



**Aplicação do Método Eletromagnético Sistema EM-34 Integrado a
Dados Estruturais e de Sensoriamento Remoto em um Estudo Hidrogeológico**
Application of the EM- 34 System Electromagnetic Method
Integrated with Structural and Remote Sensing Data in a Hydrogeological Study

Maximilian Fries¹; Marieli Machado Zago¹ & Luciano Soares Cunha²

¹ Universidade Federal do Pampa, Campus Caçapava do Sul, Laboratório de Geofísica Aplicada,
Caçapava do Sul, 96570-000, Rio Grande do Sul, Brasil

² Universidade de Brasília, Instituto de Geociências, Campus Universitário Darcy Ribeiro
ICC Ala Central, Brasília, 70.910-900, Distrito Federal, Brasil

E-mails: maximilianfries@unipampa.edu.br; marielizago@gmail.com; lucianosc@unb.br

Recebido em: 27/11/2018 Aprovado em: 27/04/2019

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2019_2_126_136

Resumo

A escassez de água doce potável é um problema crescente que a população mundial enfrenta nas grandes metrópoles, mas, também, em localidades situadas em regiões menos habitadas. O uso de metodologias e técnicas rápidas, eficazes e de baixo custo representam a nova fronteira da Ciência. Proporcionam uma otimização na detecção e locação de áreas potenciais para perfuração de poços tubulares ou, até mesmo, pequenas cacimbas rudimentares de pouca profundidade auxiliando comunidades carentes. O uso da geofísica como método de investigação indireto na prospecção de água subterrânea vem ao encontro dessas necessidades. Constitui uma ferramenta eficaz e alternativa aos métodos tradicionais de mapeamento de superfície, muitas vezes limitados em decorrência da ausência de afloramentos ou presença de camadas espessas de solo mascarando fraturas e juntas. A área proposta neste estudo está localizada sobre um aquífero fissurado no município de Caçapava do Sul, Estado do Rio Grande do Sul. Foi empregado o método eletromagnético domínio do tempo (sistema EM-34) integrado a dados estruturais locais e regionais com objetivo de identificar descontinuidades (falhas geológicas) que atuam como acumuladores potenciais de água no local. A metodologia adotada e análise dos resultados obtidos permitiu a detecção de valores significativos de condutividade que possibilitaram a locação de um poço tubular e definição de diferentes níveis de saturação de água associadas às falhas e juntas ao longo dos perfis investigados. Forneceu, também, subsídios para estudos futuros de detalhamento e caracterização da vazão na área.

Palavras-chave: Hidrogeologia; Geofísica; Eletromagnético

Abstract

The shortage of clean fresh water is a growing problem that the world population faces in large cities and also in places located in less populated areas. The use of integrated methodologies employing effective and inexpensive techniques represent the new frontier of science. This approach provides for and optimizes the detection and location of potential areas for borehole well installation, or even small and shallow rudimentary ponds for helping poor communities. The use of geophysics as an indirect method of investigation in groundwater prospecting meets the needs and represents an effective alternative to traditional methods such as surface mapping, which is often limited due to the absence of outcrops or presence of thick layers of soil masking fractures and joints. The targeted study area is located on a fissured aquifer in Caçapava do Sul city, Rio Grande do Sul State, Brazil. The EM-34 timedomain electromagnetic geophysical method integrated with structural local and regional data from previous studies was used. The primary objective was to identify discontinuities indicating potential accumulation of water in the area. Analysis of the results allowed the detection of significant conductivity values, making possible the siting of a borehole well, and defining different water saturation levels and related faults and joints along the geophysical profiles. This investigation also provided insights for future detailed studies in the characterization of the aquifer flow regime for the area.

Keywords: Hydrogeology; Geophysics; Electromagnetics

1 Introdução

O Estado do Rio Grande do Sul tem uma população em torno de 11 milhões de habitantes, dos quais cerca de 50% são abastecidos por água subterrânea (Freitas, 2010).

A diminuição de recursos hídricos mundiais constitui uma preocupação atual de diversos países. Estes têm grande importância no abastecimento público industrial e agroindustrial. As atividades domésticas, lavagem de calçadas e os vazamentos na rede de fornecimento de água tratada também contribuem para o risco de escassez de água potável (Postel, 1993).

A abordagem tradicional para o estudo de águas subterrâneas possui o ônus de ter um elevado custo devido à necessidade de equipe tanto para mapeamento em superfície, exploração, como na fase de exploração (implantação de poço, revestimento e maquinário).

Métodos geofísicos como os de eletrorresistividade e eletromagnéticos constituem eficientes formas para detecção, determinação da profundidade do nível freático e locação de poços (áreas com maiores vazões). Baseadas em princípios semelhantes, as técnicas geofísicas de indução eletromagnética de correntes no terreno (EM) e de *Very Low Frequency* (VLF) têm sido utilizadas com sucesso na busca desse detalhamento, reduzindo a margem de erro nas locações dos poços e diminuindo os custos envolvidos na construção. Diversos projetos internacionais de larga escala têm sido reportados, como os da África Ocidental, onde o uso dessas técnicas para locação de poços em terrenos cristalinos reduziu os custos de perfuração em cerca de 40% (Palacky *et al.*, 1981; Payne, 1995).

O EM-34 é um equipamento que mede o campo eletromagnético e suas interações com o meio geológico na função da frequência. É denominado de FDEM (*Frequency Domain Electromagnetics*) e reconhecidamente aceito na utilização e aplicação em pesquisas minerais, ambientais (contaminações) e em hidrogeologia. Estudos com o EM-34 se mostraram efetivos para descrever a estrutura aquífera e caracterizar plumas de contaminação da água subterrânea. Oferece, também, resultados satisfatórios na detecção e mapeamento de falhas, fraturas e juntas, importantes na análise e caracterização hidrogeológica de aquíferos do tipo fissural em razão do eleva-

do contraste de condutividade apresentado (Stewart, 1982; Jardani *et al.*, 2007; Cunha & Shiraiwa, 2011).

As características da região estudada, em especial o Sistema Aquicludo Eopaleozoico de baixa permeabilidade, classificado como aquífero de baixas condições de armazenamento de água subterrânea (Freitas, 2010), impõem o desafio de se localizar áreas com boas vazões (zonas fraturadas) e consequente aumento no fornecimento de água. Atualmente, estas condições constituem uma problemática na implantação de empreendimentos como parque industrial, estabelecimentos comerciais de grande porte, condomínios, cooperativas agrícolas e de produção e envase de azeite de oliva (cooperativa dos produtores de azeite de oliva) sendo, este último, a justificativa deste trabalho.

Considerando as premissas anteriores, foi realizada uma investigação usando-se o método geofísico eletromagnético EM-34 com o principal objetivo de investigar a existência de descontinuidades litológicas ou estruturais de subsuperfície por meio da detecção de anomalias condutivas correlacionáveis a áreas de captação e acúmulo de água subterrânea em um aquífero fissural na cidade de Caçapava do Sul - RS. Informações geológicas e estruturais (medidas no campo e estudos prévios de sensoriamento remoto) representaram os meios auxiliares no estudo.

2 Área de Estudo

2.1 Localização

A área está localizada no município de Caçapava do Sul, na porção centro sul do Estado do Rio Grande do Sul. O município de Caçapava do Sul dista 259 km da capital do Estado, Porto Alegre. O acesso pode ser feito pelas rodovias ERS 401, BR 290 e BR 153. A área situa-se próxima à BR 392 ao fundo da Indústria de Laticínios Caçapava – INDULAC (Figura 1).

2.2 Contexto Geológico

Regionalmente, a área encontra-se inserida onde predominam rochas cristalinas do Escudo Sul-Rio-Grandense (ESRG) situado, segundo Almeida (1980), na porção meridional da Província da Mantiqueira. Estas rochas cristalinas estão representadas por um conjunto de rochas graníticas, gnaisses, rochas metamórficas, associações de sedimentos e

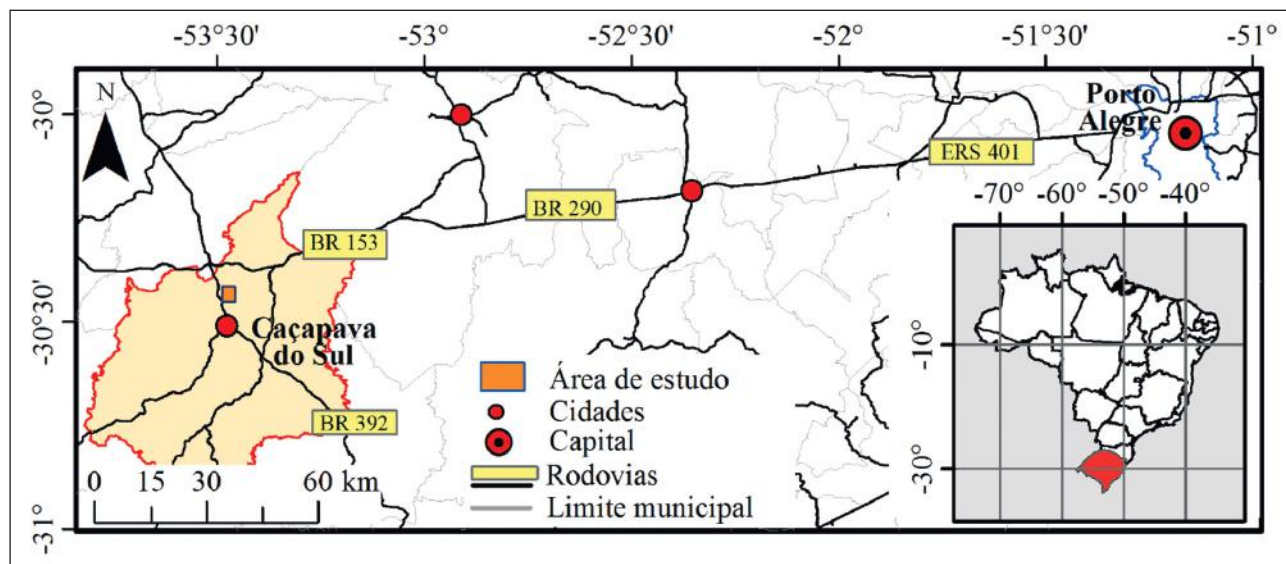


Figura 1 Localização da área de estudo, principais cidades e rodovias de acesso (Adaptado de CPRM, 2000).

rochas vulcânicas antigas (Wildner *et al.*, 1997). É o resultado dos processos de geração e deformação de crosta continental, principalmente pela acresção e deformação de vários blocos crustais pré-cambrianos, cuja maior contribuição ocorreu nos ciclos orogênicos Transamazônico (2,26-2,00 Ga – Paleoproterozoico) e Brasileiro (900-535 Ma – Neoproterozoico) (Hartmann *et al.*, 2007). A partir do uso de dados geofísicos aeromagnéticos foram definidos três domínios geofísicos por Costa (1997), estes foram denominados de Domínio Geofísico Leste, Domínio Geofísico Central (área de estudo) e Domínio Geofísico Oeste.

No contexto local, a área possui como litotipo a denominada Suíte Granítica Caçapava do Sul. É composta principalmente por granodioritos, monzogranitos e sienogranitos (Nardi & Bitencourt, 1989). Essas rochas apresentam variações de leucogranitos, biotitas granitos e granitos transicionais (CPRM, 2000) com camadas superficiais alteradas de pouca profundidade (<30 cm) e, camada de solo arado com espessuras médias de 50 cm em média (Figura 2).

2.3 Arcabouço Estrutural

Estruturalmente a região foi definida e compartimentada por Costa (1997) por meio de lineamentos magnéticos e estruturais do ESRG que compõem os Domínios Geofísicos. Esses

domínios foram posteriormente correlacionados e caracterizados por Kazmierczak (2006) em um estudo de caráter regional por meio de imagens aéreas e satélite *LandSat*. Observa-se que no Domínio Geofísico Central (local do estudo), as principais concentrações de densidade dos lineamentos são paralelas e com direção preferencial NE.

Quatro domínios estruturais são também definidos; 1) *trend* de lineamentos de direção preferencial noroeste (NW), áreas onde aflora a Bacia do Paraná; 2) domínio localizado na parte central referente à Bacia do Camaquã, onde nota-se uma direção preferencial para nordeste, marcada pela presença de lineamentos escalonados (*en échelon*); 3) Domínio onde aflora o ESRG, localizado na porção leste, com direção preferencial de lineamentos norte; 4) *trend* concomitante que marca as estruturas do embasamento onde aflora o escudo, e também ocorre a influência da Falha Ibaré com estruturas NW e a Sutura de Caçapava sobre os Lineamentos NE (Figura 3).

2.4 Contexto Hidrogeológico da Região

O Projeto Mapa Hidrogeológico do Estado do Rio Grande do Sul (Machado & Freitas, 2005) dividiu os aquíferos do Estado em 21 sis-

Aplicação do Método Eletromagnético Sistema EM-34 Integrado a
 Dados Estruturais e de Sensoriamento Remoto em um Estudo Hidrogeológico
 Maximilian Fries; Marieli Machado Zago & Luciano Soares Cunha

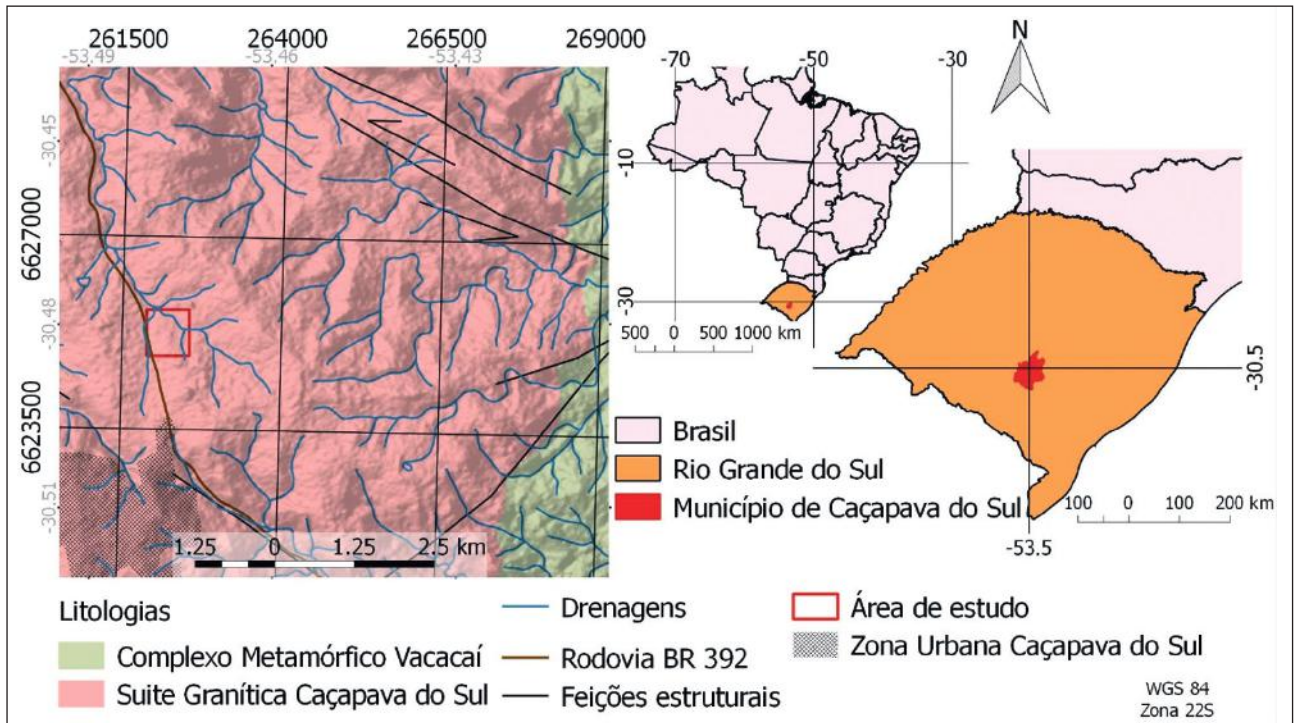


Figura 2 Contexto geológico da área de estudo (Adaptado de CPRM, 2000).

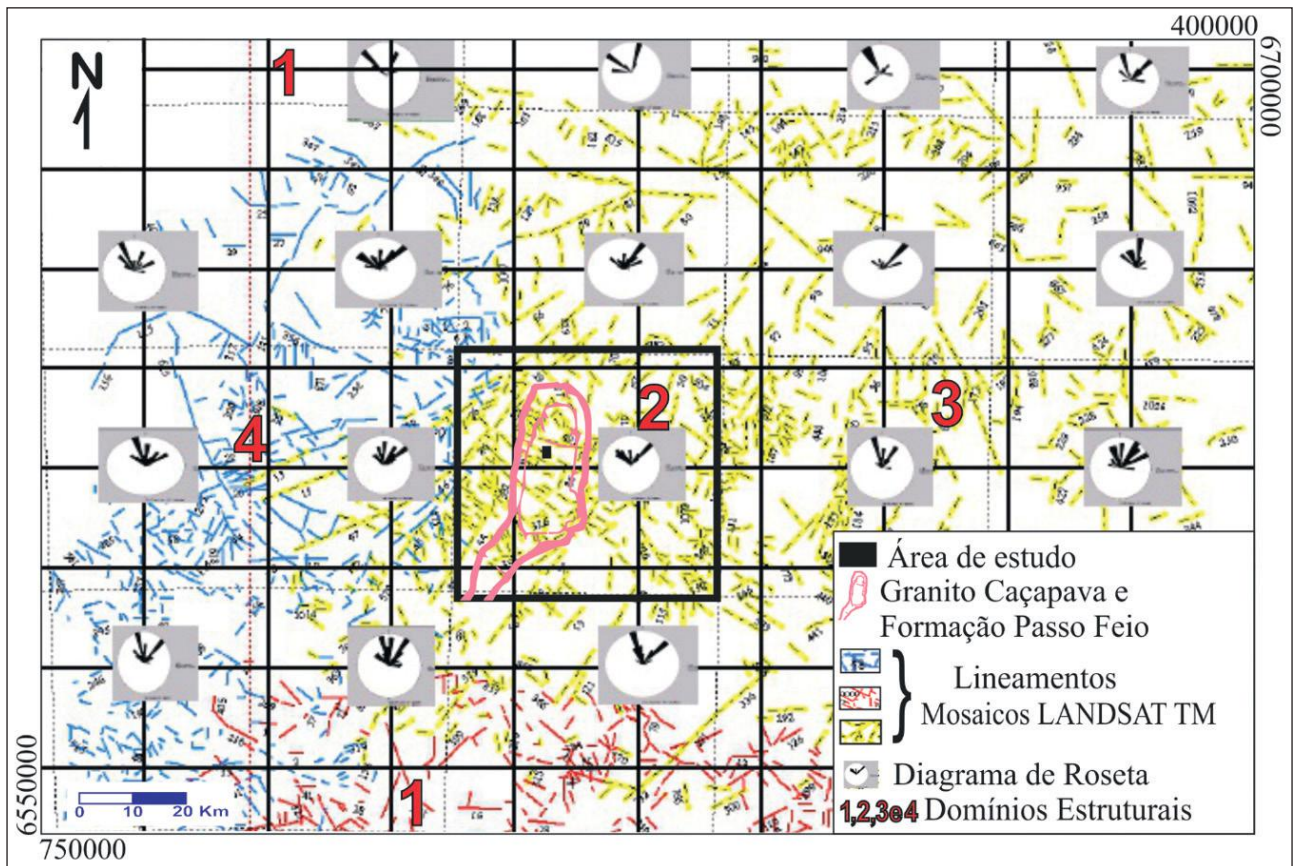


Figura 3 Posicionamento das famílias de lineamentos dominantes e domínios estruturais no ESRG. Detalhe da região 2 correspondente à área de estudo (retângulo preto) (Adaptado de Kazmierczak, 2006).

temas, conforme a permeabilidade e potencialidade para ocorrência de água subterrânea, distribuídos em seis grupos. De acordo com Freitas (2010), o grupo correspondente à área de estudo é de potencial baixo e ocupa 26,64% do território gaúcho. Em estudo recente, Arruda Júnior & Fries (2015) por meio da integração de dados de poços na região analisada pela metodologia GOD (Foster & Hirata, 1988) classificara a área como de baixa vulnerabilidade.

Abrangendo os municípios de Bagé, Caçapava do Sul, Encruzilhada do Sul e pequena porção de Porto Alegre, há o grupo denominado *Aquíferos Limitados de Baixa Possibilidade para Água Subterrânea em rochas com porosidade intergranular ou por fraturas* (Freitas, 2010). Neste grupo registra-se a) Aquífero Embasamento Cristalino II e b) Aquitardos Permianos. O Aquífero Embasamento Cristalino II relaciona-se às rochas graníticas, gnáissicas, andesitos, xistos, filitos e calcários metamorfizados que estão afetadas por fraturamentos e falhas. Apresentam capacidades específicas inferiores a 0,5 m³/h/m. Na área de pesquisa esse aquífero caracteriza-se por apresentar o fluxo subterrâneo condicionado pelos conjuntos de fraturas e juntas com aberturas e espaçamentos variados, com predomínio de zonas de fraturas com larguras de 5,0 a 10,0 cm em que se constata uma maior densidade dessas estruturas rúpteis com orientação predominante NE (vide contexto estrutural). O principal uso desse sistema é o abastecimento de pequenas comunidades rurais e assentamentos do INCRA (Instituto Nacional de Colonização e Reforma Agrária). Sua vulnerabilidade está relacionada à espessura do manto de alteração.

No município de Caçapava do Sul também ocorre o Sistema Aquicludo composto por arenitos finos a médios, róseos a avermelhados. Sofreram intensa diagênese e metamorfismo, ocasionando uma baixa permeabilidade, por isso são classificados como aquíferos de baixas condições de armazenamento de água subterrânea (Freitas, 2010).

3 Materiais e Métodos

3.1 O Sistema Condutímetro de Terreno EM-34

O EM-34 foi descrito por McNeill (1980) e o instrumento consiste em duas bobinas: i) transmissora e que é energizada com uma corrente alternada em uma frequência específica para gerar o campo magnético primário no solo e ii) receptora, localizada a uma curta distância da transmissora. Esta, detecta o campo magnético secundário induzido pela Terra juntamente com o campo primário transmitido e percorrido pelo ar.

Os métodos de indução eletromagnética de superfície (McNeill, 1980, 1983) envolvem a medição de um ou mais componentes de campo magnético induzidos em subsuperfície por um campo primário produzido a partir de uma fonte gerada passivamente ou gerada artificialmente, operando em frequências inferiores a 1,0MHz. Em comparação com os métodos elétricos, possuem uma grande vantagem: o processo de indução não requer o uso de eletrodos de contato diretos (ou galvânicos) com o solo. Assim, os dados são adquiridos com mais rapidez e de forma pouco onerosa (sem dificuldades logísticas).

A técnica do medidor de condutividade eletromagnética de terreno é denominada de método de indução eletromagnética no domínio da frequência (*frequency-domain electromagnetic induction methods – FDEM*) que utiliza duas bobinas de indução independentes, conectadas por um cabo flexível (transmissora e receptora), onde o número de indução é muito menor do que a unidade sendo a quantidade recebida “campo magnético secundário/primário” linearmente proporcional à condutividade elétrica do subsolo (McNeill, 1990). Tais sistemas móveis permitem medir tanto a condutividade aparente do solo em miliSiemens por metro [mS/m] como a fase da componente em partes por mil (*parts per thousand – ppt*) em cada ponto de medição ao longo de um perfil de pesquisa.

Normalmente, são empregados dois modos de operação: i) bobinas coplanares horizontais com um dipolo magnético vertical (DV) e ii) bobinas coplanares verticais com um dipolo magnético horizontal (DH). O ponto para medição é geralmente o ajuste médio da bobina. Na orientação de dipolo magné-

tico vertical (DV), a profundidade de penetração é aproximadamente um e meio do espaçamento entre bobinas enquanto na orientação de dipolo magnético horizontal (DH) a profundidade de investigação é de aproximadamente metade a dois terços da separação entre bobinas.

3.2 Aquisição de Campo (Geofísica)

Neste estudo, a aquisição das medidas de condutividade foi realizada por um condutímetro de terreno, sistema EM 34-3 modelo XL, fabricado pela Geonics Ltd. – Canadá. O equipamento é portátil, possui duas bobinas (transmissora e receptora) que são conectadas entre si por um cabo com distâncias variáveis, sendo que tanto o transmissor como o receptor são móveis.

As bobinas são operadas verticalmente e horizontalmente (Dipolos vertical e horizontal). Segundo McNeill (1980) as frequências de operação variam conforme o espaçamento entre as bobinas sendo i) separação entre bobinas de 10 m (frequência de 6,4 kHz); ii) para 20 m (frequência de 1,6 kHz) e iii) para 40 m (frequência de 0,4 kHz). A profundidade de investigação é também variável em função da separação entre bobinas e disposição horizontal/vertical, sendo, a mínima de 7,5 metros e a máxima de 60 metros conforme apresentado na Tabela 1. Maiores detalhes e características do equipamento são apresentadas em McNeill (1980).

Espaçamento entre Bobinas (Metros)	Profundidade de Exploração (Metros)	
	Dipolos Horizontais	Dipolos Verticais
10	7,5	15
20	15	30
40	30	60

Tabela 1 Espaçamento entre bobinas, frequências e profundidades de investigação do sistema EM-34 (Adaptado de McNeill, 1980).

Foram adquiridas três seções ortogonais às discontinuidades observadas no campo (perfis) denominados de 1, 2 e 3. Cada um possui 180, 320 e 210 metros de comprimento respectivamente. Os espaçamentos entre bobinas são de 10, 20 e 40 metros e as medidas foram realizadas nos Dipolos Verticais e Dipolos Horizontais (DV e DH).

3.3 Posicionamento e Georreferenciamento dos Perfis

Simultaneamente a realização dos perfis, um levantamento planialtimétrico foi realizado usando-se um receptor GPS de precisão modelo *Pro XR* da *Trimble Inc*. Este equipamento é constituído por um receptor de precisão horizontal e vertical (milímetros nas coordenadas horizontais X e Y e centímetros em Z) ao ser empregado o método de correção diferencial (DGPS) (Figura 4). O processamento para correção dos dados adquiridos foi realizado utilizando-se o arquivo digital da Estação Base de Referência da cidade de Santa Maria/RS fornecido pelo IBGE, projeto RBMC (Rede Brasileira de Monitoramento Contínuo dos Sistemas GNSS), disponível em www.ibge.gov.br.

Para o cálculo da correção diferencial dos dados da Estação Móvel utilizando os dados da Estação Base foi utilizado o *software* de processamento *Pathfinder Office 3.10*. A fim de se ter a melhor precisão das estações levantadas e obter-se maior acuracidade no modelo digital de elevação de terreno gerado (MDT), procurou-se manter um índice de diluição PDOP (*Position Dilution of Precision*) máximo de 3. O valor máximo recomendado para que o DGPS funcione com precisão aceitável, segundo *Pathfinder* (2001) é um PDOP de 6,0.

3.4 Modelo Digital de Elevação

Para o modelo digital de elevação um total de 167 pontos foram medidos (com espaçamento de 20 metros entre pontos) com GPS Diferencial usando-se as coordenadas horizontais (latitude e longitude) e vertical (altitude). A partir de uma interpolação utilizando o método de mínima curvatura (Briggs, 1974) fez-se uma malha (*Grid*) de 54 x 53 pontos (X e Y respectivamente) composta por células de 7,53 m x 7,53 m com espaçamento mínimo de 1/4 da amostragem.

A aquisição de pontos nos arredores da área foi feita com objetivo de se obter uma representatividade da variação do terreno em toda área. Os dados brutos iniciais apresentavam com uma precisão

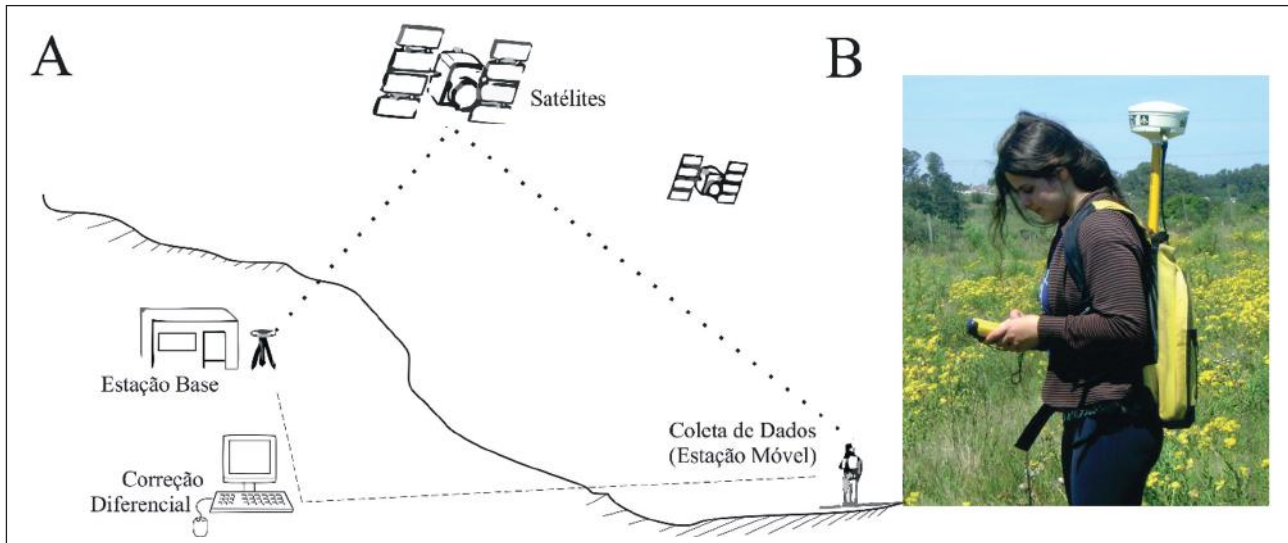


Figura 4 Em A Esquema representativo da obtenção dos dados corrigidos plani-altimétricos (metodologia DGPS) adotada para o posicionamento dos perfis geofísicos e geração do MDE (Modelo Digital de Elevação) no local. Em B Equipamento GPS Pathfinder Pro XR utilizado. (Adaptado de Pathfinder, 2001).

de aproximadamente 5,6 metros (altitude). Após a correção diferencial (Dados Base *versus* Móvel) foi obtida uma precisão de 0,4 metros em Z. A maior parte da aquisição de dados teve uma efeméride de

no mínimo de 7 satélites disponíveis e PDOP menor do que 3. A área estudada possui uma topografia pouco acentuada e de baixa declividade com variações altimétricas de 408,01 m a 382,6 m (Figura 5).

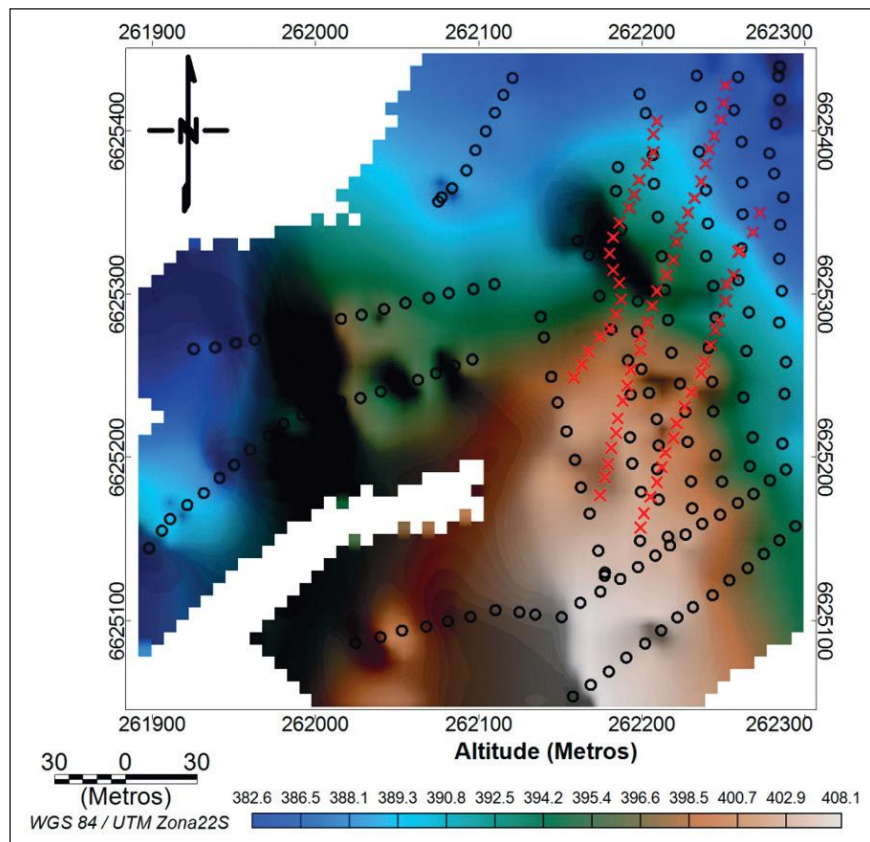


Figura 5 Modelo Digital de Elevação com as estações obtidas por meio do GPS diferencial (círculos pretos) e perfis de condutividade EM-34 realizados (cruzes vermelhas).

4 Resultados e Discussões

4.1 Contexto Estrutural

Estudo de caráter regional a partir de dados geofísicos no ESRG identificaram para o Domínio Geofísico Central (Costa *et al.*, 1995), localizado na parte referente à Bacia do Camaquã, principais concentrações de densidade dos lineamentos paralelos. Mais recentemente (Kazmierczak, 2006) definiu direções principais dos lineamentos para a área estudada de NE e NW (Figura 6A).

Localmente, há poucas rochas aflorantes acarretando um número de medidas pouco expressivo de fraturas e juntas para uma análise. Porém, alguns locais de rocha exposta foram identificados possibilitando um total de 29 medidas estruturais. As principais frequências de direções preferenciais são EW e NW de acordo com a Figura 6B. A integração das frequências de direções preferencias no contexto regional e local é apresentada na Figura 6C.

4.2 Perfis Eletromagnéticos

Os perfis 1, 2 e 3 são apresentados na forma de perfis representativos de cada profundidade (10, 20 e 40 metros) para o Dipolo Horizontal adquirido por meio do arranjo com as bobinas dispostas na vertical e seções para o Dipolo Vertical com as bo-

binas dispostas na horizontal (Figuras 7 e 8). Para otimização do processo de análise e interpretação dos resultados, o perfil 2 apresenta apenas a maior profundidade de 40 metros (DV e DH) e foi considerado, também, que os resultados em 10 e 20 metros não atenderiam a proposta do estudo.

Valores de condutividade apresentados nas seções em profundidade foram processados por meio da ferramenta *3D gridding method* (Geosoft, 2014). O *voxel* foi gerado aplicando-se o método de interpolação krigagem (Krige, 1951). Este procedimento, com as respectivas profundidades e perfis visualizáveis em uma direção escolhida, foi adotado a fim de possibilitar melhor análise e interpretação (Figura 9 e 10). Estas interpolações em 3D geraram um *grid* composto por células de 10 m x 10 m x 10 m (¼ do espaçamento entre as leituras obtidas).

Os resultados tanto dos Dipolos Horizontais (DH) como dos Dipolos Verticais (DV) foram mesclados em um único modelo tridimensional conforme apresentado na Figura 10. A partir da análise desse modelo integrado observa-se de forma mais explícita a presença de zonas anômalas de condutividade elétrica coincidentes com a orientação das principais fraturas e juntas identificadas na área de pesquisa de direções NE e NW. Tendo-se valores de condutividade elétrica é possível a identificação de um aumento

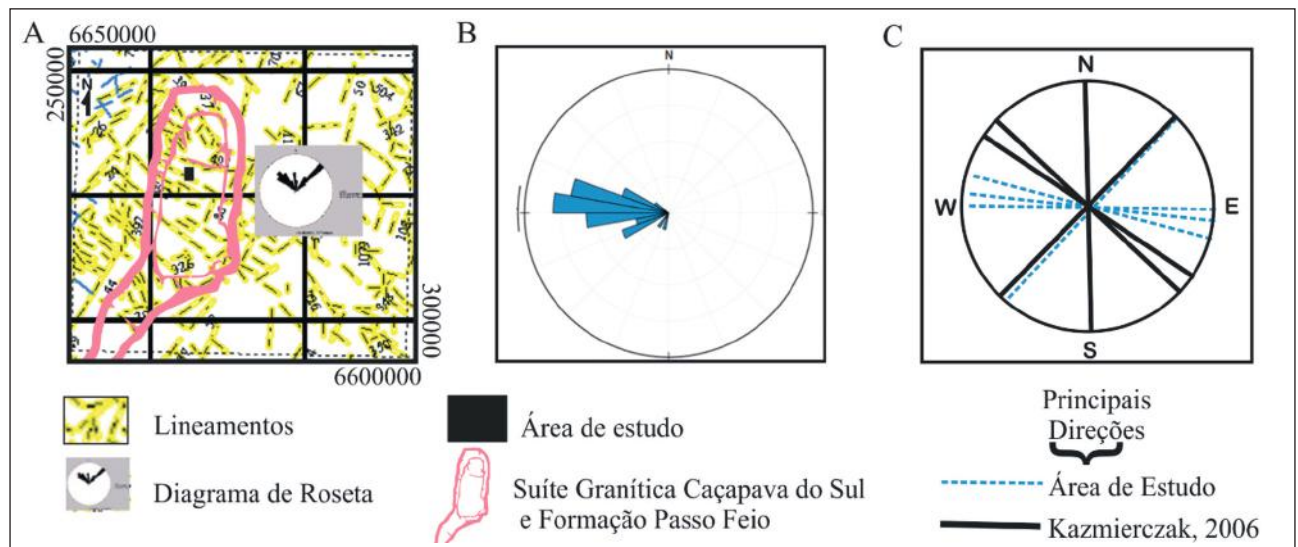


Figura 6 A Estudo regional das principais direções de falhas e fraturas (Kazmierczak, 2006) com ênfase na área deste estudo (detalhe); B gráfico de frequência das principais direções de fraturas e juntas medidas no local e C integração das direções preferenciais reconhecidas neste estudo e no contexto regional (Kazmierczak, 2006).

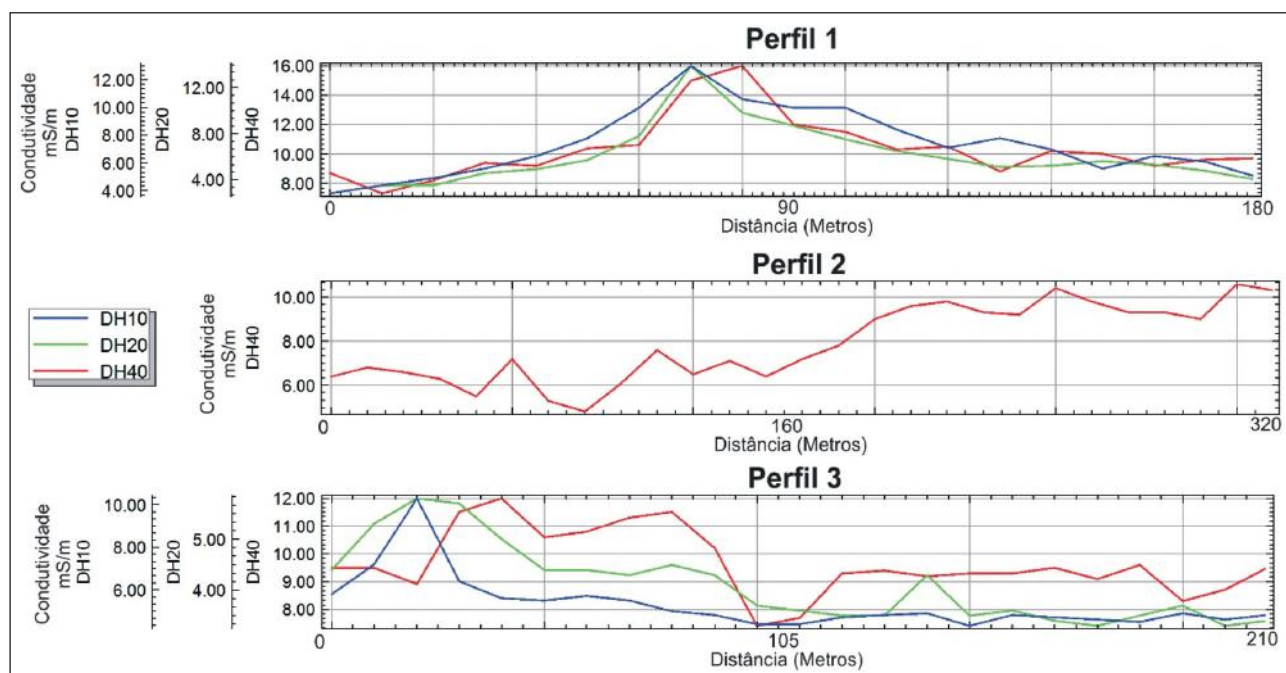


Figura 7 Perfis 1, 2 e 3 de 180, 320 e 210 metros de distância representando os valores de condutividade (mS/m) para o Dipolo Horizontal de 10, 20 e 40 metros de investigação (azul, verde e vermelho).

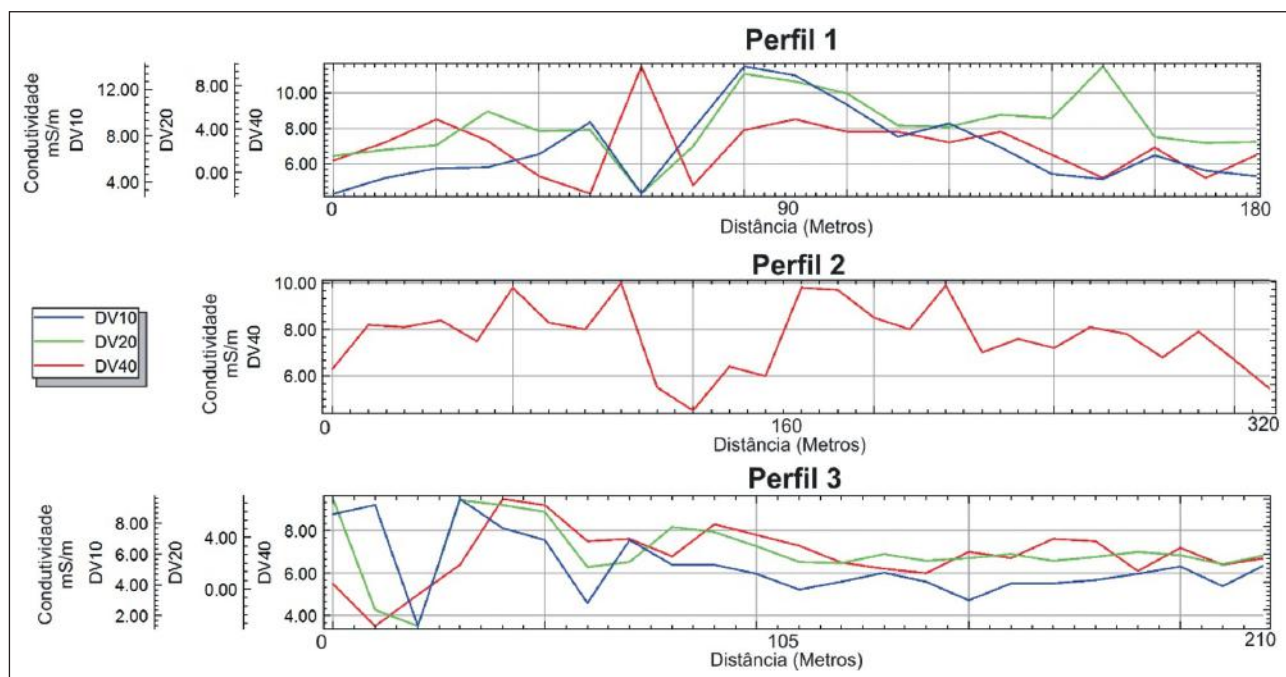


Figura 8 Perfis 1, 2 e 3 de 180, 320 e 210 metros de distância representando os valores de condutividade (mS/m) para o Dipolo Vertical de 10, 20 e 40 metros de investigação (azul, verde e vermelho).

progressivo insignificante, 1% a 2% de incremento, até os valores próximos a 5.4 e 5.6 mS/m para ser interpretado que naquele local haja uma mudança de material e/ou presença de uma zona fraturada preenchida parcialmente ou completamente com água.

Mas a partir desse valor ocorre um incremento elevado de 15%, quando analisados os valores entre 5.6 a 6.3 mS/m ou entre 6.3 a 7.1 mS/m ou entre 7.1 a 8.5 mS/m. Após esse valor de condutividade elétrica constata-se um incremento de 47%. Ou seja,

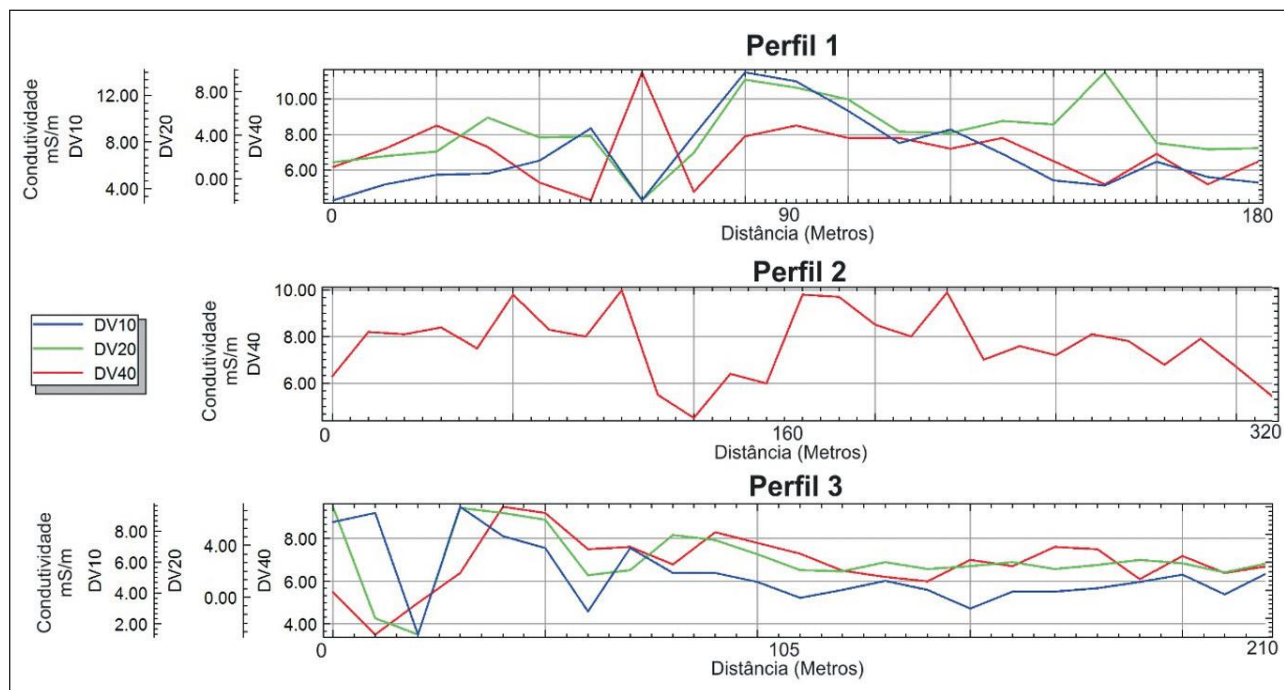


Figura 9 Visualização 3D dos perfis 1, 2 e 3 realizados com Dipolo Horizontal de 10, 20 e 40 metros, respectivamente e Dipolo Vertical com 10, 20 e 40 metros, respectivamente.

é possível interpretar que o limite da zona anômala condutiva acontece entre os valores acima de 5.6 mS/m nesse tipo de aquífero cristalino fraturado com reduzida espessura de solo como cobertura. Na Figura 8A, dipolo horizontal, uma zona anômala condutiva bem definida na parte norte dos Perfis 1 e 2 com uma orientação NE é detectada.

Na Figura 8B, dipolo vertical, duas zonas anômalas condutivas podem ser identificadas sendo uma NE também visível com o dipolo horizontal e outra NW mais ao sul dos Perfis 2 e 3. Outra característica detectada pelo Perfil 2 é uma zona anômala condutiva NW com uma geometria na qual sua porção mais superior está menos fraturada. Isto ocorre em razão de somente o dipolo vertical, mais sensível à variação lateral de condutividade elétrica, ter sido capaz de interceptá-la.

5 Conclusão

A análise e interpretação dos resultados obtidos a partir do método geofísico eletromagnético indutivo (FDEM) possibilitou delimitar zonas anômalas condutivas com orientação coincidente às principais orientações de falhas e fraturas identificadas tanto a nível regional quanto local.

Este tipo de aquífero presente na área de pesquisa tem sua potencialidade em termos de exploração de água subterrânea condicionada pela densidade de fraturas, aberturas e conexão com outros conjuntos de estruturas rúpteis com diferentes orientações de forma a elevar a capacidade do sistema em ter maior potencial de fluxo subterrâneo. Assim, nesse local, tanto indiretamente (dados geofísicos) quanto diretamente (dados estruturais) foi possível constatar todos esses elementos. Além desses, a região contempla um relevo suave ondulado e com regimes pluviométricos de média a alta intensidade que também potencializa a recarga do aquífero local. O estudo apresentou resultados satisfatórios ao executar uma integração de dados geofísicos, estruturais e de sensoriamento remoto aplicados a um estudo hidrogeológico. Permitiu, desta forma, identificar locais com alto potencial para obtenção de água subterrânea (no caso da demanda apresentada pela cooperativa das oliveiras do município). Além disso, consiste em uma alternativa viável e fornece importantes subsídios a estudos geológicos e estruturais em áreas e contextos semelhantes (rochas cristalinas recobertas por solo/camadas intemperizadas).

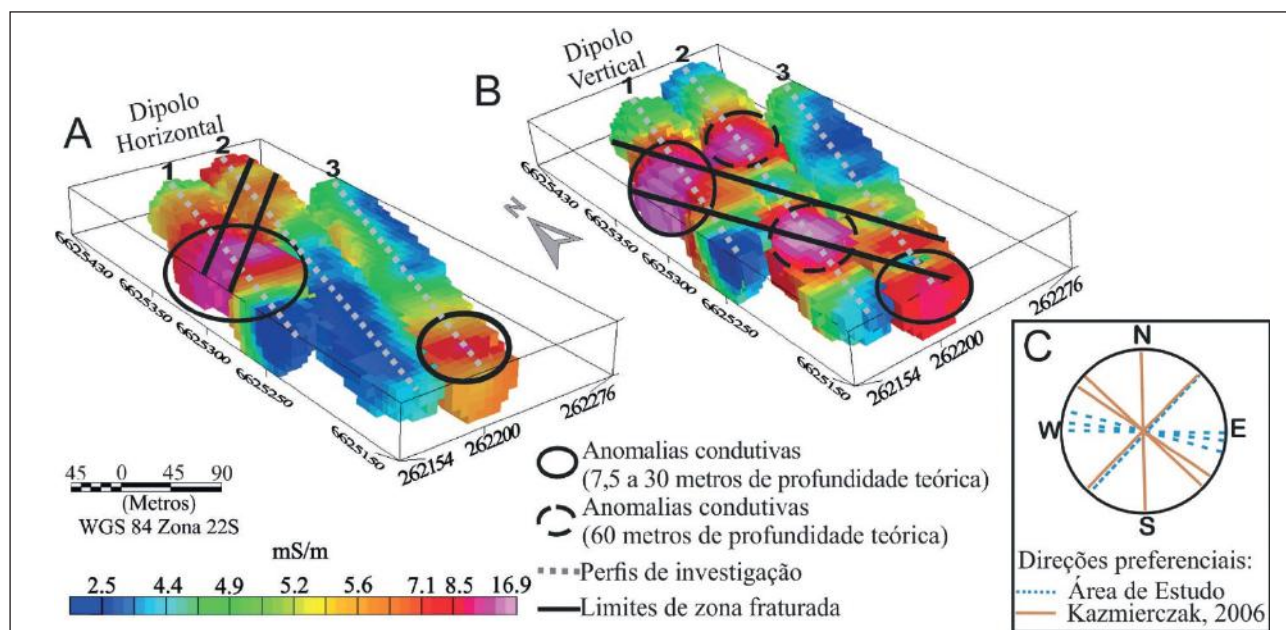


Figura 10 Visualização 3D dos perfis 1, 2 e 3 integrados e as variações de condutividade medidas A e B. Em C direções preferenciais de falhas e fraturas identificadas na área de estudo e regionalmente por Kazmierczak, 2006.

6 Referências

- Almeida, F.F.M. 1980. Tectônica da Bacia do Paraná no Brasil. Relatório do Instituto de Pesquisas Tecnológicas, n. 14091, PAULIPETRO, São Paulo, 187p.
- Arruda Júnior, L.A.C. & Fries, M. 2015. Vulnerabilidade dos aquíferos no município de Caçapava do Sul RS usando a metodologia GOD. In: SALÃO INTERNACIONAL DE ENSINO, PESQUISA E EXTENSÃO, Bagé, 2015. Resumos expandidos, Bagé, UNIPAMPA.
- Briggs, I.C. 1974. Machine contouring using minimum curvature. *Geophysics*, 39(1): 39-48
- CPRM (Serviço Geológico do Brasil). 2000. *Folha Cachoeira do Sul SH-22-Y-A*. Escala 1:250.000. Brasília: Programa Levantamentos Geológicos Básicos do Brasil.
- Costa, A.F.U. 1997. *Teste e modelagem geofísica da estruturação das Associações Litotectônicas Pré-Cambrianas no escudo Sul-rio-grandense*. Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Tese de Doutorado. 291p.
- Costa, A.F.U.; Fernandes, L.A.D.; Shukowsky, W.; Nardi, L.V.S.M. & Bitencourt, M.F. 1995. Teste dos Modelos Tectônicos e de Posicionamento do Complexo Granítico de Caçapava do Sul através de Estudos de Modelagem Gravimétrica 3D. *Revista Brasileira de Geofísica*, 13(2): 91-101. Cunha, L.F.J. & Shiraiwa, S. 2011. Aplicação do método eletromagnético indutivo na investigação da pluma de contaminação da água subterrânea por resíduos de cromo de curtume. *Revista Brasileira de Geofísica*, 29(1): 127-134.
- Freitas, M. A. 2010. Geodiversidade do Estado do Rio Grande do Sul: Programa Geologia do Brasil, levantamento da Geodiversidade. In: CPRM. Recursos Hídricos Subterrâneos (1º ed.), p. 71-86.
- Foster, S.S.D. & Hirata, R.C.A. 1988. *Groundwater pollution risk evaluation: the methodology using available data*. WHO-PAHO/HPE-CEPIS Technical Manual, Lima, Peru. 81p.
- Geosoft. 2014. How-to guide complete workflow for Oasis Montaj 34p. Disponível em: <http://updates.geosoft.com/downloads/files/how-to_guides/Oasis_montaj_Complete_Workflow.pdf >. Acesso em: 28 de fevereiro de 2019.
- Hartmann, L.A.; Chemale Jr., F. & Philipp, R.P. 2007. Evolução geotectônica do Rio Grande do Sul no pré-cambriano. In: IANUZZI, R. & FRANTZ, J.C. (Org.), 50 anos de Geologia. (1º ed.) Editora Comunicação e Identidade, CIGO/UFRGS. Instituto de Geociências, p. 97-123.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Arquivo digital da Estação Base de Referência da cidade de Santa Maria/RS. Disponível em: <www.ibge.gov.br>. Acesso em: 20 de abril de 2016.
- Jardani, A.; Revil, A.; Santos, F.; Fauchard, C. & Dupont, J.P. 2007. Detection of preferential infiltration pathways in sinkholes using joint inversion of self-potential and EM-34 conductivity data. *Geophysical Prospecting*, 55(5): 749-760.
- Kazmierczak, T.S. 2006. *Mapeamento da Bacia do Camaquã com a utilização de dados geofísicos, geologia e sensoriamento remoto*. Programa de Pós-Graduação em Geociências, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Dissertação de Mestrado. 110p.
- Krige, D.G. 1951. A statistical approach to some basic mine valuation problems on the Witwatersrand. *Journal of the Chemical, Metallurgical and Mining Society of South Africa*. 52(6): 119-139.
- Machado, J.L.F. & Freitas, M.A. 2005. Projeto mapa hidrogeológico do Rio Grande do Sul: relatório final. Escala 1:750.000. Porto Alegre: CPRM.
- McNeill, J.D. 1980. *Electrical Conductivity of Soils and Rocks*. Technical Note TN- 5. Disponível em: <http://www.geonics.com/pdfs/technicalnotes/tn5.pdf>. Acesso em: 14 de abril de 2016.
- Nardi, L.V.S. & Bitencourt, M.F.A.S. 1989. Geologia, petrologia e geoquímica do Complexo Granítico de Caçapava do Sul, RS. *Revista Brasileira de Geociências*, 19: 153-169.
- Palacky, G.I.; Ritsema R.L. & Jong S.J. 1981. Electromagnetic Prospecting for Groundwater in Precambrian Terrains in the Republic of Upper Volta. *Geophysical Prospecting*, 29(6): 932-955.
- Payne, M.I. 1995. The Electromagnetic Traversing Method of Groundwater Exploration in Crystalline Rock Terrain. Thurber Environmental Consultants Ltd., Victoria, Canada, p. 863-875.
- Pathfinder. 2001. GPS Pathfinder Systems- Receiver Manual.
- Postel, S. 1993. Uma escassez anunciada. *Revista O Correio*, Rio de Janeiro: UNESCO.
- Stewart, M.T. 1982. Evaluation of Electromagnetic Methods for Rapid Mapping of Salt-Water Interfaces in Coastal Aquifers. *Ground Water*, 20(5): 538-545.
- Wildner, W.; Lima, E.F.; Camozzato, E. & Lopes, R.C. 1997. Vulcanismo Neoproterozóico Cambriano no Rio Grande do Sul: Estratigrafia e aspectos texturais. *A Terra em Revista*, 3(3): 19 - 27.