



Delimitação crosta continental-crosta oceânica através da magnetometria

Darciléa F. Santos*, CPGf-UFGA, João B. C. Silva, CPGf-UFGA, Valéria C. F. Barbosa, LNCC, e Luiz F. S. Braga, FUGRO

Copyright 2005, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation at the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Salvador, Brazil, 11-14 September 2005.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 9th International Congress of the Brazilian Geophysical Society. Ideas and concepts of the text are authors' responsibility 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 present a method to delineate the boundary separating the oceanic and continent crusts using magnetic data. The method maps magnetic lineaments, which happen to occur solely in the continental crust. To this end, the magnetic signal is amplified by downward continuing the magnetic anomaly to a surface defined by the bathymetry of the continental shelf, continental slope, and part of the continental rise. The purpose is to locate the seaward end of the lineaments. The downward continuation is formulated using the equivalent layer principle, leading to a large-scale system of linear equations, that was solved via a conjugate gradient method. To stabilize the solutions we used the first-order Tikhonov regularization functional (global smoothness constraint). Examples with synthetic data showed that, in contrast with the plain visual inspection of the original aeromagnetic data, which leads to an erroneous delineation of the boundary separating the oceanic and continent crusts, the continued magnetic anomaly delineates this boundary with excellent resolution. The method has also been applied to real aeromagnetic data from a Brazilian coastal area, evidencing that the data window is located above the continental shelf, or, possibly above a transitional crust.

Introdução

As pesquisas em busca de reservatórios potenciais de hidrocarbonetos em águas profundas e ultraprofundas intensificaram-se a partir de 1990, sendo, portanto, de extrema importância, o conhecimento sobre o limite da interface crosta continental-crosta oceânica, pois as condições favoráveis de temperatura e pressão para geração e armazenamento de hidrocarbonetos requerem que os sedimentos estejam depositados sobre a crosta continental.

Na década de 90 a indústria petrolífera tornou a empregar com frequência o método aeromagnético para a prospecção de hidrocarbonetos (Glenn e Badge, 1998). Uma das vantagens do levantamento aeromagnético é o registro de dados em regiões de difícil acesso, além do menor custo por unidade de área de exploração, comparado a outros métodos geofísicos. Adicionalmente, os atuais avanços nos sistemas de posicionamento asseguram uma alta precisão do posicionamento dos dados geofísicos resultando no aprimoramento das interpretações aeromagnéticas.

A susceptibilidade magnética das rochas é a propriedade física de interesse nos levantamentos aeromagnéticos. Embora a susceptibilidade magnética das rochas sedimentares seja muito pequena comparada à susceptibilidade dos outros tipos rochosos, a aeromagnetometria de alta resolução tem possibilitado estudos de estruturas sedimentares.

As rochas do embasamento de bacias sedimentares, entretanto, possuem susceptibilidade magnética suficientemente alta para permitir o delineamento de estruturas do embasamento. Apesar das altas amplitudes da anomalia magnética no embasamento a interpretação direta de dados aeromagnéticos não é capaz de delinear a interface crosta continental-crosta oceânica, pois conforme o levantamento avança em direção a essa interface o sinal magnético diminui devido ao aumento da distância fonte-sensor, sendo necessária informação geológica sobre a área de estudo para definir o limite da crosta continental-crosta oceânica.

O método apresentado neste trabalho amplifica o sinal aeromagnético na região do talude, plataforma continental e da elevação continental, possibilitando o realce de anomalias características da crosta continental, como por exemplo, lineamentos magnéticos. Para acentuar o sinal aeromagnético dos lineamentos procedemos a uma continuação analítica dos dados observados para uma superfície paralela à superfície batimétrica. Para tanto usamos a técnica da camada equivalente (Leão e Silva, 1989), adaptada para obter a continuação para baixo da anomalia observada para uma superfície arbitrária. Como o operador de continuação para baixo é instável, ele foi estabilizado através do operador de regularização de primeira ordem de Tikhonov (Tikhonov e Arsenin, 1977; Medeiros e Silva, 1996).

O método foi aplicado a dados aeromagnéticos sintéticos de um modelo representando lineamentos devidos a fontes magnéticas rasas incrustadas exclusivamente na crosta continental, estendendo-se assim pelo continente e por toda a plataforma continental até a área do talude e da elevação continental. Para testar a eficiência do método e a estabilidade da solução, usamos dados sintéticos contaminados com ruído. O método também foi aplicado a dados reais de uma região costeira do Brasil.

Método

Seja $h(x_i, y_i, z_i)$, $i = 1, 2, \dots, N$, um conjunto de N observações da anomalia de campo total sobre uma região costeira contendo feições lineares magnéticas cortando a crosta continental (Figura 1). As coordenadas x_i e y_i são, respectivamente as coordenadas horizontais nas direções norte-sul e leste-oeste e z_i a coordenada vertical da i -ésima observação.

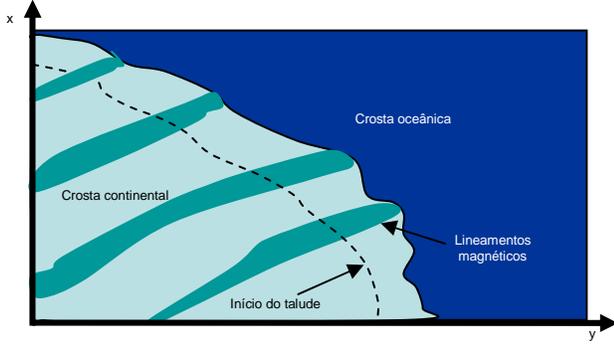


Figura 1- Representação esquemática de uma região contendo feições lineares magnéticas cortando exclusivamente a crosta continental.

Para obter a anomalia continuada, presumimos como modelo interpretativo equivalente uma malha de M fontes de dipolos cujas intensidades de magnetização são os parâmetros a serem estimados. A inclinação e a declinação de cada dipolo é arbitrária. Por simplicidade, os dados magnéticos foram interpolados em uma malha regular com espaçamentos dx e dy ao longo das direções x e y , respectivamente. Também por simplicidade, presumimos que o número de fontes dipolares coincidem com o número de observações magnéticas, sendo as coordenadas de localização x e y de cada dipolo coincidentes com as respectivas coordenadas de localização de uma observação magnética e a coordenada vertical de localização z_o de cada dipolo um valor constante (Figura 2).

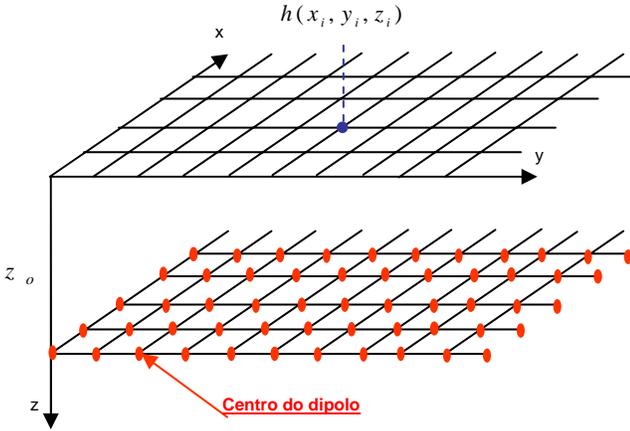


Figura 2- Esquematização da malha contendo M fontes equivalentes de dipolo (pontos vermelhos), $h(x_i, y_i, z_i)$ é a anomalia magnética de campo total na posição x_i (norte-sul), y_i (leste-oeste) e z_i (profundidade).

Como a camada de dipolos é uma aproximação discreta de uma camada equivalente contínua, a anomalia magnética \mathbf{h} relaciona-se à distribuição discreta da magnetização $\mathbf{q}(x_j, y_j, z_o)$ pela equação linear:

$$\mathbf{A}\mathbf{q} = \mathbf{h}, \quad (1)$$

sendo \mathbf{q} o vetor M -dimensional de intensidades de fontes equivalentes dipolares, \mathbf{h} o vetor N -dimensional da anomalias de campo total observada e \mathbf{A} a matriz de Green cujo elemento genérico a_{ij} é expresso como:

$$a_{ij} = \alpha_0 a_x + \beta_0 a_y + \gamma_0 a_z, \quad (2)$$

com

$$a_x = \frac{4\pi r^3}{3} \left[\frac{(2u_{ij}^2 - v_{ij}^2 - w_{ij}^2)\alpha_j + 3u_{ij}(v_{ij}\beta_j + w_{ij}\gamma_j)}{(u_{ij}^2 + v_{ij}^2 + w_{ij}^2)^{5/2}} \right], \quad (3)$$

$$a_y = \frac{4\pi r^3}{3} \left[\frac{(2v_{ij}^2 - u_{ij}^2 - w_{ij}^2)\beta_j + 3v_{ij}(u_{ij}\alpha_j + w_{ij}\gamma_j)}{(u_{ij}^2 + v_{ij}^2 + w_{ij}^2)^{5/2}} \right], \quad (4)$$

e

$$a_z = \frac{4\pi r^3}{3} \left[\frac{(2w_{ij}^2 - u_{ij}^2 - v_{ij}^2)\gamma_j + 3w_{ij}(u_{ij}\alpha_j + v_{ij}\beta_j)}{(u_{ij}^2 + v_{ij}^2 + w_{ij}^2)^{5/2}} \right], \quad (5)$$

em que r é o raio de uma esfera produzindo o mesmo campo do dipolo localizado em seu centro e com o mesmo momento de dipolo, $u_{ij} = x_i - x'_j$, $v_{ij} = y_i - y'_j$, $w_{ij} = z_i - z'_j$, $\alpha_j = \cos I_j \cos D_j$, $\alpha_0 = \cos I_0 \cos D_0$, $\beta_j = \cos I_j \sin D_j$, $\beta_0 = \cos I_0 \sin D_0$, $\gamma_j = \sin I_j$ e $\gamma_0 = \sin I_0$, sendo I_0 e D_0 , respectivamente, a inclinação e o azimute em relação ao eixo x do campo geomagnético; e I_j e D_j a inclinação e o azimute em relação ao eixo x do vetor-magnetização da j -ésima fonte equivalente de dipolo, respectivamente. No cálculo da expressão (2), z_i é igual à altura de vôo em relação ao nível do mar.

O vetor \mathbf{q} é estimado pelo método Paige e Saunders (1982) que consiste em minimizar

$$\left\| \begin{bmatrix} \mathbf{A} \\ \mu \mathbf{R} \end{bmatrix} \mathbf{q} - \begin{bmatrix} \mathbf{h} \\ \mathbf{0} \end{bmatrix} \right\|^2 = \delta, \quad (6)$$

em que \mathbf{R} é a matriz representando o operador discreto diferencial de primeira ordem, que vincula todos os parâmetros adjacentes a assumirem valores próximos entre si (Medeiros e Silva, 1996). Esta matriz possui apenas dois elementos não nulos em cada linha 1 e -1, associados aos parâmetros contíguos e μ é um escalar não negativo.

O campo continuado $\hat{\mathbf{h}}_c$ é obtido numericamente pela transformação

$$\hat{\mathbf{h}}_c = \mathbf{C}\mathbf{q}, \quad (7)$$

em que \mathbf{C} é a matriz de Green, de ordem $N \times M$, do campo continuado (Leão e Silva, 1989) cujo elemento genérico c_{ij} é dado de forma análoga às expressões (2)-(5), sendo que z_i assume agora valores iguais aos do aerolevanteamento ou da batimetria, dependendo se as

coordenadas x_i e y_i estão sobre o continente ou sobre o oceano, respectivamente.

Resultados

1 – Aplicação a dados sintéticos.

O método foi testado em dados sintéticos de um modelo 3-D simulando o ambiente da interface crosta continental-crosta oceânica. Para tanto, foram simuladas feições magnéticas lineares confinadas à crosta continental, (i.e., feições sobre o continente prolongando-se por toda a extensão da plataforma, talude e elevação continental) Estas feições são similares às feições mostradas de modo esquemático na Figura 1. Portanto, a detecção das extremidades de cada feição aeromagnética linear na região do talude implica o delineamento do contato entre as crostas continental e oceânica.

A anomalia magnética sintética 3-D, contaminada com ruído pseudoaleatório Gaussiano com média nula e desvio padrão de 1 nT (Figura 3), foi calculada em uma malha regular de 70x70 pontos nas direções norte-sul e leste-oeste, com espaçamentos $dx = 1\text{ km}$ e $dy = 1\text{ km}$ respectivamente. Esta anomalia foi produzida por feições lineares simuladas por cinco prismas (linhas contínuas brancas na Figura 3) alongados na direção 30° NE cujos topos coincidem com a topografia ou com a batimetria definida na Figura 4, dependendo se as observações estão sobre o continente ou sobre o oceano, respectivamente. Os prismas se estendem pela região a oeste e a leste da linha do início do talude (linha pontilhada na Figura 3). O continente e a plataforma continental estão situados na área a oeste da linha do início do talude. Por simplicidade, presumimos que o gradiente batimétrico nesta região é desprezível; para tanto, nesta região, consideramos que as espessuras verticais dos prismas são constantes e iguais a 2 km. Por outro lado, as regiões do talude, da elevação continental e oceânica estão situadas a leste da linha do início do talude (Figure 3). Na região do talude simulamos um gradiente batimétrico de 5° através do decrescimento contínuo das espessuras dos prismas na região a leste da linha do início do talude. Esse decrescimento é tal que, numa seção vertical ao longo de 30° NE, esses prismas exibem em sua borda NE a forma de uma cunha com a superfície superior formando um ângulo de 5° com a horizontal. A região acima da crosta oceânica é representada na Figura 3 pela área a leste da linha do início do talude sem a presença das feições lineares (prismas).

Como presumimos que os topos destas feições lineares coincidem ou com a batimetria (nas áreas submersas) ou com a topografia (no continente), produzimos a batimetria e topografia sintéticas mostrada na Figura 4 gerada a partir da informação sobre o topto dos prismas que simulam as feições lineares. Na região oceânica (em que há ausência de prismas), estabelecemos uma profundidade de 4km para a batimetria, simulando a profundidade média dos oceanos. Por simplicidade, presumimos que os dados batimétricos sintéticos da

Figura 4 foram interpolados na mesma malha regular usada para obter as observações da anomalia de campo total (Figura 3).

Note que o sinal da anomalia magnética é fortemente atenuado a partir da linha do início do talude em direção a crosta oceânica (Figura 3) não sendo suficiente para delinear as extremidades das fontes prismáticas e, conseqüentemente, delinear a interface crosta continental-crosta oceânica. Para realçar estas feições lineares, a anomalia magnética foi continuada para baixo para a superfície batimétrica (Figura 4).

A profundidade z_0 da camada equivalente foi fixada em 4 km. A Figura 5 mostra a continuação para baixo usando $\mu = 1$ (Equação 6), indicando que a borda da crosta continental pode ser delimitada com excelente precisão pelo presente método através do realce da continuidade dos lineamentos magnéticos a leste da linha de costa.

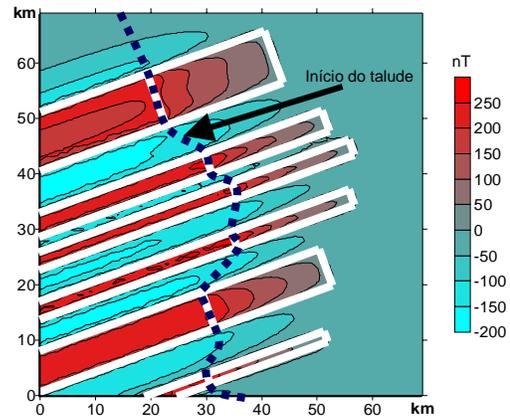


Figura 3 – Anomalia magnética de campo total produzida por cinco prismas (linha contínua branca) simulando lineamentos magnéticos da crosta continental (continente, plataforma continental e talude). A linha pontilhada azul representa o início do talude em que a profundidade batimétrica começa a variar. A área mais a leste sem prismas representam a região oceânica (crosta oceânica).

2 – Aplicação a dados reais.

O método foi aplicado a uma janela de dados aeromagnéticos reais de uma região da costa brasileira. Os dados reais e a batimetria da região, interpolados em uma malha regular de 188 x 144 pontos nas direções x , e y com espaçamentos $dx = dy = 4\text{ km}$, respectivamente, estão mostrados nas Figuras 6 e 7, respectivamente. A Figura 6 possui algumas feições lineares ao longo da direção 70°NE. Observa-se que o sinal dessas feições lineares é atenuado a leste da linha magenta, representando a linha do início do talude. Observa-se na Figura 7 que ao longo da linha magenta o gradiente do talude não é uniforme.

Para obter a anomalia continuada para o nível batimétrico, usou-se $\mu = 1$ e camada equivalente em 4 m. O resultado (Figura 8), mostra a amplificação do sinal produzido pelos lineamentos magnéticos. Observa-se

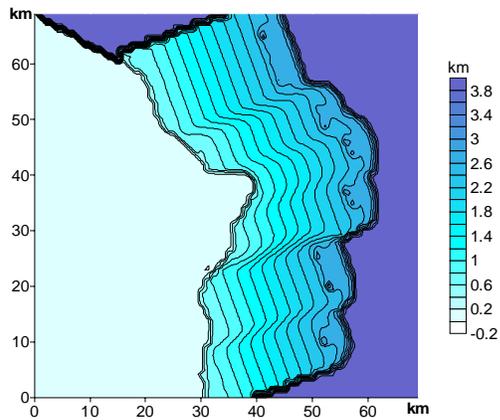


Figura 4 – Batimetria sintética da região costeira cujos dados magnéticos estão simulados na Figura 3

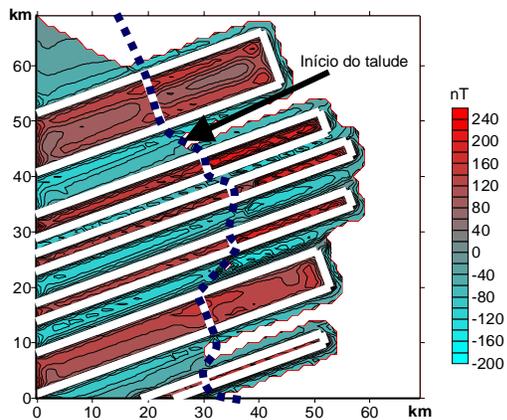


Figura 5 – Anomalia magnética continuada para a superfície batimétrica mostrada na Figura 4 usando $\mu = 1$. A linha pontilhada azul representa o início do talude em que a profundidade começa a variar. Os prismas estão representados pela linha contínua branca.

que a leste da linha do início do talude o campo continuado realça a continuidade de várias feições lineares existentes na janela de dados. Outros lineamentos aparecem realçados na região a leste da linha do início do talude, mas não de forma contínua em relação aos lineamentos visíveis na região à oeste da linha do início do talude. Estes resultados indicam que a janela de dados está provavelmente localizada na crosta continental, ou próxima a uma crosta transicional, sendo necessária uma janela de dados maior a fim de melhor delinear a interface crosta continental-crosta oceânica.

Conclusão

Este trabalho apresentou um método para o delineamento da interface crosta continental-crosta oceânica. O método é fundamentado na teoria da continuação analítica da anomalia magnética para uma superfície arbitrária, implementada através do princípio

da camada equivalente. A continuação pra baixo é efetuada para a superfície batimétrica compreendendo a plataforma continental e o talude. Como a operação é instável, usou-se o operador de regularização de primeira ordem de Tikhonov (vínculo de suavidade global) para a obtenção de soluções estáveis.

Como os sistemas lineares envolvidos na solução do problema de camada equivalente são de grande porte, eles foram resolvidos através do método do gradiente conjugado

Testes em dados sintéticos mostraram a potencialidade do método para realçar a continuidade de lineamentos magnéticos circunscritos à crosta continental e assim, permitir uma boa estimativa do limite crosta continental-crosta oceânica no plano horizontal.

Na aplicação a dados reais de uma região brasileira costeira, o presente método apresentou evidências que a janela de dados reais estudada está sobre a crosta continental, havendo possíveis sub-áreas, provavelmente localizadas em uma crosta transicional.

Agradecimentos

Este trabalho é financiado pelo projeto CTPETRO (CNPq) definido no contrato 504419/2004-8. Os autores agradecem ao convênio UFPA-PRH-ANP-MCT-06 pelo suporte financeiro e à Fugro Airborne Surveys por fornecer os dados aeromagnéticos usados neste trabalho. Adicional suporte financeiro aos autores D.F.S., J.B.C.S. e V.C.F.B foi fornecido pelo CNPq pelo projeto definido no contrato 505265/2004-4. Um dos autores (V.C.F.B.) também recebeu apoio de projetos de pesquisas financiados pelo CNPq (contrato No. 472229/03-6) e pelo CNPq/FAPERJ (contrato No. E-26/170.733/2004). Os autores J.B.C.S. e V.C.F.B agradecem o apoio financeiro recebido através do CNPq via bolsas de Pesquisa.

Referências

- Glenn, W. E., e Badge, R. A.,** 1998. High Resolution aeromagnetic surveys for hydrocarbon exploration: prospect scale interpretation: Canadian Journal of Exploration Geophysics, 34, 97-102.
- Leão, J. W. D., e SILVA, J. B. C.,** 1989. Discrete linear transformations of potencial field data: Geophysics, 54, 497-507.
- Medeiros, W. E., e Silva, J. B. C.,** 1996. Geophysical inversion using approximate equality constraints: Geophysics, 61, 1678-1688.
- Paige, C. C., e Saunders, M. A.,** 1982. LSQR: An algorithm for sparse linear equations and sparse least squares: ACM Transactions on Mathematical Software, 8, 43-71.
- Tikhonov, A.N. e Arsenin, V.Y.,** 1977. Solutions of ill-posed problems: V.H.. Winston & Sons.

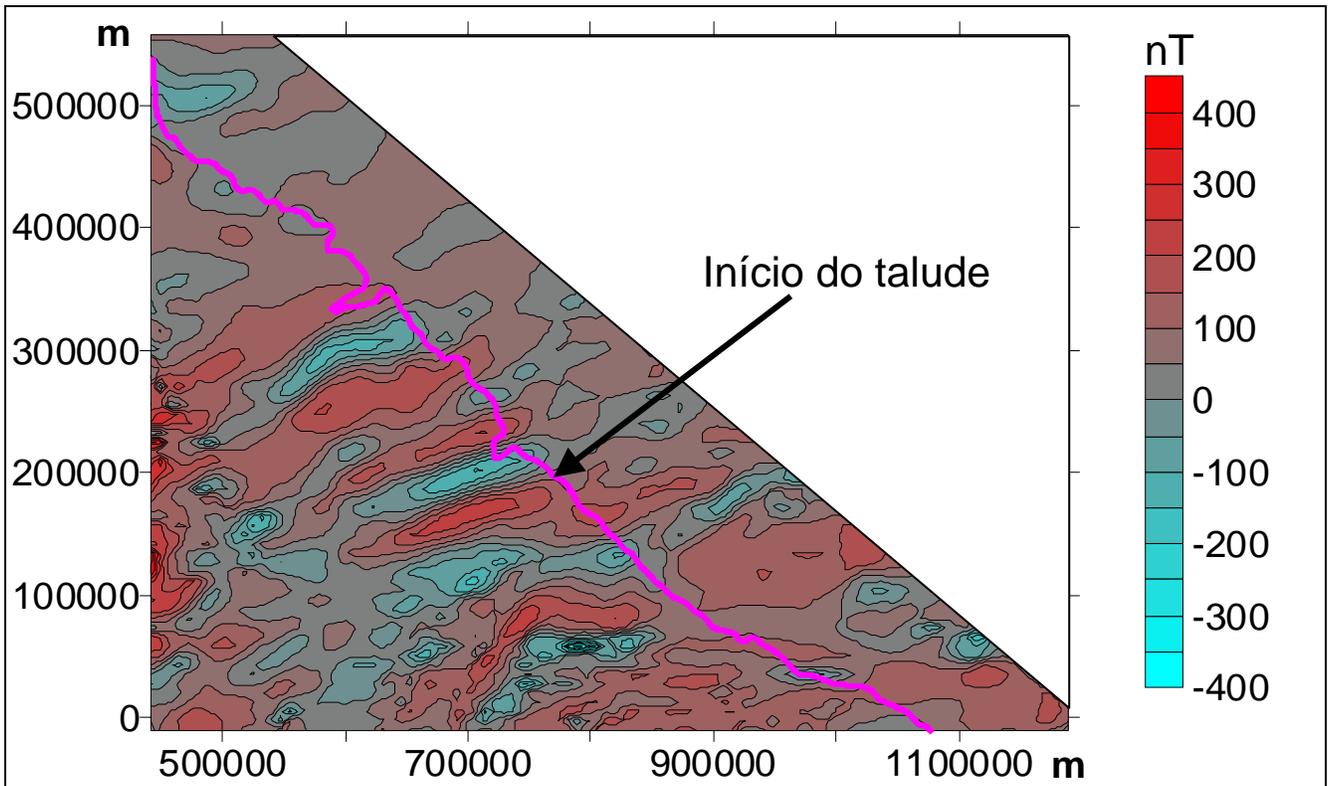


Figura 6 – Dados Reais: janela de dados da anomalia de campo total de uma região brasileira costeira. A linha pontilhada magenta representa o início do talude em que a profundidade começa a variar.

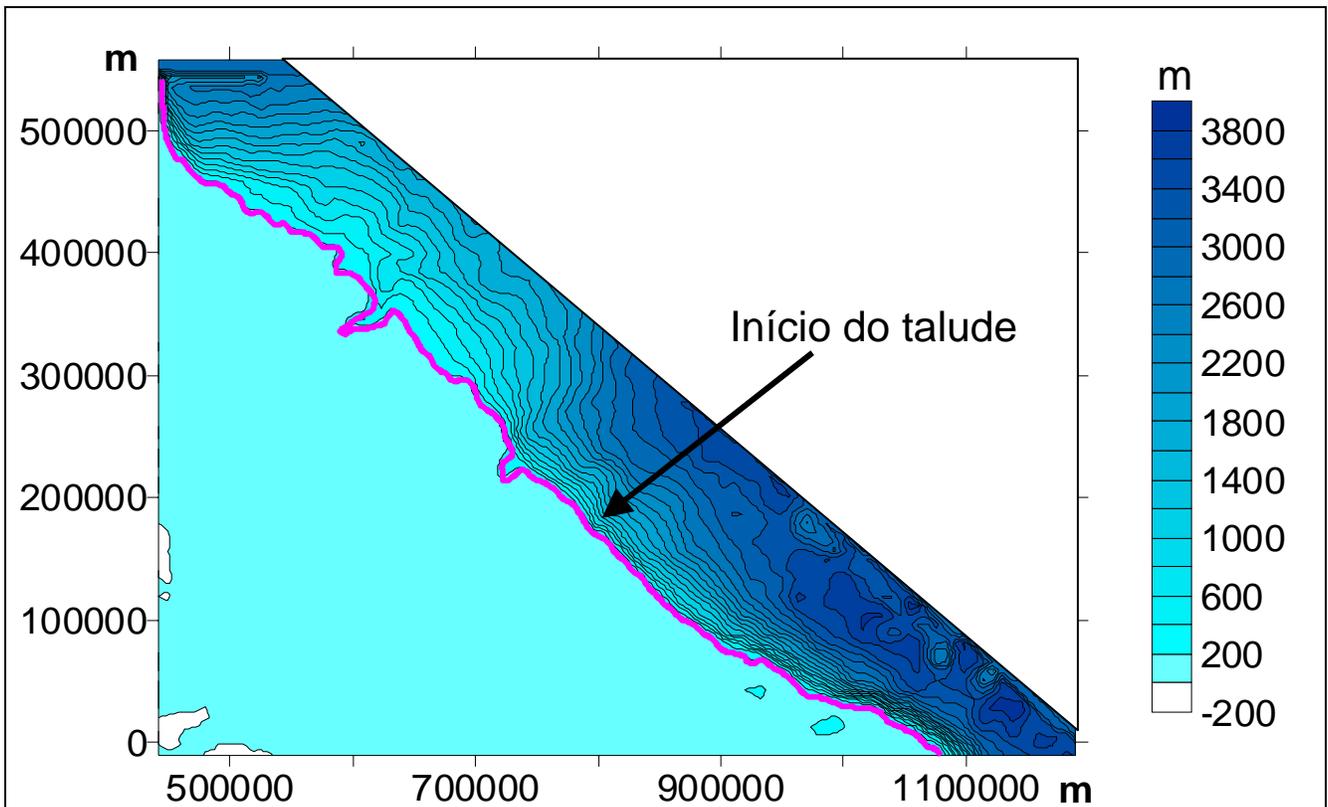


Figura 7 – Batimetria da região costeira brasileira. A linha pontilhada magenta representa o início do talude em que a profundidade começa a variar.

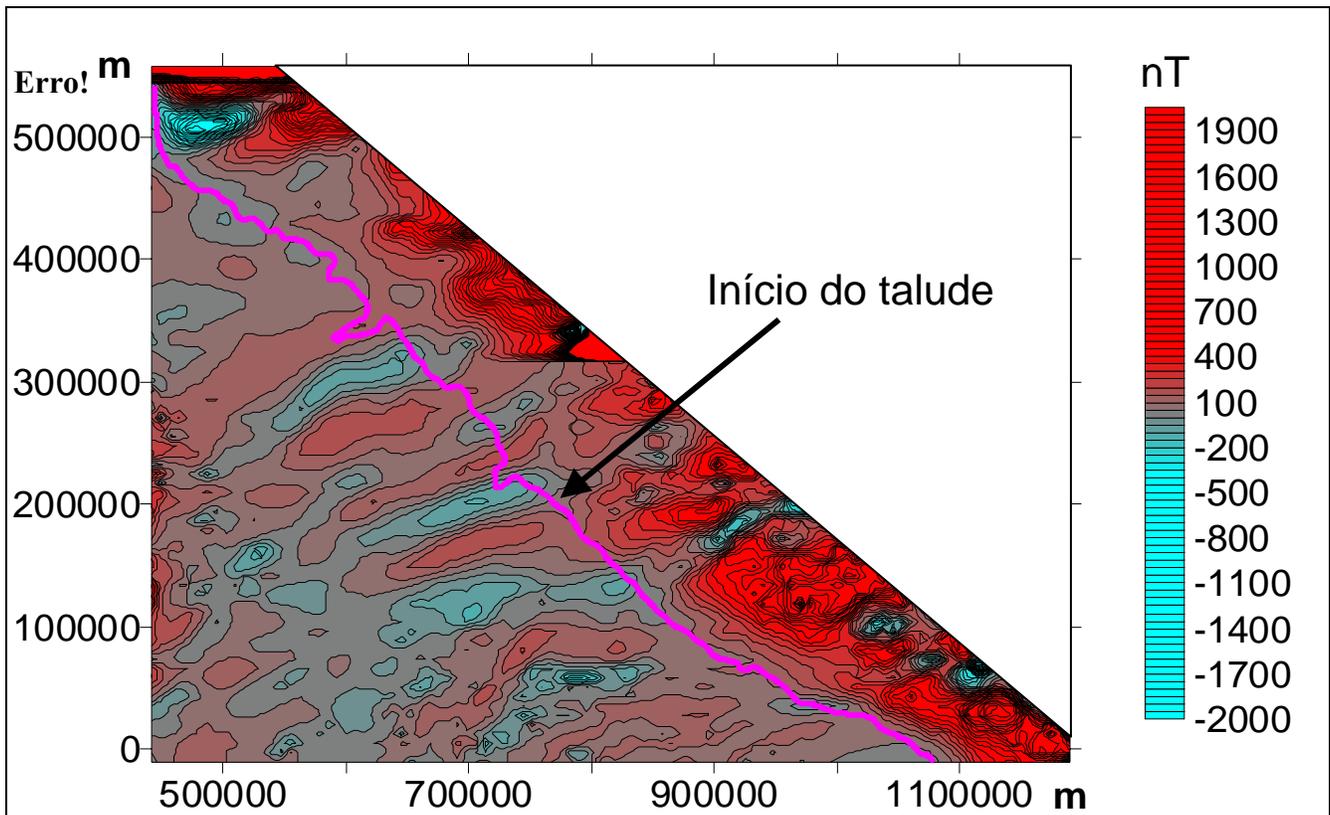


Figura 8 – Anomalia magnética de campo total continuada para a superfície batimétrica (Figura 7) usando $\mu=1$. A linha pontilhada magenta representa o início do talude em que a profundidade começa a variar.