Geofísica aplicada a prospecção de Lítio no Brasil: Estudo de caso com a utilização da gamaespectrometria terrestre para identificação do pegmatito Murion, na Subprovíncia Pegmatítica de Solonópole, Ceará.

Frederico Ricardo Ferreira Rodrigues de Oliveira e Sousa, Serviço Geológico do Brasil – SGB/CPRM.

Copyright 2024, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Este texto foi preparado para a apresentação no IX Simpósio Brasileiro de Geofísica, Salvador, 08 a 10 de outubro de 2024. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do X SimBGf, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.

Resumo

Este trabalho apresenta os resultados obtidos durante um levantamento geofísico terrestre utilizando gamaespectrometria e susceptibilidade magnética. O objetivo foi delimitar com maior precisão uma anomalia geofísica detectada por dados aerogeofísicos, associada ao pegmatito Murion. Neste pegmatito está localizado um antigo garimpo de turmalinas desativado, situado na Subprovíncia Pegmatítica de Solonópole, no Ceará, uma região conhecida por suas diversas ocorrências de pegmatitos LCT enriquecidos em Li, Cs, Be, Ta, Nb e Sn.

Introdução

Pegmatitos LCT são rochas que ocorrem como diques, bolsões ou lentes, geralmente próximas a granitos peraluminosos (tipo S). Podem ser gerados pela cristalização contínua do magma granítico, com crescente concentração de elementos incompatíveis e voláteis (lítio, césio, tântalo, rubídio, berílio, estanho, bário, fósforo, urânio e flúor) à medida em que esse magma se distancia da fonte granítica (ČERNÝ,1982 a, b). Outra hipótese petrogenética sugere que pegmatitos LCT podem ser gerados a partir da fusão parcial de rochas metassedimentares presentes na região, que contenham elementos incompatíveis e voláteis em sua composição mineral (SIMMONS; WEBBER, 2008).

No município de Solonópole-CE ambas as hipóteses são plausíveis, dado ao contexto geológico local (Figura1). Foram catalogadas diversas ocorrências de pegmatitos LCT que apresentam correlação espacial com o corpo Banabuiú, um granito peraluminoso Neoproterozoico a duas micas e com granada, e muitos desses pegmatitos se encontram encaixados na foliação e fraturas de rochas metassedimentares tais como xistos, gnaisses migmatizados, metatexitos e diatexitos do Complexo Acopiara (Paleoproterozoico) (PINÉO *et al*., 2020).

Dados aerogeofísicos preliminares do Projeto de Avaliação do Potencial de Lítio em Solonópole-CE, conduzido pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB), indicaram anomalias geofísicas nos mapas gamaespectrométricos de Potássio, RGB, Parâmetro F e Urânio bem caracterizadas, correlacionáveis às rochas pegmatíticas presentes na porção sul do granito Banabuiú. Algumas dessas anomalias geofísicas foram confirmadas como pegmatitos durante etapas de campo.

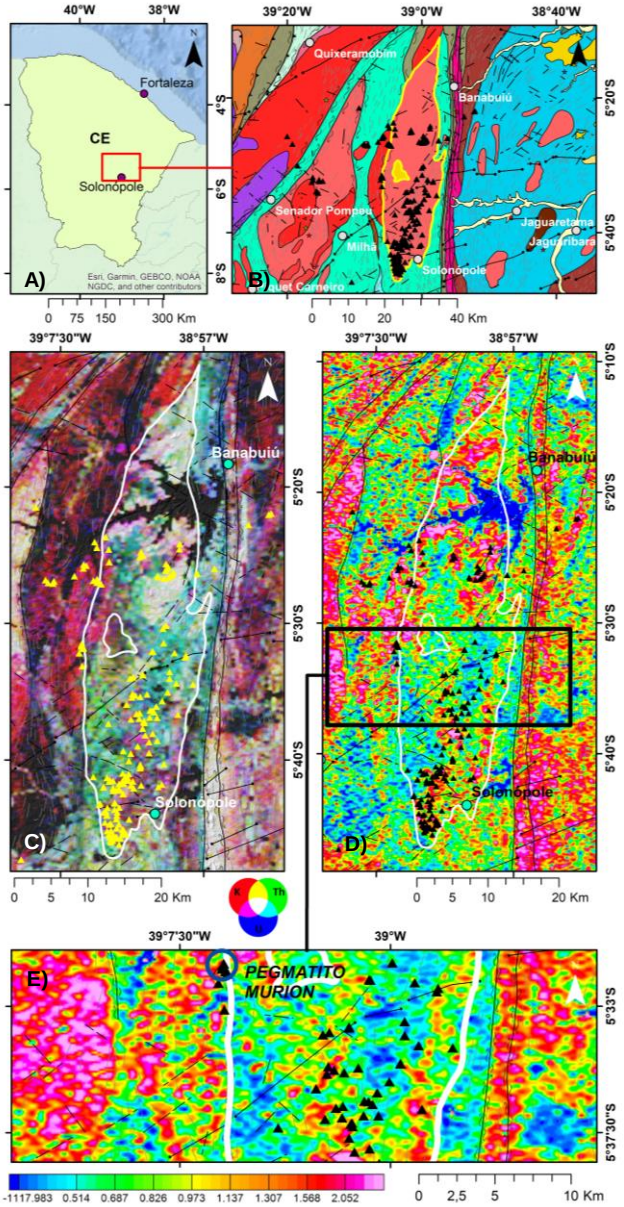


Figura 1 - A) Localização da Subprovíncia Pegmatítica de Solonópole, no estado do Ceará, Brasil; B) Mapa geológico (PINÉO et al., 2020) mostra a relação espacial entre os pegmatitos e o corpo cartografado como granito Banabuiú por Palheta (2017); C) Mapa ternário RGB (K, eTh, eU); D, E) Parâmetro F (F= K.eU/eTh) mostrando a forte correlação observada entre as anomalias geofísicas (cor magenta no RGB e altos valores de Parâmetro F) e as principais ocorrências de pegmatitos LCT catalogadas na Subprovíncia Pegmatítica de Solonópole-CE.

Esses resultados indicaram que a realização de um levantamento gamaespectrométrico terrestre poderia fornecer um melhor contraste entre as concentrações de K, Th e U nas regiões dessas anomalias geofísicas. Isso seria útil para melhorar a resolução espacial das anomalias geofísicas, auxiliar na delimitação dos contatos litológicos entre pegmatitos e a rocha encaixante, além de possibilitar a descoberta de novos alvos exploratórios não perceptíveis na escala do aerolevantamento geofísico. Foi selecionada como área de estudos o pegmatito Murion, um afloramento com aproximadamente 300m de extensão, onde funcionava um antigo garimpo de turmalinas com diversas cavas e que hoje se encontra desativado.

Metodologia/ Problema Investigado

Para a realização deste trabalho foram utilizados:

i) susceptibilímetro magnético e condutivímetro portátil modelo KT v2 10 S/C, (*range* de 1 -100.000 S/m e 0.001 – 1999,99 x 10^{-3} SI) com 5 leituras por ponto (Figura 2.A);

ii) Gamaespectrômetro portátil modelo RS-125 Super-SPEC (cristal de NaI(Tl) de 2"x 2" (5 x 5 cm - 103 cm^3), 1024 canais e *range* de energia de 30 keV – 3000 keV) com tempo de leitura de 2 minutos por ponto (Figura 2.B).

Figura 2 - Equipamentos empregados durante a etapa de campo no pegmatito Murion: (A) Susceptibilimetro magnético e condutivímetro portátil, modelo KT 10 S/C – Foto: Terra Plus; (B) Gamaespectrômetro portátil RS-125 Super-SPEC – Foto: Radiation Solutions; (C, D, E, F, G, H) Equipamentos geofísicos sendo utilizados pela equipe de campo durante o trabalho na área alvo.

Inicialmente foi definido um levantamento em perfil aprox. NW-SE, seccionando a cava principal do pegmatito Murion, com espaçamento entre 3 e 10 metros. Em seguida foi realizado um levantamento em malha com espaçamento variando entre 15 e 50 metros entre os pontos de leitura, dadas as condições de acesso e relevo da área de estudos. Foram definidos um tempo de 2 minutos para as leituras de gamaespectrometria, e a média aritmética de 5 leituras por ponto para o KT 10 S/C como parâmetros de campo (Figuras 2 C, D, E, F, G, H).
A Figura 3 mostra um mapa com a distribuição dos pontos de campo sobre a área de estudos deste trabalho.

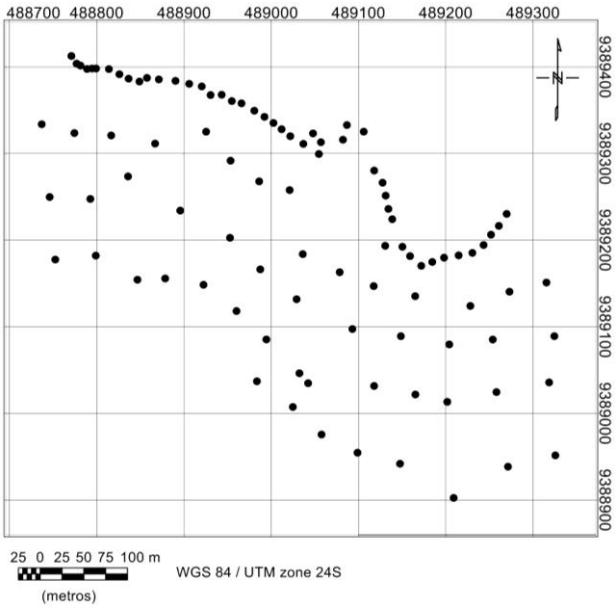


Figura 3 - Detalhe da área de estudos (650m x 650m) com a localização dos pontos de leitura (perfil com espaçamento variando entre 3 e 10 metros; malha com espaçamento variando entre 15 e 50 metros).

Resultados

Os dados do perfil traçado na porção mais à norte da área de estudos, o qual secciona a cava principal do pegmatito, indicam um contraste marcante entre as concentrações de tório (maiores nas regiões onde ocorrem afloramentos da rocha encaixante e cobertura coluvional) e potássio (maiores onde aflora o pegmatito, em especial na região onde é possível observar maior concentração de K-feldspato com textura gráfica). Foi detectado um pico de urânio em porções da cava principal, e está associado a uma região onde é possível observar no afloramento o processo de substituição de K-Feldspato por Albita, o que geralmente ocorre na zona intermediária dos pegmatitos zonados, associados a processos de cristalização de fluidos em fases tardias, mais enriquecidos em elementos incompatíveis e voláteis como se esperava para o elemento urânio (Figura 4.A).
Foram gerados mapas de concentrações de K, Th, U, Parâmetro F, razões U/Th e KT/Th, de susceptibilidade magnética e de condutividade elétrica, para o arranjo em malha feito ao longo do pegmatito Murion (Figura 4.B).

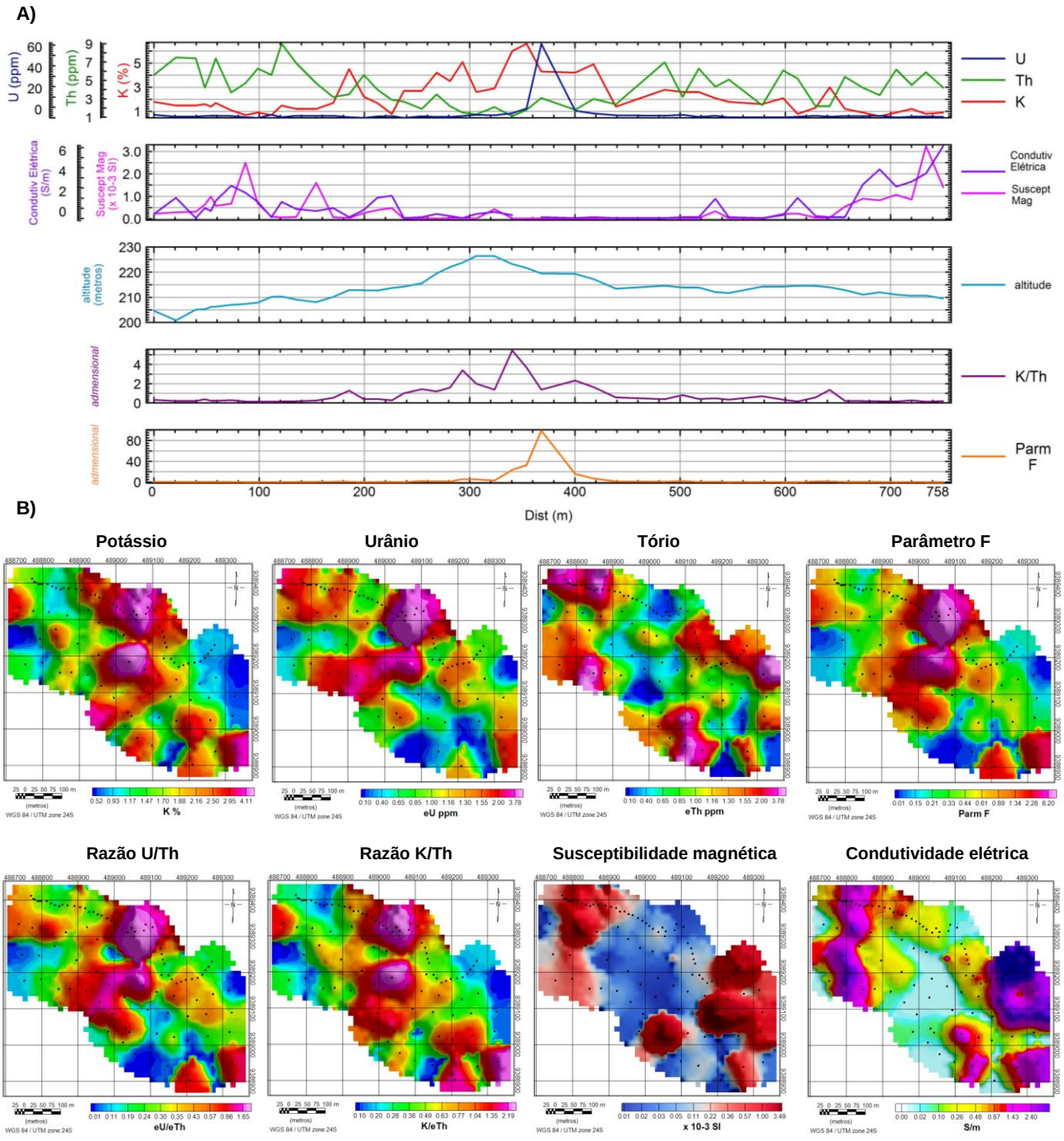


Figura 4 – Resultados obtidos com o levantamento geofísico na área de estudos: A) Perfil na porção norte da área, enfatizando o contraste entre a rocha encaixante + cobertura (assinatura geofísica de alto Th, baixos K e U, alta condutividade e susceptibilidade magnética) e o pegmatito Murion, que se destaca nos canais de K, Razão K/eTh e Parâmetro F. O pico de Urânio nesse perfil foi detectado na cava principal, e está associado a uma região onde é possível observar no afloramento o processo de substituição de K-Feldspato por Albita, na zona intermediária do pegmatito; Os mapas geofísicos de Potássio, Urânio, Parâmetro F, Razão eU/eTh e K/eTh apresentam correlação positiva para os corpos pegmatíticos presentes na área de estudos, enquanto os mapas de Tório, susceptibilidade magnética e condutividade elétrica destacam o entorno do pegmatito, sendo essa resposta associada a rocha encaixante (biotita paragnaisse) + cobertura/colúvio.

A Figura 5 mostra um comparativo entre a mesma anomalia geofísica de Parâmetro F associada ao pegmatito Murion, observada a partir de dados aerogeofísicos (Figura 5.A - 125 m de resolução espacial) e a partir de dados deste levantamento terrestre (Figura 5.B - 14 m de resolução espacial).

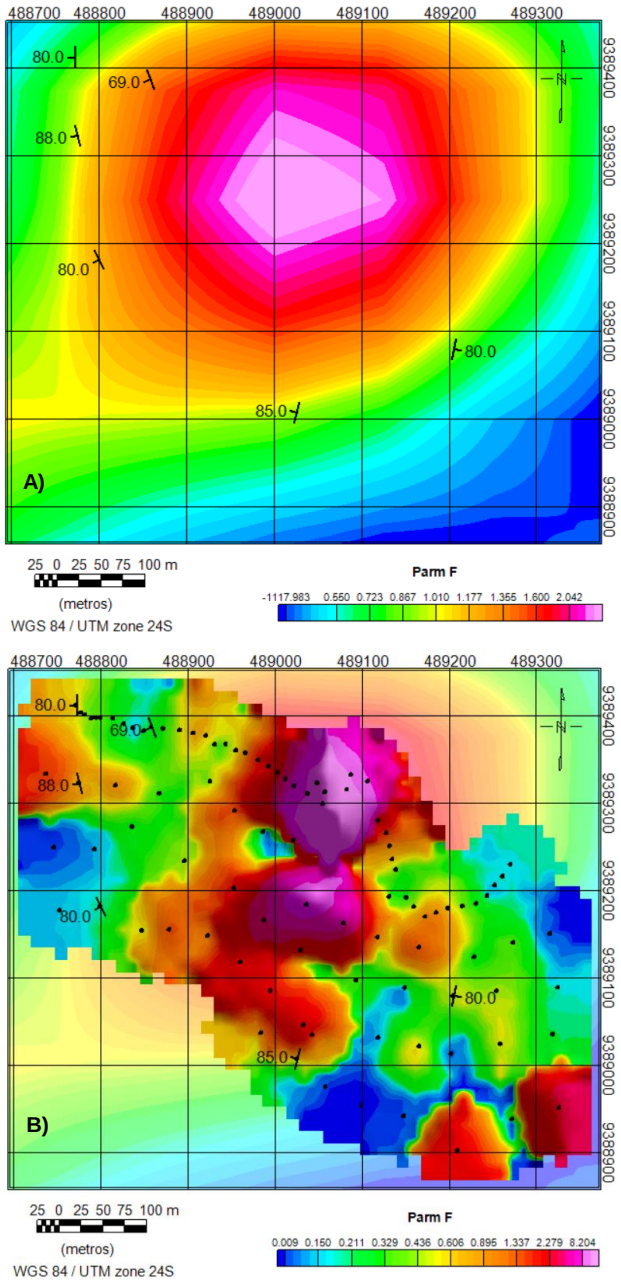


Figura 5 - Comparativo entre a mesma anomalia geofísica de Parâmetro F associada ao pegmatito Murion, observada em A) Mapa aerogeofísico – 125m de resolução espacial; e B) Mapa de 14 m de resolução espacial obtido com o levantamento geofísico terrestre deste trabalho. Em destaque pontos de campo (COR_DO_PONTO) e dados de foliação da encaixante coletados durante o levantamento geofísico, concordante com o trend regional N/S, em alto ângulo de mergulho.

Medidas estruturais dos planos de foliação em afloramentos da rocha encaixante indicam alinhamento aproximadamente N-S em alto ângulo de mergulho, concordante com o *trend* regional.

A Figura 6 traz uma visão em relevo do mapa do Parâmetro F, a fim de se avaliar como mudanças na topografia poderiam afetar na mobilidade e concentração dos radionuclídeos, e também fotografias ilustrando alguns dos principais afloramentos visitados durante o levantamento geofísico. É possível observar uma correlação positiva entre as regiões em vermelho e a ocorrência das principais cavas de garimpo do pegmatito Murion. Também foram localizados pequenos corpos pegmatíticos lenticulares concordantes com a foliação da rocha encaixante, um biotita gnaisse paraderivado com foliação bem desenvolvida e em alto ângulo de mergulho. Esses corpos representam as pequenas anomalias positivas localizadas nos vértices da área de estudo.

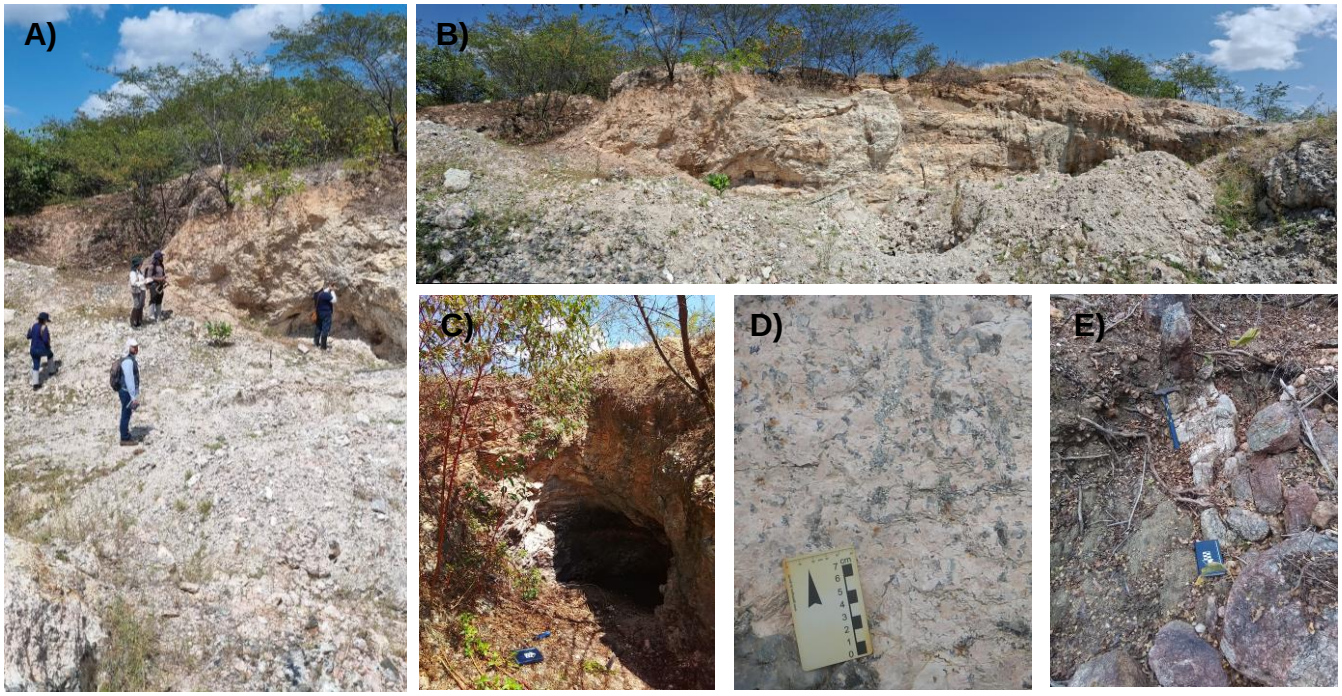
Discussão e Conclusões

Tanto o pegmatito Murion quanto os demais corpos pegmatíticos lenticulares que afloravam na área de estudos estavam dispostos concordantes à foliação de alto ângulo de mergulho desenvolvida no biotita gnaisse migmatizado (rocha encaixante), e alinhados ao *trend* regional aprox. N-S (Figura 7). A relação espacial entre anomalias gamaespectrométricas (*e.g.* Parâmetro F) e a ocorrência de corpos pegmatíticos concordantes aos planos de foliação das rochas encaixantes, revelou-se um importante guia prospectivo para trabalhos futuros de identificação de pegmatitos na região de Solonópole-CE.

A definição da assinatura geofísica do pegmatito Murion foi realizada levando-se em conta a totalidade dos mapas gerados. O levantamento geofísico terrestre foi capaz de fornecer dados correlacionáveis com a geologia local, uma vez que foi possível observar um claro contraste entre as assinaturas geofísicas do pegmatito Murion e das rochas metassedimentares do Complexo Acopiara. Os resultados obtidos tanto em perfil quanto em malha indicam que alguns dos mapas gerados ressaltam mais os pegmatitos (Potássio, Urânio, Parâmetro F, Razões eU/Th e K/eTh) enquanto outros ressaltam a rocha encaixante e coberturas (Tório, Susceptibilidade magnética e Condutividade elétrica).

Os valores de alto potássio do pegmatito Murion provavelmente se devem à extensa exposição no afloramento de uma zona onde predominam quartzo e feldspato alcalino intercrescidos, os quais se cristalizaram simultaneamente formando uma textura gráfica. Esse maior conteúdo de sílica nos pegmatitos também explica os seus baixos valores de condutividade elétrica.

O mapa de concentração de urânio apresentou boa resposta na região onde as cavas estavam mais expostas com um pico localizado na cava principal do pegmatito. Contudo, os dados apresentaram valores intermediários para a concentração de urânio tanto em algumas porções do pegmatito como também em algumas porções da parte oeste da área de estudos, onde se observou a presença de cobertura sedimentar (colúvio + rejeito).



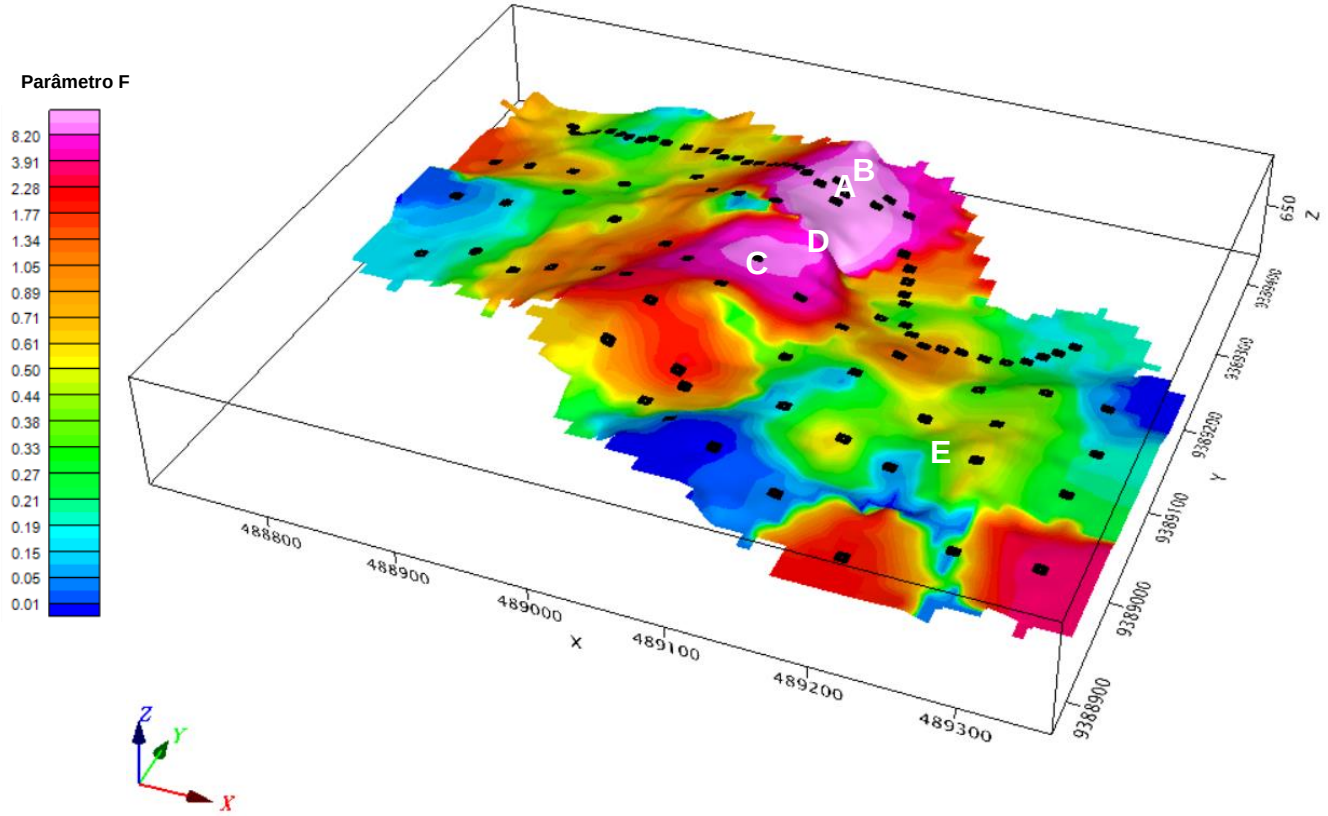


Figura 6 – Mapa do Parâmetro F em relevo, obtido a partir dos dados de gamaespectrometria coletados neste trabalho (pontos pretos), enfatizando forte correlação entre as regiões em vermelho, a ocorrência de afloramentos e as principais cavas de garimpo do pegmatito Murion. Em destaque: A, B) detalhes da cava principal; C) existência de diversas pequenas cavas como esta, espalhadas ao longo do pegmatito; D) detalhe de um megacristal de feldspato alcalino apresentando intercrescimento de quartzo em textura gráfica; E) aspecto da rocha encaixante, um biotita gnaisse paraderivado com foliação bem desenvolvida e em alto ângulo de mergulho.

No que diz respeito às assinaturas geofísicas relacionadas à rocha encaixante, percebe-se uma maior correlação espacial entre os mapas de concentração de tório, de susceptibilidade magnética e de condutividade elétrica. As regiões de mais altos valores nesses mapas representavam respostas tanto de afloramentos da rocha encaixante, quanto da cobertura sedimentar (colúvio) presente na área de estudos.

Portanto, em termos de assinatura gamaespectrométrica da rocha, é possível concluir que pegmatitos como o Murion tendem a ter baixo Th e altos K e U. Esse resultado indica que os melhores mapas para representar esse tipo de rocha são o Parâmetro F (onde F= K.eU/eTh) e as razões K/eTh e eU/eTh, justamente por considerarem essa relação de proporcionalidade em relação ao elemento tório.

Os baixos valores de condutividade elétrica e susceptibilidade magnética eram resultados já esperados, uma vez que essa rocha é composta majoritariamente por quartzo, muscovita, turmalina, plagioclásio e feldspato alcalino, e esse alto conteúdo de sílica tende a responder como uma zona de alta resistividade elétrica. Além disso, minerais como quartzo, feldspato e plagioclásio, abundantes no pegmatito Murion, são conhecidamente diamagnéticos, o que se traduziu em campo como uma baixa susceptibilidade magnética ao longo do corpo. Esse resultado sugere que métodos geofísicos elétricos e magnéticos só seriam capazes de detectar um pegmatito indiretamente, a depender da existência de contraste em relação as propriedades físicas da rocha encaixante.

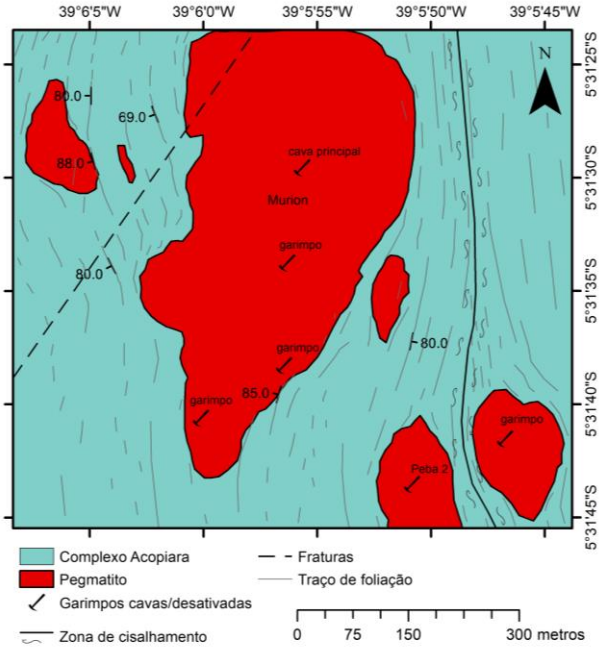


Figura 7 - Mapa geológico do pegmatito Murion, elaborado com base no conjunto de imagens geofísicas e observações de campo. Esses pegmatitos correspondem a regiões de anomalias geofísicas, formando bolsões e lentes encaixadas na foliação de alto ângulo, no contexto de uma zona de cisalhamento regional N-S.

É necessário, contudo, ponderar sobre o limite de alcance da metodologia apresentada neste estudo, uma vez que são equipamentos de baixa penetração, ou seja, é preciso que o corpo pegmatítico esteja aflorando para se obter resultados similares aos apresentados neste trabalho. Para a finalidade de reconhecimento/*follow-up* de anomalias geofísicas e refinamento da cartografia geológica em áreas alvo, esta metodologia de uso conjunto de levantamentos gamaespectrométricos, de susceptibilidade magnética e condutividade elétrica produz resultados satisfatórios a um baixo custo de execução, além de possibilitar a descoberta de novos alvos exploratórios não perceptíveis na escala dos aerolevantamentos geofísicos atualmente disponíveis.

Agradecimentos

Agradecimentos especiais aos colegas pesquisadores Izaac Cabral, José Maria Aladim Rocha, Deoclécio Pereira Vale Filho, Monica Mazzini Perrota, Ioná de Abreu Cunha e Rogério Celestino de Almeida, ao técnico em geociências Almir Gomes Freire, aos estagiários Monique Ellen Matos Santos, Roberth Lincon Matos Silva dos Santos, do Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM), ao geólogo Ramon Arouca (UFBA), ao técnico/guia local “Seu Carrinho” e ao geólogo Alexandre, da mineradora AMG Brasil, pelo apoio indispensável durante a aquisição dos dados apresentados neste trabalho. Também agradecemos à AMG Brasil por facilitar o acesso à área de estudos e ao Serviço Geológico do Brasil pela infraestrutura técnica e apoio institucional fundamentais para realizar este estudo.

Referências

ČERNÝ, P., 1982a. Petrogenesis of Granitic Pegmatites. In: Granitic pegmatites in science and industry. Winnipeg, Mac. Short Course, Handbook, 8: 405–461.

ČERNÝ, P., 1982b. Anatomy and classification of granitic pegmatites. In: Granitic pegmatites in science and industry. Winnipeg, Mac. Short Course, Handbook, 8, 1–39.

SIMMONS W., WEBBER K. 2008. Pegmatite genesis: state of the art. European Journal of Mineralogy, 20, 421-438.

PINÉO, T. R. G.; PALHETA, E. S. M.; COSTA, F. G.; VASCONCELOS, A. M.; GOMES, I. P.; GOMES, F. E. M.; BESSA, M. D. M. R.; LIMA, A. F.; HOLANDA, J. L. R.; FREIRE, D. P. Projeto geologia e recursos minerais do Estado do Ceará: mapa geológico do estado do Ceará. Fortaleza: CPRM, 2020. 1 mapa, color. Escala 1:500.000.

PALHETA, E. S. M. Mapa geológico folha SB.24-V-D-VI-Senador Pompeu. Fortaleza: CPRM, 2017. 1 mapa, color. Escala 1:100.000. (Programa Geologia do Brasil – PGB).