

# INTEGRAÇÃO DE INFORMAÇÕES GEOLÓGICAS E GEOFÍSICAS PARA ESTUDOS DE AQUIFEROS FRATURADOS

Adriana Chatack Carmelo<sup>1</sup>; José Elói G. Campos<sup>1</sup>; Roberto A. V. de Moraes<sup>2</sup>; José Oswaldo de Araújo Filho<sup>1</sup>

## Resumo

Na região do Distrito Federal, os psamitos, constituintes parciais dos grupos Paranoá e Bambuí, definem importante controle hidrogeológico. Esses litotipos apresentam características rúpteis que geram um maciço intensamente fraturado, quando em condições tectônicas rasas e neotectônicas distensivas. As fraturas mantêm e regulam a alimentação dos sistemas hidrogeológicos no domínio fraturado.

Uma metodologia de integração de dados geo-estruturais, hidrogeológicos e geofísicos é proposta para identificar fraturas armazenadoras de água em profundidade.

As áreas potenciais selecionadas pela análise estrutural mostram três padrões de fraturas (NS, EW e N50°-60°W). As duas primeiras são juntas abertas de Modo I, ideais para o acúmulo de água por apresentar ampla porosidade secundária e apresentar mergulho em alto ângulo a sub-verticais.

As três direções de fraturas mostraram comportamento anômalo nos levantamentos geofísicos terrestres realizados com técnicas (FDEM) dos métodos eletromagnéticos (VLF e EM-34), indicando a presença de condutores com água, localizando, portanto, zonas aquíferas fraturadas.

Os resultados mostraram que os dados geofísicos são eficientes no mapeamento das fraturas que armazenam água. A interpretação integrada dos dados resultou na identificação de conectividade das estruturas em subsuperfície, confirmando a presença de água e a existência de um sistema hidráulico comunicante alimentado pelas fraturas NS e EW.

**Palavras-chave** - Aquíferos fraturados, métodos eletromagnéticos, Distrito Federal.

## Abstract

The psamitic-bearing sequence, partial constituent of the Paranoá and Bambuí groups, in the Federal District controls the hydrogeological conditions, due to the brittle reologic properties of their rocks. These lithostratigraphic groups are strongly fractured, resulting from important brittle deformation and extensive neotectonic processes. Therefore, fractures supply and regulate these hydrogeological systems in the study area.

This work presents a methodology of integrated data from lithologic, structural, hydrological, and geophysics settings that led to identification of fractured aquifers. The opening of fracture is the natural conduit for recharge, control, and support of the studied hydrogeological systems.

<sup>1</sup> Universidade de Brasília / Instituto de Geociências. Campus Darcy Ribeiro. CEP: 70.910-900 Brasília-DF. Telefone: (61) 3307-2434, Fax: (61) 3272-4286. chatack@unb.br, eloi@unb.br, oswaldo@unb.br

<sup>2</sup> HGEO | INTERGEO Geociências Ltda. SCLN 111 bloco C sala 220. CEP: 70.754-530. Brasília-DF. Telefone/Fax: (61) 3274-4533. rmoraes@hgeointergo.com.br

Three main directions of vertical fractures (NS, EW, and N50°-60°) were indicated as fractured potential aquifer based on structural analysis. Fractures display electromagnetic anomalies (VLF and EM-34 ground surveys) from water on fracture zones.

Integrated final product imparts to geophysics and litho-structural data a powerful tool to pinpoint fractures with water, and determine fractured aquifer. Therefore, these results contribute to the betterment of the hydrogeology and litho-structural control in the Federal District.

**Keywords** - Fractured aquifers, electromagnetic geophysical methods, Federal District.

## INTRODUÇÃO

No Distrito Federal a água subterrânea está associada aos aquíferos de domínios intergranulares, fraturados e físsuro-cársticos. Devido às características hidrogeológicas da região, os sistemas de porosidade secundária fissural e físsuro-cárstico são os mais promissores como fonte complementar para o abastecimento de água.

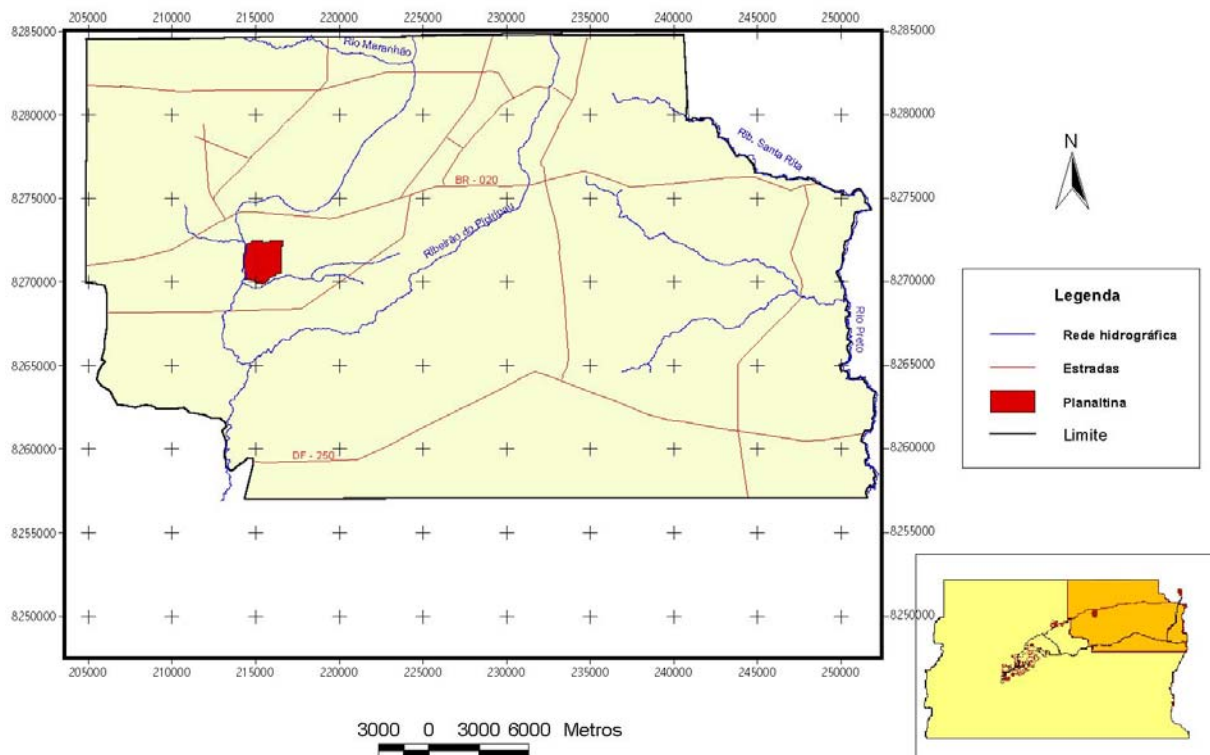
Para o presente estudo foi selecionado o quadrante nordeste do Distrito Federal como alvo. A área é constituída principalmente por litotipos psamíticos com características rúpteis, resultando na quebra de coesão dos materiais, e que gera maciços intensamente fraturados, em diferentes escalas, quando em condições tectônicas rasas e neotectônicas distensivas. São essas estruturas abertas que mantêm e regulam a alimentação dos sistemas hidrogeológicos no domínio fissural. Na região, essas fraturas podem permanecer abertas até profundidades maiores que 180 metros, o que não ocorre em fraturas presentes em litotipos mais pelíticos que tendem a acomodação abaixo de 150 metros.

Para localização das zonas aquíferas fraturadas, faz-se uso de levantamentos geofísicos terrestres realizados com técnicas (FDEM) dos métodos eletromagnéticos (VLF e EM-34), os quais indicam a presença de condutores decorrentes da presença de água por comportamento anômalo.

A técnica de VLF foi aplicada como ferramenta indicativa da presença de água e qualificadora das fraturas como aquíferos, enquanto a do EM-34 detalhou e posicionou em determinada profundidade de investigação as feições anômalas.

Uma metodologia de integração de dados geo-estruturais, hidrogeológicos, de sensoriamento remoto e geofísicos é aqui proposta, para identificar fraturas armazenadoras de água em maiores profundidades (Carmelo, 2002).

A área de estudo está situada cerca de 40 km de Brasília, DF, e localiza-se geograficamente entre as latitudes 15°30'00''S e 15°45'00''S e longitudes 47°20'00''W e 47°40'00''W (Figura 1). Esta perfaz quase todo o quadrante Nordeste do DF, com 1107 km<sup>2</sup> onde o maior segmento leste-oeste tem 35,65 km e o segmento norte-sul o máximo de 31 km. As principais vias de acesso à área são, no sentido EW, a BR - 020 que liga o Distrito Federal à região Nordeste do Brasil e a rodovia DF - 250, que conecta Planaltina (DF) à cidade de Formosa (GO).



**Figura 1** - Mapa de localização da área de estudo.

Barros (1993) classifica os aquíferos porosos com importância limitada no DF, mas indica a existência de promissoras fontes complementares de água com porosidade primária como aluviões, coluviões e manto laterítico. O ambiente geológico é constituído por rochas metamórficas de baixo grau (quartzitos, ardósias e filitos) intensamente fraturadas, caracterizando os aquíferos fraturados como a principal fonte de recurso hídrico. Tais aquíferos apresentam comportamento hidrogeológico variável, heterogêneo, mas os quartzitos (Unidade **Q<sub>3</sub>**) e os calcários (Unidade **PPC**) do Grupo Paranoá apresentam elevada capacidade de armazenamento e vazões específicas. Os tipos de aquíferos presentes na região são descritos e uma subdivisão hidrogeológica é proposta, em que avalia os aquíferos em função do ambiente geológico, da capacidade de armazenamento e das vazões específicas (Barros, 1993).

Campos e Freitas-Silva (2001) caracterizam o ambiente hidrogeológico do DF em **sistemas** que se baseiam nos tipos de aquíferos (poroso e fissural) e em **subsistemas** que representam os tipos litológicos das unidades litoestratigráficas constituintes do ambiente geológico (Tabela 1), as quais foram definidas também por Faria (1995) e Freitas-Silva e Campos (1998).

Os principais subsistemas constituintes do Sistema Paranoá são **Q<sub>3</sub>/R<sub>3</sub>** e **S/A** que apresentam as maiores vazões na região. No **Subsistema Q<sub>3</sub>/R<sub>3</sub>**, composto pelas unidades **Q<sub>2</sub>** (Quartzitos Conglomeráticos), **Q<sub>3</sub>** (Quartzitos Médios) e **R<sub>3</sub>** (Metarritmitos Arenosos) predominam rochas arenosas. Os quartzitos estão em grande distribuição de área e neles estão impressas as fraturas mais importantes para o contexto hidrogeológico, no domínio fissural.

**Tabela 1** - Aquíferos do domínio fissural com médias de vazões (Campos e Freitas-Silva, 2001).

SISTEMA PARANOÁ		SISTEMA CANASTRA		SISTEMA BAMBUÍ	SISTEMA ARAXÁ
Subsistema Q <sub>3</sub> /R <sub>3</sub>	12,0 (m <sup>3</sup> /h)	Subsistema F	6,0 (m <sup>3</sup> /h)	6,0 (m <sup>3</sup> /h)	3,0 (m <sup>3</sup> /h)
Subsistema S /A	12,0 (m <sup>3</sup> /h)	Subsistema F/Q/M	33,0 (m <sup>3</sup> /h)		
Subsistema A	4,0 (m <sup>3</sup> /h)				
Subsistema R <sub>4</sub>	6,0 (m <sup>3</sup> /h)				
Subsistema PPC	9,0 (m <sup>3</sup> /h)				

O **Subsistema S/A** (Metassiltitos/ Ardósias) é constituído por metassiltitos que ocorrem em áreas com elevada densidade populacional (urbana e rural), o que confere grande importância a esse subsistema por causa de sua localização espacial ser estratégica. As camadas psamíticas, topo da Unidade **S**, são excelentes reservatórios de água e apresentam pequena incidência de poços secos. Nesse local, metarritmitos arenosos e quartzitos estratificados apresentam vazões superiores a 30 m<sup>3</sup>/h. Os demais sistemas constituem importantes fontes de abastecimento de áreas urbanas, núcleos rurais, condomínios e assentamentos em função da posição estratégica e das vazões obtidas nos aquíferos (Campos e Freitas-Silva, 2001).

### Características Hidrogeológicas da Área de Estudo

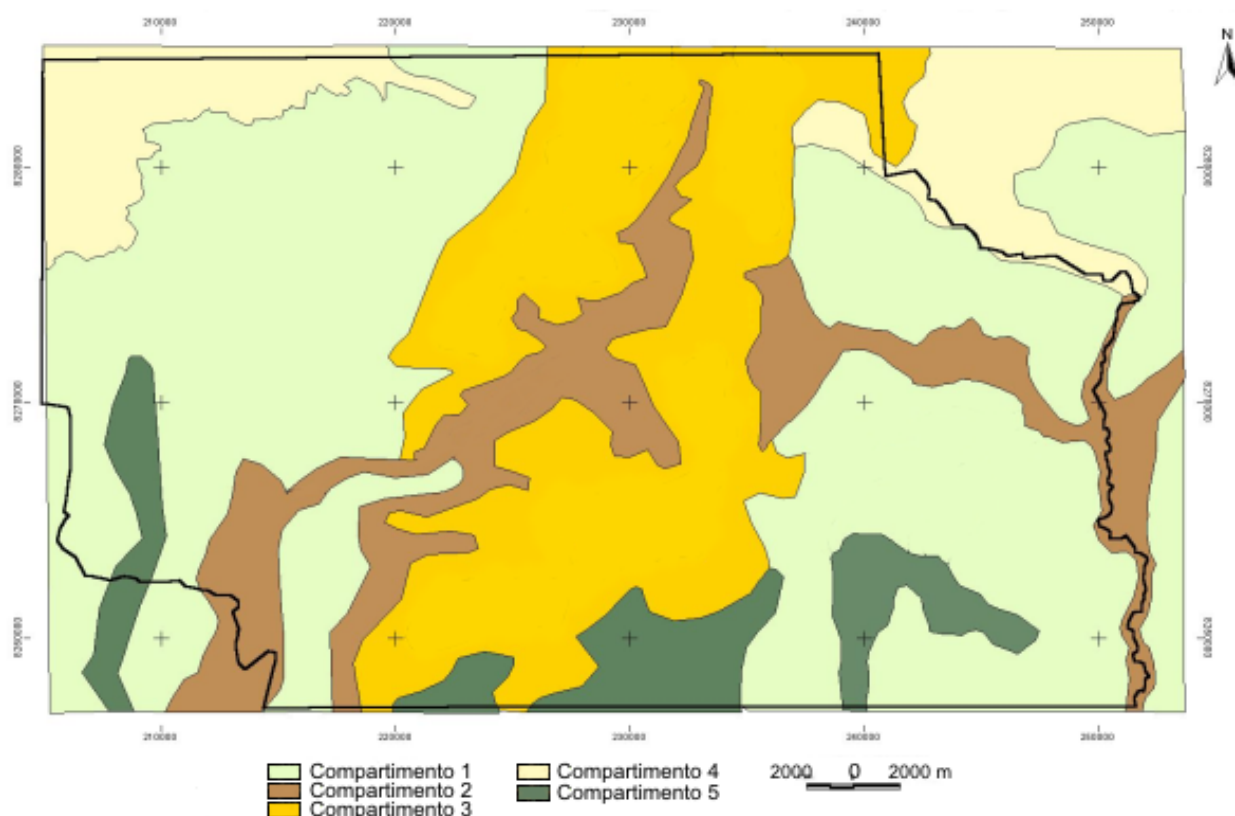
Os principais subsistemas aflorantes na área de estudo constituem o Sistema Paranoá, **Q<sub>3</sub>/R<sub>3</sub>** e **S/A**. O subsistema **Q<sub>3</sub>/R<sub>3</sub>**, unidades **Q<sub>3</sub>** (Quartzitos Médios) e **R<sub>3</sub>** (Metarritmitos Arenosos), predomina na área onde estão as fraturas mais importantes para o contexto hidrogeológico. No topo da Unidade **S** do Subsistema **S/A** (Metassiltitos/ Ardósias), as camadas psamíticas (metarritmitos arenosos e quartzitos estratificados) são excelentes reservatórios de água.

Marschall (1982) define o clima do DF como Tropical Úmido, com duas estações distintas durante o ano, chuvosa (Verão) e seca (Inverno), com base em série histórica de dados meteorológicos de 20 anos. Durante a estação da chuva que compreende os meses de outubro a abril, são registrados cerca de 80% da precipitação pluviométrica anual. E na estação seca, os maiores níveis de estiagem ocorrem no período de junho a agosto, correspondendo a aproximadamente 2% da precipitação pluviométrica anual.

Com base nas principais características do ambiente hidrogeológico da área, foi gerado um mapa morfoestrutural (Figura 2) com subdivisão da área em cinco compartimentos morfoestruturais (Tabela 2). Esse produto é resultado da integração e análise das seguintes informações físicas extraídas da área de estudo: *i*) mapa geológico, *ii*) mapa de declividade de encosta, *iii*) mapa de solos, e *iv*) mapa de relevo.

**Tabela 2** - Características dos compartimentos morfoestruturais apresentados na área estudada.

	Compartimento 1	Compartimento 2	Compartimento 3	Compartimento 4	Compartimento 5
<b>Cota (m)</b>	850 a 1000	950 a 1150	1000 a 1200	850 a 950	900 a 1000
<b>Declividade (%)</b>	X > 8 %	X > 8 %	X < 8 %	X > 8 %	X < 8 %
<b>Tipo de Solos</b>	LV, Hidromórfico e Cambissolo	LV, Cambissolo, Hidromórfico	LV	Cambissolo, Terra Roxa e Podzólico	LV
<b>Litotipos</b>	Ardósias e metarritmitos	Metarritmitos e clorita xistos	Metarritmitos e quartzitos	Metarritmitos, quartzitos e calcários	Metarritmitos e metassiltitos
<b>Rede de drenagem</b>	Forma de Treliça	Densa, elementos pequenos	Raros elementos	Densa, elementos pequenos	Raros elementos
<b>Uso e ocupação</b>	agrícola	agrícola	agrícola	agrícola	agrícola



**Figura 2** - Mapa de compartimentos morfoestruturais da área de estudo (Carmelo, 2002).

## GEOLOGIA ESTRUTURAL

A análise estrutural das fraturas em rochas metamórficas de baixo grau é de grande importância, pois trata-se do mecanismo controlador e condicionantes dos aquíferos na área de estudo. Pesquisas anteriores no DF e adjacências resultaram em observações relevantes sobre as estruturas rúpteis (Faria, 1995; Freitas-Silva e Campos, 1998; Araújo Filho, 1999).

Faria (1995) insere o DF num domínio litoestrutural resultante de compressões sucessivas, orientadas de E para W e N para S. Essas deformações apresentam a fase rúptil como a principal, em decorrência de falhamentos gerados por empurrões dúcteis-rúpteis de baixo ângulo (NS/335°-330°), em nível crustal raso.

Freitas-Silva e Campos (1998) consideram no seu trabalho apenas uma fase de deformação eminentemente rúptil que denominam como  $D_5$ , em ambiente de descompressão em que a “tensão do *stress* residual é acomodada por fraturamentos e falhamentos normais; a rigor, efeitos elásticos, por si só, não causam fraturamentos”. A maior parte das estruturas planares, de médio e de alto ângulo, foi gerada nas quatro fases iniciais e, durante  $D_5$  são reativadas como falhamentos normais ou fraturas de alívio. Essas fraturas estão representadas no DF por três principais conjuntos de fraturas com direções N15°E, N15°W e N50°-75°W. Os dois primeiros conjuntos são juntas e, a última, falha de cisalhamento segundo Kulander *et al.* (1979) e Pollard e Aydin (1988).

Araújo Filho (1999) estuda a região da Sintaxe dos Pirineus e adjacências que estão localizadas no centro do Estado de Goiás. A área de estudo do referido autor é contígua ao limite oeste do DF e foi subdividida em domínios tectônicos locais. Na região oeste do Distrito Federal, as rochas pelíticas dos metarritmitos do Grupo Paranoá apresentam clivagem ardosiana bem desenvolvida, mas próximo ao empurrão do Grupo Canastra sobre o Grupo Paranoá, tal estrutura apresenta mergulho de 10°-25° e 270°-280°. As lineações de transporte tectônico têm atitudes que predominam entre WNW e SSW com uma dispersão de direção de cerca de 15°, com dobras de propagação de falhas e escamas locais de falha, com vergência predominante para leste. As estruturas caracterizam a deformação no domínio dúctil-rúptil. Na região W do DF, o padrão de fraturamento regional da foi extraído de fotos aéreas, imagens TM/LANDSAT-5 e verificadas por medidas em afloramentos. As fraturas foram resumidas em um diagrama de rosetas que apresenta quatro direções principais, foram interpretadas como juntas, fraturas ortogonais (NS e EW) e fraturas de cisalhamento (25° a 40° e 320° a 340°).

### Geologia Estrutural da Área de Estudo

Na área as fraturas estão distribuídas por todos os litofácies aflorantes. Entretanto, são mais evidentes nas regiões com cotas mais elevadas onde estão os litotipos mais resistentes das unidades  $Q_2$ ,  $R_3$  ( $R_{3a}q_i$  e  $R_{3b}q_s$ ) e  $Q_3$ . Esses litotipos sustentam o relevo, principalmente, as porções onde se definem as bordas que margeiam a estrutura do Domo do Pípiripau e onde estão as fraturas associadas à frente do empurrão do Grupo Paranoá sobre o Grupo Bambuí, o qual representa a porção sul do Cavalcamento do Paranã (Campos e Freitas-Silva, 1998). O padrão de fraturamento da área é representado por fraturas subverticais (mergulho  $\geq 80^\circ$ ) que resultam de 1225 medidas de atitudes obtidas em 85 afloramentos.

Também, foram utilizados produtos gerados da imagem TM/LANDSAT-5, onde os traços de fraturas extraídos da rede de drenagem resultaram em 1399 segmentos, subdivididos segundo a dimensão e a localização espacial. A leitura da direção dos traços foi azimutal e realizada com auxílio de um transferidor. Assim, adota-se o termo *traço de fratura* (TF) para toda feição linear

mapeada na imagem TM/LANDSAT-5, na escala 1:50.000, as quais foram caracterizadas três classes de **TF**, em função do tamanho, da população geral, de conveniências e da praticidade da observação das fraturas na escala de trabalho. As classes definidas foram: **TF**<sub>grandes</sub>  $n \geq 5$  km (10 cm), **TF**<sub>médias</sub>  $1 \text{ km (2 cm)} \leq n \leq 5 \text{ km (10 cm)}$  e **TF**<sub>pequenas</sub>  $n \leq 1 \text{ km (2 cm)}$ . O resultado da distribuição desses traços por classes foi: 23 **TF**<sub>grandes</sub>, 477 **TF**<sub>médias</sub> e 899 **TF**<sub>pequenas</sub>.

Os traços extraídos da imagem a partir do padrão da rede de drenagem aliados aos dados de fraturas do campo mostram que a informação estrutural é fiel à tectônica rúptil impressa na área.

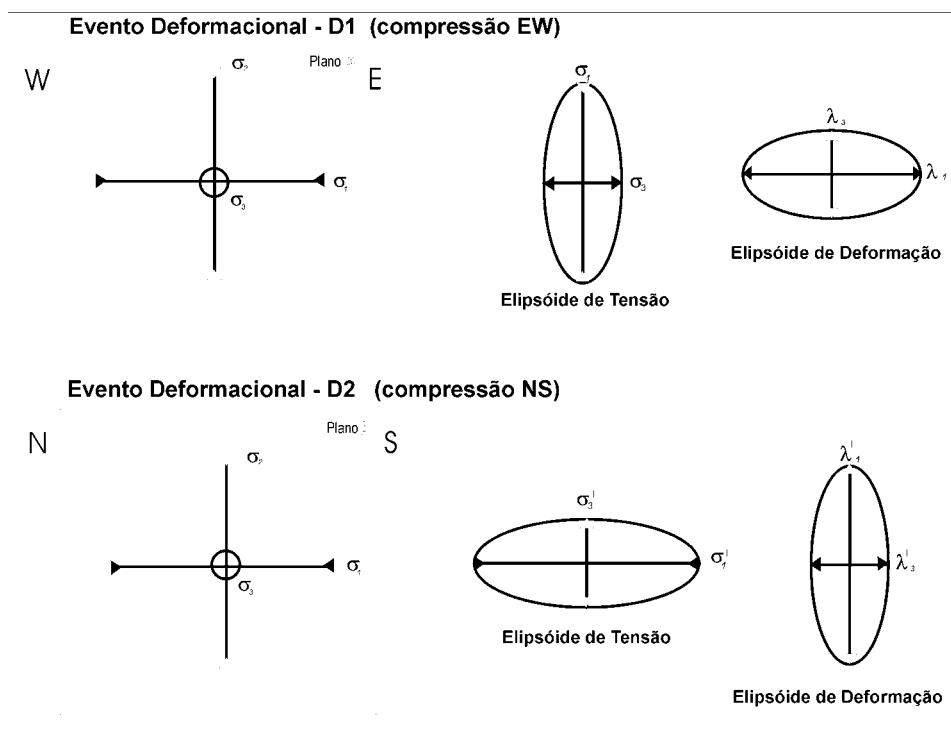
Com a análise do diagrama de roseta resultante da soma das atitudes dos dados de campo e imagem, observa-se que as duas escalas de observação (campo e imagem) complementam as informações estruturais rúpteis na área.

As principais famílias das fraturas apresentam os seguintes padrões:

**Conjunto 1 (Campo):** *i'*) 30° a 40°, *ii'*) 110° a 130° e *iii'*) 160° a 170°; e **Conjunto 2 (Imagem):** *i''*) 90° a 100°, *ii''*) 170° a 190°, *iii''*) 140° a 150° e *iv''*) 50° e 60°.

Os conjuntos de fraturas (*i'* e *iii'*) e (*i''* e *ii''*) são interpretados como fraturas ortogonais, e (*iii''* e *iv''*) de cisalhamento. As fraturas ortogonais são interpretadas como juntas de Modo I, fraturas abertas e, portanto, com  $\sigma_3$  horizontal tracional perpendicular a seu plano médio (Kulander *et al.*, 1979; Pollard e Aydin, 1988). Há, portanto, indicações que as tensões principais podem ter sido giradas de 90° e se interpreta como feições resultantes da atuação de duas fases de deformação **D**<sub>1</sub> e **D**<sub>2</sub> (Figura 3). Há indícios de que um padrão intercepta o outro, pois a ortogonalidade pode existir com  $\sigma_1$  e  $\sigma_2$  tracionais concomitantes.

A análise desses dados estruturais indica três direções principais de fraturas, NS, EW e N60°-70°W. As duas primeiras direções são analisadas como juntas abertas (Kulander *et al.*, 1979; Pollard e Aydin, 1988). Estas feições estruturais que geneticamente apresentam alto potencial hidrogeológico são fraturas sub-verticais e abertas que podem constituir-se em excelentes estruturas de recarga e reservatórios de água para um ambiente de aquíferos fissurais. Assim, interpreta-se que as fraturas impressas na área foram geradas por tensões tectônicas atuantes na geração da Faixa Brasília durante o Ciclo Orogenético Brasileiro (900 – 480 Ma) e por reativações neotectônicas de antigas zonas de fraquezas.



**Figura 3** - Fases deformacionais, **D<sub>1</sub>** e **D<sub>2</sub>**, esquemáticos (Faria, 1995, Araújo Filho 1999 e 2000).

## METODOLOGIA

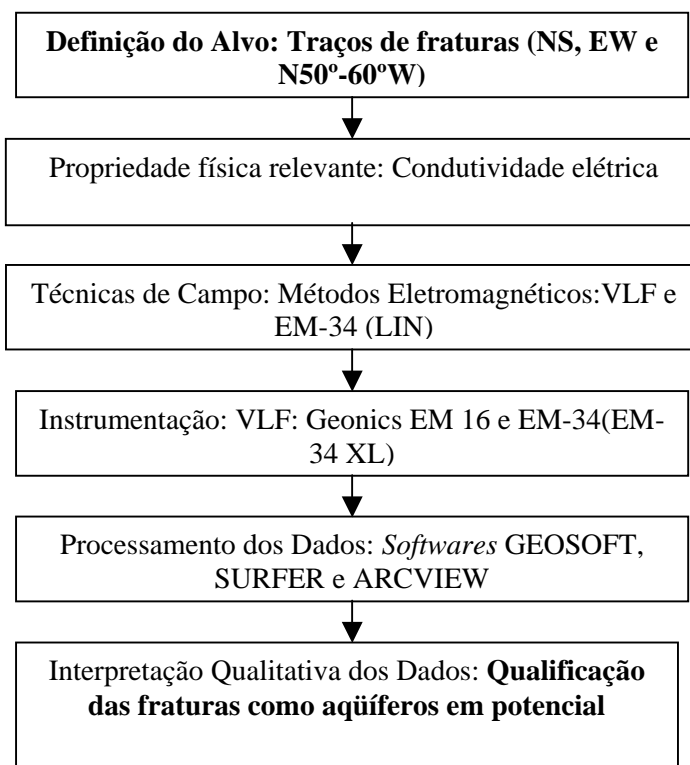
Foram analisados e coletados dados pelas estações climatológicas e fluviais, no período de 1971 a 2000, e integrados com as propriedades físicas da área de estudo (topografia, solos e relevo). O mapa morfoestrutural e as informações de precipitação pluviométrica mostram que as características do Sistema Hidrogeológico do Paranoá, especificamente, do Subsistema **Q<sub>3</sub>/ R<sub>3</sub>**, fornecem indícios para se delimitar áreas que se comportam como zonas alimentadoras. Essas áreas constituem altos ou divisores de águas de micro-bacias e formam zonas delimitadoras de sistemas de fraturas e drenagens.

As áreas interpretadas como áreas de recarga e alimentadoras dos aquíferos fissurais em potenciais, compartimentos **2** e **5** (Tabela 2), serão avaliadas quanto ao potencial hidrogeológico com aplicação de levantamento geofísico. A área de estudo é constituída por rochas metamórficas de baixo grau (quartzitos, ardósias e filitos), fraturadas e com aquíferos condicionados às zonas de ruptura. Nesse contexto, utiliza-se a geofísica para detectar a ocorrência ou não de água nas principais fraturas (NS, EW e N50°-60°W) para poder caracterizá-las como possíveis aquíferos.

A propriedade física relevante usada é a condutividade elétrica. Com isso, as técnicas geofísicas escolhidas para detectá-la utilizam métodos eletromagnéticos VLF e EM-34. A presença de água nas fraturas é indicada por zonas condutoras e a sua ausência, ao contrário, por zonas mais resistivas. Os métodos eletromagnéticos aplicados neste estudo permitiram identificar e delinear estruturas condutivas em profundidade, caracterizando-se ferramentas importantes no estudo de aquíferos no domínio fraturado.



Com base em informações morfoestruturais e de litotipos, selecionou-se **três áreas-alvo** com potencial hidrogeológico para aplicação dos levantamentos geofísicos. Os métodos eletromagnéticos foram escolhidos em função da disponibilidade dos equipamentos, da rápida aquisição dos dados e do processamento simples e direto. As etapas para realização dos trabalhos geofísicos estão descritas a seguir (Figura 4).



**Figura 4** - Fluxograma simplificado da sistemática para realização de uma campanha geofísica.

### **Aquisição e Processamento dos Dados Geofísicos**

Os métodos eletromagnéticos são amplamente utilizados como ferramenta de prospecção de água em locais que apresentam potencialidade hídrica em aquíferos fissurais como apresentado por Folio *et al.* (2000), Gomes *et al.* (2000), entre outros.

No Distrito Federal e entorno, algumas propostas metodológicas foram desenvolvidas para o estudo dos aquíferos fissurais utilizando como ferramenta prospectiva os métodos eletromagnéticos. Mello *et al.* (1997) e Lousada (1999) propõem metodologias eficientes e rápidas que integram fotogeologia/sensoriamento remoto, mapeamento geológico de detalhe e método eletromagnético para identificar aquíferos fissurais e local poços tubulares profundos ( $p > 90$  m).

Na área de estudo, optou-se em usar traços de fraturas e diferentes litotipos como indicadores para selecionar áreas-alvo e possíveis nós, junções das fraturas. Nessas áreas, com cerca de 6 km<sup>2</sup>, executou-se o levantamento geofísico terrestre em escala de maior detalhe, 1:25.000. Como o principal objetivo foi caracterizar uma fratura como possível aquífero, os métodos eletromagnéticos forneceram informação da presença de água nas estruturas pela variação da condutividade elétrica,

sendo possível mapear em subsuperfície a continuidade e a conectividade das estruturas (Carmelo 2002).

As áreas-alvo selecionadas resultam da análise dos traços de fraturas extraídos da imagem TM/ LANDSAT-5 e apresentam a melhor representatividade estatística e espacial na área de estudo. Foram selecionadas as três direções principais obtidas pela análise estrutural e, portanto, como as mais expressivas e persistentes da deformação rúptil impressa na área. Outras características foram usadas na definição das áreas-alvo (Figura 5):

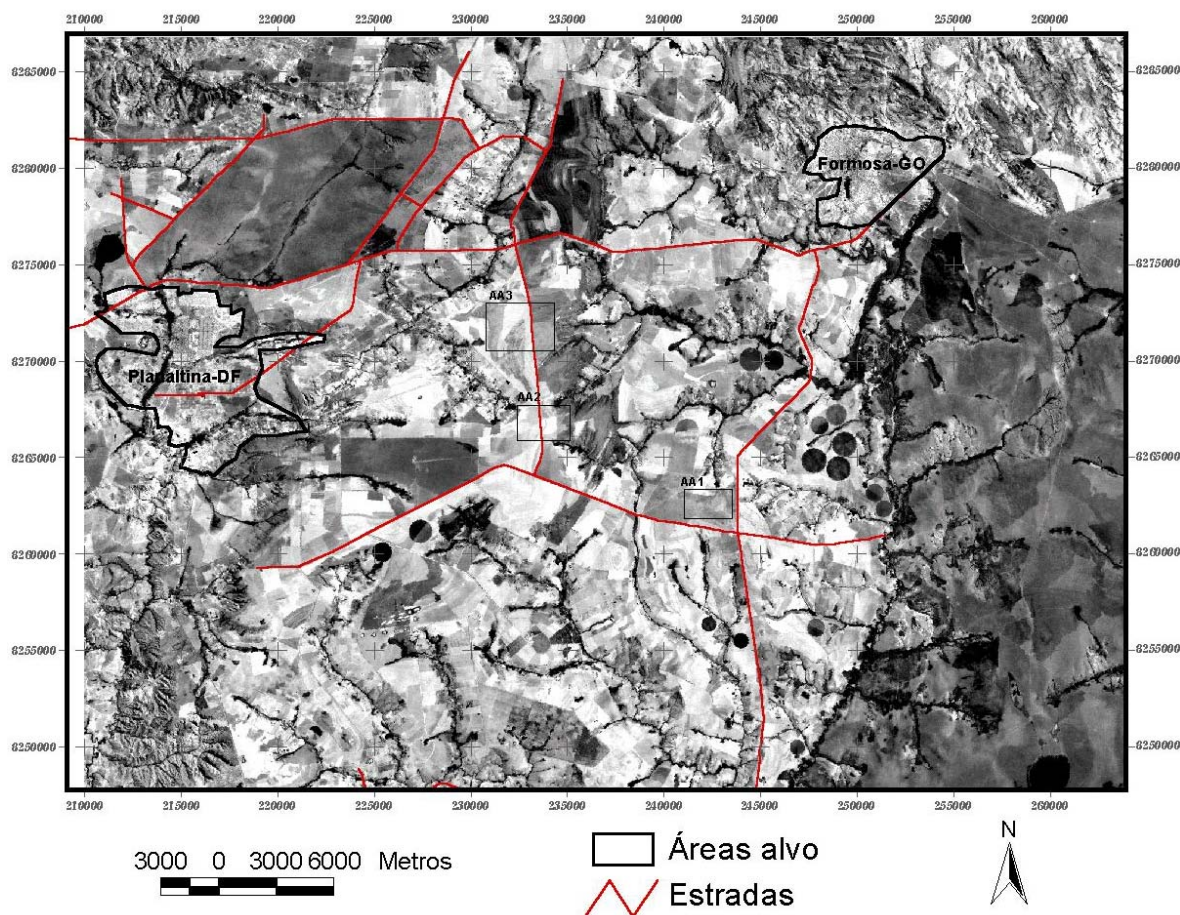
- traços de fratura média ( $\mathbf{TF}_{\text{média}}$ ):
  - o área-alvo 1 - fraturas com direção NS (206 medidas);
  - o área-alvo 2 - fraturas com direção N50°-60°W (179 medidas); e
  - o área-alvo 3 - fraturas com direção EW (197 medidas).
- áreas planas e com pequena variação topográfica ( $10 \text{ metros} < \Delta < 70 \text{ metros}$ ),
- litotipos importantes no ambiente hidrogeológico (sistemas Paranoá e Bambuí); e
- áreas com pouco ruído e uso agropecuário.

O levantamento com métodos eletromagnéticos foi realizado em duas diferentes etapas de aquisição de dados. A primeira etapa caracteriza-se pelo levantamento com o equipamento EM-16 **VLF** (Geonics) efetuado nas três áreas-alvo onde o principal objetivo foi analisar as fraturas como aquíferos pela resposta da variação da condutividade elétrica. A segunda etapa realizou-se com o equipamento **EM-34 3XL** (Geonics), apenas na área-alvo três, com intuito de detalhar e delimitar com maior precisão as principais feições anômalas identificadas na etapa anterior. Com esse último método, permite-se estimar a profundidade da superfície onde estão as feições anômalas mapeadas.

A primeira etapa do levantamento, com método **VLF**, realizou-se com a mesma sistemática de aquisição dos dados para as três áreas-alvo. A amostragem foi em intervalos de aproximadamente 20 m, mas à direção dos perfis de amostragem sempre estiveram perpendiculares à direção da fratura investigada. Logo, diferentes direções foram tomadas e o espaçamento destas variou entre 200 m a 500 m (Tabela 3).

A segunda etapa foi realizada com o equipamento **EM-34 3XL** (Geonics) e executou-se o levantamento apenas na área-alvo três. Os perfis de amostragem tiveram direção NS, perpendiculares à direção da fratura investigada, o espaçamento entre as linhas ficou em 500 m a 400 m e com configuração da distância entre as bobinas de 40 m. As bobinas operaram nos dois modos, Dipolo Horizontal (**DH**) e Dipolo Vertical (**DV**; Tabela 3).

Nos próximos sub-ítens descrevem-se as etapas de processamento dos dados brutos adquiridos no levantamento para os dois equipamentos VLF-TX 27 e EM-34 3XL, com interpretação qualitativa das principais feições geofísicas observadas nos mapas correspondentes a cada área-alvo.



**Figura 5** - Áreas-alvo selecionadas para o levantamento geofísico com método eletromagnético (imagem TM/ LANDSAT-5, banda 5 - infravermelho).

**Tabela 3** - Levantamento geofísico terrestre com métodos eletromagnéticos.

<b>1ª ETAPA</b>		
<b>área-alvo 1</b>	<b>VLF-TX 27 (GEONIC Ltda)</b>	
Traço de fratura	<i>Direção NS</i>	
Perfil de amostragem	<i>Espaçamento médio 200 m</i>	<i>Direção EW</i>
Amostragem	<i>20 m</i>	
<b>área-alvo 2</b>	<b>VLF-TX 27 (GEONIC Ltda)</b>	
Traço de fratura	<i>Direção ~ N 50° - 60° W</i>	
Perfil de amostragem	<i>Espaçamento médio 300 m</i>	<i>Direção ~ N 30 E</i>
Amostragem	<i>20 m</i>	
<b>área-alvo 3</b>	<b>VLF-TX 27 (GEONIC Ltda)</b>	
Traço de fratura	<i>Direção EW</i>	
Perfil de amostragem	<i>Espaçamento médio 400 m</i>	<i>Direção ~ NS</i>
Amostragem	<i>20 m</i>	
<b>2ª ETAPA</b>		
<b>área-alvo 3</b>	<b>EM-34 3XL (GEONIC Ltda)</b>	
Traço de fratura	<i>Direção EW</i>	
Perfil de amostragem	<i>Espaçamento médio 400 m</i>	<i>Direção ~ NS</i>
Espaçamento entre as bobinas	<i>40 m</i>	

## **Método Eletromagnético com VLF (*Very Low Frequency*)**

Os dados foram adquiridos no levantamento com coordenadas UTM, pelo GPS GARMIN 45, e estruturados em planilhas EXCEL onde se criou um campo para os dados brutos filtrados com o Filtro Fraser. Esse filtro remove a influencia de anomalias ocasionadas por comprimentos de onda ( $\lambda$ ) longo ou muito pequeno que resultam de variações topográficas ou feições geológicas não significativas. Após a uniformização dos dados, exporta-se o arquivo em formato ASCII, em XYZ. Os campos X e Y mostram a localização do ponto com as coordenadas UTM (X) e (Y), e o valor do dado filtrado é o campo Z. Isto é necessário para os dados serem importados para o *software*, OASIS – Montaj, versão 5.0 (GEOSOFT, 1998).

Após montar o banco de dados no OASIS - Montaj (GEOSOFT, 1998), transforma-se os dados para o formato de grade ou *grid* regular, para a posterior geração e processamento de imagens. Portanto, os dados XYZ brutos foram interpolados para a representação destes no formato grade fosse adequada a distribuição dos dados originais. A escolha do interpolador para o gradeamento resultou da análise da forma dos dados originais, com atenuação das diferenças de amostragem ao longo dos perfis de amostragem (cerca de 20 m) e entre esses (200 m a 500 m).

Escolheu-se o interpolador Curvatura Mínima para gerar as grades e atenuar variações de espaçamento provocadas pelas tomadas das linhas de produção. Inicialmente, consideram-se os pontos originais como os nós de uma grade preliminar, a qual tem o tamanho de célula oito vezes maior que será o da grade final. O método baseia-se na média do inverso da distância dos dados dentro de um raio, caso não haja ponto dentro deste raio, utiliza-se todos os pontos constituintes da grade. Para o ajuste da grade aos pontos reais, aplica-se um que posiciona tais pontos mais próximos aos nós da grade preliminar. Uma vez aceitável o ajuste, o tamanho da célula da grade preliminar é dividido por dois e o processo repete-se até que seja ajustada a superfície de Curvatura Mínima com o tamanho da célula da grade final requerida.

As grades regulares referentes às áreas-alvo tiveram tamanhos de célula diferenciados devido às diferenças de espaçamentos entre as linhas de produção a partir da aquisição durante os levantamentos. Vasconcelos *et al.* (1990) dimensionaram o tamanho de cada célula como função do espaçamento entre as linhas de produção que devem estar no intervalo de 1/4 a 1/8 do valor do espaçamento destas linhas. A tabela 4 mostra os valores de cada célula em função do espaçamento médio em cada grade regular decorrente dos dados do levantamento.

Os dados eletromagnéticos na forma de grade regular são processados e transformados em imagem, formato *raster*, pois nesse formato a informação é mais facilmente interpretada devido à percepção visual ser mais sensível às variações de cores ou níveis de cinza (Slater, 1980). A representação dos dados como imagem permite uma interpretação qualitativa da informação, como

as pesquisas apresentadas por Kwarteng e Chaves Jr. (1990), Schetselaar *et al.* (1990), entre outros que utilizam os dados geofísicos no formato *raster*.

**Tabela 4** - Relação entre os espaçamentos das linhas de produção e o tamanho das células das grades para as três áreas-alvo.

Áreas-alvo	Espaçamento médio dos perfis de amostragem	Tamanho das células
1	200 m	20 m
2	300 m	100 m
3	400 m	100 m

Para integrar os dados geofísicos em imagens com as informações estruturais e os litotipos apresentados na área de estudo, utilizou-se o sistema de informação geográfica ARCVIEW, versão 3.2 (ESRI, 1998) que oferece um conjunto de programas destinados a combinar, analisar e gerar informações espacialmente gerorreferenciadas. Os mapas finais foram gerados no ARCVIEW e integraram as variáveis de condutividade elétrica aparente, os traços de fratura média ( $TF_{médias}$ ) e a rede de drenagem.

As figuras 6, 7 e 8 são os mapas finais resultantes do levantamentos realizados com o eletromagnetômetro VLF-TX 27. Os valores anômalos indicam a diferença angular detectada entre  $H_p$  e  $H_s$  e transformada em valores percentuais onde esses valores mais altos estão associados a valores anômalos de condutividade elétrica.

#### ÁREA - ALVO 1 (DIREÇÃO NS)

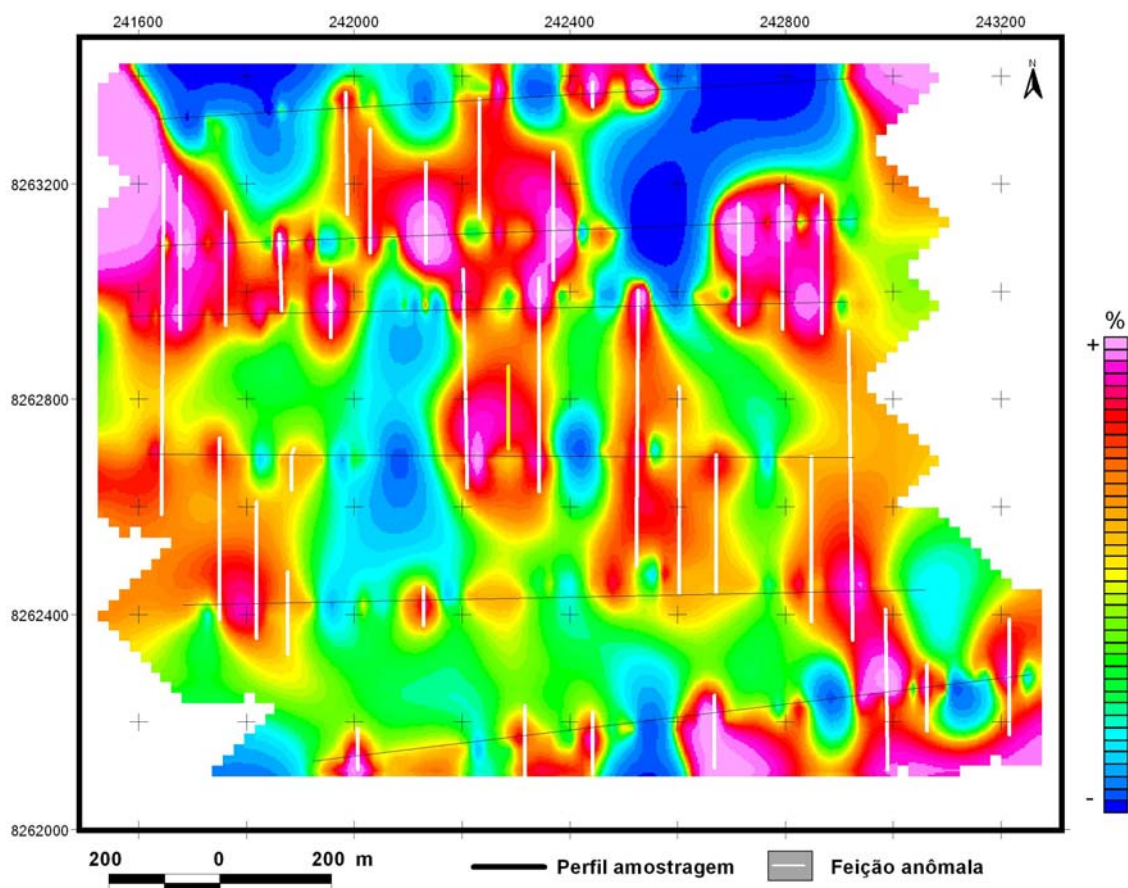
Essa área-alvo foi selecionada para a investigação das fraturas de direção NS e mostra valores percentuais elevados ou zonas anômalas em condutividade elétrica aparente na direção NS. A figura 6 exibe lineamentos NS quase contínuos que constituem zonas anômalas com cerca de 150 m de largura e 1 km de comprimento. Outros lineamentos anômalos subordinados, com direção EW, existem nas porções noroeste e sudeste da área coberta. Com estas observações, conclui-se que as fraturas devem estar conectadas em subsuperfície e preenchidas por água, o que se traduz em indícios relevantes para caracterizar as fraturas como aquíferos.

#### ÁREA - ALVO 2 (DIREÇÃO N 60° - 50° W)

O mapa da figura 7 caracteriza as fraturas NW com baixos valores percentuais (diferença entre  $H_p$  e  $H_s$ ), indicando que essas fraturas não contêm água. A região centro-sul do mapa apresenta uma zona anômala, com cerca de 900 m de largura e valores percentuais anômalos que se interpreta como a presença de água nas fraturas com direções EW, NS e NW, localmente. Nas porções N e NE da área, ocorre um lineamento anômalo e descontínuo, interpretado como uma zona de fraturas com a presença de água restrita. Esse fato pode indicar que nessa região as fraturas NW não estão conectadas ao sistema principal dos aquíferos (NS e EW).

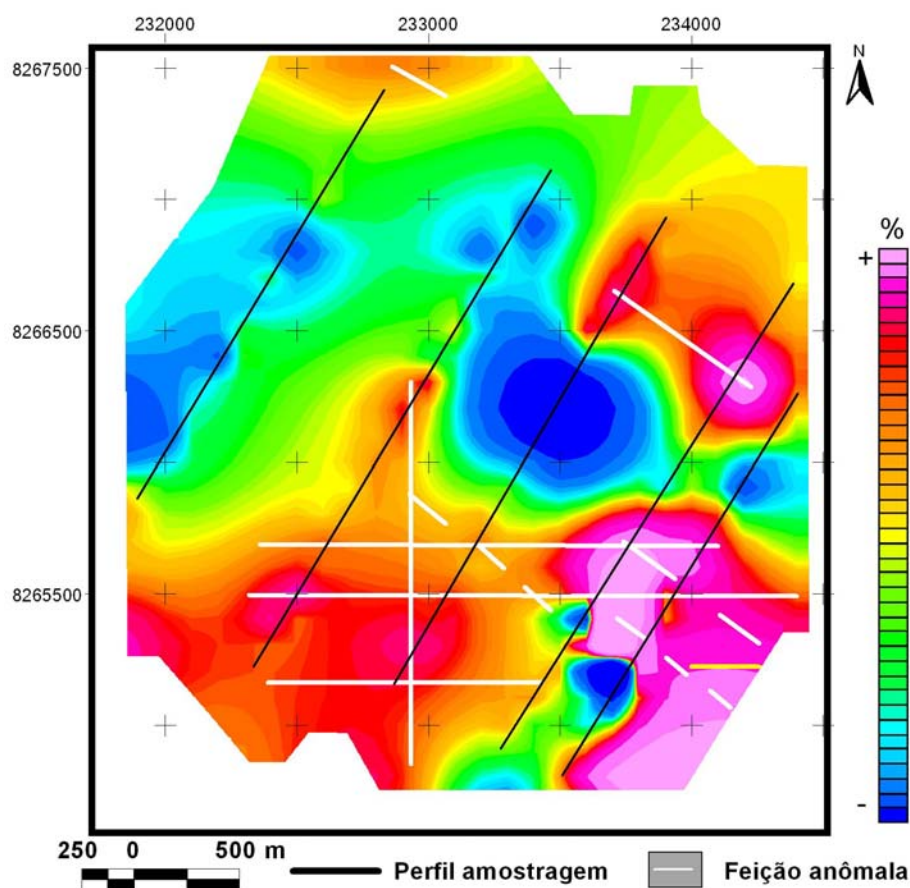
### ÁREA - ALVO 3 (DIREÇÃO EW)

As fraturas estão definidas no mapa da figura 8 por altos valores percentuais (diferença entre  $H_p$  e  $H_s$ ) nas direções EW, NS e NW, subordinadamente. A região central do mapa apresenta feições anômalas realçadas nas direções NS e EW. Interpreta-se essa região central como uma zona fraturada muito condutiva, com aproximadamente 800 m de largura. Lineamentos anômalos destacam-se na direção EW que são as principais feições estruturais da área. Uma feição linear, com direção NS e 1700 m de comprimento, atravessa quase toda área coberta pelo levantamento e indica outro lineamento geofísico anômalo importante. Na porção NW do mapa, localiza-se um lineamento anômalo com direção NW, o qual se prolonga até o centro da área e está associado a um elemento de drenagem próximo. Esse fato indica com grande probabilidade que todas as feições anômalas observadas nas três direções são intercomunicantes e formam um sistema hidrológico.



**Figura 6** - Mapa de valores percentuais de condutividade elétrica, detalhe da Área - Alvo 1.

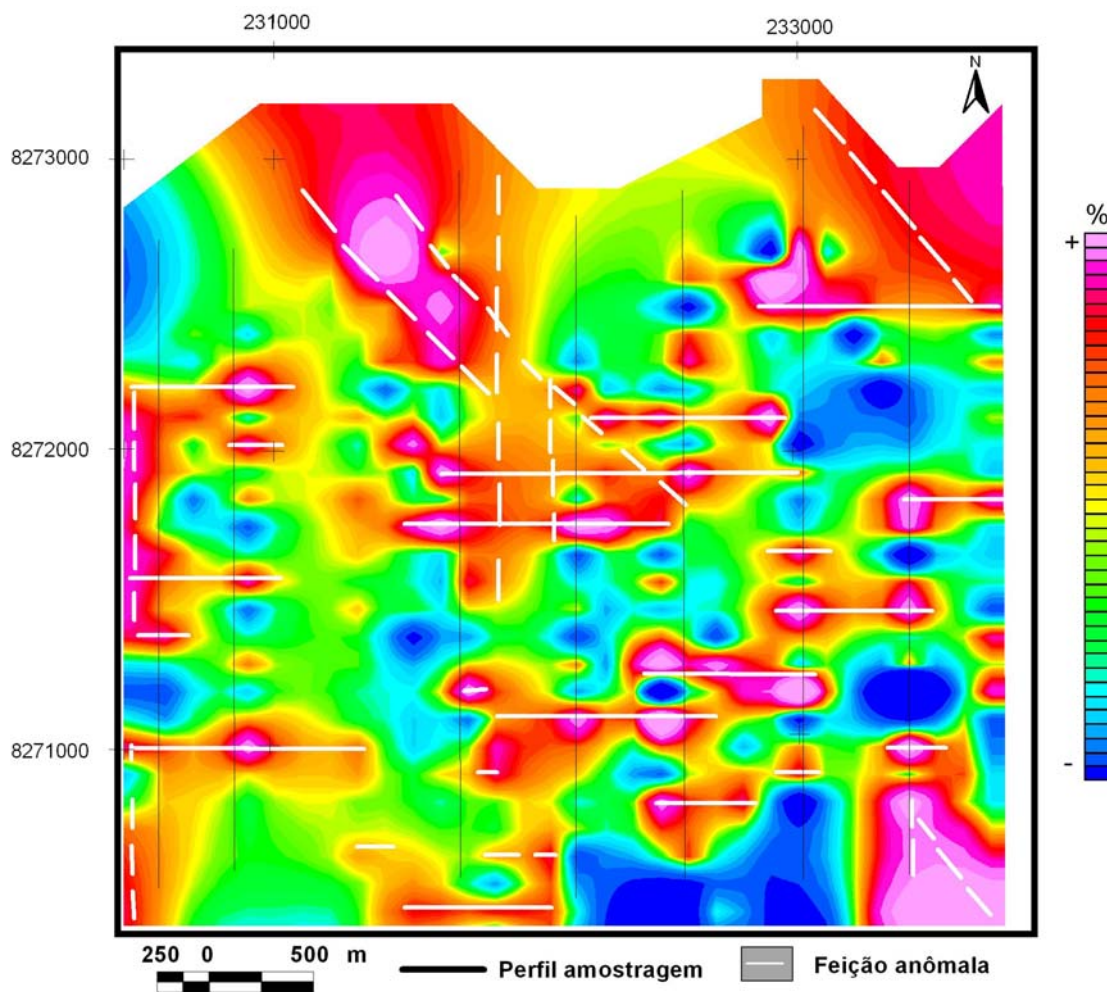




**Figura 7** - Mapa de valores percentuais de condutividade elétrica, detalhe da Área - Alvo 2.

### Método Eletromagnético com EM-34

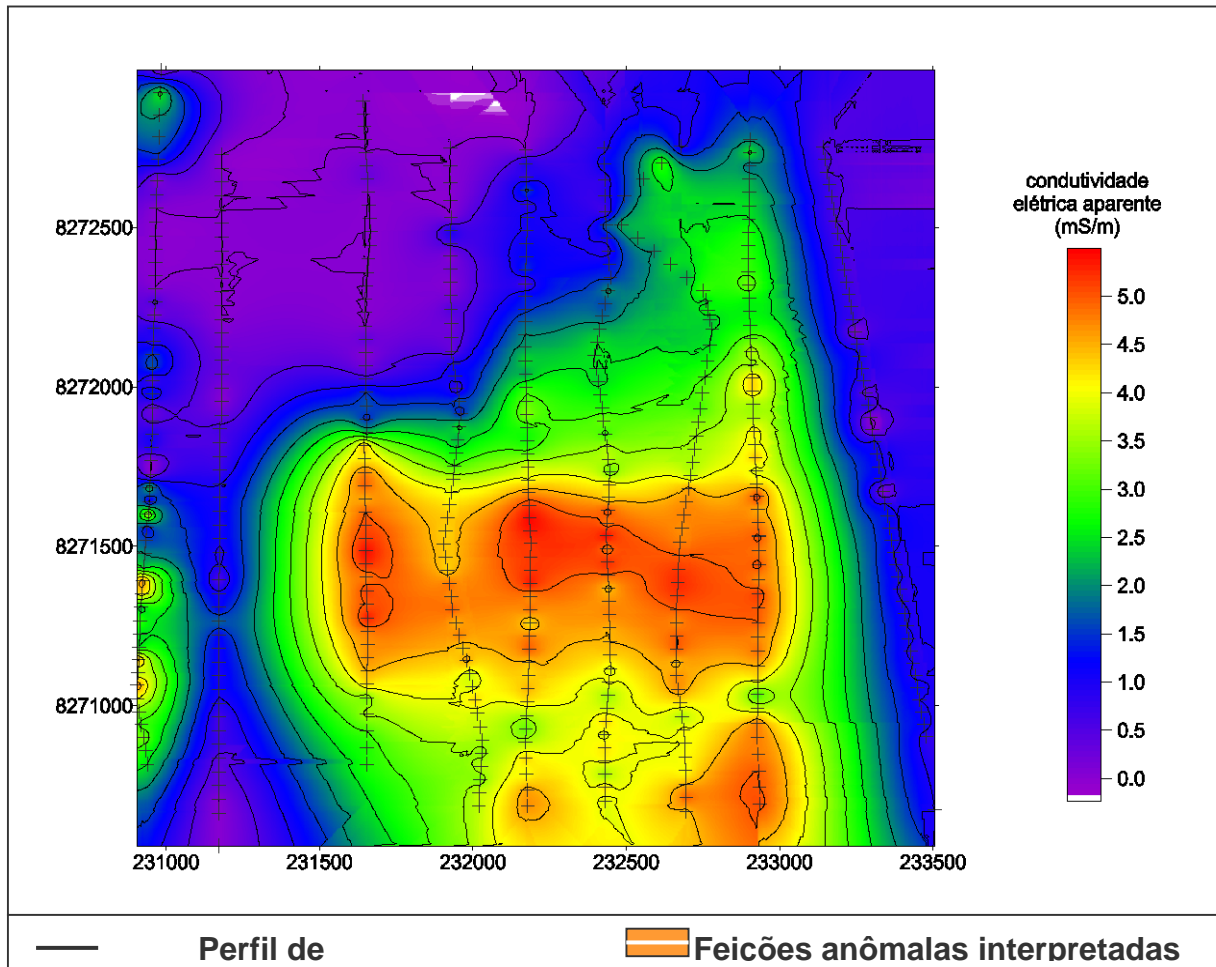
O levantamento realizou-se por aquisição dos dados em coordenadas UTM, pelo GPS GARMIN 45, utilizando mesma sistemática de campo aplicado para o levantamento com o VLF. Todo volume de dados foi organizado em planilhas EXCEL e exportado em formato ASCII, XYZ. Os campos X e Y mostram a localização do ponto com as coordenadas UTM (X) e (Y), e o valor da condutividade elétrica, aparente é o campo Z. Para esses dados, o campo Z tem duas respostas de condutividade elétrica aparente, as quais decorrem dos dois modos de aquisição dos dados, Dipolo Horizontal (**DH**) e Dipolo Vertical (**DV**). Para transformação dos dados obtidos pelo modo dipolo vertical (**DV**) no formato de grade regular usa-se o *software* SURFER, versão 7.0 (Golden, 1994). Utilizou-se como interpolador o método de *Krigagem* que oferece a melhor estimativa local linear equitativa para o ajuste de dados obtidos com espaçamento irregular. Após essa etapa, gera-se a imagem de isocondutividade, modo **DV**, no SURFER (Golden, 1994) e a integração realizou-se no ARCVIEW (ESRI, 1998).



**Figura 8** - Mapa de valores percentuais de condutividade elétrica, detalhe da Área - Alvo 3.

A figura 9 mostra o mapa de isocondutividade elétrica aparente, com os dados referentes ao arranjo das bobinas no modo Dipolo Vertical (DV) e espaçamento de 40 m que indica uma profundidade inferida de investigação de 60 m. O mapa apresenta a região central com elevados valores de condutividade aparente (4,5 mS/m a 5,5 mS/m) que caracteriza uma zona anômala contínua, na direção EW, com 500 m de largura e 1500 m de comprimento. Essa feição anômala “domina” a área coberta por suas expressivas dimensões e altos valores de condutividade. Outro lineamento, com valores mais baixos de condutividade elétrica aparente (3,5 mS/m a 3,8 mS/m), separa a zona central mais condutiva de outra zona, ao sul, que apresenta menor dimensão e valores de condutividade mais restritos aos pontos de amostragem. Algumas feições determinam lineamentos condutivos incipientes na direção NS.





**Figura 9** - Mapa de Isocondutividade elétrica (EM-34), detalhe da Área - Alvo 3.

## DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Com base nas três direções de fraturas investigadas, NS (área-alvo 1), EW (área-alvo 3) e N50°- 60°W (área-alvo 2), a integração das informações geofísicas e geológicas apresenta informações importantes sobre o ambiente hidrogeológico da área de estudo.

A interpretação qualitativa integrada dos dados indica que as estruturas investigadas estão interconectadas em subsuperfície onde as fraturas NS e EW apresentam sempre resposta positiva, confirmando a presença de água como feições anômalas mostradas por lineamentos e/ou zonas. Ou seja, existe um sistema hidráulico comunicante alimentado principalmente pelas fraturas NS e EW, que sugerem ser juntas do Modo I; portanto, com abertura suficiente para a recarga e retenção de água. A direção NW parece estar subordinada aos dois sistemas principais, algumas vezes, constitui o sistema e apresenta-se com feições anômalas e com dimensão restrita (área-alvo 3). Entretanto, na área-alvo 2, essa direção de fratura apresenta-se com comportamento anômalo e não anômalo o que pode ser interpretado como uma zona de fraturas irregulares que armazena água em algumas porções preferenciais com selagem seletiva em função da estrutura/composição, pois não constituem com regularidade os sistemas aquíferos.

## CONCLUSÕES

Foram definidos indicadores que fornecem informações reais do sistema hidrogeológico na região, áreas de recarga e aquíferos fraturados, com base nas características físicas (estrutural/hidrogeológica).

Para seleção de áreas de recarga tem-se: *i*) traços de fratura média com dimensões de 1 km <n <5 km, na escala 1:25.000, com direções NS, EW e N50°-60°W, subordinadamente; *ii*) áreas planas e com pequena variação topográfica ( $\Delta < 70$  metros); e *iii*) litotipos psamíticos, os quais são determinantes no controle do ambiente hidrogeológico por serem intensamente fraturados e, conseqüentemente, regulam a entrada de água no sistema. Os principais litotipos psamíticos compõem o Subsistema **Q<sub>3</sub>/R<sub>3</sub>** (12,0 m<sup>3</sup>/h) do Grupo Paranoá, e os siltitos do Grupo Bambuí (6,0 m<sup>3</sup>/h).

As áreas de recarga selecionadas fornecem indicações para futuras locações de poços na área de estudo e em toda região do Distrito Federal, assim como poderá contribuir para uma melhor compreensão da relação do controle estrutural dos aquíferos na região.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ARAÚJO FILHO, J. O. - 1999 -Structural Characteristics and Tectonic Evolution of the Pirineus Syntaxis, Central Brazil. Illinois, USA. 417p. (Tese de Doutorado/ University of Illinois - Inédito).
- ARAÚJO FILHO, J. O. - 2000 - The Pirineus Syntaxis: an example of the intersection of two Brasiliano fold-thrust belts in central brasil and its implications for the tectonic evolution of western Gondwana. *Revista Brasileira de Geociências*, **30(1)**: 144-148.
- BARROS, J. G. C. - 1993 - Caracterização Geológica e Hidrogeológica. In: NOVAES PINTO M., (Organizadora) Cerrado: caracterização, ocupação e perspectivas. Editora da UnB. Brasília, 264-284.
- CAMPOS, J. E. G. e FREITAS-SILVA, F. H. - 1998 - Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal. Relatório Técnico. Hidrogeologia do Distrito Federal, vol. IV. Convênio IEMA /UnB. Brasília. 85 p.
- CAMPOS, J. E. G. e FREITAS-SILVA, F. H. - 2001 - Meio Físico. In: Fonseca, F. O. (Organizador) Olhares sobre o Lago Paranoá. 1ª edição. Secretaria de Meio Ambiente e Recursos Hídricos. Brasília – DF. P. 45-80.
- CARMELO, A. C. - 2002 - Caracterização de Aquíferos Fraturados por Integração de Informações Geológicas e Geofísicas. Brasília. DF. 153p. (Tese de Doutorado IG/ UnB – Inédito).
- ESRI: ENVIRONMENT SYSTEM RESEARCH INSTITUTE, INC. - 1998 - Undersanding GIS. The ARCVIEW Method. Self-Study workbook. Version 3.2.
- FARIA, A. - 1995 - Estratigrafia e Sistemas Depositionais do Grupo Paranoá nas Áreas de Cristalina, Distrito Federal e São João D´Aliança – Alto Paraíso de Goiás. Brasília. 1995. 199p. (Tese de Doutorado IG/ UnB - Inédito).
- FOLIO, J. L.; JOIN, J. L.; ROBINEAU, B.; COUDRAY, J.; RITZ, M. - 2000 - Complementary of electromagnetic prospecting and groundwater modeling to study shield volcano hydrogeology:

- Piton de la Fournaise volcano case study, Reunion Island. *In: Sillo et al. (Ed) Groundwater: Past Achievements and Future Challenges. Balkema, Rotterdam. P. 385-388.*
- FREITAS-SILVA, F. H. e CAMPOS, J. E. G. - 1998 - Inventário Hidrogeológico e dos Recursos Hídricos Superficiais do Distrito Federal. Relatório Técnico. Meio Físico do Distrito Federal. Vol. I. Convênio IEMA/ UnB. Brasília. 208p.
- GEOSOFT - 1998 - Mapping and Processing System. Manual (*version 5.0*).
- GOLDEN - 1994 - Golden Software, Surfer for Windows Manual. Golden-CO, USA. (*version 7.0*).
- GOMES, A.; CHAMBEL, A.; DUQUE, J. - 2000 - VLF method applied to hydrogeological prospecting in the gneissic-migmatitic hard aquifer of Évora, South Portugal. *In: Sillo et al. (Eds) Groundwater: Past Achievements and Future Challenges. Balkema, Rotterdam, P. 153-157.*
- KWARTENG, A. Y. e CHAVES Jr., P. S. - 1990 - Digital image processing of airborne geophysical data for uranium - mineralized breccia pipes exploration in North-Western Arizona. *Geophysics. 55(8): 965-976.*
- KULANDER, B. B.; BARTON, C. C.; DEANS, S. L. - 1979 - The Application of Fractography to Core and Outcrop Fracture Investigation. U.S. Department of Energy. Morgantown Energy Technology Center, Report METC/SF-79/3, Morgantown, West Virginia, 174p.
- LOUSADA, E. - 1999 - Estudos Geológicos e Geofísicos Aplicados a Locação de poços Tabulares profundos em aquíferos fraturados na região do Distrito Federal. Brasília-DF. 107p. (Dissertação de Mestrado IG/ UnB - Inédito).
- MARSHALL, C. - 1982 - Climatologia de Brasília. *INMET/DAPRE. 72p. Relatório Interno.*
- MELLO, G. A.; FRANCO, H. A.; CAMPOS, J. E. G., PIRES, A. C. B. - 1997 - Desenvolvimento de Metodologia para Prospecção de Água Subterrânea em Aquíferos Fissurais na Região do Distrito Federal. *IN: CONG. INT. SOC. BRAS. GEOF. 5. Resumos Expandidos. Vol. 1. SBGF. São Paulo. 1997. p: 453-456.*
- POLLARD, D. D. e AIDIN, A. - 1988 - Progress in understanding jointing over the post century. *Geological Society of America Bulletin. Vol. 100. 1988. p. 1181-1204.*
- SCHETSELAAR, E. M.; VanDIJK, P. M.; ALFASATWI, Y. A. - 1990- Digital image processing of geophysical data using a raster based GIS. *ITC Journal. 3: 248-252.*
- SLATER, P. - 1980 - Remote Sensing. Optics and Optical Systems. University of Arizona Press. Tucson. 576p.
- VASCONCELOS, R. M.; METELO, M. S.; MOTA, A. C.; GOMES, R. D. - 1990 - Geofísica em levantamentos geológicos. Rio de Janeiro. DIGEOF - CPRM. Relatório Interno.