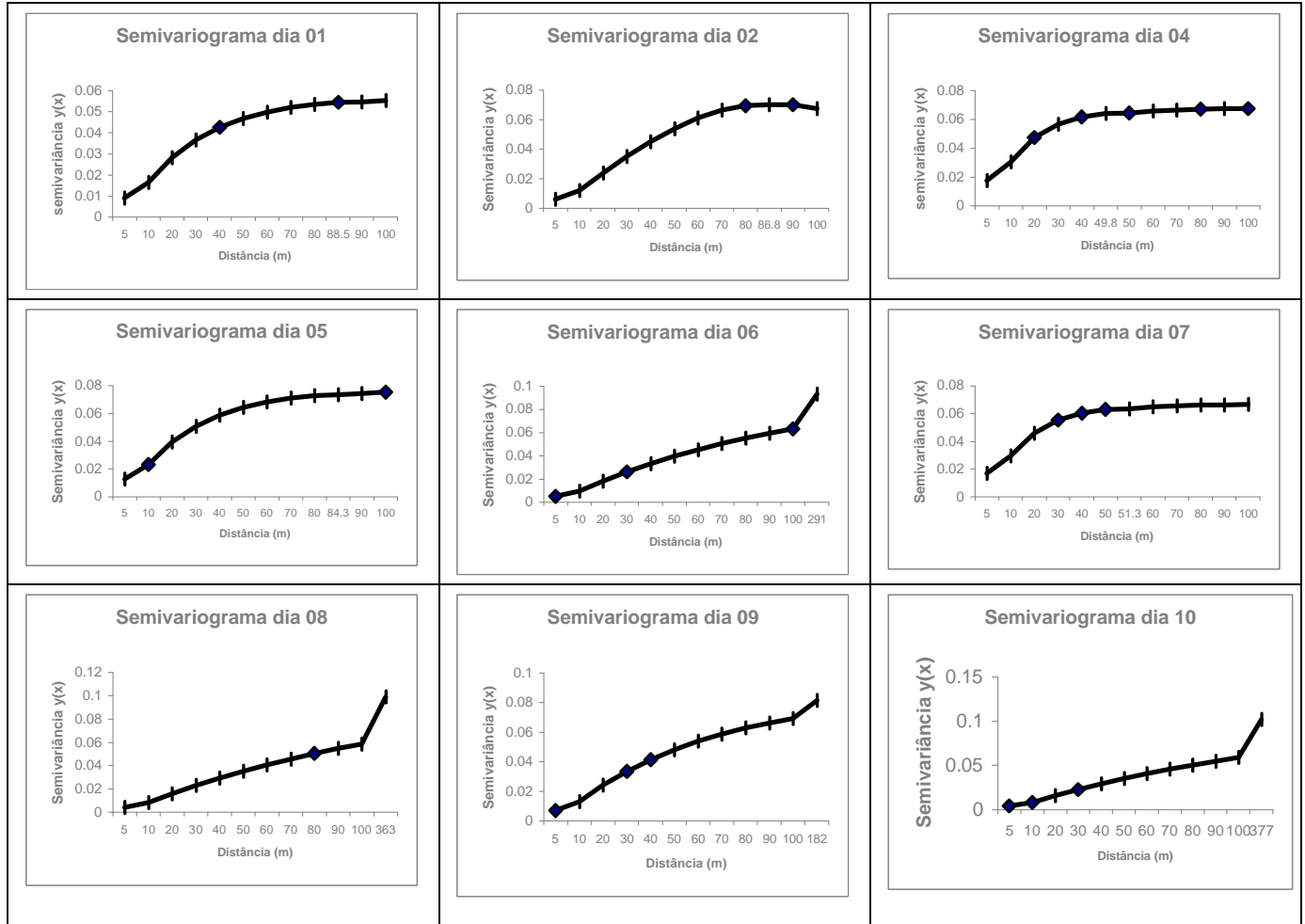


Figura 10. Semivariogramas dos dados experimentais de condutividade elétrica, dos dias avaliados.

Os valores para o efeito pepita também apresentaram tendência de aumento ao longo do período de avaliação sendo que os valores de menor e maior magnitude observados foram 0,00190 e 0,03880 obtidos no quarto e décimo dia, respectivamente. O valor do efeito pepita varia em função da variabilidade espacial, apresentando elevada dependência quanto mais próximo ao eixo x, e de forma contrária, baixa dependência espacial quanto mais próximo do patamar (TRANGMAR et al., 1987).

Um dos parâmetros para escolha do melhor modelo foi o coeficiente de regressão, calculado após a validação cruzada, o valor desse coeficiente quanto

mais próximo de 1 indica que o modelo de semivariograma escolhido explica de maneira adequada a dependência espacial da condutividade elétrica do solo.

**Tabela. 5** – Coeficiente de regressão da validação cruzada para a condutividade elétrica.

<b>Dias</b>	<b>Coeficiente de regressão</b>	<b>R<sup>2</sup> coeficiente de determinação</b>
1	0,95	0,87
2	0,90	0,85
4	1,01	0,79
5	1,00	0,81
6	0,84	0,65
7	1,00	0,61
8	0,90	0,82
9	0,81	0,58
10	0,90	0,51

Os coeficientes de determinação para a validação cruzada para os modelos de semivariograma, obtidos para a condutividade elétrica variaram de 0,51 para o décimo dia a 0,87 para o primeiro dia (Tabela 5). Estes resultados indicam que os modelos de semivariogramas selecionados, segundo o coeficiente de regressão, descrevem bem a dependência espacial da condutividade elétrica do solo da área experimental (Figura 11).

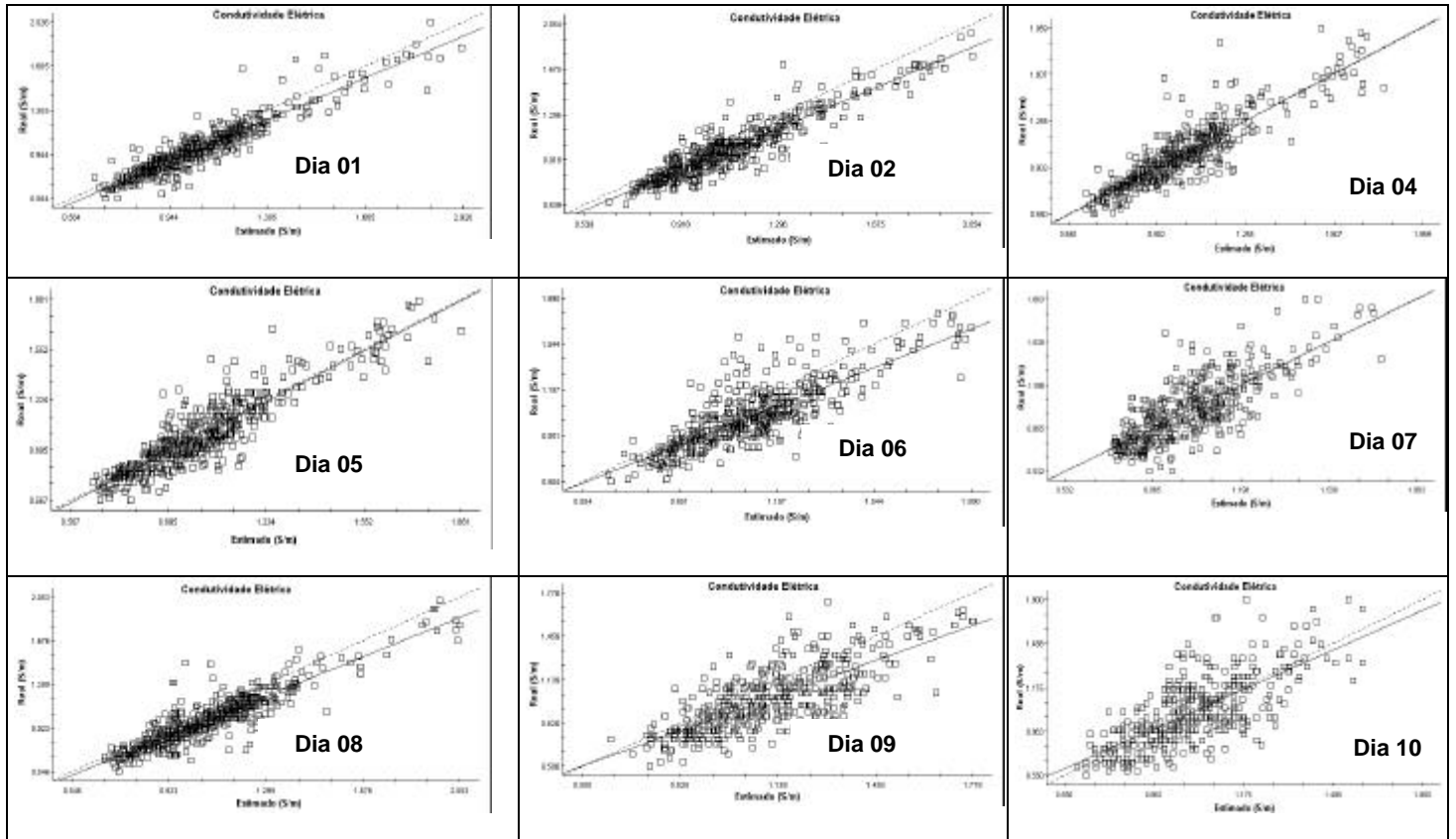
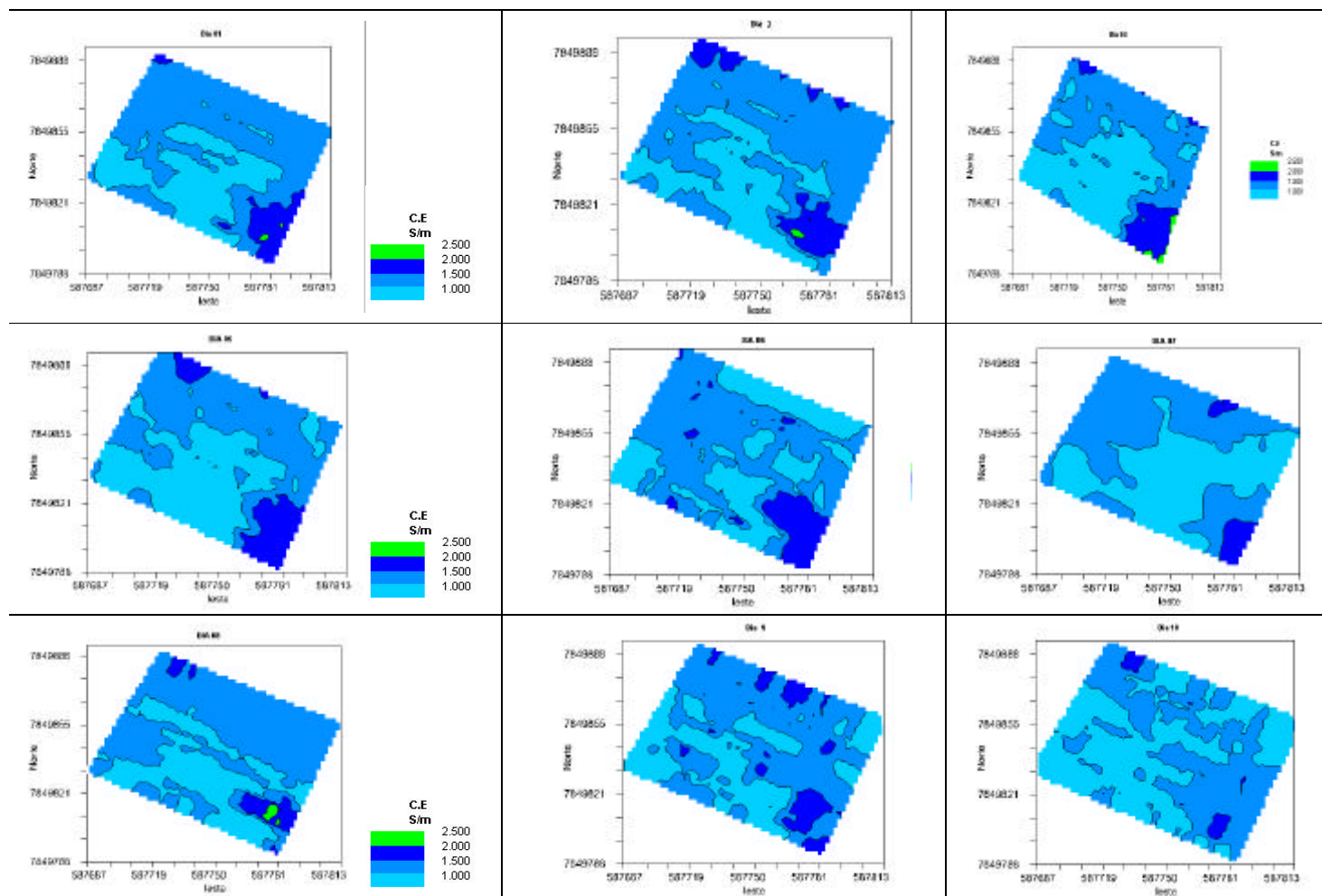


Figura 11. Representação gráfica da validação cruzada para a condutividade elétrica.

Utilizando-se os modelos de semivariograma selecionados apresentados na Tabela 4, figura 10 e o método de interpolação krigagem foram gerados os mapas (Figura 12) de isolinhas de condutividade elétrica do solo para cada um dos dez dias avaliados. Para padronizar os mapas de condutividade elétrica durante os dias avaliados, foi feito um cálculo da seguinte forma: calculou-se a média do dia e dividiu os valores do mesmo dia pela média, isto foi feito para todo os dias avaliados, padronizando as faixas de condutividade elétrica, mínimo de 0.50 e máximo de 2.50 S/m.



**Figura 12.** Mapas de isolinhas de condutividade elétrica da área experimental nos dias avaliados do 1<sup>o</sup> ao 10<sup>o</sup> dias.

Pode-se observar que houve uma tendência dos mapas de condutividade elétrica do solo ficarem com a mesma conformação, onde houve uma faixa de maior valor de condutividade elétrica do solo, permaneceu com valores maiores na mesma região do mapa, mesmo com o decréscimo da umidade do solo. Na faixa de umidade entre 21 a 26 % que os mapas mostraram-se com maior semelhança.

#### **4.4 Análise da correlação da condutividade elétrica com características físico-químicas do solo.**

Para o cálculo da correlação entre a condutividade elétrica e as características físico-químicas do solo foi utilizado apenas os valores coletados nos 30 pontos cujas posições coincidiam ou que estavam mais próximos das 30

posições de onde foram coletadas amostras (Quadro 3, apêndice), para avaliar as características físico-químicas do solo. Estes valores é que foram utilizados para o cálculo do coeficiente de correlação de Pearson entre condutividade elétrica com argila, capacidade de troca catiônica, pH e matéria orgânica. Os valores obtidos para a correlação entre estas características são apresentados na Tabela 6.

Ao longo dos dias de avaliação a correlação entre condutividade elétrica e argila não apresentou nenhuma tendência (Tabela 6), pois ao longo do período foram observados valores tanto positivos quanto negativos além de valores bem próximos de zero. Tal comportamento pode ter ocorrido pelo fato da área em estudo ser homogênea em relação ao teor de argila. Esse comportamento da correlação indica não existir relação significativa entre o teor de argila no solo e condutividade elétrica. A argila interfere na condutividade elétrica do solo devido aos cátions trocáveis presentes em sua composição e a água que fica associada a argila. McNeill, 1980, não achou correlação significativa entre teor de argila superficial e condutividade elétrica superficial, na camada de 0 a 30 centímetros.

Entre as variáveis capacidade de troca catiônica e condutividade elétrica, foram observados valores do coeficiente de correlação entre estas duas variáveis acima de 0,50 do primeiro dia ao sétimo dia de avaliação e abaixo de 0,50 do oitavo ao décimo dia (Tabela 6). Tais valores sugerem existir uma relação significativa entre condutividade elétrica e capacidade de troca catiônica do solo. Vale lembrar que foi observado uma tendência de diminuição do teor de umidade nos últimos dias de avaliação. Sendo que a capacidade de troca catiônica indica a quantidade de íons positivos (cátions) que o solo é capaz de reter em determinadas condições e permutar por quantidades estequiométricas equivalentes de outros cátions, e é função da intensidade de cargas negativas que se manifesta nos colóides. Quanto maior a CTC do solo maior o número de cátions que este solo pode reter (LOPES e GUIDOLIM, 1989).

Em solos minerais que contêm níveis altos de matéria orgânica e/ou minerais de argila 2:1 como montmorillonita, illita ou vermiculita têm uma maior habilidade para reter íons positivamente carregados (como Ca, Mg, K, Na, NH<sub>4</sub>, ou H) que solos com deficiência destes componentes. A presença destes íons nos

poros de solos com umidade alta aumentará a condutividade elétrica da mesma forma que salinidade (DOERGER, 2001). No caso do experimento onde o solo possui teor de matéria orgânica alta, e um solo argiloso, esse comportamento da condutividade elétrica pode ser observado.

Embora a magnitude dos valores seja diferente daqueles entre capacidade de troca catiônica e condutividade elétrica, é possível chegar a similar inferência para explicar a relação entre pH e condutividade elétrica (Tabela 6). Por outro lado, a matéria orgânica teve comportamento similar ao observado para a relação entre argila e condutividade elétrica (Tabela 6).

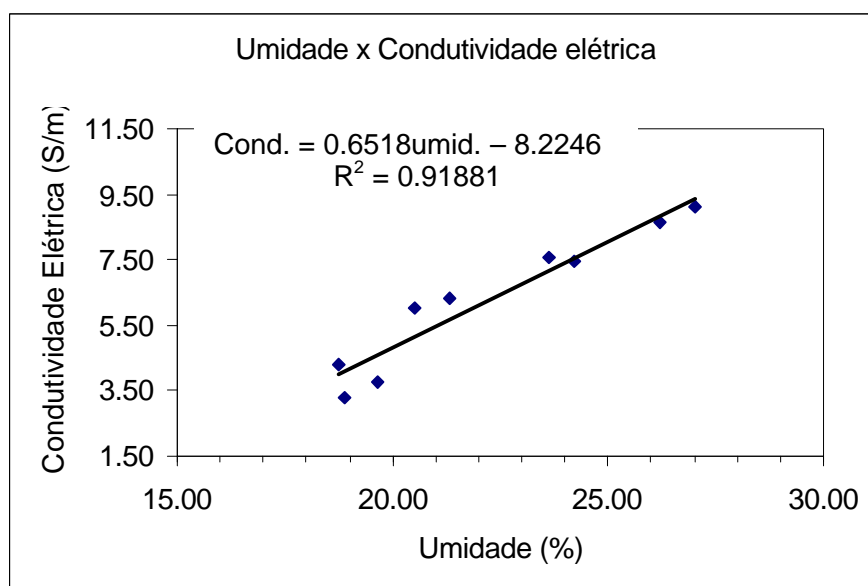
SCHIMDT (1975), com base no módulo do valor numérico observado para o coeficiente de correlação classificou a relação linear entre duas variáveis em cinco categorias: desprezível (0,00 a 0,29); baixo (0,30 a 0,49); moderado (0,50 a 0,79); alto (0,80 a 0,99) e perfeito (1,00). Basicamente, todo e qualquer coeficiente de correlação superior a 80 % (0,80) revela que a reta é representativa dos pontos levantados (VANNI,1998). Portanto, de acordo com SCHIMDT (1975) todos os coeficiente de correlação entre condutividade elétrica e matéria orgânica foram desprezíveis (Tabela 6). Por outro lado, entre condutividade elétrica com capacidade de troca catiônica e pH houve correlação satisfatória (Tabela 6). A maioria das correlações encontradas foram moderadas.

**Tabela 6.** Coeficientes de correlação de Pearson observados entre condutividade elétrica do solo e argila, capacidade de troca catiônica (CTC), pH e matéria orgânica.

Dias	Condutividade elétrica do solo									
	1	2	4	5	6	7	8	9	10	
<b>Argila</b>	-0,250	-0,307	-0,196	-0,185	-0,555	-0,311	0,007	0,108	-0,055	
<b>CTC</b>	0,579	0,595	0,594	0,540	0,719	0,713	0,270	0,164	0,410	
<b>PH</b>	0,461	0,426	0,576	0,422	0,626	0,631	0,066	-0,021	0,249	
<b>Matéria Orgânica</b>	-0,173	-0,157	-0,156	-0,037	0,000	-0,208	-0,070	-0,255	-0,293	

#### 4.5 Análise das médias e da correlação entre umidade e medidas de condutividade elétrica ao longo dos dez dias avaliados para os 30 pontos demarcados

Os valores médios de umidade e condutividade elétrica obtidos para os trinta pontos demarcados para a coleta de amostras de solo para quantificar a umidade no período de dez dias de avaliação são apresentados na Tabela 7. Os valores que geraram essa tabela encontram-se no apêndice Quadro 1. Observa-se que houve uma tendência da condutividade elétrica diminuir com o decréscimo da umidade ao longos dos dias de observação, como pode ser observado na Figura 13.



**Figura 13.** Gráfico de dispersão entre umidade do solo e condutividade elétrica nos 30 pontos de coletas de amostras de solo.

**Tabela 7.** Valores médios de umidade e condutividade elétrica obtidos para os trinta pontos demarcados para a coleta de amostras de solo.

DIAS	UMIDADE (%)	C.E (S/m)
1	27,00	9,11
2	26,19	8,64
4	24,20	7,46
5	23,61	7,55
6	21,33	6,32
7	20,50	6,03
8	18,76	4,31
9	19,65	3,74
10	18,89	3,27

Os coeficientes de correlação observados entre umidade e condutividade elétrica do primeiro ao décimo dia de avaliação são mostrados na diagonal principal da Tabela 8. Os coeficientes de correlação entre medidas de condutividade elétrica tomadas ao longo do período de 10 dias são apresentados acima da diagonal principal da Tabela 8. Pode-se observar que do primeiro ao quarto dia e do nono ao décimo dia de avaliação a correlação entre umidade e condutividade elétrica tendeu a ser negativa; e positiva do quinto ao oitavo dia. Neste período observou-se que os valores médios observados para a umidade e condutividade elétrica nos 30 pontos demarcados (Tabela 7) foram decrescentes, pois com o solo mais seco os íons, chamados solutos que transmitem a corrente elétrica, ficam mais dispersos entre si, diminuindo a capacidade de condutividade elétrica do solo. Porém todas as correlações de acordo com o critério estabelecido por SCHMIDT encontradas foram desprezíveis ou baixas.

Na Tabela 8 observa-se que as correlações de medidas de condutividade elétricas tomadas em dias próximos tendem a ter valores maiores do que a correlação entre medidas de condutividade elétrica tomada em dias com maior intervalo de tempo entre si. Tal resultado pode ser explicado pelo fato da variação da umidade de um dia para outro ser pequena quando comparado com dois ou três dias de intervalo, ou seja, os valores de condutividade elétrica de um dia em relação ao dia posterior ficaram bem próximos e os valores com diferenças maiores do que dois ou três dias ficaram mais distantes, como observado na Tabela 7.

**Tabela 8.** Coeficientes de correlação de Pearson entre condutividade elétrica e umidade relativa na diagonal principal e entre medidas de condutividade elétrica tomadas em diferentes dias acima da diagonal principal.

Dias	1	2	4	5	6	7	8	9	10
1	<b>-0,3078</b>	0,638	0,766	0,622	0,429	0,690	0,551	0,338	0,376
2		<b>-0,420</b>	0,603	0,633	0,583	0,507	0,372	0,421	0,579
4			<b>-0,011</b>	0,822	0,542	0,831	0,586	0,439	0,398
5				<b>0,249</b>	0,561	0,740	0,514	0,585	0,532
6					<b>0,030</b>	0,680	0,385	0,233	0,140
7						<b>0,666</b>	0,724	0,504	0,317
8							<b>0,025</b>	0,622	0,535
9								<b>-0,145</b>	0,721
10									<b>-0,110</b>

#### **4.6 Definição das zonas de manejo**

Como foi observado os mapas isolinhas de condutividade elétrica do solo tenderam a apresentar-se semelhantes na faixa de umidade entre 21 e 26%. Este resultado permite inferir que a confecção de um mapa de isolinhas de condutividade elétrica, pode ser estabelecido entre valores de umidade de 21 a 26% para essas condições do experimento. Para obter mapas de condutividade elétrica foi necessário um estudo da condutividade elétrica com alguns parâmetros do solo, que foram CTC, pH, matéria orgânica e argila, todos esses parâmetros têm correlação direta ou indireta com a umidade do solo.

Para a definição das zonas de manejo foi feita a média dos 30 pontos de coletas de amostras de solo, de condutividade elétrica dos dez dias avaliados (apêndice, Quadro 3). Os padrões de condutividade elétrica do solo dentro de um campo tendem a não mudar significativamente com o passar do tempo (LUND et al.1999). Geralmente, uma vez feito um mapa de condutividade elétrica, este permanecerá relativamente preciso a menos que aconteça no solo um movimento significativo de terra, como nivelamento de solo, construção de terraço, ou algum tipo de ocorrência natural.

Para a definição das zonas de manejo foram feitas análises com 3, 6 e 8 clusters ou grupos. O número de clusters máximos é o total de pontos amostrados, no caso desse trabalho eram 30 pontos. Pelo fato da área experimental ser pequena, as zonas de manejo quando definidas com 6 e/ou 8 clusters ficaram muito pequenas, dificultando o manejo nessas áreas. Optou-se então por usar 3 clusters para a definição dessas áreas (Figura 14).

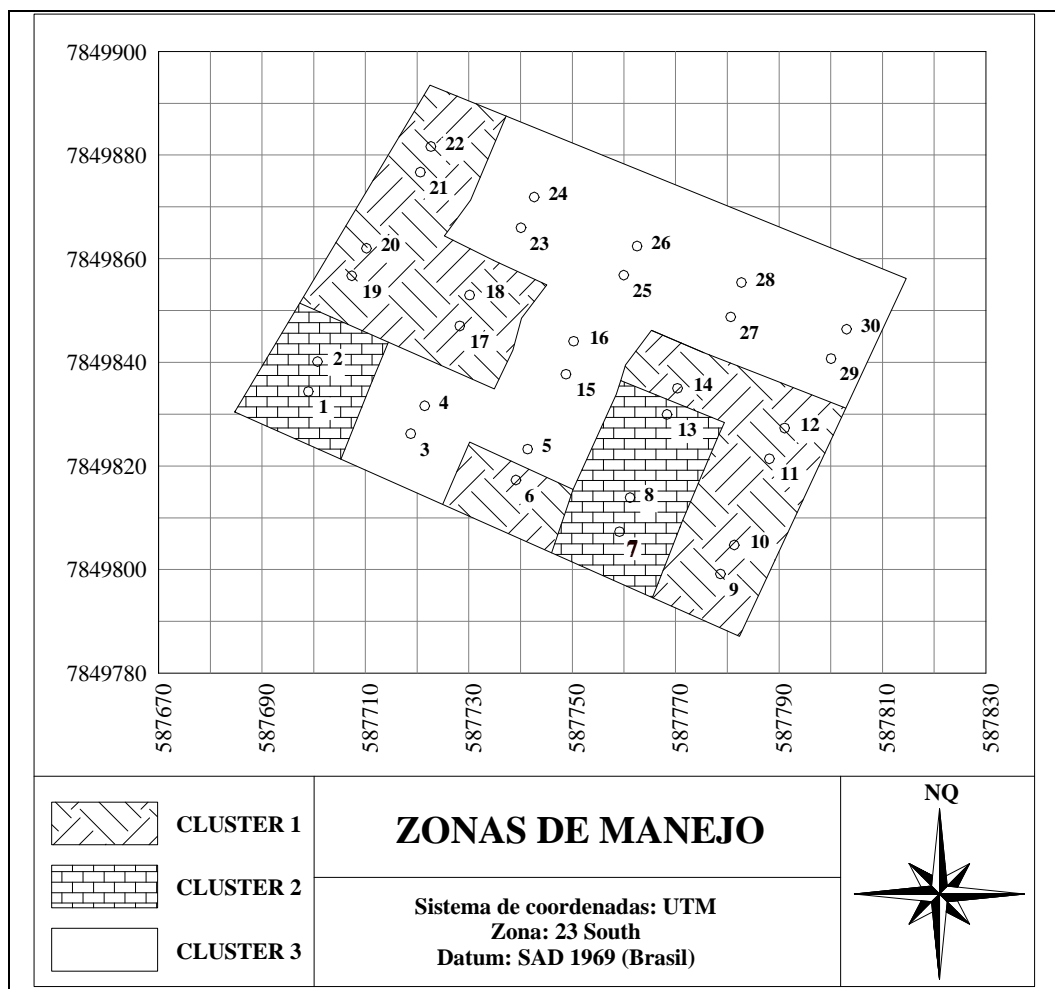


Figura 14. Mapa com os clusters definidos com base na condutividade elétrica do solo.

Os clusters formam um grupo homogêneo em relação às variáveis em questão, argila, pH, Ca, P, Mg, K, matéria orgânica, soma de bases e CTC, saturação de bases e condutividade elétrica, ou seja, amostras com características semelhantes em relação a essas variáveis são agrupadas em clusters, as médias dentro de cada cluster são apresentadas na tabela 9.

**Tabela 9.** Apresentação dos resultados da análise de solo, valores médios para os pontos dentro de cada clusters.

Atributos	CLUSTERS		
	1	2	3
<b>Argila</b>	53,83	55,40	54,55
<b>pH</b>	6,38	5,86	6,06
<b>Ca</b>	5,16	3,76	4,71
<b>Mg</b>	0,46	0,47	0,50
<b>K</b>	140,50	104,80	172,82
<b>P</b>	16,00	11,60	16,91
<b>Matéria orgânica</b>	2,27	2,13	2,50
<b>S.B</b>	5,98	4,49	5,65
<b>C.T.C</b>	8,36	7,27	8,24
<b>V</b>	69,67	61,60	68,45
<b>C.E</b>	7,09	5,76	6,16

Argila em %, pH em água (H<sub>2</sub>O), Ca, Mg, em cmolc/dm<sup>3</sup>, K, P em mg/dm<sup>3</sup>, matéria orgânica (M.O) em dag/Kg, Soma de bases (SB), CTC em cmolc/dm<sup>3</sup> e saturação de bases (V) e C.E, condutividade elétrica em S/m.

## 5 RESUMO E CONCLUSÕES

O presente trabalho foi desenvolvido na EMBRAPA Milho e Sorgo, localizado em Sete Lagoas, Minas Gerais, com o objetivo de avaliar o uso da condutividade elétrica do solo como uma ferramenta para definição de zonas de manejo.

Foi feito também um estudo da correlação da condutividade elétrica do solo com teor de argila, capacidade de troca catiônica, pH, matéria orgânica e umidade.

Com base nos resultados encontrados, pode-se concluir o seguinte:

Com uso de técnicas de geoestatística, foi possível detectar e modelar satisfatoriamente a variabilidade espacial da condutividade elétrica do solo.

Não houve correlação significativa entre a condutividade elétrica e o teor de argila.

A condutividade elétrica em relação a capacidade de troca catiônica e pH os resultados verificados indicaram que houve correlação positiva moderada e uma correlação satisfatória respectivamente.

O teor de umidade influenciou diretamente a condutividade elétrica do solo, sendo que entre 20 a 27% de umidade no solo, foi o intervalo no qual os mapas de condutividade elétrica apresentaram menor variação entre si.

Os dados de condutividade elétrica, em mapas georreferenciados, permitiram mapear 3 zonas de manejo na área estudada.

## 6 REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

AGTERBERG, F. P. **Trend surface analysis**. In: Spatial statistics and analysis, Gaile, G.L., Willmott, C. J.(ed.). Reidel, Netherlands, 1984. 605p.

BAKHSH, A .; COLVIN, T.S.; JAYNES, D.B. et al . **Spatial distribution of soil attributes affecting crop yield**. St Joseph: ASAE. 1997. 10p. (ASAE. Paper, 971032).

BOYDELL, B.; MCBRATNEY, A.; WHELAN, B. & BUDIMAN. **Preliminary results with the VERIS soil electrical conductivity instrument**. Australian centre for agriculture for precision. 1999.

BRAGA, L. P. V. **Geoestatística e aplicações**. Minicurso do 9o Simpósio Brasileiro de Probabilidades e Estatística. IME. USP. São Paulo, 1990. 36 p.

CAMBARDELLA, C. A.; MOORMAN, T. B.; NOVAK, J. M.; PARKIN, T. B.; KARLEM, D. L.; TURCO, R. F.; KONOPA, A. E. **Field-scale variability of soil properties in central Iowa soil**. Soil Science Society of American Journal, Madison, v. 58, p. 1501-1511, 1994.

CORÁ. J.E. **The potential for site-specific management of soil and corn yield variability induced by tillage**. Est Lansing, MI, 1997. 104p. (Tese de Doutorado – Michigan State University, USA).

DAVID, M. **Handbook of applied advanced geostatistical ore reserve estimation**. New York, Elsevier, 1988. 216p.

DAVIS, J. C. **Statistics and data analysis in geology**. John Wiley & Sons, New York, 1986. 281p.

DAVIS, B. M. **Uses and abuses of cross-validation in geostatistics.** Mathematical geology, v.19, p. 241-248, 1987.

DIAS, G.P.; QUEIROS, D.M.; MANTOVANI, E.C **Automação e Instrumentação para Agricultura de Precisão** In: XXVII CONBEA – Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola – Mecanização e Agricultura de Precisão, Poços de Caldas – MG, 1998.

DOERGE, T. **Fitting soil electrical conductivity measurements into the precision farming toolbox.** Presented at the 2001 Wisconsin Fertilizer, Agrilime and Pest Management Conference. Madison, WI, January 16-18.

DOERGE, T.; KITCHEN, N.R.; LUND, E.D. **Soil Electrical Conductivity Mapping.** SSMG-30. Site-Specific Management Guidelines, 1999.

DOOLITTLE, J. A., SUDDUTH, K.A., KITCHEN, N.R., INDORANTE, S.J. (1994) **Estimating Depth to Claypans Using Electromagnetic Induction Methods.** Journal of Soil and Water Conservation, 49, 572-575.

EMBRAPA, **Serviço nacional de levantamento e conservação de solo: Manual de métodos de análise de solos.** Rio de Janeiro – R.J. Brasil, 1979.

GEISERS, S. **The predictive sample reuse methods with application.** J. Am. Stat. Assoc., v.70, p. 320-328, 1975.

**Agricultura de precisão** disponível em [www.geosat.com.br/sv\\_agricultura.html](http://www.geosat.com.br/sv_agricultura.html). Acessado em 08/11/2004

GOOVAERTS, P. **Geostatistics in Soil Science: State – of – the – art and perspectives.** Geoderma, v.89, n1-2, p.1-45,1999.

GOOVAERTS, P. **Geostatistics for natural resources evaluation.** Oxford Univ. Press. New York, 1997. 650p.

GUERRA, P. A. G. **Geoestatística operacional.** Brasília, MME/DNPM, 1988. 145p.

GUIMARÃES, E. C. **Geoestatística básica e aplicada.** Uberlândia, Universidade Federal de Uberlândia, 2001. 49p.

HAMLETT, J.M.; HORTON, R.; CRESSIE, N.A.C. **Resistant and exploratory techniques for use in semivariogram analysis soil science society of America.** Journal, v.50, n.3, p868-875,1986.

HARTSOCK, N. J., MUELLER T. G., THOMAS G. W., BARNHISEL R. I., and WELLS K. L. and SHEARER S. A. 2000. **Soil Electrical Conductivity Variability.** In. P.C. Robert et al. (ed.) Proc. 5th international conference on precision Agriculture. ASA Misc. Publ., ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI.

HURN, J. **GPS: um guia para a próxima utilidade.** Sunnyvale: Trimble Navigation, 1989. 76p.

ISAAKS, E.H. & SRIVASTAVA, R.M. **An introduction to applied geostatistics.** New York, Oxford University Press. 1989. 560p.

JAYNES, D.B. (1996) **Improved Soil Mapping Using Electromagnetic Induction Surveys. Proceedings of the 3rd International Conference on Precision Agriculture,** pp 169-179.

JOHNSON, C.K.; DORAN, J.W.; DUKE, H.R.; WIENHOLD, B.J.; ESKRIDGE, K.M.; SHANAHAN, J.F. 2001. **Field-scale electrical conductivity mapping for delineating soil condition.** *Soil Sci. Soc. Am. J.* SAS Institute Inc. 1999. The SAS system for Windows version 8.0. SAS Inst., Cary, NC.

JOURNEL, A.G.; HUIJBREGTS, C.J. **Mining geostatistics.** Academic Press, London, 1991.600p.

KACHANOSKI, R.G., GREGORICH, E.G., Van WESENBEECK, I.J., **Estimating spatial variations of soil water content using non contacting electromagnetic inductive methods.** *Can. J. Soil Sci.*:68, 715-722, 1988.

KHAKURAL, B.R., and ROBERT, P.C. **Use of non-contacting electromagnetic inductive method for estimating soil moisture across a landscape.** *Commun. Soil Sci. Plant. Anal* 29: 2055-2065, 1998.

KANE, V., BEGOVICH, C., BUTZ, T., MYERS, D. E. **Interpretation of regional geochemistry.** *Comput. Geosci.*, v. 8, p. 117-136, 1982.

KITCHEN, N.R.; K. SUDDUTH, A.; DRUMMOND. S.T. **Soil electrical conductivity as a crop productivity measure for claypan soils.** *J. Prod. Agric.*, 12:607-617, 1999.

KITCHEN, N.R, and SUDDUTH, K.A. (1996) **Predicting Crop Production Using Electromagnetic Induction.** 1996 Information Agriculture Conference Proceedings, Urbana IL.

KRIGE, D. G. **A statistical approach to some basic mine valuation problems on the witwaterland.** *Journal Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa*, South Africa, v.52, n.6., p.119-139, 1951.

LANDIM, P.M.B. **Análise estatística de dados geológicos**. São Paulo: UNESP, 1998. 226p.

LASLETT, G.M.; MCBRATNEY, A.B.; PAHL, P.J.; HUTCHINSON, M.F. **Comparison of several spatial prediction methods for soil pH**. Soil science: 38 325-341, 1987.

LIMA, T.R; NUNES, D.D; MENDES, A.M; SILVA, J.M. **Análise da fertilidade natural ( $k^+$  ;  $ca^{+2}$  ;  $mg^{+2}$ ;  $al^{+3}$ ) do solo na faixa de influência do rio madeira, Porto Velho-RO a Humaitá-AM**.

LESH, S.M., RHOADES, J.D., LUND, L.J., and CORNIN,D.L. **Mapping soil salinity using calibrate electromagnetic measurements**, Soil Sci. Soc. Am. J., 56, 540-548, 1992.

LUND, E. D.; CHRISTY, C. D. and DRUMMOND, P. E. **Practical Applications of Soil Electrical Conductivity Mapping**. Veris Technologies, 601 N. Broadway, Salina Kansas 67401, USA. Disponível em: [http://www.veristech.com/pdf\\_files/europe\\_1999.pdf](http://www.veristech.com/pdf_files/europe_1999.pdf).

MANZATTO, C.V.; BHERING, S.B.; SIMÕES, M. **Agricultura de precisão: propostas e ações da Embrapa solos, 1999**. [HP:www.cnps.embrapa.Br/search/pesqs/proj01](http://www.cnps.embrapa.Br/search/pesqs/proj01).

MARQUES JÚNIOR, J. **Atributos do Solo para Agricultura de Precisão** In: XXVII CONBEA – Congresso Brasileiro de Engenharia Agrícola - Mecanização e Agricultura de Precisão, Poços de Caldas – MG, 1998.

MATHERON, G. **Principles of geostatistics**. Economic Geology. El Paso, V. 58, p. 11246-66,1963.

MAC NEILL, J.D., **Electrical conductivity of soil and rocks**. Technical Note TN-5, GEONICS LTD. Mississauga, Ont., Canada, 1980.

MATHERON, G. **The theory of regionalized variables and its applications**. Les Cahiers du Centre de Morphologie mathématique. Fas. 5. C. G. Fontainebleau, 1971.

McBRATNEY, A.B. & WEBSTER, R. **Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates**. The Journal of Soil Science, Oxford, v.37, n.4, p.617-639, oct./dec., 1986.

McBRIDE, R.A., GORDON, A.M., SHRIVE, S.C. **Estimating forest soil quality from terrain measurements of apparent electrical conductivity**. Soil Sci. Soc. Amer. J. 54:290-293. 1990.

MYERS, J. C. **Geostatistical error management. Qualifying uncertainty for environmental sampling and mapping**. New York, Van Nostrand Reinhold, 1997. 571p.

MOLIN, J..P., MENEGATTI, E .L..A.A. **Mapeamento da resistência elétrica do solo por sensor de contato**. 2o Simpósio Internacional de Agricultura de Precisão Viçosa, MG, 12 a 14 de junho de 2002.

PANNATIER, Y. **VarioWin: software for spatial data analysis in 2D**. New York, 1996. 316p.

RHOADES, J.D., MANTEGHI N.A., SHOUSE P.J., and ALVES W.J.. **Soil electrical conductivity and soil salinity: new formulations and calibrations**. Soil Science Sociedad. Am J. 53:433-439, 1989.

RHOADES, J.D., CORNIN, D.L. **Determining soil electrical conductivity-depth relations using an inductive electromagnetic soil conductivity meter.** Soil Sci. Am. J. 45, 255-260, 1981.

RHOADES, J.D., INVALSON, R.D., **Determining salinity in fields soils with soil resistance measurements.** Soil Sci. Soc. Am. Proc., 35: 54-60, 1971.

ROCHA, J.V.; LAMPARELLI, R. A.C. **Do trabalho de campo ao processamento de mapas: um caso prático de agricultura de precisão no Brasil.** In: Congresso e feira para usuário de geoprocessamento da América Latina – GIS Brasil. 98, 4.; Curitiba, 1998. Anais. Curitiba, 1998.

ROSSI, R. E., DUNGAN, J. L., BECK, L. R. **Kriging in the shadows: geostatistical interpolation for remote sensing.** Remote Sens. Environ., v.49, p. 32-40, 1994.

SCHUCANY, W. R. Sample reuse. In: Kotz, S., Johnson, N. L. **Encyclopedia of statistical science**, New York, John Wiley, 1981. p. 235-238.

SHEETS K.R. and J.M.H. HENDRICKX. 1995. **Noninvasive soil water content measurement using electromagnetic induction.** Water Resources Res. 31(10): 2401-2409.

STRAUCH, J. C. M, **Estudo de viabilidade técnica-econômica para implantação da agricultura de precisão na cultura de soja sob rotação de culturas em plantio direto na região de Campos Gerais - PR** disponível em: [www.cnps.embrapa.br/search/pesqs/proj07/home.html](http://www.cnps.embrapa.br/search/pesqs/proj07/home.html).

SUDDUTH, K.A.; KITCHEN, N.R.; BOLLERO, G.A.; BULLOCK, D.G. **Comparison of electromagnetic induction and direct sensing of soil electrical conductivity.** Agr. Journal. (in press), 2002.

SUDDUTH, K.A.; DRUMMOND, S.T.; KITCHEN, N.R. **Accuracy issues in electromagnetic induction sensing of soil electrical conductivity for precision agriculture.** Computers Elec. Agric. 31:239- 264. 2001.

TRANGMAR, B.B; YOST, R.S.; WADE, M.K.; UEHARA, G. & SUDJADI, M. **Spatial variation of soil properties and rice yield on recently cleared land.** Soil Science Society America Journal, Madison, v.51, n.3, p.668-674, may/jun., 1987.

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

VIEIRA, S. R.; HATFIELD, J. L.; NIELSEN, D. R.; BIGGAR, J. W. **Geostatistical theory and application to variability of some agronomical properties.** Hilgardia, Berkeley, v. 31, n. 3, p. 1-75, 1983.

VIEIRA, S.R. **Geoestatística aplicada a agricultura de precisão.** In: BRÉM, A.; GIUDICE, M, P.; QUEIROZ, D.M de et al. (ed) Agricultura de precisão. Viçosa: Os autores, 200. p93-108.

VEZZANI, F. M. **Qualidade do sistema solo na produção agrícola. 2001.Tese de doutorado. 184 f.** Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

WARRICK, A. W., ZHANG, R., HARRIS, M. K., MYERS, D. E. **Direct comparisons between kriging and other interpolation – Validation of flow and transport models for the unsaturated zone.** New Mexico, 1988. p. 254-326.

WILLIAMS, B., HOEY, D. (1987). **The Use of Electromagnetic Induction to Detect the Spatial Variability of the Salt and Clay Content of Soils.** Australian Journal Soil Research, 25, 21-27.

ZIMBACK, C.R.L. **Análise espacial de atributos químicos de solos para fins de mapeamento da fertilidade.** Tese de Livre-Docência (Livre-Docência em Levantamento do solo e fotopedologia), FCA/UNESP, 2001. 114p.

## **7 APÊNDICE**

**Quadro 1** – Valores de umidade e condutividade elétrica do solo nos pontos de coletas com as respectivas coordenadas.

Pontos	Coordenadas		DIAS									
			1		2		3		4		5	
			U	C.E	U	C.E	U	C.E	U	C.E	U	C.E
1	587698.973	7849834.374	29.23	7.40	28.05	6.78	27.74	5.96	24.34	5.89	22.87	6.06
2	587700.731	7849840.152	29.04	6.70	27.79	7.54	25.66	4.36	25.13	4.40	24.59	4.50
3	587718.761	7849826.235	27.99	8.32	28.14	7.31	27.18	6.63	25.44	6.57	26.19	6.52
4	587721.455	7849831.613	28.64	7.45	26.96	7.05	25.84	6.60	24.49	6.63	24.48	6.35
5	587741.348	7849823.255	27.12	6.75	25.91	6.05	25.14	5.70	24.26	5.63	23.98	5.61
6	587739.097	7849817.291	26.55	5.25	25.12	6.35	24.58	4.55	22.82	4.47	21.36	4.73
7	587761.180	7849813.902	26.64	6.94	25.41	11.88	26.01	6.44	24.15	6.13	22.76	4.71
8	587759.123	7849807.326	27.59	12.62	26.44	6.43	25.78	11.67	23.76	11.62	23.58	7.15
9	587781.341	7849804.746	26.51	14.51	25.86	13.56	25.25	11.07	24.41	12.90	23.83	11.49
10	587778.653	7849799.178	25.68	15.05	24.81	14.08	24.77	12.88	23.84	12.50	24.40	12.33
11	587788.130	7849821.390	26.37	9.69	25.14	10.97	27.26	12.06	25.46	9.80	24.41	12.70
12	587791.073	7849827.324	27.00	11.35	26.11	9.71	24.52	8.56	24.09	7.77	23.07	7.59
13	587768.312	7849829.951	26.98	7.28	25.82	7.90	25.41	6.70	23.92	6.17	22.37	6.99
14	587770.343	7849834.988	26.30	7.68	26.51	5.77	26.02	6.10	25.53	5.68	24.73	5.63
15	587748.772	7849837.722	27.26	9.69	26.11	8.07	25.63	5.86	24.16	6.55	22.74	7.92
16	587750.269	7849844.085	28.22	8.61	26.41	6.76	25.35	6.78	23.97	5.52	21.93	5.88
17	587728.238	7849847.023	26.79	8.87	25.84	7.27	25.00	8.02	24.09	6.88	24.01	6.82
18	587730.150	7849852.995	27.58	6.91	27.74	8.17	26.84	7.83	25.70	7.71	25.12	8.66
19	587707.364	7849856.715	27.56	11.69	26.07	8.82	25.94	8.76	24.36	7.89	24.69	8.90
20	587710.203	7849862.024	25.70	9.43	25.00	10.46	25.25	8.68	23.37	6.30	22.28	6.61
21	587720.617	7849876.702	28.07	8.72	26.17	8.69	25.23	9.33	24.35	6.54	24.33	7.56
22	587722.650	7849881.656	26.16	13.69	26.61	10.62	24.64	13.26	24.88	7.58	24.74	7.20
23	587740.073	7849865.982	27.37	8.18	26.23	7.57	24.84	8.71	23.45	9.01	23.41	7.88
24	587742.636	7849871.904	26.40	7.97	26.13	8.21	25.64	8.53	24.43	8.48	23.96	9.02
25	587759.956	7849856.833	24.73	9.04	25.67	7.39	25.33	8.75	23.54	7.38	23.52	8.70
26	587762.539	7849862.443	27.56	8.78	26.47	9.01	25.47	10.39	24.61	7.65	24.40	7.24
27	587780.647	7849848.782	28.68	7.46	26.56	9.14	26.35	8.89	24.66	8.44	23.44	8.49
28	587782.726	7849855.419	26.50	8.89	25.83	9.67	25.91	10.38	22.06	8.04	24.49	8.63
29	587800.040	7849840.713	24.54	8.61	24.64	8.38	24.62	10.00	22.55	6.90	20.70	7.48
30	587803.060	7849846.402	25.26	9.80	26.05	9.57	23.73	10.09	24.08	6.72	21.96	7.25

U – umidade em %, C.E – condutividade elétrica do solo em  $\text{Sm}^{-1}$

Continua ...

**Quadro 1 - Cont.**

Pontos	Coordenadas		DIAS									
			6		7		8		9		10	
			U	C.E	U	C.E	U	C.E	U	C.E	U	C.E
1	587698.973	7849834.374	22.48	3.93	22.73	5.25	19.21	3.33	19.76	2.95	20.55	2.66
2	587700.731	7849840.152	22.18	4.61	20.66	4.98	18.00	3.79	18.91	3.76	18.62	2.60
3	587718.761	7849826.235	22.92	4.76	20.25	5.36	19.23	3.92	19.17	3.65	18.31	2.60
4	587721.455	7849831.613	21.79	8.18	19.83	6.18	17.52	4.14	19.13	4.11	18.08	3.06
5	587741.348	7849823.255	22.11	6.13	19.63	4.66	19.81	3.64	20.38	2.45	18.93	2.58
6	587739.097	7849817.291	20.33	5.87	20.68	3.94	18.75	3.08	19.21	3.63	18.73	2.86
7	587761.180	7849813.902	19.51	5.70	18.35	4.28	18.58	3.27	20.06	3.31	18.20	4.06
8	587759.123	7849807.326	21.41	4.65	19.68	8.48	18.27	5.10	19.87	3.34	19.08	2.60
9	587781.341	7849804.746	22.38	9.21	22.67	9.64	18.65	6.00	20.37	5.23	18.76	4.22
10	587778.653	7849799.178	20.47	11.45	28.92	11.14	18.60	6.40	18.30	4.21	17.14	4.01
11	587788.130	7849821.390	23.69	5.25	19.78	5.99*	18.90	5.34	18.85	5.58	18.28	5.13
12	587791.073	7849827.324	19.95	6.54	19.65	5.84	17.80	4.39	20.71	3.01	19.54	3.71
13	587768.312	7849829.951	22.35	5.91	20.23	5.59	19.49	5.84	20.91	4.22	19.07	3.54
14	587770.343	7849834.988	20.89	4.75	18.96	4.69	18.91	4.91	19.84	3.34	19.38	3.60
15	587748.772	7849837.722	22.10	5.59	21.70	5.63	17.72	3.38	19.01	3.91	18.19	3.80
16	587750.269	7849844.085	21.60	6.15	20.08	5.30	19.95	5.20	20.49	4.39	18.06	3.10
17	587728.238	7849847.023	20.33	6.28	20.59	5.67	15.03	4.41	20.24	2.94	18.39	2.56
18	587730.150	7849852.995	22.87	8.74	19.63	6.85	18.60	3.30	19.60	3.20	18.54	1.99
19	587707.364	7849856.715	23.63	7.43	22.25	6.50	20.28	3.80	19.54	3.58	21.08	3.04
20	587710.203	7849862.024	21.37	6.92	20.07	6.42*	17.92	3.68	19.21	2.79	19.12	2.42
21	587720.617	7849876.702	24.01	6.08	20.28	5.90	22.14	4.63	21.29	4.15	20.31	3.84
22	587722.650	7849881.656	18.65	5.20	21.35	5.74	20.77	4.40	18.81	4.09	19.72	3.62
23	587740.073	7849865.982	21.11	6.35	19.14	6.73	21.83	4.14	19.64	4.02	18.11	3.47
24	587742.636	7849871.904	20.64	6.11	19.01	5.29	19.05	3.42	19.63	3.55	19.06	3.05
25	587759.956	7849856.833	20.92	6.00	19.58	7.39	20.06	4.71	19.28	3.98	19.19	3.42
26	587762.539	7849862.443	22.00	7.12	21.29	8.56	16.57	5.56	19.72	4.28	19.41	3.80
27	587780.647	7849848.782	20.12	6.57	20.44	5.34	17.84	4.37	20.26	3.63	19.22	3.36
28	587782.726	7849855.419	19.63	6.66	19.89	5.90	17.26	4.17	17.75	3.80	17.93	3.17
29	587800.040	7849840.713	19.06	5.40	18.66	3.95	18.54	3.53	19.61	3.48	19.16	3.13
30	587803.060	7849846.402	19.51	6.19	19.07	3.96	17.48	3.55	19.78	3.47	18.41	3.17

**Quadro 2 – Resultados da análise de solos da área experimental.**

Pontos	D.a	Argila	Classificação	pH	H+Al	Al	Ca	Mg	K	P	M.O.	SB	CTC	V	SatAl
1	0.99	55	Argila	6.0	2.87	0.00	4.04	0.55	104	10	2.39	4.86	7.73	63	0
2	0.99	53	Argila	6.3	2.57	0.00	4.34	0.61	100	17	2.28	5.21	7.78	67	0
3	0.99	51	Argila	6.2	2.60	0.00	4.70	0.61	158	13	2.44	5.71	8.31	69	0
4	0.99	51	Argila	6.3	2.60	0.00	4.18	0.56	161	13	2.43	5.15	7.75	66	0
5	0.98	50	Argila	6.5	2.15	0.00	4.42	0.73	161	17	2.33	5.56	7.71	72	0
6	0.97	55	Argila	6.3	2.35	0.00	4.48	0.64	131	9	2.22	5.46	7.81	70	0
7	0.98	55	Argila	5.7	3.10	0.00	3.05	0.38	111	8	2.02	3.71	6.81	55	0
8	0.98	58	Argila	6.2	2.35	0.00	4.26	0.49	104	10	1.95	5.01	7.36	68	0
9	1.01	50	Argila	7.5	1.21	0.00	8.16	0.45	147	24	2.08	8.98	10.19	88	0
10	1.01	45	Argila	7.7	1.06	0.00	11.03	0.37	144	24	2.14	11.77	12.83	92	0
11	0.98	57	Argila	5.7	3.03	0.10	3.15	0.27	133	9	2.09	3.76	6.79	55	3
12	0.95	58	Argila	5.8	2.84	0.00	3.98	0.34	151	14	2.23	4.71	7.55	62	0
13	0.94	56	Argila	5.1	3.00	0.00	3.11	0.30	105	13	2.00	3.68	6.68	55	0
14	0.96	55	Argila	6.0	2.84	0.00	3.17	0.30	148	13	2.10	3.85	6.69	58	0
15	0.97	51	Argila	5.3	2.25	0.00	4.36	0.50	168	15	2.08	5.29	7.54	70	0
16	0.97	55	Argila	5.1	2.63	0.00	4.35	0.43	173	11	2.56	5.22	7.85	67	0
17	0.96	55	Argila	6.4	2.25	0.00	4.03	0.58	140	8	2.19	4.96	7.22	69	0
18	0.97	53	Argila	6.3	2.48	0.00	4.62	0.53	131	11	2.46	5.48	7.96	69	0
19	0.94	51	Argila	6.4	2.40	0.00	4.62	0.67	153	20	2.51	5.68	8.08	70	0
20	0.98	53	Argila	6.1	2.63	0.00	4.70	0.53	127	16	2.24	5.55	8.18	68	0
21	0.95	59	Argila	6.1	2.81	0.00	4.68	0.40	131	16	2.36	5.41	8.22	66	0
22	0.96	55	Argila	6.2	2.71	0.00	5.27	0.44	150	28	2.60	6.10	8.81	69	0
23	0.98	57	Argila	6.2	2.71	0.00	4.86	0.44	171	20	2.58	5.74	8.45	68	0
24	0.98	55	Argila	6.2	2.68	0.00	4.68	0.42	158	18	2.60	5.50	8.18	67	0
25	0.94	61	Muito argiloso	6.2	2.71	0.00	4.68	0.40	195	23	2.33	5.58	8.28	67	0
26	0.97	57	Argila	6.3	2.74	0.00	5.37	0.48	200	23	2.60	6.36	9.10	70	0
27	0.97	55	Argila	6.2	2.68	0.00	5.44	0.49	178	21	2.66	6.38	9.06	70	0
28	0.97	55	Argila	6.2	2.68	0.00	5.03	0.45	137	19	2.50	5.83	8.51	69	0
29	0.96	57	Argila	6.2	2.81	0.00	4.77	0.39	178	12	2.84	5.62	8.43	67	0
30	0.98	57	Argila	5.8	3.20	0.00	3.91	0.31	137	8	2.34	4.57	7.77	59	0

D.a – densidade aparente em g/cm<sup>2</sup>, Argila em %, pH em água (H<sub>2</sub>O), H+Al, Al, Ca, Mg, em cmolc/dm<sup>3</sup>, K, P em mg/dm<sup>3</sup>, matéria orgânica (M.O) em dag/Kg, Soma de bases (SB), CTC em cmolc/dm<sup>3</sup> e saturação de bases (V) e saturação de Alumínio (m) em %.

**Quadro 3** – Valores da condutividade elétrica nos dez dias de avaliação nos 30 pontos de coletas de amostras de solo.

Pontos	Condutividade elétrica (S/m)									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	7.40	6.78	5.96	5.89	6.06	3.93	5.25	3.33	2.95	2.66
2	6.70	7.54	4.36	4.40	4.50	4.61	4.98	3.79	3.76	2.60
3	8.32	7.31	6.63	6.57	6.52	4.76	5.36	3.92	3.65	2.60
4	7.45	7.05	6.60	6.63	6.35	8.18	6.18	4.14	4.11	3.06
5	6.75	6.05	5.70	5.63	5.61	6.13	4.66	3.64	2.45	2.58
6	5.25	6.35	4.55	4.47	4.73	5.87	3.94	3.08	3.63	2.86
7	6.94	11.88	6.44	6.13	4.71	5.70	4.28	3.27	3.31	4.06
8	12.62	6.43	11.67	11.62	7.15	4.65	8.48	5.10	3.34	2.60
9	14.51	13.56	11.07	12.90	11.49	9.21	9.64	6.00	5.23	4.22
10	15.05	14.08	12.88	12.50	12.33	11.45	11.14	6.40	4.21	4.01
11	9.69	10.97	12.06	9.80	12.70	5.25	5.99*	5.34	5.58	5.13
12	11.35	9.71	8.56	7.77	7.59	6.54	5.84	4.39	3.01	3.71
13	7.28	7.90	6.70	6.17	6.99	5.91	5.59	5.84	4.22	3.54
14	7.68	5.77	6.10	5.68	5.63	4.75	4.69	4.91	3.34	3.60
15	9.69	8.07	5.86	6.55	7.92	5.59	5.63	3.38	3.91	3.80
16	8.61	6.76	6.78	5.52	5.88	6.15	5.30	5.20	4.39	3.10
17	8.87	7.27	8.02	6.88	6.82	6.28	5.67	4.41	2.94	2.56
18	6.91	8.17	7.83	7.71	8.66	8.74	6.85	3.30	3.20	1.99
19	11.69	8.82	8.76	7.89	8.90	7.43	6.50	3.80	3.58	3.04
20	9.43	10.46	8.68	6.30	6.61	6.92	6.42*	3.68	2.79	2.42
21	8.72	8.69	9.33	6.54	7.56	6.08	5.90	4.63	4.15	3.84
22	13.69	10.62	13.26	7.58	7.20	5.20	5.74	4.40	4.09	3.62
23	8.18	7.57	8.71	9.01	7.88	6.35	6.73	4.14	4.02	3.47
24	7.97	8.21	8.53	8.48	9.02	6.11	5.29	3.42	3.55	3.05
25	9.04	7.39	8.75	7.38	8.70	6.00	7.39	4.71	3.98	3.42
26	8.78	9.01	10.39	7.65	7.24	7.12	8.56	5.56	4.28	3.80
27	7.46	9.14	8.89	8.44	8.49	6.57	5.34	4.37	3.63	3.36
28	8.89	9.67	10.38	8.04	8.63	6.66	5.90	4.17	3.80	3.17
29	8.61	8.38	10.00	6.90	7.48	5.40	3.95	3.53	3.48	3.13
30	9.80	9.57	10.09	6.72	7.25	6.19	3.96	3.55	3.47	3.17