



Interpretação magnética-estrutural de modelos sintéticos e na região do rio Tapajós, Estado do Pará - Brasil

Alessandra de Barros e Silva Bongioiolo¹, Francisco José Fonseca Ferreira¹, 1 – Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada (LPGA/UFPR)

Copyright 2011, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 15-18, 2011.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 12th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

The aim of this work is to evaluate a reduction-to-the-pole filter for magnetic data at low latitudes and its implications for structural interpretation. For this purpose we have analyzed the anomalies generated by several methods of data enhancement with and without reduction-to-the-pole. These methods have been applied to synthetic prisms located at low magnetic latitudes and the resulting anomalies have been compared with those calculated at the magnetic pole. The synthetic models have been generated from a program that calculates the anomalies from prisms with arbitrary dimensions, susceptibilities and depths. The method has also been applied to the magnetic data of the Amazon Basin and the Amazon Craton, (Northern Brazil). For synthetic data, the reduction-to-the-pole algorithm used in this work improved the performance of the enhancement methods, since after its application the maximal amplitude of the transformed anomalies were positioned over the edges of the sources, facilitating the magnetic-structural interpretation. For real data, the good correlation between magnetic lineaments - particularly those inferred by the method of tilt derivative of the total horizontal gradient, recently proposed - and the interpreted geological structures indicate that the reduction-to-the-pole may be applicable even when the data located in low magnetic latitudes.

Introdução e Objetivos

O presente trabalho tem como objetivo principal testar a resposta do sinal magnético de modelos sintéticos em regiões localizadas próximas ao Equador Magnético (latitudes entre +20° e -20°, e.g. Li, 2008) e no polo, para avaliar o desempenho do método de redução ao polo (RTP) nestas regiões, além de discutir os resultados da aplicação de vários métodos de realce de anomalias magnéticas, incluindo a técnica ISA_GHT, recentemente desenvolvida por Ferreira *et al.* (2010). Para tanto foram cotejadas as respostas magnéticas dos métodos de realce, geradas a partir de modelos sintéticos, com base no Programa GRAV_MAG_PRISMA (Bongioiolo *et al.*, em preparação), desenvolvido no Laboratório de Pesquisas em Geofísica Aplicada (LPGA/UFPR). Os vários métodos de realce também foram aplicados a dados reais de uma área localizada na região do rio Tapajós, Estado do Pará,

no contexto da Bacia do Amazonas e do seu embasamento.

Métodos

Neste trabalho a técnica de redução ao polo (RTP) é aplicada em modelos sintéticos e reais, inseridos em ambiente de baixas latitudes magnéticas, onde a técnica de RTP é reconhecidamente instável (e.g. Li, 2008). Para a aplicação do filtro RTP foi utilizado o módulo Magmap do programa Oasis Montaj, onde são requeridos os seguintes parâmetros: inclinação e declinação magnéticas, além de um fator de correção para regiões de baixas latitudes, o qual é relacionado ao complemento da inclinação magnética da área de estudo: por exemplo, caso o valor da inclinação magnética seja -18°, o fator de correção a ser usado será de -72°.

Para avaliar a resposta do sinal magnético de modelos sintéticos 3D localizados no polo geomagnético, na área de estudo e reduzidos ao polo, foi desenvolvido o programa GRAV_MAG_PRISMA (Bongioiolo *et al.*, em preparação), em linguagem MATLAB®, com base na proposta de Bhaskara Rao & Ramesh Babu (1991), cujos parâmetros de entrada são: inclinação, declinação e intensidade do campo geomagnético (IGRF), coordenadas centrais x, y e profundidades ao topo (z) dos prismas, susceptibilidade magnética (κ) e inclinação dos corpos em relação ao Norte. Também foram aplicados os seguintes métodos de realce, com o objetivo de facilitar a interpretação magnética-estrutural (Fig.1): amplitude do sinal analítico (ASA – Nabighian, 1972; Roest *et al.*, 1992), gradiente horizontal total (GHT – Cordell & Grauch, 1985), inclinação do sinal analítico (ISA – Miller & Singh, 1994), gradiente horizontal total da inclinação do sinal analítico (GHT_ISA – Verduzco *et al.*, 2004) e inclinação do sinal analítico do gradiente horizontal total (ISA_GHT – Ferreira *et al.*, 2010).

Os testes foram realizados com base nos modelos 3D da Figura 2, cujos parâmetros geométricos e magnéticos são indicados nas tabelas 1 e 2, respectivamente. De acordo com os dados da Tabela 1, os prismas exibem as mesmas dimensões, porém profundidades ao topo distintas (P1=100m, P2=200m, P3=300m). Conforme a Tabela 2, a magnetização foi considerada induzida ($\kappa = 0.0276$ SI).

Localização e geologia da área de estudo

A área de estudo localiza-se na porção Centro-Oeste do Estado do Pará (Fig.3), abrangendo aproximadamente 27.000 km². É delimitada pelas coordenadas geográficas -3°20' e -4°40' de latitude Sul e -56°30' e -54°50' de longitude Oeste, cujo mapa geológico é apresentado na Figura 4.

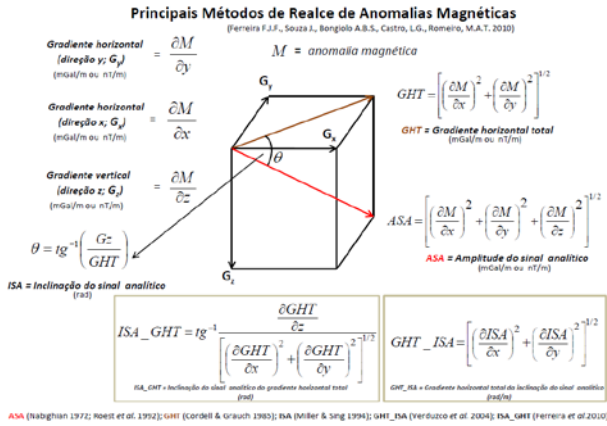


Figura 1 - Métodos de realce de anomalias magnéticas utilizados na pesquisa. ASA (Nabighian, 1972; Roest et al., 1992); GHT (Cordell & Grauch, 1985); ISA (Miller & Singh, 1994); GHT_ISA (Verduzco et al., 2004) e ISA_GHT (Ferreira et al., 2010).

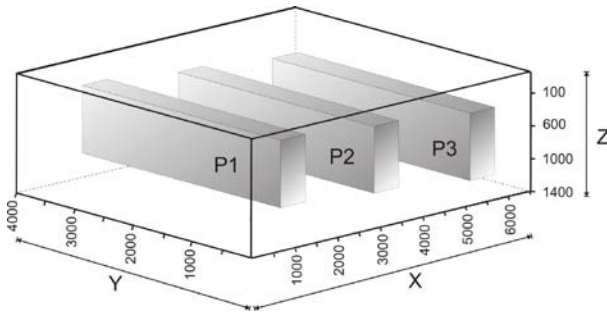


Figura 2 - Representação dos modelos sintéticos 3D.

Tab. 1 - Parâmetros geométricos dos modelos (Fig. 2).

Localização	Prisma P1	Prisma P2	Prisma P3
X (m)	500-1000	3000-3500	5500-6000
X centro	750	3250	5550
Y (m)	500-3500	500-3500	500-3500
Y centro	2000	2000	2000
Z (m)	100-1100	200-1200	300-1300

Tab. 2 - Parâmetros magnéticos dos modelos (Fig. 2).

Parâmetros	Tapajós	Polo
Latitude	-04°00'00"S	85°00'00"
Longitude	-56°00'00"W	132°36'00"
Declinação (D°)	-13°18'	0,0
Inclinação (I°)	+12°34'	90,0
Intensidade (T)	27.865 x 10 ⁻⁹	56.973 x 10 ⁻⁹
Ji (A/m)	0,61	1,25

As principais estruturas que afetam a área são lineamentos/falhas de direção NW bem marcadas, as quais correspondem a falhas transcorrentes com cinemática dextral (Rezende & Brito, 1973) e falhas de transferência (Wanderley Filho, 1991). Estes autores determinaram direções preferenciais NW para o embasamento e NE para a Bacia do Amazonas.

Santos (2010) observou lineamentos que sugerem a presença de falhas importantes com direções principais

de estruturas regionais N50-70W, N60-70E e E-W. As direções NE e NW seguem as grandes estruturas propostas por diversos autores para a Bacia do Amazonas e o embasamento. Por outro lado, poucos trabalhos (Costa, 2002), mencionam as falhas de direção E-W na Bacia do Amazonas.

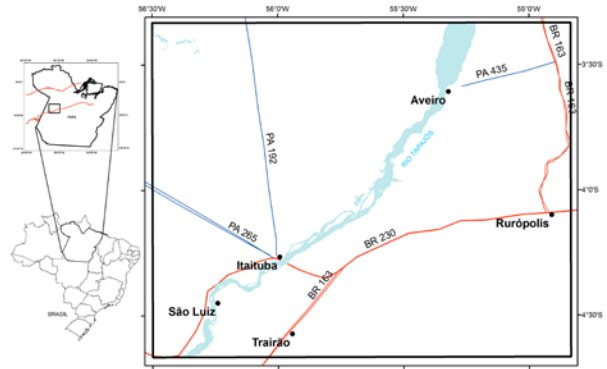


Figura 3 - Mapa de localização da área de estudo.

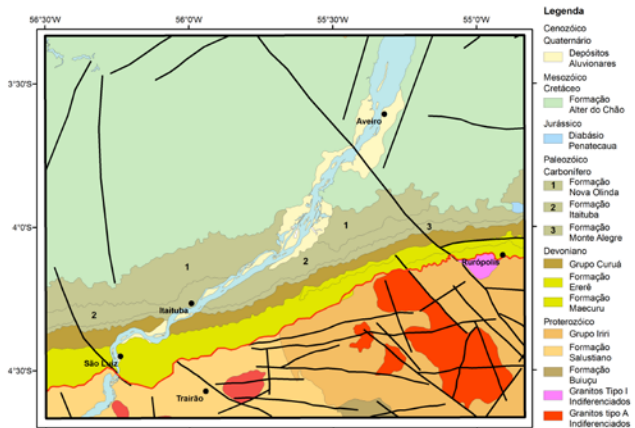


Figura 4 - Mapa geológico da área de estudo (CPRM, 2008). Rio Tapajós (azul), estruturas (preto) e contato embasamento/bacia (vermelho).

Resultados - Dados sintéticos

As figuras 5 e 6 exibem os mapas de realce gerados a partir dos parâmetros geométricos (Tab. 1) e magnéticos (Tab. 2) dos prismas na área de estudo (painel esquerdo), dos dados reduzidos ao polo (painel central) e dos dados no polo (painel direito).

As anomalias do campo magnético da área de estudo (A1, Fig. 5), reduzidas ao polo (A2, Fig. 5) e no polo (A3, Fig. 5) mostram atenuações nas amplitudes, em correspondência ao aumento das profundidades dos prismas.

O mapa de anomalias da área de estudo (A1, Fig. 5) mostra que as bordas dos modelos são delineadas por mínimos e máximos, refletindo o caráter dipolar do campo magnético. Ao aplicar o filtro RTP aos dados anteriores se verifica que os máximos se localizam aproximadamente sobre as fontes (A2, Fig. 5), de forma semelhante às anomalias situadas no polo (A3, Fig. 5).

Os mapas B1, B2 e B3 (Fig. 5), de ASA definem bem as bordas e os eixos de corpos, embora, do mesmo modo, os sinais são atenuados com a profundidade das fontes.

O mapa de GHT (C1, Fig. 5), mostra que este método depende da inclinação magnética, enquanto os mapas C2 e C3 (Fig. 5) revelam que as bordas e os centros dos corpos são delineados por máximos e mínimos, respectivamente, os quais também se atenuam em função da profundidade dos modelos.

O mapa D1 (Fig. 6) mostra que ISA depende da inclinação magnética (e.g. Verduzco *et al.*, 2004), enquanto os mapas D2 e D3 (Fig. 6) mostram a equalização dos sinais nos centros dos corpos.

A técnica GHT_ISA, proposta por Verduzco *et al.* (2004), é independente da inclinação e da intensidade da anomalia, além de realçar e centralizar as máximas amplitudes sobre os limites das fontes. Tais atributos são da maior relevância para a interpretação qualitativa de dados de campos potenciais. Entretanto, ao observar os mapas E1, E2 e E3 (Fig. 6), nota-se também que as amplitudes das anomalias são atenuadas com a profundidade dos modelos, além da profusão de ruídos (E1 e E2) (e.g. Ferreira *et al.*, 2010), dificultando a interpretação estrutural.

O método ISA_GHT, enquanto dependente da latitude magnética (F1, Fig. 6), mostrou resultados satisfatórios só quando aplicado aos dados reduzidos ao polo (F2, Fig. 6), uma vez que as bordas dos prismas são igualmente realçadas por máximas amplitudes do sinal, como decorrência da equalização pelo ISA, portanto sem guardar relação com a profundidade dos modelos (Ferreira *et al.*, 2010), de modo semelhante ao mapa F3 (Fig. 6). Tais resultados se apresentam como feições lineares e contínuas sobre as fontes, melhor refletindo as estruturas geológicas, facilitando a interpretação qualitativa.

Resultados - Dados reais

Os dados aeromagnéticos utilizados pertencem ao Projeto Santarém (Área Leste), cedidos pela Petrobras na forma de malha regular de 1000 x 1000 metros e continuados para uma altura próxima de 1000 m. Tais dados foram levantados em 1981 ao longo de linhas espaçadas em torno de 3000 metros e segundo a direção N-S (CPRM, 2004).

A Figura 7 exibe o mapa magnético residual (painel superior) e reduzido ao polo (painel inferior) na altura de vôo. Posteriormente, os dados reduzidos ao polo foram continuados para cima (2000 e 5000 metros) no intuito de atenuar os ruídos e visualizar os sinais de estruturas mais profundas.

A partir dos dados (RTP) continuados para 2000 m (Fig. 8A) foram aplicados os métodos de realce que utilizam às derivadas de primeira ordem, indicados na Figura 1, cujos resultados podem ser visualizados na Figura 8 (B, C e D). Para os métodos de realce que recorrem às derivadas de segunda ordem (Fig.1), optou-se por utilizar os dados (RTP) continuados para 5000 m (Fig.8, E e F).

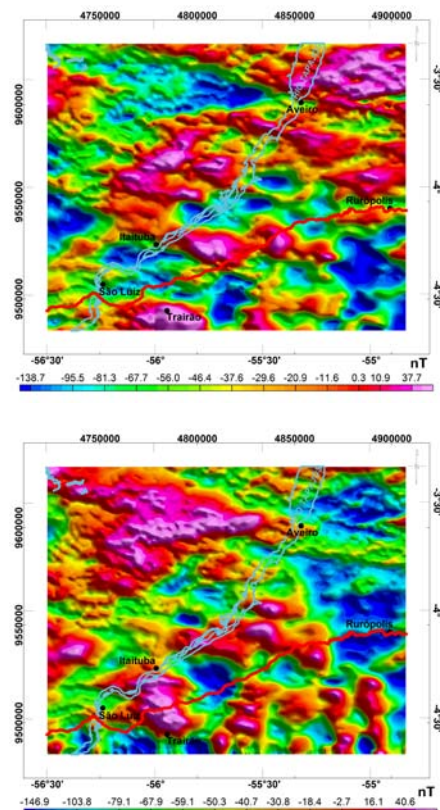


Figura 7 - Mapa magnético residual da área de estudo (painel superior) e reduzido ao polo (painel inferior). Rio Tapajós (azul) e contato embasamento/bacia (vermelho).

O mapa de ASA (Fig. 8B) exibe lineamentos de direções preferenciais NW-SE e WNW-ESE, no contexto do embasamento, os quais adentram a bacia, além de estruturas NE-SW na Bacia do Amazonas. Na Figura 8C, GHT resalta anomalias representativas das bordas dos grandes lineamentos exibidos em ASA (Fig. 8B).

O mapa de ISA (Fig. 8D) resalta tendências de direções NW-SE e WNW-ESE, persistentes na bacia, sendo possível observá-las com clareza na porção Norte da área.

O método GHT_ISA (Fig. 8E), apesar de seus atributos, não apresentou resposta satisfatória. Em contraste, a técnica ISA_GHT (Fig. 8F) evidenciou com maior clareza tendências NW-SE e NE-SW, facilitando a interpretação magnética qualitativa.

O arcabouço magnético-estrutural, resultante da integração dos lineamentos magnéticos, é exibido na Figura 9, na qual são sobrepostas estruturas definidas pela literatura, onde se nota um padrão concordante das direções NW-SE e WNW-ESE, destacando-se os lineamentos Faro-Juruti (NW-SE) e Tapajós (NE-SW).

A Figura 10 foi construída para cotejar as tendências magnéticas da Figura 9 aos lineamentos de superfície obtidos através da interpretação de modelos digitais de elevação (SRTM) realizada por Santos (2010), onde se observa boa correspondência dos padrões estruturais.

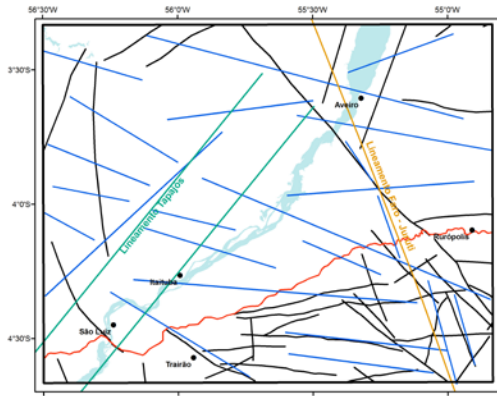


Figura 9 – Mapa de lineamentos magnéticos (azul) indicando estruturas definidas por vários autores (RADAMBRASIL, 1975 – verde; Wanderley Filho, 1991 – laranja; CPRM, 2008 – preto). Rio Tapajós (azul) e contato embasamento/bacia (vermelho).

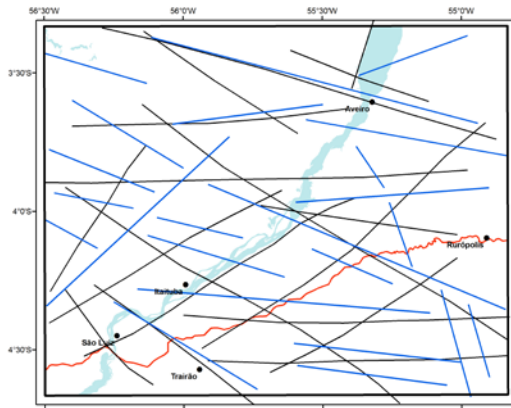


Figura 10 – Mapa de lineamentos magnéticos (azul) e de superfície (preto, conforme Santos, 2010). Rio Tapajós (azul) e contato embasamento/bacia (vermelho).

Conclusões

Em síntese, as respostas dos modelos sintéticos mostraram que, para o ambiente geomagnético da área de estudo, a técnica de redução ao polo (RTP) utilizada minimizou os efeitos da inclinação magnética, apesar das discrepâncias quando comparadas aos dados no polo. As várias técnicas de realce aplicadas aos dados reais reduzidos ao polo foram consideradas eficazes no delineamento do arcabouço estrutural-magnético, com ênfase no método ISA_GHT.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Petrobras pelo financiamento da pesquisa e a CAPES pela cessão de Bolsa de Doutorado (ABSB). F.J.F. Ferreira agradece ao CNPq pela Bolsa de Produtividade em Pesquisa.

Referências

BHASKARA RAO D & RAMESH BABU N. 1991. A rapid method for three-dimensional modeling of magnetic anomalies. *Geophysics*, 56(11): 1729-1737.
 BONGIOLO ABS, DE SOUZA J, FERREIRA FJF & CASTRO LG de. GRAV_MAG_PRISMA: um programa para geração de anomalias gravimétricas e magnéticas de corpos prismáticos (em preparação).

CORDELL L & GRAUCH VJS. 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 Anomalies Maps*. Society of Exploration Geophysicists, p.181-197.

COSTA ARA. 2002. *Tectônica Cenozóica e Movimentação Salífera na Bacia do Amazonas e suas Relações com a Geodinâmica das Placas da América do Sul, Caribe, Cocos e Nazca*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará – UFPA, Belém, 237p.

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. 2004. *Projeto Aerogeofísico Santarém (Área Leste): relatório final do levantamento e processamento dos dados magnetométricos e gamaespectrométricos*. Texto técnico. Rio de Janeiro: PROSPEC S.A. - Geologia, Prospecções e Aerofotogrametria, v.1. 51p. il. anexos + mapas. Programa Geologia do Brasil (PGB).

CPRM – Serviço Geológico do Brasil. 2008. *Programa Geologia do Brasil. Mapas geológicos estaduais escala 1:1.000.000. Geologia e recursos minerais do estado do Pará*.

FERREIRA FJF, DE SOUZA J, BONGIOLO ABS, CASTRO LG de & ROMEIRO MAT. 2010. Realce de anomalias magnéticas do gradiente horizontal total usando a inclinação do sinal analítico. Parte I - Aplicação a dados sintéticos. In: IV Simpósio Brasileiro de Geofísica. 1 CD-ROM, 2193. Brasília-DF.

LI X. 2008. Magnetic reduction-to-the-pole at low latitudes: Observations and considerations. *The Leading Edge*, 27(8): 990-1002.

MILLER HG & SINGH V. 1994. Potential field tilt – a new concept for location of potential field sources. *Journal of Applied Geophysics*, 32(2-3): 213-217.

NABIGHIAN MN. 1972. The analytic signal of two-dimensional magnetic bodies with polygonal cross-section: Its properties and use for automated anomaly interpretation. *Geophysics*, 37(3): 507-517.

RADAMBRASIL. 1975. SANTOS DB, FERNANDES PECA, DREHER AM, CUNHA FMB, BASEI MAS, TEIXEIRA JBG. In: BRASIL. Departamento Nacional da Produção Mineral. Projeto RADAMBRASIL; Folha SB.21 Tapajós. Rio de Janeiro. p. 409 (Levantamento de Recursos Naturais, 7).

REZENDE WM de & BRITO CG de. 1973. Avaliação Geológica da Bacia Paleozóica do Amazonas. In: Congresso Brasileiro de Geologia, 27, Anais, p. 228-245.

ROEST WR, VERHOEF J & PILKINGTON M. 1992. Magnetic interpretation using the 3-D analytic signal, *Geophysics*, 57(1):116-125.

SANTOS TBS. 2010. *Análise Estrutural da Bacia do Amazonas, Região de Itaituba – PA*. Dissertação (Mestrado) - Pós-Graduação em Geologia, Universidade Federal do Paraná (UFPR), Curitiba, 101f.

VERDUZCO B, FAIRHEAD JD, GREEN CM & MACKENZIE C. 2004. New insights into magnetic derivatives for structural mapping. *The Leading Edge*, 23(2): 116-119.

WANDERLEY FILHO JQ. 1991. *Evolução Estrutural da Bacia do Amazonas e sua relação com o embasamento*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Pará (UFPR), 125p.

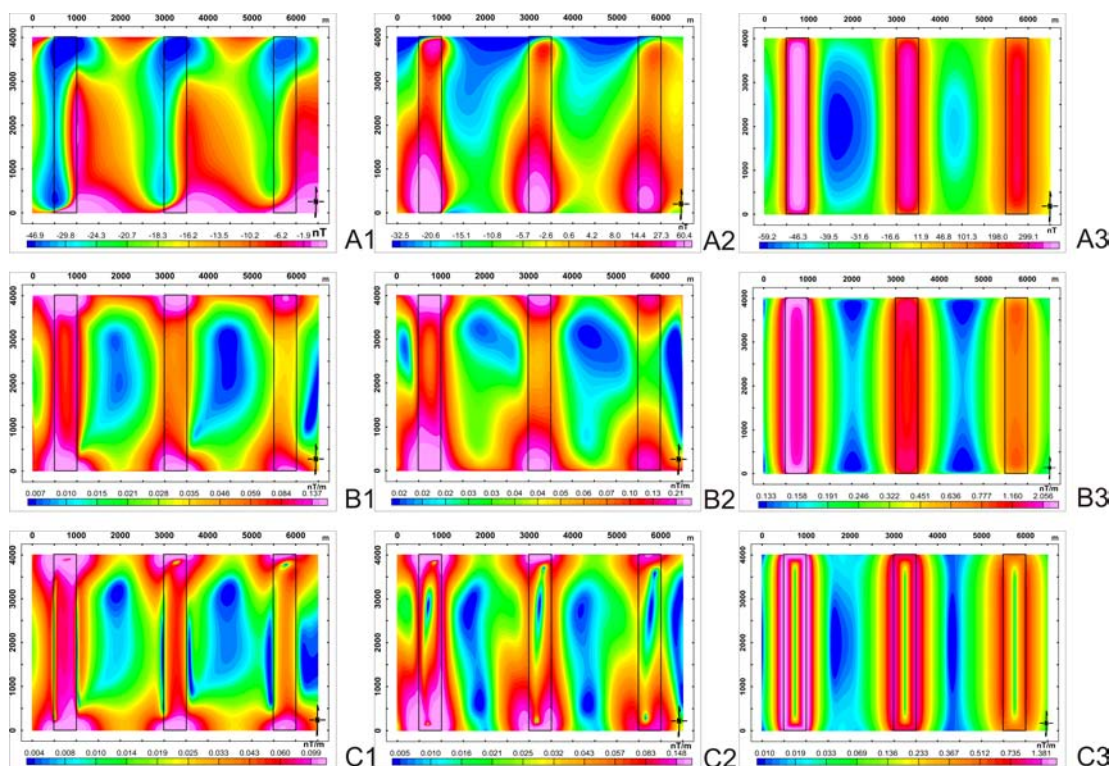


Figura 5 - Mapas do campo magnético anômalo (A1), RTP (A2) e no polo (A3); da amplitude do sinal analítico (ASA- B1, ASA-RTP-B2 e ASA no polo-B3) e do gradiente horizontal total (GHT-C1, GHT-RTP-C2 e GHT no polo-C3).

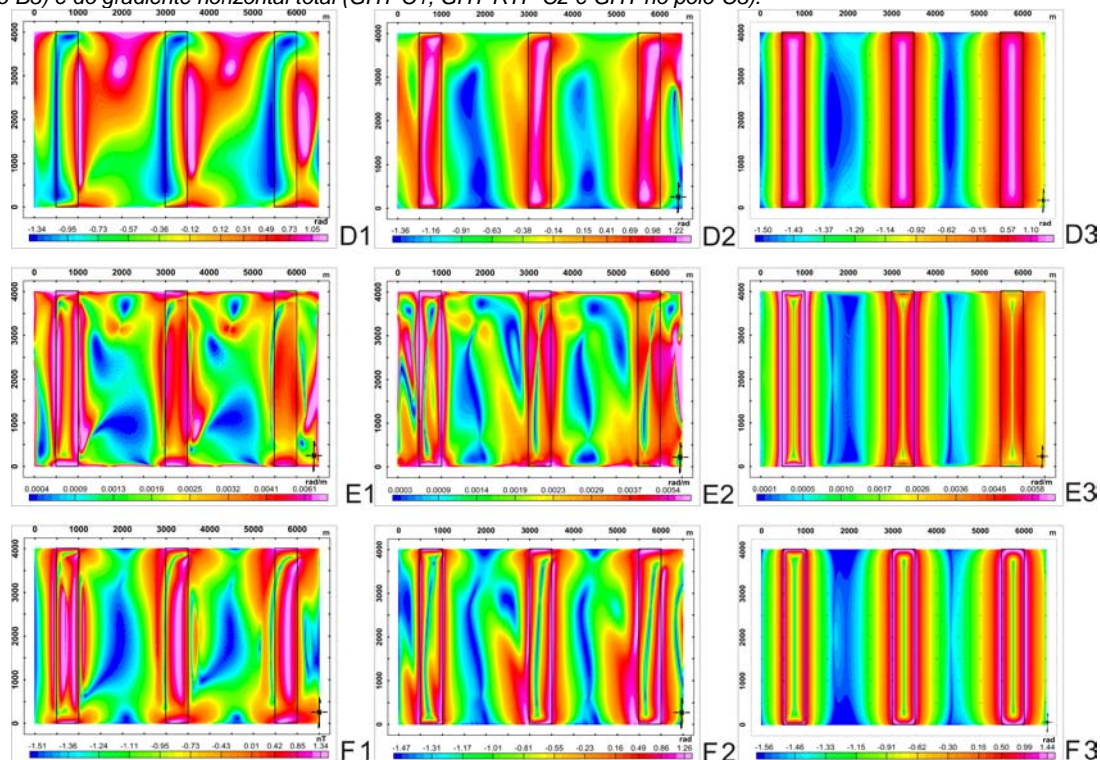


Figura 6 - Mapas da inclinação do sinal analítico (ISA-D1, ISA-RTP-D2 e ISA no polo D3); do gradiente horizontal total da inclinação do sinal analítico (GHT_ISA- E1, GHT_ISA-RTP-E2 e GHT_ISA no polo-E3) e da inclinação do sinal analítico do gradiente horizontal total (ISA_GHT-F1, ISA_GHT-RTP-F2 e ISA_GHT no polo-F3).

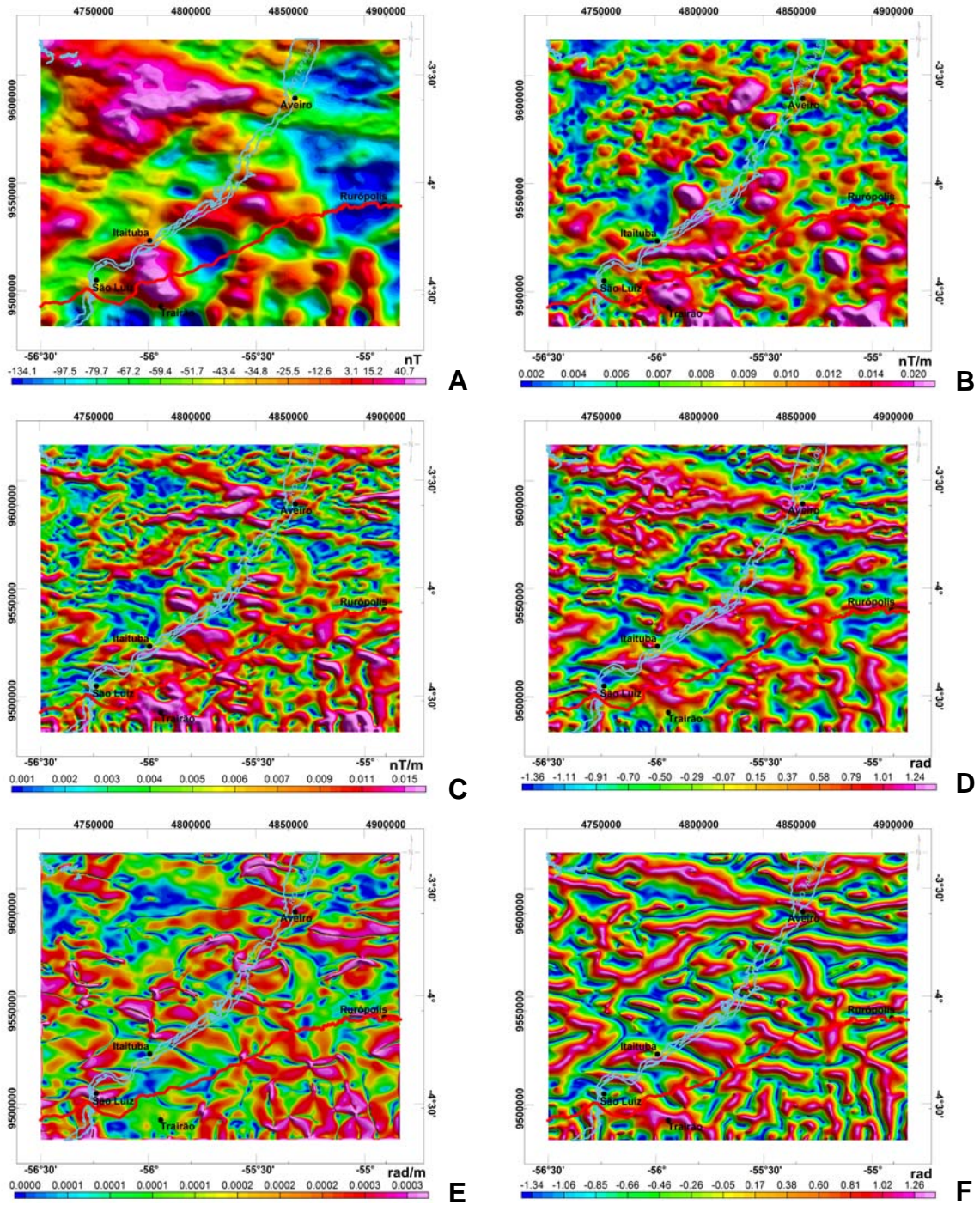


Figura 8 - Mapas derivados da aplicação de métodos de realce: mapa magnético (UW2000m) reduzido ao polo (A), mapa da amplitude do sinal analítico (ASA-UW2000m, B), mapa do gradiente horizontal total (GHT-UW2000m, C), mapa da inclinação do sinal analítico (ISA-UW2000m, D), mapa do gradiente horizontal total da inclinação do sinal analítico (GHT_ISA-UW5000m, E) e mapa da inclinação do sinal analítico do gradiente horizontal total (ISA_GHT-UW5000m, F). Rio Tapajós (azul) e contato embasamento/bacia (vermelho).