



Filtro de Redução ao Pólo: Potencialidades e Limitações

Aline Cristina de Melo, Rodrigo Bijani Santos, Dionísio Uendro Carlos, Cosme F. Ponte Neto, Valéria C. F. Barbosa
(Observatório Nacional – ON/MCT)

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

We demonstrate the potentials and the limitations of applying the reduction-to-the-pole filter to the total field magnetic anomaly in the wavenumber domain. We show that the reduction-to-the-pole technique can be a useful and cost-effective tool for transforming a measured magnetic anomaly caused by an arbitrary source into an anomaly that would be measured at the north magnetic pole. We show that this technique centralizes the magnetic anomaly over their causative source, making magnetic interpretation easier. However, the reduction-to-the-pole technique fails in practice in two cases: (1) if the magnetization direction of the source is unknown and (2) if the reduction-to-the-pole technique is applied at low-latitude magnetic anomalies. These limitations of the reduction-to-the-pole technique are illustrated by synthetic magnetic data. We show that the reduced-to-the-pole anomaly using the wavenumber-domain filtering fails if the magnetic latitude is lower than 15° or if the magnetization of the sources is assumed to be induced only but it is caused by the presence of remanent magnetization. The instability of the reduction-to-the-pole filter is illustrated through the amplitude and phase spectra. Finally, we apply the reduction-to-the-pole filter to two real datasets. The first one is over a buried target from the controlled test site at Vassouras (Rio de Janeiro, Brazil), and the second dataset is over the iron ore province of Minas Gerais State, Brazil.

Introdução

Dados magnéticos sejam terrestres ou aerotransportados são amplamente utilizados na exploração mineral. Diferentemente da gravimetria que considera apenas a densidade das rochas, que é uma grandeza escalar, a magnetometria é mais complexa, pois envolve uma grandeza vetorial: o vetor de magnetização das rochas. Uma forma de simplificar a interpretação da anomalia de campo total é a aplicação do Filtro de Redução ao Pólo (FRP) cujo propósito é centralizar as máximas amplitudes do sinal magnético sobre o centro das fontes geológicas. Neste trabalho demonstramos as potencialidades e limitações na aplicação do FRP. Para esta demonstração utilizamos dados sintéticos e reais, sendo esses últimos

adquiridos em Vassouras (RJ) e numa região no estado de Minas Gerais da anomalia de campo total.

Comportamento Magnético das Rochas: Magnetização Induzida e Remanescente

Pequenas variações na intensidade do campo magnético de uma rocha podem ser determinadas, medindo a susceptibilidade magnética presente em alguns minerais, cuja magnetização pode ser dada de forma induzida ou remanescente. A magnetização induzida é devida a um campo magnético externo atual, cuja intensidade é proporcional à força do campo atuante e variável com a quantidade de minerais magnéticos existentes na rocha, enquanto a magnetização remanescente é uma magnetização adquirida ao longo da história da rocha sendo função dos seguintes fatores associados as rochas: 1) da estrutura atômica, 2) da estrutura cristalográfica, 3) da composição química, 4) da história geológica, 5) da história tectônica, 6) da história térmica.. A magnetização remanescente pode ser originada por uma das seguintes causas: 1) magnetização termo-remanescente; 2) magnetização remanescente química; 3) magnetização remanescente viscosa; 4) magnetização remanescente isotérmica e 5) magnetização remanescente deposicional.

A magnetização total de uma rocha é determinada pela soma da magnetização induzida com a remanescente. A magnetização induzida, depende da posição geográfica da fonte geológica na Terra e portanto é conhecida (Cordani e Shukowsky, 2009). Por outro lado, a magnetização remanescente pode adquirir virtualmente qualquer direção, sendo, portanto um parâmetro muito difícil de ser estimar.

Limitações

O FRP requer o conhecimento da direção (inclinação e declinação) do vetor de magnetização das fontes geológicas. Se a magnetização das rochas for do tipo induzida é admitido que a direção do vetor de magnetização das fontes geológicas seja a mesma do campo geomagnético. Por outro lado, se a magnetização das rochas for do tipo remanescente, então a direção do vetor de magnetização das fontes geológicas será diferente da direção do campo geomagnético. O conhecimento da direção do vetor de magnetização das fontes geológicas é um grande empecilho na aplicação do filtro de redução ao pólo. O uso equivocado desta direção resulta em uma anomalia reduzida ao pólo que não produz um máximo sobre o centro da fonte levando à interpretações errôneas sobre a multiplicidade e forma das fontes geológicas.

Metodologia

Filtro de Redução ao Pólo

O Filtro de Redução ao Pólo é uma técnica muito útil e eficaz, capaz de transformar uma anomalia magnética medida na direção do campo geomagnético local em uma anomalia magnética medida no pólo geomagnético (Mendonça e Silva, 1992). O FRP, no domínio do número de ondas é dado pela expressão (Gunn, 1975; Blakely, 1996):

$$F[\psi_r] = \frac{1}{\theta_m \theta_f} \tag{1}$$

$$\theta_m = \hat{m}_z + i \frac{\hat{m}_x k_x + \hat{m}_y k_y}{|k|} \tag{2a}$$

$$\theta_f = \hat{f}_z + i \frac{\hat{f}_x k_x + \hat{f}_y k_y}{|k|} \tag{2b}$$

em que k_x e k_y são números de onda nas direções x e y , respectivamente, \hat{m}_x , \hat{m}_y e \hat{m}_z são as projeções do vetor de magnetização da fonte geológica nos eixos cartesianos e \hat{f}_x , \hat{f}_y e \hat{f}_z são as projeções do campo geomagnético nos eixos cartesianos.

A Transformada Rápida de Fourier (FFT) transforma a anomalia magnética de campo total medida no domínio do espaço para o domínio do número de ondas. A redução desta anomalia ao pólo geomagnético pode ser realizada através da equação (Blakely, 1996):

$$F[\Delta T_r] = F[\psi_r] F[\Delta T] \tag{3}$$

sendo $F[\Delta T_r]$ o campo magnético total reduzido ao pólo, no domínio do número de onda, $F[\psi_r]$ o operador de filtragem da redução ao pólo (FRP, Equação 1) e $F[\Delta T]$ a anomalia magnética de campo total no domínio do número de ondas. Note que a operação de redução ao pólo requer obrigatoriamente o conhecimento da direção do vetor de magnetização da fonte geológica. O conhecimento da inclinação e declinação do vetor de magnetização da fonte geológica é uma grave limitação na aplicação do FRP.

Problemas em Baixas Latitudes

Independentemente do conhecimento da direção do vetor de magnetização das fontes geológicas, uma segunda limitação do FRP é a sua aplicação em baixas latitudes, onde a inclinação geomagnética é menor que 15° (Silva, 1986 e Mendonça e Silva, 1993). Neste caso, o FRP apresenta instabilidade numérica resultando em feições lineares espúrias. Estes problemas numéricos são facilmente entendidos quando realizamos uma mudança de coordenadas cartesianas para coordenadas cilíndricas. Presumindo que a magnetização é induzida e que a inclinação geomagnética em baixas latitudes é

próxima a zero, então o FRP em coordenadas cilíndricas é:

$$R(r, \theta) = R(\theta) = \frac{-1}{\cos^2(D - \theta)}, \tag{4}$$

em que D é a declinação geomagnética e $\theta = \arctan(k_y / k_x)$. Na prática, de acordo com a Equação 4, o FRP torna-se instável quando em baixas latitudes e $D - \theta = \pm 90^\circ$ (Li, 2008). Neste caso o filtro de redução ao pólo tende a infinito criando feições lineares fictícias no dado transformado na direção da declinação magnética. Nesses casos a sugestão é aplicar o filtro de redução ao equador (Leu 1981, Gilbert e Galdeano, 1985) ou utilizar o princípio da camada equivalente e calcular a redução ao pólo como um problema inverso (Silva, 1986).

Desenvolvimento de Rotinas Computacionais

Para os cálculos da anomalia magnética do campo total, da anomalia magnética reduzida ao pólo, da amplitude e da fase do FRP, foram utilizadas rotinas e sub-rotinas desenvolvidas em Fortran, baseadas nos algoritmos de Blakely (1996).

Resultados Numéricos

Neste trabalho demonstraremos as conseqüências das potencialidades e limitações do FRP através da simulação de seis conjuntos de dados magnéticos sintéticos. Em seguida aplicaremos o FRP a dois levantamentos de dados magnéticos reais, sendo um terrestre realizado na região de Vassouras (RJ) e outro aéreo realizado em uma região do estado de Minas Gerais.

Dados Sintéticos

Simulamos seis conjuntos de dados magnéticos sintéticos. Os quatro primeiros conjuntos simulados de dados magnéticos de campo total foram produzidos por uma esfera isolada de raio 7 m, localizada no centro do sistema de coordenadas cartesianas, com 20 m de profundidade e com magnetização homogênea. A anomalia magnética de campo total foi gerada no plano $z = 0$ m em uma malha regular com 64 x 64 pontos de medidas e com espaçamentos iguais de 1 m ao longo das direções x e y . Estes dados simulados estão em uma área que abrange os intervalos 0 – 63 m em ambas as direções x e y . A esfera está dentro de um meio não magnético. O campo geomagnético apresenta inclinação (I) e declinação (D) iguais a 55° e -48°, respectivamente. A intensidade de magnetização da esfera foi 0,1 A/m. Os parâmetros (i_{tp}) e (d_{tp}) mostram quais valores de inclinação e declinação magnéticas das esferas foram utilizadas durante a redução ao pólo.

Os dois últimos conjuntos de dados magnéticos foram gerados por três esferas cujas coordenadas do centro são dadas por (x_1, y_1, z_1) , (x_2, y_2, z_2) e (x_3, y_3, z_3) . Estas 3

esferas produzem uma anomalia magnética de campo total interferente. As esferas possuem as mesmas inclinação e declinação magnéticas (i_1 e d_1 referentes a esfera 1, i_2 e d_2 referentes a esfera 2 e i_3 e d_3 referente a esfera 3), além de i_{rtp} e d_{rtp} iguais. O campo geomagnético foi simulado com $I = 55^\circ$ e $D = -48^\circ$ respectivamente. A intensidade de magnetização utilizada para cada esfera foi 0,1 A/m.

Em todos os seis testes simulamos medidas terrestres e foi adicionado um ruído pseudo-aleatório de distribuição normal com média zero e desvio padrão de 2% do valor máximo do dado teórico simulado. Apresentaremos uma discussão breve dos seis testes sintéticos. Em cada teste especificaremos a inclinação (i) e declinação (d) das fontes esféricas simuladas bem como a I e D do campo geomagnético e o gráfico da amplitude e fase do FRP.

Dados Reais

Utilizamos dois conjuntos de dados reais. O primeiro conjunto de dados foi adquirido na cidade de Vassouras (RJ) e o segundo, em uma pequena região do aerolevante magnético sobre o estado de Minas Gerais. Os dados terrestres foram adquiridos com um magnetômetro de precessão de prótons, recobrando uma área de aproximadamente 49 m². Os dados do aerolevante magnético foram adquiridos com um magnetômetro de vapor de césio, modelo CS-2 da Scintrex, separação das linhas de voo de 100 m e altura de voo de aproximadamente 100 m, recobrando uma área de aproximadamente 8 km².

Resultados

Testes para Esfera Isolada

No primeiro teste sintético (Figura 1) utilizamos inclinação e declinação da esfera isolada iguais a do campo geomagnético local, ou seja, $I = i = 55^\circ$, e $D = d = -48^\circ$, significando que a magnetização da fonte é induzida. Para a aplicação do FRP, presumimos que a inclinação e a declinação da esfera isolada é igual a inclinação e declinação geomagnética, ou seja, $i_{rtp} = 55^\circ$ e $d_{rtp} = -48^\circ$. Como conhecemos a direção de magnetização da fonte porque a magnetização é induzida, então a redução ao pólo é eficiente. Note na Figura 1 que o valor máximo da anomalia de campo total reduzida ao pólo está perfeitamente centralizado sobre o centro da fonte magnética esférica simulada. Outras ferramentas que auxiliam na verificação da qualidade do FRP são os gráficos da amplitude e da fase pois quando apresentam pequena variação da escala numérica desses gráficos, indicam que o FRP é estável, sem criação de falsas feições.

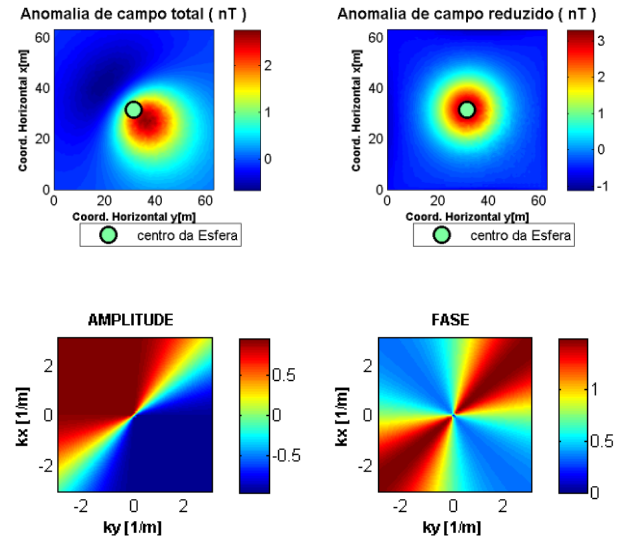


Fig. 1. Teste 1: Anomalia de campo total - superior à esquerda, anomalia de campo reduzido ao pólo - superior à direita, além da amplitude - inferior à esquerda e fase - inferior à direita do filtro de redução ao pólo.

A Figura 2 (Teste 2) simula uma esfera próxima ao equador magnético com magnetização induzida ($D = d = 0^\circ$ e $I = i = 5^\circ$). Neste segundo teste presumimos que conhecemos a direção de magnetização da fonte, i.e., usamos $i_{rtp} = i = 5^\circ$ e $d_{rtp} = d = 0^\circ$. A Figura 2 mostra que anomalia de campo total reduzida ao pólo não foi capaz de centralizar a anomalia magnética criando feições lineares espúrias na direção da declinação magnética que é zero.

Outra forma de concluir a instabilidade do filtro é analisar a variação da escala numérica dos gráficos da amplitude e da fase. Em caso de valores na ordem de 10^2 podemos concluir que o filtro apresentou comportamento instável, pois no Teste 1 (Figura 1) os valores da amplitude e fase são da ordem de 10^1 .

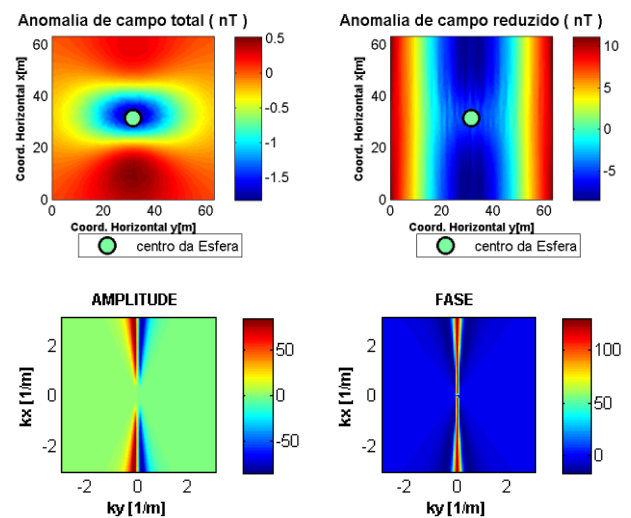


Fig. 2. Teste 2: Simulação próximo ao equador. A amplitude e a fase do FRP apresentaram comportamento instável. Observe a tendência nos gráficos de amplitude e fase acompanhando a declinação do campo geomagnético.

Um estudo importante é simular um corpo isolado com magnetização remanescente conhecida e outro caso em que essa propriedade seja desconhecida. A Figura 3 (Teste 3) mostra o FRP aplicado a uma esfera com magnetização remanescente ($i = -23^\circ$ e $d = 70^\circ$) localizada no centro do sistema de coordenadas e cujo vetor de magnetização é conhecido ($i_{rp} = i = -23^\circ$ e $d_{rp} = d = 70^\circ$). Novamente o campo geomagnético local foi simulado com $D = -48^\circ$, $I = 55^\circ$.

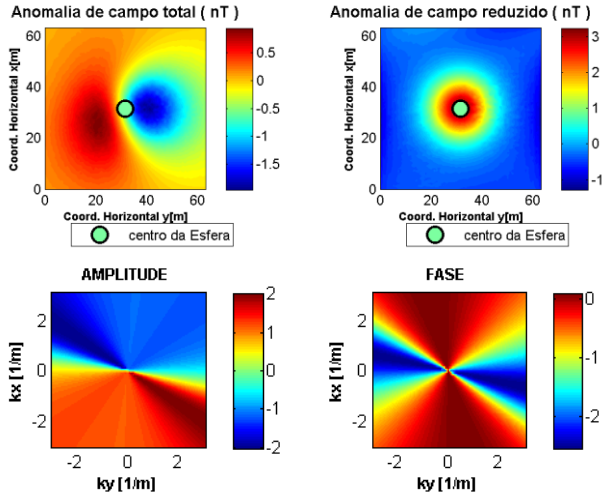


Fig. 3. Teste 3: Caso em que a magnetização é remanescente e conhecida. A amplitude e fase do filtro apresentaram comportamento estável.

Observamos no Teste 3 (Figura 3) que o FRP teve o mesmo comportamento do Teste 1 (Figura 1), o que é esperado devido à similaridade entre os modelos. Uma conclusão preliminar é que o filtro funciona tanto para fontes com magnetização induzida quanto para remanescente, desde que a direção de magnetização da fonte seja conhecida.

A Figura 4 (Teste 4) simula uma esfera isolada de magnetização remanescente ($i = -23^\circ$ e $d = 70^\circ$). O campo geomagnético local apresenta $I = 55^\circ$ e $D = -48^\circ$. Neste teste presumimos que desconhecemos a direção de magnetização da fonte. Presumimos para a redução ao pólo que a magnetização da fonte é induzida, i.e., $i_{rp} = 55^\circ$ $d_{rp} = -48^\circ$. Comparando a Figura 3 com a Figura 4 notamos claramente que o desconhecimento da magnetização remanescente modifica consideravelmente o resultado da redução ao pólo. Este resultado mostra que o conhecimento do vetor de magnetização da fonte é o parâmetro mais importante na aplicação do FRP.

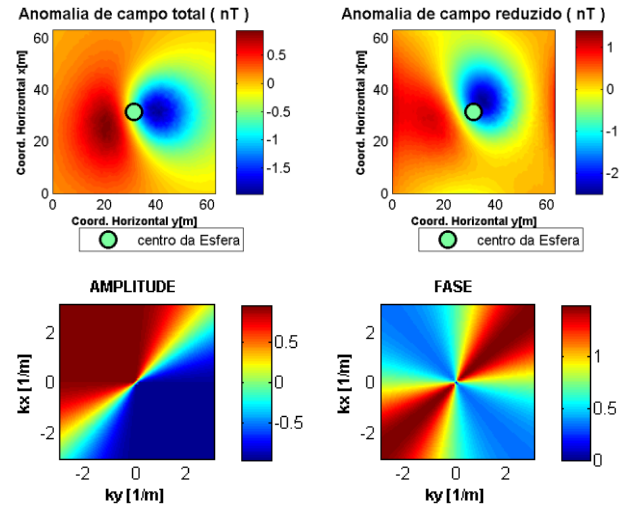


Fig. 4. Teste 4: Caso em que a magnetização da fonte é remanescente e desconhecida pelo intérprete. A amplitude e a fase apresentaram comportamento esperado, ou seja, variação numérica da escala de cores da ordem de 10^1 .

Testes com 3 Esferas

Na Figura 5 as esferas apresentam o mesmo raio, mesma intensidade de magnetização e se encontram afastadas umas das outras. Os parâmetros utilizados neste teste foram: $I = 55^\circ$, $D = -48^\circ$, $i_1 = i_2 = i_3 = 55^\circ$, $d_1 = d_2 = d_3 = -48^\circ$, $i_{rp} = 55^\circ$ e $d_{rp} = -48^\circ$. As posições das esferas foram: $x_1 = 12$ m, $y_1 = 12$ m, $z_1 = 11$ m, $x_2 = 31$ m, $y_2 = 31$ m, $z_2 = 12$ m e $x_3 = 55$ m, $y_3 = 55$ m, $z_3 = 13$ m. As profundidades variam entre 10 e 15 metros. Observa-se que aplicando o FRP as anomalias magnéticas isoladas foram centralizadas sobre as esferas.

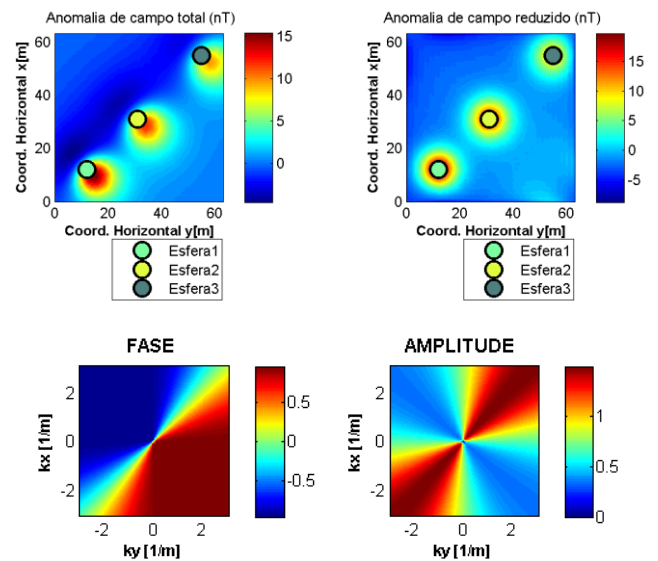


Fig. 5. Teste 5: Anomalia de campo total - superior à esquerda, anomalia de campo reduzido ao pólo - superior à direita, além da fase - inferior à esquerda e a amplitude - inferior à direita do filtro de redução ao pólo. O FRP mostrou-se estável, pois as esferas situam-se em altas latitudes.

Na Figura 6 aproximamos as esferas para aumentar a interferência entre os campos magnéticos. Adicionalmente simulamos esferas com magnetização induzida. Os parâmetros utilizados neste teste foram: $I = 55^\circ$, $D = -48^\circ$, $i_1 = i_2 = i_3 = 55^\circ$, $d_1 = d_2 = d_3 = -48^\circ$, $i_{FRP} = 55^\circ$ e $d_{FRP} = -48^\circ$. As posições das esferas foram: $x_1 = 15$ m, $y_1 = 15$ m, $z_1 = 15$ m, $x_2 = 20$ m, $y_2 = 22$ m, $z_2 = 16$ m, $x_3 = 30$ m, $y_3 = 30$ m, $z_3 = 17$ m. Observamos que o FRP apresenta bons resultados (delimitação da tendência geral das anomalias, direção NE-SW) quando ocorrem a interferência de campos magnéticos próximos gerados por fontes magnéticas muito próximas, porém não isolando cada uma das três anomalias magnéticas.

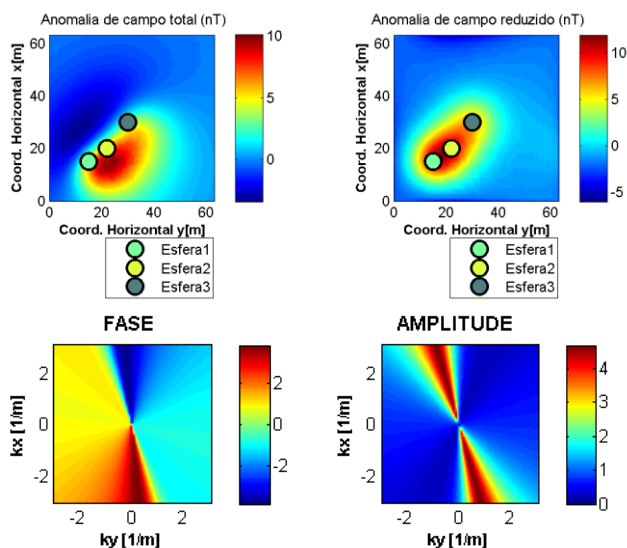


Fig. 6. Teste 6: Três esferas muito próximas. Novamente a amplitude e fase do FRP apresentou estabilidade da ordem de 10^1 . Neste caso observamos que os centros se confundem, mostrando que diante desse conjunto sintético o FRP tende a transformar a anomalia provocada por três esferas em uma anomalia gerada por uma fonte mais alongada.

Dados reais - resultados

A Figura 7 apresenta o levantamento magnético terrestre de Vassouras (RJ). O estudo foi feito sobre uma caixa ferromagnética enterrada contendo materiais também ferromagnéticos. O vetor de magnetização da época do levantamento (IGRF-10) foi de $I = -37^\circ$ e $D = -22^\circ$. O vetor de magnetização da fonte magnética é igual ao do campo geomagnético, ou seja, $i = -37^\circ$ e $d = -22^\circ$, pois materiais ferromagnéticos não possuem magnetização remanescente.

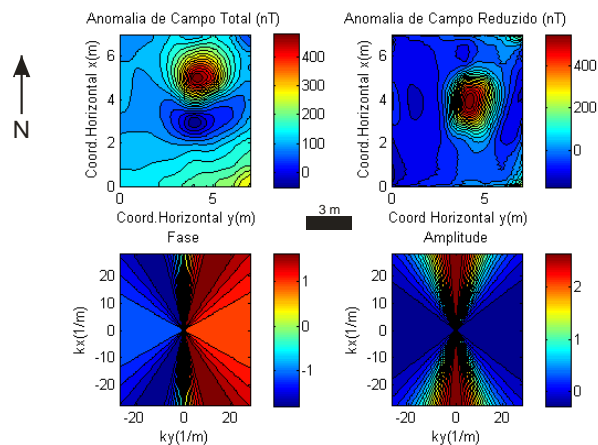


Fig.7. Levantamento magnético terrestre de Vassouras (RJ). Anomalia de campo total - superior à esquerda, anomalia de campo reduzido ao pólo - superior à direita, além da fase - inferior à esquerda e a amplitude - inferior à direita do filtro de redução ao pólo. O FRP mostrou-se estável (observe escalas numéricas dos gráficos da amplitude e fase).

A Figura 8 apresenta a região do aerolevamento magnético de uma área do estado de Minas Gerais. O vetor de magnetização da época do levantamento (IGRF-10) foi de $I = -33^\circ$ e $D = -22^\circ$. A inclinação e declinação utilizadas para a FRP é igual ao do campo geomagnético, $i = -33^\circ$ e $d = -22^\circ$, caracterizando uma magnetização induzida. Essa premissa foi presumida devido ao desconhecimento dos parâmetros de magnetização da(s) fonte(s) magnética(s).

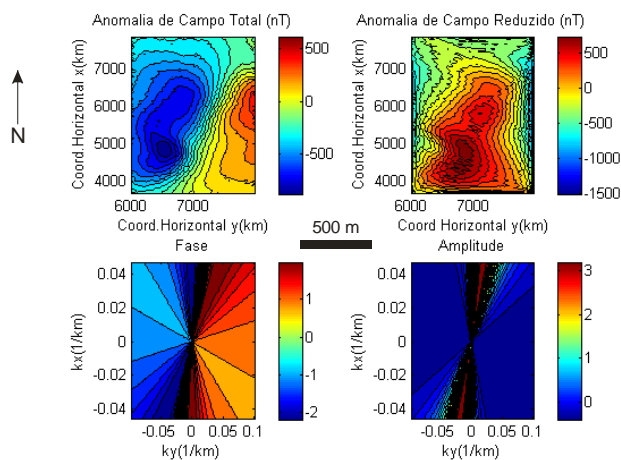


Fig.8. Aerolevamento magnético de uma região do estado de Minas Gerais. Anomalia de campo total - superior à esquerda, anomalia de campo reduzido ao pólo - superior à direita, além da fase - inferior à esquerda e a amplitude - inferior à direita do filtro de redução ao pólo. O FRP mostrou-se estável (observe escalas numéricas dos gráficos da amplitude e fase).

A aplicação do FRP mostrou-se eficaz nos dois conjuntos de dados reais. No caso de Vassouras notamos que o FRP centralizou a anomalia exatamente sobre as fontes magnéticas.

Quanto aos dados de Minas Gerais o FRP não centralizou totalmente as anomalias mas indicou que a anomalia pode ser uma fonte geológica assimétrica e alongada na direção NE-SW.

Conclusões

De acordo com os resultados obtidos, conclui-se que o filtro de redução ao pólo no domínio do número de ondas apresenta bons resultados quando o vetor de magnetização da fonte é conhecido e quando o mesmo é aplicado em latitudes acima de 15° . Apresentamos testes em que o filtro de redução ao pólo se comporta de maneira instável e indesejável, dentre os quais destacam-se testes em que as fontes geológicas estão em baixas latitudes e com magnetização remanescente desconhecida, fato muito comum em dados magnéticos reais. No caso da magnetização da fonte ser induzida, o filtro apresentou resultados concordantes com o esperado. A instabilidade numérica do FRP foi averiguada com base nos gráficos de amplitude e fase, os quais serviram como controle auxiliar do processo de redução ao pólo, indicando que em baixas latitudes, onde a inclinação magnética do campo regional é menor que 15° , o filtro apresenta instabilidade e cria feições lineares espúrias na direção da declinação magnética. Esse filtro deve ser utilizado criteriosamente, pois induz a pseudo-interpretações acerca da multiplicidade e dos centros das anomalias das fontes magnéticas. A aplicação do FRP aos dois conjuntos de dados reais mostrou-se eficiente, pois no caso de Vassouras há a presença de um corpo cujo vetor de magnetização é induzido pelo campo geomagnético. No caso do dado de Minas Gerais, verificamos a presença de pelo menos um corpo alongado na direção nordeste-sudoeste magnético.

Referências Bibliográficas

Blakely, R. J., 1995. *Potential theory in gravity and magnetic applications*: Cambridge Univ. Press, New York, 441 p.

Cordani, R.; Shukowsky, W., 2009. *Magnetização remanescente: um parâmetro crucial para a interpretação e modelamento de anomalias magnéticas em território brasileiro*. Revista Brasileira de Geofísica, v. 27(4), 659-667.

Gilbert, D., Galdeano, A., (1985). *A computer program to perform transformations of gravimetric and aeromagnetic surveys*. Computers and Geosciences 11, 553-588.

Gunn, P. J. (1975). *Linear transformations of gravity and magnetic fields*. Geophysical Prospecting, 23,300-312.

Leu, L. K., (1981). *Use of reduction-to-equator process for magnetic data interpretation*. Fifty-First Annual International Meeting, 445, Society of Exploration Geophysicists.

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

Mendonça, C. A.; Silva, J. B. C., 1992. *Reduction to the pole at low magnetic latitude using a stabilized filter*. SEG Expanded Abstracts 11, 540-543.

Silva, J. B., 1986. *Reduction to the pole as an inverse problem and its application to low-latitude anomalies*. Geophysics 51, 369-382.