



## Caracterização do Solo para Uso em Agricultura de Precisão através de Métodos Elétricos e Eletromagnéticos (GPR): Resultados Preliminares

Cláudia de Oliveira <sup>1\*</sup>; Jorge Luís Porsani <sup>2</sup>; Shozo Shiraiwa <sup>3</sup> & Welitom Rodrigues Borges <sup>1</sup>

<sup>1</sup> Pós-Graduação em Geofísica (IAG-USP). Tel.: (11) 3091 2792. E-mail: [claudia@iag.usp.br](mailto:claudia@iag.usp.br) & [welitom@iag.usp.br](mailto:welitom@iag.usp.br)

<sup>2</sup> Departamento de Geofísica (IAG-USP). Tel.: (11) 3091 4734. Fax.: (11) 3091 5034. E-mail: [porsani@iag.usp.br](mailto:porsani@iag.usp.br)

<sup>3</sup> Departamento de Física (ICET-UFMT). Tel.: (65) 615 8745. E-mail: [shiraiwa@cpd.ufmt.br](mailto:shiraiwa@cpd.ufmt.br)

Copyright 2005, SBGF - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, 11-14 September 2005.

Contents of this paper were reviewed by The Technical Committee of the 9<sup>th</sup> International Congress of The Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGF, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of The Brazilian Geophysical Society is prohibited.

### Abstract

In this work, the Ground Penetrating Radar-GPR and Continuous electric profile-VERIS methods had been used to characterize the structures of the soil for use in precision agriculture. The studies were carried out in a pilot area closed for soy plantation located in Farroupilha farm, Mato Grosso state, Brazil. GPR Profiles allowed characterizing the subsurface until 12 m depth. The main images structures were: the soil thickness, a lateritic layer with iron oxide and the water table top. The electric conductivity mapping obtained with VERIS profiles showed that the conductivity varies laterally and it is heterogeneous for all the pilot area until 1 m of depth. The results had shown a good correlation between the reflections zones from GPR profiles and the electric conductivity anomalies zones. In regions where the conductivity is highest, there is absence of GPR reflections. On the other hand, where the conductivity is lowest occur good penetration of the radar and the reflectors are stronger.

**Keywords:** Ground Penetrating Radar, GPR, Continuous electrical conductivity, VERIS, Precision agriculture.

### Introdução

Este estudo refere-se à aplicação de métodos elétricos e eletromagnéticos em uma área de plantio de soja e algodão visando uma caracterização do solo para uso em agricultura de precisão.

O estudo da caracterização da condutividade elétrica do solo para agricultura de precisão se faz necessária, pois ela é um indicador das propriedades físicas e químicas do solo, que tem relações intrínsecas com a sua fertilidade (Allred *et al.*, 2003). Dentre as principais propriedades tem-se: a salinidade, conteúdo de argila, conteúdo de matéria orgânica, capacidade de troca catiônica, conteúdo de umidade e temperatura. Desta

forma, a geofísica torna-se uma ferramenta importante, pois mede a condutividade do solo *in situ* e de maneira não destrutiva (Allred *et al.*, 2003; Sudduth *et al.*, 1999).

O enfoque desse estudo é mapear a condutividade elétrica aparente, a umidade e as heterogeneidades do solo até 1 m de profundidade, visando direcionar a adubação para áreas mais carentes em nutrientes, aumentando assim a produtividade agrícola. Para tanto, foram utilizados os métodos geofísicos: eletrorresistividade e GPR-Ground Penetrating Radar. As respostas dos perfis de reflexão GPR para diferentes frequências permitiram complementar as informações sobre a estruturação geológica a maiores profundidades, até o limite de penetração do método.

Para alcançar os objetivos propostos, foi realizado um mapeamento geofísico regional preliminar da condutividade do subsolo utilizando-se o sistema de mapeamento de condutividade elétrica de solo 3100 (Veris Technologies, 2002). Através deste levantamento, foi identificada uma região que apresentava heterogeneidades nos valores da condutividade elétrica, sendo escolhida como uma área piloto para detalhamento dos estudos. Nesta área de detalhe foram realizados os levantamentos com os métodos GPR, Eletromagnético Indutivo (EM38), TDR-Time Domain Reflectometry e Elétrico (Veris 3100).

Este trabalho refere-se a uma aplicação, relativamente recente do uso dos métodos geofísicos à caracterização do solo para uso em agricultura de precisão. Em outros países, vários tipos de sensores já são utilizados para identificar zonas com anomalias de condutividade elétrica, como o Veris 3100, GPR, TDR e EM38 (Innan *et al.*, 2002; Nadler *et al.*, 2002). Os resultados de GPR permitem identificar zonas de baixa e alta condutividade no solo, identificar áreas preferenciais do fluxo de água subterrânea, heterogeneidades litológicas e a umidade do solo, através da análise da constante dielétrica (Freeland *et al.*, 1998; Yoder *et al.*, 2001; Senéchal *et al.*, 2002; Butnor *et al.*, 2003). No Brasil, entretanto, a Unesp e a Esalq vêm trabalhando com o Veris em agricultura de precisão, mas não se tem conhecimento do emprego do GPR para tal finalidade.

Neste artigo são apresentados os resultados preliminares de levantamentos de GPR e Veris 3100 realizados em uma área piloto localizada na Fazenda Farroupilha,

município de Pedra Preta-MT. Esta área está localizada dentro de um talhão utilizado para plantio de soja (Figura 1).

### Metodologia

A área piloto apresenta uma dimensão de 100 m x 100 m, dividida em 21 linhas espaçadas de 5 em 5 m. Sobre cada uma destas linhas foram realizados levantamentos com os equipamentos GPR, EM38, TDR e Veris 3100.

Os dados GPR foram adquiridos com o equipamento Ramac fabricado pela empresa sueca Mala GeoScience e os dados do sensor de condutividade elétrica do solo foram adquiridos com o equipamento Veris 3100.

Na região de estudo, aflora a unidade edafo-estratigráfica denominada de Formação Cachoeirinha (Gonçalves & Schneider, 1970). Ocorre na forma de um pacote de composição areno-argilosa, geralmente maciços, com evidências da atuação do processo de lateritização em vários estágios de desenvolvimento, desde níveis argilosos concentrados até níveis diversos de canga laterítica maciça, na forma de crostas irregulares de ferro, cimentando a sedimentação areno-cascalhosa. Intercalam-se depósitos de conglomerados aluviais com depósitos argilo-areno-cascalhosos. Os depósitos de leques aluviais são caracterizados por conglomerados polimíticos em matriz argilosa formados por seixos de quartzo e de fragmentos líticos, arredondados, com matriz sem organização interna.

A deposição desta unidade está relacionada à atuação da erosão e de processos pedogenéticos, relacionados com os controles climáticos, além da atuação de processos deposicionais controlados por água e gravidade, durante os eventos de aplainamento da superfície Sul-Americana durante o Terciário (King, 1956 *in* Weska & Svisero, 2001).

### Aquisição e Processamento dos Dados

#### GPR

Os perfis GPR foram adquiridos em todas as linhas com antenas blindadas (100 e 500 MHz) e não-blindadas (50 e 200 MHz), todas orientadas perpendicularmente à direção dos perfis (modo Transversal Elétrico – TE, Annan, 1992). Os perfis adquiridos com as antenas de 100 MHz foram obtidos com auxílio de um quadríciclo (Figura 2). Para todos os perfis o intervalo entre os traços foi de 0,1 m. Quatro sondagens de velocidade do tipo CMP-*Common Mid Point* foram adquiridas com as antenas de 100 MHz (não-blindada), visando o cálculo da velocidade de propagação da onda eletromagnética na subsuperfície.

Os perfis GPR foram processados utilizando-se o software Radan (GSSI) e as etapas básicas utilizadas no processamento foram: correção do tempo zero, correção da escala horizontal, análise do espectro de frequência, filtragem temporal do tipo passa banda, remoção do *background*, filtragem horizontal, ganhos no tempo (constante, linear, esférico e exponencial) e conversão tempo-profundidade (velocidade de 0,07 m/ns calculada com base na análise das sondagens CMP).

#### Condutividade Elétrica (VERIS 3100)

Os perfis de condutividade elétrica aparente foram adquiridos com espaçamento de 5 m. O equipamento é composto por 6 eletrodos de arado, dispostos no terreno com a configuração do arranjo Wenner (Figura 3). Para medir a condutividade elétrica na profundidade de 0,30 m, o equipamento, através de um sistema de comutação, anula dois eletrodos (i.e., 1 e 6) e a condutividade elétrica é obtida a partir da medida da corrente entre os eletrodos 2 e 5, e da medida do potencial entre os eletrodos 3 e 4; o espaçamento entre os eletrodos 2, 3, 4 e 5 é de 0,25 m. Para medir a condutividade elétrica a 1 m de profundidade, o sistema anula os eletrodos 3 e 4, e a condutividade elétrica é obtida a partir das medidas de corrente entre os eletrodos 1 e 6, e da medida do potencial entre os eletrodos 2 e 5; o espaçamento entre os eletrodos 1, 2, 5 e 6 é de 0,75 m.

O posicionamento dos pontos foi adquirido em tempo real usando-se um DGPS-*Differential Global Position System* que é acoplado a uma entrada no computador de campo. A quantidade de pontos adquirida depende da velocidade com que o veículo percorre a área a ser mapeada. Foram coletados, na área piloto, em torno de 90 pontos para cada linha, com um tempo médio para aquisição de 2 minutos. O arranjo dos eletrodos de corrente e de potencial, junto com o computador de bordo e o sistema DGPS estão mostrados na Figura 3.

Para elaborar o perfil e o mapa da distribuição da condutividade elétrica aparente utilizou-se o *software* Surfer onde os dados foram interpolados pelo método da krigagem. Em razão dos dados terem uma distribuição normal, foram utilizados 95 % dos dados, determinado pelo intervalo obtido pela média e o desvio padrão ( $\mu \pm 2\sigma$ ) (Yamamoto, 2001). Os parâmetros de interpolação utilizados foram os mesmos para os pontos das duas profundidades.

### Resultados Preliminares

#### GPR

A Figura 4 mostra os perfis GPR obtidos na Linha 1 com as antenas de 500, 200, 100 e 50 MHz.

Com a antena de 500 MHz (Figura 4a) observa-se que o sinal penetrou até 2,5 m. Nos primeiros 30 m do perfil, os refletores estão mais fortes até 1 m de profundidade e variam lateralmente; a partir daí até o final do perfil, as reflexões são mais fracas (até cerca de 0,8 m) evidenciando uma zona onde o solo é mais condutivo. Esses resultados estão de acordo com o perfil de condutividade elétrica do solo (Figura 5).

Com a antena de 200 MHz (Figura 4b) a profundidade de penetração alcançada foi 5 m. Nesta figura fica mais evidente a variação lateral da condutividade do solo. De 0 a 40 m do perfil observa-se uma zona de reflexões fortes, variando de cerca de 0,5 até 2,5 m de profundidade. De 40 m até o final do perfil, pode-se observar um aumento na atenuação do sinal do radar, ou seja, as reflexões são mais fracas devido a maior condutividade do terreno. Note que até 1 m de profundidade o perfil GPR apresenta

uma excelente correlação com o perfil de condutividade elétrica (Figura 5).

A antena de 100 MHz (Figura 4c) permitiu investigar até 9 m de profundidade. Note que em torno de 6,5 até 8 m observa-se em toda a extensão do perfil, um nítido e forte refletor irregular que é interpretado como uma camada de concreções lateríticas com argila, bastante rica em óxido de ferro. Esta interpretação foi baseada nas informações geológicas locais e furos de sondagens realizados na área. Este horizonte delimita a espessura do solo presente na área de estudos. Acima deste refletor nota-se zonas de reflexões distintas que mostram a heterogeneidade do solo. De 0 a 0,4 m nota-se uma camada bem condutiva, devido à elevada atenuação do radar. De 0,4 a 0,8 m observa-se uma camada de solo até cerca de 40 m de extensão sendo mais resistiva; de 40 até 75 m, as reflexões tornam-se mais fracas, evidenciando uma região mais condutiva; de 75 a 90 m as reflexões voltam a ficar um pouco mais forte, embora ainda atenuada, e nos 10 m finais do perfil o sinal volta a ficar atenuado. Este padrão de reflexão até 1 m de profundidade está de acordo com a variação lateral de condutividade (Figura 5).

Os padrões de reflexão encontrados correspondem aos observados na Figura 4b. De 1 até cerca de 4,5 m de profundidade ocorre uma zona com um padrão caótico de reflexões e com distintas profundidades de penetração ao longo do perfil, que evidencia as heterogeneidades da composição e das características físicas do solo.

O perfil obtido com a antena de 50 MHz (Figura 4d) investiga até a profundidade de 12 m. Ao longo de todo o perfil observa-se uma forte atenuação das reflexões do radar mostrando uma zona mais condutora. Note que esta região é mais espessa a partir da posição de 50 m.

Embora este perfil não tenha resolução para ser comparado com os dados de condutividade elétrica, devido à diferença de escala de profundidade, de uma maneira geral as ausências de reflexões estão relacionadas com um aumento na condutividade elétrica do subsolo (Figura 5).

Abaixo desta zona de alta atenuação, ocorrem reflexões fortes a partir de 0,5 m de profundidade (0-30 m de extensão) e de 3 m até cerca de 5,5 m, estando relacionadas com um material mais resistivo. Esta zona de fortes refletores é caracterizada por um padrão de reflexão caótico até encontrar o primeiro refletor "bem comportado" em torno de 7 m de profundidade. Esta zona corresponde à camada de solo, com variações laterais das reflexões, conforme observada na Figura 4c.

O forte refletor que ocorre variando de 7 a 8,5 m apresenta-se irregular, sendo causado pelas concreções lateríticas e óxidos de ferro. Logo abaixo deste refletor, em torno de 10 m de profundidade ocorre um outro refletor forte, contínuo e subhorizontal correspondente ao nível freático da região. Esta interpretação está de acordo com as informações geológicas locais.

### **Condutividade Elétrica (VERIS 3100)**

A Figura 5 mostra o perfil de condutividade elétrica aparente da Linha 1. Neste perfil estão representadas as medidas de condutividade correspondente às profundidades de 0,3 e 1 m, sendo os valores intermediários resultante do processo de interpolação.

No início do perfil, de 0 a 30 m, observa-se uma região onde predominam baixos valores de condutividade, ou seja, uma região mais resistiva; de 30 a 40 m, observa-se uma região mais condutora; de 40 até 62 m, predomina uma região mais resistora e a partir daí até o final do perfil uma região bastante condutiva. Além disso, os baixos valores de condutividade elétrica (ou seja, as regiões mais resistentes) coincidem com as áreas de maior penetração e reflexões mais fortes do sinal GPR; por outro lado, as regiões mais condutivas indicam regiões de maior atenuação do sinal GPR.

As Figuras 6 e 7 mostram os mapas da condutividade elétrica aparente correspondentes à 0,3 e 1 m de profundidade, respectivamente. De uma maneira geral, os resultados obtidos com o Veris 3100 mostraram que a distribuição da condutividade para o solo superficial (até 1 m de profundidade) é bastante heterogênea para toda a área piloto.

### **Conclusões Preliminares**

Os perfis GPR permitiram caracterizar a subsuperfície até 12 m de profundidade. As principais estruturas imageadas foram: a espessura do solo, uma camada de laterita com óxido de ferro e o topo do lençol freático. A parte rasa do subsolo (até cerca de 2,5 m) é marcada por uma variação lateral na amplitude dos refletores, estando relacionado com os horizontes condutivos e resistivos identificados nos perfis de condutividade elétrica aparente. Até 1 m de profundidade os perfis GPR apresentam uma excelente correlação com o perfil de condutividade elétrica obtido pelo Veris 3100.

O padrão de reflexão nos perfis GPR, observado entre 1 e cerca de 4,5 m de profundidade, são caracterizados por um padrão caótico de reflexões e com distintas profundidades de penetração, evidenciando as heterogeneidades da composição e das características físicas do solo. A camada de laterita varia de 7 a 8,5 m de profundidade e delimita a espessura do solo presente na área de estudos. O topo do lençol freático é identificado no perfil GPR de 50 MHz, sendo caracterizado por um forte refletor contínuo e subhorizontal, ocorrendo em torno de 10 m de profundidade.

O mapeamento da distribuição da condutividade elétrica da área de estudos, através do sensor de condutividade elétrica (Veris 3100), mostrou que a condutividade para o solo superficial (até 1 m de profundidade) varia lateralmente e é bastante heterogênea para toda a área piloto. Os baixos valores de condutividade elétrica (ou seja, as regiões mais resistentes) têm uma excelente correlação com as regiões de maior penetração e reflexões mais fortes do sinal GPR e vice-versa.

De uma maneira geral, tanto os resultados GPR quanto os resultados dos perfis de condutividade elétrica aparente, obtidos com o Veris 3100, são bastante coerentes entre si e muito animadores. Certamente, num futuro próximo os resultados serão melhores compreendidos e os métodos geofísicos poderão ser empregados de maneira mais efetiva em apoio à agricultura de precisão.

A próxima etapa da pesquisa é a busca de uma relação entre as zonas anômalas de condutividade com a umidade e os nutrientes do solo, e com isto, delimitar regiões e sugerir o uso de corretivos (adubos), visando o aumento da produtividade de grãos.

### Referências

- Allred, B.J., Ehsani, M.R., Daniels, J.J., 2003.** The Impact On Electrical Conductivity Measurement Due To Soil Profile Properties, Shallow Hydrologic Conditions, Fertilizer Application, Agricultural Tillage, And The Type Of Geophysical Method Employed. Proceedings Of Application Of Geophysics To Engineering And Environmental Problems. 2003. Cd-Rom. P. 336-349.
- Annan, A.P., 1992.** Ground Penetrating Radar - Workshop Notes. Sensors & Software Inc. 197p.
- Butnor, J.R., Doolittle, J.A., Johnsen, K.H., Stokes, T., Kress, L., 2003.** Utility of Ground Penetrating Radar as a Root Biomass Survey Tool in Forest Systems. Soil Science Society American Journal, v. 67, p. 1607-1615.
- Freeland, R.S, Yoder, R.E., Ammons, J.T., 1998.** Mapping shallow underground features that influence site-specific agricultural production. Journal of Applied Geophysics, v. 40, p. 19-27.
- Gonçalves, A. & Schneider, R. L. de 1970.** Geologia do Centro Leste de Mato Grosso. Ponta Grossa, Petrobras, Desul no. 394 - Depex - Sedoc, Relatório Técnico Interno, 2v.43p.
- Inman, D.J., Freeland, R.S., Ammons, J.T., Yoder, R.E., 2002.** Soil investigations using Eletromagnetic Induction and Ground-Penetrating Radar in Southwest Tennessee. In: Soil Science Society American Journal, v. 66, p. 206-211.
- Nadler, A., Green, S.E., Vogeler, I., Clotier, B.E., 2002.** Horizontal and vertical TDR Measurement of soil water content and eletrical conductivity. Soil Science Society American Journal, v. 66, p. 735-743.
- Sénéchal, P., Perroud, H., Bourg, A.C.M., 2002.** Characterization of agricultural Contaminant Transport using Ground Penetration Radar and Electrical Data. Ninth International Conference on Ground Penetrating Radar vol 4758 p. 460-465.
- Sudduth, K.A., Kitchen, N.R. and Drummond, S.T., 1999.** Soil conductivity sensing on claypan soils: comparison of eletromagnetic induction and direct methods In: Proc. 4th International Conference on Precision Agriculture, Vol II, p. 979-990. ASA. CSSA, SSSA, Madison, WI.
- Veris Technologies, 2002.** 3100 SOIL EC. MAPPING SYSTEM. Operations Manual. Salina.
- Yamamoto, J.K., 2001.** Geoestatística Aplicada. Apostila de curso, 84p.
- Yoder, R.E., Freeland, R.S., Ammons, J.T., Leonard, L.L., 2001.** Mapping agricultural fields with GPR and EMI to identify offsite movement of agrochemicals. Journal of Applied Geophysics, v. 47, p. 251-259.
- Weska, R.K., Svisero, D.P., 2001.** Aspectos Geológicos de algumas intrusões kimberlíticas da região de Paranatinga, Mato Grosso. Revista Brasileira de Geociências, v. 31, n. 4, p. 555-562.

### Agradecimentos

Ao IAG-USP pela infra-estrutura necessária para a realização desta pesquisa. À CAPES pela bolsa de mestrado. Aos Coordenadores do Projeto Prof. Eduardo Magalhães Couto e Prof. Ricardo S.S. Amorim (UFMT) pelo apoio financeiro. Ao Prof. Mário José Pereira (UFMT) e ao técnico Ernande Costa Santos (IAG/USP) pelo fundamental apoio durante a aquisição de dados. Ao Eng. Agrônomo Tiago Hinnah da Fazenda Farroupilha pelo apoio logístico.

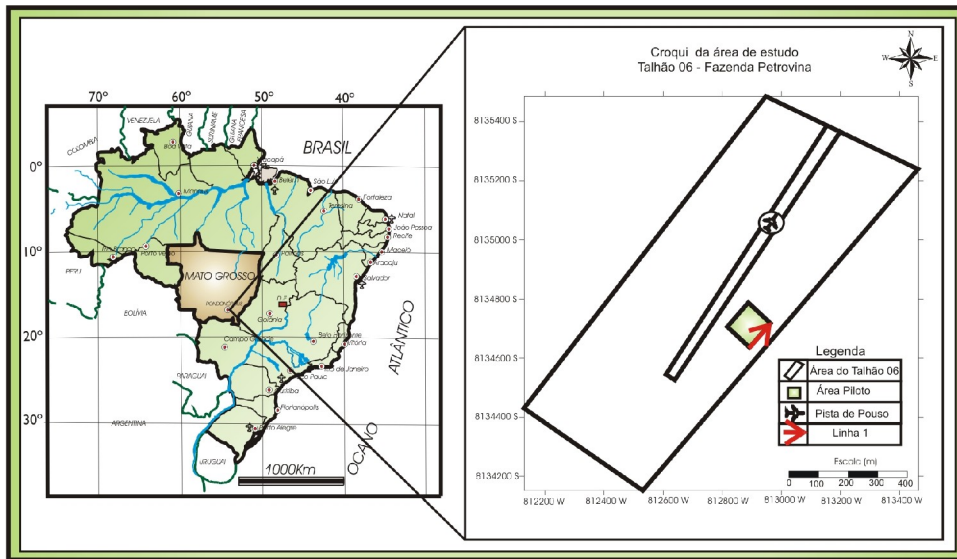


Figura 1. Localização da área de estudo.



Figura 2. Aquisição GPR com antena blindada de 100 MHz.



Figura 3. Aquisição de dados de condutividade elétrica contínua com Veris 3100.

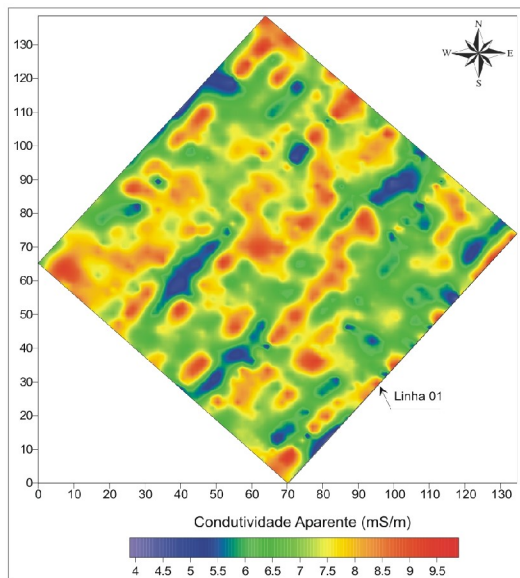


Figura 6. Mapa de condutividade elétrica em 0,3 m.

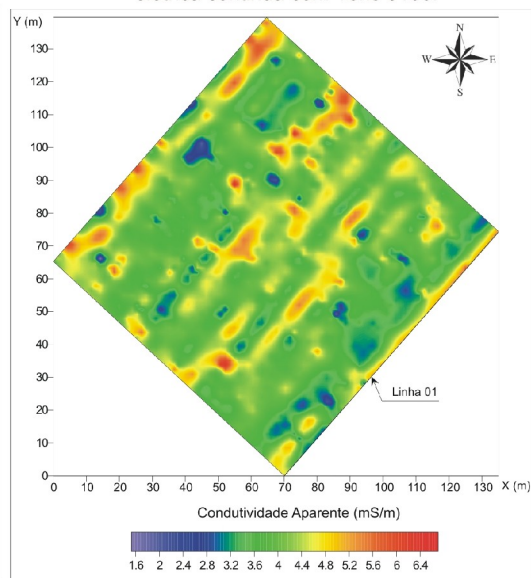


Figura 7. Mapa de condutividade elétrica em 1 m.



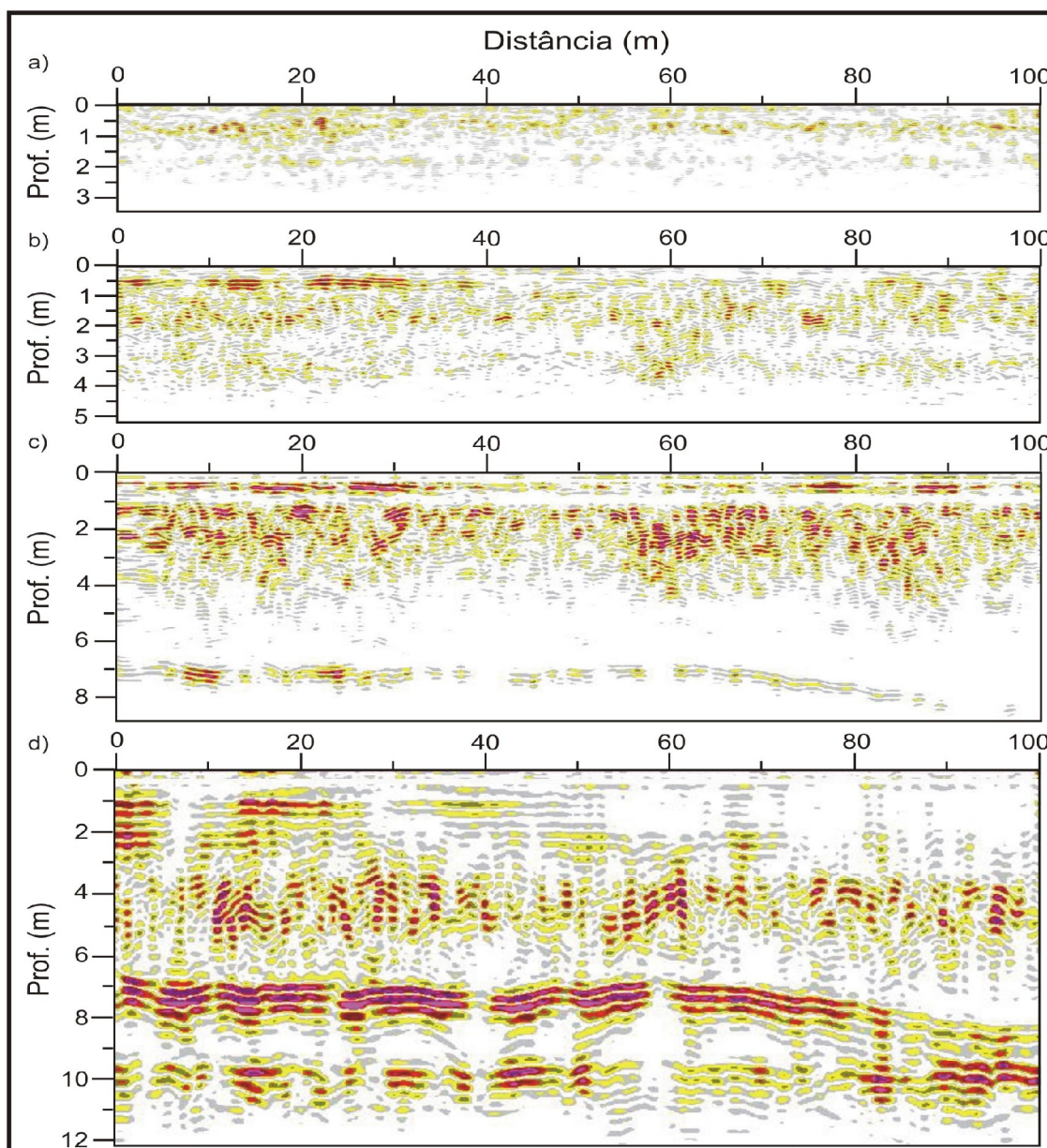


Figura 4. Perfis GPR. a) 500 MHz, b) 200 MHz, c) 100 MHz e d) 50 MHz.

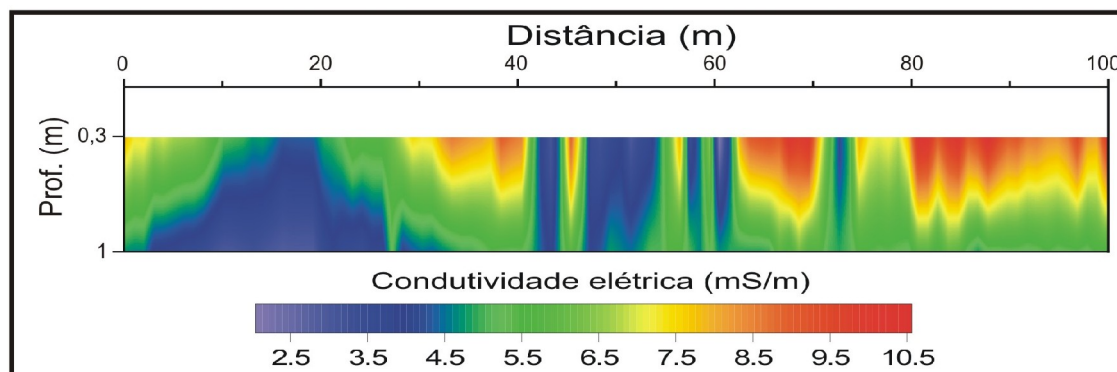


Figura 5. Perfil de condutividade elétrica contínua (Veris) do solo interpolada de 0,3 a 1 m.