



Modelagem Multidados dos Corpos Metamáficos-Ultramáficos do Greenstone Belt Serra das Pipocas, Província Borborema, Ceará

Herdivânia Pires de SOUSA¹, Clóvis Vaz PARENTE²,
Christiano MAGINI², Dillano Rodrigues Bastos XIMENES¹

Resumo: O Greenstone Belt Serra das Pipocas, de idade riaciana (2.1 a 2.2Ga), está inserido no Núcleo Arqueano/Paleoproterozoico do Domínio Ceará Central, na porção Setentrional da Província Borborema, entre as regiões de Independência e adjacências. Técnicas de mapeamento litoestrutural conexas a análise de dados aerogeofísicos (Magnetometria e Gamaespectrometria), espectrais (Landsat 8) e radar Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), permitiram individualizar diferentes corpos metamáfico-ultramáficos dentro do terreno, como também suas principais estruturas regionais. O uso integrado de dados aerogeofísicos, imagens ternárias (RGB e CMY) nos canais de KThU (Gamaespectrometria) e 765 (Landsat 8) permitiu a delimitação dos domínios geológicos. A técnica do Índice Máfico caracterizou ainda com mais precisão os corpos da sequência. As assinaturas estruturais foram identificadas na magnetometria (ASA e AGHT) e SRTM (relevo sombreado com azimute de 315° e altitude de 45°). Duas tendências estruturais foram observadas: uma de direção NE-SW associada à principal fase de deformação Brasileira, e a outra de direção NW-SE, relacionada à uma tectônica rúptil tardia. A integração desses dados favoreceu a geração do mapa do arcabouço litoestrutural e a individualização das rochas metamáfica-ultramáficas da sequência metavulcanossedimentar da Serra das Pipocas.

Palavras-chave: Aerogeofísica; Índice Máfico; SRTM; Landsat 8

Abstract: *The Serra das Pipocas Greenstone Belt, with rhyacian age (2.1 – 2.2Ga), is part of the Archean/Paleoproterozoic core of the Ceará Central Domain, and is located at the northern portion of Borborema Province, near the municipality of Independência and neighboring areas. Lithostructural mapping techniques associated with the analysis of airborne geophysical (Magnetometry and Gamma spectrometry), spectral (Landsat 8) and orbital Shuttle Radar Topography Mission (SRTM) data, allowed to identify different metamafic-ultramafic bodies in the greenstone belt, as well as its main regional structures. The integrated use of airborne geophysical data, ternary images (RGB and CMY), in the channels of K-Th-U (Gamma spectrometry) and 765 (Landsat 8) allowed a better delimitation of geological domains. The mafic index technique characterized with a better accuracy the mafic-ultramafic bodies within the sequence. The structural signatures were*

¹ Programa de Pós-Graduação em Geologia - Universidade Federal do Ceará

² Departamento de Geologia - Universidade Federal do Ceará

identified through the techniques of magnetometry (ASA and AGHT) and SRTM (shaded relief with 315° Azimuth and 45° attitude). Two structural trends were observed, one of them with strike NE-SW, associated to the Brasiliano main deformation phase, and the other one with strike NW-SE related to a late fragile deformation. The integration of these data has favored the development of a lithostructural framework map and the individualization of metamafic-ultramafic bodies of the Serra das Pipocas metavolcanic-sedimentary sequence.

Keywords: Gamma spectrometry; Magnetometry; Mafic Index; SRTM; Landsat 8.

1. INTRODUÇÃO

A utilização e integração de dados multifontes têm sido de fundamental importância para mapeamento geológico e modelos de distribuição de depósitos minerais, que podem subsidiar o desenvolvimento do setor mineral. Diversos métodos já foram estabelecidos utilizando informações aerogeofísicas, radar e de sensoriamento remoto, com intuito de reconhecer alvos prospectivos. Dentre esses têm-se aqueles elaborados por Spector & Grant (1970), Pires (1995), Souza Filho & Crósta (2003), Neto & Ferreira (2003), etc. No caso em específico, a interpretação unificada auxiliou para a delimitação prévia de corpos metamáfico-ultramáficos.

Na região sudoeste do Estado do Ceará, entre os municípios de Boa Viagem, Independência Tauá e Pedra Branca (Figura 1), ocorre uma sequência metavulcanossedimentar do tipo granito-greenstone, denominada de Greenstone Belt Serra das Pipocas (Caby & Arthaud 1986; Rosa Júnior 2012, Costa 2015; Sousa, 2016).

O Greenstone Belt Serra das Pipocas (GBSP) encontra-se inserido a sudoeste do Núcleo Arqueano/Paleoproterozoico do Domínio Ceará Central, na Província Borborema, fazendo limites com o Complexo Cruzeta e Complexo Ceará (Figura 2).

É composto por rochas metasedimentares psamo-pelito-margosos,

contendo intercalações de derrames vulcânicos metamáfico-ultramáficos de natureza toleítica e komatiítica, respectivamente, e meta-ácidas, metamorfisadas em fácies xisto verde alto a anfíbolito alto. Metatufos básicos a ácidos, metacherts e formações ferríferas bandadas ocorrem intercaladas a anfíbolitos, que se encontram, por vezes, fortemente hidrotermalizados. Esses litotipos são recortados por intrusões metamáfica-ultramáficas, metagrano-dioritos e dique metabásico.

Estruturalmente, a área é marcada por deformações polifásicas penetrativas, ocorridas no Brasiliano/Pan-Africano, com dobras isoclinais apertadas, recumbentes, além de falhamentos de empurrão e cisalhamento dúctil. Esses falhamentos são reconhecidos, sobretudo, no contato entre esta sequência metavulcanossedimentar e as rochas granito-gnáissico-migmatíticas do Complexo Cruzeta, entre as subunidades dominadas pelas rochas metaultramáficas e metamáficas e nas bordas dos corpos intrusivos riacianos (2.2Ga) (Sousa 2016) (2.2Ga) (Sousa, 2016), próximos à zona de empurrão Queimadas, que se encontram fortemente hidrotermalizadas. Poste-riormente, durante o evento Brasiliano houve também a intrusão dos leucogranitos.

Dentro deste contexto, o trabalho apresenta e discute os resultados do

mapeamento geológico na escala 1:100.000 com suporte de dados aerogeofísicos, combinados com informações interpretadas de imagens

espectrais e radar, como contribuição ao estudo da associação metamáfica-ultramáfica do Greenstone Belt Serra das Pipocas.

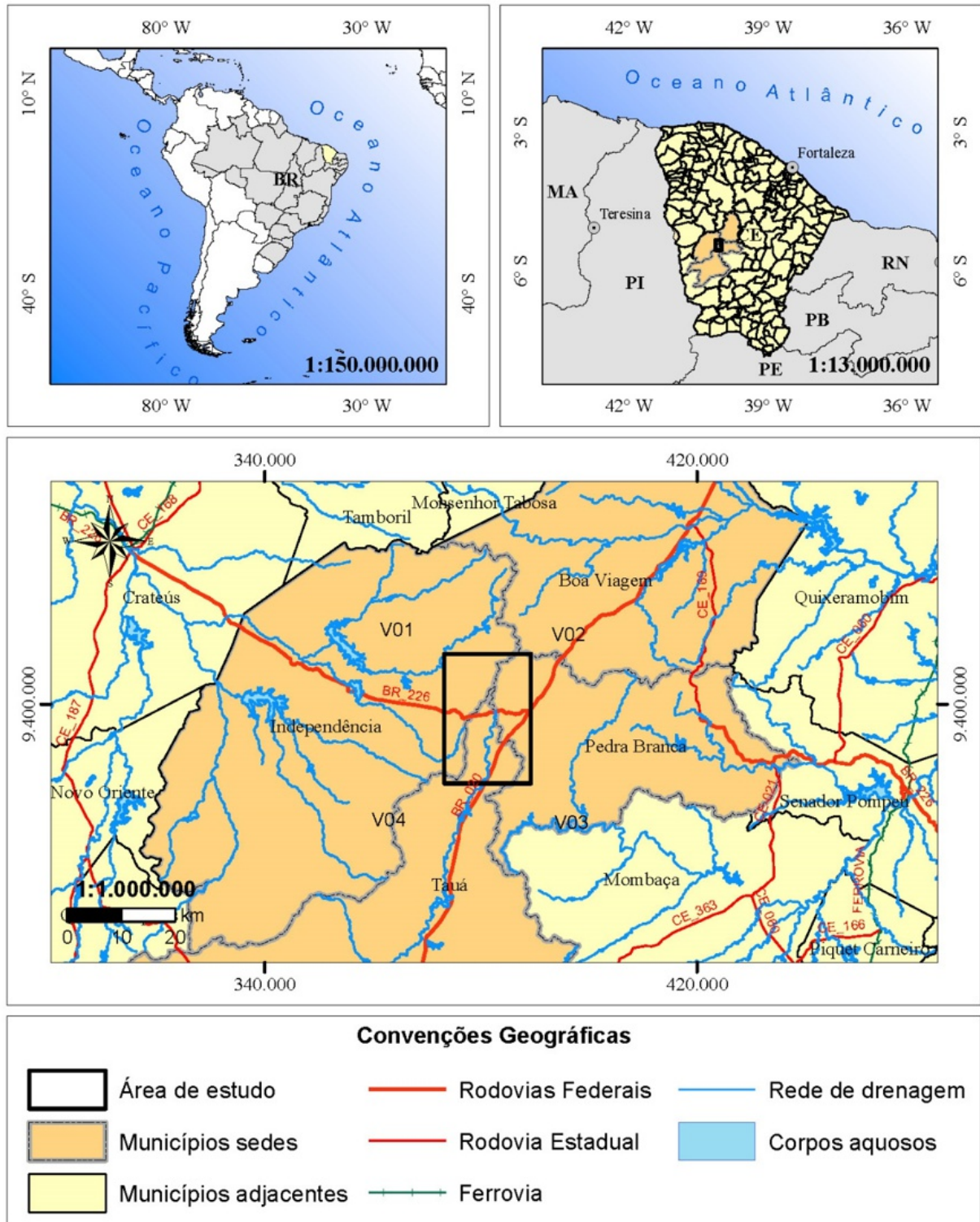


Figura 1: Localização do Greenstone Belt Serra das Pipocas (Sousa, 2016).

2. ARCABOUÇO GEOLÓGICO REGIONAL

O GBSP, de idade paleoproterozoica (Costa *et al.* 2015; Sousa 2016), está localizado na porção Setentrional da Província Borborema (PB) (Figura 2), região central do nordeste do Ceará. A PB situa-se no nordeste da plataforma sul-americana, limitada a norte e a leste pelas bacias costeiras e margem continental, a oeste pela bacia do Parnaíba e a sul pelo cráton São Francisco (Almeida *et al.*, 1977, 1981).

A evolução da província é interpretada como uma complexa região de domínios tectonoestratigráficos, associado a eventos termotectônicos ocorrido entre o Arqueano e o Neoproterozoico (Almeida *et al.*, 1977, 1981). A estruturação atual resulta da colisão frontal dos crátons Amazônico, São Luís/Oeste Africano e São Francisco/Congo, o que gerou o consumo e fechamento do oceano Goiás-Faruriano no Neoproterozoico, durante o evento tectonotermal Brasileiro, por volta de 600Ma (Arthaud 2007; Cordani *et al.*, 2013). O regime convergente passou de frontal a oblíquo (590Ma), evidenciado pelo desenvolvimento de zonas de cisalhamentos transcorrentes dextrais/sinistrais, com direção NNE-SSW e NW-SE, respectivamente (Brito Neves *et al.*, 2000; Arthaud 2007). Essas megazonas de cisalhamento, ativadas no final do evento Brasileiro, dividem a porção setentrional da PB em domínios geotectônicos: Médio Coreaú, Ceará Central e Rio Grande do Norte (Fetter 1999; Brito Neves *et al.*, 2000; Delgado *et al.*, 2003; Amaral, 2010).

O Domínio Ceará Central, que envolve a área estudada, é caracterizado por um embasamento gnáissico policíclico e cobertura alóctone,

representada por uma sequência metassedimentar do tipo plataformar, composta de quartzitos, mármore e metapelitos, intercalados com rochas metavulcânicas máficas e ácidas, fortemente afetada por uma tectônica de nappes e por volumosos corpos graníticos pré, sin, tardi e pós-Brasileiros (Caby & Arthaud 1986; Nogueira Neto 2000; Arthaud 2007). Nesse domínio, são reconhecidas várias unidades litoestratigráficas, formadas entre o Arqueano e o Neoproterozoico/Paleozoico, mas neste trabalho, será dada ênfase àquelas desenvolvidas entre o Arqueano e o Paleoproterozoico, por fazerem parte da temática em questão (Figura 2).

O núcleo arqueano é constituído por dois conjuntos de ortogneisses cinza migmatizados, exibindo bandamentos composicionais complexos, com predomínio de bandas tonalítica/granodiorítica alternando-se com bandas graníticas, agrupados nos complexos Mombaça e Cruzeta (Cavalcante *et al.*, 2003; Arthaud *et al.*, 2008). A distinção entre os dois é baseada em assinatura geocronológica. O Complexo Cruzeta teria idade em torno de 2,7Ga e o Complexo Mombaça, 2,8Ga (Arthaud *et al.*, 2008). Idades modelo TDM em rochas do Complexo Cruzeta revelam valores entre 2,7 e 2,8Ga e consideradas como juvenis, enquanto no Complexo Mombaça dominam rochas com TDM entre 2,9 e 3,0Ga, representativas de materiais crustais arqueanos mais antigos (Arthaud *et al.* 2008). Datação realizada por Silva *et al.* (2002) pelo método U-Pb em zircão de metatonalito, deu idade 3,27Ga, interpretada como idade de cristalização. Nesses terrenos são frequentes corpos boudinados de rochas metamáfica-ultramáficas acamadadas ou não, alguns dos quais mineralizados em cromita

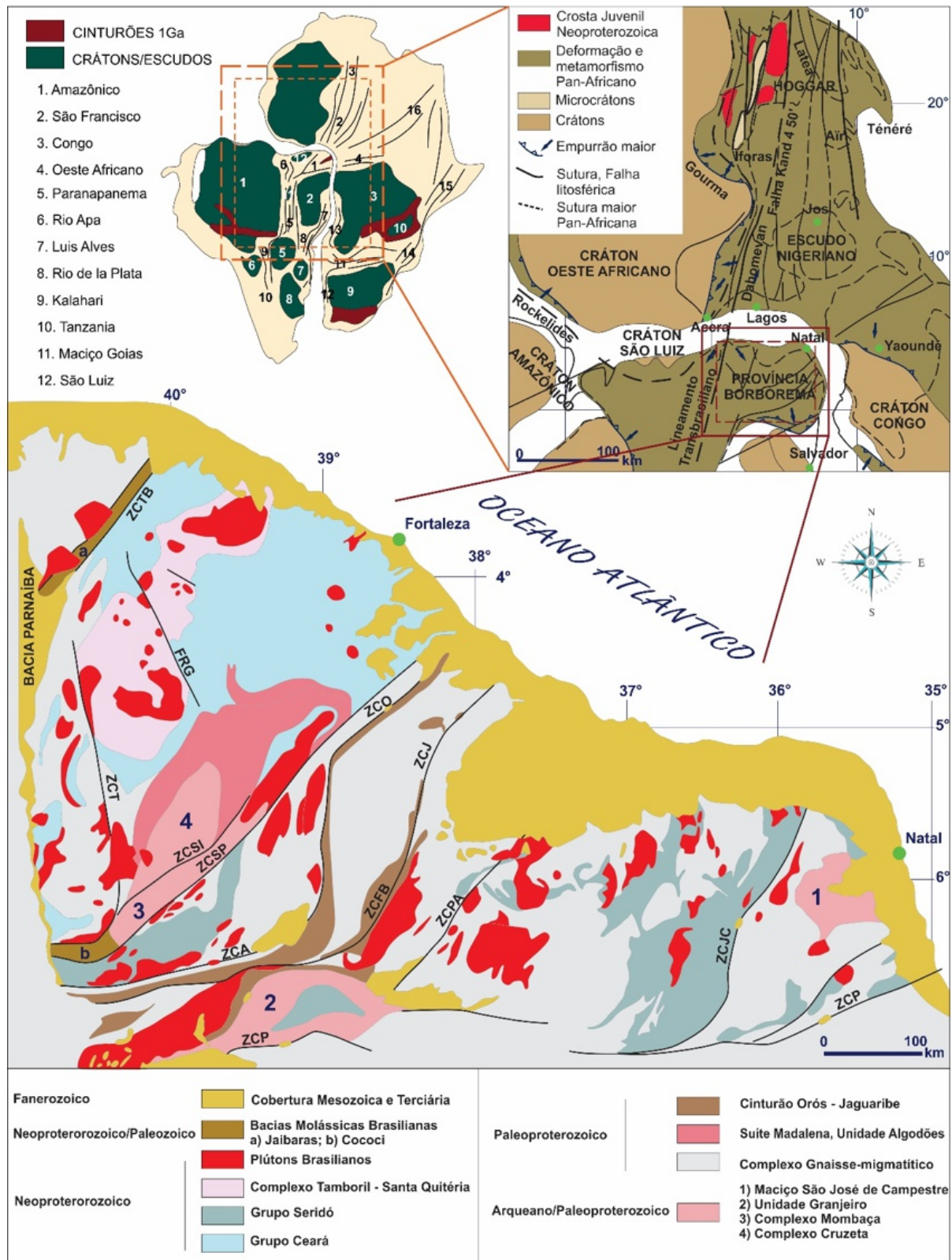


Figura 2: Subdivisão da Província Borborema e localização da área de estudo inserida no Núcleo Arqueano do Domínio Ceará Central (Cavalcante, 1999; Brito Neves 2000; Delgado et al. 2003; Arthaud, 2007; De Wit et al. 2008). Principais Zonas de Cisalhamento: ZCTB (Sobral-Pedro II); ZCT (Tauá); ZCSI (Sabonete-Inharé); ZCSP (Senador Pompeu); ZCO (Orós); ZCJ (Jaguaribe); ZCPA (Porto Alegre); ZCJC (João Câmara); ZCA (Auiába); ZCFB (Farias Brito); ZCP (Patos); FRB (Falha Rio Groaíras).

estratiforme e platinoides, com ocorrências subordinadas de rochas supracrustais constituídas por delgados corpos lenticulares de formações ferríferas bandadas, associadas a anfibolitos, turmalinitos, paragnaisses, que junto com os ortognaisses anteriores formariam a associação do tipo granito-greenstone (Caby & Arthaud 1986; Caby et al., 1995; Arthaud et al., 2008) ou Unidade Troia (Cavalcante et al., 2003).

Os terrenos paleoproterozoicos, que margeiam o referido bloco arqueano, exibem limite irregular ou mesmo impreciso, e são constituídos por diversas associações litológicas agrupadas em três unidades distintas (e.g. Arthaud et al., 2008): i-Complexo gnáissico-migmatítico, dominado por ortognaisses de composição tonalítica a granodiorítica com idade U-Pb entre 2,11 e 2,19Ga (Fetter 1999); ii- Suíte Madalena representada por rochas meta quartzodioríticas não migmatizadas, com idade U-Pb entre 2,15 e 2,2Ga (Castro 2004). Análises geoquímicas em rochas granodioríticas dessa suíte, indicam natureza cálcio-alcálica, característica de granitos do tipo I, encontrados em ambiente de Arco Magmático (Borges & Silva 2012). Costa et al. (2015) sugerem que os ortognaisses apresentam assinaturas similares a adakitos, de idade entre 2190 e 2160Ma, com características TTG; e iii-Unidade Algodões caracterizada por sequências supracrustais constituídas de rochas metavulcânicas básicas (anfibolitos com ou sem granada), rochas metaultramáficas de natureza toleítica, com valores ϵNd (em 2,0Ga) de +7,6 a 7,9 e isócrona Sm-Nd em rocha total de $2,06 \pm 0,1 Ga$. Metavulcânicas félsicas e rochas metassedimentares diversas, inclusive formações ferríferas e manganésíferas, intrudidas por

ortognaisses porfiríticos, metadacitos e microdioritos são os demais litotipos (Arthaud & Landim 1995; Martins 2000; Arthaud et al., 2008). Datações U-Pb em zircão do metarriolito dão idade de 2,13Ga (Castro 2004). Para Fetter (1999) e Fetter et al. (2003) é provável que esses terrenos paleoproterozoicos sejam resultados da acreção de vários arcos insulares (idades compreendidas entre 2,1 e 2,15Ga) em torno de pequeno núcleo arqueano. As rochas do complexo intrusivo representariam o processo de acreção de arcos de ilhas ao longo de um período de 50Ma, durante o Paleoproterozoico, com pouca participação de fragmentos crustais mais antigos, enquanto as supracrustais teriam se desenvolvidas em ambientes de back-arc (e.g. Martins et al., 2009).

Recentemente, Pinéo & Costa (2013) e Costa et al. (2015), utilizando dados aerogamaespectrometria, geoquímica e geocronologia, propuseram um novo limite entre o núcleo neoarqueano/paleoproterozoico e o Complexo Gnáissico Paleoproterozoico do Domínio Ceará Central. Como resultado, verificou-se o aumento da exposição dos terrenos paleoproterozoicos e uma diminuição dos terrenos arqueanos (Figura 3). A área estudada está inserida basicamente no domínio dos terrenos paleoproterozoicos.

3. MÉTODOS E PROCESSAMENTO DE DADOS

Os dados aerogamaespectrométricos do Projeto Aerogeofísico Novo Oriente, datado de 2006 (Tabela 1), foram disponibilizados pela Divisão de Geofísica (DIGEOF) da Companhia de Pesquisa e Recursos Minerais (CPRM), ao Programa de Pós-Graduação em Geologia da Universidade Federal do Ceará. O espaçamento entre as linhas de voo

foi de 0,5km e o intervalo entre as medições foi de 1s, o que corresponde a, aproximadamente, 100m (velocidade média do avião: 270km/h).

O processamento dos dados aerogeofísicos de magnetometria (campo total) e gamaespectrometria (canais de potássio, tório e urânio) foram obtidos de dois arquivos no formato tabular do tipo

ASCII (GDB) e foram importados para o software Oasis Montaj (Geosoft 2009), para geração de mapas magnetométricos e gamaespectrométricos, em escala 1:100.000 (disponibilizadas gratuitamente). O processamento e análise foi executado em escala regional e local, sendo que durante o recorte há um refinamento dos dados obtidos.

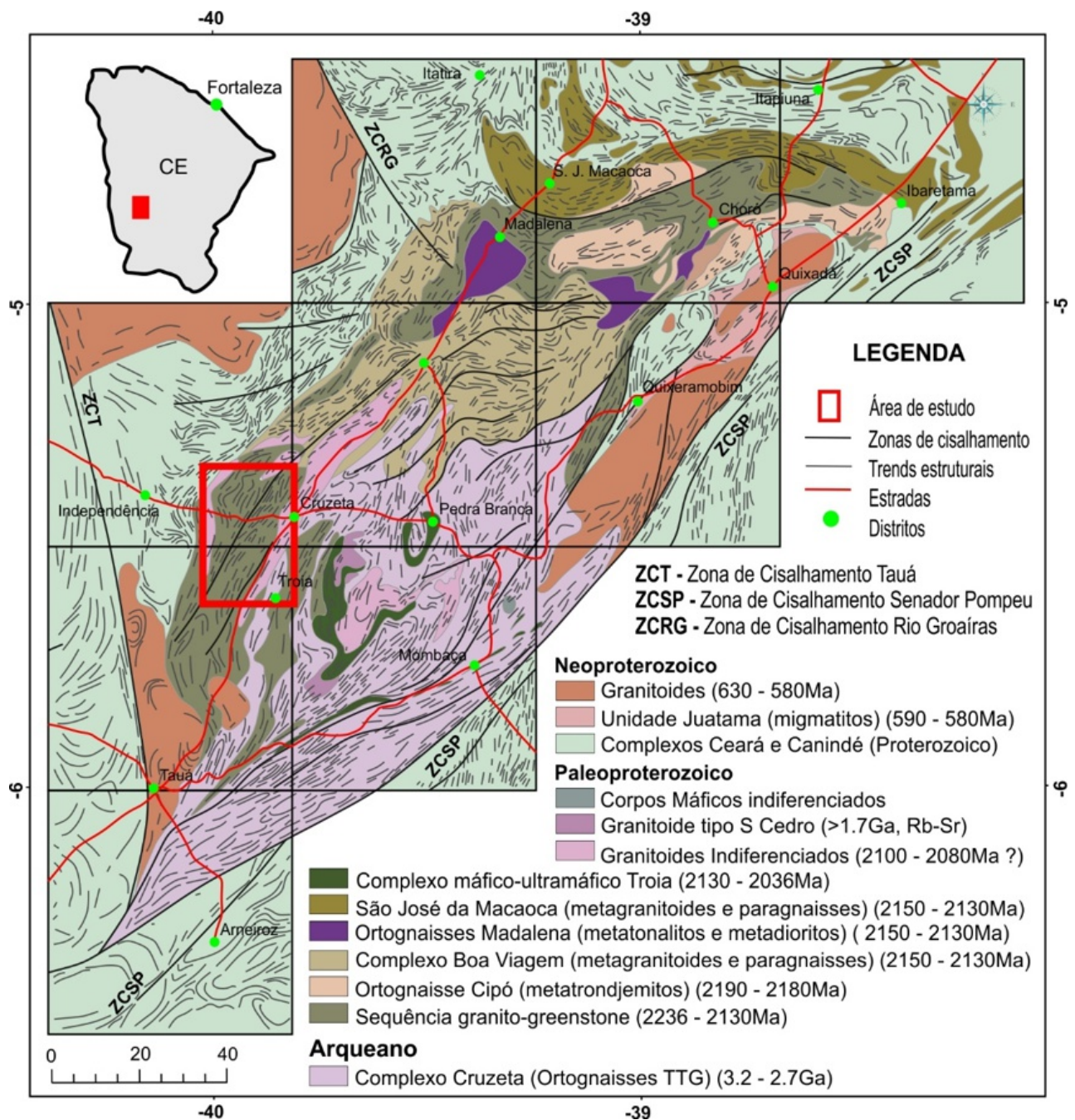


Figura 3: Mapa geológico simplificado do Núcleo Arqueano/Paleoproterozoico do Domínio Ceará Central com localização do Greenstone Belt Serra das Pipocas (Costa et al., 2015).

Tabela 1: Dados do levantamento magnetométrico e gamaespectrométrico.

Métodos	Magnetometria e Gamaespectrometria
Direção das linhas de voo	N-S
Espaçamento entre as linhas de voo	0,5km
Direção das linhas de controle	E-W
Espaçamento entre as linhas de controle	10 km
Intervalo entre medições geofísicas (magnéticas) consecutivas	até 0,01s, decimadas para 0,1s
Intervalo entre medições geofísicas (gamaespectrométricas) consecutivas	1s
Altura média de voo	100 m
Velocidade média de voo	270 km/h

O modelo do International Geomagnetic Reference Field (IGRF) (Barton *et al.*, 1996) foi removido dos dados magnetométricos originais, o que resultou no campo magnético anômalo (CMA). Testes da diferença quarta e parâmetros de P (e.g. Blum 1999) foram aplicados para a avaliação da distribuição e consistência dos dados. O método de mínima curvatura foi interpolado em um intervalo de $\frac{1}{4}$ do espaçamento da linha de voo (e.g. Vasconcelos *et al.*, 1994). O micronivelamento removeu erros residuais de nivelamento, através da técnica de filtragem direcional de Minty (1991). Logo após, foram calculadas as derivadas horizontais x e y (Dx e Dy) e vertical z (Dz), as Amplitudes do Sinal Analítico (ASA) (e.g. Roest *et al.*, 1992), o Gradiente Horizontal Total (AGHT) (Cordell & Grauch 1985) e a Inclinação do Sinal Analítico (ISA) (e.g. Miller & Singh 1994).

Os dados gamaespectrométricos foram processados e resultaram imagens corrigidas dos canais do K (%), eTh (ppm), eU (ppm) e da contagem total (CT), além de imagens ternárias RGB e CMY produzidas a partir dos canais

radiométricos originais. Análises integradas as imagens ternárias foram processadas, geradas junto ao Dz, ISA e MDT, o que acentuou as assinaturas geofísicas dos litotipos estudados.

Com os dados magnetométricos (ASA) e gamaespectrométricos (K, eU, eTh) foi gerada a equação do Índice Máfico (IM) (Equação 1). O IM é uma técnica útil para individualização de corpos de origem máfica e ultramáfica (Pires & Moraes 2006).

$$IM = \frac{(ASA \cdot eU \cdot Th)}{K}$$

Para processamento e análises de imagens multispectrais, obtidas a partir de dados de radar, foi utilizado o software ENVI 5.0. Neste foram realizadas diferentes composições com três arranjos de bandas, a partir do processamento das imagens do satélite Landsat 8, de órbita ponto 217/64, disponibilizado pela United States Geological Survey (USGS), no período caracterizado por estiagem (26 de abril de 2013), de forma a caracterizar a diferença dos alvos.

As imagens de radar corroboraram para determinação do padrão estrutural delimitado pelas assinaturas magnetométricas. Os dados foram processados no ErMapper 7.0 e a análise digital para a extração dos lineamentos foi realizada através do programa ArcGIS 10.2. O Modelo Digital do Terreno (MDT) foi extraído dos dados do *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM) de resolução horizontal 30m, disponibilizados pelo *United States Geological Survey* (USGS), na página <<http://earthexplorer.usgs.gov>>.

A integralização das informações gerados nos *softwares* foi construída no ArcGIS 10.2, para auxiliar no tratamento final e elaboração dos mapas pré e pós-campo, assim como as figuras com dados em SIG, em coordenadas UTM, de datum WGS84 e fuso 24M, com intuito de armazenar planos de informações (*shapefiles*) para futuras consultas.

4. RESULTADOS

A utilização multidados (aerogeofísicos, espectrais e radar), junto a trabalhos de campo, auxiliaram para a configuração espacial das unidades litológicas e estruturas tectônicas da sequência. A aplicação resultou na confecção de mapas estruturais, domínios geológicos e índices máficos, ambos na escala 1:100.000, o que incrementa a configuração da cartografia geológica do GBSP.

4.1 Modelagem de Dados Estruturais

Os dados magnetométricos permitiram correlacionar as assinaturas estruturais mapeadas. Os lineamentos magnéticos foram traçados, primeiramente, a partir de produtos derivados como Amplitude do Gradiente Horizontal Total (AGHT) e da Amplitude do Sinal Analítico (ASA) (Figura 4).

A principal tendência estrutural observada exibe trend NE-SW, subordi-

nadamente, apresenta variações estruturais de direção NW-SE (Figura 5). Dados da literatura e de campo indicam que a direção NE-SW decorre da influência dos eventos que deram origem às zonas de cisalhamento transcorrente dextral Senador Pompeu e lineamento Transbrasiliiano, em âmbito regional. As falhas observadas na área se tratam das Zona de Empurrão Vinte (ZEV), Zona de Empurrão Serra das Pipocas (ZESP), Zona de Empurrão Queimadas (ZEQ), Zona de Empurrão Barra Nova (ZEBN), Zona de Cisalhamento Belém (ZCB) e Zona de Cisalhamento Indiferenciada (ZCI), observadas durante o mapeamento geológico, apresentam feições de baixo ângulo (zona de cavalgamento ou empurrão) a alto (zona de cisalhamento), com direção preferencial similar ao observado nas imagens, corroborando com a análise.

Os lineamentos positivos (lineamento +) são referentes aos sistemas de relevo mais elevados na área de estudo e lineamento negativo (lineamento -) faz referência as elevações pouco pronunciadas na área.

Os domínios magnéticos altos a muito altos ocorrem em algumas porções do GBSP, principalmente, associados com corpos metamáficos e metaultramáficos. Na porção sudeste da área, observa-se zonas com feições anômalas intensas, demarcado pelos litotipos do Complexo Cruzeta (ortognaisses migmatizados e corpos lenticulares anfibolíticos).

As estruturas de trend NW-SE são interpretadas durante a análise como zonas de fraturas, decorrente de uma tectônica rúptil, durante o final do Neoproterozoico ou mais recente, que pode ser ratificada e não. As feições tracejadas encontram-se impressas em todos os tipos litológicos, corroborando com os dados de campo.

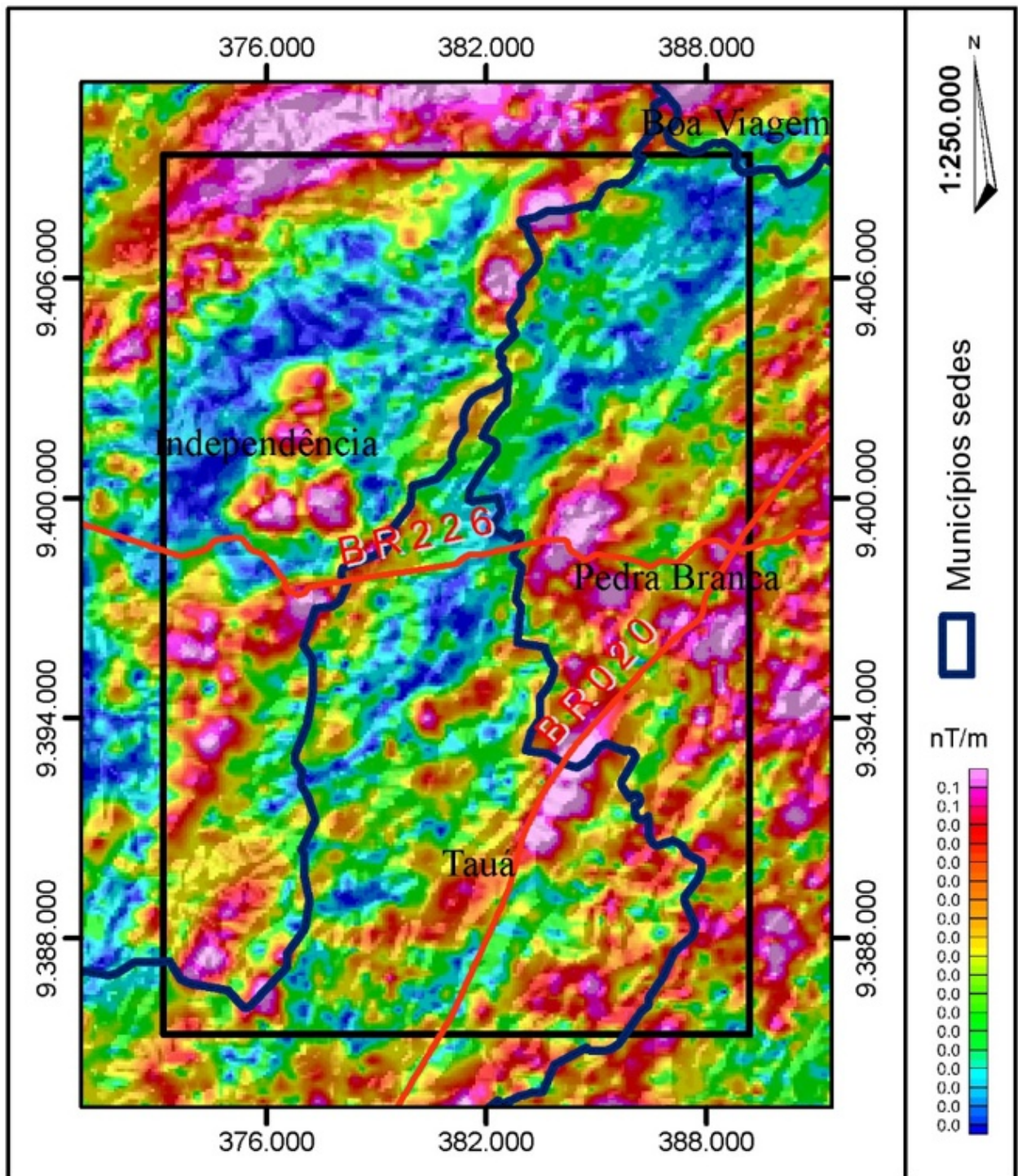


Figura 4: A. Amplitude do Sinal Analítico (ASA) com relevo sombreado (azimute 315° e altitude de 45).

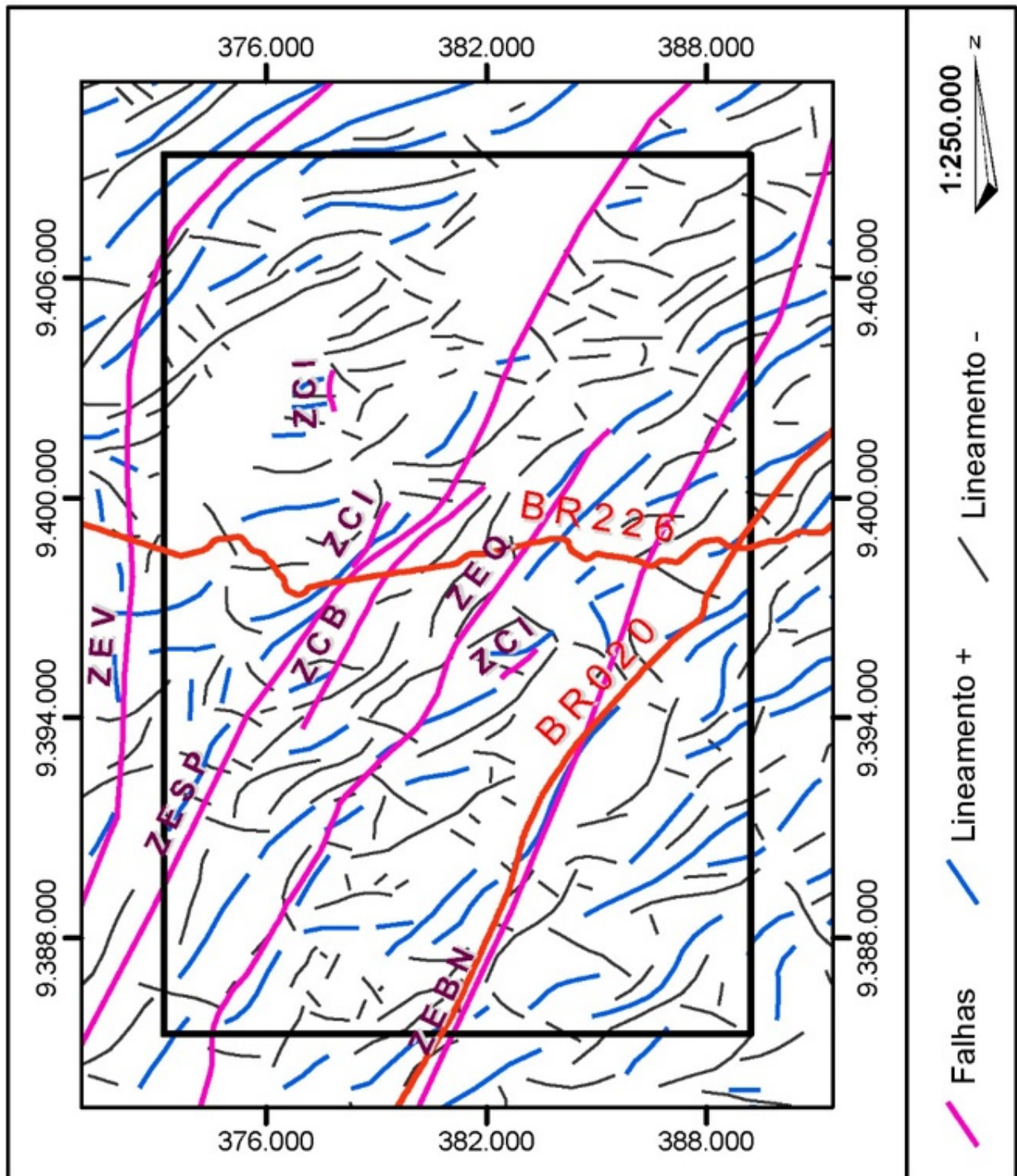


Figura 5: Interpretação dos principais lineamentos estruturais do GBSP. As falhas reconhecidas são Zona de Empurrão Vinte (ZEV), Zona de Empurrão Serra das Pipocas (ZESP), Zona de Empurrão Queimadas (ZEQ), Zona de Empurrão Barra Nova (ZEBN), Zona de Cisalhamento Belém (ZCB) e Zona de Cisalhamento Indiferenciada (ZCI).

O Modelo Digital de Terreno, gerado a partir de dados do radar SRTM (Figura 6) confirma a interpretação das feições

estruturais supracitadas, ao longo dos contatos geológicos entre os domínios gamaespectométricos (Figura 7).

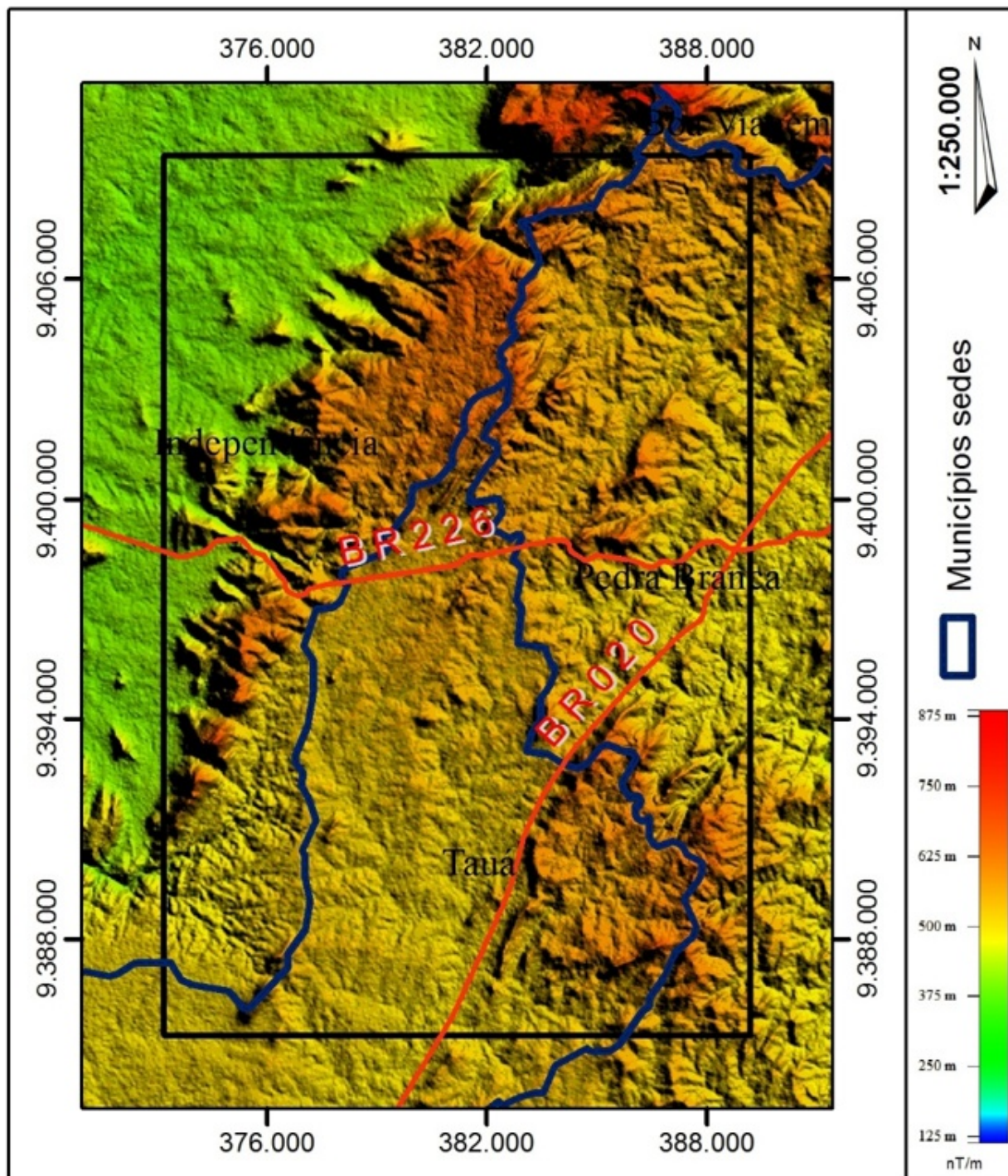


Figura 6: A. Relevo sombreado (azimute 315° e altitude de 45) em dado de SRTM 30m. B. Interpretação estrutural a partir de dados SRTM de 30m de resolução.

Técnica de relevo sombreado realçou a direção dos lineamentos em azimute 315° e altitude de 45, como resultado têm-se os lineamentos

de direção preferencial NE-SW e NW-SE, similar aos descritos anteriormente (Figura 5).

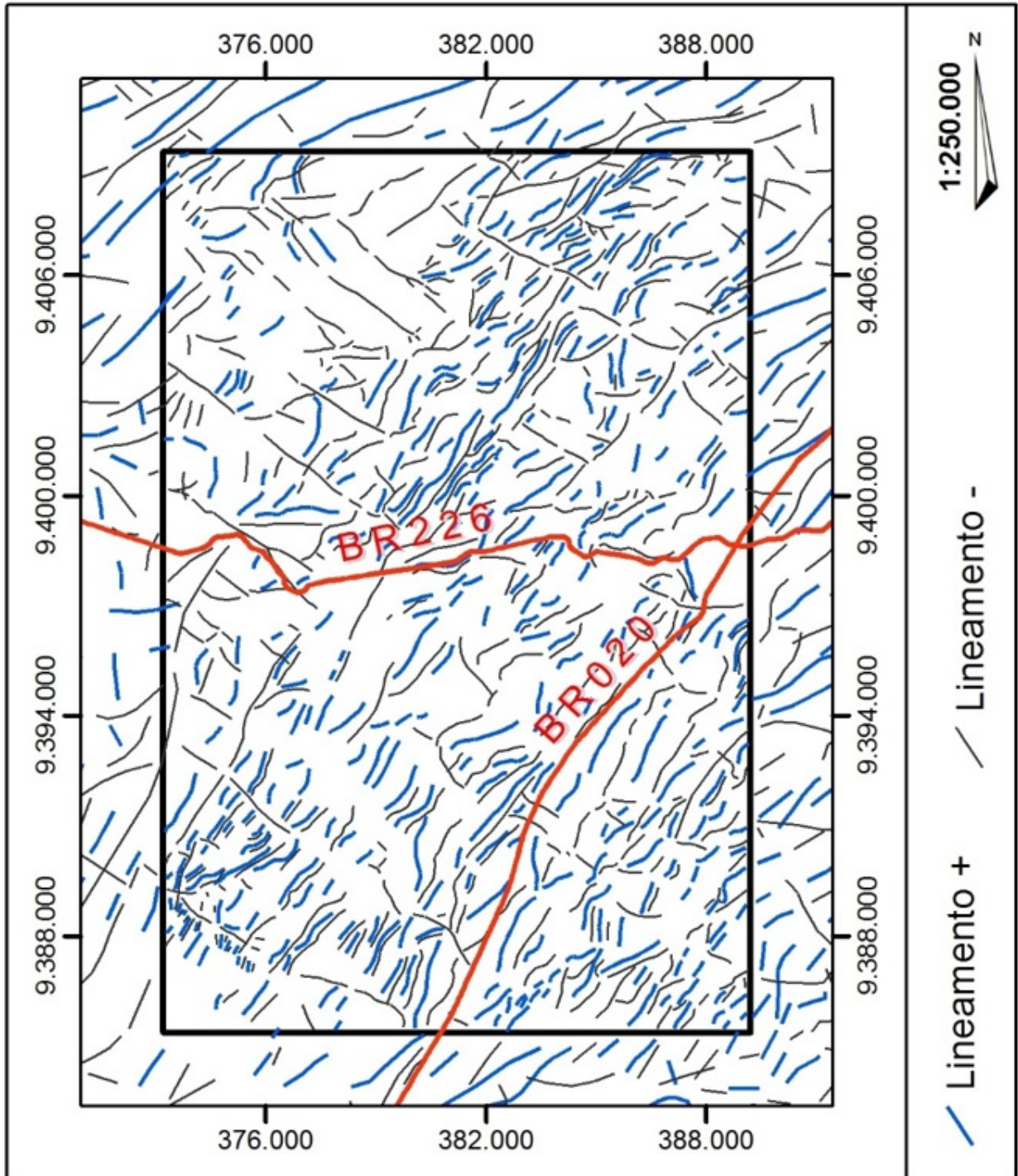


Figura 7: Interpretação estrutural a partir de dados SRTM de 30m de resolução.

4.2 Modelagem de Dados Geológicos

Os domínios geológicos foram traçados através da comparação entre as imagens Landsat 8 e dados gamaespectrométricos (Figura 8), sendo individualizados dez domínios (A a J).

Na fusão ternária dos dados radiométricos foram considerados os padrões de distribuição dos três radioelementos, potássio (K), equivalente tório (eTh) e equivalente urânio (eU).

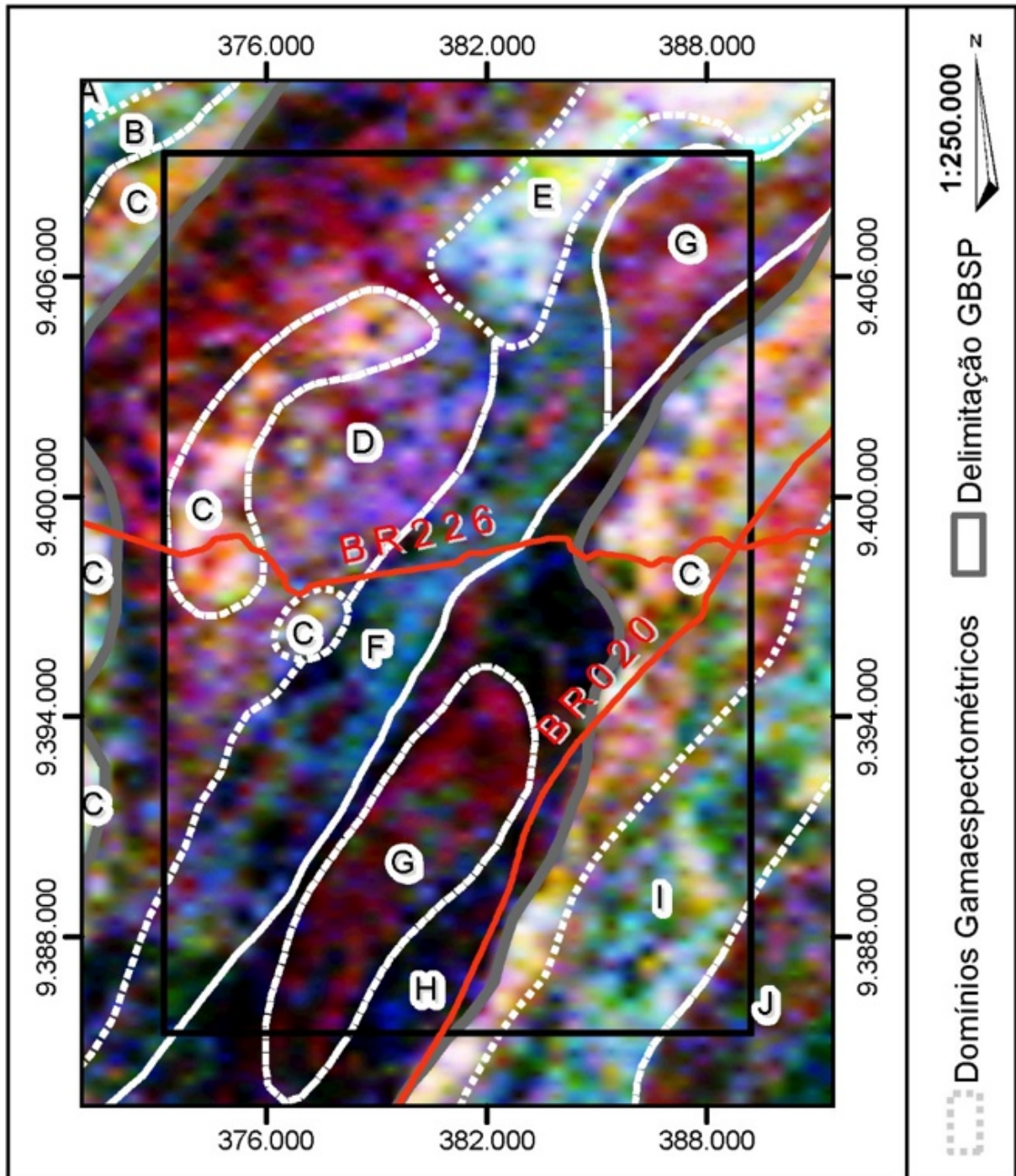


Figura 8: Fusão ternária RGB (KThU) nos dados de Gammaespectrometria e interpretação dos Domínios Geológicos.

A delimitação entre o Complexo Cruzeta, Greenstone Belt Serra das Pipocas e Unidade Independência é identificada pela diminuição dos radioelementos, sinalizada na imagem pelo aumento da tonalidade de cores, em um trend NE-SW, demarcada pelos domínios D e H (Figura 8).

O Complexo Cruzeta compreende o embasamento do GBSP, na porção extremo sudeste da área. No mapa de domínios gamaespectométricos a unidade é correlata, parcialmente, aos domínios magnéticos I (baixo %K, alto eTh, médio eU) e J (médio %K, médio eTh, baixo eTh). A distinção entre esses domínios ocorre pela pequena variação de tório. Há presença de ortognaisses e lentes de anfibolitos associados ao complexo.

Os Domínios B, D, F e H associam-se as rochas do GBSP e ocorrem dispostos na porção central da área de estudo. De maneira geral, este setor é caracterizado por valores baixos a médio dos três radioelementos, com exceção de valores mais elevados de eU, no domínio H. Pelo mapa de domínios gamaespectométricos os domínios B (baixo %K, médio eTh, baixo eU) e F (baixo %K, médio eTh, médio eU) exibem tonalidade esverdeada pela maior presença do elemento Th, pela presença de rochas metamáficas anfibolíticas em ambos e metatufos básicos no domínio F. No domínio D (médio %K, baixo eTh, baixo eU) e H (baixo %K, baixo eTh, alto eU) há uma similaridades em tonalidades azul avermelhada, porém nota-se que a concentração no domínio H é superior. Nos domínios há presença de rochas metamáfica-ultramáficas, metatufos e intrusivas plutônicas.

As assinaturas geofísicas referentes aos Granitoides Indiferenciados, intrudidos no GBSP, são visualizados nos domínios C (alto %K,

baixo eTh, baixo eU), E (médio %K, médio eTh, alto eU) e G (médio %K, baixo eTh, baixo eU), diferenciam-se pela distribuição de potássio.

O Domínio Gamaespectométrico A, limita a porção extremo noroeste da análise, apresenta baixos teores de %K, alto eTh e alto eU. Pela assinatura geofísica e tonalidade ciano, associa-se essas rochas a gnaisses paraderivados aluminosos e migmatitos do Grupo Ceará.

O processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos através do Índice Máfico (Figura 9) permitiu acentuar a delimitação de corpos metamáfico-ultramáficos, a partir das feições com intensidade do campo magnético alto (coloração magenta a vermelha), em relação as unidades adjacentes (coloração verde e amarelo).

O método mostrou eficiência na discriminação das rochas metabásica-ultrabásicas, pois elimina a resposta magnética superficial decorrente de rochas alteradas e solos, e ressalta a resposta magnética da rocha subjacente.

Análogo à identificação das assinaturas geofísicas e espectrais, foram analisadas imagens do satélite Landsat 8. A combinação de falsa cor RGB 765 realçou principalmente os afloramentos de rochas metamáficas, sendo discriminados na imagem pela coloração marrom, de orientação preferencial NE-SW (Figura 10).

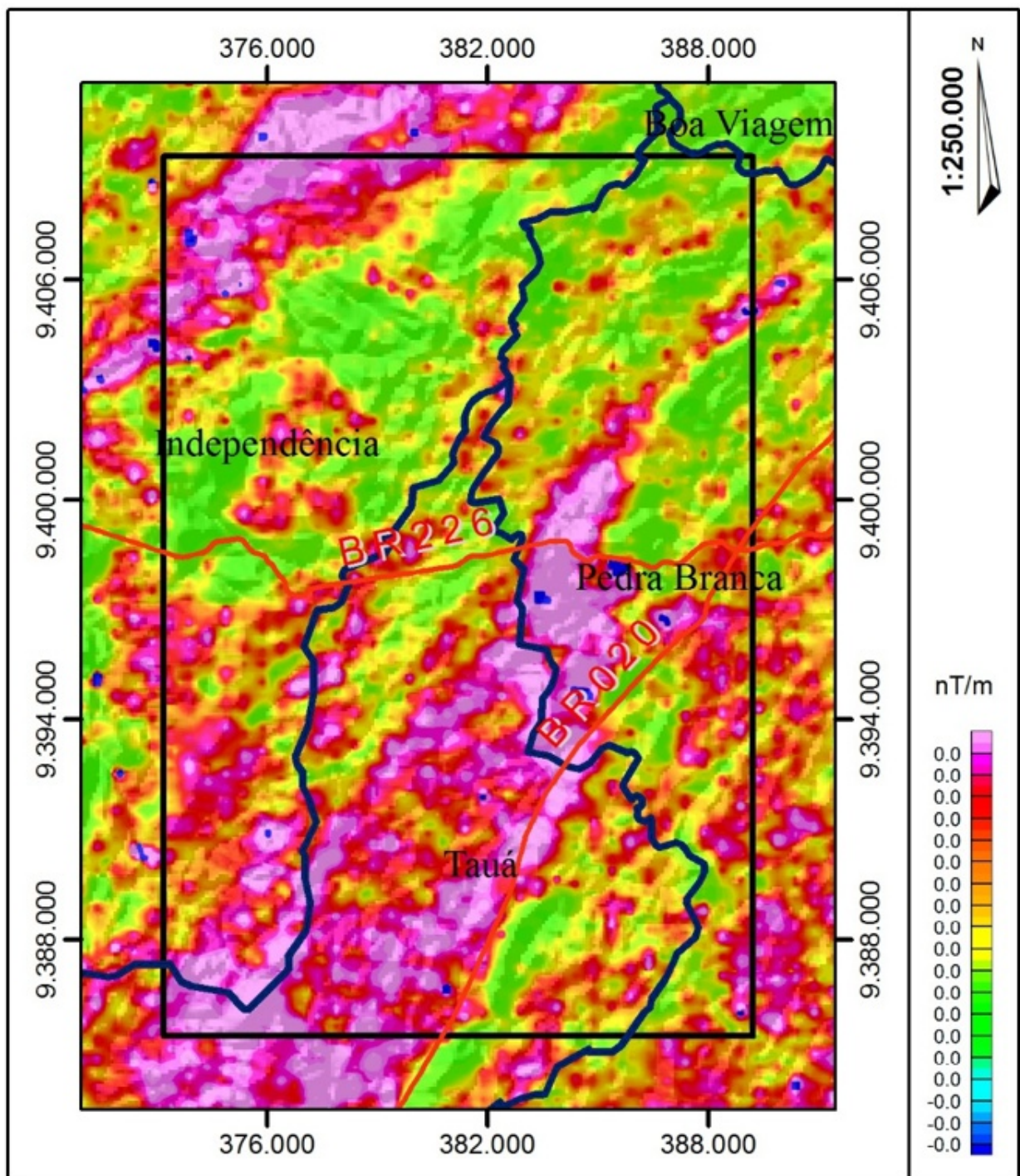


Figura 9: Técnica de índices máficos para realce dos corpos metamáico-ultramáficos, com maior intensidade magnética em magenta.

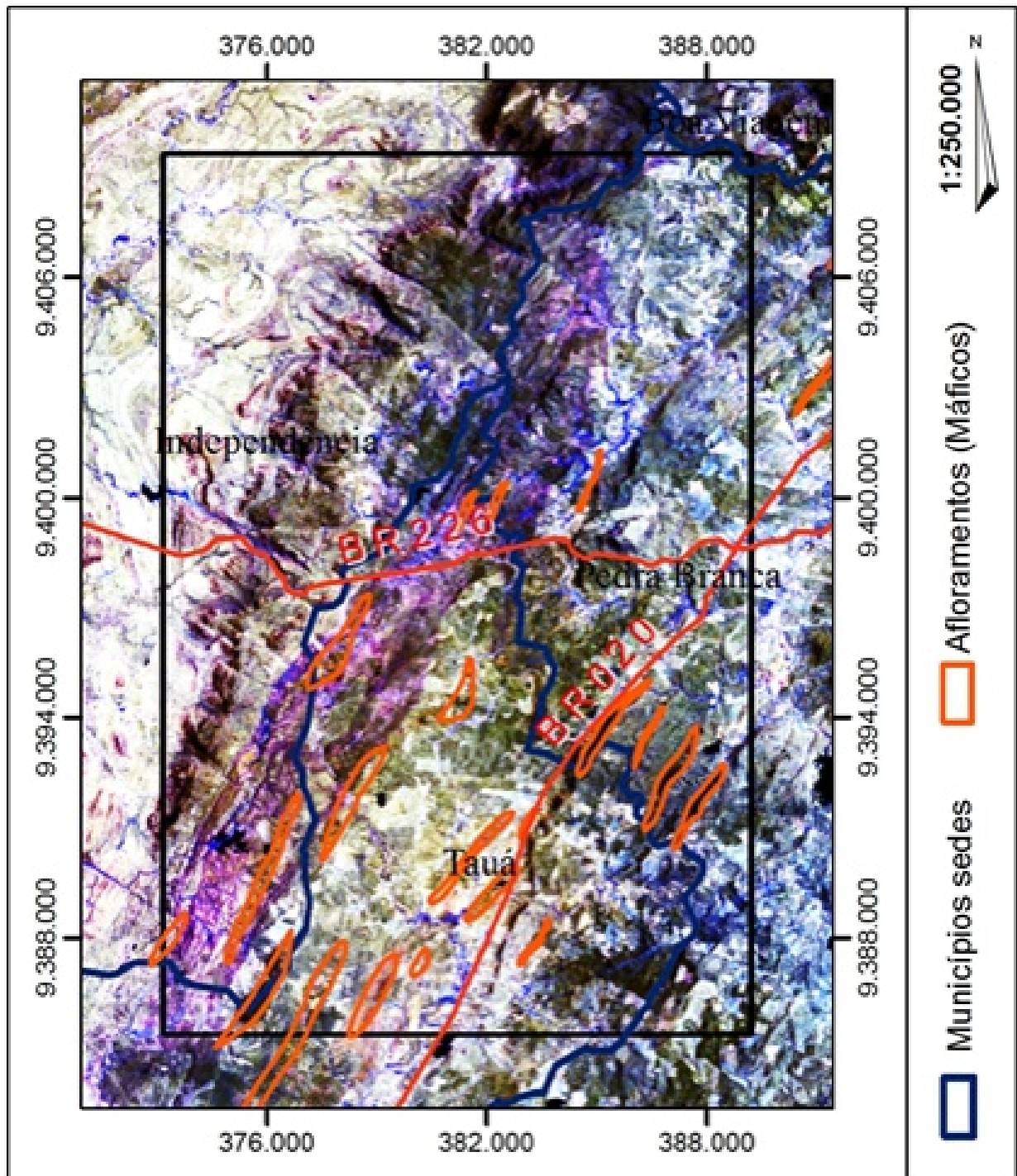


Figura 10: Delimitação dos corpos metamáficos através da combinação falsa cor 765 do sensor OLI do Landsat 8.

5. CONCLUSÃO

No GBSP, a modelagem dos dados estruturais (magnetometria e SRTM) realçou trends NE-SW e NW-SE compatíveis com os averiguados em campo, discriminados como proveniente da deformação Brasileira e tectônica rúptil, respectivamente.

Para a delimitação preliminar dos corpos, lentes e domínios geológicos encontrados na área, técnicas de gamaespectrometria, índice máfico e imagens de satélite do Landsat 8, realçaram de maneira favorável.

Dez domínios gamaespectrométricos foram delimitados baseados nas diferentes texturas, radiação dos raios gama, identificando a composição química das rochas e dos solos sobrejacentes, em imagens ternárias nos canais KThU.

A delimitação dos corpos metamáfico-ultramáfico ocorrem em áreas de relevo acidentado e pobres em radioelementos (tendendo a tonalidade preta), mostrando respostas opostas à dos domínios compostos por rochas félsicas, ricas em radioelementos (tendendo a tonalidade branca). A variação da coloração magenta a vermelho, no índice máfico, denota porções com predominâncias de litotipos e solos típicos de metamáfica-ultramáficas. Os diferentes aspectos texturais na imagem de satélite (Landsat) indica grandes corpos metamáfico-ultramáficos aflorantes, em tonalidade marrom, na composição RGB 765.

Ressalta-se, entretanto, a necessidade de cautela para a interpretação dos dados, pois a análise é somente utilizada como ferramenta auxiliar, não podendo substituir trabalhos sistemáticos de mapeamento geológico. Os dados quando utilizados corretamente funcionam como ferramen-

tas para reconhecimento de tramas estruturais e litológicas complexas.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia de Estudos Tectônicos (CNPq/INCT-ET/Proc.573713/2008-1), ao PROCAD/NF (UFC-UNB), sob os auspícios da CAPES, às Universidades UFC e UNB pelo apoio técnico e laboratorial.

REFERÊNCIAS

- Almeida F. F. M., Hasui Y., Brito Neves B. B., Fuck H. A. 1981. Brazilian Structural Provinces: an Introduction. *Earth Sciences Reviews*, 17: 1-29.
- Almeida F. F. M., Hasui Y., Brito Neves B. B., Fuck H. A. 1981. Brazilian Structural Provinces: an Introduction. *Earth Sciences Reviews*, 17: 1-29.
- Almeida, F.F.M.; Hasui, Y; Brito Neves, B.B.; Fuck, R.A. 1977. Províncias estruturais brasileiras. In: SBG/Núcleo Nordeste, Simp. Geol. NE, 8, Campina Grande, Atas, 363-391.
- Amaral, W.S. 2010. Análise geoquímica, geocronológica e termobarométrica das rochas de alto grau metamórfico, adjacentes ao arco magmático de Santa Quitéria, NW da Província Borborema. Tese de Doutorado, Universidade Estadual de Campinas-UNICAMP.
- Arthaud, M.H. & Landim, D.F., 1995, Relações da Sequência Metassedimentar de Quixeramobim com seu embasamento. 16º Simpósio de Geologia do Nordeste, 1: 125 – 128.
- Arthaud, M.H. 2007. Evolução Neoproterozoica do Grupo Ceará (Domínio Ceará Central, NE Brasil): da sedimentação à colisão continental brasileira. Tese de Doutorado, Instituto de Geociências, Universidade de Brasília.

- Arthaud, M.H., Caby, R., Fuck, R.A., Dantas, E.L., Parente, C.V., 2008. Geology of the Northern Borborema Province NE Brazil and its Correlation with Nigeria, NW Africa, vol. 294. Geological Society, London, Special Publications. pp. 49–67.
- Barton, C.E., Baldwin, R.T., Barraclough, D.R., Bushati, S., Chiappini, M., Cohen, Y., Coleman, R., Hulot, G., Kotz, E.R., Golovkov, V.P., Jackson, A., Langel, R.A., Lowes, F.J., Mcknight, D.J., Macmillan, S., Newitt, L.R., Peddie, N.W., Quinn, J.M. & Sabaka, T.J. 1996. International Geomagnetic Reference Field. 1995 Revision. IAGA Division V. Working Group 8, Phys. Earth Planet. Inter., 97: 23–26.
- Blum, M.L.B. 1999. Processamento e interpretação de dados de geofísica aérea no Brasil central e sua aplicação à geologia regional e à prospecção mineral. 1999. 229 p. Tese (Doutorado em Geologia) - Universidade de Brasília, Brasília-DF, 1999.
- Borges, F. G. S.; Silva, C. D. A. 2012. Contexto Geológico e Tipológico das Ocorrências de Cobre associadas a Granitos Paleoproterozoico de Boa Viagem – Ceará. Relatório de Graduação. Universidade Federal do Ceará.
- Brito Neves B.B., Santos E.J., Van Schmus W. R. 2000. Tectonic History of the Borborema Province. In: U.G.Cordani; E.J. Milani; A Thomaz Filho; D.A. Campos (eds.) Tectonic Evolution of the South America. 31st International Geological Congress, 2000, Rio de Janeiro, Brasil, pp. 151-182.
- Caby R., Arthaud M.H. & Archanjo C.J. 1995. Lithostratigraphy and petrostructural characterization of supracrustal units in the Brasiliano Belt of Northeast Brazil: geodynamic implications. Journal of South American Earth Sciences, 8, 235–246.
- Caby, R. & Arthaud, M. H. 1986. Major Precambrian Nappes of the Brazilian Belt, Ceará, Northeast Brazil. Geology, 14, pp: 871-874.
- Castro, N. A. 2004. Evolução Geológica Proterozoica da região entre Madalena e Taperuaba, Domínio Tectônico Ceará Central (Província Borborema). Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo.
- Cavalcante, J.C., 1999. Limites e evolução do Sistema Jaguaribeano, Província Borborema, Nordeste do Brasil. Dissertação de mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal 183p.
- Cavalcante, J.C., Vasconcelos, A.M., Medeiros, M.F., Paiva, I.P., Gomes, F.E.M., Cavalcante, S.N., Cavalcante, J.E., Melo, A.C.R., Duarte Neto, V.C. & Benevides, H.C. 2003. Mapa Geológico do Estado do Ceará – Escala 1:500.000. Fortaleza, Ministério das Minas e Energia/Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais.
- Cordani, U.G., Pimentel, M.M., Ganade de Araújo, C.E.G. and Fuck, R.A., 2013. The significance of the Transbrasiliano-Kandi tectonic corridor for the amalgamation of West Gondwana. Braz. J. Geol., 43, 583-597.
- Cordell, L. & Grauch, V.J.S. 1985. Mapping basement magnetization zones from aeromagnetic data in the San Juan basin, New Mexico. In: HINZE WJ. (Ed.). The Utility of Regional Gravity and Magnetic Anomaly Maps, Society of Exploration Geophysicists, 181–197.
- Costa, F.G, Evandro L. Klein, E.L.K., Palheta, E.S.M., Naletto, J.L.C., Rodrigues, J.B., Vasconcelos, A.M. 2015.

- Paleoproterozoic Greenstone Belts of the Troia Massif, Borborema Province, NE-Brazil: Rhyacian Crustal Evolution, Neoproterozoic Reworking And Gold Mineralization. *Anais do XXVI Simpósio de Geologia do Nordeste*. p.165.
- De Wit M.J.; Pankhurst R.J., Trouw R.A.J., Brito Neves B.B. 2008. West Gondwana: pre-Cenozoic correlations across the South Atlantic region, Geological Society, London, Special Publications, 294, 430 p.
- Delgado, I. de M. et al., 2003. Geotectônica do Escudo Atlântico. In: Bizzi, L.A., Schobbenhaus, C.; Vidotti, R.M., Gonçalves J.H. (eds). *Geologia, Tectonica e Recursos Minerais do Brasil*. Ministério de Minas e Energias. Serviço Geológico do Brasil – CPRM.
- Fetter, A.H. 1999. U/Pb and Sm/Nd Geochronological constraints on the crustal framework and geological history of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: Implications goes the assembly of Gondwana. University of Kansas, Thesis of Doutorado, 164 pp.
- Fetter, A.H., Santos, T.J.S., Van Schmus, W.R., Hackspacher, P.C., Brito Neves, B.B., Arthaud, M.H., Nogueira Neto, J.A., Wernick, E. 2003. Evidence for Neoproterozoic continental arc magmatism in the Santa Quitéria batholith of Ceará State, NW Borborema Province, NE Brazil: implications for assembly of West Gondwana. *Gondwana Research* 6, 265-273.
- Martins, G. 2000. Litogeoquímica e Controles Geocronológicos da Suíte Metamórfica Algodões-Choró. Dissertação de Mestrado. Instituto de Geociências. Universidade Estadual de Campinas.
- Martins, G., Oliveira, E.P., Lafon, J.M. 2009. The Algodões amphibolite–tonalite gneiss sequence, Borborema Province, NE Brazil: geochemical and geochronological evidence for Palaeoproterozoic accretion of oceanic plateau/back-arc basalts and adakitic plutons. *Gondwana Research* 15, 71-85.
- Miller, H.G. & Singh V. 1994. Potential Field Tilt – a new concept for location of potential field sources. *Journal of Applied Geophysics*, 32: 213–217.
- Minty, B.R.S. 1991. Simple micro-levelling for aeromagnetic data. *Exploration Geophysics*, 22: 591–592.
- Neto, L.F., Ferreira, F.J.F. 2003. Gamaespectrometria integrada a dados exploratórios multifonte em ambiente SIG aplicada à prospecção de ouro na Folha Botuverá, SC. *Brazilian Journal of Geology*.
- Nogueira Neto, J. A. 2000. Evolução Geodinâmica das Faixas Granulíticas de Granja e Cariré, Extremo Noroeste da Província Borborema. Tese de Doutorado. UNESP/SP.
- Pinéo, T.R.G. & Costa, F.G., 2013. Dados aerogamaespectrométricos aplicados na delimitação do Complexo Cruzeta (Maciço Arqueano de Tróia), Domínio Ceará Central da Província Borborema. 13º International Congress of the Brazilian Geophysical Society & EXPOGEF, Rio de Janeiro, Agosto de 2013.
- Pires A.C.B. 1995. Identificação geofísica de áreas de alteração hidrotermal, Crixás-Guarinos, Goiás. *Rev. Bras. Geociências*, 25:61-68.
- Pires, A.C.B. & Moraes, R.A.V. 2006. New processing technologies applied do airborne geophysical data: impact on interpretation. 2º Simpósio Brasileiro de Exploração Mineral, SIMEXMIN, Ouro Preto, MG.

- Rosa Júnior, C.A. 2012. Aspectos Geológicos, Petrográficos e Geoquímicos das Rochas Metamáficas e Metaultramáficas da Sequência Metavulcano-Sedimentar Serra das Pipocas/CE. Relatório de Graduação. Universidade Federal do Ceará.
- Silva, L. C., Armstrong, R., Pimentel M. M., Scandola, J., Ramgrab, G., Wildner, W., Angelim, L. A. A. A., Vasconcelos, A. M., Rizzoto, G., Quadros, M. L. E. S., Sander, A., Rosa, A. L. Z. 2002. Reavaliação da Evolução Geológica em Terrenos Pré-Cambrianos Brasileiros com base em novos dados U-Pb SHRIMP. Parte III: província Borborema, Mantiqueira Meridional e Rio Negro-Jurena. *Revista Brasileira de Geociências*, 32, 529–544.
- Sousa, H.P. 2016. Caracterização das Unidades Máfica-Ultramáficas e Potencial Metalogenético da Sequência Metavulcanossedimentar Serra Das Pipocas (Ceará): Um Provável Greenstone Belt. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Ceará.
- Souza Filho, CR. & Crósta A.P. 2003. Geotecnologias aplicadas à Geologia. *Rev. Bras. Geoc.*, 33(2): 1-4.
- Spector, A. e Grant, F. S., 1970. Statistical models for interpreting aeromagnetic data. *Geophysics*, 35(2): 293-302.
- Vasconcellos, R.M., Metelo, M.J., Motta, A.C. & Gomes, R.D. 1994. Geofísica em levantamentos geológicos no Brasil, CPRM, Rio de Janeiro, 165 pp.