



# Investigating Quadrilátero Ferrífero region stratigraphy, structures and hydrogeology using integrated geophysics methods

Jorge Roncato, Guilherme Prosdocimi, Maximiliano Simão, Juliano Vitorino (Neogeo Geotecnologia LTDA.)

Copyright 2015, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 14<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 3-6, 2015.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 14<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

We propose to deepen the interpretation of combined geophysical methods (georadar and electric) to assess physical properties characterizing the near-surface geological formations, structures and the influence of water. Velocity analysis of multioffset georadar data are used to estimate the structures, lateral and vertical ground water fluctuations. This enables us to identify transitions from non-saturated to fully saturated layers with certainty. These geophysical investigations, in parallel with geological analyses, helped in the decision to locate trench excavations exposing the fault surfaces. Geophysical methods pointed out anomalies at all sites of the fault position. The contrast of physical properties (electrical resistivity and permittivity, seismic velocity) observed between the two fault blocks is a result of a difference in the lithology of the juxtaposed soil layers and of a change in the water table depth across the fault. In a second step, more detailed methods (electrical tomography and GPR) more precisely imaged the fault zone and revealed some structures that were observed in the trenches. Like all geophysical surveys, the quality of the data is strongly dependent on the geologic environment and on the contrast of the physical properties between the juxtaposed formations. This study displays the impact of combined geophysical approaches for providing geologic models.

## Introdução

A área de trabalho encontra-se a norte do município de Conselheiro Lafaiete, estado de Minas Gerais. No contexto geotectônico do Quadrilátero Ferrífero (QF), Geologicamente engloba complexos metamórficos de rochas cristalinas; sequências vulcano-sedimentares do tipo *greenstone belt*, de idade Arqueana (Supergrupo Rio das Velhas); coberturas sedimentares platformais de idade Proterozóica Inferior (Supergrupo Minas e Grupo Itacolomi) e coberturas sedimentares Fanerozóicas, constituídas por bacias interiores terciárias de ocorrência restrita.

Na região de Conselheiro Lafaiete, local de estudo do atual relatório, as rochas existentes pertencem à

sequência vulcano-sedimentar *greenstone belt* do Supergrupo Rio das Velhas e rochas intrusivas representadas pela granitogênese plutônica paleoproterozóica denominada na região como Batólito Alto Maranhão.

Segundo trabalho de Damasceno (2008), o manganês da região é descrito como uma rocha sílico-carbonatada. Estarocha apresenta-se compacta, com textura afanítica, tendo os seguintes minerais principais: Rodocrosita ( $MnCO_3$ ), Quartzo ( $SiO_2$ ), Espessartita [ $Mn_3Al_2(Si_3O_{12})$ ], Rodonita ( $Mn_3Si_3O_9$ ), Tefroíta [ $Mn_2(SiO_4)$ ], Sulfetos (pirrotita, pirita, calcopirita e galena).

## Métodos

O equipamento utilizado nos trabalhos foi *SuperStingR8/IP* da AGI (*Advanced Geoscience Inc.*) com configuração de 84 canais.

Diante do objetivo proposto, foram realizadas 08 (oito) seções de GPR na área. Neste trabalho foi utilizado o equipamento SIR3000 do fabricante GSSI com antena de 15 MHz (MLF – *Multi Low Frequency*). A interpretação dos dados de GPR foi realizada na Suite de Aplicativos da *LandMark*, utilizando-se os módulos 2D do *SeisVision*. Este aplicativo permite interpretações geológicas com integração de dados de outras ferramentas. Caminhamento Elétrico (CE) - Eletroresistividade

## Resultados

As análises das seções geofísicas consideraram as diferenciações nos perfis em virtude da sua magnitude em Zonas de Alta Resistividade aparente (ZAR) cujos valores encontram-se acima de 700,0 ohm.m e Zonas de Baixa Resistividade aparente (ZBR), cujos valores estão abaixo de 25,0 ohm.m. Dentro das ZBR, os valores abaixo de 8,0 ohm.m foram caracterizados por locais com presença de concentrações de minério de manganês. Este valor foi estabelecido com base em trabalhos geofísicos relacionados à problemática do presente estudo (figura 1)

As seções 1 e 2 apresentaram, de maneira geral, um comportamento similar em relação à disposição das zonas geofísicas devido à proximidade e paralelismo nas aquisições o que contribuiu para uma interpretação conjunta. A porção superior das seções é marcada por um predomínio de Zonas de Alta Resistividade aparente (ZAR) e que podem estar relacionadas a rochas com fraturas não preenchidas por água. Porções já rompidas próximas do início das seções com presença de material desagregado com grande quantidade de ar preenchendo os espaços vazios corrobora para um aumento

significativo nas resistividades aparentes de ambas as linhas.

As Zonas de Baixa Resistividade aparente (ZBR) dominam as demais porções das seções e encontram-se próximas à superfície dos perfis. Assim, essas zonas podem estar associadas a rochas com fraturas preenchidas por água e que marcam o aquífero regional. Anomalias condutivas cujos valores de resistividade aparente estão abaixo de 8,0 ohm.m estão localizadas aproximadamente na porção central de ambas seções e podem ser relacionadas à associação com ocorrência de rochas manganíferas.

Os perfis 6 e 7 apresentaram, de maneira geral, um comportamento similar em relação à disposição das zonas geofísicas devido a proximidade e paralelismo nas aquisições o que contribuiu para uma interpretação conjunta.

A porção superficial, em geral, é mais resistiva, apresenta características descontínuas e pode estar associada a materiais desagregados e/ou material rochoso com fraturas não preenchidas por água, o que acaba por aumentar o valor das resistividades aparentes. Anomalia resistiva aparece em ambas as seções, na porção central, e pode estar relacionada também à rocha mais preservada sem presença de água entre as fraturas.

Zonas de Baixa Resistividade aparente (ZBR) podem ser observadas próximas ao início de ambos os perfis e podem estar associadas a regiões com maior teor de umidade e/ou aquíferos suspensos o que acaba por diminuir o valor das resistividades aparentes. Anomalias condutivas cujos valores de resistividade aparente estão abaixo de 8,0 ohm.m podem ser relacionadas às rochas enriquecidas em manganês.

O perfil é caracterizado por não apresentar Zonas de Baixa Resistividade aparente (ZBR) significativas. A porção superficial apresenta resistividades aparentes intermediárias marcando um horizonte ondulado que pode estar relacionado à rocha mais alterada e/ou material aterrado.

A porção logo abaixo é caracterizada pelo aumento significativo das resistividades aparentes e que pode estar vinculada à rocha mais preservada com fraturamento não preenchido por água. Uma anomalia também resistiva próxima à superfície da seção é encontrada no início da seção 3.

A porção basal da seção sugere uma queda nas resistividades aparentes. Tal fato pode estar associado à existência de uma região saturada e/ou úmida cujas cotas tendem a corroborar com o aquífero fraturado regional também identificado nas linhas 1 e 2.

Anomalias condutivas próximas ao fim da seção nas cotas 990 metros e 980 metros, aproximadamente, podem estar associadas a regiões com presença de aquíferos suspensos e/ou maior umidade. Da mesma forma, próximo ao início da seção, há presença de porções com valores de resistividade aparente mais baixos e que também podem estar associados à região com maior umidade e/ou aquíferos suspensos.

A porção basal da seção é caracterizada por uma queda nas resistividades aparentes e que pode estar relacionada a região saturada e/ou úmida e cujas cotas tendem a corroborar com o aquífero fraturado regional identificado nas linhas 1 e 2.

Anomalias condutivas podem estar associadas a estruturas preenchidas por água e/ou maior umidade assim como a aquíferos suspensos presentes na mina.

Anomalias caracterizadas por baixas resistividades aparentes aparecem próximas ao início da seção desde a cota 990 metros até a porção basal do perfil. Tais anomalias sugerem patamares próximas às cotas 990 metros, 980 metros e 950 metros e que podem estar associados a níveis de água suspensos e/ou zonas de maior umidade com conexão entre as mesmas. Já a porção basal da seção também sugere uma anomalia condutiva que pode estar relacionada ao aquífero fraturado regional.

### ***Polarização Induzida – IP***

Os valores adquiridos para a cargabilidade aparente neste trabalho foram enquadrados em virtude da sua magnitude em Zonas de Alta Cargabilidade aparente (ZAC), Zonas de Baixa Cargabilidade aparente (ZBC) e Zonas de Cargabilidade Intermediária (ZIC). As Zonas de Baixa Cargabilidade aparente apresentam valores que podem chegar até 4,0 msec enquanto as Zonas de Alta Cargabilidade aparente apresentam valores acima de 28,0 msec.

As imagens geradas pelo método de polarização induzida (IP) e as interpretações pertinentes às mesmas são apresentadas na Figura 2.

As seções geofísicas apresentam um comportamento heterogêneo em relação à disposição das zonas geofísicas. As seções L-01, L-02, L-05 a L-07 apresentam ZAC e ZBC distribuídas aleatoriamente, com maior predomínio de altas cargabilidades na porção central e próximo ao início e fim das linhas.

As seções L-03, L-04 e L-08 registram ZBC em quase totalidade das seções, apresentando certa homogeneidade e constância dos resultados. Entretanto, anomalias localizadas de alta cargabilidade e de menores proporções podem ser visualizadas nas seções, como na porção superior próximo ao início da seção L-08 e próximo ao fim da seção L-04.

### ***Ground Penetrating Radar - GPR***

Para a interpretação dos dados de GPR foram utilizados conceitos de radar-estratigrafia, com individualização das diferentes fácies presentes em cada seção de GPR, em termos de estrutura interna dos refletores tais como forma, mergulho, relação e continuidade.

As seções são mostradas por meio de uma paleta em tons de verde e vermelho e que alcançaram aproximadamente 50,0 (cinquenta) metros de profundidade. As imagens geradas pelo método de GPR e as interpretações pertinentes às mesmas são apresentadas na figura 3.

A análise das seções permitiu identificar o contato entre 3 (três) pacotes distintos. O primeiro fortemente contrastado, com refletores planos, sem mergulho, internamente paralelos e contínuos. Tal pacote pode estar associado à rocha com fraturamento não preenchido por água.

O segundo pacote, atenuado, apresenta um padrão de refletores subparalelos, moderadamente contínuos a descontínuos e pode estar relacionado à rocha com fraturas preenchidas por água.

O último pacote apresenta refletores também contrastados, descontínuos, subparalelos e com mergulho.

A linha 1 apresenta planos de fraqueza que podem estar relacionados a descontinuidades associadas ao encontro de famílias de falhas/fraturas. Tais famílias possuem medidas variadas de mergulho: ângulos baixos (de 20° a 30°), ângulos de 40° a 55° e subverticais, todos com direção SE ou SW/NW.

A linha 2 apresenta família de falhas/fraturas também com medidas variadas de mergulho: sub-horizontais (14° a 20°), ângulos entre 39° e 49° e subverticais, concentradas na porção central da seção e direção aproximada SE ou SW/NW.

As linhas 6 e 7 apresentam, em geral, ângulos de mergulho entre 30° e 45°, com direção aproximada SE ou SW/NW.

A seção permitiu a inferência de falhas/fraturas com medidas variadas de mergulho: ângulos baixos (de 20° a 25°), ângulos entre 40° e 55°, todos com direção aproximada SE ou SW/NW.

A linha 4 foi dividida em 4 (quatro) pacotes distintos. O primeiro, contrastado, é formado por refletores planos, sem mergulho e contínuos e pode estar relacionado a materiais desagregados e/ou material de aterro com poros preenchidos por ar.

O segundo pacote apresenta refletores paralelos, moderadamente contínuos a descontínuos com forte atenuação de sinal próximo ao início da seção. O terceiro pacote, mais contrastado, apresenta refletores moderadamente descontínuos e sub-horizontais. Por último, o quarto pacote apresenta padrão de refletores caóticos. Tais pacotes podem estar relacionados à presença de rocha em diferentes graus de preservação o que altera o padrão das reflexões internas. A porção mais atenuada próxima ao início da seção pode estar associada à região mais úmida e/ou aquífero suspenso.

O perfil apresenta planos de fraqueza que podem estar relacionados ao encontro de famílias de falhas/fraturas persistentes e que podem configurar descontinuidades. Tais famílias apresentam medidas variadas de mergulho entre 30° e 50° e poucas medidas com ângulos baixos, todas com direção SE ou SW/NW.

A linha 5 apresenta família de falhas/fraturas com medidas variadas de mergulho: aproximadamente com 20°, entre 35° e 50° e poucas medidas com ângulos subverticais.

A linha 8 mostra famílias de falhas/fraturas, em geral, apresentam ângulos de mergulho entre 35° e 45°, com direção de mergulho para SE ou SE/NW. O encontro de famílias de falhas/fraturas podem configurar descontinuidades associadas à estruturação da área.

### Conclusão

Através da análise integrada dos dados foi possível associar regiões caracterizadas por altas resistividades aparentes coincidentes com regiões de forte contraste dos refletores nas seções de GPR e que podem estar relacionados a rochas com fraturamento não preenchido por água quando em profundidade e material desagregado oriundo de solo residual e/ou material de aterro quando em subsuperfície. Da mesma forma, regiões formadas por um predomínio de Zonas de Baixa Resistividade aparente (ZBR) associam-se a Zonas de Alta Cargabilidade aparente (ZAC) e também à forte atenuação do sinal de GPR e podem estar relacionadas a s com maior umidade e/ou rochas com fraturamento preenchido por água e que configuram aquíferos suspensos ou regionais.

Famílias de falhas/fraturas identificadas nas seções de GPR apresentam ângulos de mergulho que se repetem ao longo dos perfis e que coincidem com descontinuidades marcadas nas seções de eletrorresistividade através de mudanças abruptas nas resistividades aparentes. Próximo às rochas alteradas e/ou saprólitos, o ângulo de mergulho tende a ser menor e as falhas/fraturas tornam-se menos inclinadas que quando em profundidade.

Identificou-se que a baixa resistividade aparente (abaixo de 8,0 ohm.m) aliada a altas cargabilidades aparentes podem estar relacionadas à ocorrência de rochas com manganês. Estas rochas, apresentam uma maior quantidade de fraturas abertas, o que permite uma definição de uma unidade aquífera distinta das demais rochas encaixantes. Portanto, apresentam forte tendência condutiva tanto pela característica mais condutiva intrínseca do manganês quanto pela presença de água preenchendo as fraturas abertas que configuram uma unidade aquífera.

Nas linhas geofísicas L-01, L-02, L-06 e L-07, as porções em que ocorrem anomalias abaixo de 8,0 ohm.m são caracterizadas por uma melhor definição e persistência das fraturas nos perfis de GPR o que acaba por representar uma porção de maior fraturamento.

As demais seções (L-03, L-04, L-05 e L-08) apresentam resistividades aparentes mais elevadas nas seções de eletrorresistividade e, em geral, maior contraste nos perfis de GPR. Tais perfis estão sobre rochas encaixantes o que corrobora com os resultados mais resistivos levantados pela geofísica.

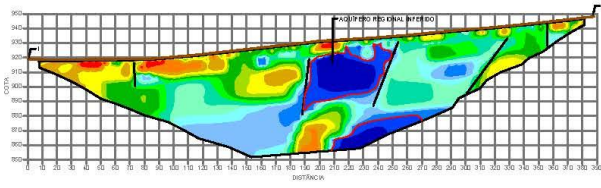
### Bibliografia

Barbosa, O. 1954. *Evolution du Geosinclinal Espinhaço*. In: *International Geological Congress*, 18, Alger., p.2-27;

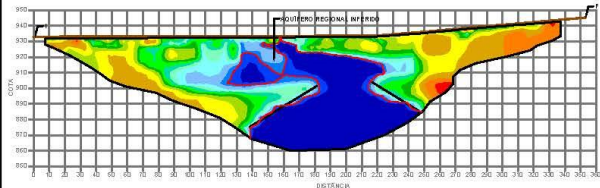
- Braga, A. C.O. 2009. Métodos Geométricos Aplicados. Módulo Hidrogeologia. UNESP. 27p;
- Damasceno, C. S. R. 2008. Modelagem Geológica e Geomecânica 3D e Análises de Estabilidade 2D dos Taludes da Mina de Morro da Mina, Conselheiro Lafaiete, MG, Brasil. Tese de Mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro, 165p.;
- Dorr II, J. V. N. 1969. *Physiographic, stratigraphic and structural development of Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*. USGS. Prof. Paper, 641-A, 110 pp, Washington;
- Endo, I. 1997. Regimes tectônicos do Arqueano e Proterozóico no interior da Placa Sanfranciscana: Quadrilátero Ferrífero e minas adjacentes, Minas Gerais. Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, Tese de Doutorado, 243 p;
- Grossi Sad, J. H.; Pinto C. P.; Duarte C. L. 1983. Geologia do Distrito Manganêsífero de Conselheiro Lafaiete, MG. In: SBG, Simp. Geol. Minas Gerais, 2, Anais, 3:259-270;
- Guild, P. W. 1957. *Geology and mineral resources of the Gongonhas district, MG, Brazil*. U.S. Geological Survey Paper 290, 1-89. Guild et al. (s.d.). Mapas geológicos das quadrículas Casa de Pedra, São Julião, Jeceaba e Gongonhas, em escala 1:25.000. DNPM/USGS;
- Harari, Z., 1996. *Ground-penetrating radar (GPR) for imaging stratigraphic features and groundwater in sand dunes*. *Journal of Applied Geophysics*, 36: 43-52;
- Noce, C. M. 1995. Geocronologia dos Eventos Magmáticos, Sedimentares e Metamórficos na Região do Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 128 p;
- Pires, F. R. M. 1977. Geologia do Distrito Manganêsífero de Conselheiro Lafaiete. Dissertação de Mestrado, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 344 p;
- Robinson, S; Michaud, Y. 1999. *Ground penetrating radar*. In: *Handbook of Geophysical Techniques for Geomorphic and Environmental Research*. Gilbert, B. Editor, *Open file 3731, Geological Survey of Canada*, p. 69-102;
- Seixas, L. A. R. 1988. Geologia e Metalotectos de Ouro de uma Fração do Lineamento Congonhas, Minas Gerais. Universidade de Brasília-UNB, Dissertação de Mestrado, 119p;
- Seixas, L. A. R. 2000. *Pétrologie de la suite TTG de la bordure nord du batholite d'Alto Maranhão et du pluton Congonhas, Minas Gerais, Brésil*. Centre Scientifique d'Orsay, Université de Paris-Sud, Orsay, France & Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Tese de Doutorado, 202p;
- Telford, W. M.; Geldart, L. P.; Sheriff, R. A. 1990, *Applied geophysics*, 2nd

SEÇÕES DE CAMINHAMENTO ELÉTRICO

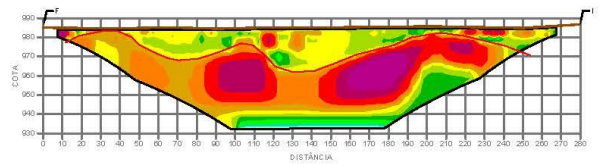
LINHA 01



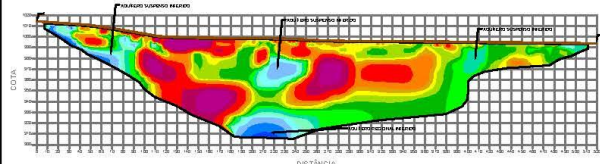
LINHA 02



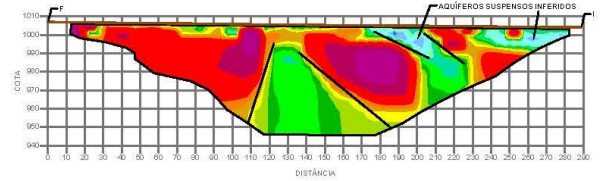
LINHA 03



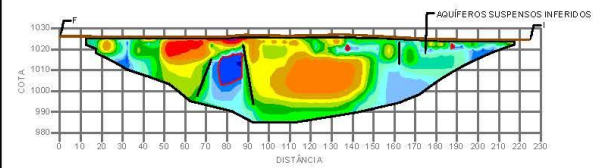
LINHA 04



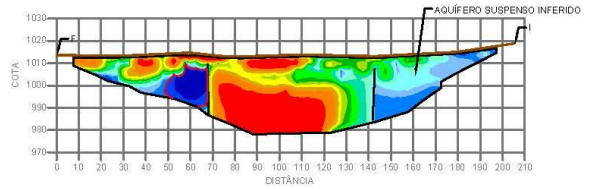
LINHA 05



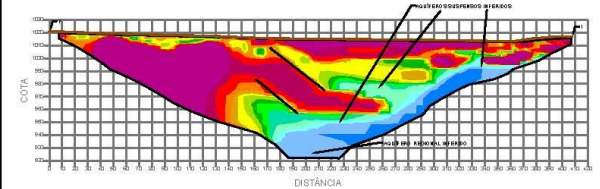
LINHA 06



LINHA 07



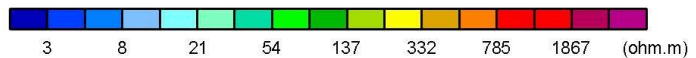
LINHA 08



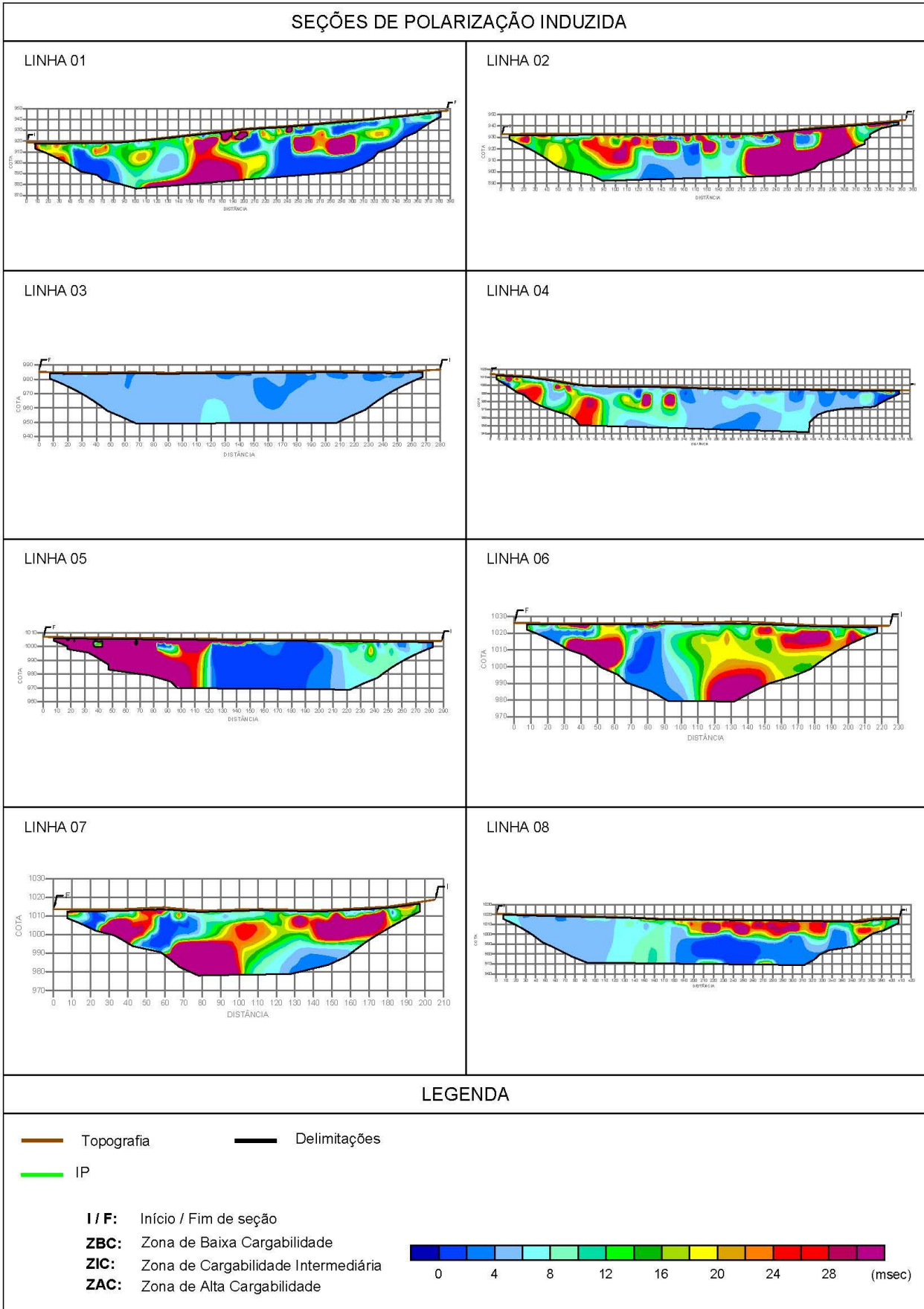
LEGENDA

- Topografia
- Possível Zona Mineralizada
- C.E.
- Descontinuidades

- I / F:** Início / Fim de seção
- ZBR:** Zona de Baixa Resistividade
- ZIR:** Zona de Resistividade Intermediária
- ZAR:** Zona de Alta Resistividade

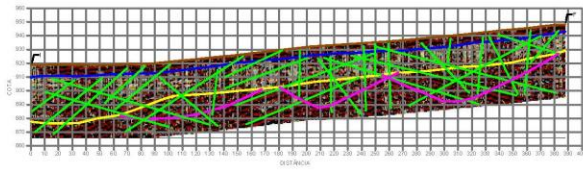


SEÇÕES DE POLARIZAÇÃO INDUZIDA

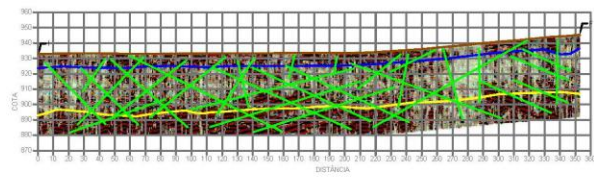


SEÇÕES DE GPR

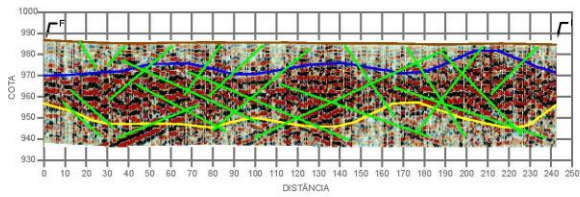
LINHA 01



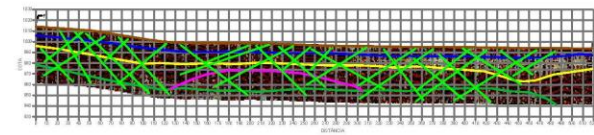
LINHA 02



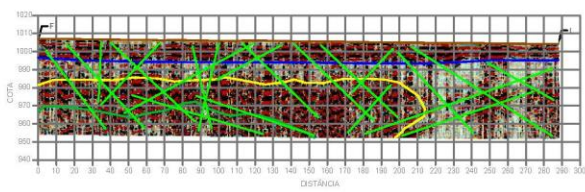
LINHA 03



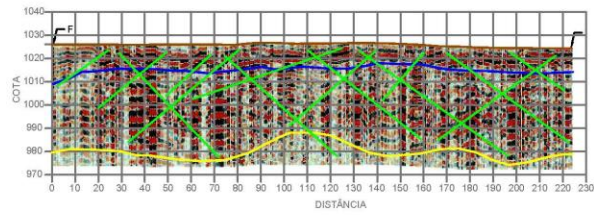
LINHA 04



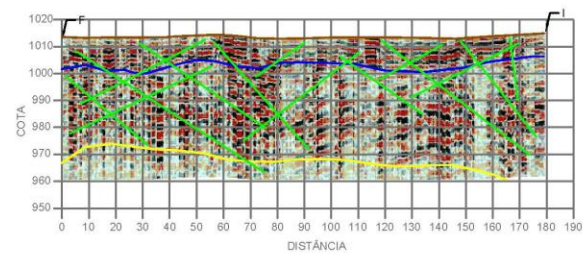
LINHA 05



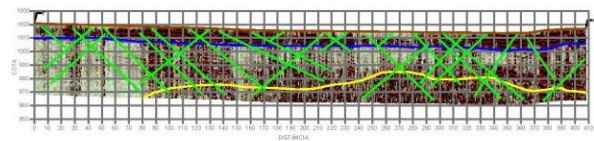
LINHA 06











LINHA 07



LINHA 08



LEGENDA

- |   |            |   |                       |
|---|------------|---|-----------------------|
|  | TOPOGRAFIA |  | DESCONTINUIDADES      |
|  | PACOTE 1   |  | FALHAS/FRATURAS       |
|  | PACOTE 2   |  | GPR                   |
|  | PACOTE 3   |  | Início / Fim de seção |