

USO DE LÓGICA *FUZZY* PARA CRIAÇÃO DE MAPA PROSPECTIVO DE FAVORABILIDADE DE SKARNS MINERALIZADOS: APLICAÇÃO À REGIÃO DA MINA BONFIM (W-Mo e Au-Bi-Te), FAIXA SERIDÓ, NE BRASIL

USE OF FUZZY LOGIC TO THE CREATION OF PROSPECTIVE MAP OF THE FAVORABILITY OF MINERALIZED SKARNS: APPLICATION TO THE BONFIM MINE'S REGION (W-Mo and Au-Bi-Te), SERIDÓ BELT, NE BRAZIL

Hugo Marcelo Cordeiro Guimarães Filho ^{1*}, João Adauto Souza Neto ^{1,2}, Vanessa Biondo Ribeiro ³

¹ Programa de Pós-Graduação em Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE – Brasil. *autor correspondente, e-mail: hugoguimaraesfilho@gmail.com.

² Departamento de Geologia, Universidade Federal de Pernambuco, Recife – PE – Brasil.

³ Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation (CSIRO), Perth – WA – Australia.

<https://doi.org/10.51359/1980-8208.2023.260418>

RESUMO

A Faixa Seridó está inserida na Província Borborema, nordeste do Brasil, e possui a ocorrência de mais de 700 skarns, sendo considerada uma Província de Skarns Polimetálicos, e tendo como principais mineralizações em W-Mo e Au-Bi-Te. A Mina Bonfim possui mineralização em W-Mo e Au-Bi-Te, que se encontra hospedada em skarns, formados nos contatos dos mármores (Formação Jucurutu) com os xistos (Formação Seridó) ou nas camadas e lentes desses mármores. A mineração é uma atividade econômica que envolve alto custo e um alto risco financeiro, sendo por isso necessária a aplicação de metodologias que otimizem tempo e recursos na descoberta de novos alvos exploratórios. O objetivo deste trabalho é aplicar a Lógica *Fuzzy*, uma metodologia de análise de dados supervisionada e multivariada. Ela baseia-se em informações indiretas (aerolevantadas através de sensores remotos), e informações geológicas diretas (obtidas em campo durante o mapeamento), para buscar indicação de potenciais alvos para o direcionamento da exploração, criando assim um mapa prospectivo de favorabilidade de skarns mineralizados. Foram utilizados dados aeromagnetométricos de amplitude do sinal analítico e *total horizontal derivative*, e aerogamaespectrométricos de razões U/K e Th/K, e de Fator F, assim como mapas geológicos, todos estes disponibilizados pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB), em conjunto com dados litológicos e estruturais obtidos em campo. Estes dados indiretos foram normalizados e depois cruzados, obtendo-se um mapa de favorabilidade para ocorrências de skarns mineralizados. Para validação dos resultados deste mapa de favorabilidade foram utilizados 77 pontos de skarns classificados em depósitos, ocorrências e indícios minerais obtidos no banco de dados do Serviço Geológico do Brasil. Desses skarns, 78% se localizam em regiões indicadas como de altas a médias probabilidades, e 22% em regiões de baixa probabilidade. Analisando-se especificamente

Recebido em 09/12/2023. Aprovado em 26/12/2023. Publicado on-line em 31/01/2024



Este artigo está sob uma [Licença Creative Commons 4.0 Internacional - CC BY](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

os depósitos de skarns da região estudada, o índice dos pontos que se localizam em regiões de altas e médias probabilidades sobe para 84%. O mapa de favorabilidade final produzido indica regiões ainda sem registro de skarns mineralizados em W-Mo e Au-Bi-Te mapeados, podendo fornecer subsídios para um direcionamento da pesquisa de novas jazidas.

Palavras-chave: faixa seridó; mapa de favorabilidade; lógica *fuzzy*; prospecção mineral; aerogeofísica.

ABSTRACT

The Seridó Belt is inserted at Borborema Province, northeastern Brazil, and have the occurrence of more than 700 skarns, being considered a Polymetallic Skarn Province, and have mineralization of W-Mo and Au-Bi-Te. The polymetallic skarn of Bonfim Mine have mineralization in W-Mo and Au-Bi-Te, which is hosted in skarns, formed in the contacts of marbles (Jucurutu Formation) with schists (Seridó Formation) or in the layers and lenses of these marbles. Mining is an economic activity that involves high cost and high financial risk, which is why it is necessary to apply methodologies that optimize time and resources in discovering new exploration targets. The objective of this work is to apply Fuzzy Logic, a supervised and multivalued data analysis methodology. It is based on indirect information (aerial surveyed through remote sensors), and direct information geological information (obtained in the field during mapping), to seek indication of potential targets for the direction of exploration, thus creating a prospective map of the favorability of mineralized skarns. Aeromagnetometric data of analytical signal amplitude and total horizontal derivative were used, as well as aerogammaspectrometric data of U/K and Th/K ratios, and F Factor, and geological maps, all made available by the Geological Survey of Brazil (SGB), together with lithological and structural data obtained in the field. These indirect data were normalized and then crossed, obtaining a favorability map for the occurrences of mineralized skarns. To validate the results of this favorability map, 77 skarns points classified into deposits, occurrences and mineral signs obtained from the Brazilian Geological Survey database were used. Of these skarns, 72% are in regions indicated as having high to medium probabilities, and 22% in regions having low probability. Specifically analyzing the skarns deposits in the studied region, the rate of point located in regions of high and medium probabilities rises to 84%. The final favorability map produced indicates region with no record of W-Mo and Au-Bi-Te mineralized skarns yet mapped, which can provide support for directing the search for new deposits.

Keywords: seridó belt; favorability map; fuzzy logic; mineral prospecting; aerial geophysics.

1. INTRODUÇÃO

A Faixa Seridó é formada por um cinturão de rochas supracrustais neoproterozoicas, com direção geral NNE-SSW, cuja deformação e metamorfismo provém do fim do neoproterozoico (Angelim et al., 2006). A Faixa Seridó abriga uma Província Pegmatítica e uma Província de Skarns

Polimetálicos, e as rochas mineralizadas de ambas as províncias fornecem, desde minerais industriais como feldspatos e quartzo, até minerais metálicos contendo tungstênio, molibdênio, ouro, nióbio, tântalo, dentre outros, além de pedras preciosas como a turmalina azul Paraíba, água marinha e esmeralda. Destaca-se que foram recentemente publicados trabalhos, como Fernandes et al. (2022),

que avaliaram o potencial para exploração de lítio na Faixa Seridó, e mostrando que a região ainda carece de estudos, tanto científicos quanto do ponto da prospecção mineral. Neste aspecto, no presente momento essa região é alvo de uma intensa campanha de exploração e prospecção de lítio por várias empresas, nacionais e internacionais (e.g. australianas).

Sabe-se que a mineração é uma atividade econômica de elevados custo e risco, e que para mitigá-los estes elevados custos, há uma demanda por novas técnicas que possam abranger vastas áreas em busca de alvos exploratórios, otimizando tempo e recursos na etapa de exploração mineral. Para esta finalidade, tradicionalmente já são utilizados dados aerogeofísicos e de sensoriamento remoto, visando varreduras de grandes áreas para uma análise ampla e, posteriormente, focando em alvos de maior potencial para detalhamento por outras metodologias exploratórias.

Aliada a estas metodologias, estão sendo estudadas novas formas de se padronizar a análise de uma grande quantidade de informação, e com esta finalidade, a área de análise de dados e de *machine learning* estão sendo amplamente aplicadas.

Autores como Chung (2003) utilizam metodologias ditas supervisionadas, pois necessitam de um conhecimento prévio do alvo do estudo. Dados como mapas geológicos, modelos genéticos do depósito minerais, associações entre corpos mineralizados e estruturas geológicas, são o tipo de conhecimento prévio que se faz necessário antes de se aplicar este tipo de metodologia. Já metodologias não supervisionadas prescindem de interferência humana, sendo necessário apenas que se forneçam dados robustos para que o algoritmo identifique padrões para o alvo do estudado. Um exemplo da metodologia não supervisionada vem do estudo de Holden et al. (2008), que

processou dados aerogeofísicos buscando regiões com descontinuidades magnéticas para descoberta de novas regiões com mineralização de ouro, na região do Cráton Yilgarn, oeste da Austrália.

Contudo, é importante ter ciência que ambas as metodologias (supervisionada e não supervisionada) possuem pontos fortes e fracos. A análise de dados supervisionada pode adquirir um viés equivocado quando a interpretação das informações por parte do pesquisador o leva a utilizar dados ou parâmetros que não se adequam com as características reais da jazida mineral. Metodologias não supervisionadas, por sua vez, podem obter resultados que não estão de acordo com a realidade, pois são sensíveis à seleção e à disponibilidade do ponto de treinamento, a precisão da modelagem pode ser influenciada aleatoriamente se o conjunto de treinamento não for representativo da mineralização do alvo (Nykänen et al., 2007)

Este trabalho tem como objetivo o uso de Lógica *Fuzzy* para o cruzamento de dados litológicos-estruturais e aerogeofísicos, visando-se criar um mapa de favorabilidade de ocorrência de skarns mineralizados na região do entorno da Mina Bonfim, localizada a cerca de 28 km a sudeste da sede do município de Lajes, no Estado do Rio Grande do Norte.

2. GEOLOGIA REGIONAL

A Faixa Seridó, é formada por uma sequência de rochas supracrustais neoproterozoicas com origem metassedimentares e vulcânicas básicas, estas sobrepostas a um embasamento arqueano a paleoproterozoico gnáissico-migmatítico (Bezerra et al., 2007) (Figura 1). É limitada a norte pelas coberturas meso-cenozoicas da Bacia Potiguar, a oeste pelo Maciço Rio Piranhas, a leste pelo Maciço Caldas Brandão e a sul pela Zona de Cisalhamento Patos (Silva et al., 2010).

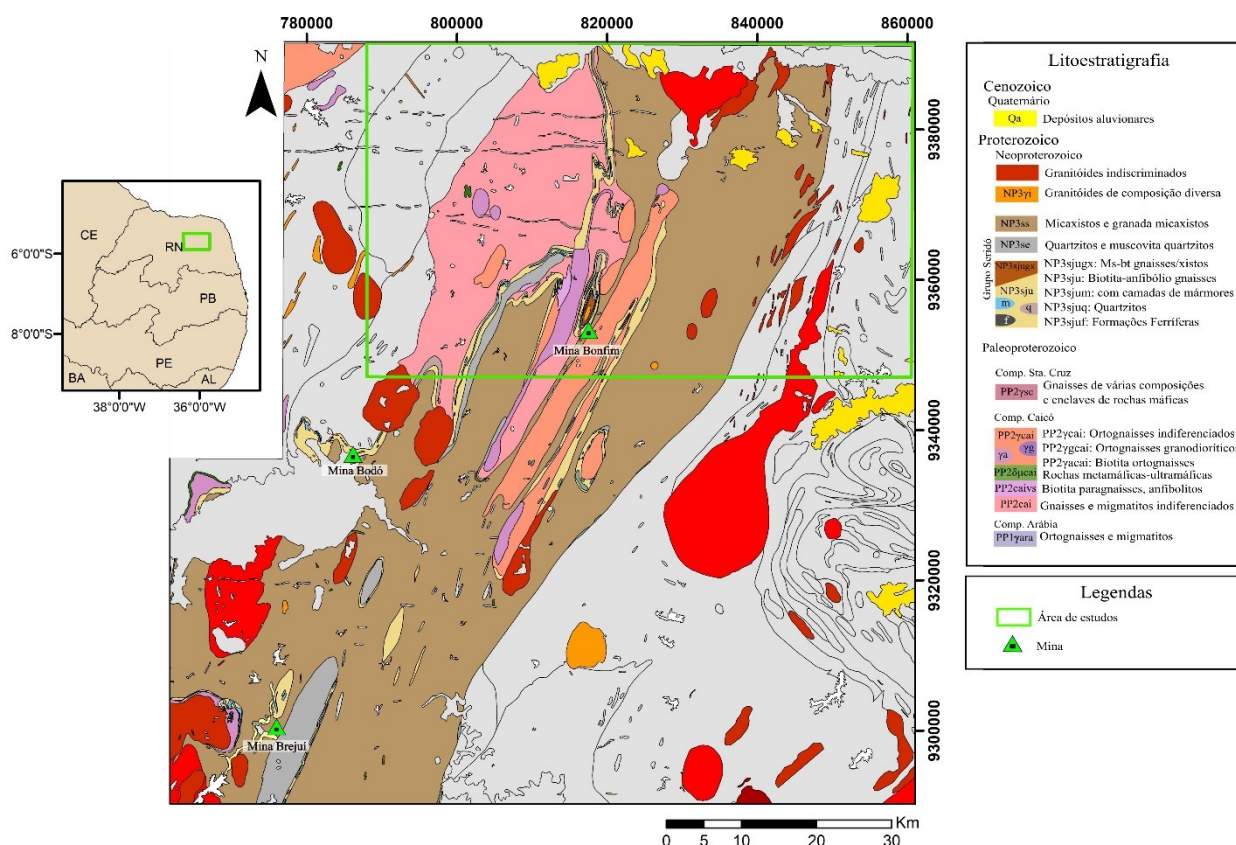


Figura 1. Mapa geológico simplificado da porção leste da Faixa Seridó, com localização das três principais minas de skarns com W-Mo. O retângulo verde corresponde à área da Figura 2. Fonte: Adaptado de Cunha et al., 2021.

Acima do embasamento, ocorrem as rochas supracrustais do denominado Grupo Seridó, subdividido nas seguintes formações, da base para o topo: a Formação Jucurutu é constituída por clorita $\pm$ epidoto $\pm$ biotita $\pm$ hornblenda paragneisses, camadas de rochas calcissilicáticas e lentes de mármore (Ribeiro et al., 2023). Na sequência ocorre a Formação Equador, composta por muscovita quartzitos, feldspáticos puros, muitas vezes com turmalina (Bezerra et al., 2007). Em seguida, a Formação Seridó, constituída por biotita xistos com granada, cordierita, silimanita, andalusita, estauroilita e raras lentes de mármore (Ribeiro et al., 2023).

Os skarns polimetálicos da Mina Bonfim ocorrem em corpos lenticulares a tabulares, em escalas centimétricas a métricas, dentro das camadas de mármore com contatos irregulares, invadindo e truncando a foliação de suas

rochas encaixantes (Santos et al., 2014). São skarns estrato-controlados, que ocorrem dentro de camadas de mármore da Formação Jucurutu, ou o contato destes mármore com os xistos da Formação Seridó (Souza Neto et al., 2008).

Ainda há discussão sobre a origem dos fluidos metassomáticos formadores dos skarns e de suas mineralizações da Faixa Seridó, sendo até o momento admitido como associado a intrusões graníticas brasileiras que ocorreram entre 610-526 Ma, cuja migração provavelmente foi facilitada pela presença de zonas de cisalhamento de escala quilométricas (Souza Neto et al., 2008). Datações Re-Os em molibdenita associada à scheelita dos skarns mineralizados, revelam que as três principais mineralizações de W-Mo em skarns da Faixa Seridó ocorreram em cerca de 554 ± 2 Ma (Mina Brejuí), $524 \pm$

2 Ma (Mina Bonfim) e 510 ± 2 Ma (Mina Bodó) (Hollanda et al., 2017). Todos estes momentos sendo claramente posteriores ao pico metamórfico regional datado em cerca de 575 Ma (Hollanda et al., 2017)

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O presente trabalho foi baseado em dados obtidos em etapa de campo realizado no entorno da Mina Bonfim, assim como trabalhos publicados e dados de mapeamentos geológicos e aerogeofísicos disponibilizados no banco de dados do Serviço Geológico do Brasil (SGB). Todo esse acervo de dados serviu tanto para a criação de um modelo prospectivo, quanto na aplicação destes dados à metodologia da Lógica *Fuzzy*, que culminou na criação do Mapa de Favorabilidade.

3.1. Levantamentos de Dados

Foram primeiramente levantados dados referentes à Faixa Seridó e seu contexto geológico, assim como de sua Província de Skarns Polimetálicos (i.e. Santos et al., 2014), com objetivo de se conhecer as características geológicas regionais, e assim criar um modelo prospectivo que correspondesse ao estado da arte dos skarns mineralizados da Faixa Seridó.

Foram também obtidos os dados litológicos e estruturais a partir dos mapas geológicos das folhas João Câmara (Dantas & Roig, 2013) e Lajes (Costa & Dantas, 2014), ambos na escala 1:100.000, além do mapa geológico da região Seridó Leste (Cunha et al., 2021), na escala de 1:350.000. Foram ainda obtidos dados aerogeofísicos do Projeto Paraíba-Rio Grande do Norte, cuja realização se deu no ano de 2009, obtidos

e disponibilizados pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB). Para estes últimos dados, ressalta-se que as linhas de voo são N-S, com espaçamento de 500 m, e com linhas de controle na direção E-W com espaçamento de 10 km entre elas, tudo obtido em uma altura de voo de 100 m de altitude.

3.2. Etapa de Campo

Foi realizado um levantamento de campo na área do entorno da Mina Bonfim com o objetivo de se descrever os principais litotipos encontrados e georreferenciar seus pontos de ocorrência em superfície. Ao todo foram descritos e georreferenciados 30 pontos, sendo obtidas descrições petrográficas e estruturais (Figura 2).

3.3. Pós-Processamento dos Dados Aerogeofísicos

Os dados aerogeofísicos foram pós-processados com o apoio do Laboratório de Geofísica Aplicada, do Departamento de Geologia, da Universidade Federal de Pernambuco, utilizando-se o *software* Geosoft Oasis Montaj®.

Dentre os mapas aerogeofísicos gerados, foram utilizados para o estudo os mais relevantes à jazida da Mina Bonfim, sendo: nos dados aeromagnetométricos, o filtro de Amplitude do Sinal Analítico (ASA; Nabighian, 1972 e 1974), o filtro Total Horizontal Derivative (THDR), definido por Cordell & Grauch (1985). Já nos dados aerogamaespectrométricos, Fator F (Gnojek & Prichystal, 1985) e razões Th/K e U/K.

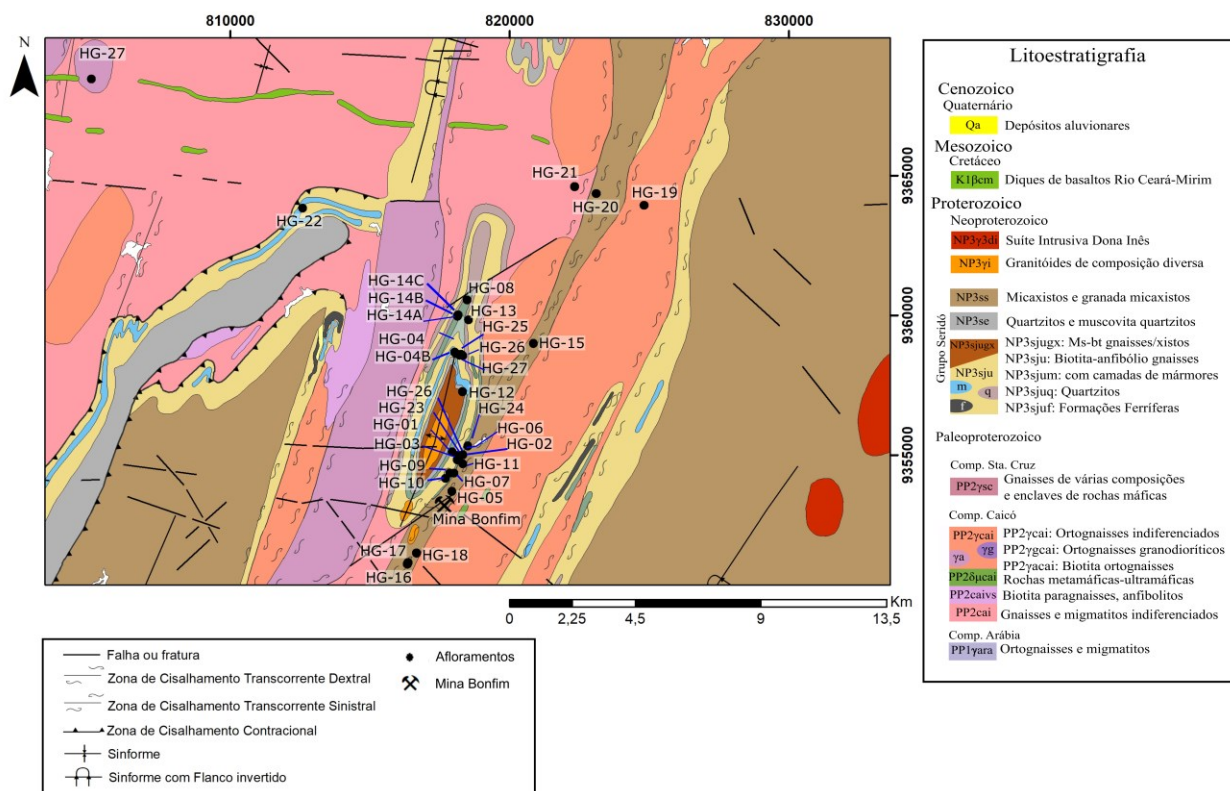


Figura 2. Mapa geológico simplificado do entorno da Mina Bonfim e localização dos pontos mapeados em etapa de campo. Fonte: adaptado de Costa & Dantas, 2014.

Apesar da principal função, tanto do ASA quando do THDR serem a detecção de bordas de anomalias magnéticas, a eficiência desta técnica para a detecção de centros de estruturas lineares, como falhas e diques é defendida por alguns autores como Verduzco et al. (2004). Além disso, estes autores também afirmam que esta técnica, teoricamente não sofre influência da inclinação magnética, como ocorre com outras técnicas utilizadas para mapeamento de centro de corpos magnéticos.

3.4. Lógica Fuzzy

É uma metodologia de análise de dados visual multivalorada, ou seja, que admite mais do que dois valores verdade, sendo estes valores contidos no grupo entre 0 (totalmente falso) e 1 (totalmente verdade), permitindo com isso a existência de verdades parciais (Missio, 2008).

Além disso, a Lógica Fuzzy é classificada como uma metodologia dirigida pelo conhecimento (Abedi et al., 2013), ou supervisionada, pois faz-se necessário o conhecimento prévio de modelos para sua aplicação, e depende completamente da interferência do pesquisador na etapa de valoração dos pesos de cada conjunto de dados.

Para aplicação desta metodologia, primeiramente deve-se normalizar os dados para que todos tenham a mesma escala de peso, atribuindo valores em uma escala entre 0 e 1. Esta normalização pode ser realizada diretamente pelo pesquisador (classificação), quando os dados não são hierarquizáveis, como é o caso de dados litológicos ou lineamentos estruturais; ou a partir do uso de funções de pertinência.

Estas funções de pertinência são arbitradas de acordo com o conhecimento do pesquisador sobre o quanto a distribuição e do padrão dos dados. A função linear (Figura 3A), por exemplo,

admite um ponto de máximo e de mínimo, onde todos os valores são sempre verdadeiros e sempre falsos respectivamente, e entre estes extremos, ocorre uma variação linear. Já as funções

large (Figura 3B) e *small* (Figura 3C) tem como parâmetros o ponto de inflexão da curva e sua inclinação, cuja forma se assemelha a uma função raiz.

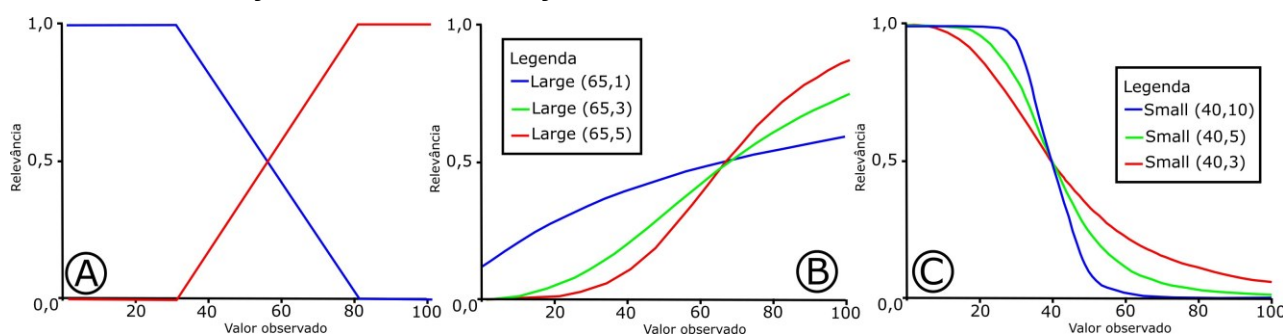


Figura 3. Exemplos de funções de pertinência utilizados na Lógica *Fuzzy*. A) Representa o gráfico da função linear; B) gráfico da função *large*; C) gráfico da função *small*. Fonte: Adaptado de Environmental Systems Research Institute (ESRI, 2014).

Por fim, o cruzamento dos dados é obtido a partir da utilização de operadores *fuzzy*, sendo estes operadores 'E', 'Ou', 'Produto *Fuzzy* (PD)', 'Soma *Fuzzy* (SD)' e 'Gamma'. O Operador 'E' retorna o menor valor em relação aos dados

comparados. O operador 'Ou', por sua vez, fornece o maior valor dos dados comparados. As fórmulas que definem PF, SF e *Gamma* estão contidas na Tabela 1.

Tabela 1. Fórmulas dos operadores *fuzzy*. Fonte: Bonham-Carter, 1994.

Operador	Fórmula
Produto <i>Fuzzy</i> (PF)	PF = produto(arg ₁ , arg ₂ , arg ₃ , ...)
Soma <i>Fuzzy</i> (SF)	SF = 1 - produto(1-arg ₁ , 1-arg ₂ , 1-arg ₃ , ...)
Gamma	Gamma = (SF) ^γ ·(PF) ^{1-γ}

As classificações e normalizações dos dados para a Lógica *Fuzzy* foram aplicadas no *software* ESRI Arcgis 10.8, através da ferramenta *Spatial Data Modeller* (Sawatzky et al., 2010).

4. RESULTADOS

4.1. Aeromagnetometria

Primeiramente obteve-se o mapa magnetométrico residual, objetivando-se

a filtragem da influência de corpos magnéticos mais profundos, assim como a influência do campo magnético de fontes muito rasas. A metodologia utilizada para esta filtragem foi proposta por Bhattacharyya (1966), transformando o Campo Magnético Total em domínio do número de onda através da Transformada de Fourier.

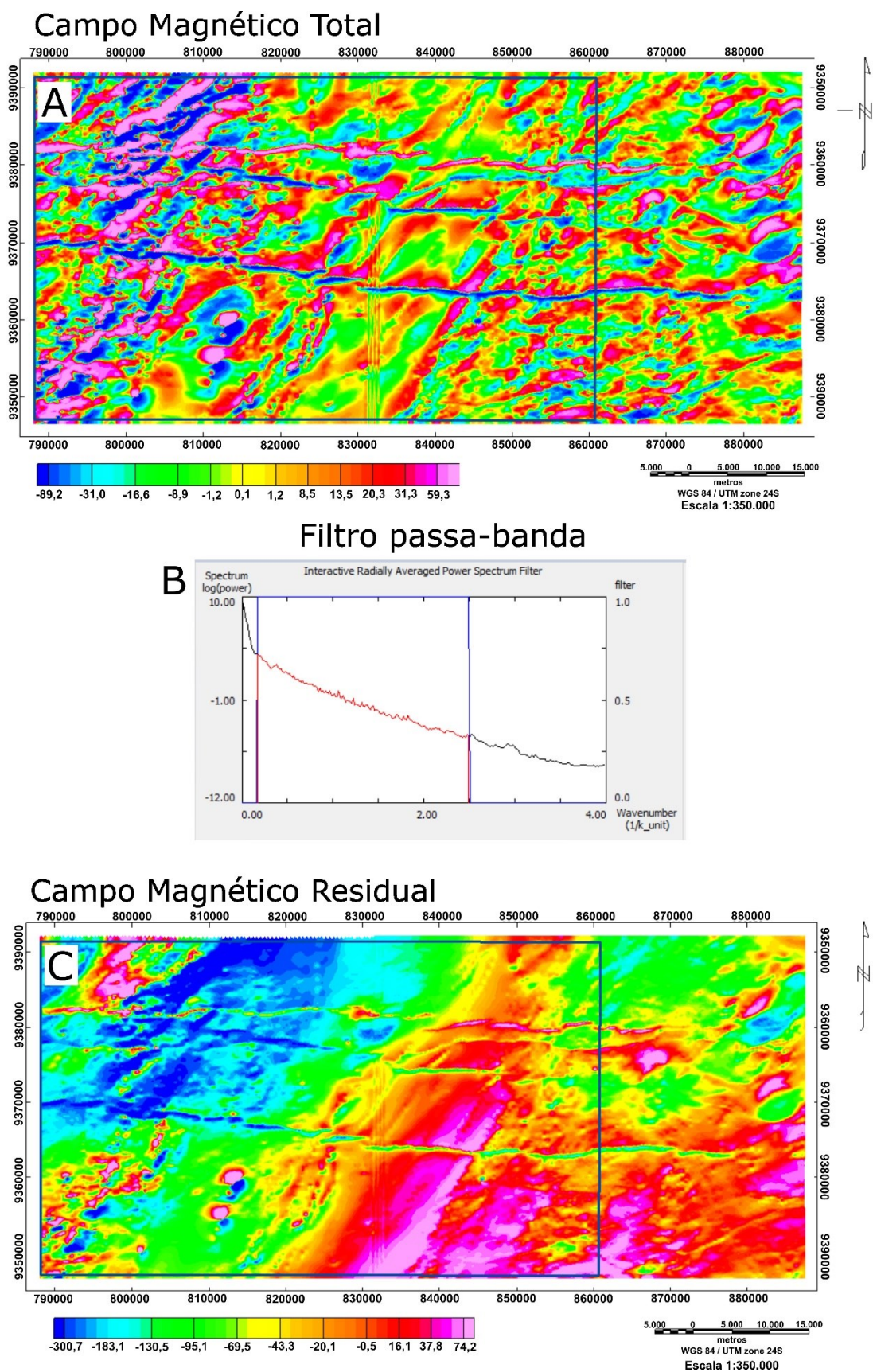


Figura 4. Aplicação do filtro passa-banda: A) Mapa do Campo Magnético Total; B) parâmetros do filtro passa-banda aplicados ao Campo Magnético Total; C) Resultado da filtragem, gerando o mapa do Campo Magnético Residual.

Foram, então, filtradas as influências dos campos magnéticos de ondas maiores e menores, utilizando para isso o filtro de passa-banda (Figura 4).

Utilizando o mapa com a Amplitude do Sinal Analítico, identificou-se padrões magnéticos onde foram delimitados domínios e estes foram relacionados com os litotipos (Figura 5). Em geral, as regiões com altos magnéticos se relacionam com rochas ígneas ou metamórficas com protólitos predominantemente ígneos, como

as do Complexo Caicó (embasamento gnáissico-migmatítico), enquanto regiões de baixo magnético se relacionam a litotipos de origem sedimentar ou metamórficas com protólitos sedimentar, como as rochas do Grupo Seridó. Observa-se um padrão de anomalias circulares e altos gradientes magnéticos, possivelmente associados a corpos graníticos intrusivos, muito comuns na Faixa Seridó.

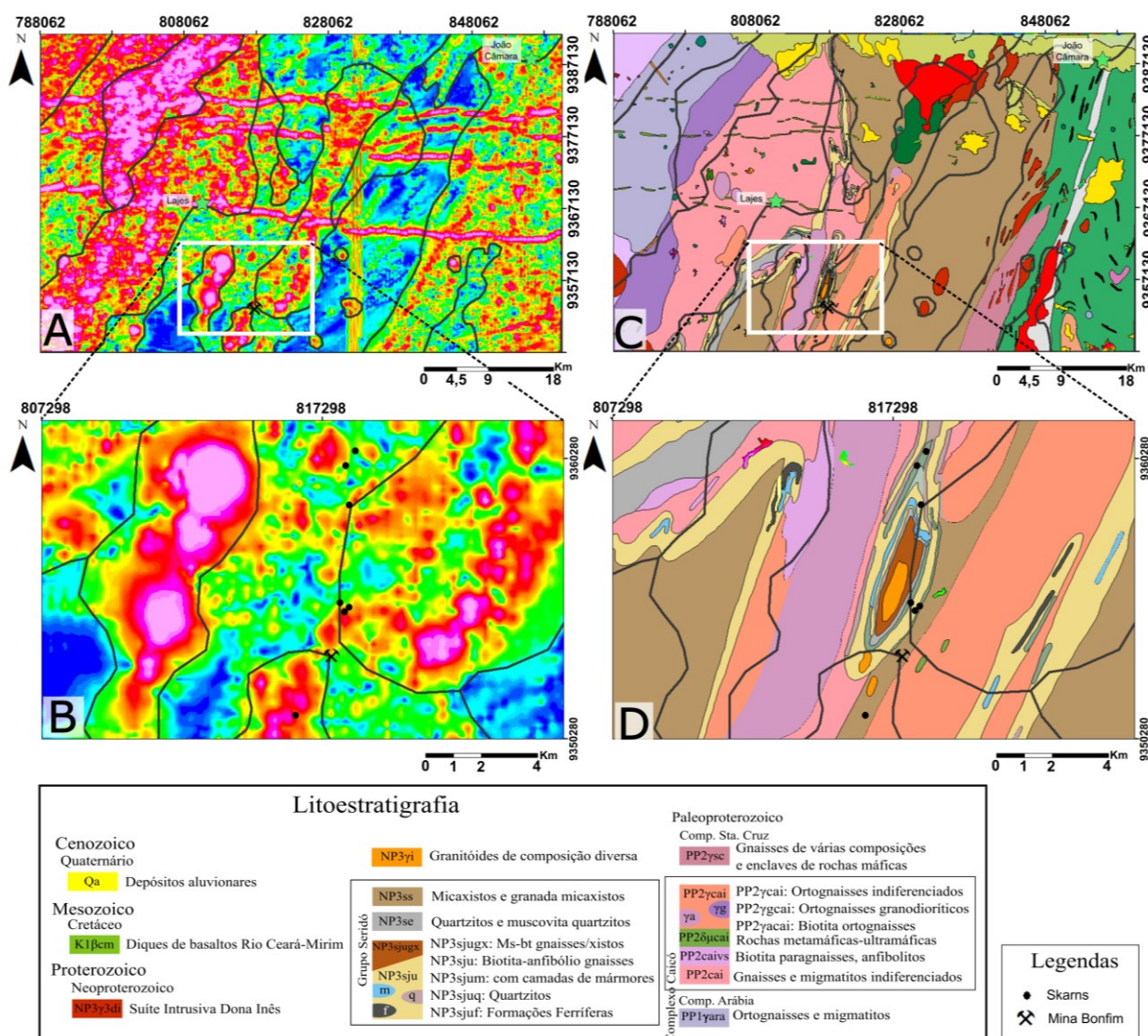


Figura 5. Domínios magnéticos delimitados a partir do mapa de Amplitude do Sinal Analítico e as mesmas delimitações sobre o mapa geológico simplificado. A) Mapa de ASA regional; B) Recorte do mapa regional de ASA; C) Mapa geológico simplificado regional; D) Recorte do mapa geológico simplificado regional. Fonte: mapa geológico simplificado adaptado de Cunha et al., 2021.

Também ocorreu uma associação entre as localizações dos skarns descritos em campo com regiões de altos gradientes magnéticos. Apesar de serem rochas de origem metamórficas desenvolvidas entre/sobre rochas sedimentares, e que por padrão, se localizariam em regiões de baixo gradiente magnético, este fato pode refletir uma forte presença de minerais magnéticos na composição dos skarns, como magnetita e pirrotita, o que corrobora com a mineralogia dos skarns da região, descrita por Souza Neto et al. (2008).

Foram também traçados os lineamentos magnéticos-estruturais a partir do mapa de THDR (Figura 6), cujo *trend* NE-SW está em conformidade com a tendência da estruturação regional da Faixa Seridó. Ocorrem também lineamentos com gradiente magnético muito elevado na direção ESSE-WNW, contudo estes não foram traçados por se tratar de intrusões de rochas vulcânicas máficas cretáceas pós-mineralização dos skarns, não sendo relevantes ao foco do presente estudo.

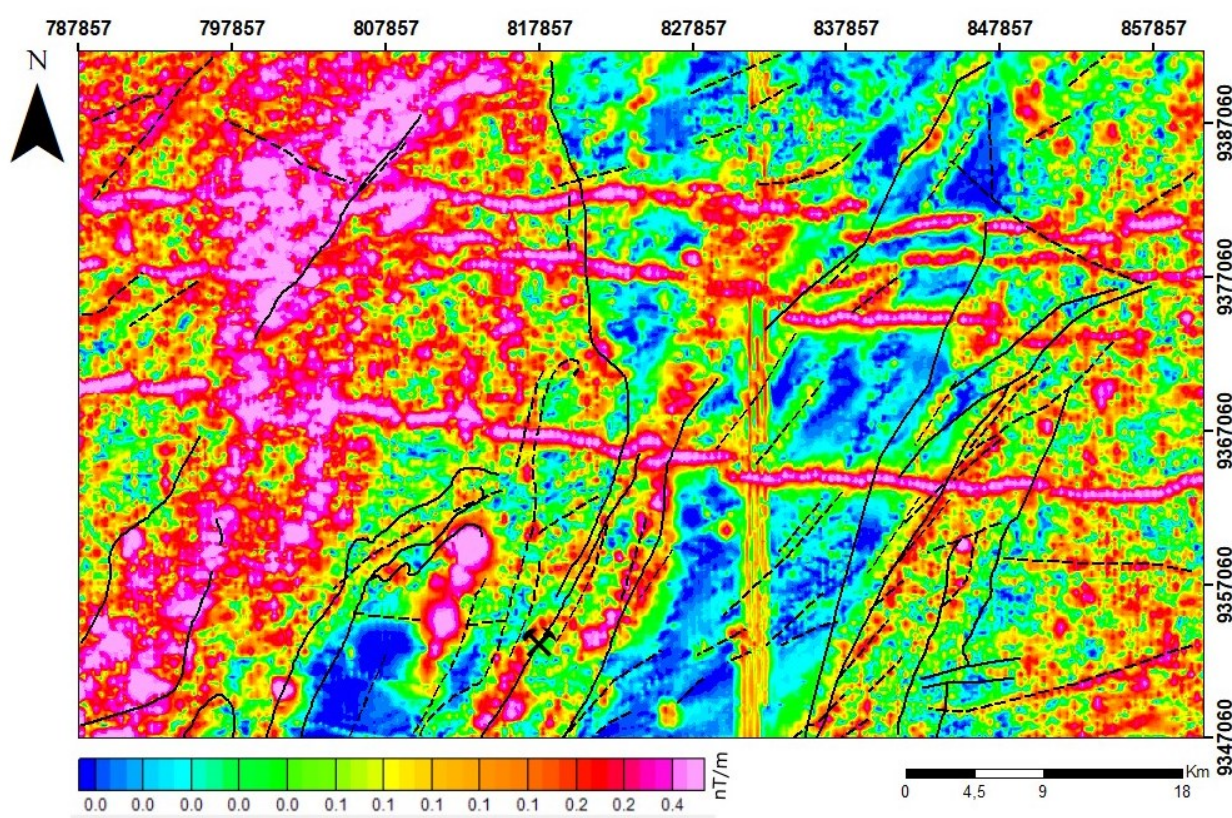


Figura 6. Mapa THDR e com demarcações de lineamentos magnéticos (linhas pretas tracejadas) e lineamentos estruturais (Cunha et al., 2021 - linhas pretas contínuas). A Mina Bonfim está referenciada nos dois martelos cruzados.

4.2. Aerogamaespectrometria

Os mapas gamaespectrométricos de razões tem como objetivo destacar a diferença entre os elementos analisados. Já o mapa gamaespectrométrico de Fator F tem como objetivo realçar o enriquecimento do potássio (K) e do

equivalente urânio (eU) em relação ao equivalente tório (eTh), principalmente quando este enriquecimento está associado a áreas relacionadas a eventos de hidrotermalismo (Ribeiro et al, 2017). O Fator F é definido por:

$$F = K \cdot \frac{eU}{eTh} \quad (1)$$

Foram analisados todos os mapas aerogamaespectrométricos gerados buscando a presença de um padrão anômalo que correspondessem a presença dos skarns. Dentre estes mapas, foi observada uma correlação dos pontos mapeados em campo com baixas

razões de Th/K e de U/K, e com altos valores no mapa de Fator F (Figura 7).

Estas correlações supracitadas podem ser explicadas pela associação de um corpo de origem hidrotermal com o enriquecimento do elemento mais móvel dos três elementos radioativos, que é o caso do potássio.

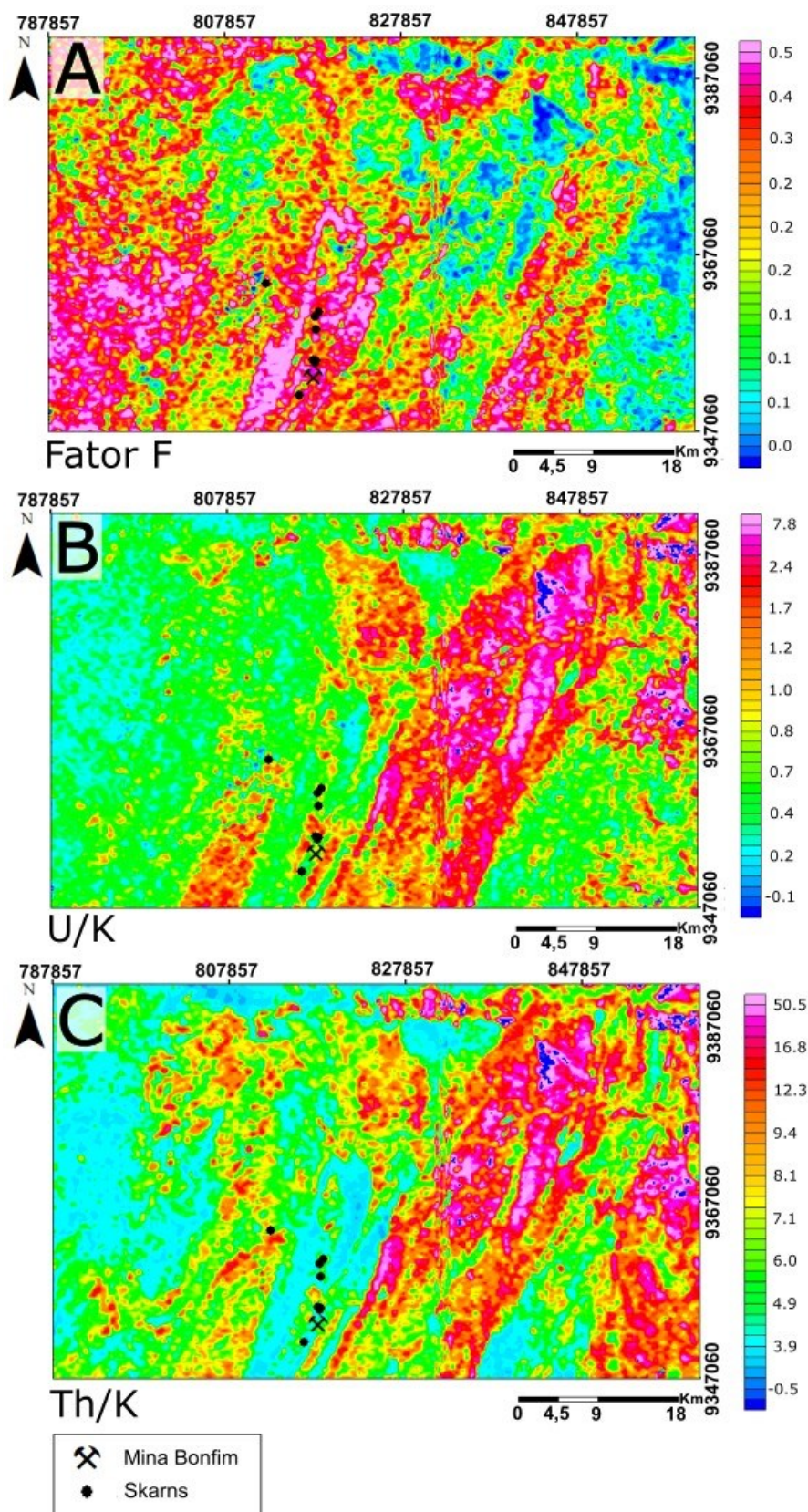


Figura 7. Mapas aerogamaespectrométricos de Fator F e de razões U/K e Th/K. Pode-se perceber a presença de skarns em regiões com altos gradientes no mapa de Fator F (A) e a presença de skarns em regiões de baixos gradientes nos mapas de razões U/K (B) e Th/K (C), indicando relações direta e inversas, respectivamente.

O mapa litológico foi categorizado de acordo com a probabilidade de ocorrência de skarns, segundo o que indicava a literatura sobre a Província de Skarns Polimetálicos do Seridó (Fig. 8). Atribuiu-se maiores valores a litologias que foram descritas como associadas à sequência de lentes ou camadas de mármore, e baixos valores para rochas granitoides e outros litotipos intrusivos.

Já com os dados de lineamentos estruturais e magnéticos, foi demarcada

uma região de 3,6 km no seu entorno, e delimitados 9 trechos de 400 m nestas regiões ao redor dos lineamentos (Figura 9). A escolha do raio de 3,6 km ao redor dos lineamentos estruturais e magnéticos se deu buscando ser a menor possível, que englobasse a máxima quantidade de pontos de verificação. A esses trechos de 400 m no entorno dos lineamentos, foram dados pesos que diminuem conforme se distanciavam do centro (Figura 9).

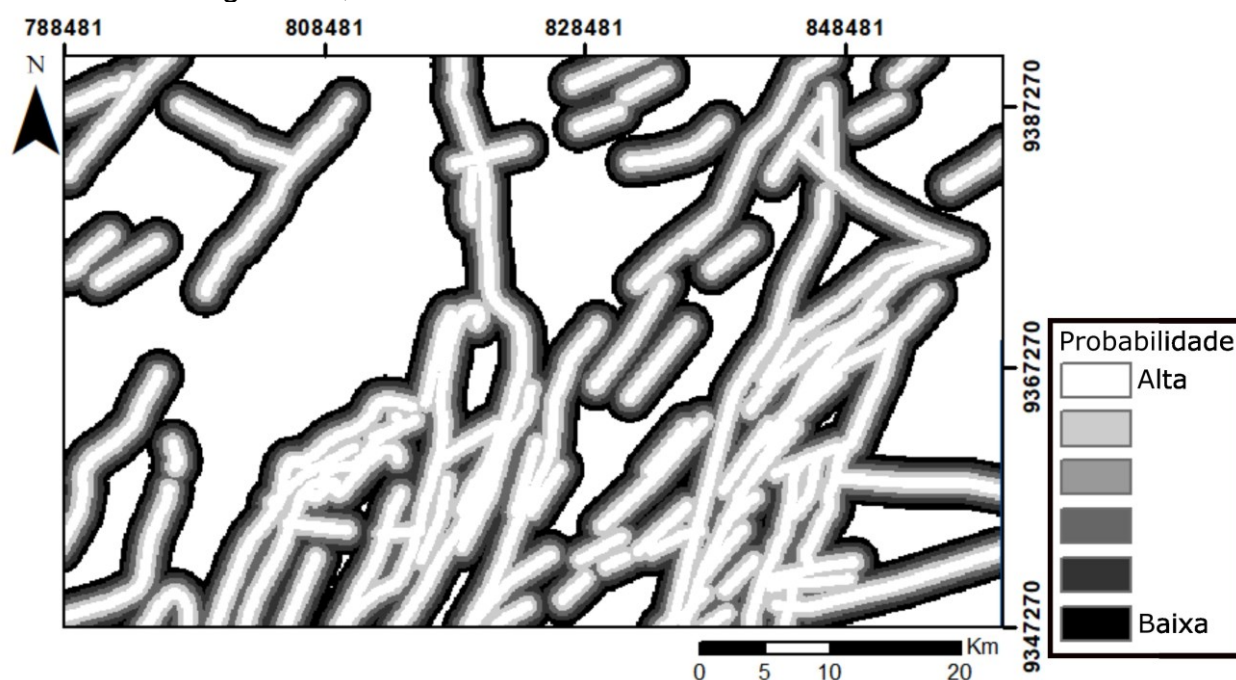


Figura 9. Delimitação de áreas ao redor dos lineamentos estruturais e magnéticos, com um raio de 3,6 km, sendo esta área dividida em 9 trechos de 400 m, e cujos pesos atribuídos iam diminuindo conforme se distanciavam da linha de centro do lineamento.

A avaliação dos dados aerogeofísicos buscou compreender a relação dos mapas utilizados com os pontos de skarns mapeados em campo, para enfim buscar a função de pertinência que melhor traduzia essa relação. Quando se analisavam os mapas de ASA (Figura 5B) e Fator F (Figura 7A), por exemplo, era possível perceber que os skarns se localizavam em regiões de altos valores, e por este motivo possuíam uma relação direta com estas características. Já na análise dos skarns em relação aos mapas de razões U/K (Figura 7B) e Th/K (Figura 7C), nota-se uma relação dos skarns com

baixas razões, tendo por este motivo uma relação inversa. Com estas relações compreendidas, foram utilizadas para os mapas de ASA e de Fator F a função de pertinência *large*, enquanto para os mapas de razões utilizou-se a função de pertinência *small*.

Com a parametrização e normalização de todos os dados, foram enfim cruzados esses dados para se obter o mapa de favorabilidade (Figura 10). Por esta análise se tratar de uma ocorrência mineral, cuja presença trata-se de uma anomalia geológica, foi utilizado o

operador 'E', pois, conforme foi descrito anteriormente, é o operador mais conservador de todos, e fornece

resultados positivos apenas quando todos os dados corroboram o modelo.

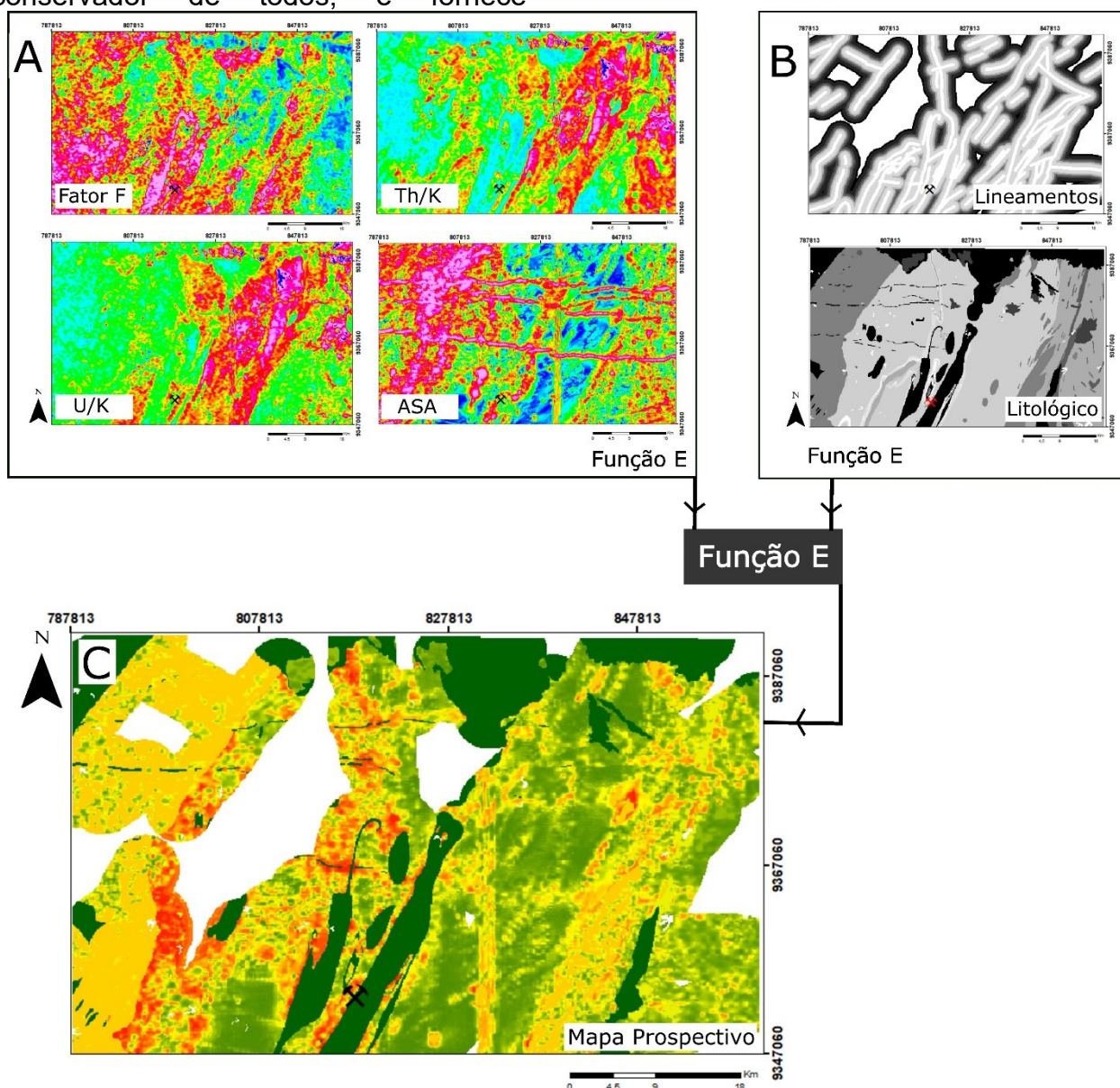


Figura 10. Esquema gráfico do passo a passo da criação do mapa de favorabilidade: A) Mapas geofísicos cruzados com função 'E'; B) Mapas litológico e estrutural categorizados cruzados com a função 'E'; C) Mapa de favorabilidade de ocorrência de skarns mineralizados na região da Mina Bonfim.

Para tentar avaliar o grau de acerto do modelo criado, foram utilizados dados de 77 pontos referentes a skarns, obtidos do banco de dados do SGB (Figura 11). Estes pontos são definidos pelo SGB em três categorias: depósito, indício e ocorrência.

A análise foi realizada visualmente, e classificada a partir da localização na

coloração do mapa de favorabilidade, que indica a probabilidade. As probabilidades foram divididas em alta, média e baixa. Os skarns utilizados para verificar o índice de acerto estão divididos entre depósitos minerais (39 pontos), ocorrências minerais (37 pontos) e indício mineral (1 ponto).

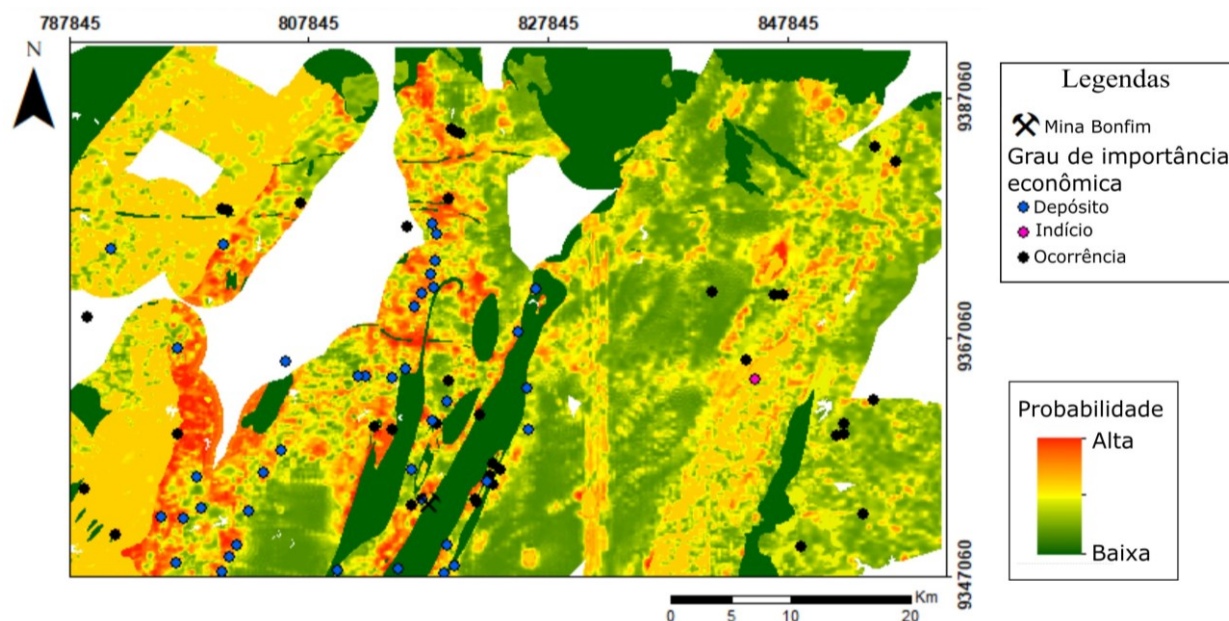


Figura 11. Mapa de favorabilidade de ocorrência de skarns mineralizados com pontos de localização de skarns divididos por grau de importância econômica, com o objetivo de se avaliar quantidade de acertos do modelo prospectivo.

Diante desta análise, foram obtidos um percentual de 74% entre probabilidades alta e média, e apenas 22% de skarns ocorrendo em área de baixa probabilidade (Figura 11). Contudo, se for ainda classificado em grau de importância econômica, os depósitos em skarns, que são o maior volume de pontos, possuem um índice de concordância em alta probabilidade de 63%, enquanto sua presença em locais com baixa probabilidade cai para 16%. Apenas 4% dos skarns ficaram localizados fora da região considerada pelo modelo prospectivo.

5. CONCLUSÕES

Apesar do uso de dados aerogeofísicos com um espaçamento de linhas de aquisição muito grandes para a média do comprimento dos skarns, e a baixa densidade de pontos utilizados para buscar o padrão de assinaturas aerogeofísicas, os dados obtidos com o uso de Lógica Fuzzy para a obtenção do mapa de favorabilidade de skarns mineralizados conseguiu um bom índice

de acertos. 74% dos skarns mapeados pela SBG se localizam em regiões compreendidas entre altas a médias probabilidades. Quando observados apenas os skarns classificados como depósitos minerais, o índice de acerto em altas e médias probabilidades sobe para 84%.

Mesmo com um resultado bastante coerente com a presença destes corpos mineralizados, por se tratar de uma técnica orientada pelo conhecimento, conforme o modelo prospectivo for evoluindo pelo acréscimo de novos conhecimentos sobre os depósitos estudados, a acurácia do mapa de favorabilidade pode ser ainda melhorada.

Um exemplo deste fato são os 3 pontos onde se localizam skarns mapeados pela SGB, problema este que pode ser resolvido com um mapeamento geológico de maior detalhe nas regiões sem cobertura do mapa de favorabilidade, buscando identificar novos lineamentos estruturais, ou ainda com um levantamento geofísico de melhor resolução para este tipo de corpo mineralizado.

Mostrou-se, com isso, que a metodologia preditiva baseada em favorabilidade pode ser um grande aliado para a escolha de novos alvos exploratórios por uma empresa, buscando-se com isso a redução de custos e otimização do tempo na etapa de exploração mineral.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Mineração Nosso Senhor do Bonfim pelo acesso à área da Mina Bonfim e permitir amostragem, ao Departamento de Geologia da Universidade Federal de Pernambuco, e ao seu Programa de Pós-Graduação em Geociências. Agradecem também ao Serviço Geológico do Brasil por todos os dados disponibilizados que fomentam a pesquisa e a pesquisa mineral. J.A. Souza Neto agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela Bolsa de Produtividade em Pesquisa (Processo número 313.251/2021-5).

REFERÊNCIAS

- Abedi, M., Norouzi, G.H., Fathianpour, N., 2013. Fuzzy outranking approach: A knowledge-driven method for mineral prospectivity mapping. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. 21m 556-567. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2012.07.012>
- Angelim, L.A.A., Nesi, J.R., Torres, H.H.F., Medeiros, V.C., Santos, C.A.Veiga Júnior, J.P., Mendes, V.A., 2006. Geologia e recursos minerais do estado do Rio Grande do Norte. Escala 1:500.000. Serviço Geológico do Brasil, Recife.
- Bezerra, F.H.R., Amaral, R.F., Silva, F.O., Sousa, M.O.L., da Fonseca, V.P., Vieira, M.M., 2007. Jardim do Seridó-SB.24-Z-B-V, escala 1:100.000: nota explicativa. Serviço Geológico do Brasil, Recife.
- Bhattacharyya, B.K., 1966. Continuous spectrum of the total-magnetic-field anomaly due to a rectangular prismatic body. *Geophysics*, 31, 1, 97-121. <https://doi.org/10.1190/1.1439767>
- Bonham-Carter, G.F., 1994. Tools for map analysis: multiple maps, in: Bonham-Carter, G.F. (Ed.) *Geographic information systems for geoscientists: modeling with GIS*. Oxford, Pergamon, 267-337.
- Chung, C.J.F., 2003. Use of airborne geophysical surveys for constructing mineral potencial maps, in: Goodfellow, W.D., McCutcheon, S.R., Peter, J.M. (Org.). *Massive sulfide deposits of Bathurst Mining Camp, New Brunswick and northernsn Maine*. Society of Exploration Geophysicists, 11, 879-891. <https://doi.org/10.5382/Mono.11.40>.
- Cordell, L., Grauch, V.J.S., 1985. Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the San Juan Basin, New Mexico, in: Hinze, W.J. (Ed), *The utility of regional gravity and magnetic anomaly maps*. Society of Exploration Geophysicists, pp. 181-197. <https://doi.org/10.1190/1.0931830346.ch16>.
- Costa, A.P., Dantas, A.R., 2014. Folha Lajes – SB.24-X-D-VI. Escala 1:100.000. Serviço Geológico do Brasil, Recife.
- Cunha, A.L.C., Costa A.P., Cavalcante, R., Dantas, A.R., Lima, R.B., Spisila, A.L., Lajes, G.A., 2021. Província Mineral do Seridó: Mapa geológico integrado e Mapa de recursos minerais integrado, estados da Paraíba e Rio Grande do Norte. Escala: 1:350.000. Serviço Geológico do Brasil, Recife.
- Dantas, E.L., Roig, H.L., 2013. Folha João Câmara – SB.25-V-C-IV. Escala

- 1:100.000. Serviço Geológico do Brasil, Recife.
- Environmental Systems Research Institute (ESRI)., 2014. ArcMap: How fuzzy membership works. <https://desktop.arcgis.com/en/arcmap/10.3/tools/spatial-analyst-toolbox/how-fuzzy-membership-works.htm> (acessado em 27 de outubro de 2023).
- Fernandes, P.R., Neto, I.C., Silveira, F.V., Paes, V.J.C., 2022. Avaliação do potencial de lítio no Brasil – área: Província Pegmatítica da Borborema. Serviço Geológico do Brasil, Recife.
- Gnojek, I., Prichystal, A., 1985. A new zync-mineralization detected by airborne gamma-ray spectrometry in Northern Moravia (Czechoslovakia). *Geoexploration*, 23, 4, 491-502. [https://doi.org/10.1016/0016-7142\(85\)90076-6](https://doi.org/10.1016/0016-7142(85)90076-6)
- Holden, E.J., Dentith, M., Kovesi, P., 2008. Towards the automated analysis of regional aeromagnetic data to identify regions prospective for gold deposits. *Computers & Geosciences*, 34, 11, 1505-1513. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2007.08.007>.
- Hollanda, M.H.B.M., Souza Neto, J.A., Archanjo, C.J., Stein, H., Maia, A.C.S., 2017. Age of the granitic magmatism and the W-Mo mineralizations in skarn of the Seridó Belt (NE Brazil) based on zircon U-Pb (SHRIMP) and Re-Os determinations. *Journal of South American Earth Sciences*, 79, 1-11. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2017.07.011>
- Missio, M., 2008. Modelos de EDP integrados à Lógica Fuzzy e métodos probabilísticos no tratamento de incertezas: uma aplicação à febre aftosa em bovinos. Tese de Doutorado. Universidade de Campinas – Instituto de Matemática, Estatística e Computação Científica.
- Nabighian, M.N., 1974. Additional comments on the analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section. *Geophysics*, 39, 1, 86-92. <https://doi.org/10.1190/1.1440416>.
- Nabighian, M.N., 1972. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: it's properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, 37, 507-517. <https://doi.org/10.1190/1.1440276>
- Nykänen, V.M., Ojala, V.J., Sarapää, O., Hulkki, H., Sarala, P., 2007. Spatial modelling techniques and data integration using GIS for target scale gold exploration in Finland, in: *Proceedings of Exploration*, 7, 911-917.
- Ribeiro, C.V.A., Sales, M.C.C., Oliveira, A.L.S., Sallet, R., 2023. Linking sedimentary provenance, climate and tectonics in the Neoproterozoic Seridó Belt, Borborema Province (NE Brazil). *Geoscience Frontiers*, 14, 6, 1-18. <https://doi.org/10.1016/j.gsf.2023.101681>
- Ribeiro, V.B., Mantovani, M.S.M., Louro, V.H.A., 2013. Aerogamaespectrometria e suas aplicações no mapeamento geológico. *Terræ Didática*, 10, 29-51. <https://doi.org/10.20396/td.v10i1.8637386>
- Santos, E.J., Souza Neto, J.A., Silva, M.R.R., Beurlen, H., Cavalcanti, J.A.D., Silva, M.G., Dias, V.M., Costa, A.F., Santos, L.C.M.L., Santos, R.B., 2014. Metalogênese das porções norte e central da Província Borborema, in: Silva, M.G., Neto, M.B.R., Jost, H., Kuyumian, R.M. (Orgs). *Metalogênese das Províncias Tectônicas Brasileiras*, 1, 343-388.
- Silva, S.M.P., Crósta, A.P., Ferreira, F.J.F., Beurlen, H., Silva, A.M., Silva, M.R.R., 2010. Identificação gamaespectrométrica de pláceres

rutilo-monazíticos neoproterozoicos no sul da Faixa Seridó, Nordeste do Brasil. *Revista Brasileira de Geofísica*, 28, 1, 61-77. <https://doi.org/10.1590/S0102-261X2010000100005>.

Souza Neto, J.A., Legrand, J.M., Volfinger, M., Pascal, M.L., Sonnet, P., 2008. W-Au skarns in the neoproterozoic Seridó Mobile Belt, Borborema Province in northeastern Brazil: an overview with emphasis on the Bonfim deposit. *Mineralium Deposita*, 43, 2, 185-208. <https://doi.org/10.1007/s00126-007-0155-1>.

Sawatzky, D., Raines, G., Bonham-Carter, G. 2010. Spatial Data Modeller. Disponível em: <https://www.ige.unicamp.br/sdm/ArcSDM10/source/>. Acesso em: 05 de nov. de 2023.

Verduzco, B., Fairhead, J.D., Green, C.M., Mackenzie, C. 2004. New insights into magnetic derivatives for structural mapping. *The Leading Edge*, 23, 116-119. <https://doi.org/10.1190/1.1651454>.