

descrever esses tipos de corpos geológicos.

O CAMPO DE UMA DISTRIBUIÇÃO CONTÍNUA E UNIFORME DE DIPOLOS MAGNÉTICOS AO LONGO DE UMA SEMI-RETA INCLINADA

Formulação do Problema

Uma semi-reta inclinada, contendo uma distribuição contínua e uniforme de dipolos magnéticos, tem sua extremidade superior localizada a uma distância h abaixo de um datum horizontal. Os cossenos diretores da linha são $p, 0, n$, e os cossenos diretores de seu momento de dipolo por unidade de comprimento, \vec{J} , são L, M, N .

O problema consiste em deduzir a expressão para a componente do campo magnético causado por essa semi-reta, na direção do campo geomagnético local. Para tanto, será conveniente empregar um sistema retangular $X'Y'Z'$, cuja relação com o sistema retangular X, Y, Z , de acordo com Officer (1974, p.4), é a seguinte:

$$\begin{vmatrix} X' \\ Y' \\ Z' \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} n & 0 & -p \\ 0 & 1 & 0 \\ p & 0 & n \end{vmatrix} \begin{vmatrix} X \\ Y \\ Z \end{vmatrix} \quad (1)$$

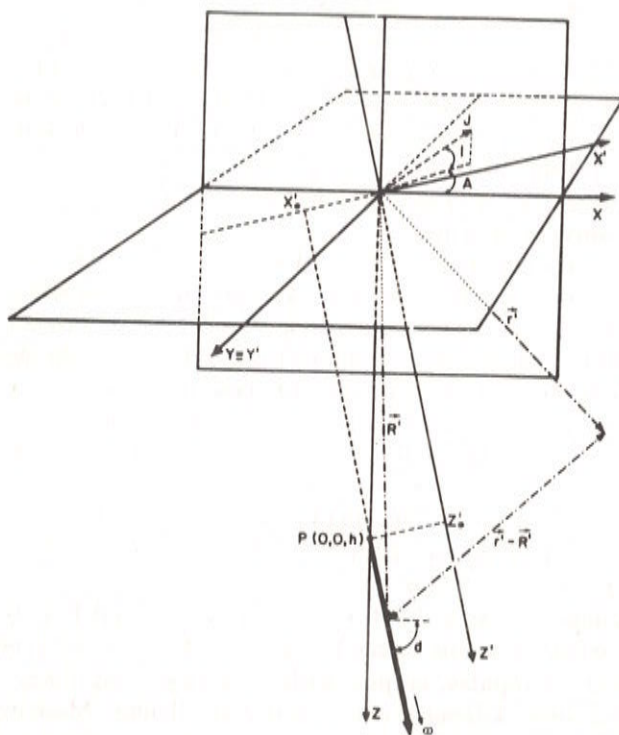


Figura 1. Representação do modelo da semi-reta com inclinação d e magnetização linear \vec{J} .

Figure 1. Representation of the dipping half-line of dipoles with an inclination d and linear magnetization \vec{J} .

Conforme mostra a Fig. 1, o vetor \vec{R}' define a posição de um elemento da semi-reta, e o vetor \vec{r}' define um ponto de observação onde,

$$\vec{R}' = X'_0 \vec{i}' + Z' \vec{k}', \quad (2)$$

$$X'_0 = -ph, \quad (3)$$

$$Z'_0 = nh \leq Z' < +\infty, \quad (4)$$

$$\vec{r}' - \vec{R}' = (x' - X'_0) \vec{i}' + y' \vec{j}' + (z' - Z') \vec{k}', \quad (5)$$

e o produto escalar $\vec{J} \cdot (\vec{r}' - \vec{R}')$ é dado por

$$\vec{J} \cdot (\vec{r}' - \vec{R}') = JL[n(x' - X'_0) + p(z' - Z')] + My' + N[-p(x' - X'_0) + n(z' - Z')]. \quad (6)$$

Determinação da Função Potencial

O potencial magnético da semi-reta de dipolos pode ser expresso, de acordo com Grant & West (1965, p. 213), através da integral

$$V = \int_{Z'_0}^{\infty} \frac{\vec{J} \cdot (\vec{r}' - \vec{R}') dZ'}{|\vec{r}' - \vec{R}'|^3}, \quad (7)$$

onde

$$|\vec{r}' - \vec{R}'| = ((x' - X'_0)^2 + y'^2 + (z' - Z')^2)^{1/2}. \quad (8)$$

Substituindo a eq. (6) na (7) e integrando termo a termo, conforme desenvolvido no Apêndice I resulta a seguinte expressão para o potencial, normalizado pelo módulo de \vec{J} :

$$\begin{aligned} \frac{V}{J} = \frac{1}{F} \left\{ \frac{(Ln - Np)(x' - X'_0)(z' - Z'_0)}{H} + \right. \\ \left. \frac{My'(z' - Z'_0)}{H} - (Lp + Nn) \right\} + \\ \frac{(Ln - Np)(x' - X'_0)}{H} + \frac{My'}{H}, \quad (9) \end{aligned}$$

onde,

$$F = ((x' - X'_0)^2 + y'^2 + (z' - Z'_0)^2)^{1/2} \quad (10)$$

e

$$H = (x' - X'_0)^2 + y'^2, \quad H \neq 0. \quad (11)$$

Os dois últimos termos da eq. (9) são obtidos a partir de um processo de limite, quando $Z' \rightarrow +\infty$. Eles se cancelam no caso da determinação do potencial de um segmento de reta.

Determinação da Anomalia Magnética de Campo Total

A anomalia magnética de campo total, ΔT , é definida pela expressão a seguir, de acordo com Officer (1974, p. 4):

$$\Delta T = L^* \Delta X + M^* \Delta Y + N^* \Delta Z \quad (12)$$

onde L^* , M^* , N^* são os cossenos diretores do vetor campo geomagnético relativos ao sistema cartesiano

$$\begin{aligned} \Delta X/J = & -\frac{n}{(H^2 F^3)} \{ p H^2/n [(Ln - Np)(x' - X'_0) + My' + (Lp + Nn)(z' - Z'_0)] \\ & + (Ln - Np)(z' - Z'_0)((x' - X'_0)^2((z' - Z'_0)^2 - 3F^2) + HF^2) \\ & + My'(z' - Z'_0)(x' - X'_0)((z' - Z'_0)^2 - 3F^2) + (Lp + Nn)(x' - X'_0)H^2 \\ & - (Ln - Np)((x' - X'_0)^2 - y'^2)F^3 - 2My'(x' - X'_0)F^3 \}, \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \Delta Y/J = & -\frac{1}{(H^2 F^3)} \{ (Ln - Np)(x' - X'_0)(z' - Z'_0)y'((z' - Z'_0)^2 - 3F^2) \\ & + M(z' - Z'_0)(y'^2((z' - Z'_0)^2 - 3F^2) + HF^2) + (Lp + Nn)y'H^2 \\ & - 2(Ln - Np)(x' - X'_0)y'F^3 + M((x' - X'_0)^2 - y'^2)F^3 \} \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} \Delta Z/J = & \frac{p}{(H^2 F^3)} \{ -nH^2/p[(Ln - Np)(x' - X'_0) + My' + (Lp + Nn)(z' - Z'_0)] \\ & + (Ln - Np)(z' - Z'_0)((x' - X'_0)^2((z' - Z'_0)^2 - 3F^2) + HF^2) \\ & + My'(z' - Z'_0)(x' - X'_0)((z' - Z'_0)^2 - 3F^2) + (Lp + Nn)(x' - X'_0)H^2 \\ & - (Ln - Np)((x' - X'_0)^2 - y'^2)F^3 - 2My'(x' - X'_0)F^3 \}. \end{aligned} \quad (18)$$

Comumente $z = 0$ no plano de observação. Nesse caso é útil empregar a seguinte normalização:

$$(z' - Z'_0)/h = px/h - n \quad (19)$$

$$(x' - X'_0)/h = nx/h + p \quad (20)$$

$$y'/h = y/h. \quad (21)$$

XYZ e, ΔX , ΔY , ΔZ são, respectivamente, as componentes X , Y , Z da anomalia magnética causada pela semi-reta de dipolos, derivadas da seguinte forma:

$$\Delta X = -(\partial V/\partial z')(\partial z'/\partial x) - (\partial V/\partial x')(\partial x'/\partial x), \quad (13)$$

$$\Delta Y = -(\partial V/\partial y') \quad (14)$$

e

$$\Delta Z = -(\partial V/\partial z')(\partial z'/\partial z) - (\partial V/\partial x')(\partial x'/\partial z). \quad (15)$$

A substituição da eq. (9) nas eqs. (13), (14) e (15) permite obter as expressões resultantes para as componentes normalizadas da anomalia magnética da semi-reta de dipolos para $H \neq 0$:

Desse modo as eqs. (16), (17) e (18) podem ser calculadas independentes de h , se as mesmas forem multiplicadas por h^2 . Com este procedimento, as componentes do campo passam a depender, espacialmente, das variáveis x/h e y/h , normalizadas em relação a h .

Tanto a eq. (9) como as eqs. (16), (17) e (18) divergem quando $H = 0$. Isso acontece porque a integral da eq. (7), conforme definida pela eq. (9), não é válida para $x' - X'_0 = y' = 0$. Para este ponto singular, é ne-

cessário igualar $x' - X'_0$, bem como y' , a zero, antes de efetuar a integral para definir o potencial. Para computar ΔX , ΔY e ΔZ nesse mesmo caso, é necessário aplicar as eqs. (13), (14) e (15) à eq. (7), em seguida igualar $x' - X'_0$ e y' a zero, e finalmente efetuar as integrações. Esse procedimento, que faz parte do Apêndice II, resulta nas seguintes expressões:

$$\Delta X/J = \frac{2p(Lp + Nn) - n(Ln - Np)}{2(z' - Z'_0)^2}, \quad (22)$$

$$\Delta Y/J = - \frac{M}{2(z' - Z'_0)^2} \quad (23)$$

e

$$\Delta Z/J = \frac{2n(Lp + Nn) + p(Ln - Np)}{2(z' - Z'_0)^2} \quad (24)$$

Analogamente, essas equações podem ser definidas independentes de h , multiplicando-as por h^2 e empregando a normalização definida pela eq. (19) para $x = 0$.

REPRESENTAÇÃO E ANÁLISE DAS ANOMALIAS MAGNÉTICAS DA SEMI-RETA DE DIPOLOS

Cálculo Numérico

Utilizando os resultados obtidos elaboramos um programa de computador para calcular o valor de $\Delta T/J$, em uma malha quadrada, com espaçamento de 0,4 h. Fixamos o valor de inclinação do campo ambiente em zero graus, aproximadamente igual aos dados interpretados adiante. Fixamos também o centro da malha verticalmente acima do topo da semi-reta, e o tamanho da malha em 25 x 25 pontos. Mesmo assim, o número de mapas a calcular e a analisar seria bastante grande se, por exemplo, variássemos de 15° em 15° os quatro parâmetros restantes. Como não é nosso objetivo construir um catálogo de mapas, selecionamos dezesseis casos divididos em quatro grupos. Com essa seleção, pretendemos abordar alguns casos, que mostrem o contraste entre magnetização induzida e remanente, entre inclinação da semi-reta no mesmo sentido e contrária à inclinação da magnetização total, e entre direção da semi-reta paralela ou oblíqua ao meridiano magnético. Em cada um dos quatro grupos fixamos dois parâmetros e variamos os demais. Acreditamos que os mapas resultantes são suficientes para a análise que pretendemos realizar.

Análise dos Mapas Teóricos

Neste item, os pontos cardeais referidos serão sempre magnéticos. Nos quatro primeiros mapas, os

valores do azimute do campo, A_C , e do azimute da polarização, A_P , são constantes e iguais a zero graus. Isto significa que eles apresentam o mesmo azimute da semi-reta. As Figs. 2a e 2b correspondem aos casos de magnetização induzida. A inclinação da semi-reta, d , é igual a 90° nas Figs. 2a e 2c e igual a 45° nas Figs. 2b e 2d. Os quatro mapas apresentam, em comum, a simetria com relação ao eixo X.

A Fig. 2a representa o mapa magnético de uma semi-reta vertical magnetizada por indução. Ela apresenta também simetria com relação ao eixo Y, e o eixo maior das curvas negativas paralelas ao E-W magnético, o que pode dar a falsa impressão de um corpo alongado nessa direção. Entretanto, o alongamento do eixo maior das curvas positivas, no sentido N-S magnético, bem como a concavidade para fora do centro, das curvas negativas, mostram não ser esse o caso. A distância entre o pico negativo, situado acima do topo da semi-reta, e qualquer um dos picos positivos é aproximadamente igual a 2,4 h.

A Fig. 2b representa o mapa magnético de uma semi-reta inclinada de 45° no sentido do norte magnético, magnetizada por indução. Não há mais simetria com relação ao eixo Y, mas as curvas negativas continuam ainda alongadas no sentido E-W magnético. A concavidade das curvas é mais pronunciada do lado norte, enquanto o gradiente é mais acentuado do lado sul. O pico positivo setentrional está além do limite norte do mapa. O pico negativo central dista entre 0,2 h e 0,4 h ao norte do epicentro da semi-reta, e a distância entre o pico negativo e o pico positivo ao sul é de, aproximadamente, 1,6 h.

A Fig. 2c representa o mapa magnético de uma semi-reta vertical, com uma magnetização total no mesmo sentido do norte magnético, mas fazendo um ângulo de 45° com a horizontal. Embora a orientação da semi-reta relativa à da magnetização seja a mesma do caso anterior, os dois mapas são nitidamente diferentes. No mapa da Fig. 2c, tanto a concavidade como o gradiente das curvas são mais acentuados ao sul, e não há valores positivos da função na parte norte, dentro dos limites do mapa. O pico negativo está ao norte do epicentro da semi-reta, e a uma distância aproximada de 0,4 h. A distância entre os picos negativo e positivo é de cerca de 1,6 h.

Calculamos os dados do mapa da Fig. 2d para o caso de uma semi-reta inclinada de 45°, com magnetização total inclinada de mesmo valor, ambas no sentido do norte magnético. Entretanto, esse mapa corresponde a todos os casos em que a magnetização total é paralela à semi-reta, não sendo possível resolver essa ambiguidade. Trata-se da anomalia de um polo magnético negativo, cuja característica principal é ser anti-simétrica em relação ao eixo Y.

As Figs. 3a, 3b, 3c e 3d correspondem a mapas de anomalias magnéticas de uma semi-reta de dipolos, no caso de haver um ângulo de 45° entre a direção da magnetização total da semi-reta e o meridiano magné-

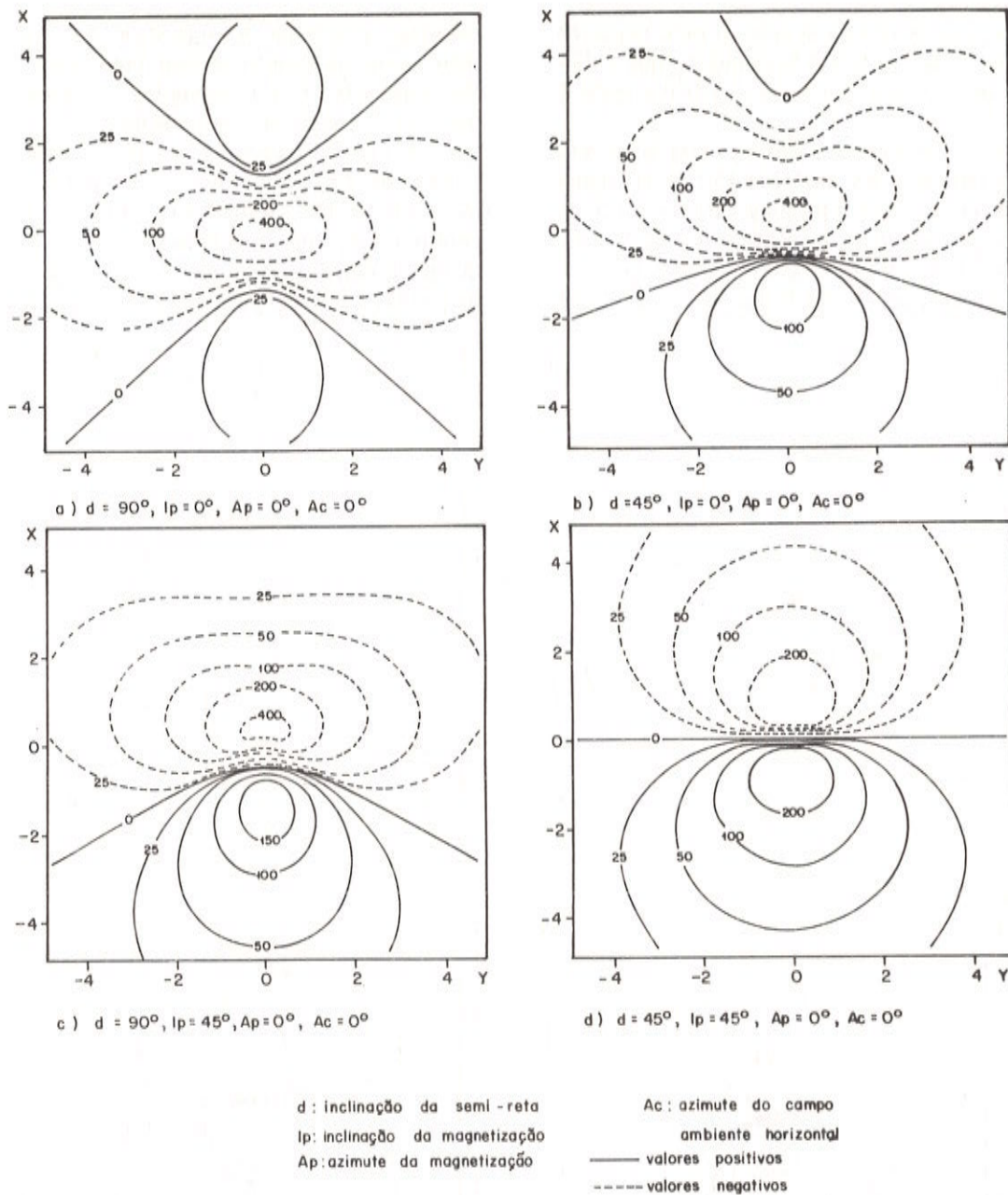


Figura 2. Mapa de anomalia magnética de campo total devido a uma semi-reta inclinada uniformemente magnetizada. Coordenadas x e y normalizadas pela profundidade de topo da semi-reta. Azimutes em relação ao eixo X . Valores das curvas em $(\Delta T/J) \times 10^3$.

Figure 2. Total field magnetic anomaly map due to a dipping half-line of dipoles; x and y coordinates normalized by the depth to the top of the half-line; azimuths relative to the X axis. Solid line = positive values; dashed line = negative values; d = dip of the half-line; I_p = dip of the magnetization; A_p = azimuth of the magnetization; A_c = azimuth of the horizontal ambient field. Curves' values in $(\Delta T/J) \times 10^3$.

tico, sendo o norte magnético coincidente com o eixo X . A Fig. 3a representa o caso da semi-reta vertical com polarização horizontal. Esse mapa tem semelhança na forma das curvas com a Fig. 2a. Isso pode levar à conclusão precipitada de que se trata de magnetização induzida, com $A_c = A_p = 22^\circ 30'$, em relação ao eixo X . Entretanto, no caso da Fig. 3a, o pico negativo, que coincide com o epicentro da semi-reta, dista dos picos positivos de, aproximadamente, 2,16 h, e a razão entre as magnitudes dos picos negativo e qualquer positivo é inferior a sete, enquanto que no mapa

da Fig. 2a esta mesma razão tem um valor próximo de dez. Além disso, o eixo que contém os picos é paralelo ao norte magnético, no caso da Fig. 2a, e faz um ângulo de $22^\circ 30'$, com o norte magnético, no caso da Fig. 3a.

A Fig. 3b representa o mapa de anomalia magnética de uma semi-reta inclinada de 45° no sentido do norte magnético, e com polarização horizontal. A concavidade das curvas é mais acentuada ao lado norte, porém o gradiente é mais forte do lado sul. O pico negativo dista 0,4 h, aproximadamente, ao norte do epi-

centro da semi-reta. A distância entre o pico negativo e o pico positivo é cerca de 1,8 h, enquanto que a distância entre o pico negativo e o pico positivo norte é cerca de 3,0 h.

A Fig. 3c representa o caso de uma semi-reta vertical com polarização inclinada de 45° . Neste mapa a assimetria das curvas é bem pronunciada. A distância entre o pico negativo e o pico positivo ao sul é cerca de 1,6 h e entre o pico negativo e o epicentro da semi-reta é de, aproximadamente, 0,4 h para o sul. É difícil

localizar, precisamente, a posição dos dois picos. Para tanto seria necessário utilizar um espaçamento de malha igual a 0,1 h, por exemplo. Isto aumentaria sobremaneira os custos de computação.

A Fig. 3d representa o caso de uma semi-reta inclinada de 45° para o norte, com polarização também inclinada de 45° . A distância do pico negativo ao epicentro é de, aproximadamente, 0,8 h para o sul. A distância entre os dois picos é cerca de 1,6 h. O eixo maior das curvas negativas, neste mapa, faz um ângulo

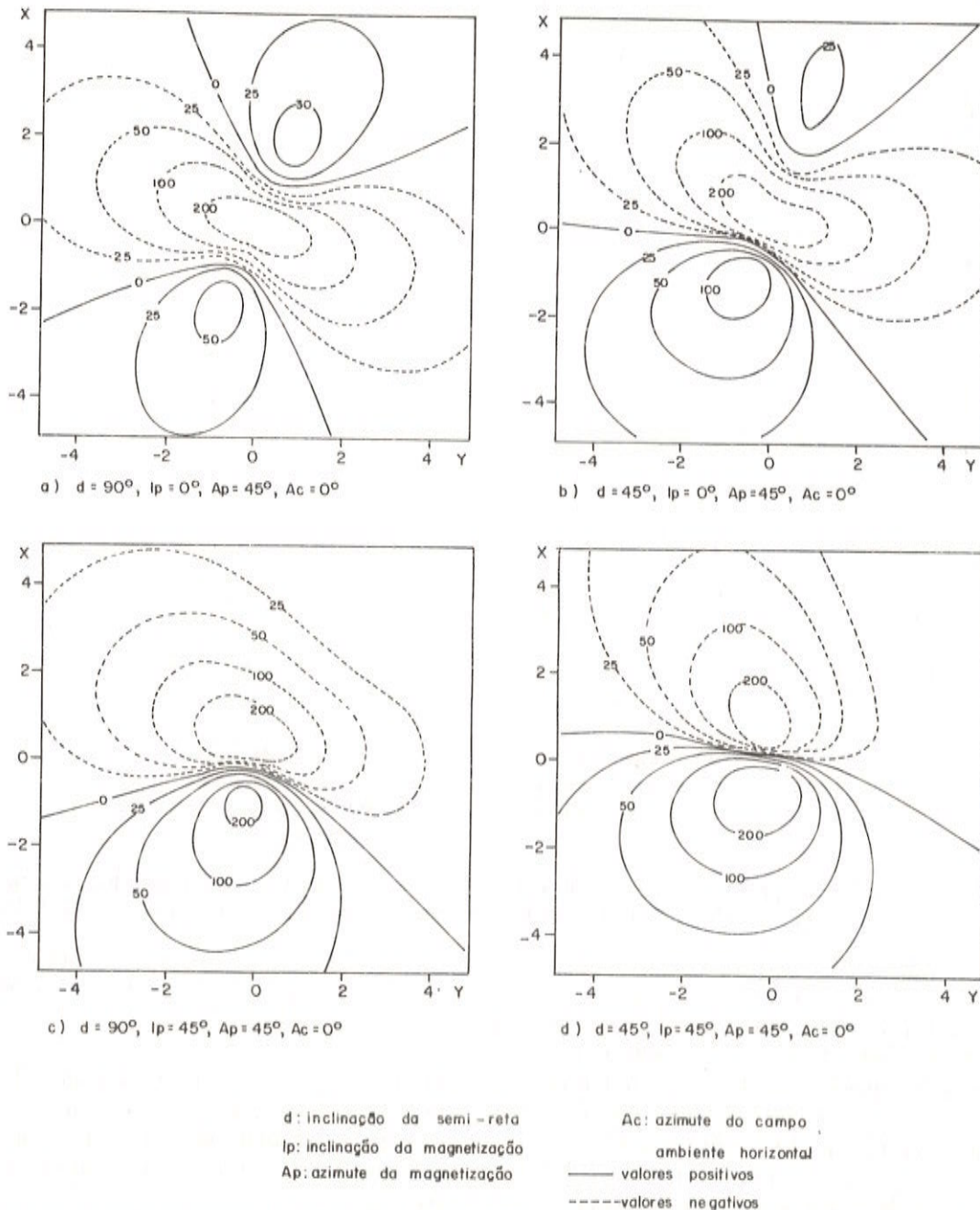


Figura 3. Mapa de anomalia magnética de campo total devido a uma semi-reta inclinada uniformemente magnetizada. Coordenadas x e y normalizadas pela profundidade de topo da semi-reta. Azimutes em relação ao eixo X . Valores das curvas em $(\Delta T/J) \times 10^3$.

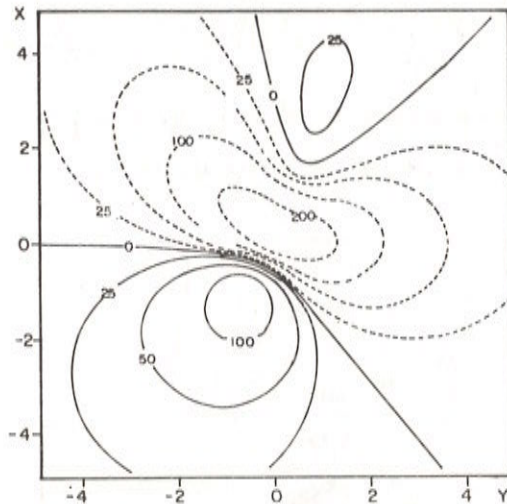
Figure 3. Total field magnetic anomaly map due to a dipping half-line of dipoles: x and y coordinates normalized by the depth to the top of the half-line; azimuths relative to the X axis. Solid line = positive values; dashed line = negative values; d = dip of the half-line; I_p = dip of the magnetization; A_p = azimuth of the magnetization; A_c = azimuth of the horizontal ambient field. Curves' values in $(\Delta T/J) \times 10^3$.

com o N-S menor do que no caso da Fig. 3c. As curvas positivas da Fig. 3d se aproximam mais da circunferência do que as curvas positivas da Fig. 3c.

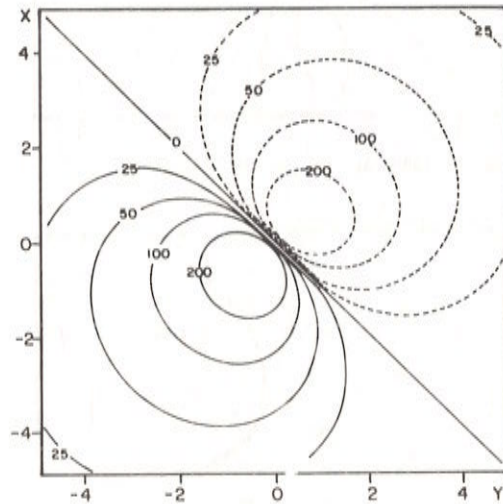
As Figs. 4a, 4b, 4c e 4d representam o caso de uma semi-reta inclinada de 45° na direção $N45^\circ W$. A Fig. 4a representa o mapa magnético para uma polarização horizontal, e de mesmo sentido da semi-reta. Este mapa é idêntico ao da Fig. 3b. Este tipo de identidade ocorre sempre que houver troca de valor entre polarização e campo ambiente. Como, normalmente, a

direção do campo ambiente é dada, é possível distinguir um caso do outro.

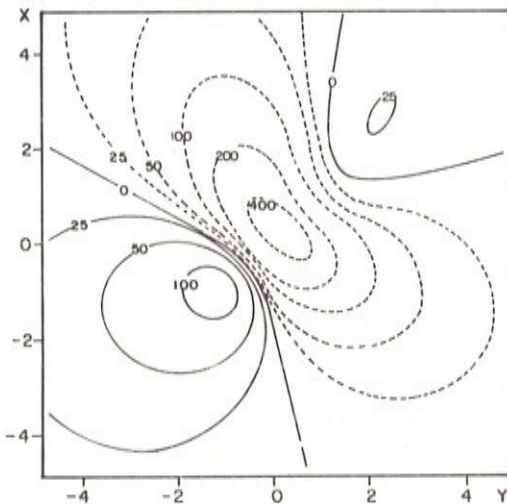
A Fig. 4b é idêntica à Fig. 2b, pelas razões já discutidas. A Fig. 4c representa o caso de magnetização induzida de uma semi-reta inclinada de 45° na direção $N45^\circ W$. Esta figura guarda semelhanças com a Fig. 2b. As principais características da Fig. 4c, que a distinguem da Fig. 2b, são as seguintes: distância do pico negativo para o pico positivo norte igual, aproximadamente, a $3,2 h$; o alinhamento dos picos não



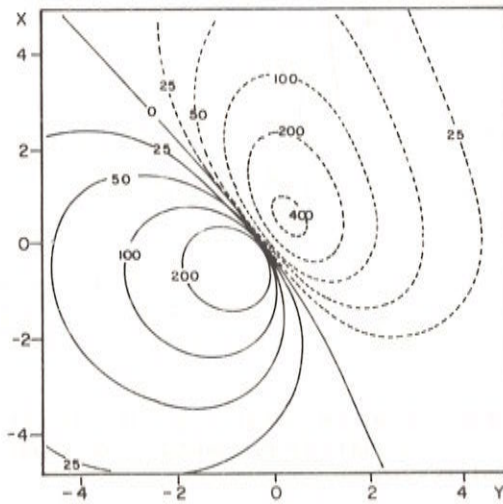
a) $d = 45^\circ$, $I_p = 0^\circ$, $A_p = 0^\circ$, $A_c = 45^\circ$



b) $d = 45^\circ$, $I_p = 45^\circ$, $A_p = 0^\circ$, $A_c = 45^\circ$



c) $d = 45^\circ$, $I_p = 0^\circ$, $A_p = 45^\circ$, $A_c = 45^\circ$



d) $d = 45^\circ$, $I_p = 45^\circ$, $A_p = 45^\circ$, $A_c = 45^\circ$

d : inclinação da semi-reta
 I_p : inclinação da magnetização
 A_p : azimute da magnetização

A_c : azimute do campo ambiente horizontal
 — valores positivos
 - - - - - valores negativos

Figura 4. Mapa de anomalia magnética de campo total devido a uma semi-reta inclinada uniformemente magnetizada. Coordenadas x e y normalizadas pela profundidade de topo da semi-reta. Azimutes em relação ao eixo X . Valores das curvas em $(\Delta T/J) \times 10^3$.

Figure 4. Total field magnetic anomaly map due to a dipping half-line of dipoles: x and y coordinates normalized by the depth to the top of the half-line; azimuths relative to the X axis. Solid line = positive values; dashed line = negative values; d = dip of the half-line; I_p = dip of the magnetization; A_p = azimuth of the magnetization; A_c = azimuth of the horizontal ambient field. Curves' values in $(\Delta T/J) \times 10^3$.

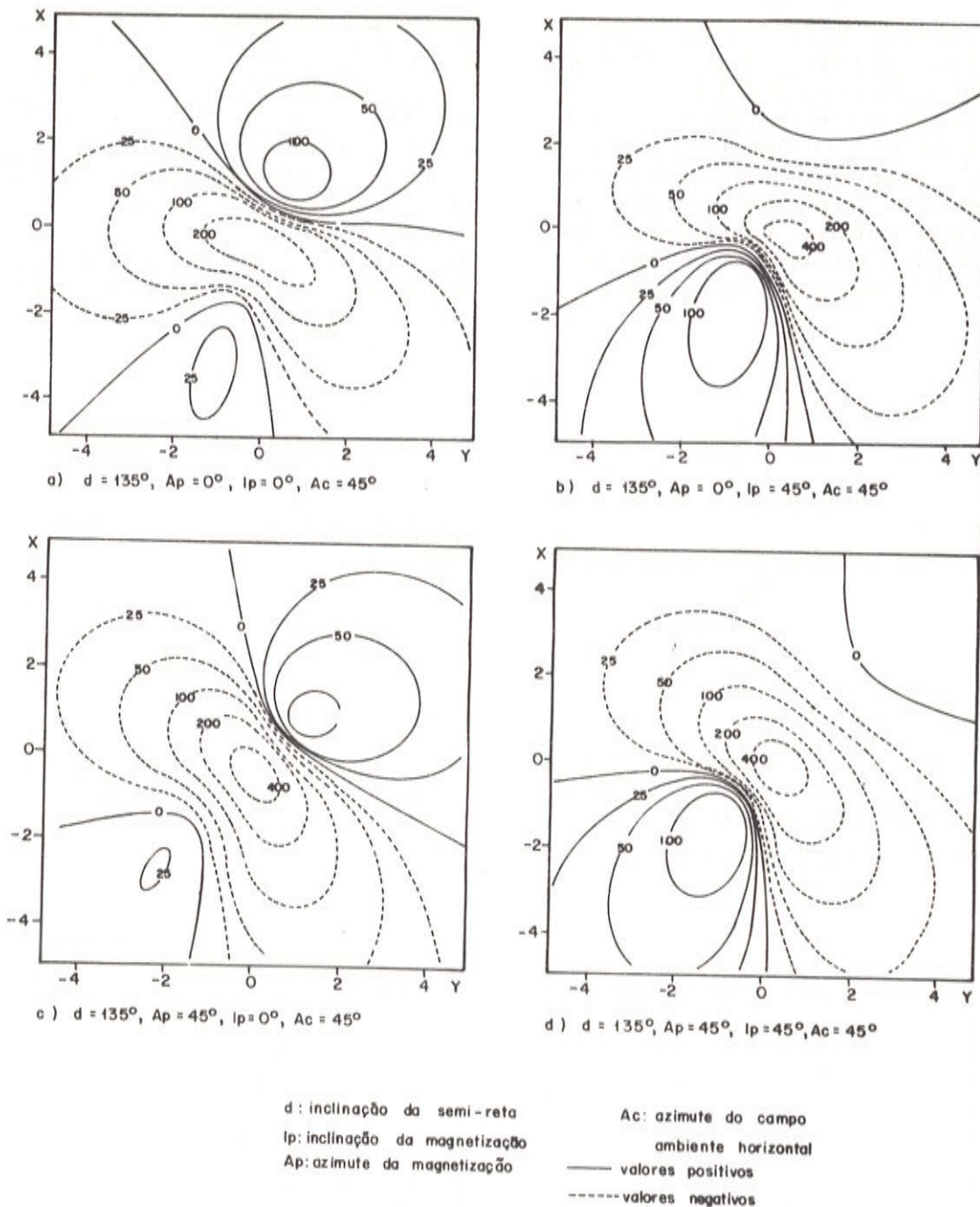


Figura 5. Mapa de anomalia magnética de campo total devido a uma semi-reta inclinada uniformemente magnetizada. Coordenadas x e y normalizadas pela profundidade de topo da semi-reta. Azimutes em relação ao eixo X . Valores das curvas em $(\Delta T/J) \times 10^3$.

Figure 5. Total field magnetic anomaly map due to a dipping half-line of dipoles; x and y coordinates normalized by the depth to the top of the half-line; azimuths relative to the X axis. Solid line = positive values; dashed line = negative values; d = dip of the half-line; I_p = dip of the magnetization; A_p = azimuth of the magnetization; A_c = azimuth of the horizontal ambient field. Curves' values in $(\Delta T/J) \times 10^3$.

coincide exatamente com a direção N-S; e as curvas de valor negativo se alongam mais para NW do que para SE, sendo que o eixo das mesmas tende a ficar paralelo à semi-reta.

A Fig. 4d representa o caso de polarização de 45° no sentido norte. A reta que une os picos positivo e negativo apresenta ligeiro desvio para nordeste, e a distância entre os mesmos é próxima de 1,6 h. Este mapa se distingue do caso do monopolo, principalmente por causa do alongamento para NW das curvas

de valor negativo, justamente o sentido de inclinação da semi-reta.

As Figs. 5a, 5b, 5c e 5d representam o caso de uma semi-reta inclinada de 45° na direção S45°E. A Fig. 5a constitui o mapa magnético para uma polarização horizontal, na direção N45°W. Este mapa representa uma inversão, no sentido N-S, em relação ao mapa da Fig. 4a; servindo os dois, de excelentes ilustrações do efeito que a inclinação da semi-reta tem sobre a forma das curvas: o gradiente é mais forte e as

curvas positivas são mais circulares do lado oposto ao qual a semi-reta pende; enquanto no sentido de inclinação da semi-reta, as curvas se alongam e apresentam maior concavidade.

A Fig. 5b representa o caso de polarização inclinada de 45° na direção $N45^\circ W$. O pico negativo está a uma distância aproximada de 0,4 h, na direção $N45^\circ E$, do epicentro da semi-reta. A distância entre os picos negativo e positivo é cerca de 2,0 h. Neste mapa, a concavidade e o gradiente das curvas são mais pronunciados no lado sul da passagem dos valores negativos para os valores positivos. Também neste mapa, as curvas se alongam no sentido da inclinação da semi-reta.

A Fig. 5c representa o caso de magnetização induzida, constituindo uma inversão de 180° da Fig. 4c. Neste caso se aplicam as mesmas observações feitas para o caso da Fig. 5a. A Fig. 5d representa o caso de polarização inclinada de 45° na direção norte. É necessário cuidado para distinguir este caso do representado na Fig. 5b. No caso da Fig. 5d, o alinhamento dos picos positivo e negativo, bem como o eixo maior

das curvas de valor positivo, são praticamente paralelos ao N-S. Outra característica é que o eixo maior das curvas de valor negativo, que apresentam pouco encurvamento, tem direção próxima do E-W, no mapa da Fig. 5d. Uma terceira distinção é a forma das curvas de valor negativo, que são quase uniformes na Fig. 5d, enquanto na Fig. 5b são mais largas do lado leste do que do lado oeste.

Interpretação de Mapas Aeromagnéticos

A Fig. 6 representa o mapa aeromagnético da região de Botuporã e Paramirim no Estado da Bahia, a qual faz parte do espinhaço setentrional (DNPM, 1977). As rochas são de idade arqueana, constituindo um complexo metamórfico, contendo faixas migmatizadas e diversos episódios intrusivos (CPM, 1978). A estrutura magnética dominante do mapa, no qual o campo ambiente tem um valor aproximadamente igual a 24950 nT, apresenta as seguintes características: (i) há um baixo magnético inferior a 24650 nT, valor residual menor do que -300 nT; (ii) as curvas em torno

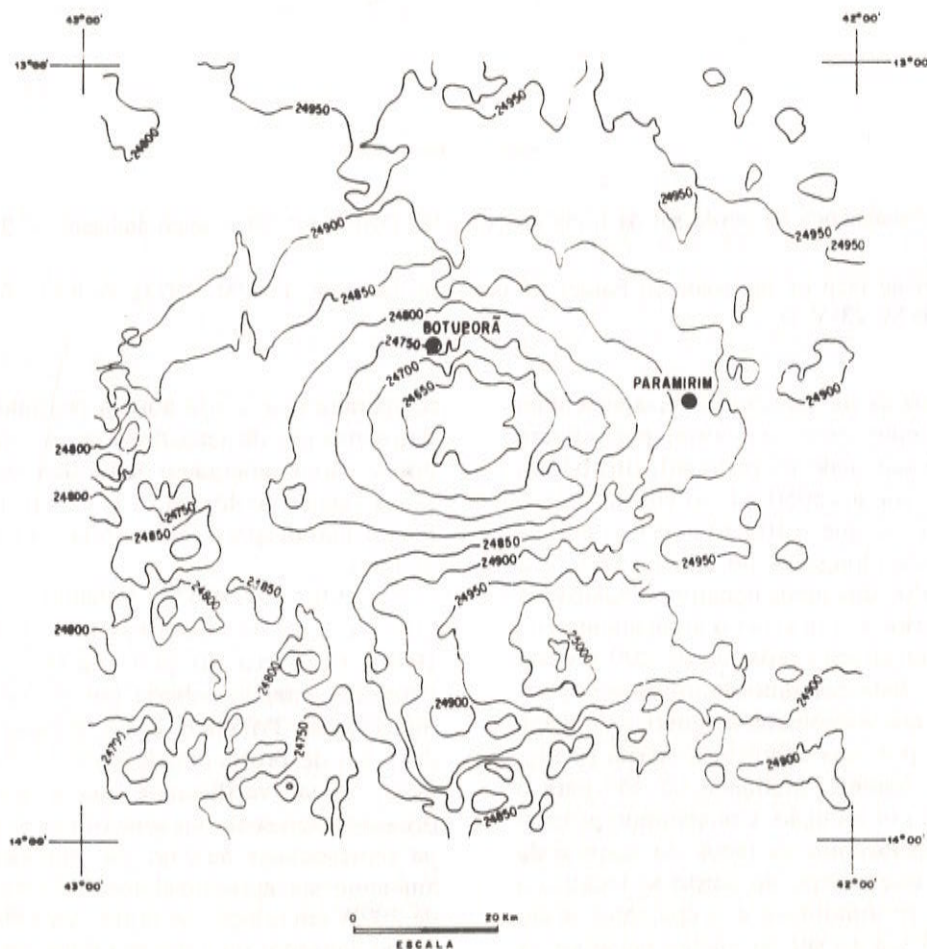


Figura 6. Mapa aeromagnético do Espinhaço setentrional, DNPM (1977). Campo ambiente = 24950 nT, folha SD 23-X-D.

Figure 6. Aeromagnetic map of the northern Espinhaço, DNPM (1977). Ambient field = 24,950 nT, quadrangle SD 23-X-D.

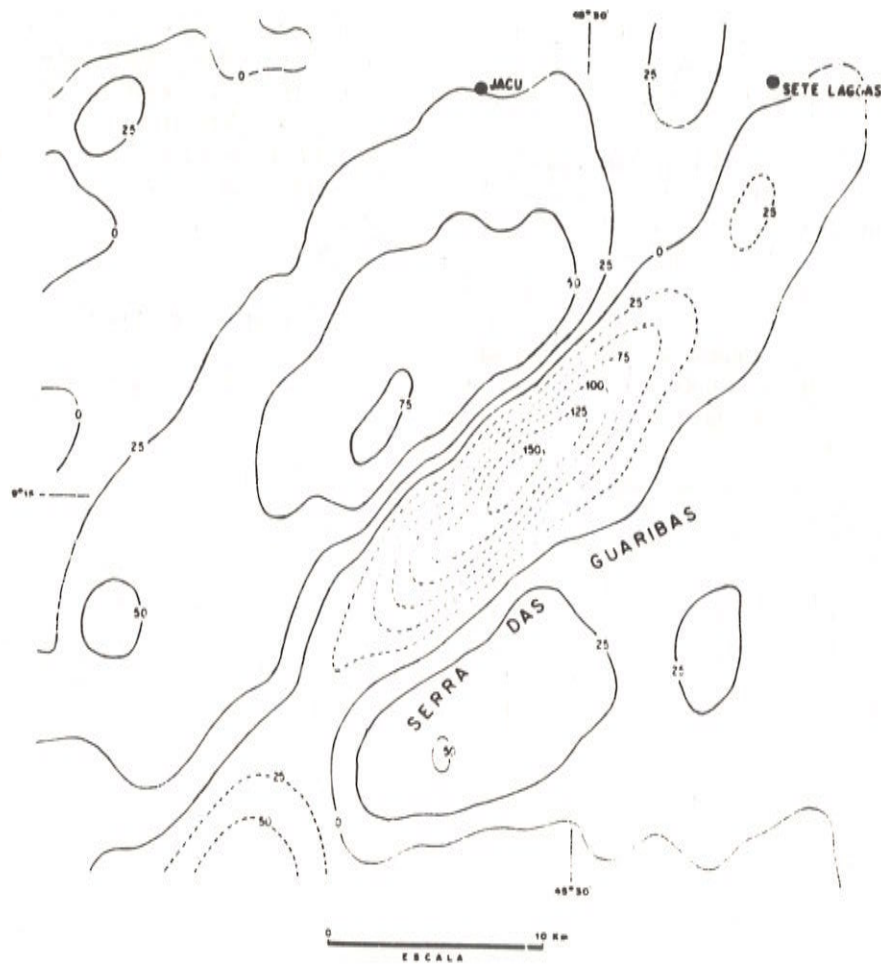


Figura 7. Mapa aeromagnético da borda sul da bacia do Parnaíba, DNPM (1978). Campo ambiente = 25600 nT, folha SC 23-V-D.

Figure 7. Aeromagnetic map of the southern border of the Parnaíba basin, DNPM (1978). Ambient field = 25,600 nT, quadrangle SC 23-V-D.

do baixo são alongadas na direção E-W, apresentam reentrâncias e gradiente suave ao norte, e gradiente forte com pouca concavidade na parte sul; (iii) há um alto magnético superior a 25050 nT ao sul do baixo, valor residual maior do que +100 nT; (iv) as curvas do alto magnético são alongadas no sentido N-S, e a razão entre os módulos dos picos negativo e positivo é igual ou pouco superior a 3,0; e (v) o alinhamento entre os dois picos tem direção próxima de 20° a oeste do norte geográfico. Este conjunto de informações sugere, por inspeção, que a anomalia magnética do mapa da Fig. 6 é causada por uma condição descrita na Fig. 2b: um corpo tipo chaminé, inclinado de 45° para o norte e magnetizado por indução. Comparando proporcionalmente a distância entre os picos do mapa e da Fig. 2b, estimamos que o topo do corpo se localiza a cerca de 24 km de profundidade e o epicentro dista, aproximadamente, 6 km ao sul do núcleo negativo. A profundidade de 24 km é extremamente elevada para o topo de um corpo magnético, a menos que o grau geotérmico da região não seja suficiente para atingir a

temperatura de Curie àquela profundidade. Deste modo, o modelo de uma única semi-reta inclinada de dipolos não é adequado para descrever as dimensões dessa feição geológica, e o corpo deve ter espessura lateral não-desprezível em relação à sua profundidade de topo.

A Fig. 7 representa o mapa aeromagnético da região da serra dos Guaribas ao sul do Piauí (DNPM, 1978). Esta área faz parte da borda sul da bacia do Parnaíba, estando coberta por rochas sedimentares do Siluriano ao Triássico, e seu embasamento está a cerca de 1 km de profundidade (DNPM, 1972). Por comparação visual verificamos que a anomalia magnética principal apresenta características semelhantes ao mapa representado na Fig. 5a, em virtude de o campo ambiente ser aproximadamente horizontal e declinado de 20° W em relação ao norte geográfico. Neste caso, o corpo causador da anomalia pode ser um "kimberlito" inclinado de 45° SE, cuja magnetização total é horizontal e tem a mesma direção do corpo causador da anomalia, a qual faz um ângulo de 45° com o norte

magnético. Estimamos uma profundidade máxima do topo do corpo em cerca de 3,7 km e que seu epicentro se localiza, aproximadamente, a 0,8 km a noroeste do pico negativo, utilizando a mesma metodologia descrita no exemplo anterior.

CONCLUSÃO

A solução analítica, que desenvolvemos neste trabalho, permite definir, em todos os pontos do espaço, o potencial ou qualquer componente do campo magnético, devido a uma semi-reta contendo uma distribuição contínua e uniforme de dipolos magnéticos. Escolhemos o modelo da semi-reta, porque o mesmo é dos mais simples, simula algumas estruturas geológicas, tipo chaminé, e ainda não tinha recebido tratamento sistemático. Em prospecção geofísica terrestre, aérea ou marítima, todos os dados são reduzidos a um plano horizontal. Por esta razão, calculamos os valores do campo, em um datum onde arbitramos $z = 0$, em função das coordenadas normalizadas x/h e y/h , sendo h a profundidade do topo da semi-reta. A utilização das coordenadas normalizadas permitiu calcular os valores do campo, bem como representá-los em mapa, independente do valor de h e da unidade de distância empregada.

Analisamos apenas dezesseis casos, sendo que dois deles, embora distintos, apresentam a mesma representação em mapa. Apesar do pequeno número de exemplos, cobrimos os casos de interesse para a análise da representação do campo magnético, em mapa, variando os parâmetros diretores da magnetização, campo ambiente e orientação da semi-reta. Consideramos o campo ambiente horizontal, porque este é o valor aproximado do campo geomagnético na parte centro-norte do Estado da Bahia. Conforme descrito detalhadamente no ítem da análise dos mapas teóricos, a forma das curvas de $\Delta T/J$ e a sua magnitude servem de critérios para identificar cada caso, salvo exceções,

como o modelo do polo magnético. A interpretação de dois mapas aeromagnéticos experimentais comprovou a utilidade dos mapas teóricos e dos esquemas interpretativos na identificação de estruturas geológicas de sub-superfície.

Além das estruturas tipo "ring dikes", chaminés e kimberlitos, citados anteriormente neste trabalho, podemos empregar também o modelo da semi-reta na simulação das seguintes situações geológicas:

- Um sistema de vários corpos. Neste caso é necessário calcular a anomalia magnética de várias semi-retas.
- Um corpo de espessura finita ao longo do mergulho. Neste caso deve-se calcular a anomalia de um segmento de reta.
- Um corpo cilíndrico, cuja espessura transversal seja finita. Neste caso deve-se somar as anomalias magnéticas de um conjunto de semi-retas, ou segmento de retas, idênticas e separadas entre si de uma pequena distância.

AGRADECIMENTOS

Agradeço ao CNPq e à FINEP pelo suporte financeiro e ao Centro de Computação da UFBA pelas facilidades concedidas no cálculo numérico das funções. Agradeço ao Prof. H.K. Sato pelo auxílio na elaboração e aperfeiçoamento do programa de computador e pela revisão da álgebra, ao Prof. A.C.S.P. Bitencourt pela revisão do texto e ao Dr. A.C. Motta pelas informações prestadas, e pelo fornecimento dos dois mapas aeromagnéticos. A datilografia original foi realizada por N. da Silva e as figuras foram preparadas por N. Gomes.

REFERÊNCIAS

- BHATTACHARYYA, B.K. - 1964 - Magnetic anomalies due to prism-shaped bodies with arbitrary polarization. *Geophysics*, 29: 517-533.
- COGGON, J. - 1976 - Magnetic and gravity anomalies of polyhedra. *Geoexploration*, 14: 93-105.
- COOK, K. - 1950 - Quantitative interpretation of vertical magnetic anomalies over veins. *Geophysics*, 15: 667-686.
- CPM - 1978 - Mapa geológico do Estado da Bahia. Escala 1:1.000.000, organizado por H.A.V. Inda e J.F. Barbosa, Salvador.
- DNPM - 1972 - Carta tectônica do Brasil. Escala 1:5.000.000, organizado por E.O. Ferreira, Rio de Janeiro.
- DNPM - 1977 - Mapa aeromagnético, projeto Espinhaço Setentrional. Executado pela Geofoto, publicação DNPM/CPRM/NUCLEBRÁS, Rio de Janeiro.
- DNPM - 1978 - Mapa aeromagnético, projeto Borda do Sul da Bacia do Parnaíba. Executado pela Prospec, publicação CPRM, Rio de Janeiro.
- GRANT, F. & WEST, G. - 1965 - Interpretation theory in applied geophysics. McGraw-Hill Book Company, New York, 584 pp.
- HJELT, S.E. - 1972 - Magnetostatic anomalies of dipping prisms. *Geoexploration*, 10: 239-254.
- KOULOMZINE, T., LAMONTAGNE, Y. & NADEAU, A. - 1970 - New methods for direct interpretation of magnetic anomalies caused by inclined dikes of infinite length. *Geophysics*, 35: 812-830.
- OFFICER, C.B. - 1974 - Introduction to theoretical geophysics. Springer-Verlag New York Inc., New York, 385 pp.

- PLOUFF, D. - 1976 - Gravity and magnetic fields of polygonal prisms and application to magnetic terrain corrections. *Geophysics*, 41: 728-741.
- TALWANI, M. & EWING, M. - 1960 - Rapid computation of gravitational attraction of three-dimensional bodies of arbitrary shape. *Geophysics*, 25: 203-225.
- TALWANI, M., WORZER, J.L. & LANDISMAN, M. - 1959 - Rapid gravity computations for two-dimensional bodies with application to the Mendocina fracture zone. *J. Geophys. Res.*, 64: 49-59.

- VACQUIER, V., STEENLAND, N., HENDERSON, R. & ZIETZ, I. - 1951 - Interpretation of aeromagnetic maps. *Geol. Soc. America Mem.* 47, 151 pp.
- WON, I.J. & BEVIS, M. - 1987 - Computing the gravitational and magnetic anomalies due to a polygon: Algorithms and Fortran subroutines. *Geophysics*, 52: 232-238.
- ZIETZ, I. & ANDREASEN, G.E. - 1967 - Remanent magnetization and aeromagnetic interpretation. *Mining Geophysics, S.E.G.*, 2: 569-590.

Versão recebida em: 23/01/90
Versão revista e aceita em: 11/10/90
Editor Associado: W. Shukowsky

APÊNDICE I

CÁLCULO DA FUNÇÃO POTENCIAL, EXCETUANDO O PONTO $x' - X'_0 = y' = 0$

Consideremos inicialmente a integral

$$I = \int_{Z_1}^{Z_2} \vec{J} \cdot (\vec{r} - \vec{R}') dZ' / |\vec{r} - \vec{R}'|^3, \quad (\text{AI.1})$$

onde $\vec{r} - \vec{R}'$ é definido na eq. (5). Empregando a eq. (6) na integral (AI.1), resulta

$$I = I_1 + I_2 + I_3 \quad (\text{AI.2})$$

onde,

$$I_1 = J (Ln - Np) \int_{Z_1}^{Z_2} (x' - X'_0) dZ' / |\vec{r} - \vec{R}'|^3, \quad (\text{AI.3})$$

$$I_2 = JM \int_{Z_1}^{Z_2} y' dZ' / |\vec{r} - \vec{R}'|^3 \quad (\text{AI.4})$$

e

$$I_3 = J (Lp + Nn) \int_{Z_1}^{Z_2} (z' - Z') dZ' / |\vec{r} - \vec{R}'|^3. \quad (\text{AI.5})$$

Consequentemente,

$$I_1 = \frac{J(Ln - Np)(x' - X'_0)(z' - Z_1)}{(y'^2 + (x' - X'_0)^2)|\vec{r} - \vec{R}'_1|} - \frac{J(Ln - Np)(x' - X'_0)(z' - Z_2)}{(y'^2 + (x' - X'_0)^2)|\vec{r} - \vec{R}'_2|}, \quad (\text{AI.6})$$

$$I_2 = \frac{JMy' (z' - Z_1)}{(y'^2 + (x' - X'_0)^2)|\vec{r} - \vec{R}'_1|} - \frac{JMy' (z' - Z_2)}{(y'^2 + (x' - X'_0)^2)|\vec{r} - \vec{R}'_2|}, \quad (\text{AI.7})$$

$$I_3 = \frac{J(Lp + Nn)}{|\vec{r} - \vec{R}'_2|} - \frac{J(Lp + Nn)}{|\vec{r} - \vec{R}'_1|} \quad (\text{AI.8})$$

$$\lim_{Z_2 \rightarrow \infty} \frac{z' - Z_2}{|\vec{r} - \vec{R}'_2|} = -1 \quad (\text{AI.10})$$

e que

$$\lim_{Z_2 \rightarrow \infty} \frac{1}{|\vec{r} - \vec{R}'_2|} = 0. \quad (\text{AI.11})$$

e

$$\vec{R}'_j = X'_0 \vec{i} + Z_j \vec{k}, \quad j = 1, 2. \quad (\text{AI.9})$$

Igualando Z_1 a Z'_0 e fazendo $Z_2 \rightarrow \infty$, a integral (AI.1) corresponderá à função potencial expressa pela eq. (7), observando que

Levando em consideração as eqs. (AI.10) e (AI.11), e substituindo as eqs. (AI.6), (AI.7) e (AI.8) na eq. (AI.2), concluímos que:

$$I = J(Ln - Np) ((z' - Z'_0) / F + 1) (x' - X'_0) / H + JM ((z' - Z'_0) / F + 1) y' / H - J (Lp + Nn) / F \quad (\text{AI.12})$$

onde

$$F = ((x' - X'_0)^2 + y'^2 + (z' - Z'_0)^2)^{1/2} \quad (\text{AI.13})$$

e

$$H = (x' - X'_0)^2 + y'^2, \quad H \neq 0. \quad (\text{AI.14})$$

APÊNDICE II

CÁLCULO DA FUNÇÃO POTENCIAL E DAS COMPONENTES MAGNÉTICAS QUANDO $x' - X'_0 = y' = 0$

Se igualarmos a zero $x' - X'_0$, bem como y' , na eq. (6), a eq. (7) assume a forma

$$V = \int_{Z'_0}^{\infty} \frac{J (Lp + Nn) (z' - Z') dZ'}{|z' - Z'|^3} \quad (\text{AII.1})$$

e, portanto,

$$V = - \frac{J (Lp + Nn)}{|z' - Z'_0|}, \quad (\text{AII.2})$$

Para obter ΔX , ΔY e ΔZ é necessário aplicar, respectivamente, as eq. (13), (14) e (15) na eq. (7) e, em seguida, fazer $x' - X'_0 = y' = 0$. Após essas operações, conclui-se que

$$\Delta X = J|2p(Lp + Nn) - n(Ln - Np)| \int_{Z'_0}^{\infty} \frac{dZ'}{|z' - Z'|^3}, \quad (\text{AII.3})$$

$$\Delta Y = - JM \int_{Z'_0}^{\infty} \frac{dZ'}{|z' - Z'|^3}, \quad (\text{AII.4})$$

$$\Delta Z = J|2n(Lp + Nn) + p(Ln - Np)| \int_{Z'_0}^{\infty} \frac{dZ'}{|z' - Z'|^3} \quad (\text{AII.5})$$

e portanto,

$$\Delta X = J|2p(Lp + Nn) - n(Ln - Np)| \frac{(z' - Z'_0)}{2|z' - Z'_0|^3}, \quad (\text{AII.6})$$

$$\Delta Y = - JM \frac{(z' - Z'_0)}{2|z' - Z'_0|^3} \quad (\text{AII.7})$$

e

$$\Delta Z = J|2n(Lp + Nn) + p(Ln + Np)| \frac{(z - Z'_0)}{2|z' - Z'_0|^3}, \quad (\text{AII.8})$$