

Aplicação de georadar (GPR) para a caracterização de frentes de cavalgamento na região da Serra da Matriculada, município de Datas (MG)
Application of georadar (GPR) for the characterization of floor thrust in the region of Serra da Matriculada, municipality of Datas (MG)
Aplicación de georadar (GPR) para la caracterización de frentes de cabalgamientos en la región de Sierra Matriculada, municipio de Datas (MG)

Recebido: 28/01/2020 | Revisado: 14/02/2020 | Aceito: 16/02/2020 | Publicado: 02/03/2020

Juni Silveira Cordeiro

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9371-8385>

Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil

E-mail: juni.scordeiro@gmail.com

Paulo Roberto Antunes Aranha

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7850-9590>

Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil

E-mail: aranha@geol.igc.ufmg.br

Ricardo Diniz da Costa

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8250-0740>

Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil

E-mail: biduufmg@gmail.com

Luiz Guilherme Knauer

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9103-3673>

Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil

E-mail: gknauer@gmail.com

Joana Tiago Reis Magalhães

ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-7588-2285>

Universidade Federal de Minas Gerais, Brasil

E-mail: joana.magalhaes@cprm.gov.br

Resumo

O georadar (GPR) corresponde à um método geofísico que, dentre outras aplicações, tem sido utilizado no mapeamento de feições geológicas subsuperficiais. Dessa forma, esta técnica foi empregada para a caracterização estrutural de litotipos na Serra da Matriculada, Datas (MG).

Foram realizados dois perfis com direção E-W e um com direção N-S, perpendiculares às zonas de cisalhamento responsáveis por inversões estratigráficas. Dentre as características observadas nos radargramas destacam-se dois padrões de reflexão (1) contínuo, com inclinação para os quadrantes leste, condizente com os planos de foliações dos litotipos aflorantes e (2) oblíquo aos primeiros refletores, correlacionado à família de fraturas com direção N-S e mergulho para os quadrantes oeste. O perfil com direção N-S indica uma falha normal, responsável pela inexistência de litotipos correlacionados à Formação Barão do Guaicuí e ao Complexo de Gouveia na porção sul da área. Salienta-se como limitações associadas ao emprego do GPR a presença de litotipos com características elétricas condutoras e, localmente, de ruídos eletromagnéticos.

Palavras-chave: Caracterização estrutural; Mapeamento geológico; Radar de penetração no solo; Serra do Espinhaço.

Abstract

Georadar (GPR) corresponds to a geophysical method that, among other applications, has been used in the mapping of subsurface geological features. Thus, this technique was used for the structural characterization of lithotypes in Serra da Matriculada, Datas (MG). Two profiles with E-W direction and one with N-S direction were performed, perpendicular to the shear zones responsible for stratigraphic inversions. Among the characteristics observed in radargrams, two patterns of continuous reflection stand out: (1) inclination towards the east quadrants, consistent with the foliation planes of the outcropping lithotypes and (2) oblique to the first reflectors, correlated to the family of fractures with direction NS and dip to the west quadrants. The profile with N-S direction indicates a normal fault, responsible for the absence of correlated lithotypes to Barão do Guaicuí Formation and Gouveia Complex in the southern portion of the area. The limitations associated with the use of GPR are the presence of lithotypes with conductive electrical characteristics and, locally, of electromagnetic noise.

Keywords: Structural characterization; Geological mapping; Ground-penetrating radar; Serra do Espinhaço.

Resumen

Georadar (GPR) corresponde a un método geofísico que, entre otras aplicaciones, se ha utilizado en el mapeo de las características geológicas del subsuelo. Por lo tanto, esta técnica se utilizó para la caracterización estructural de litotipos en Serra da Matriculada, Datas (MG). Se realizaron dos perfiles con dirección E-W y uno con dirección N-S, perpendiculares a las

zonas de corte responsables de las inversiones estratigráficas. Entre las características observadas en los radargramas, se destacan dos patrones de reflexión continua: (1) inclinación hacia los cuadrantes este, consistente con los planos de foliación de los litotipos de afloramiento y (2) oblicuos a los primeros reflectores, correlacionados con la familia de fracturas con dirección. NS y sumérgete en los cuadrantes del oeste. El perfil con dirección N-S indica una falla normal, responsable de la ausencia de litotipos correlacionados con la Formación Barão do Guaicuí y el Complejo Gouveia en la parte sur del área. Las limitaciones asociadas con el uso de GPR son la presencia de litotipos con características eléctricas conductoras y, localmente, de ruido electromagnético.

Palabras clave: Caracterización estructural; Mapeo geológico; Radar de penetración del suelo; Serra do Espinhaço.

1. Introdução

A Serra do Espinhaço, caracterizada por uma direção aproximadamente norte-sul e mais de 1200 km de extensão, abrange áreas dos estados de Minas Gerais e Bahia. A sua porção meridional, com aproximadamente 300 km de extensão, está localizada em Minas Gerais, compondo um dos principais acidentes geográficos desta região.

De modo geral, afloram na Serra do Espinhaço Meridional litotipos com idades entre o Arqueano e o Neoproterozoico, predominando rochas metassedimentares com idades paleoproterozoicas a mesoproterozoicas, associadas ao Supergrupo Espinhaço (Knauer, 2007).

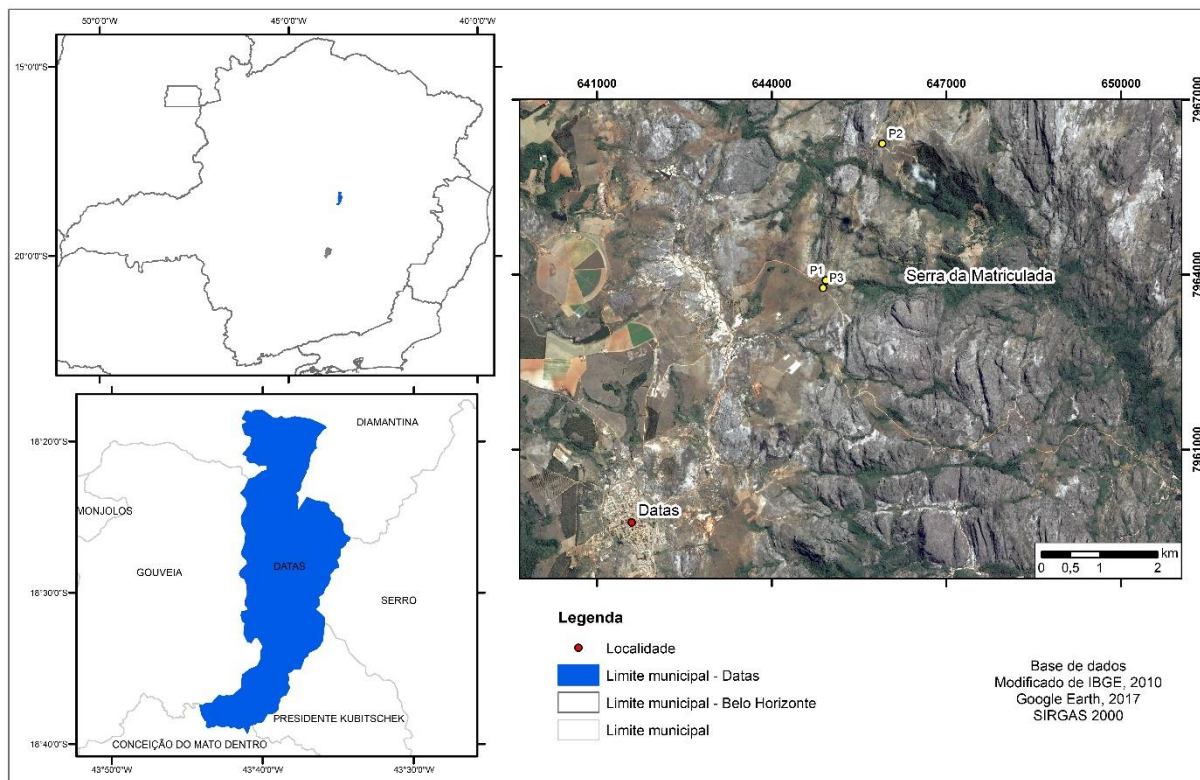
A estruturação desse setor da Serra do Espinhaço está associada a um sistema de zonas de cisalhamento dúctil/falhas de empurrão, caracterizado por direção norte-sul e mergulhos moderados a altos para os quadrantes leste. Diversas análises estruturais (Herrgesell, 1984; Herrgesell & Pflug, 1986; Almeida-Abreu *et al.* 1986; Rolim, 1992) indicam que parte destas falhas/zonas de cisalhamento dúctil representa rampas frontais originadas por um transporte de massa, aproximadamente, de leste para oeste.

A Folha Diamantina (SE-23-Z-A-III, Carta do Brasil, escala 1: 100.000) localiza-se na porção central da Serra do Espinhaço Meridional, consistindo na área foco da maioria dos estudos geológicos na serra e onde podem ser observadas as principais seções-tipo das unidades geológicas.

O município de Datas/MG (Figura 1), distante aproximadamente 270 km de Belo Horizonte, capital do Estado, é uma das áreas mais intensamente deformadas da Folha Diamantina, representando a “Zona de Falhamentos da Matriculada” de Schöll & Fogaça

(1981), sendo caracterizada por um importante sistema de frentes de cavalgamento/zonas de cisalhamento.

Figura 1: Localização do município de Datas, com enfoque para seu posicionamento no âmbito do estado de Minas Gerais.



Fonte: Modificado de Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE), 2010; Google Earth, 2019.

Nesta perspectiva, destaca-se que os métodos geofísicos têm sido considerados ferramentas eficientes para a identificação de discontinuidades geológicas. Apesar de serem passíveis de ambiguidade ou incerteza na interpretação, essas técnicas fornecem um meio relativamente rápido e com custos baixos para a obtenção de informações em subsuperfície.

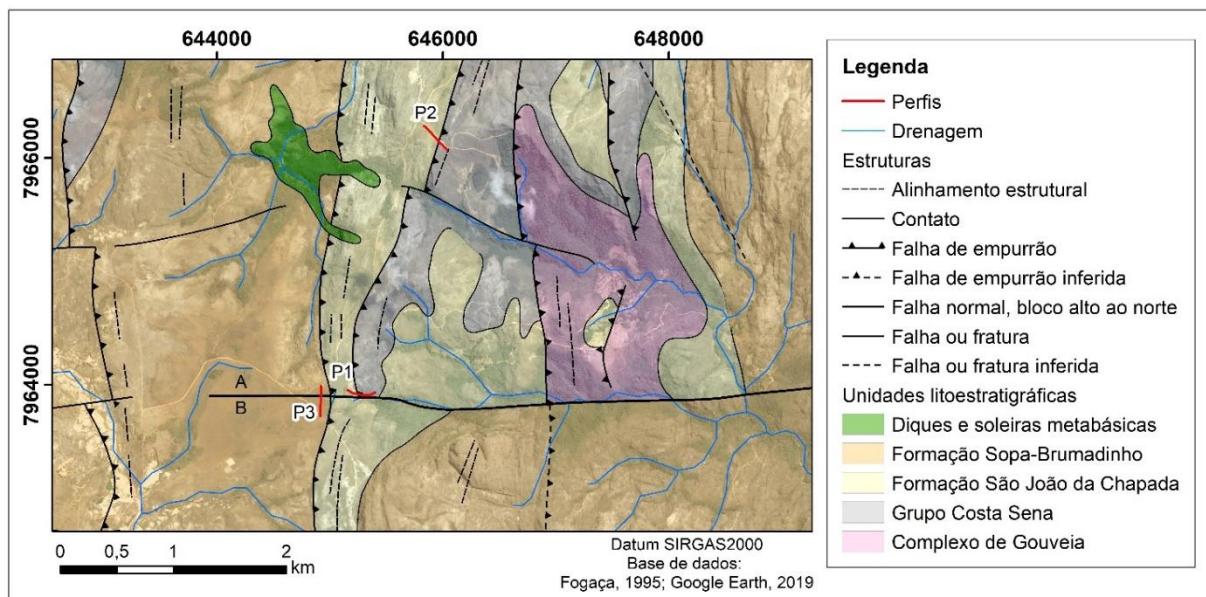
Dentre os métodos disponíveis, destaca-se o georadar (GPR), que utiliza ondas eletromagnéticas de alta frequência, entre 10 e 2500 MHz, para o mapeamento de estruturas e feições geológicas subsuperficiais rasas ou ainda para a localização de objetos enterrados.

Assim, esta investigação objetivou caracterizar, em subsuperfície, as frentes de cavalgamento/zonas de cisalhamento ocorrentes na região da Serra da Matriculada, município de Datas, Serra do Espinhaço Meridional, testando a aplicação do GPR como ferramenta auxiliar ao mapeamento geológico em escala de detalhe.

2. Contexto geológico regional

Ao longo da Zona de Falhamentos da Matriculada, no município de Datas (MG), podem ser identificadas lascas tectônicas associadas ao Complexo de Gouveia, à Formação Barão do Guaicuí (Grupo Costa Sena) e de unidades correlacionadas ao Supergrupo Espinhaço, representadas pelas formações São João da Chapada e Sopa-Brumadinho (Figura 2).

Figura 2: Mapa geológico simplificado da região da Serra da Matriculada, município de Datas (MG) com localização dos perfis de GPR (P1, P2 e P3) realizados.



Fonte: Modificado de Fogaça, 1995; Google Earth, 2019.

O Complexo de Gouveia é formado por migmatitos e granitos, com corpos de anfibolito associados (Schöll & Fogaça, 1981). A composição petrográfica das rochas pertencentes à esta unidade, de acordo com Hoffmann (1981, 1983), é relativamente homogênea, predominando os granodioritos, monzogranitos e tonalitos, além de termos que podem ser classificados como granitos *sensu lato*. Destaca-se que datação geocronológica pelo método U/Pb em zircões obtidos no granito de Gouveia indicou idades de cristalização de 2839 ± 14 Ma, com regressão linear em 1844 ± 15 Ma (Machado *et al.*, 1989).

Constituindo a unidade mais basal do Grupo Costa Sena, a Formação Barão do Guaicuí é composta por quartzo-mica xisto, frequentemente contendo turmalina, cianita e, mais raramente, lazulita, apresentando intercalações de quartzo xisto, quartzito, sericita xisto, formação ferrífera bandada, xisto verde e metavulcanito ácido (Fogaça *et al.*, 1984), estes

últimos com idades de 2049 +3/-2 Ma (Machado *et al.*, 1989).

Os metassedimentos essencialmente clásticos que constituem o Supergrupo Espinhaço foram agrupados por Pflug (1968) em oito formações, sendo que as duas basais (formações São João da Chapada e Sopa-Brumadinho) foram detalhadas por Schöll & Fogaça (1979) e subdivididas nos níveis “A”, “B” e “C” (inclusos na Formação São João da Chapada) e “D”, “E” e “F”, relacionados à Formação Sopa-Brumadinho e posteriormente formalizados, respectivamente, nos membros Datas e Caldeirões (Almeida-Abreu, 1993) e Campo Sampaio (Fogaça & Almeida-Abreu, 1982).

De modo geral, a Formação São João da Chapada é composta por quartzitos contendo lentes de metabrechas e metaconglomerados, associados ao “Nível A”; filitos hematíticos, contendo, localmente, intercalações de clorita-xistos, turmalinitos finos e, mais raramente, cloritóide-fels pertencentes ao “Nível B” e quartzitos médios a grosseiros, contendo, eventualmente, grânulos e pequenos seixos esparsos de quartzo e leitos decimétricos de metaconglomerados polimíticos correlacionados ao “Nível C” (Schöll & Fogaça, 1979).

O Membro Datas, sequência mais basal da Formação Sopa-Brumadinho, é constituído por filitos e quartzitos micáceos finos; enquanto o Membro Caldeirões é composto por quartzitos ferruginosos, com granulometria média a grossa, e metaconglomerados (Knauer, 1990). Já o Membro Campo Sampaio, unidade superior da Formação Sopa-Brumadinho, possui distribuição mais restrita e localizada, com predomínio de metapelitos e quartzitos com granulação fina (Fogaça, 1995).

Proposta em Knauer (1990) e adotada no Projeto Espinhaço (e.g. Knauer & Grossi-Sad, 1995 a, b), a Suíte Metaígneia Pedro Lessa é formada por diques e soleiras de metagabros e metadiabásios, com idades de intrusão de cerca de 906 ± 3 Ma (Machado *et al.*, 1989), e metamorfisadas no fácies xisto verde.

Quanto à estruturação, a Serra do Espinhaço Meridional é caracterizada por um sistema de frentes de cavalgamento/zonas de cisalhamento dúctil, com planos próximos a norte-sul e mergulhos moderados a altos para os quadrantes leste. Dentre as estruturas planares de origem tectônica, destaca-se uma foliação “Sn”, com direção comumente entre N05°W e N15°E e mergulhos moderados a altos para os quadrantes leste (Knauer 1990, 1999).

Nas áreas menos deformadas podem ser observadas as estruturas planares S_{n+1} e S_{n+2} . A estrutura planar S_{n+1} corresponde a uma clivagem de fratura ou ardosiana caracterizada por direções próximas a N-S e com mergulhos altos para leste, evoluindo, localmente, para uma xistosidade. Já a estrutura planar S_{n+2} , com ocorrência menos frequente e conspícua do que S_{n+1} , possui direção E-W e mergulhos sub-verticais, correspondendo, também, a uma clivagem

de fratura nas rochas mais competentes e de crenulação nos xistos e filitos (Rolim, 1992).

3. Metodologia

O termo *ground penetrating radar* (radar de penetração no solo, georadar ou GPR) corresponde a um método geofísico eletromagnético que gera imagens de alta resolução de feições e estruturas presentes em subsuperfície a partir do registro do tempo duplo de viagens de ondas eletromagnéticas (Annan, 1992).

Uma antena transmissora propaga no solo um curto pulso eletromagnético de alta frequência (ondas situadas na faixa entre 16 e 2200). Em subsuperfície esse pulso sofre refração e reflexão nas discontinuidades características de dois meios que possuem diferentes propriedades eletromagnéticas. Uma antena receptora capta as ondas refletidas quando estas retornam à superfície, sendo que estas são então amplificadas, digitalizadas e registradas (Robinson & Michaud, 1999).

O método GPR tem sido usado para mapear as condições da subsuperfície em diversas aplicações geológicas tais como para o imageamento de solo raso, para a caracterização de estruturas em rochas em alta resolução e na localização de tubulações enterradas (Kearey *et al.*, 2002). Dentre as pesquisas mais recentes utilizando este método, pode-se destacar a investigação de estruturas cársticas e tectônicas (Zajc *et al.*, 2015), a avaliação de condições geológicas envolvidas na escavação de túneis (Guo *et al.*, 2016) e a identificação de juntas verticais em mina a céu aberto (Tolooiyan *et al.*, 2019).

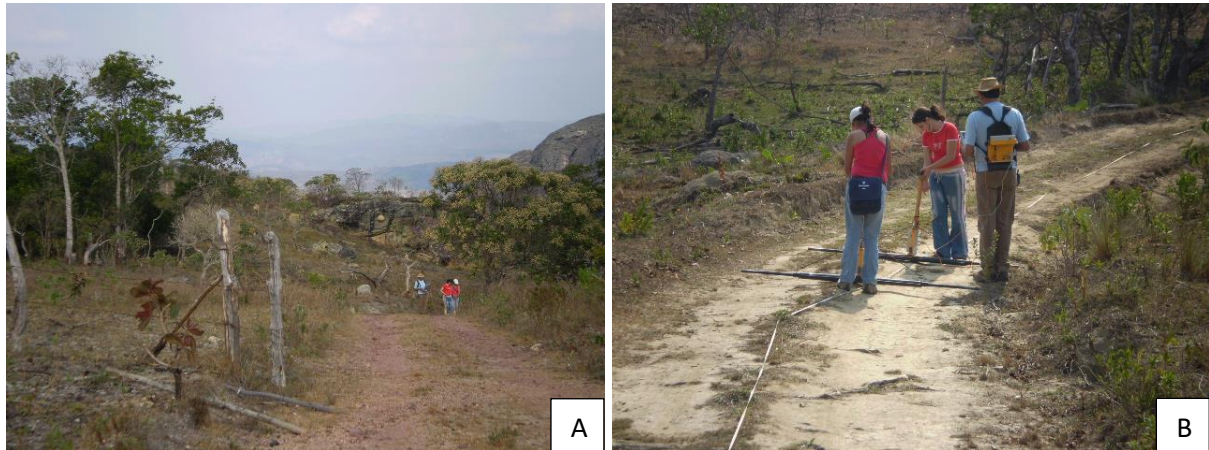
Na região da Serra do Espinhaço Meridional, o GPR foi aplicado na caracterização de coberturas superficiais em Gouveia/MG (Neves *et al.*, 1997; Aranha *et al.*, 1998; Horn *et al.*, 1998; Aranha, 2003), como ferramenta de apoio ao mapeamento geológico em escala de detalhe (Penna, 2006; Cordeiro *et al.*, 2007), e na caracterização de diques na região de Diamantina/MG (Aranha & Horn, 2000).

A campanha geofísica deste trabalho foi realizada por meio de três perfis de GPR utilizando-se o aparelho RAMAC (Mala GeoScience). Destaca-se que neste estudo foram empregadas duas diferentes antenas, ambas de baixa frequência (50 MHz e 100 MHz), sendo que a primeira foi empregada apenas no primeiro perfil – P1, com o intuito de analisar porções mais profundas (algumas dezenas de metros). Neste sentido, faz-se importante salientar que frequências maiores da onda transmitida possibilitam maior resolução da subsuperfície, acarretando, contudo, em uma menor profundidade de penetração.

Os perfis foram realizados com antenas mantidas a uma distância constante (*common*

offset), em que o sistema é deslocado ao longo de uma direção (Figura 3) permitindo a obtenção de um perfil das reflexões *versus* posição. Empregou-se o modo de 16 *stacks* (pulsos rápidos) visando a elevação da relação entre sinal/ruído da onda emitida, otimizando a qualidade dos dados adquiridos em campo.

Figura 3: Visão geral (A) e detalhe (B) do levantamento de GPR realizado na região da Serra da Matriculada, Datas (MG).

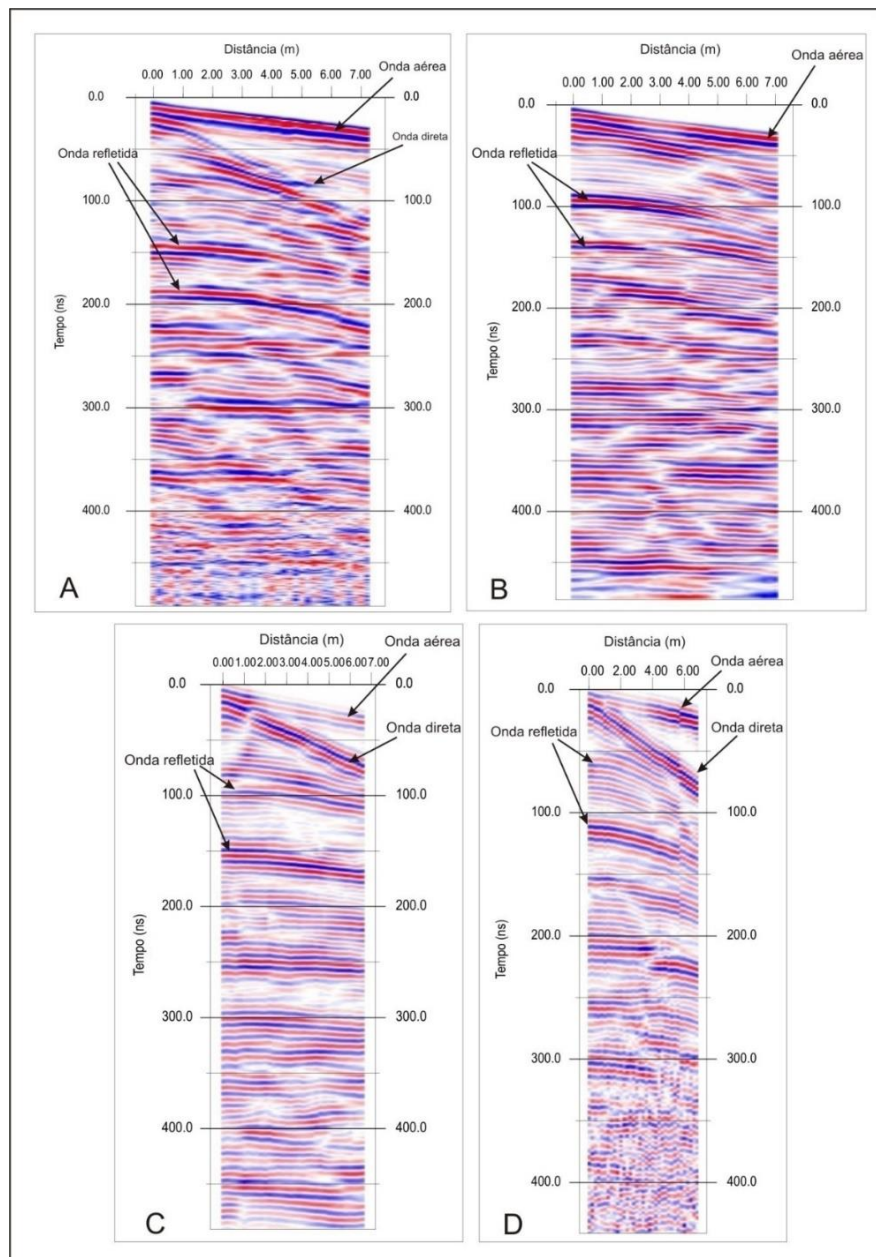


Fonte: Acervo dos autores, 2019.

Os parâmetros restantes empregados no desenvolvimento dos perfis correspondem à uma frequência de amostragem de cerca de 10 vezes a frequência central das antenas utilizadas; uma janela de tempo de 400 ns e espaçamento entre os pontos de obtenção de dados de 0,25 m considerando a antena de 50 MHz e 0,20 m para a antena de 100 MHz.

O processamento dos dados, realizado por meio do *software* Gradix, visou melhorar a qualidade e precisão destes, buscando uma maior correlação com a realidade. A edição abrangeu a organização dos dados, sua correção e o posicionamento dos perfis executados, dentre outros aspectos. Algumas manipulações essenciais dos dados foram efetuadas como, por exemplo, *declipping*, *dewow*, marcação do “tempo zero”, aplicação de ganho AGC, filtragem – filtro *gaussiano*, migração (a partir da definição dos campos de velocidade dos perfis CMPs (*common midpoint* - ponto médio comum), obtidos em três posições –início, meio e fim – de cada perfil, Figura 4) e correção da topografia ao longo dos perfis realizados.

Figura 4: Perfis CMPs obtidos na região da Serra da Matriculada (A) Perfil 1 – 5 m iniciais; (B) Perfil 1 – 5 m finais, (C) Perfil 2 – 5 m iniciais; (D) Perfil 3 – 5 m iniciais.



Fonte: Dados da pesquisa, 2019.

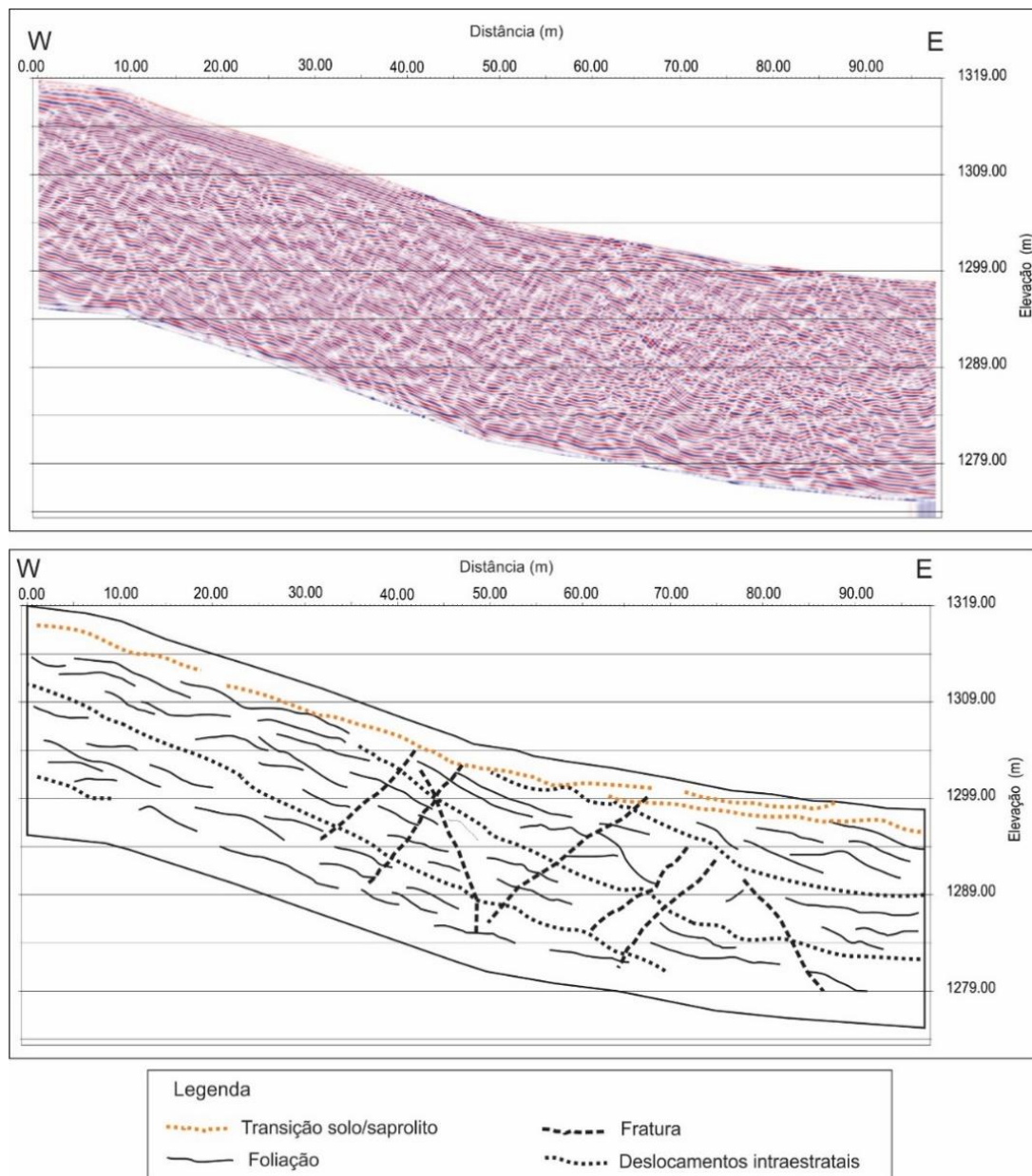
Salienta-se que uma discussão detalhada acerca da edição e manipulações aplicadas aos dados coletados nesta pesquisa pode ser verificada, entre outros, em Aranha (2003).

4. Resultados e discussão

Foram realizados dois perfis de GPR (P1 – Figuras 5 e 6, P2 – Figura 7) com direção aproximadamente E-W, cortando de forma perpendicular lascas tectônicas que colocam em

contato, nos perfis P1 e P2 rochas pertencentes às formações Barão do Guaicuí e São João da Chapada. Um terceiro perfil (P3 - Figura 9), com direção próxima a N-S, foi executado com antena de 100 MHz, na porção sul da região, visando a identificação e caracterização de uma importante falha normal mapeada por Fogaça (1995) na Folha Diamantina.

Figura 5: Radargrama obtido ao longo do perfil P1 executado com antena de 50 MHz.



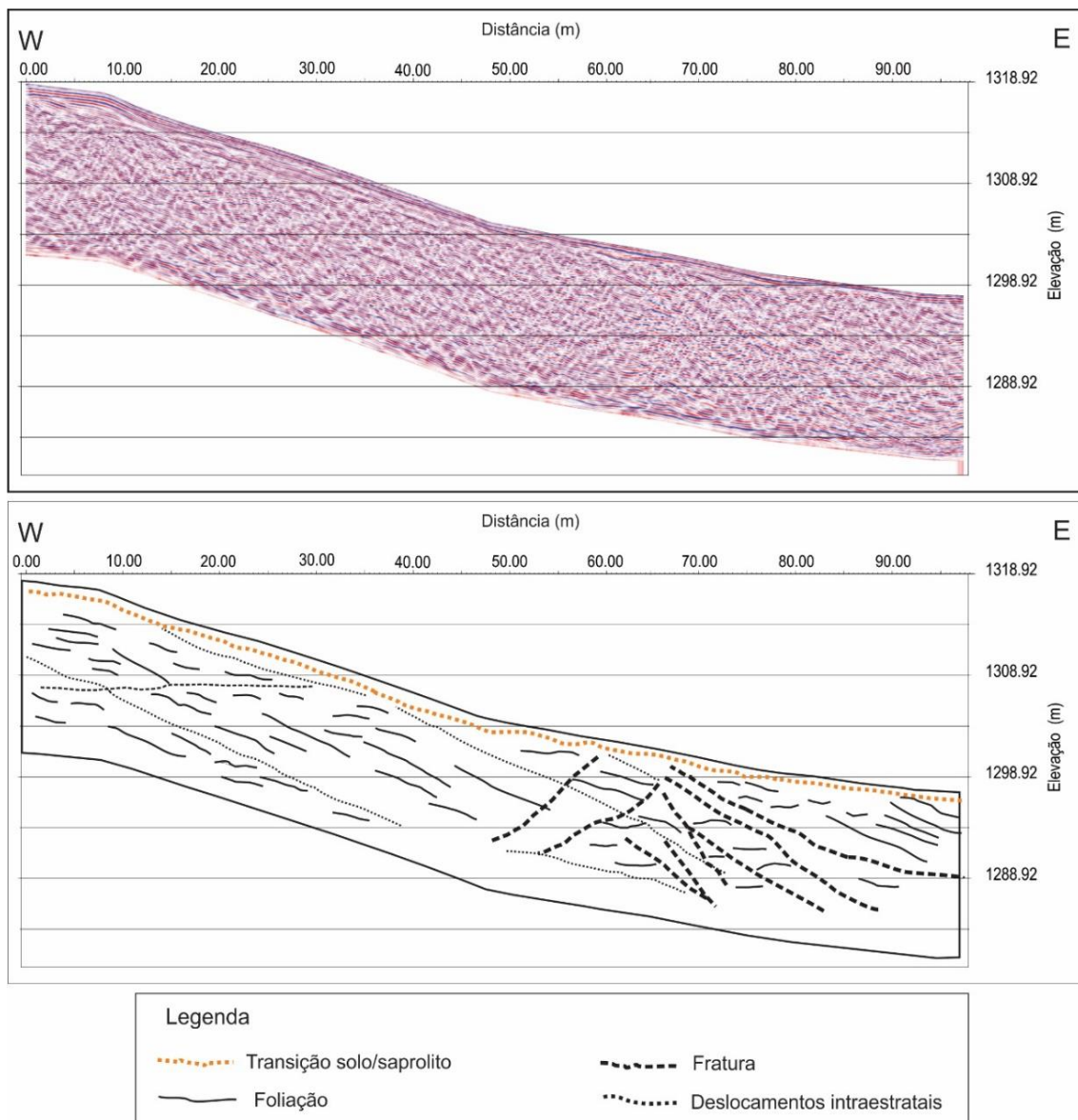
Fonte: Dados da pesquisa, 2019.

Os radargramas resultantes apresentam uma transição, ao longo de toda a extensão do perfil, de solo (região caracterizada por uma superfície de reflexão contínua e paralela ao relevo) para saprolito (região do perfil, localizado abaixo da superfície de reflexão do solo, na

qual não há estruturas capazes de possibilitarem a reflexão da onda emitida) e, em sequência, rocha sã.

Ao longo dos perfis P1 e P2 (Figuras 5, 6 e 7) pelo menos dois refletores podem ser identificados. O primeiro conjunto de refletores, visíveis por toda a profundidade dos radargramas, é representado por um padrão de reflexão relativamente contínuo, com inclinação para leste, que pode ser associado aos planos de foliação presentes nos xistos e quartzitos, caracterizados por uma direção regional N-S e mergulho para o quadrante SE.

Figura 6: Radargrama obtido ao longo do perfil P1 executado com antena de 100 MHz.

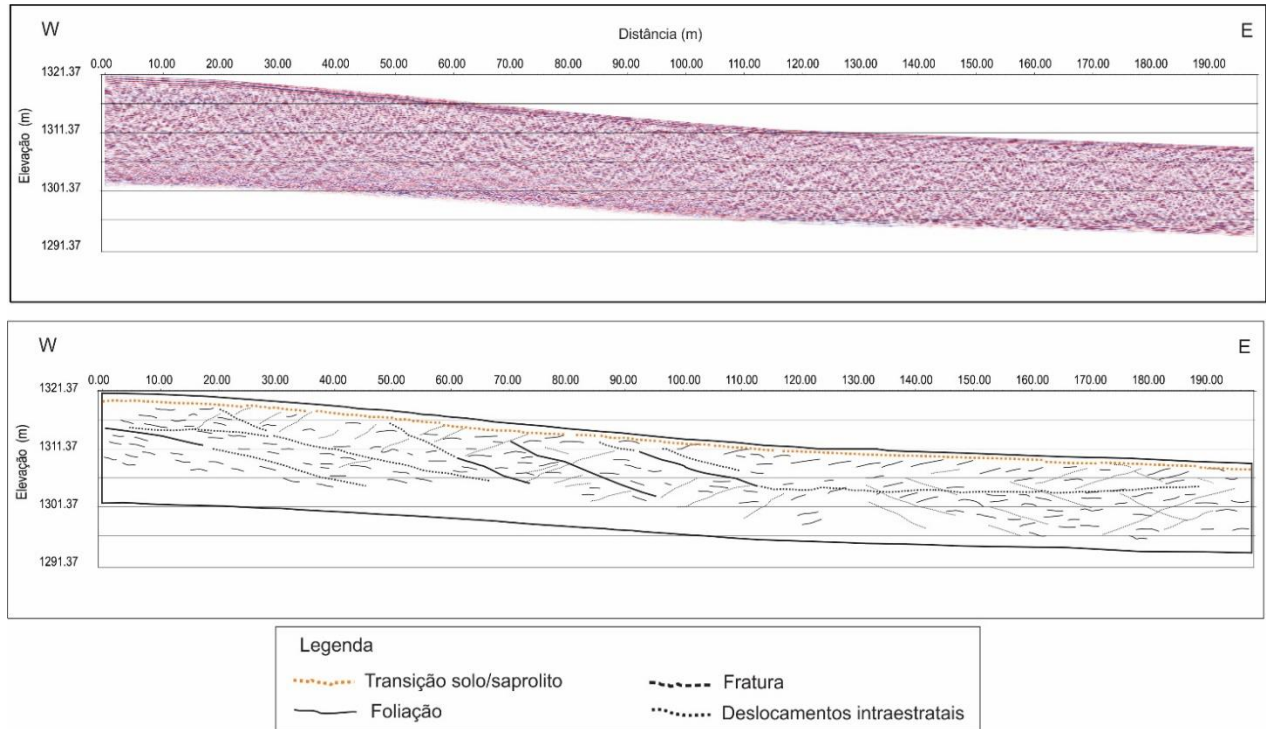


Fonte: Dados da pesquisa, 2019.

O segundo conjunto de refletores, mais nítido no perfil P2 (Figura 7), apresenta-se

oblíquo aos primeiros refletores descritos, podendo ser correlacionado às famílias de fraturas regionais, também com direção geral N-S, mas possuindo mergulho para os quadrantes oeste.

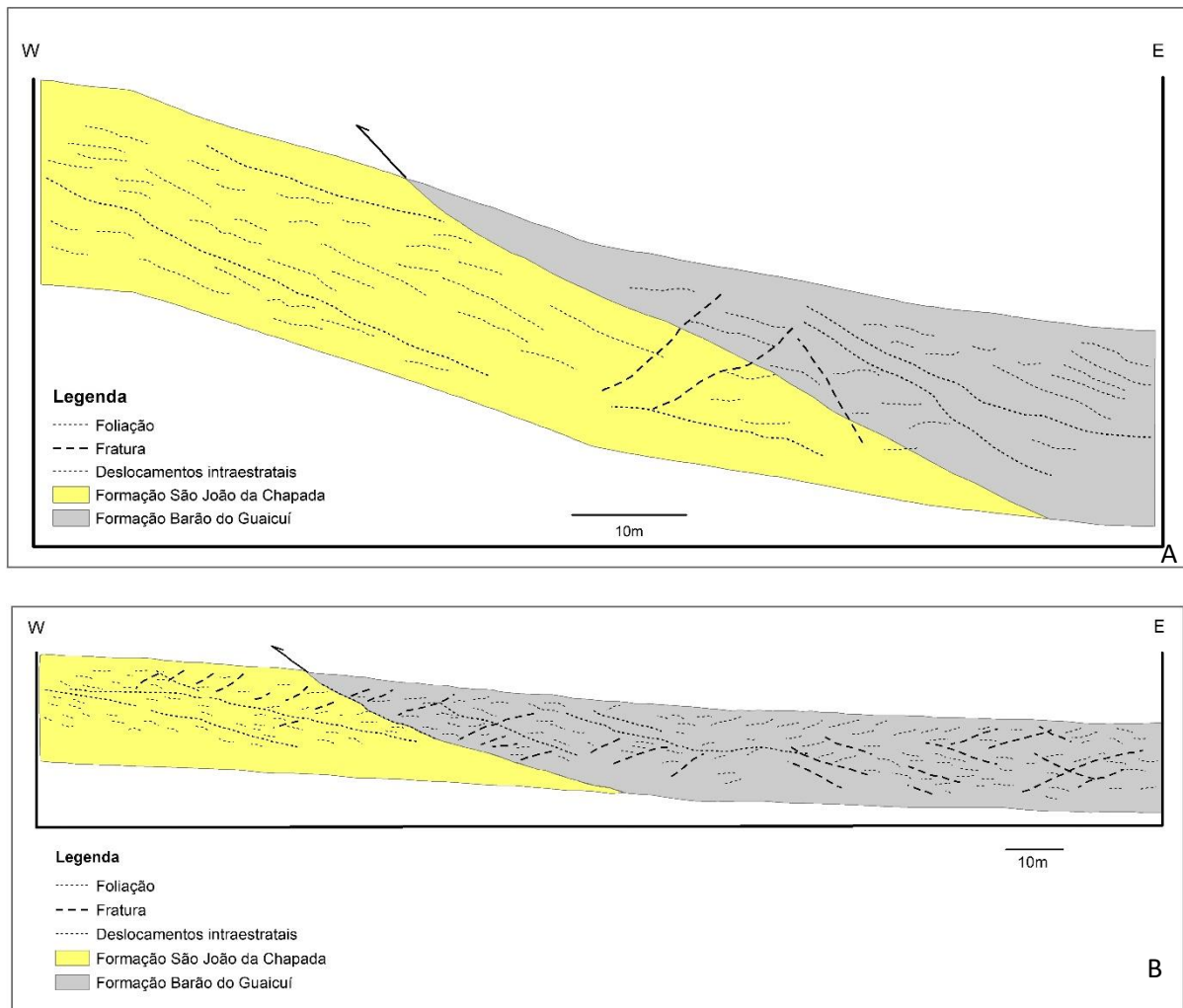
Figura 7: Radargrama obtido ao longo do perfil P2 executado com antena de 100 MHz.



Fonte: Dados da pesquisa, 2019.

Destacam-se nos perfis representados nas figuras 5, 6 e 7 refletores contínuos por toda a extensão dos radargramas, com inclinação semelhante àquela visualizada para os planos de foliação, nas proximidades das zonas de contatos dos litotipos aflorantes - quartzo-mica xisto (Formação Barão do Guaicuí) e quartzito pertencente à Formação São João da Chapada em ambos os perfis. Tais superfícies podem ser associadas aos descolamentos basais responsáveis pelas frentes de cavalgamento/zonas de cisalhamento e, conseqüentemente, inversões estratigráficas encontradas por toda a região da Serra da Matriculada (Figuras 8A e 8B).

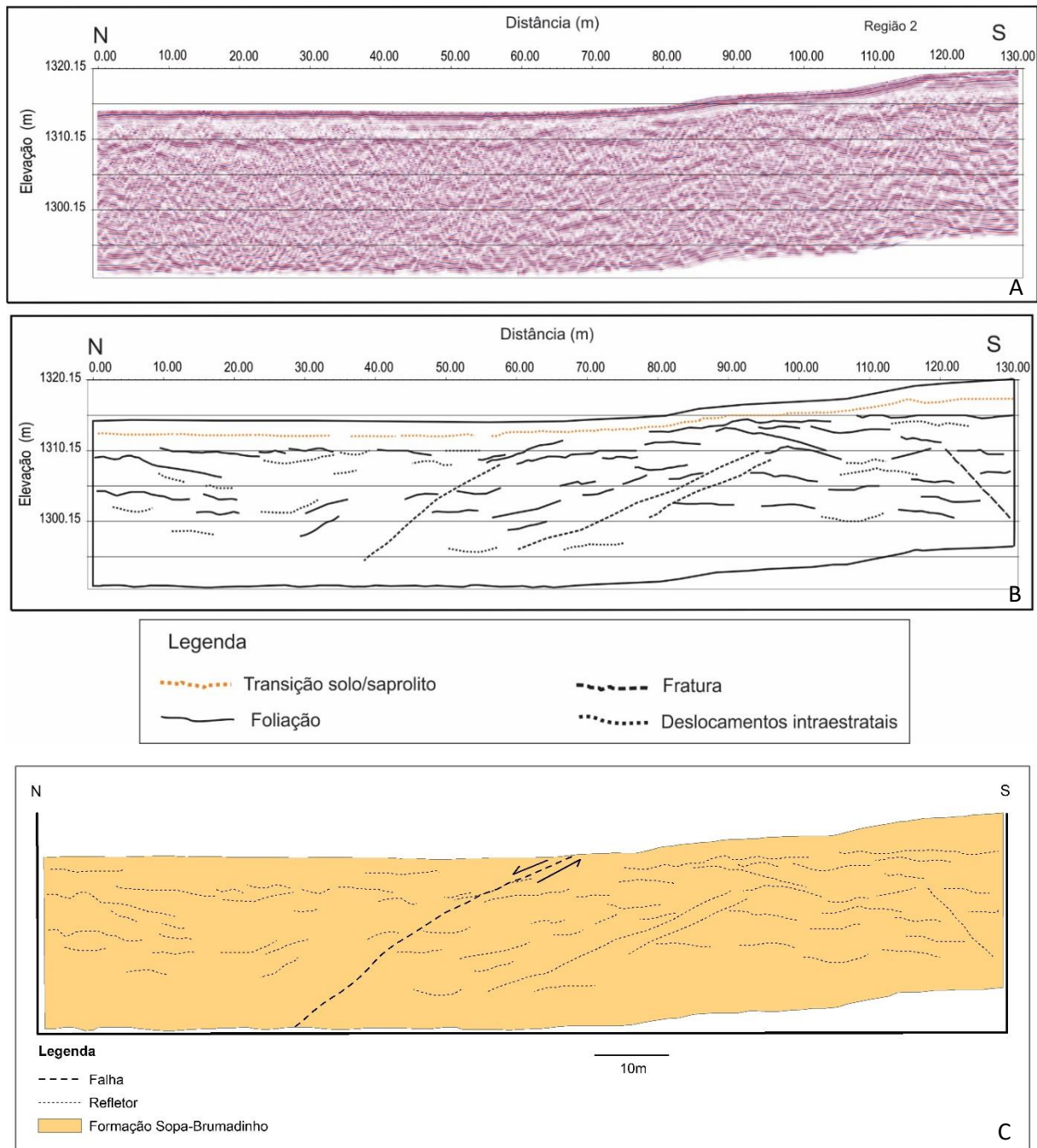
Figura 8: Perfil geológico esquemático ao longo da linha do perfil P1 (A) e P2 (B).



Fonte: Dados da pesquisa, 2019.

No terceiro e último perfil executado (P3, Figuras 9A e 9B), a forma com a qual alguns refletores são interrompidos, próximo à distância de 70 m, indica a existência de uma falha, assinalada por um refletor contínuo e com inclinação moderada para N. Essa falha, mapeada por Fogaça (1995), seria do tipo normal, justificando a ausência de unidades associadas à Formação Barão do Guaicuí e ao Complexo de Gouveia na porção a sul do lineamento ao qual é correlacionada (Figura 9C).

Figura 9: (A) e (B) Radargrama obtido ao longo do perfil P3 executado com antena de 100 MHz; (C) Perfil geológico esquemático ao longo da linha do perfil P3.



Fonte: Dados da pesquisa, 2019.

Inúmeros outros refletores podem ser visualizados no perfil P3, mas dada a direção deste (paralela às principais estruturas), a relação com os planos de foliação e famílias de fraturas é dificultada. Um segundo fator complicador nesse caso está associado à inexistência de afloramentos na região de execução do perfil, os quais possibilitariam uma correlação direta.

5. Considerações finais

O método GPR pode ser de grande utilidade como ferramenta auxiliar ao mapeamento geológico, apresentando bons resultados relacionados à identificação de alterações nos padrões de reflexão, indicando possíveis contatos entre diferentes litologias e caracterização de estruturas geológicas, como planos de foliação ou conjuntos de fraturas; e no reconhecimento de depósitos supergênicos, evidenciando contatos entre solo e saprolito.

A realização de três perfis de GPR na região da Serra da Matriculada, município de Datas (MG), permitiu a identificação de dois conjuntos de refletores. O primeiro destes conjuntos, caracterizado por um padrão de reflexão relativamente contínuo, com inclinação para os quadrantes leste, pode ser correlacionado aos planos de foliação presentes nos xistos e quartzitos, localmente aflorantes ao longo dos perfis executados.

Um segundo conjunto de refletores, oblíquo aos primeiros refletores descritos, pode ser correlacionado às famílias de fraturas regionais, caracterizadas por uma direção geral N-S, com mergulho para os quadrantes oeste.

Um terceiro perfil (P3) executado com direção N-S na porção sul da área, apresenta como peculiaridade refletores interrompidos, próximo à distância de 70 m, que podem ser relacionados à uma falha normal, responsável pela inexistência de unidades correlacionadas à Formação Barão do Guaicuí e ao Complexo de Gouveia na porção sul da área.

Apesar da eficiência do GPR como ferramenta auxiliar para a identificação de descontinuidades geológicas, destacam-se dificuldades associadas à sua utilização em materiais com características elétricas condutoras (as quais promovem a dispersão da onda eletromagnética), assim como nas proximidades de árvores, dada a geração de ruídos.

Referências

Almeida-Abreu, P. A. (1993). *A evolução geodinâmica da Serra do Espinhaço Meridional, Minas Gerais*, Brasil. Tese Dout., Univ. Freiburg, 150 p.

Almeida-Abreu, P. A.; Fernandes, P. C. O.; Knauer, L. G.; Hartmann, M. B.; Donato, M. T. R.; Schorscher, H. D. (1986). Elementos da zona de cisalhamento dúctil da borda oriental da Serra do Espinhaço, Minas Gerais. In: XXXIV Cong. Bras. Geol., *Anais...* 2: 1219-1236, Goiânia.

Annan, A. P. (2003). *Ground penetrating radar: Principles, procedures & applications*. Sensors & Software Inc. Technical Paper. Acesso em 10 de setembro de 2019 em <http://www-rohan.sdsu.edu/~geology/jiracek/sage/documents/Sensors%20and%20Software%20GPR%20Manual.pdf>.

Aranha, P. R. A. (2003). *Estudo das coberturas superficiais e sua dinâmica na região de Gouveia, Serra do Espinhaço, MG: utilizando o Radar de Penetração no Solo (GPR)*. Tese de Doutorado, UFOP, Ouro Preto, 305 p.

Aranha, P. R. A.; Horn, A. H. (2000). Investigações estruturais de um dique máfico caulinzado na Serra do Espinhaço Meridional, utilizando o GPR. *Revista Geonomos*, v. 8, n. 1, p. 69-76.

Aranha, P. R. A.; Augustin, C. H. R. R., Lucio, P. S.; Neves, F. A. P. S. (1998). Estudo das coberturas superficiais na região de Gouveia – MG, com o uso de GPR (Ground Penetrating Radar). In: XL Congresso Brasileiro de Geologia, Belo Horizonte, *Anais*, CD-ROM.

Cordeiro, J. S.; Aranha, P. R. A.; Costa, R. D.; Knauer, L. G.; Magalhaes, J. T. R. (2007). Aplicação de Georadar (GPR) na caracterização de frentes de cavalgamento na região da Serra da Matriculada, município de Datas (MG). In: XIV Simpósio de Geologia de Minas Gerais, 2007, Diamantina, MG, *Anais*, CD-ROM.

Fogaça, A. C. C. (1995). Geologia da Folha Diamantina. In: Grossi-Sad, J. H.; Lobato, L. M.; Pedrosa-Soares, A. C.; Soares-Filho, B. S. (coordenadores e editores). *Projeto Espinhaço*, Belo Horizonte, COMIG – Companhia Mineradora de Minas Gerais. p. 1575-1665.

Fogaça, A. C. C.; Almeida Abreu, P. A. (1982). Depósitos de planícies de marés na Formação Sopa-Brumadinho (Proterozoico Inferior), Cordilheira do Espinhaço, Minas Gerais, Brasil. In: V Cong. Latinoamer. Geol., Buenos Aires, *Actas*, v. 2, p. 373-388.

Fogaça, A. C. C.; Almeida Abreu, P. A.; Schorscher, H. D. (1984). Estratigrafia da sequência supracrustal arqueana da porção mediana-central da Serra do Espinhaço Meridional, Minas Gerais. In: XXXIII Cong. Br. Geol., Rio de Janeiro, *Anais*, v. 6, p. 2654-2667.

Google. (2019). Google Earth. Versão 7.1.5.1557. 2017. Nota (Datas/MG). Acesso em 5 de setembro de 2019 em <http://www.google.com/earth/download/ge/agree.html>.

Guo, M.; Liu, G.; Bai, T. Y.; Li, Z. P. (2016). Application of GPR in extra-long tunnel engineering with a variety of adverse geological conditions. *Anais... 5th International Conference on Civil, Architectural and Hydraulic Engineering, ICCAHE 2016*, p. 899 - 905.

Herrgesell, G. (1984). *Das Prakambrium am Ostrand der nordlichen Serra do Cipó (Serra do Espinhaço, Minas Gerais, Brasilien)*. Un. Freiburg, Tese Dout., 247 pp., Freiburg.

Herrgesell, G.; Pflug, R. (1986). The thrust belt of the southern Serra do Espinhaço, Minas Gerais, Brazil. *Zbl. Geol. Palaontol.*, Teil I, 9/10: 1405-1414, Stuttgart.

Hoffmann, C. (1981). CHI-square testing of zircon populations from an Archean granite-greenstone terrain, Minas Gerais, Brasilien. *N. Jb. Min. Abh.* 140: 202-220.

Hoffmann, C. (1983). The Archean Peraluminous Gouveia Granite, its structure, geochemistry and phase petrology. *N. Jb. Min. Abh.* 146(2): 151-169.

Horn, A. H.; Aranha, P. R. A.; Neves, S. C.; Viana F^o, L.; Ádamo, R. G. (1998). Novos dados sobre a ocorrência de fosfatos e silicatos de Al-Fe na Serra do Espinhaço Meridional – Perfis nas regiões da Serra da Miúda e Fazenda Formação – Diamantina, Minas Gerais. In: XL Congresso Brasileiro de Geologia, Belo Horizonte, *Anais*, CD-ROM.

Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). (2010). *Carta Internacional ao Milionésimo*. Acesso em 5 setembro de 2019 em <http://mapas.ibge.gov.br/interativos/servicos/wms-do-arcgis>.

Kearey, P.; Brooks, M.; Hill, I. (2002). *An Introduction to Geophysical Exploration*. 3 ed. Oxford: Blackwell, 262 p.

Knauer, L. G. (1990). *Evolução geológica do Precambriano da porção centro-leste da Serra do Espinhaço Meridional e metalogênese associada*. Dissertação de Mestrado, UNICAMP, 298 p.

Knauer, L. G. (1999). *Aspectos estratigráficos e estruturais das unidades proterozóicas da Serra do Espinhaço meridional e suas implicações para a caracterização do Evento Uruçuano*. Tese de Doutorado, UNESP, 226pp., Rio Claro.

Knauer, L. G. (2007). O Supergrupo Espinhaço em Minas Gerais: considerações sobre sua estratigrafia e seu arranjo estrutural. *Revista Geonomos*, 15 (1): 81-90.

Knauer, L. G.; Grossi Sad, J. H. (1995a). Geologia da Folha Serro, Minas Gerais. In: Grossi-Sad, J. H.; Lobato, L. M.; Pedrosa-Soares, A. C.; Soares-Filho, B. S. (coordenadores e editores). *Projeto Espinhaço*. Belo Horizonte, COMIG - Companhia Mineradora de Minas Gerais. p. 2057-2316.

Knauer, L. G.; Grossi Sad, J. H. (1995b). Geologia da Folha Presidente Kubitschek, Minas Gerais. In: Grossi-Sad, J. H.; Lobato, L. M.; Pedrosa-Soares, A. C.; Soares-Filho, B. S. (coordenadores e editores). *Projeto Espinhaço*. Belo Horizonte, COMIG - Companhia Mineradora de Minas Gerais. p. 1901-2055.

Machado, N.; Schrank, A.; Abreu, F. R.; Knauer, L. G.; Almeida-Abreu, P. A. (1989). Resultados preliminares da geocronologia U/Pb na Serra do Espinhaço Meridional. In: V Simp. Geol. Minas Gerais, Belo Horizonte, *Anais*, p. 171-174.

Neves, F. A. P. S.; Aranha, P. R. A.; Lucio, P. S. (1997). Estudos de voçorocas usando GPR. In: Simpósio Regional de Geologia (SBG), Penedo. *Anais*, CD-ROM.

Penna, R. M. (2006). *Mapeamento geológico e caracterização geofísica por cintilometria, magnetometria e georadar da região de Gouveia, MG*. Trabalho de Graduação IGC/UFMG, 125 p.

Pflug, R. (1968). *Observações sobre a estratigrafia da Série Minas na região de Diamantina, Minas Gerais*. DNPM/DGM, Not. Prel. Est. 142: 1-20, Rio de Janeiro.

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.

Rolim, V. K. (1992). Uma interpretação das estruturas tectônicas do Supergrupo Espinhaço baseada na geometria dos falhamentos de empurrão. *Rev. Esc. Minas*, v. 45, n. 1 e 2, p. 75-77.

Schöll, W. U.; Fogaça, A. C. C. (1979). Estratigrafia da Serra do Espinhaço na região de Diamantina. In: I Simp. Geol. Minas Gerais, Diamantina. *Anais*, p. 55-73.

Schöll, W. U.; Fogaça, A. C. C. (1981). *Geologia das quadrículas Guinda e Gouveia*. DNPM/CPRM/CGE, Rel. Int., 63 pp., Diamantina.

Tolooiyan, A.; Dyson, A. P.; Karami, M.; Shaghaghi, T., Ghadrhan, M. (2019). Application of ground penetrating radar (GPR) to detect joints in organic soft rock. *Geotechnical Testing Journal*, Vol. 42, No. 2, p. 257 – 274.

Zajc, M.; Celarc, B.; Gosar, A. (2015). Structural–geological and karst feature investigations of the limestone–flysch thrust-fault contact using low-frequency ground penetrating radar (Adria–Dinarides thrust zone, SW Slovenia). *Environ Earth Sci.*, 73: 8237–8249.

Porcentagem de contribuição de cada autor no manuscrito

Juni Silveira Cordeiro – 30%

Paulo Roberto Antunes Aranha – 30%

Ricardo Diniz da Costa – 20%

Luiz Guilherme Knauer – 10%

Joana Tiago Reis Magalhães – 10%