

Determinação da espessura da interface sedimento-embasamento da Bacia Sergipe-Alagoas a partir da assinatura gravimétrica.

Alanna Costa Dutra¹ e Roberto Max de Argollo¹
¹ Instituto de Física da Universidade Federal da Bahia

Copyright 2016, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

Resumo

O presente trabalho teve como objetivo a aquisição, processamento e interpretação de dados gravimétricos, ao longo da região do embasamento adjacente e sua extensão para a Bacia Sergipe-Alagoas, para que fosse feita uma modelagem gravimétrica dos domínios crustais e suas relações tectônicas. Para delinear o relevo do embasamento da Bacia Sergipe-Alagoas foi necessário conhecer as anomalias gravimétricas e o contraste de densidade na superfície da bacia. Com estas informações foi possível estimar, além do relevo, o valor do contraste de densidade na superfície desta bacia sedimentar, sendo fornecida a anomalia gravimétrica e a profundidade do embasamento em alguns pontos da bacia. A grande vantagem dos métodos gravimétrico é a boa capacidade de recobrimento espacial com custos razoáveis, e são bastante utilizados para a detecção, localização e delimitação de feições estruturais.

Introdução

A Bacia Sergipe-Alagoas situa-se na margem continental nordeste do Brasil. Em sua porção terrestre abrange uma área de aproximadamente 13.000 km² e sua porção submersa uma área de cerca de 40.000 km², até a cota batimétrica de 2.000 m. A Figura 1 apresenta um mapa regional simplificado com as principais feições tectônicas da região entre as bacias Alagoas, Sergipe e Camamu, mostrando também as principais anomalias magnéticas.

Esse embasamento compreende os domínios geotectônicos Salvador-Itabuna-Curaçá da subprovinça cráton do São Francisco, e Estância, Canudos-Vaza-Barris, Macururé, Rio Coruripe e Pernambuco-Alagoas da subprovinça Meridional da província Borborema, os quais devem constituir o embasamento da bacia Sergipe-Alagoas, como mostra o mapa geológico na Figura 2.

De todas as bacias da margem continental brasileira, esta é a que registra a sucessão estratigráfica mais completa, incluindo remanescentes de uma sedimentação paleozóica, um pacote jurássico a eocretácico pré-rifte amplamente desenvolvido e as clássicas seqüências meso-cenozóicas sinrife e pós-rifte (Cainelli e Mohriak, 1998). A bacia é representada por um rifte assimétrico, alongado na direção NNE/SSW e limitado a norte com a Bacia Pernambuco-Paraíba, pelo Alto de Maragojé, e a sul com a Bacia do Jacuípe, pelo sistema de falhas de Vaza-Barris.

As duas sub-Bacias, Alagoas e Sergipe, são separadas pelo alto de Jabotã-Penedo, nas imediações do Rio

São Francisco (Aquino e Lana, 1990). A Bacia de Sergipe-Alagoas é caracterizada por uma espessa seção sedimentar da fase rifte na região continental e por feições associadas à transpressão na região da plataforma e talude. Entre as sub-Bacias de Alagoas e Sergipe ocorrem feições diapíricas em águas profundas que podem estar relacionadas à tectônica de sal (Mohriak, 1995b).

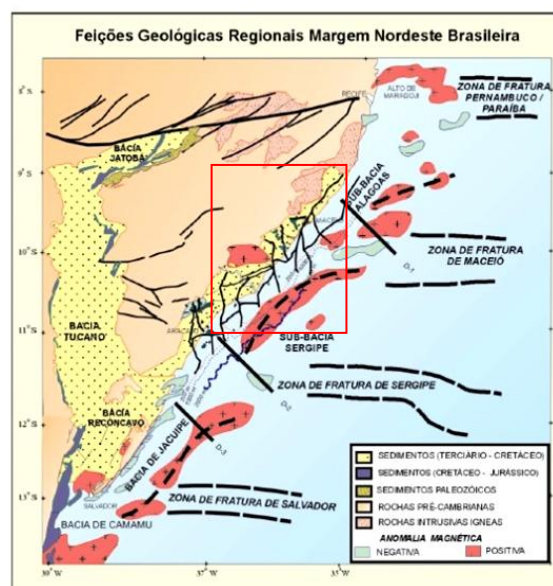


Figura 1. Mapa tectônico esquemático do segmento nordeste da margem continental divergente brasileira, mostrando anomalias magnéticas e alinhamentos de zonas de fraturas oceânicas. O mapa mostra a localização aproximada da área de estudo (retângulo vermelho).

Este projeto utilizou dados gravimétricos para pesquisar o arcabouço da bacia sedimentar Sergipe-Alagoas e parte do embasamento (Figura 2). Os principais objetivos são estimar parâmetros como espessura do embasamento e variação lateral do contraste de densidade.

Metodologia/ Problema Investigado

Neste projeto utilizamos os dados gravimétricos obtidos em campanhas (2014/2015), além de dados disponíveis na Rede Nacional de Gravimetria. Realizamos transeção gravimétrica em até 300 km de linha, cobrindo áreas de interesse. Para esta transeção, contamos com o levantamento planialtimétrico necessário com GPS diferencial e as medidas gravimétricas com um gravímetro Scintrex CG-5.

A aquisição, processamento e interpretação de dados gravimétricos foram realizados para obtenção de

soluções de profundidade do embasamento da Bacia Sergipe-Alagoas, conhecendo as anomalias gravimétricas, o contraste de densidade na superfície da bacia. Avaliar sob que circunstâncias a estimativa do relevo da interface de separação sedimento-embasamento.

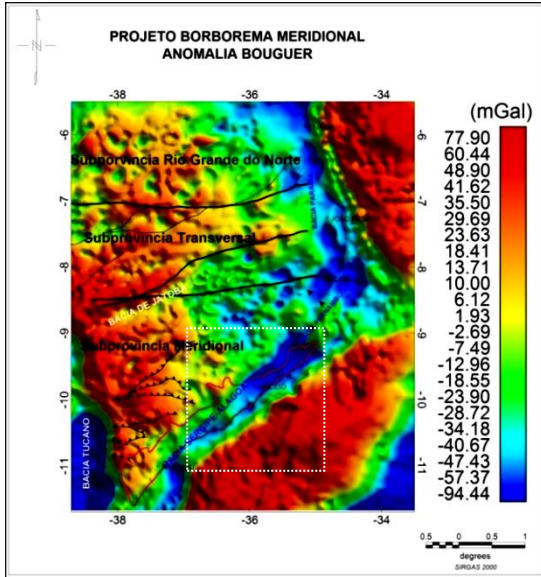


Figura 2. Mapa tectônico esquemático Província Borborema, mostrando anomalias gravimétricas e alinhamentos de zonas de fraturas continentais. A linha vermelha representa o limite geológico da Bacia Sergipe-Alagoas e a linha tracejada em branco a área de estudo.

A parte do trabalho de obtenção de soluções para o embasamento produz excelentes estimativas do relevo da bacia sedimentar desde que o contraste de densidade próxima à interface seja suficientemente grande e a atenuação do contraste de densidade com a profundidade seja suficientemente pequeno, de modo que o contraste de densidade próximo à interface entre embasamento e sedimento produza uma resposta gravimétrica bem acima do nível do ruído.

Nós utilizamos primeiramente a formulação linear como formulação do problema inverso, cujo substrato foi representado por uma malha homogênea, de posição e tamanho conhecidos, mas com contraste da propriedade física desconhecido. A inversão de dados consistiu em determinar a propriedade física em cada célula e, com isto, delinear a geometria da fonte verdadeira.

Um segundo método utilizou a formulação não-linear no qual as fontes são representadas por prismas justapostos, com contraste da propriedade física conhecido, mas com a base da bacia a ser determinada. Nós utilizamos um método estável para interpretar a relevo do embasamento da bacia sedimentar Sergipe-Alagoas. Este método que delineaia descontinuidades no relevo do embasamento.

A região em subsuperfície contendo a bacia é discretizada em uma grade de prismas elementares justapostos, cujas espessuras, que são parâmetros a

serem estimados, representam a profundidade da interface de separação entre os sedimentos e o embasamento. Conhecendo-se a anomalia gravimétrica e o contraste de densidade na superfície da bacia em superfície, foi possível delinear o relevo do embasamento Bacia Sergipe-Alagoas.

Gravimetria

A gravidade varia de ponto a ponto sobre toda a superfície terrestre. As variações com causas diversas se superpõem, se confundem e se mascaram mutuamente. Quando o objetivo é o de se estudar variação da gravidade causada por diferenças de densidade na crosta e no manto é necessário eliminar todas as demais variações conhecidas (variações causadas por: rotação e o achatamento da Terra, atração da Lua e do Sol, variações de altitude entre os pontos de medida, efeitos da estrutura da crosta e manto superior). O processo de eliminação dessas variações é chamado de “correção gravimétrica” e os valores resultantes são conhecidos como “anomalias gravimétricas”.

A anomalia gravimétrica deriva da presença de diferentes densidades na Terra, sendo que o método gravimétrico é sensível quando essas diferenças se encontram lado a lado. A maioria das rochas tem densidades entre 1,6 e 3,2 g/cm³. A densidade depende da composição e da porosidade. As rochas sedimentares, na média, apresentam valores mais baixos, em função da porosidade, e da densidade do fluido que preenche os poros. Por isso, as sequencias de rochas sedimentares apresentam normalmente um aumento da densidade em função da profundidade devido à compactação.

A aparência da anomalia depende das dimensões, contraste de densidade e profundidade do corpo anômalo. A extensão horizontal da anomalia é chamada de comprimento de onda aparente. Este é uma medida da profundidade do corpo. Corpos profundos tendem a produzir anomalias mais achatadas que ocupam uma área maior (longo comprimento de onda). Corpos mais rasos tendem a produzir anomalias estreitas e de amplitude mais definida (pequeno comprimento de onda). As anomalias de grande comprimento de onda, de origem profunda tendem a ser chamadas de regional, enquanto que as anomalias de pequeno comprimento de onda são chamadas de residual.

Modelo gravimétrico e Inversão de dados

Para o campo magnético anômalo $g(x_i, y_i, z_i)$ produzido pela distribuição de densidade (ρ_j) tem-se a seguinte equação:

$$g_i = \gamma \sum_j d_j \int_{x_{o_j}-a}^{x_{o_j}+a} \int_{y_{o_j}-a}^{y_{o_j}+a} \int_0^{z_{o_j}} \frac{z-z'}{[(x_i-x'_j)^2 + (y_i-y'_j)^2 + (z_i-z'_j)^2]^{3/2}} dx'_j dy'_j dz'_j \tag{1}$$

em que γ constante gravitacional universal e g_i é o campo gravimétrico produzido pelo j -ésimo prisma retangular. As observações $g_i(x_i, y_i, z_i)$ são aproximadas por um funcional contínuo expressando a relação entre a

propriedade física e as observações magnéticas correspondentes.

Assim temos um conjunto de observações geofísicas produzidas por fontes arbitrárias, adotando-se o sistema de coordenadas cartesianas. Geralmente assume-se que as fontes são corpos bi ou tri-dimensionais, dependendo do algoritmo utilizado. Inclui-se a fonte em uma região que represente o substrato e que é discretizada em M células. Dentro de cada célula assume-se que a propriedade física seja constante. As observações são aproximadas por um funcional contínuo expressando a relação entre a propriedade física e as observações geofísicas correspondentes; temos um conjunto de parâmetros associados a geometria e a posição de cada célula e \mathbf{p} é um vetor dimensão M das propriedades física.

Em alguns métodos utilizam-se a formulação linear como formulação do problema inverso cujo substrato é representado por uma malha homogênea, de posição e tamanho conhecidos, mas com contraste da propriedade física desconhecido. A inversão de dados consiste em determinar a propriedade física em cada célula e, com isto, delinear a geometria da fonte verdadeira (Guillen e Menichetti, 1984; Last e Kubic, 1993; Barbosa e Silva, 1994).

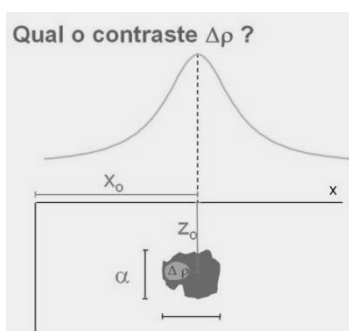


Figura 4. Esquema mostrando a anomalia causada pelo contraste de densidade entre o corpo anômalo e o entorno.

Outros métodos utilizam a formulação não-linear no qual as fontes são representadas por prismas justapostos, com contraste da propriedade física conhecido, mas com topo ou a base a serem determinados (Barbosa *et al*, 1997; Barbosa *et al*, 1999).

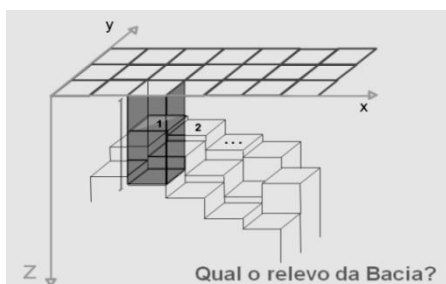


Figura 5. Esquema mostrando a região em subsuperfície contendo a bacia discretizada em uma grade de prismas elementares justapostos, cujas espessuras (p) são parâmetros a serem estimados.

O modelo interpretativo consiste de uma grade de prismas retangulares verticais justapostos. Por simplificação, os centros dos prismas coincidem com os pontos de observação. Os parâmetros a serem determinados são as espessuras p_j dos prismas, conforme ilustrado na Figura 5.

O ajuste dos dados é imposto pela minimização da função:

$$\phi^g(\mathbf{g}, \mathbf{g}^0) = \frac{1}{N} \|\mathbf{g}(\mathbf{p}) - \mathbf{g}^0\|^2, \quad (2)$$

Estimar p de \mathbf{g}^0 é um problema inverso não linear. É necessário incorporar um vínculo de suavidade, introduzindo uma ponderação no grau de suavidade entre as estimativas de parâmetros (nesse caso espessuras) contíguos. Isso é conseguido através da minimização do funcional

$$\phi^s(\mathbf{p}) = \mathbf{p}^T \mathbf{R}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \mathbf{R} \mathbf{p} \quad (3)$$

Em que f^r é o fator normalizado, \mathbf{R} é uma matriz cujas linhas contêm apenas dois elementos não nulos iguais a 1 e -1, localizados nas colunas correspondentes aos parâmetros i e j cujas estimativas devem estar o mais próximas possível. Estes parâmetros estão associados com cada par de parâmetros adjacentes (Medeiros and Silva, 1996). K é o número total de pares de parâmetros adjacentes. \mathbf{W} é uma matriz diagonal de pesos usada para relaxar o grau de suavidade imposto a determinados pares de parâmetros. Este tipo de vínculo é denominado Suavidade Ponderada. Maiores detalhes podem ser obtidos em Barbosa *et al.* (1999). Na k -ésima iteração, o i -ésimo elemento diagonal da matriz \mathbf{W} é dado essencialmente por:

$$e_{ii(k)} = \exp[-b(\hat{p}_{j(k)} - \hat{p}_{l(k)})], \quad (4)$$

em que os subscritos j e l definem o i -ésimo par de parâmetros adjacentes e b é um fator que controla o quanto o desnível $(\hat{p}_{j(k)} - \hat{p}_{l(k)})$ - deverá ser acentuado na iteração $k+1$.

O papel da matriz \mathbf{W} é permitir um aumento de resolução (em relação ao vínculo de suavidade tradicional) na estimação de relevos descontínuos. Essa tentativa de aumento de resolução, entretanto, leva a um inevitável decréscimo na estabilidade das soluções.

Para compensar essa perda de estabilidade, mais informação a priori deve ser introduzida. Essa informação será que o fundo da bacia é virtualmente plano e localizado a uma profundidade conhecida. Essa informação é imposta através da incorporação de dois vínculos adicionais: a desigualdade e a igualdade absoluta, ou seja, proximidade a alguns valores absolutos. Assim, primeiramente impõe-se que os parâmetros devem satisfazer à desigualdade

$$0 < \mathbf{p} < \mathbf{p}^{\text{sup}},$$

em que 0 é o vetor nulo, p^{sup} é o vetor cujos elementos são iguais a um limite h_{max} , considerado constante. As desigualdades acima são definidas elemento por elemento.

A seguir, impõe-se que todos os parâmetros devem estar o mais próximo possível de um valor a que é igual ou maior que h_{max} . Como os vínculos de desigualdade são rígidos e os de igualdade absoluta são aproximados, nenhum parâmetro excede h_{max} . Barbosa et al. (1999).

O vínculo de igualdade absoluta é incorporado através da minimização do funcional:

$$\phi^r = \sum_{i=1}^M (p_i - a)^2, \quad (5)$$

em que a é um valor atribuído ao limite máximo (em km) das espessuras da bacia sedimentar (um limite h_{max}). Por simplificação, foi estabelecido apenas um único valor a para toda a bacia sedimentar. Assim, os vínculos de suavidade ponderada e igualdade absoluta são incorporados através da minimização do funcional:

$$\Phi = \sum_{i=1}^N [y_i^o - g_i(p)]^2 + \mu_r \sum_{i=1}^M (p_i - a)^2 + \mu_s \mathbf{R}^T \mathbf{W}^T \mathbf{W} \mathbf{R} p \quad (6)$$

em que μ_r e μ_s são escalares não negativos conhecidos como multiplicadores de Lagrange. Detalhes do algoritmo podem ser obtidos em Barbosa et al. (1999).

Resultados

Foi caracterizado o relevo do embasamento da Bacia Sedimentar Sergipe - Alagoas mapeada gravimetricamente. Os modelos obtidos permitem explicar a distribuição do contraste de densidade no embasamento adjacente à Bacia Sedimentar Sergipe-Alagoas, assim como delineamento de estruturas ou blocos crustais.

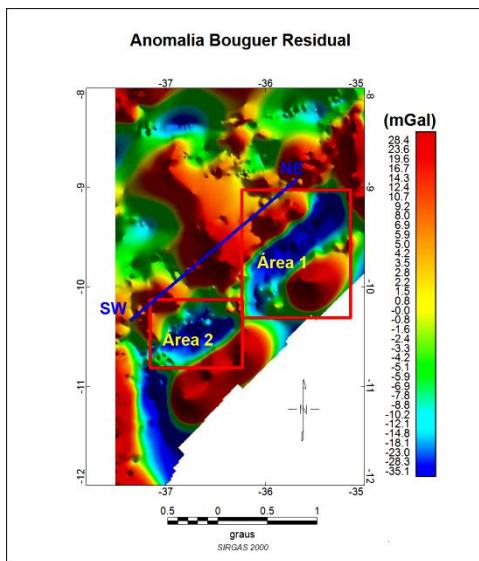


Figura 6. Mapa de anomalia Bouguer Residual e perfil SW-SE utilizado para inversão 2D e obtenção de soluções de contraste

de densidade em profundidade. Áreas 1 e 2 para obtenção de soluções 3D para o embasamento.

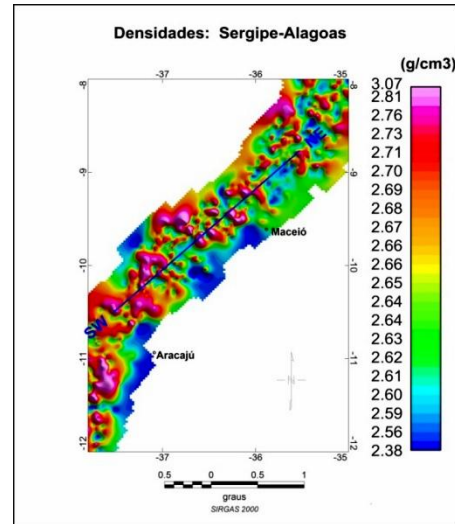


Figura 7. Mapa de distribuição de densidade na superfície adjacente à Bacia Sedimentar Sergipe-Alagoas.

A interpretação de dados gravimétricos (Figura 6) foi utilizada para obtenção de soluções de contraste de densidade, conhecendo as anomalias gravimétricas, o contraste de densidade na superfície da bacia (Figura 7).

Nós primeiramente utilizamos a formulação linear como formulação do problema inverso, cujo substrato foi representado por uma malha homogênea, de posição e tamanho conhecidos, mas com contraste de densidade desconhecido (Figura 8). A inversão de dados consistiu em determinar o contraste de densidade em cada célula e, com isto, delinear a geometria da fonte verdadeira.

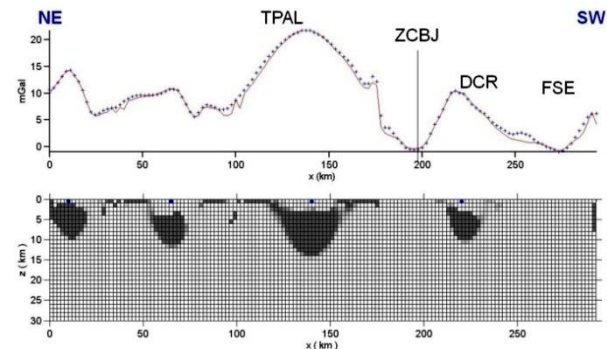


Figura 8. Soluções de contraste de densidade obtidas a partir da inversão de dados gravimétricos. Principais estruturas regionais: ZCBJ = Zona de Cisalhamento Belo Monte-Jeremoabo; TPAL = Terreno Pernambuco-Alagoas; DRC = Domínio Rio Coruripe; FSE = Faixa Sergipana.

Interpretações que envolvem a posição e o delineamento dessas fontes compreenderam o método de inversão que determinou automaticamente a posição e a geometria dos corpos. Informação a priori sobre cada fonte, assim como as informações geológicas foram traduzidas

matematicamente e incorporadas automaticamente pelo método.

Na Figura 8 apresentamos um modelo de contraste de densidade em profundidade obtido a partir de dados gravimétricos residuais onde cada solução obtida possui um valor máximo de $\Delta\rho=0,25 \text{ g/cm}^3$. As principais estruturas regionais foram mapeadas em profundidade: Zona de Cisalhamento Belo Monte-Jeremoabo, Terreno Pernambuco-Alagoas e $\text{DRC} = \text{Domínio Rio Coruripe}$.

Conhecendo-se a anomalia gravimétrica e o contraste de densidade na superfície da bacia em superfície, foi possível delinear o relevo do embasamento Bacia Sergipe-Alagoas.

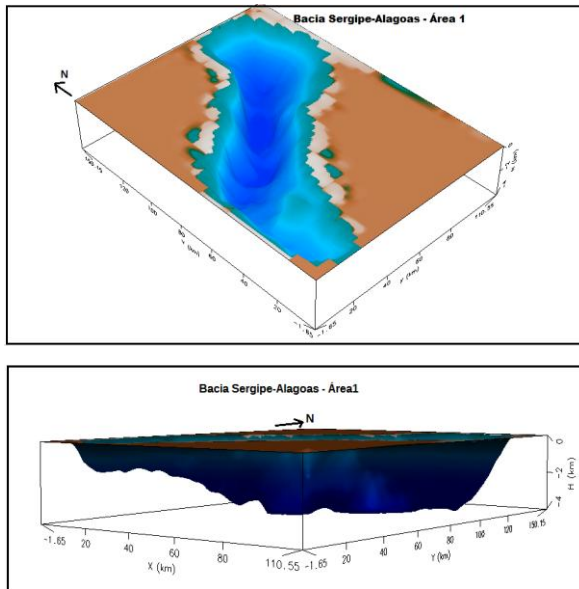


Figura 9. Soluções de espessuras estimadas h_i que representam a profundidade da interface de separação entre os sedimentos e o embasamento para Área 1.

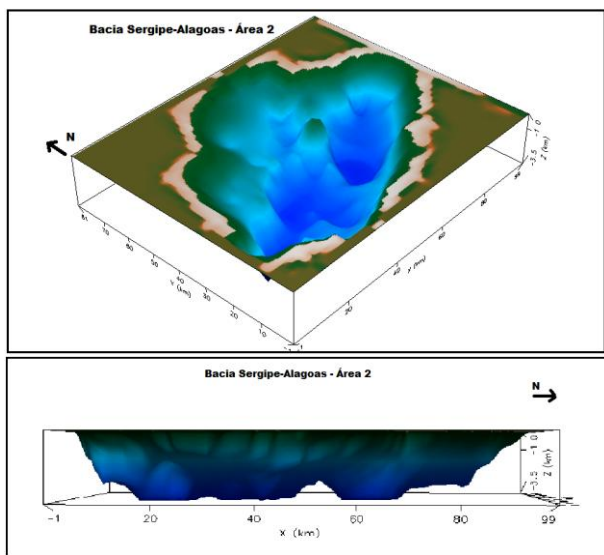


Figura 10. Soluções de espessuras estimadas h_i que representam a profundidade da interface de separação entre os sedimentos e o embasamento para Área 2.

Utilizamos a formulação não-linear no qual as fontes são representadas por prismas justapostos, com contraste de densidade conhecido, mas com a base da bacia a ser determinada. A parte do trabalho de obtenção de soluções 3D para o embasamento produziu excelentes estimativas do relevo da bacia sedimentar como pode ser visto nas Figuras 9 e 10.

A área 1 contém 1702 estações gravimétricas onde os valores máximos obtidos da espessura foram 4,0 km de profundidade (Figura 9). A área 2 contém 1665 estações gravimétricas onde os valores máximos obtidos da espessura foram 3,50 km de profundidade (Figura 10). Para inverter os dados reais utilizou-se um contraste de densidade de $\Delta\rho=-0,25 \text{ g/cm}^3$.

O método utilizado permitiu o delineamento das discontinuidades no relevo do embasamento. A região em subsuperfície contendo a bacia foi discretizada em uma grade de prismas elementares justapostos, cujas espessuras estimadas representam a profundidade da interface de separação entre os sedimentos e o embasamento da Bacia Sergipe-Alagoas que foi dividida em duas áreas (1 e 2).

A inversão utilizou como critério de parada o erro do dado menor que 0,1%. Os modelos de profundidades nas inversões apresentam correspondência com as anomalias observadas (Figuras 11 a 13).

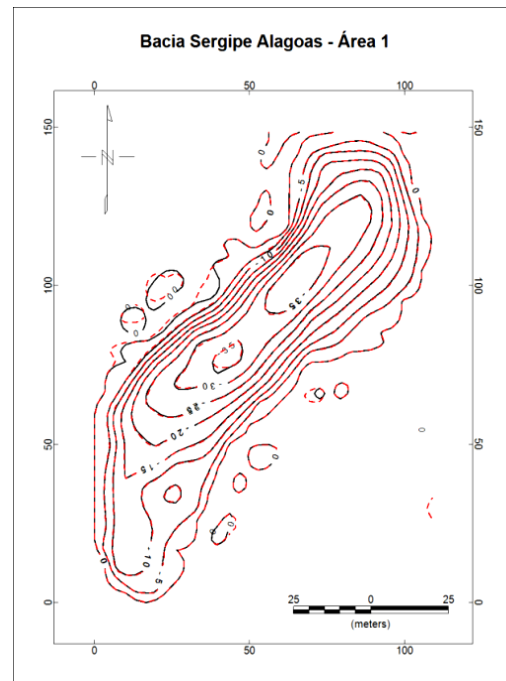


Figura 11. Área 1 - Anomalia Bouguer Residual (linhas pretas sólidas) obtidas pela remoção de uma superfície polinomial de ordem três, e anomalias ajustada (linhas tracejadas vermelhas) usando inversão. Intervalo de Contorno de 5.0 mGal.

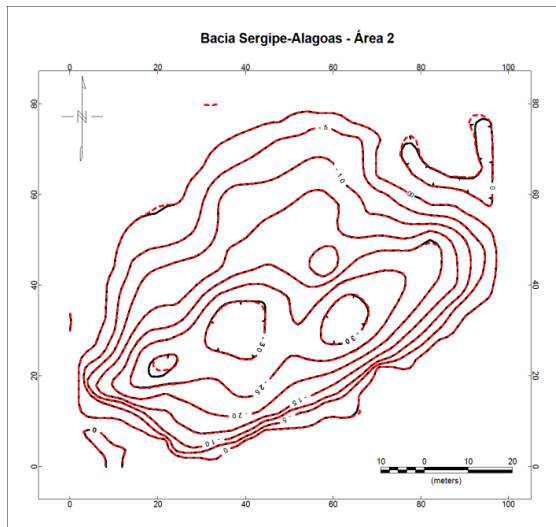


Figura 12. Área 2 - Anomalia Bouguer Residual (linhas pretas sólidas) obtidas pela remoção de uma superfície polinomial de ordem três, e anomalias ajustada (linhas tracejadas vermelhas) usando inversão. Intervalo de Contorno de 5.0 mGal

Tabela 1. Comparação de medidas diretas (H_{verd}) com os resultados da inversão (H_{calc}) e $\Delta(\%)$ discrepância.

Longitude	Latitude	H_{verd}	H_{calc}	$\Delta(\%)$
-36.81	-10.60	2.44	2.36	5.26
-36.79	-10.57	3.00	2.95	1.65
-36.06	-10.00	1.00	0.95	4.41
-36.04	-9.99	1.11	1.17	4.97
-35.92	-9.68	3.19	3.24	1.53
-35.91	-9.59	2.05	2.12	3.56
-35.89	-9.59	2.66	2.57	3.23
-35.80	-9.59	3.12	3.00	3.99
-35.75	-9.55	3.00	3.08	1.50
-35.71	-9.58	3.47	3.53	5.43

A modelagem se mostrou eficiente e o método de inversão também se mostrou eficaz para se obter o delineamento do relevo do embasamento adotando o contraste de densidade de $\Delta\rho = -0,25 \text{ g/cm}^3$. Verificamos na Tabela 1, através da comparação de medidas diretas (H_{verd}) com os resultados da inversão (H_{calc}), que os resultados para os modelos invertidos no trabalho foram satisfatório.

Discussão e Conclusões

Neste trabalho apresentamos modelos de contraste de densidade em profundidade obtido a partir de dados gravimétricos residuais onde cada solução obtida possui um valor máximo de $\Delta\rho = 0,25 \text{ g/cm}^3$. As principais estruturas regionais foram mapeadas em profundidade.

A partir do conhecimento da anomalia gravimétrica e o contraste de densidade na superfície da bacia em superfície, foi possível delinear o relevo do embasamento Bacia Sergipe-Alagoas. A área 1 apresentou valores máximos para espessura de 4,0 km de profundidade. A área 2 apresentou valores máximos para espessura de 3,5 km de profundidade com o relevo do embasamento apresentando mudanças ocasionalmente abruptas.

As anomalias gravimétricas foram invertidas com contraste de densidade de $\Delta\rho = -0,25 \text{ g/cm}^3$. O método de inversão se mostrou eficaz para se obter o delineamento do relevo do embasamento e as espessuras apresentam correspondência com as anomalias observadas.

As bacias sedimentares representam a principal fonte de concentração de petróleo. O estudo dessas bacias pode revelar a existência de petróleo em acumulações comercialmente exploráveis. Porém, a acumulação do petróleo depende da existência de armadilhas estruturais que o aprisionem e promovam sua concentração.

Agradecimentos

Agradecemos ao Promob – Cenpes – Petrobras pelo apoio através do projeto Petrobras 0050.0082543.13-9.

A Professora Dr^a. Valéria Cristina Barbosa pelos algoritmos de inversão.

Referências

- Aquino, G.S., Lana, M.C. 1990. Exploração na Bacia de Sergipe-Alagoas: o “estado da arte”. *Boletim de Geociências da Petrobrás*, Rio de Janeiro, 4(1):75-84.
- Barbosa, V. C. F., and Silva, J. B. C., 1994, Generalized compact gravity inversion: *Geophysics*, 59, 57-68.
- Barbosa, V. C. F.; Silva, J. B. C.; Medeiros, W. E. 1997. Gravity inversion of basement relief using approximate equality constraints on depth. *Geophysics*, 62, 1745-1757.
- Barbosa, V. C. F.; Silva, J. B. C.; Medeiros, W. E. 1999. Gravity inversion of a discontinuous relief stabilized by weighted smoothness constraints on depth. *Geophysics*, 64, 1429-1438.
- Cainelli, C., Mohriak, W.U. 1998. Geology of Atlantic Eastern Brazilian basins. 1998. In: AAPG, International Conference & Exhibition Short Course – Brazilian Geology Part II, Rio de Janeiro, Brazil, 67 p.
- Guillen, A., and Menichetti, V., 1984, Gravity and magnetic inversion with minimization of a specific functional: *Geophysics*, 49, 1354-1360.
- Last, B. J., and Kubik, K., 1983, Compact gravity inversion: *Geophysics*, 48, 713721.
- Silva, J. B. C., Medeiros, W. E., and Barbosa, V. C. F., 2000, Gravity inversion using convexity constraints. *Geophysics*, 65, 102-112.