



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
FACULDADE DE GEOFÍSICA**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

RAPHAEL DI CARLO SILVA DOS SANTOS

**INTERPRETAÇÃO GRAVIMÉTRICA DAS BACIAS
SEDIMENTARES DE TAUBATÉ E DO RECÔNCAVO**

BELÉM – PARÁ

2011

RAPHAEL DI CARLO SILVA DOS SANTOS

**INTERPRETAÇÃO GRAVIMÉTRICA DAS BACIAS
SEDIMENTARES DE TAUBATÉ E DO RECÔNCAVO**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado à Faculdade de
Geofísica do Instituto de
Geociências da Universidade
Federal do Pará - UFPA em
cumprimento às exigências para a
obtenção do título de bacharel em
Geofísica.

Área de Concentração: Métodos
Potenciais

Orientadora: Prof^{fa}. Dr^a. Darcicléa
Ferreira Santos

BELÉM

2011

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)
Biblioteca Geólogo Raimundo Montenegro Garcia de Montalvão

S237i Santos, Raphael Di Carlo Silva dos

Interpretação gravimétrica das bacias sedimentares de Taubaté e do Recôncavo / Raphael Di Carlo Silva dos Santos; Orientador: Darcicléa Ferreira Santos – 2010

49 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Geofísica) – Faculdade de Geofísica, Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, Quarto Período de 2010.

1. Geofísica. 2. Interpretação gravimétrica. 3. Inversão não linear. 4. Bacia de Taubaté. 5. Bacia do Recôncavo. I. Santos, Darcicléa Ferreira, *orient.* II. Universidade Federal do Pará. III. Título.

CDD 20º ed.: 550

RAPHAEL DI CARLO SILVA DOS SANTOS

**INTERPRETAÇÃO GRAVIMÉTRICA DAS BACIAS
SEDIMENTARES DE TAUBATÉ E DO RECÔNCAVO**

Trabalho de conclusão de curso
apresentado à Faculdade de
Geofísica do Instituto de
Geociências da Universidade
Federal do Pará - UFPA em
cumprimento às exigências para a
obtenção do título de bacharel em
Geofísica.

Área de Concentração: Métodos
Potenciais.

Data de Aprovação ____/____/____
Conceito:_____

BANCA EXAMINADORA

Prof^a. Dr^a. Darcicléa Ferreira Santos - Orientadora

Doutora em Métodos Potenciais
Universidade Federal do Pará

Prof. Dr. João Batista Corrêa da Silva

Doutor em Métodos Potenciais
Universidade Federal do Pará

Prof. Dr. Cristiano Mendel Martins

Doutor em Métodos Potenciais
Universidade Federal do Pará

Aos meus pais pela paciência e amor

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente ao Grande Arquiteto do Universo, Deus, Jeová, Alá, lavé ou qualquer denominação cultural dada ao criador do universo pela minha existência e pelo dom da dúvida e do pensamento crítico.

Agradeço a meu pai Adalberto pelo suporte, amor, perseverança e por me ensinar a disciplina adequada para passar a futuras gerações.

Agradeço a minha mãe Selma, pelo carinho, amor, suporte, cuidados e pelos deliciosos almoços que ajudaram a me concentrar antes das aulas.

À minha namorada Bruna, por todo esse tempo de convívio e carinho.

À Prof^a Darcicléa por ter me oportunizado o ingresso, de forma didática, neste ramo da ciência.

À Prof^a Naomi Ussami, do IAG-USP, pela cessão dos dados gravimétricos da Bacia de Taubaté.

Aos demais professores da Faculdade de Geofísica pelos ensinamentos ao longo do curso.

Agradeço à UFPA pela infra-estrutura necessária à conclusão do curso.

E agradeço ao convênio PRH-06/UFPA da Agência Nacional do Petróleo (ANP) pelo suporte e investimento em forma de bolsa de estudo.

“Para mudar o mundo, você precisa antes mudar a sua cabeça.”
Jimi Hendrix

RESUMO

Obter informações sobre a interface de separação entre o embasamento e o pacote sedimentar é de grande importância para a exploração de hidrocarbonetos, pois a partir do conhecimento desta interface podemos localizar prováveis feições propícias à acumulação de óleo e gás. Apresentamos neste trabalho a interpretação de três perfis gravimétricos na Bacia de Taubaté, localizada no estado de São Paulo, e de dois perfis gravimétricos na Bacia do Recôncavo, localizada no estado da Bahia. Aplicamos o método do ajuste robusto de polinômios nos dados gravimétricos de ambas as bacias para obter a anomalia Bouguer devido à bacia sedimentar. Na bacia sedimentar de Taubaté aplicamos em duas etapas o método do ajuste robusto de polinômios para remover efeitos de grande comprimento de ondas devido principalmente a interface crosta-manto. Para a bacia do Recôncavo utilizamos o método do ajuste robusto de polinômios em dados gravimétricos Bouguer corrigidos do efeito gravimétrico devido à crosta-manto. Obtivemos as interpretações do delineamento do relevo do embasamento, de ambas as bacias, utilizando o método de inversão não linear com o vínculo de suavidade global. A interpretação gravimétrica do relevo do embasamento da Bacia de Taubaté mostrou uma profundidade média de 895 m, indicando um embasamento raso, enquanto que a interpretação gravimétrica do relevo do embasamento da Bacia do Recôncavo mostrou uma profundidade média de 6,32 km, indicando um embasamento profundo. Ambas as interpretações estão consistentes com análises estruturais presentes na literatura.

Palavras-chave: Geofísica. Interpretação gravimétrica. Inversão não linear. Bacia de Taubaté. Bacia do Recôncavo.

ABSTRACT

Getting information of the interface separating the basement and the sedimentary package is of great importance on hydrocarbon exploration. From the knowledge of this interface we can infer the localization of propitious features of oil and gas accumulation. We present the interpretation of three gravity profiles in Taubaté Basin, located in São Paulo state, and two gravity profiles in Recôncavo Basin, located in Bahia state. We apply the robust polynomial fitting method in gravity data to get the residual Bouguer anomaly resulting from the sedimentary basin. In Taubaté Basin we apply the robust polynomial fitting method in two stage, to mainly remove the effect of great wave length resulting from the crust-mantle interface. For Recôncavo Basin we use the robust polynomial fitting method in Bouguer gravity data corrected of the gravity effect due to crust-mantle. We got the interpretation of basement relief delineation, of both basins, using the method of non-linear inversion and smoothness constraint. The gravity interpretation of Taubaté Basin's basement relief showed an average depth of 895 m, indicating a shallow basement, whereas the gravity interpretation Recôncavo Basin's basement relief showed an average depth of 6,32 km, indicating a deep basement. Both interpretations are consistent with structural analyses found on literature.

Keywords: Geophysics. Gravity interpretation. Non-linear inversion. Taubaté Basin. Recôncavo Basin.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – (a) Anomalia gravimétrica $g(x)$. (b) Representação esquemática do relevo do embasamento de uma bacia sedimentar.	18
Figura 2 – Modelo interpretativo da metodologia não linear na qual as espessuras p_j dos Prismas bidimensionais são os parâmetros a serem estimados.	19
Figura 3 – Perfil 1.1: Dados sintéticos com 20 observações. (a) Anomalias Bouguer observada (pontos azuis) e ajustada (linha vermelha). (b) Relevos do embasamento simulado (linha azul) e estimado (linha vermelha).	25
Figura 4 – Perfil 1.2: Dados sintéticos com 10 observações. (a) Anomalias Bouguer observada (pontos azuis) e ajustada (linha vermelha). (b) Relevos do embasamento simulado (linha azul) e estimado (linha vermelha).	25
Figura 5 – Perfil 2.1: Dados sintéticos com 100 observações. (a) Anomalias Bouguer observada (pontos azuis) e ajustada (linha vermelha). (b) Relevos do embasamento simulado (linha azul) e estimado (linha vermelha).	27
Figura 6 – Perfil 2.2: Dados sintéticos com 50 observações. (a) Anomalias Bouguer observada (pontos azuis) e ajustada (linha vermelha). (b) Relevos do embasamento simulado (linha azul) e estimado (linha vermelha).	27
Figura 7 - Mapa de localização da Bacia de Taubaté.	28
Figura 8 – Seção geológica esquemática transversal à Bacia de Taubaté.	29
Figura 9 – Gráfico do emq do resíduo versus a ordem do polinômio para a separação regional-residual nos dados gravimétricos da Bacia de Taubaté.	31
Figura 10 – Mapa Bouguer de anomalia residual da Bacia de Taubaté corrigido do efeito anômalo da interface Crosta-Manto. Intervalo de contorno 2 mGal.	32
Figura 11 – Mapa Bouguer de anomalia da Bacia de Taubaté corrigido do efeito anomalia gravimétrica de fontes profundas apresentando a localização geográfica da bacia de Taubaté e dos perfis AA', BB' e CC'. Intervalo de contorno 2 mGal.	33

Figura 12– Perfil gravimétrico AA'. (a) Anomalias Bouguer observada (pontos azuis) e ajustada (linha vermelha). (b) Relevo estimado do embasamento.35

Figura 13– Perfil gravimétrico BB'. (a) Anomalias Bouguer observada (pontos azuis) e ajustada (linha vermelha). (b) Relevo estimado do embasamento.35

Figura 14– Perfil gravimétrico CC'. (a) Anomalias Bouguer observada (pontos azuis) e ajustada (linha vermelha). (b) Relevo estimado do embasamento.36

Figura 15– Localização, limites e arcabouço estrutural da Bacia do Recôncavo.38

Figura 16– Seção geológica esquemática NW-SE, ilustrando a morfologia de hemi- graben da bacia do Recôncavo, cujo depocentro situa-se a leste.38

Figura 17– Mapa gravimétrico da Bacia do Recôncavo corrigido do efeito gravimétrico da interface Crosta-Manto. A letra B indica a localização do Baixo de Camaçari. Intervalo de contorno de 3 mGal.40

Figura 18– Gráfico do emq do resíduo versus a ordem do polinômio para a separação regional-residual nos dados gravimétricos da Bacia do Recôncavo.41

Figura 19– Mapa Bouguer devido ao relevo do embasamento da Bacia do Recôncavo apresentando as posições dos perfis R1R1' e R2R2'. As letras B e P1 indicam as localizações do Baixo de Camaçari e do ponto de intersecção, respectivamente. Intervalo de contorno de 3 mGal.42

Figura 20– Perfil gravimétrico R1R1'. (a) Anomalias Bouguer observada (pontos azuis) e ajustada (linha vermelha). (b) Relevo estimado do embasamento. A linha preta assinala a posição do ponto de intersecção P1 entre os dois perfis.44

Figura 21– Perfil gravimétrico R2R2'. (a) Anomalias Bouguer observada (pontos azuis) e ajustada (linha vermelha). (b) Relevo estimado do embasamento. A linha preta assinala a posição do ponto de intersecção P1 entre os dois perfis.45

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	METODOLOGIA	15
2.1	SEPARAÇÃO REGIONAL-RESIDUAL	15
2.2	INVERSÃO NÃO LINEAR	18
3	APLICAÇÃO EM DADOS SINTÉTICOS	23
3.1	AMBIENTE GEOLÓGICO HIPOTÉTICO 1	24
3.2	AMBIENTE GEOLÓGICO HIPOTÉTICO 2	26
4	INTERPRETAÇÃO GRAVIMÉTRICA DA BACIA DE TAUBATÉ	28
4.1	GEOLOGIA DA BACIA DE TAUBATÉ	28
4.2	DADOS GRAVIMÉTRICOS	30
4.3	SEPARAÇÃO REGIONAL-RESIDUAL	30
4.4	INVERSÃO NÃO LINEAR	33
5	INTERPRETAÇÃO GRAVIMÉTRICA DA BACIA DO RECÔNCAVO	37
5.1	GEOLOGIA DA BACIA DO RECÔNCAVO	37
5.2	DADOS GRAVIMÉTRICOS	39
5.3	SEPARAÇÃO REGIONAL-RESIDUAL	39
5.4	INVERSÃO NÃO LINEAR	42
6	CONCLUSÕES	46
	REFERÊNCIAS	46

1 INTRODUÇÃO

Para obter uma interpretação gravimétrica do relevo do embasamento devemos aplicar um conjunto de técnicas distintas nas observações gravimétricas Bouguer. A separação entre as anomalias gravimétricas de origem profunda e rasa é uma técnica efetiva para separar efeitos gravimétricos das interfaces de separação crosta-manto e embasamento-sedimento, daqueles produzidos por corpos intrasedimentares, fornecendo, assim, a anomalia gravimétrica devida apenas à bacia sedimentar. Aplicando técnicas de inversão ao efeito gravimétrico devido apenas ao pacote sedimentar podemos delinear o relevo do embasamento das bacias sedimentares detectando, assim, feições propícias à acumulação de óleo e gás, tais como falhas e elevações do relevo do embasamento.

A partir da detecção de falhas e de elevações no relevo do embasamento conseguimos obter informações sobre a localização de prováveis trapas. Em um ambiente sedimentar a ocorrência de falhas desloca rochas selantes e rochas reservatórios propiciando a formação de trapas estruturais. Elevações presentes no relevo do embasamento provocam sedimentação em flancos proporcionando condições adequadas para a formação de trapas estratigráficas. Assim, a delineação do relevo do embasamento é de grande importância para a exploração de hidrocarbonetos visto sua eficácia no auxílio ao mapeamento dessas trapas.

Entre as abordagens para o processamento e a interpretação de dados gravimétricos destacamos as metodologias de separação entre as anomalias de grande e de pequeno número de ondas classificadas como separação regional-residual e de estimação das posições horizontais e verticais de fontes gravimétricas, respectivamente.

Entre os métodos de separação regional-residual destacamos a técnica do ajuste robusto de polinômios (BELTRÃO et al., 1991) aplicada nos trabalhos de Ribeiro e Mantovani (2008) para identificar anomalias gravimétricas residuais devido a intrusões contendo carbonatitos e de Vasconcelos (2007) para obter a anomalia gravimétrica devida à cratera de impacto em Araguinha (MT/GO). Utilizamos neste trabalho para obter as anomalias devidas às bacias de Taubaté e do Recôncavo, a

técnica do ajuste robusto de polinômios (BELTRÃO et al., 1991) devida à sua eficiência em evitar o aparecimento de pseudo anomalias comuns nos métodos de ajuste polinomiais.

A estimativa do relevo do embasamento de bacias sedimentares a partir de dados gravimétricos é um problema mal-posto. Utilizando a técnica de inversão podemos incorporar informação a priori sobre características da geometria do relevo do embasamento para transformar este problema em um problema bem-posto. Comumente a informação a priori é incorporada através da minimização de um funcional estabilizador (TIKHONOV; ARSENIN, 1977) sujeito ao desajuste dos dados ser o menor possível. A técnica de inversão não linear acoplada a estabilizadores matemáticos foi apresentada, por exemplo, em Barbosa et al. (1997) e Lima (2009) para estimar o relevo do embasamento de bacias sedimentares.

O objeto de estudo deste trabalho é a interpretação gravimétrica das bacias sedimentares de Taubaté e do Recôncavo. Para realizar a interpretação gravimétrica da bacia de Taubaté, Fernandes e Chang (2001) obtiveram o mapa residual de anomalia Bouguer da Bacia de Taubaté usando os filtros de continuação para cima e passa-alta. Para obter a estimativa da profundidade média do embasamento da Bacia de Taubaté Fernandes e Chang (2001) realizaram modelagem interativa gravimétrica a partir do cálculo do efeito gravimétrico de um corpo bidimensional de seção vertical arbitrária (TALWANI et al., 1959), em perfis gravimétricos transversais à bacia. Leão et al. (1996) obtiveram a estimativa do relevo do embasamento da Bacia do Recôncavo desenvolvendo uma metodologia utilizando o método do ajuste robusto de polinômios (BELTRÃO et al., 1991) nos dados gravimétricos. A interpretação gravimétrica da Bacia do Recôncavo apresentada por Menezes (1990) consistiu em separar o efeito gravimétrico de feições mais profundas (regional) e mais rasas (residual) aplicando o método do ajuste robusto de polinômios nos dados gravimétricos e interpretando separadamente os efeitos gravimétricos das componentes regionais e residuais.

Neste trabalho apresentamos a interpretação gravimétrica do relevo do embasamento de três perfis na Bacia de Taubaté e de dois perfis na Bacia do Recôncavo. Para a interpretação de todos os perfis utilizamos o método do ajuste robusto de polinômios de Beltrão et al. (1991) para a separação regional-residual e

utilizamos o método de inversão não linear acoplado à informação a priori da suavidade do relevo do embasamento.

Para dar suporte às interpretações gravimétricas das bacias de Taubaté e do Recôncavo, a metodologia da inversão não linear foi aplicada em dados gravimétricos sintéticos de ambientes geológicos hipotéticos, produzindo relevos estimados próximos aos relevos do embasamento dos ambientes hipotéticos. Os resultados obtidos nas interpretações das Bacias de Taubaté e do Recôncavo mostraram resultados consistentes com análises estruturais presentes na literatura. As profundidades do relevo do embasamento encontradas nos perfis para a Bacia de Taubaté indicaram um embasamento raso de aproximadamente 895 m de profundidade. Já as profundidades encontradas nos perfis para a Bacia do Recôncavo indicaram um embasamento profundo no entorno de 6,32 km de profundidade.

2 METODOLOGIA

2.1 SEPARAÇÃO REGIONAL-RESIDUAL

Neste trabalho escolhemos para separação regional-residual o método do ajuste robusto de polinômios de Beltrão et al. (1991). O ajuste robusto de polinômios leva em consideração a informação a priori de que todos os valores de uma mesma anomalia devem ter o mesmo sinal, reduzindo a ocorrência de pseudo anomalias no campo residual comuns a métodos que utilizam o ajuste por mínimos quadrados.

Um estimador-M robusto (HUBER,1981) pode ser obtido minimizando a função objeto

$$Q(c) = \sum_{i=1}^n u(r_i/s), \quad (1)$$

em que u é o funcional definindo o método robusto, s é um fator de escala e r_i é o resíduo obtido na i -ésima observação dado por

$$r_i = g_i^0 - f(x_i, y_i, z_i, c), \quad (2)$$

sendo g_i^0 o i -ésimo elemento de um vetor $\mathbf{g}^0$, N-dimensional, correspondente às observações gravimétricas, $f(x_i, y_i, z_i, c)$ o funcional ajustante avaliado na posição espacial (x_i, y_i, z_i) da i -ésima observação e $\mathbf{c}$ o vetor M-dimensional de parâmetros que define o funcional f .

Para a separação regional-residual definimos o funcional $f(x_i, y_i, z_i, c)$ como

$$f(x_i, y_i, z_i, c) = P_n(x_i, y_i, c), \quad (3)$$

em que P_n é um polinômio de n -ésima ordem correspondente ao ajuste do campo regional nas direções x e y , e $\mathbf{c}$ o vetor de coeficientes do polinômio.

Substituindo o funcional f na expressão (2) temos

$$r_i = g_i^0 - P_n(x_i, y_i, c). \quad (4)$$

A condição necessária para o mínimo de $Q(c)$ na equação (1) é

$$\sum_{i=1}^N q \left(\frac{r_i}{s} \right) \left[\frac{\partial P_n(x_i, y_i, c)}{\partial c_j} \right] = 0 \quad j = 1, 2, \dots, M, \quad (5)$$

em que $q \left(\frac{r_i}{s} \right) = \left[\frac{\partial u}{\partial r} \right]_{r=r_i}$. Transformando a equação (5) em notação matricial obtemos

$$\mathbf{A}^T \mathbf{q} = \mathbf{0}, \quad (6)$$

em que $\mathbf{A}$ é uma matriz $N \times M$ cujo elemento a_{ij} é

$$a_{ij} = \left[\frac{\partial P_n(x_i, y_i, c)}{\partial c_j} \right], \quad (7)$$

$\mathbf{q}$ é o vetor nulo cujo i -ésimo elemento é $q_i = q \left(\frac{r_i}{s} \right)$ e $\mathbf{0}$ é o vetor nulo. Escrevendo

$$\mathbf{q} = \mathbf{W} \mathbf{r}, \quad (8)$$

em que $\mathbf{W}$ é uma matriz diagonal $N \times N$ de peso cujo i -ésimo elemento é dado por

$$w_i = \frac{q_i}{r_i}, \quad (9)$$

sendo $\mathbf{r}$ o vetor cujo i -ésimo elemento é r_i , e substituindo a expressão (8) em (6), obtemos

$$\mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{r} = \mathbf{0}. \quad (10)$$

Como o funcional f é linear em $\mathbf{c}$, o vetor de resíduos pode ser escrito como

$$\mathbf{r} = \mathbf{g}^0 - \mathbf{A}\mathbf{c} \quad (11)$$

Substituindo a expressão (11) na expressão (10) temos

$$\mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{A} \mathbf{c} = \mathbf{A}^T \mathbf{W} \mathbf{g}^0. \quad (12)$$

Como $\mathbf{W}$ depende implicitamente de $\mathbf{c}$, a expressão (12) não pode ser resolvida explicitamente para $\mathbf{c}$. Deste modo teremos que resolver iterativamente o problema, combinando as equações (9), (11) e (12). Na k -ésima observação, a matriz de pesos $\mathbf{W}^k$ é obtida a partir de $\mathbf{c}^k$ (k -ésima aproximação de $\mathbf{c}$), usando as equações (9) e (11). A k -ésima primeira aproximação é dada por

$$\mathbf{c}^{(k+1)} = [\mathbf{A}^T \mathbf{W}^k \mathbf{A}]^{-1} [\mathbf{A}^T \mathbf{W}^k \mathbf{g}^0]. \quad (13)$$

A iteração começa com $\mathbf{W}^0 = \mathbf{I}$ (caso particular correspondente aos mínimos quadrados). A partir da segunda iteração a matriz $\mathbf{W}$ admite pesos positivos dados na equações (14) e pesos negativos dados na equações (15) abaixo que são calculados pelas equações (9) e (11), sendo q_i dado por

$$q_i^{(k)} = r_i^{(k)} e^{-t^2}, \quad t < 5,48, \quad (14)$$

$$q_i^{(k)} = -0,1 r_i^{(k)} \left(\frac{t - 5,48}{r_{\max}} \right), \quad t \geq 5,48, \quad (15)$$

sendo,

$$t = \frac{0,6745 r_i^{(k)}}{v^{(k)}}. \quad (16)$$

Em que $r_{\max}$ é o máximo valor absoluto do resíduo na iteração de ordem k , $r_i^{(k)}$ é o resíduo no i -ésimo ponto na iteração de ordem k e $v^{(k)}$ é a mediana dos valores absolutos dos resíduos na iteração de ordem k . O processo termina quando a mediana dos valores absolutos dos resíduos é estabilizada (resíduos possuem pouca influência na função ajustada). Quantitativamente a ordem ótima do polinômio ajustante, neste trabalho, é estimada através de um gráfico do erro médio quadrático (emq) do resíduo em função da ordem do polinômio. A ordem ótima do polinômio é aquela em que o resíduo decai mais suavemente em função da ordem do polinômio.

2.2 INVERSÃO NÃO LINEAR

Neste trabalho aplicamos, para a interpretação gravimétrica do relevo do embasamento, o método de inversão não linear. Seja $\mathbf{g}^0$ um vetor N-dimensional correspondente às observações gravimétricas de um perfil transversal na direção do eixo x (Figura 1) de uma bacia bidimensional alongada na direção do eixo y . Na Figura 1b, a superfície contínua S descreve o relevo do embasamento da bacia sedimentar.

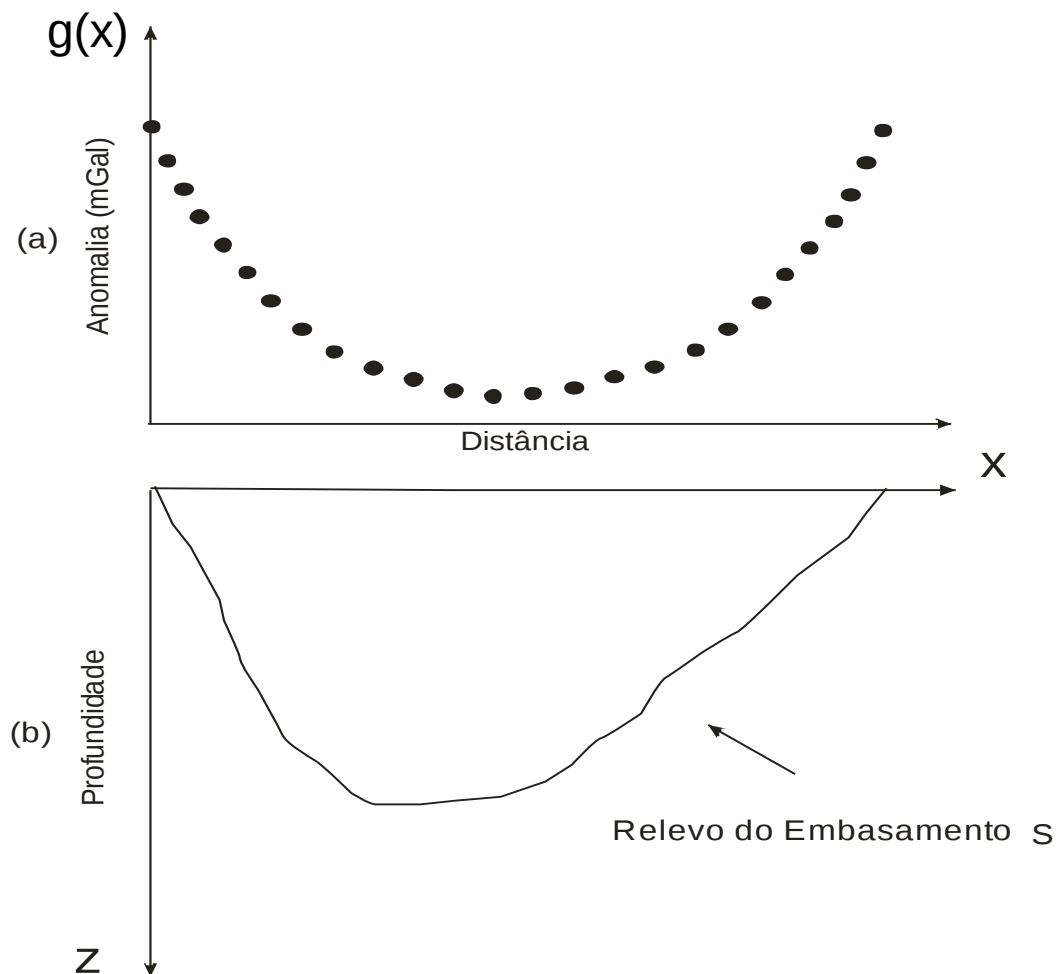


Figura 1 – (a) Anomalia gravimétrica $g(x)$. (b) Representação esquemática do relevo do embasamento de uma bacia sedimentar.

Para estimar a superfície S do relevo do embasamento representado na Figura 1b admitiremos que:

- i) os dados gravimétricos (Figura 1a) foram obtidos ao longo de um perfil paralelo à direção x ;
- ii) o contraste de densidade $\Delta\rho$ entre o pacote sedimentar e o embasamento é constante e conhecido;
- iii) o relevo do embasamento pode ser aproximado por um modelo interpretativo formado por um conjunto de M prismas bidimensionais verticais justapostos representadas na Figura 2.

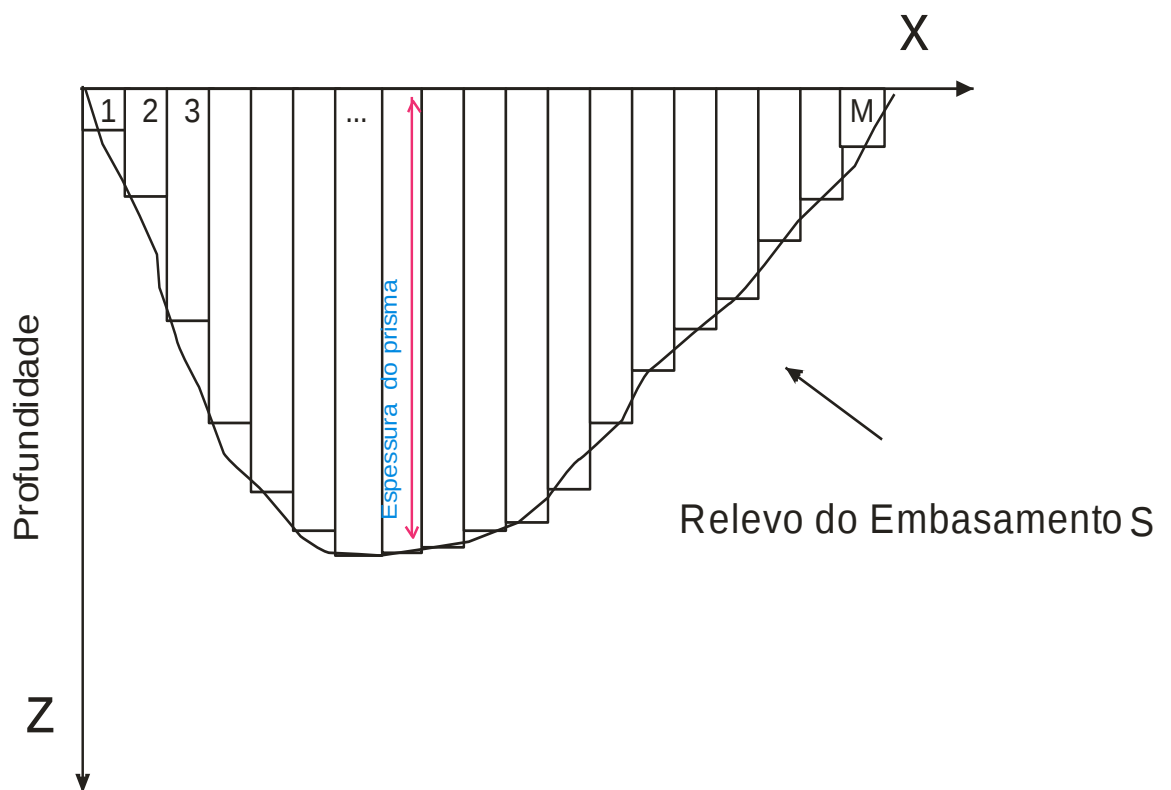


Figura 2 – Modelo interpretativo da metodologia não linear na qual as espessuras p_j dos M -prismas bidimensionais são os parâmetros a serem estimados.

No modelo interpretativo da Figura 2 o topo de cada prisma está localizado na superfície, $z = 0$; a coordenada do centro do k -ésimo prisma é dada na expressão (17)

$$x_k = x_0 + (k - 0,5)dx_p, \quad (17)$$

em que, x_0 é a origem do sistema de coordenadas do modelo interpretativo da bacia sedimentar e dx_p é o espaçamento constante entre os centros dos prismas. As

espessuras de cada prisma do modelo interpretativo (Figura 2) são os parâmetros a serem determinados.

Seja $\mathbf{p}$ o vetor M -dimensional cujo elemento p_j é a espessura do j -ésimo prisma (Figura 2) e $\mathbf{g}$ o vetor N -dimensional cujo elemento g_i é a anomalia gravimétrica produzida pelos M prismas no i -ésimo ponto de observação. Os elementos p_j e g_i estão relacionados através da função não linear

$$g_i \equiv g(x_i, \mathbf{p}, \Delta\rho) = \sum_{j=1}^M F(x_i, p_j, \Delta\rho) \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (18)$$

em que $F(x_i, p_j, \Delta\rho)$ é uma função não linear que fornece a anomalia produzida em x_i por um prisma com espessura p_j com contraste de densidade $\Delta\rho$ constante (e.g. TALWANI, 1959).

O problema de inversão gravimétrica definido neste trabalho é caracterizado no problema de estimar o vetor $\mathbf{p}$ a partir das observações gravimétricas dadas no vetor $\mathbf{g}^0$. A solução deste problema requer que a observação gravimétrica definida no vetor $\mathbf{g}^0$ seja ajustada pela observação gravimétrica definida no vetor $\mathbf{g}$, o que pode ser obtido através da minimização do seguinte funcional não linear:

$$Q = \|\mathbf{g}^0 - \mathbf{g}\|_2^2, \quad (19)$$

em que $\mathbf{g}^0$ é um vetor N -dimensional contendo as observações de campo, $\mathbf{g}$ é um vetor N -dimensional contendo as observações sintéticas produzidas pelo modelo interpretativo, localizadas nos mesmos pontos de observação dos elementos de $\mathbf{g}^0$, e $\|\cdot\|_2$ é a norma euclidiana. O problema de estimar as espessuras dos M prismas (Figura 2) resulta em um problema não linear mal-posto no sentido de Hadamard (HADAMARD, 1902), uma vez que não apresenta solução estável. Para garantir a estabilidade da estimativa do relevo do embasamento introduzimos informação geológica, a priori, sobre a característica de suavidade do relevo do embasamento através do funcional estabilizador de Tikhonov de primeira ordem (TIKHONOV; ARSENIN, 1977), conhecido por suavidade global. Este funcional estabelece que a

estimativa do parâmetro definindo a espessura de cada prisma p_j deve ser próxima à estimativa da espessura do prisma adjacente p_{j+1} gerando um grau de suavidade na estimativa do relevo do embasamento. Este problema é expresso por

$$\min \|\mathbf{R}\mathbf{p}\|_2^2, \quad (20)$$

sujeito a

$$\|\mathbf{g}^0 - \mathbf{g}\|_2^2 = \delta \quad (21)$$

em que δ é uma estimativa de variância de ruído contido nos dados e $\mathbf{R}$ é uma matriz cujas linhas contêm apenas dois elementos não nulos iguais a 1 e -1 , localizados nas colunas correspondentes aos parâmetros i e $i+1$, como mostra o exemplo genérico na expressão (22), em que as estimativas dos parâmetros devem estar o mais próximo possível.

$$\mathbf{R} = \begin{matrix} & & & & i & i+1 & & & & \\ \begin{bmatrix} 1 & -1 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 1 & -1 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & \dots & 0 & 1 & -1 \end{bmatrix} \end{matrix}. \quad (22)$$

A matriz $\mathbf{R}$ de dimensões $(M-1) \times M$ será referida como matriz de primeiras derivadas discretas. O problema definido pelas expressões (20) e (21) é então resolvido minimizando-se o funcional

$$Q(p) = \|\mathbf{g}^0 - \mathbf{g}\|_2^2 + \mu \|\mathbf{R}\mathbf{p}\|_2^2, \quad (23)$$

em que μ é um escalar não negativo chamado parâmetro de regularização. O grau de suavidade imposto à estimativa do relevo do embasamento é controlado pelo

parâmetro de regularização μ . Quanto maior o valor de μ , maior o grau de suavidade. O problema de minimização da expressão (23) não apresenta uma solução explícita para $\mathbf{p}$ sendo em geral resolvido por métodos iterativos, resolvendo-se, em cada iteração, um problema linear por diversas vezes. No presente trabalho utilizaremos o método de Marquadt (MARQUADT,1963) para a minimização do funcional definido na expressão (23).

Para obter uma solução estável adotamos o seguinte procedimento:

- Contaminamos as observações gravimétricas com várias sequências distintas de ruído pseudo-aleatório;
- Adotamos como melhor valor de μ o menor valor que produz estimativas estáveis do relevo. Uma solução é considerada estável quando as estimativas, obtidas para cada sequência de ruído, usando o mesmo valor fixo de μ , estão próximas.

Neste trabalho ilustramos o relevo estimado do embasamento por uma poligonal cujos vértices são definidos pelos centros das bases dos prismas do modelo interpretativo da Figura 2.

3 APLICAÇÃO EM DADOS SINTÉTICOS

Para testar a eficiência do método de inversão não linear geramos dados sintéticos produzidos por ambientes geológicos simulados. Estes ambientes geológicos simulados apresentam relevos do embasamento semelhantes aos das bacias de Taubaté e do Recôncavo. O relevo do embasamento da bacia de Taubaté foi gerado por um processo geológico distensivo, apresentando uma profundidade menor do que 1 km e extensão perpendicular à direção de alongamento da bacia menor do que 20 km, simulado no ambiente geológico hipotético 1. A bacia do Recôncavo apresenta relevo do embasamento gerado por processos geológicos das fases rift e pré-rift, apresentando profundidade do relevo do embasamento menor do que 7 km e extensão perpendicular a extensão de alongamento da bacia menor do que 100 km, simulado no ambiente geológico hipotético 2.

Em todos os testes desta seção geramos para cada ambiente geológico hipotético dois perfis de anomalias gravimétricas que diferem entre si pela distância entre as estações de medidas. O primeiro perfil e o segundo perfil apresentam intervalo Δx entre as estações de medida de $\Delta x_1 = 1$ km e de $\Delta x_2 = 2$ km, respectivamente, ambos situados no mesmo ambiente geológico hipotético. Realizamos testes nestes dois perfis para verificar a eficácia da técnica de inversão não linear em delinear o relevo do embasamento de ambiente geológico a partir de anomalias gravimétricas com intervalo entre as estações de medidas superiores a um. Para gerar os dados sintéticos consideramos um contraste de densidade $\Delta \rho$ constante entre o pacote sedimentar e o embasamento. Para os ambientes geológicos hipotéticos 1 e 2 atribuímos contrastes de densidades $\Delta \rho_1 = -0,29$ g/cm³ e $\Delta \rho_2 = -0,3$ g/cm³ respectivamente.

As observações gravimétricas sintéticas são definidas pelos pontos em azuis e as observações gravimétricas ajustadas são definidas pela linha vermelha nas Figuras 3a, 4a, 5a e 6a.

O relevo estimado do embasamento é definido pelas estimativas das espessuras dos prismas do modelo interpretativo. O parâmetro de regularização da suavidade μ foi obtido através do procedimento descrito na seção 2.2 para obter soluções estáveis das estimativas das espessuras dos prismas. O relevo do

embasamento hipotético é representado por uma linha azul e o relevo estimado do embasamento é representado por uma linha vermelha definindo uma poligonal nas Figuras 3b, 4b, 5b e 6b.

3.1 AMBIENTE GEOLÓGICO HIPOTÉTICO 1

Esta bacia sedimentar hipotética apresenta extensão ao longo da superfície de 20 km, profundidade máxima do relevo do embasamento de 824 m e contraste de densidade $\Delta\rho_1$. Geramos a partir deste ambiente hipotético o perfil 1.1 e o perfil 1.2 de anomalias gravimétricas sintéticas. Todas as anomalias foram contaminadas com diferentes sequências de ruído pseudo-aleatório Gaussiano com média nula e desvio-padrão de 0,05 mGal para testar a estabilidade da solução.

Perfil 1.1 : Este perfil apresenta 20 observações regularmente espaçadas no intervalo Δx_1 . Para o procedimento de inversão usamos o modelo interpretativo de 100 prismas contíguos justapostos e parâmetro de regularização da suavidade de $\mu = 20$.

Perfil 1.2 : Este perfil apresenta 10 observações regularmente espaçadas no intervalo Δx_2 . Para o procedimento de inversão usamos o modelo interpretativo de 300 prismas contíguos justapostos e parâmetro de regularização da suavidade de $\mu = 50$.

As estimativas do relevo do embasamento (linha vermelha da Figura 3b e 4b) fornecem uma boa estimativa do relevo do embasamento do ambiente geológico hipotético 1 (linha azul da Figura 3b e 4b) em ambos os perfis 1.1 e 1.2. Notamos que o perfil 1.2 com espaçamento de Δx_2 necessitou de um modelo interpretativo de 300 prismas para produzir um relevo estimado próximo ao relevo simulado do embasamento. Como consequência do aumento do número de prismas e redução do número de observações do perfil 1.2, em relação ao perfil 1.1, constatamos que o parâmetro de regularização da suavidade sofreu o aumento de $\mu = 50$ em relação ao parâmetro $\mu = 20$ usado no perfil 1.1 para obter soluções estáveis.

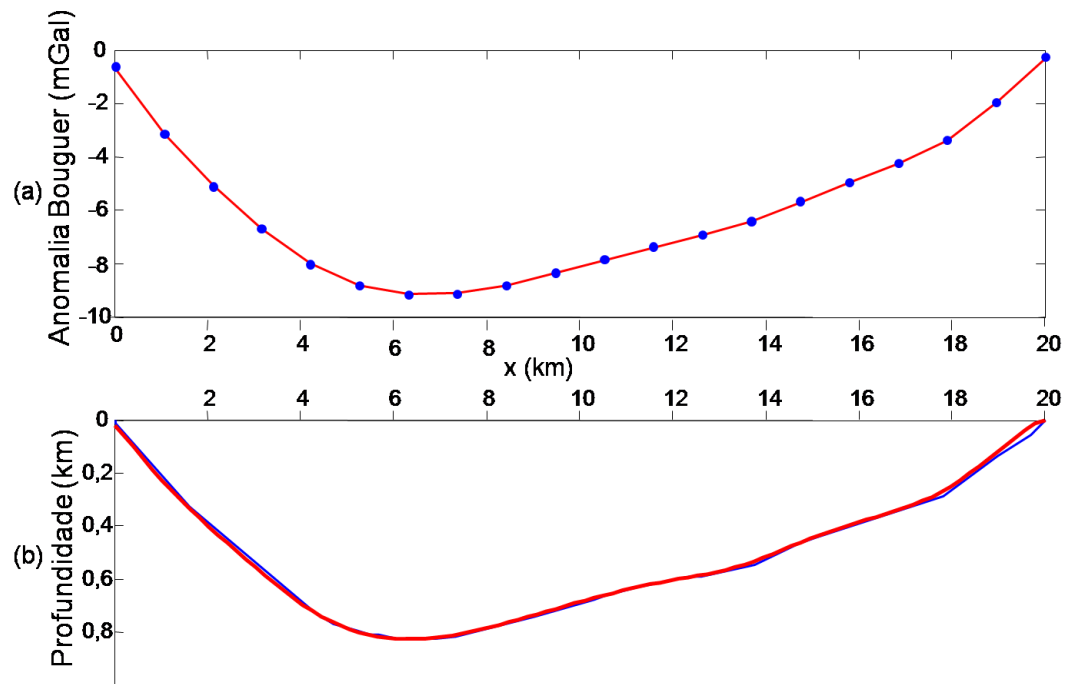


Figura 3 – Perfil 1.1: Dados sintéticos com 20 observações. (a) Anomalias Bouguer observada (pontos azuis) e ajustada (linha vermelha). (b) Relevos do embasamento simulado (linha azul) e estimado (linha vermelha).

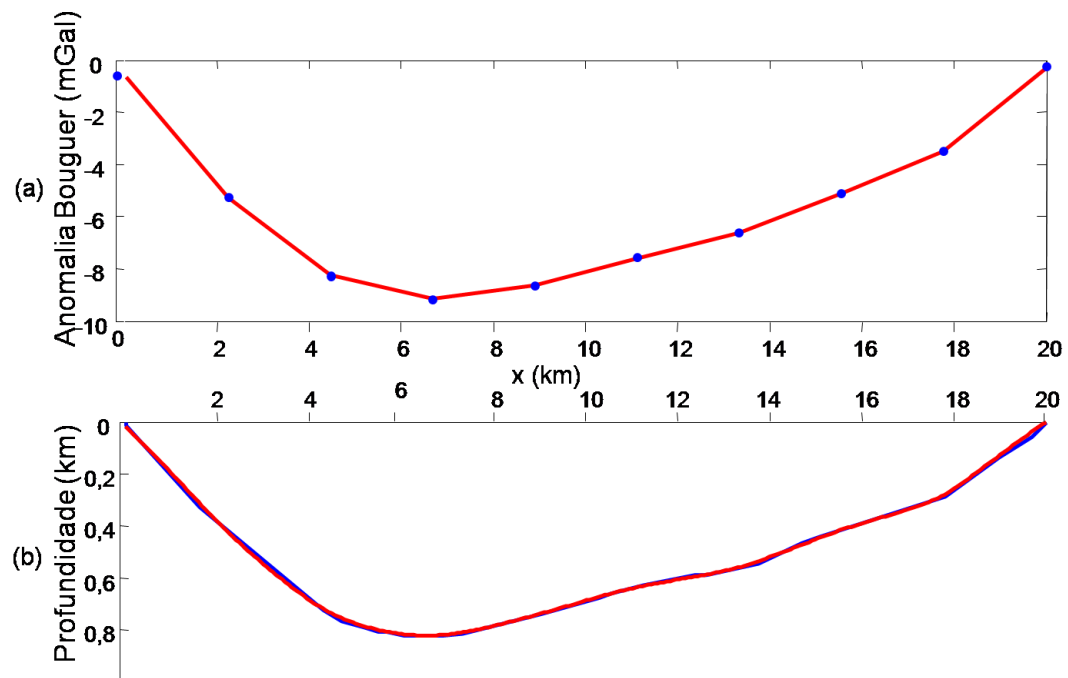


Figura 4 – Perfil 1.2: Dados sintéticos com 10 observações. (a) Anomalias Bouguer observada (pontos azuis) e ajustada (linha vermelha). (b) Relevos do embasamento simulado (linha azul) e estimado (linha vermelha).

3.2 AMBIENTE GEOLÓGICO HIPOTÉTICO 2

Este ambiente geológico hipotético apresenta extensão ao longo da superfície de 100 km, profundidade máxima do relevo do embasamento de 5,8 km e contraste de densidade $\Delta\rho_2$. A partir deste ambiente geramos o perfil 2.1 e o perfil 2.2 de anomalias gravimétricas sintéticas. Para testar a estabilidade da solução todas as anomalias foram contaminadas com diferentes sequências de ruído pseudo-aleatório Gaussiano com média nula e desvio-padrão de 0,1 mGal.

Perfil 2.1 : Este perfil apresenta 100 observações com espaçamento regular de Δx_1 . Para o processo de inversão usamos o modelo interpretativo de 300 prismas contíguos justapostos e parâmetro de regularização da suavidade de $\mu = 6$.

Perfil 2.2 : Este perfil apresenta 50 observações com espaçamento regular de Δx_2 . Para o processo de inversão usamos o modelo interpretativo de 300 prismas contíguos justapostos e parâmetro de regularização da suavidade de $\mu = 3$.

As estimativas do relevo do embasamento (linha vermelha da Figura 5b e 6b) fornecem uma boa estimativa do relevo do embasamento do ambiente geológico hipotético 2 em ambos os perfis 2.1 e 2.2 (linha azul da Figura 5b e 6b). Neste ambiente geológico hipotético notamos que os modelos interpretativos usados no procedimento de inversão dos perfis 2.1 e 2.2 não sofreram alterações no número de prismas para produzir um relevo estimado próximo ao relevo simulado do embasamento. Como consequência do número de prismas fixo do modelo interpretativo e redução do número de observações do perfil 2.2, em relação ao perfil 2.1, houve uma redução no valor do parâmetro de regularização da suavidade para $\mu = 3$ em relação ao parâmetro $\mu = 6$ usado no perfil 2.1, para obter soluções estáveis.

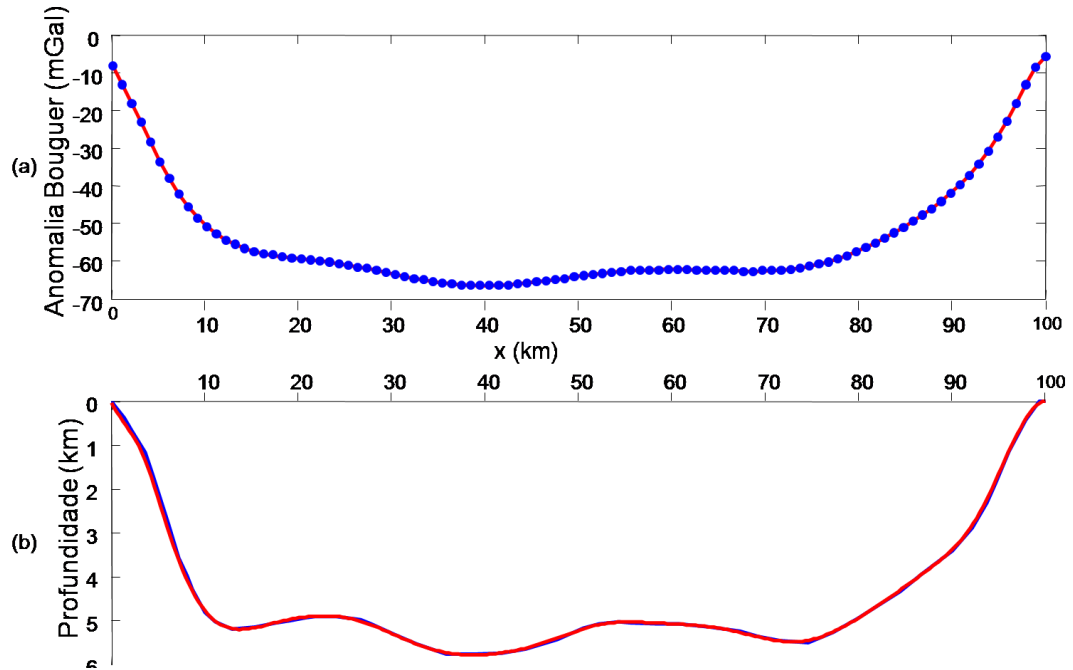


Figura 5 – Perfil 2.1: Dados sintéticos com 100 observações. (a) Anomalias Bouguer observada (pontos azuis) e ajustada (linha vermelha). (b) Relevos do embasamento simulado (linha azul) e estimado (linha vermelha).

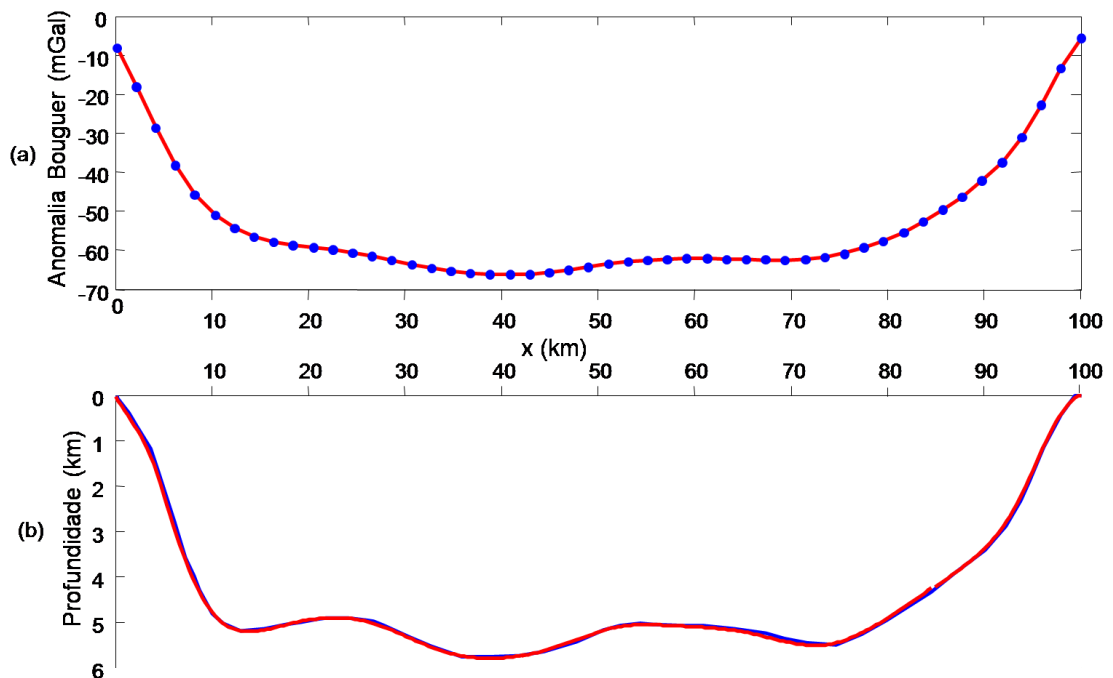


Figura 6 – Perfil 2.2: Dados sintéticos com 50 observações. (a) Anomalias Bouguer observada (pontos azuis) e ajustada (linha vermelha). (b) Relevos do embasamento simulado (linha azul) e estimado (linha vermelha).

4 INTERPRETAÇÃO GRAVIMÉTRICA DA BACIA DE TAUBATÉ

4.1 GEOLOGIA DA BACIA DE TAUBATÉ

A Bacia de Taubaté está localizada na porção leste do Estado de São Paulo, entre as cidades de Queluz e Itaquaquecetuba. É caracterizada geomorfologicamente como uma calha alongada na direção WSW-ENE, limitada pelas serras do Mar, a sudeste, e da Mantiqueira, a noroeste. Estende-se por cerca de 170 km com largura entre 10 a 25 km e profundidade em torno de 850m, ocupando uma área de aproximadamente 2400 km² (Figura 7). Estruturalmente se localiza sobre o bloco Paraíba do Sul, limitado a norte pela falha do Buquira e a Sul pelas falhas de Taxaquara e Alto de Fatura. A bacia faz parte de um conjunto tectônico-geomorfológico denominado Sistema de Rifts da Serra do Mar ou Rift Continental do Sudeste do Brasil.

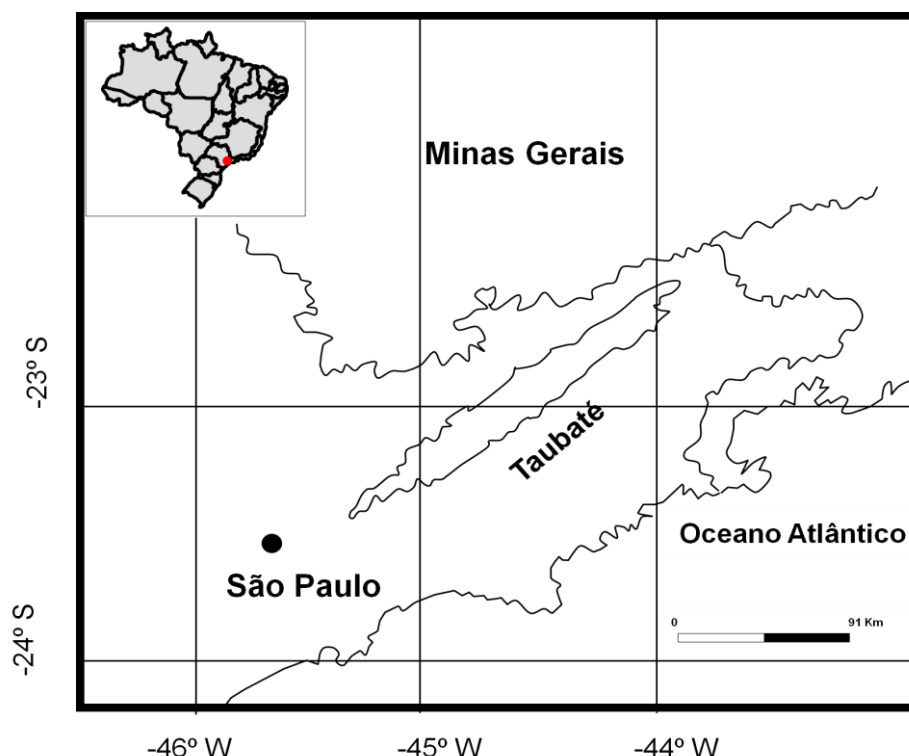


Figura 7- Mapa de localização da Bacia de Taubaté.

Seu embasamento é constituído por rochas ígneas (pegmatitos, granitos e aplitos), metamórficas (milonitos, blastomilonitos, milonitos-gnaisses, gnaisses, xistos, granitos-xistos, quartzitos, anfibolitos, anfibolitos bandados e migmatitos) e

intrusões neojurássicas e cretáceas-terciária de rochas básicas e alcalinas, respectivamente. Seu arcabouço sedimentar é preenchido pelas formações Resende, Tremembé, São Paulo, Itaquacetuba e Piedade. A Figura 8 mostra as formações associadas às fácies sedimentares da bacia.

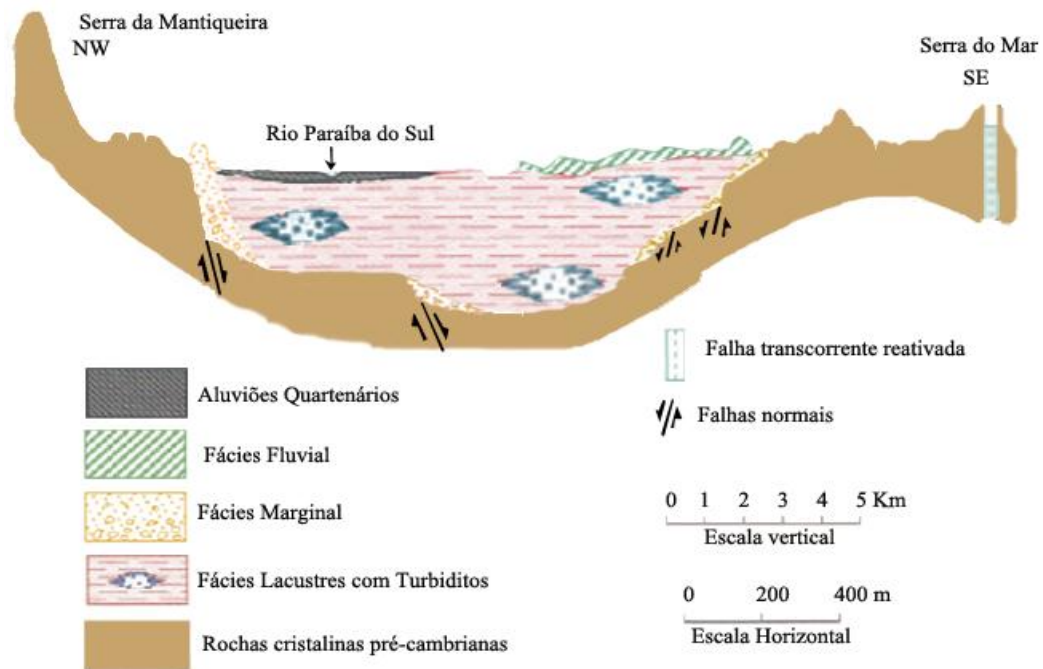


Figura 8 – Seção geológica esquemática transversal à Bacia de Taubaté.
 Fonte: Modificado de Suguio (2003).

De acordo com o modelo proposto para evolução tectônica da Bacia de Taubaté, ocorreu um processo tectônico distensivo com sentido NNW-SSE entre o Eoceno (57,8 – 36,6 Ma) e o Oligoceno (36,6 – 23,6 Ma) em função do basculamento termomecânico ocorrido na Bacia de Santos, desenvolvendo um grande gráben orientado na direção ENE-WSW com mergulho para NNW. No Mioceno (23,7 – 5,3 Ma) a bacia sofreu uma movimentação sinistral no sentido E-W com componente distensiva NW-SE e compressiva NE-SW. No Pleistoceno (5,3 – 1,6 Ma) houve uma inversão no sentido de movimentação do sistema de falhas transformantes, passando a ser dextra, invertendo o também o sentido das zonas de compressão e distensão, desenvolvendo assim os altos de Caçapava, Capela de Santa Luzia e Capela Nossa Senhora do Socorro e segmentando a bacia parcialmente. No Quaternário (1,6 Ma – atualmente), a Bacia de Taubaté entrou em

processo distensivo novamente com a direção WNW-ESE. Neste estágio houve a formação da sub-bacia do Bonfim. Atualmente estudos mostram que a Bacia de Taubaté se encontra sob regime compressivo (TORRES-RIBEIRO; BORGHI, 2005). O relevo do embasamento apresenta falhas normais associadas ao processo tectônico distensivo (Figura 8).

4.2 DADOS GRAVIMÉTRICOS

As anomalias gravimétricas Bouguer da Bacia de Taubaté foram cedidas pelo Instituto Astronômico e Geofísico (IAG-USP). Elas estão localizadas entre as coordenadas $-46,29^{\circ}$ W, $-44,89^{\circ}$ W, $-23,47^{\circ}$ S e $-22,5^{\circ}$ S. Para a obtenção da anomalia gravimétrica Bouguer completa foram utilizados o sistema de referência IGSN-71, a Fórmula Internacional da Gravidade Geodetic Reference System – 1967 (BLAKELY, 1995) e a densidade de $2,67 \text{ g/cm}^3$ para o embasamento cristalino.

4.3 SEPARAÇÃO REGIONAL-RESIDUAL

Para o cálculo da anomalia residual usamos a técnica do ajuste robusto de polinômio descrito na seção 2.1 em duas etapas. Na etapa 1 determinamos a ordem do polinômio que representa a componente regional devido às variações no relevo da interface crosta-manto empregando os seguintes passos:

- Calculamos oito anomalias residuais, uma para cada ordem do polinômio;
- Plotamos o erro médio quadrático (emq) do resíduo versus a ordem do polinômio (Figura 9);
- Adotamos a ordem do polinômio que representa as variações da componente regional, como aquela que produz, no gráfico apresentado na Figura 9, uma mudança abrupta de gradiente. Adotamos, assim, de acordo com este critério, o polinômio de ordem quatro. A anomalia residual correspondente é mostrada na Figura 10.

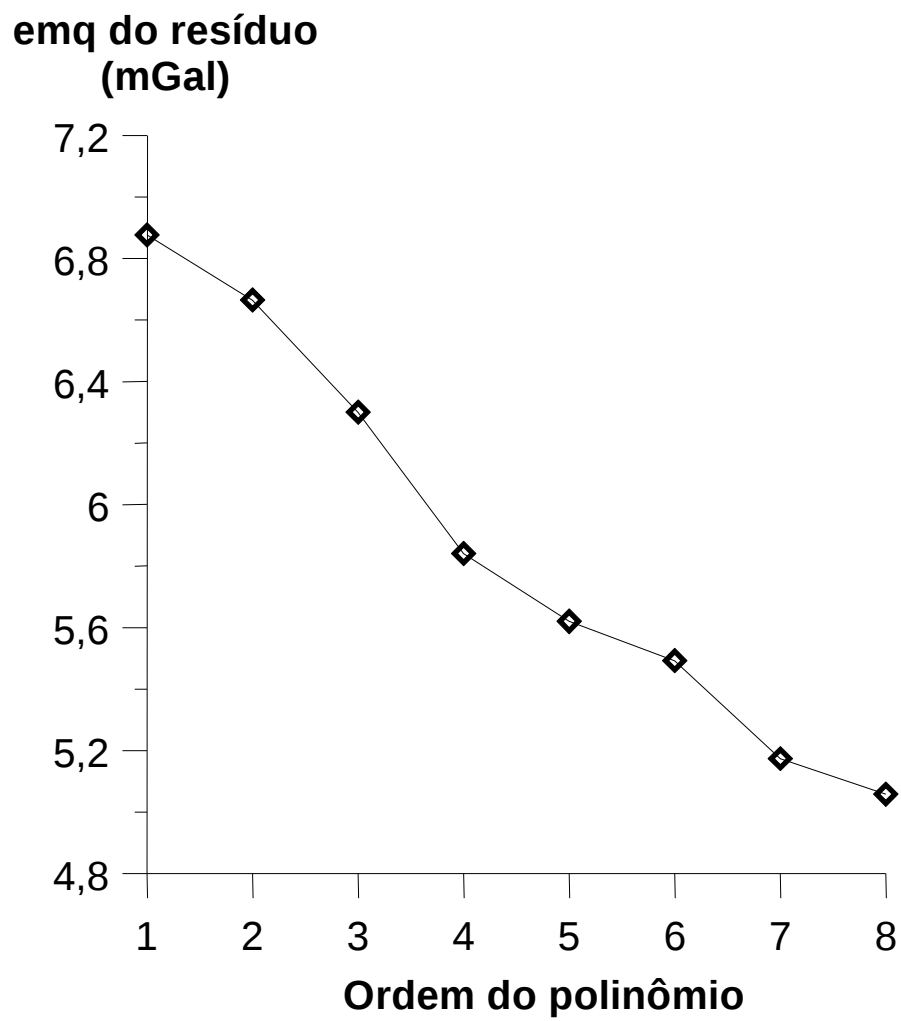


Figura 9 – Gráfico do emq do resíduo versus a ordem do polinômio para a separação regional-residual nos dados gravimétricos da Bacia de Taubaté.

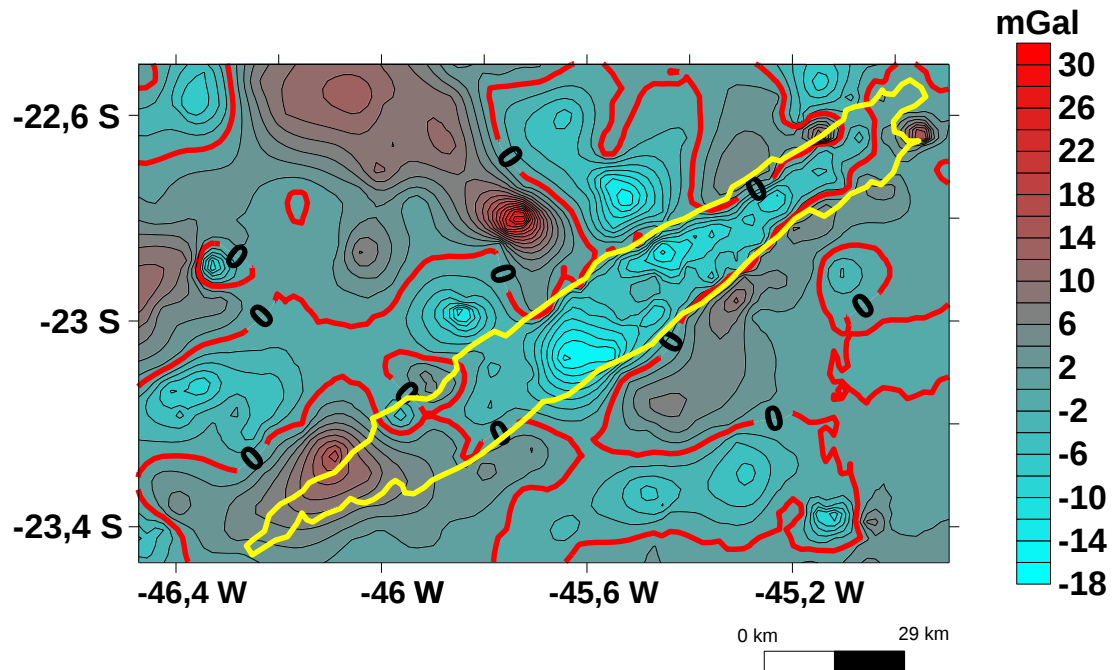


Figura 10 – Mapa Bouguer de anomalia residual da Bacia de Taubaté corrigido do efeito anômalo da interface Crosta-Manto. Intervalo de contorno 2 mGal.

Na etapa 2 retiramos possíveis efeitos de fontes gravimétricas que apresentam grande comprimento de ondas, devido a fontes profundas, aplicando novamente a técnica do ajuste de polinômio robusto descrito na seção 2.1 aos dados gravimétricos residuais obtidos na etapa 1. Para obter a ordem do polinômio, da etapa 2 seguimos os seguintes procedimentos:

- Obtivemos oito anomalias residuais, uma para cada ordem do polinômio
- Adotamos como critério de escolha da ordem do polinômio aquele cuja curva de contorno de 0 mGal da correspondente anomalia residual está mais próxima dos limites horizontais da bacia. Adotamos assim, o polinômio de ordem seis. A anomalia residual correspondente é apresentada na Figura 11.

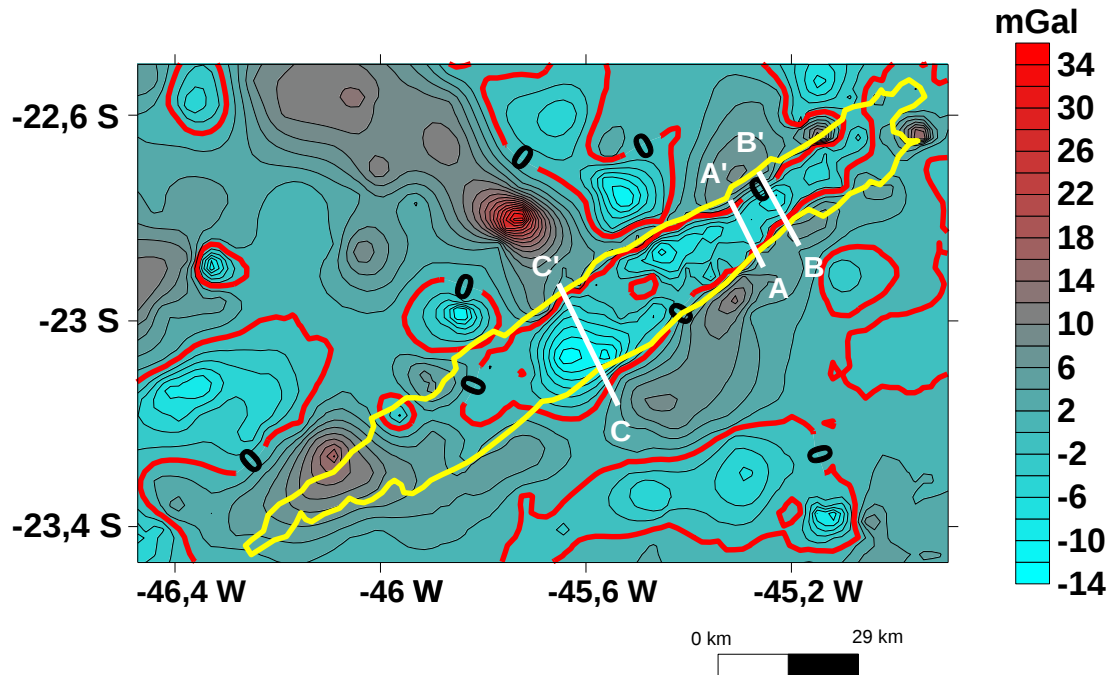


Figura 11 – Mapa Bouguer de anomalia da Bacia de Taubaté corrigido do efeito anomalia gravimétrica de fontes profundas apresentando a localização geográfica da bacia de Taubaté e dos perfis AA', BB' e CC'. Intervalo de contorno 2 mGal.

4.4 INVERSÃO NÃO LINEAR

Para a interpretação gravimétrica do relevo do embasamento da bacia de Taubaté usamos a metodologia de inversão não linear descrita na seção 2.2 e escolhemos três perfis transversais à bacia na direção NW-SE (Figura 11): perfil AA', com 15 observações, localizado entre coordenadas $-45,25^{\circ}\text{W}$, $-22,9^{\circ}\text{S}$ e $-45,32^{\circ}\text{W}$, $-22,77^{\circ}\text{S}$, perfil BB', com 14 observações, localizado entre as coordenadas $-45,18^{\circ}\text{W}$, $-22,85^{\circ}\text{S}$ e $-45,26^{\circ}\text{W}$, $-22,71^{\circ}\text{S}$ e perfil CC', com 32 observações, localizado entre as coordenadas $-45,54^{\circ}\text{W}$, $-23,17^{\circ}\text{S}$ e $-45,65^{\circ}\text{W}$, $-22,93^{\circ}\text{S}$.

O contraste de densidade utilizado foi de $\Delta\rho = -0,34 \text{ g/cm}^3$ para a interpretação de todos os perfis. Este contraste de densidade $\Delta\rho$ foi definido por Fernandes e Chang (2001) como sendo o valor médio, calibrado para a porção central da Bacia de Taubaté a partir da seção sísmica e de um perfil gravimétrico.

Para interpretarmos os perfis desprezamos as anomalias positivas localizadas nos extremos dos perfis. Para verificar a estabilidade das soluções adicionamos às observações ao longo dos perfis ruído pseudo-aleatório Gaussiano com média nula

e desvio padrão de 0,05 mGal, entretanto as interpretações foram feitas usando anomalia Bouguer residual sem adição de ruído. Para todos os perfis utilizamos o modelo interpretativo de 100 prismas. O relevo estimado do embasamento é definido pelas estimativas das espessuras dos prismas do modelo interpretativo. Usando o procedimento descrito na seção 2.2 para obter soluções estáveis, estimamos os parâmetros de regularização da suavidade de $\mu=13$ para o perfil AA', de $\mu=15$ para o perfil BB' e de $\mu=5$ para o perfil CC'.

A interpretação do perfil gravimétrico AA' (Figura 12a) mostra uma profundidade máxima de 428,9 m na coordenada de 11,4 km (Figura 12b). O perfil gravimétrico BB' (Figura 13a) mostra uma profundidade máxima de 600,8 m na coordenada de 12 km (Figura 13b). E o perfil gravimétrico CC' (Figura 14a) apresenta uma profundidade máxima de 895 m na coordenada de 11,7 km (Figura 14b). As interpretações do relevo do embasamento nas Figuras 12b, 13b e 14b apontam para uma profundidade média menor do que 1 km para o embasamento da bacia de Taubaté.

A Figura 11 evidencia a presença de baixos estruturais separados por um alto estrutural na direção da extensão de alongamento da bacia de Taubaté. Os relevos estimados do embasamento utilizando as anomalias gravimétricas dos perfis AA', BB' e CC' também evidenciam a presença de baixos estruturais separados por um alto estrutural na bacia de Taubaté, o que está de acordo com a informação geológica disponível.

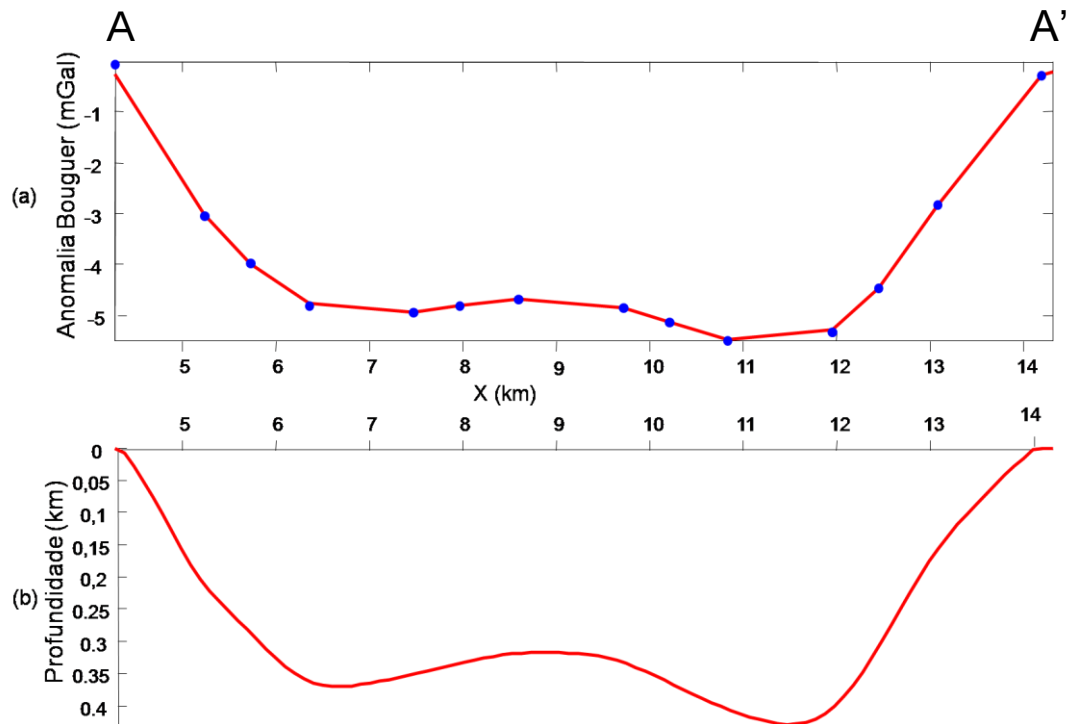


Figura 12– Perfil gravimétrico AA'. (a) Anomalias Bouguer observada (pontos azuis) e ajustada (linha vermelha). (b) Relevo estimado do embasamento.

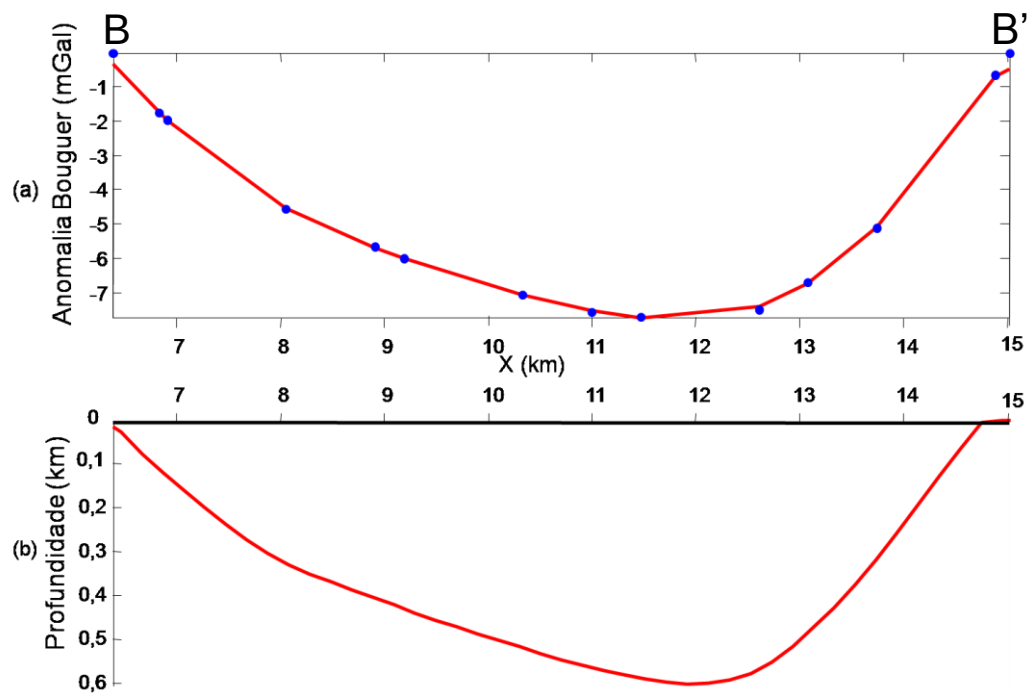


Figura 13– Perfil gravimétrico BB'. (a) Anomalias Bouguer observada (pontos azuis) e ajustada (linha vermelha). (b) Relevo estimado do embasamento.

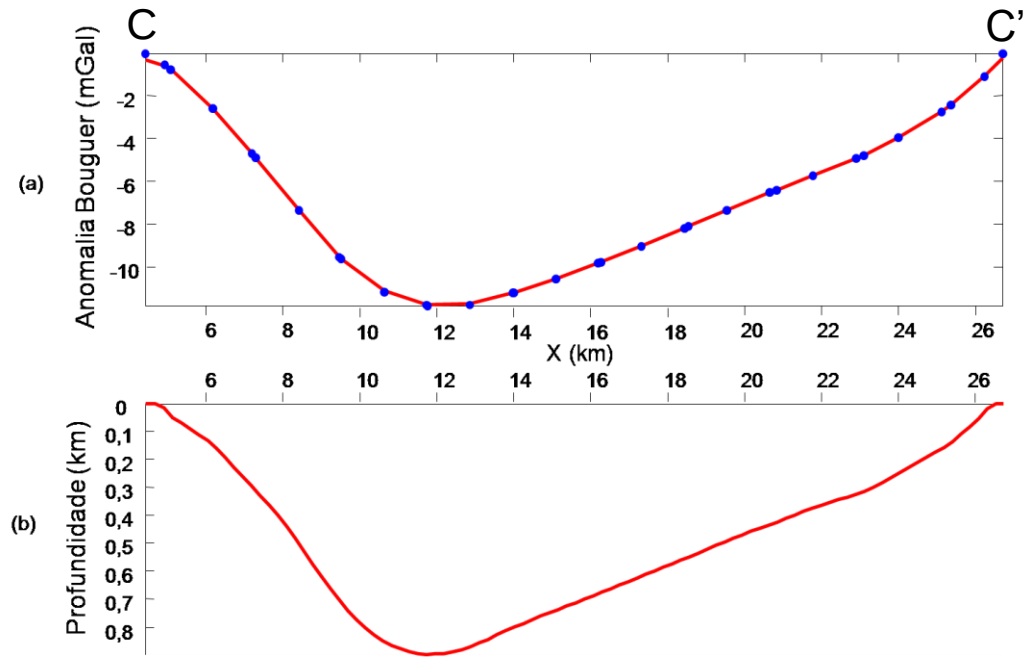


Figura 14– Perfil gravimétrico CC'. (a) Anomalias Bouguer observada (pontos azuis) e ajustada (linha vermelha). (b) Relevo estimado do embasamento.

5 INTERPRETAÇÃO GRAVIMÉTRICA DA BACIA DO RECÔNCAVO

5.1 GEOLOGIA DA BACIA DO RECÔNCAVO

A bacia do Recôncavo, localizada no Estado da Bahia, Nordeste do Brasil, é um hemi-graben, ocupando uma área de aproximadamente 11500 km². Estima-se que a seção sedimentar preservada possua uma espessura máxima da ordem de 6900 m, no Baixo de Camaçari (ARAGÃO,1994). Seus limites são dados pelo Alto de Aporá, a norte e noroeste, pelo sistema de falhas da Barra, a sul, pela falha de Maragogipe, a oeste, e pelo sistema de falhas de Salvador, a leste (Figura 15). Sua configuração estrutural é definida principalmente por falhamentos normais planares, com direção preferencial N30°E que condicionam o mergulho regional das camadas para SE, em direção às áreas mais subsidentes. Taxas de extensão diferenciadas ao longo da bacia são acomodadas através de zonas de transferência com orientação N40W, a exemplo da falha de Mata-Catu. O campo de tensões responsável pela atenuação e ruptura da crosta teria estado ativo entre o Mesojurássico (cerca de 165 Ma) e o Eocretáceo (cerca de 115 Ma).

Seu arcabouço sedimentar é constituído pelas formações Afligidos, Aliança, Sergi, Água Grande, Candeias, Maracangalha, Marfim, Pojuca, Taquipe, São Sebastião, Salvador, Marizal, Itaparica e Sabiá (Figura 16).

A bacia do Recôncavo teve sua origem relacionada ao processo de estiramento crustal que resultou na fragmentação do Gondwana e abertura do Oceano Atlântico. Possui três estágios de evolução tectônica: pré-*rift* – Thitoniano (152 Ma – 144 Ma) a Eoberriasiano (144 Ma)- sin-*rift* – Eoberriasiano (144Ma) a Eoaptiano (119Ma) - e pós-*rift* –Neoaptiano/eoalbiano (119 Ma) (MILHOMEM et al., 2003).

As principais acumulações de petróleo desta bacia relacionam-se aos depósitos fluvio-eólicos das formações Sergi e Água Grande. Há pouco tempo, o sistema Água Grande/Sergi do Campo de Água Grande detinha a maior produção acumulada de óleo por campo no Brasil (BRUHN; DE ROS, 1987). O relevo do

embasamento apresenta sistemas de falhas escalonadas, associadas às fases rift e pré-rift (Figura 16).



Figura 15– Localização, limites e arcabouço estrutural da Bacia do Recôncavo.
Fonte: Segundo Milhomem et al. (2003).

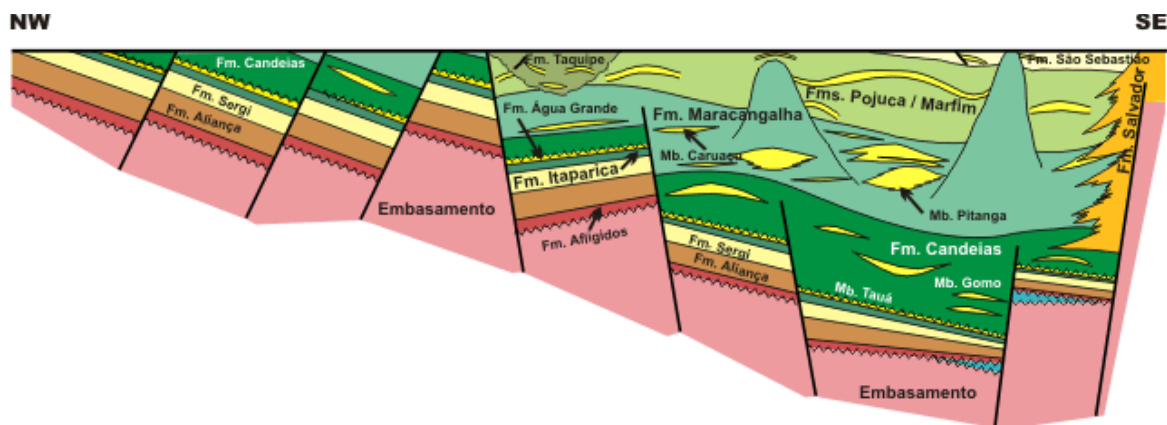


Figura 16- Seção geológica esquemática NW-SE, ilustrando a morfologia de hemi- graben da bacia do Recôncavo, cujo depocentro situa-se a leste.
Fonte: Segundo Milhomem et al. (op.cit.).

5.2 DADOS GRAVIMÉTRICOS

Utilizaremos nesta seção os dados gravimétricos da Bacia do Recôncavo corrigidos da influência gravimétrica da interface crosta-manto (Figura 17) apresentado no trabalho de Menezes (1990). Em seu trabalho adotou-se o grau 4 para o método do ajuste robusto de polinômios nos dados gravimétricos do Estado da Bahia para retirar o efeito gravimétrico da crosta.

5.3 SEPARAÇÃO REGIONAL-RESIDUAL

Para obtermos a anomalia devida ao pacote sedimentar, aplicamos a técnica do ajuste robusto de polinômios descrito na seção 2.1 nos dados gravimétricos apresentado na Figura 17. Para obter a ordem do polinômio adotamos o procedimento adotado por Leão et al. (1996), em que:

- Calculamos treze anomalias regionais, uma para cada ordem do polinômio de um a treze;
- Plotamos um gráfico do erro médio quadrático do resíduo versus a ordem do polinômio (Figura 18);
- A ordem do polinômio escolhida foi aquela que apresentou uma variação abrupta do gradiente da curva. Outro critério adotado está baseado na estabilidade qualitativa, ou seja, a persistência de estruturas no campo regional para polinômios acima de certa ordem. Portanto a ordem do polinômio escolhida preliminarmente foi doze.
- Testamos uma ordem acima de doze e esta delimitou melhor o depocentro da bacia (Baixo de Camaçari indicada pela letra B na Figura 17). Logo a ordem do polinômio tomada para a separação regional-regional foi de treze, conforme descrito em Leão et al. (1996). A anomalia gravimétrica devida ao relevo do embasamento é mostrada na Figura 19.

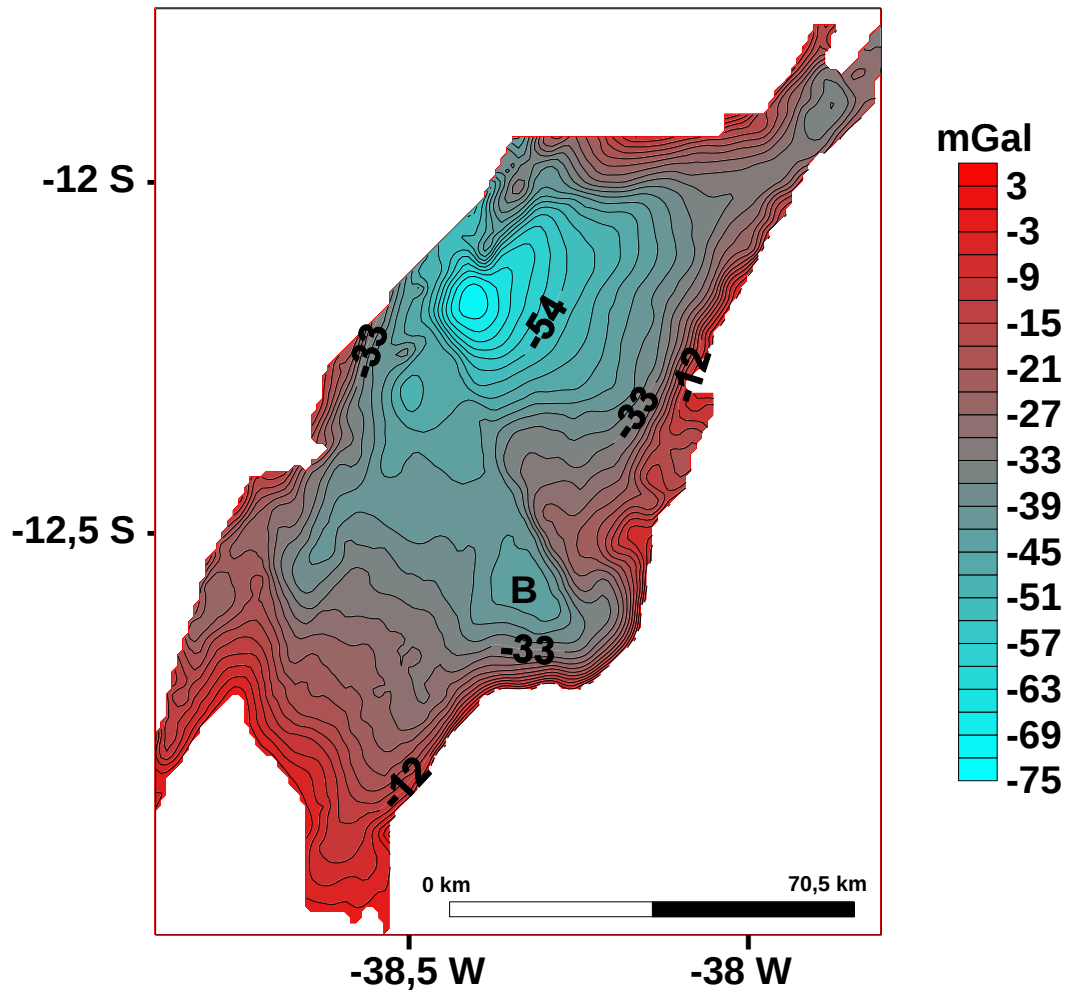


Figura 17– Mapa gravimétrico da Bacia do Recôncavo corrigido do efeito gravimétrico da interface Crosta-Manto. A letra B indica a localização do Baixo de Camaçari. Intervalo de contorno de 3 mGal.

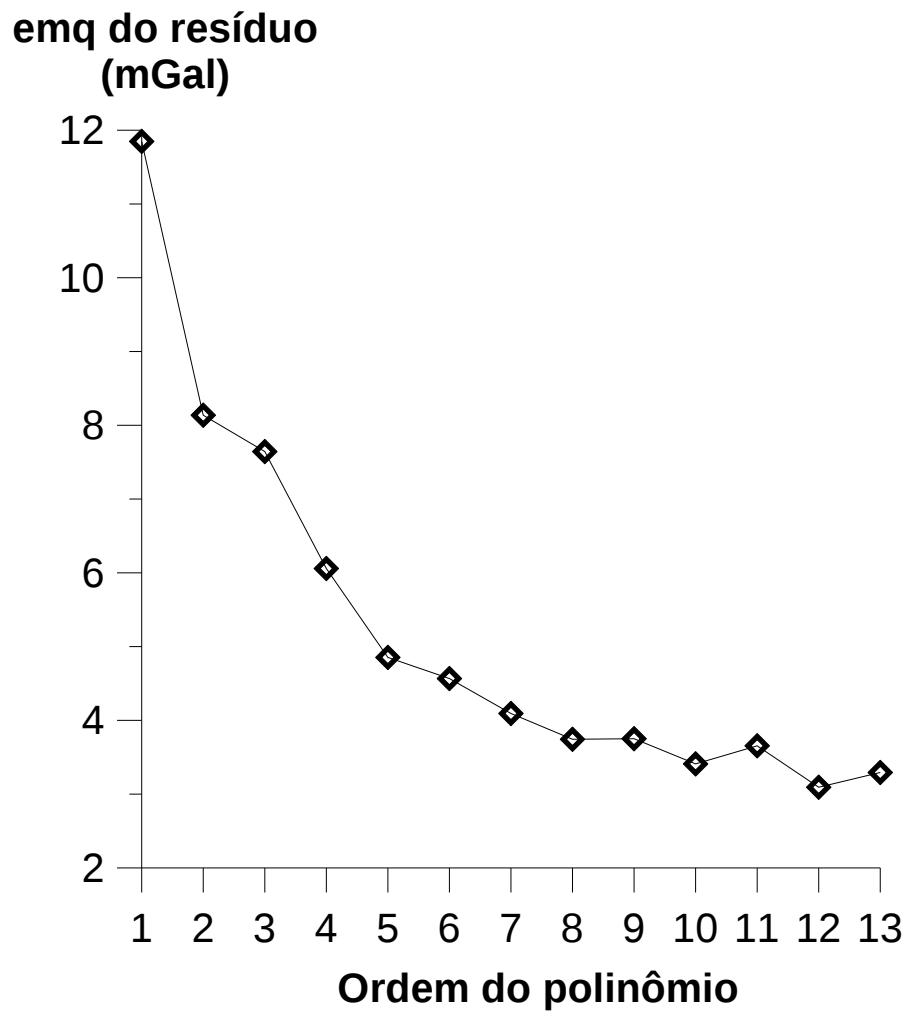


Figura 18– Gráfico do emq do resíduo versus a ordem do polinômio para a separação regional-residual nos dados gravimétricos da Bacia do Recôncavo.

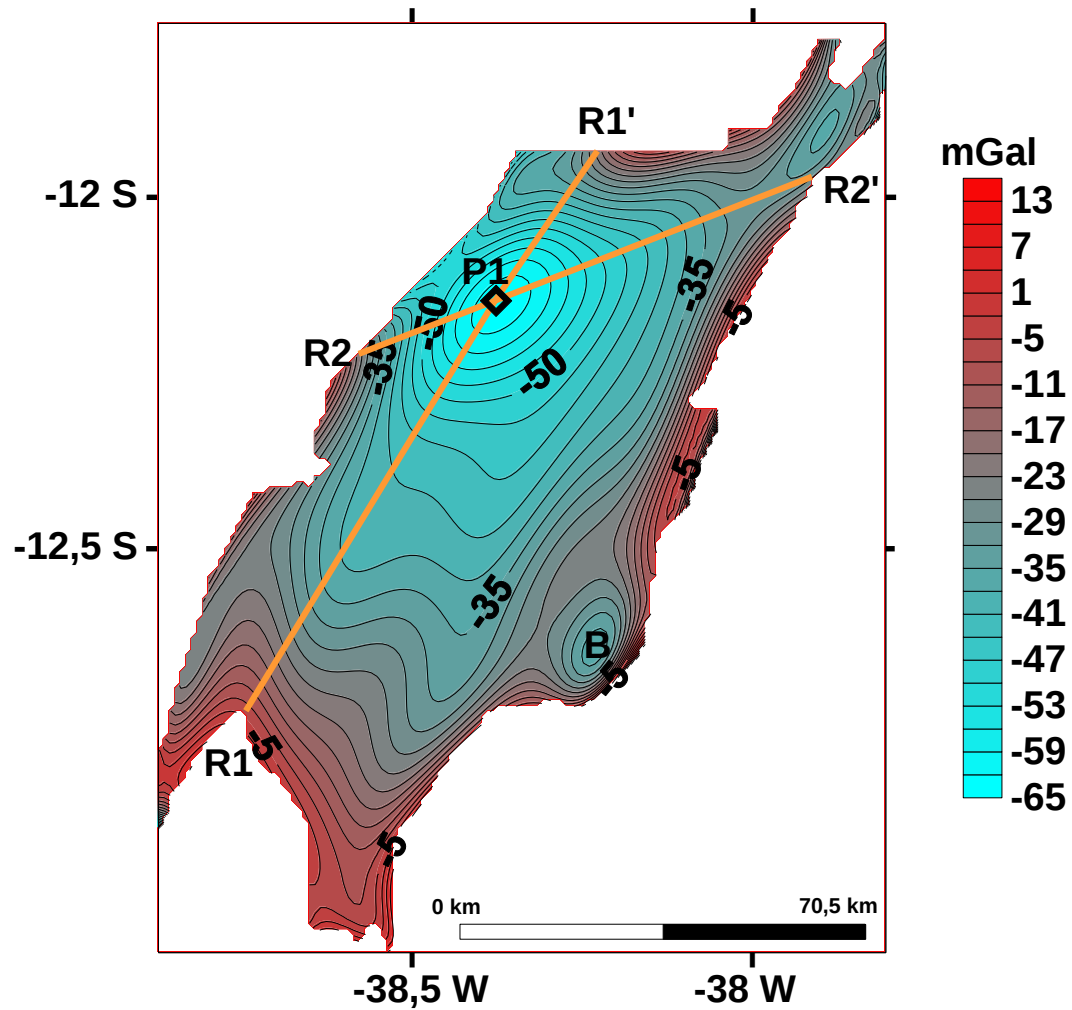


Figura 19– Mapa Bouguer devido ao relevo do embasamento da Bacia do Recôncavo apresentando as posições dos perfis R1R1' e R2R2'. As letras B e P1 indicam as localizações do Baixo de Camaçari e do ponto de intersecção, respectivamente. Intervalo de contorno de 3 mGal.

5.4 INVERSÃO NÃO LINEAR

Para a interpretação gravimétrica do relevo do embasamento da Bacia do Recôncavo usamos a metodologia de inversão não linear descrita na seção 2.2 e escolhemos dois perfis na direção NE-SW: o perfil R1R1' com 164 observações localizado entre as coordenadas $-38,74^{\circ}\text{W}$, $-12,73^{\circ}\text{S}$ e $-38,23^{\circ}\text{W}$, $-11,93^{\circ}\text{S}$ e R2R2' com 114 observações localizado entre as coordenadas $-38,57^{\circ}\text{W}$, $-12,22^{\circ}\text{S}$ e $-37,91^{\circ}\text{W}$, $-11,97^{\circ}\text{S}$ (Figura 19).

Para realizarmos o procedimento de inversão não linear adotamos um nível de base para todos os perfis localizados na Figura 19. Para determinarmos o valor

do nível de base verificamos que o perfil R1R1' está próximo aos limites horizontais da borda da bacia do Recôncavo. O valor da anomalia gravimétrica do perfil R1R1' apresenta valor de -6,46 mGal na extremidade R1 (Figura 19). Como nas bordas da bacia o valor da anomalia deveria ser próxima a 0 mGal acrescentamos o valor constante de 6,46 mGal aos dados gravimétricos dos perfis R1R1' e R2R2'. Adotamos assim o valor constante de 6,46 mGal para o nível de base.

No procedimento de inversão não linear adotamos o contraste de densidade entre o pacote sedimentar e o embasamento de todos os perfis estimado por Barbosa, Silva e Medeiros (1997) como sendo $\Delta\rho = -0,26 \text{ g/cm}^3$. O procedimento utilizado por Silva e Medeiros (op.cit.) para definir o contraste de densidade $\Delta\rho$ foi inverter diversos perfis utilizando um intervalo entre $-0,25 \text{ g/cm}^3$ a $-0,46 \text{ g/cm}^3$ e tomar o contraste de densidade que produziu estimativas do relevo mais próximas (no sentido de mínimos quadrados) às profundidades do relevo obtidas em sete poços.

Para verificar a estabilidade das soluções adicionamos às observações gravimétricas, diversas sequências de ruído pseudo-aleatório Gaussiano com média nula e desvio padrão 0,1 mGal. Entretanto, as interpretações foram feitas na anomalia Bouguer sem adição de ruído. Para todos os perfis utilizamos o modelo interpretativo de 200 prismas. O relevo estimado do embasamento é definido pelas estimativas das espessuras dos prismas do modelo interpretativo. O parâmetro de regularização da suavidade encontrado, usando o procedimento descrito na seção 2.2 para obter soluções estáveis, foi de $\mu=2,5$ para ambos os perfis R1R1' e R2R2'.

A interpretação do perfil gravimétrico R1R1' (Figura 20a) mostra uma profundidade máxima de 6,19 km na coordenada de 85,73 km (Figura 20b) do ponto de intersecção P1. E o perfil gravimétrico R2R2' (Figura 21a) mostra uma profundidade máxima de 6,32 km (Figura 21a) na coordenada de 26,14 km no ponto de intersecção P1 (Figura 21b). Notamos que as estimativas das profundidades no ponto de intersecção P1 nas Figuras 20b e 21b apresentam uma diferença de aproximadamente 0,13 km evidenciando que a escolha do nível de base de 6,46 mGal foi razoável.

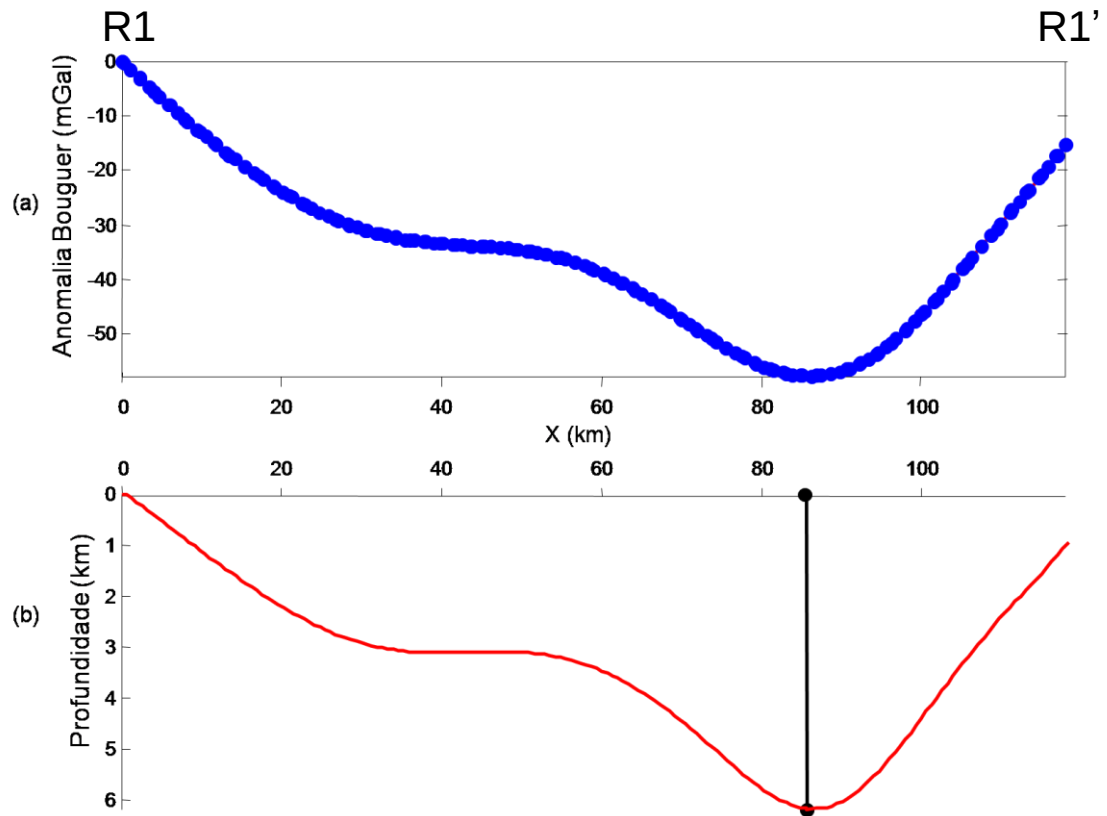


Figura 20– Perfil gravimétrico R1R1'. (a) Anomalias Bouguer observada (pontos azuis) e ajustada (linha vermelha). (b) Relevo estimado do embasamento. A linha preta assinala a posição do ponto de intersecção P1 entre os dois perfis.

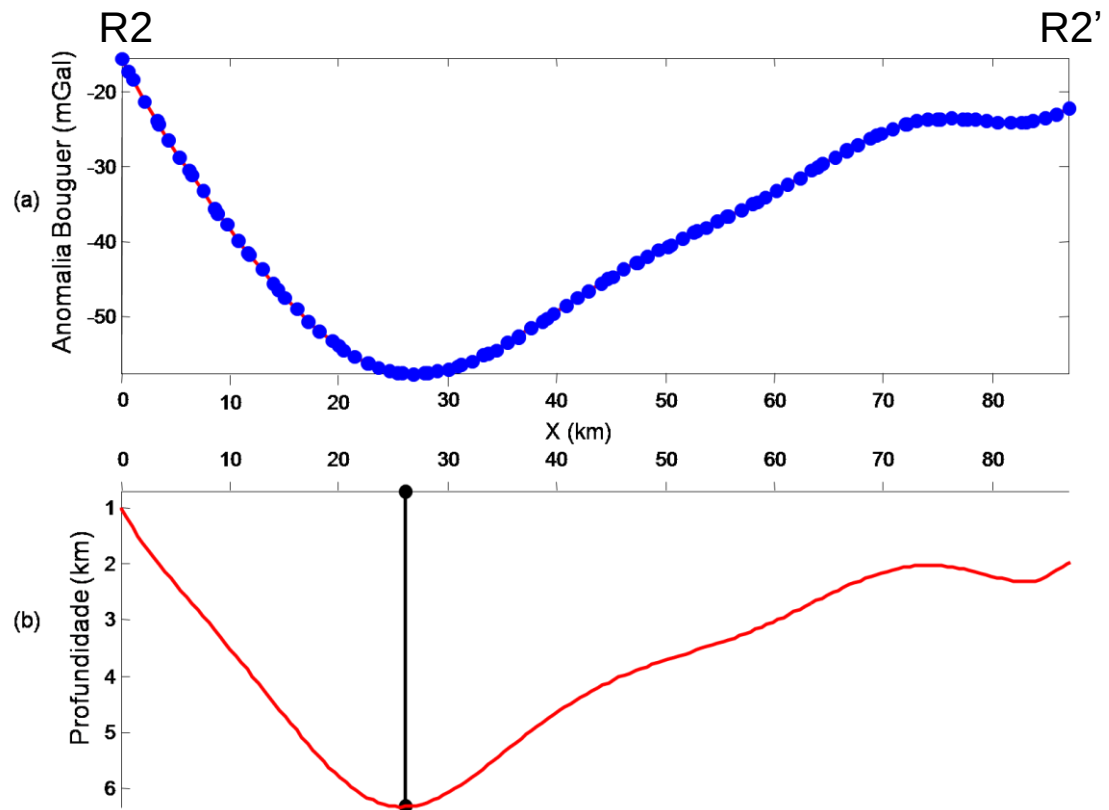


Figura 21– Perfil gravimétrico R2R2'. (a) Anomalias Bouguer observada (pontos azuis) e ajustada (linha vermelha). (b) Relevo estimado do embasamento. A linha preta assinala a posição do ponto de intersecção P1 entre os dois perfis.

6 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou a interpretação gravimétrica das bacias sedimentares de Taubaté e do Recôncavo. Para a interpretação do relevo do embasamento utilizamos a metodologia não linear com vínculo de suavidade global em três perfis gravimétricos da bacia de Taubaté e em dois perfis gravimétricos da bacia do Recôncavo.

Para testarmos a eficácia da metodologia de inversão não linear, simulamos dois ambientes geológicos hipotéticos de bacias sedimentares cujos relevos do embasamento assemelham-se aos das bacias de Taubaté e do Recôncavo. Testes com dados sintéticos mostraram que as observações gravimétricas com intervalo entre as estações de medidas de 1 km e de 2 km produzem soluções estáveis aproximando-se do relevo do embasamento hipotético.

Para confeccionar o mapa de anomalia Bouguer a ser interpretado somente devido ao contraste de densidade entre o pacote sedimentar e o embasamento das bacias de Taubaté e do Recôncavo aplicamos o método do ajuste robusto de polinômios. Na Bacia de Taubaté aplicamos o método do ajuste robusto de polinômio em duas etapas, ambas para retirar o efeito gravimétrico de fontes profundas localizadas na crosta. Para obter a anomalia gravimétrica devido apenas ao pacote sedimentar da Bacia do Recôncavo usamos o método do ajuste robusto de polinômios nas observações primeiramente corrigidas do efeito gravimétrico da interface crosta-manto.

Utilizamos a metodologia não linear com vínculo de suavidade global para interpretar o relevo do embasamento selecionando três e dois perfis gravimétricos nas bacias de Taubaté e do Recôncavo, respectivamente. As interpretações gravimétricas do relevo do embasamento da Bacia de Taubaté indicam a presença de uma bacia rasa tendo profundidade máxima de até 895 m enquanto que as interpretações gravimétricas da Bacia do Recôncavo apresentam profundidade máxima de 6,32 km para o relevo do embasamento.

Análises futuras de interpretação dos dados gravimétricos na Bacia de Taubaté e do Recôncavo deverão incluir inversão de dados gravimétricos 3D

incorporando o vínculo da variação total para estimar zonas descontínuas no relevo do embasamento. Estes tipos de relevo são mais compatíveis com o regime de forças distensivas geradoras da Bacia de Taubaté e com o sistema de falhas escalonadas presentes na bacia do Recôncavo.

REFERÊNCIAS

- ARAGÃO, M. A. N. F. Arquitetura, estilos tectônicos e evolução da Bacia do Recôncavo, Brasil. In: SIMPÓSIO SOBRE O CRETÁCEO NO BRASIL, 3., 1994, Rio Claro. UNESP/IGCE, 1994, *Boletim de Resumos*, p. 165-167.
- BARBOSA, V.C.F.; SILVA, J.B.C; MEDEIROS, W.E. Gravity inversion of basement relief using approximate quality constraints on depths. *Geophysics*. v.82, n.6, p.1745-1757. 1997.
- BELTRÃO, J.F.; SILVA, J.B.C; COSTA, J.C. Robust polynomial fitting method for regional gravity estimation. *Geophysics*. v.56, n.1, p. 80-89. 1991.
- BIZZI, L.A; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTTI, R.M.; GONÇALVES, J.H. (Org.). *Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: textos, mapas & SIG*. Brasília: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2003. 692 p.
- BLAKELY, R. J. *Potential theory in gravity and magnetic applications*. Cambridge: Cambridge University Press, 1995. 441 p.
- BRUHN, C. H. L ; DE ROS, L. F. Formação Sergi: evolução de conceitos e tendências na geologia de reservatórios. *Boletim de Geociências da Petrobras*, 1, p. 25-40. 1987.
- FERNANDES, F. L. ; CHANG, H. K. Modelagem gravimétrica da Bacia de Taubaté – Vale do Rio Paraíba do Sul, leste do estado de São Paulo. *Brazilian Journal of Geophysics*, v.19, p. 131-144. 2001.
- HADAMARD, J. *Sur les problèmes aux dérivées partielles et leur signification physique*. Bull Princeton Univ., v. 13, p. L-20. 1902.
- HUBER, P. J. *Robust statistics*. New York: John Wiley and Sons, 1981. 308 p.
- LEÃO, J.W.D.; MENEZES, P.T.L.; BELTRÃO, J.F.; SILVA, J.B.C. Gravity inversion of basement relief by the knowledge of depth at isolated points. *Geophysics*. v.61, n.6, p. 1702-1714. 1996.
- LIMA, W.A. *Inversão gravimétrica do relevo do relevo de bacias extensionais através da variação total*. 2009. 54 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 2009.
- MARQUADT, D. W. An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters. *Journal Of The Society For Industrial And Applied Mathematics*. v. 11, n. 2, p. 431-441. 1963.

MENEZES, P. T. L. *Uma nova abordagem em interpretação de anomalias gravimétricas em bacias sedimentares – Exemplo da Bacia do Recôncavo, Bahia, Brasil*. 1990. 156 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Centro de Geociências, Universidade Federal do Pará, Belém, 1990.

MILHOMEM, P. S.; MAMAN, E. J.; OLIVEIRA, F. M.; CARVALHO, M. S. S.; SOUZA-LIMA, W. Bacias Sedimentares Brasileiras: Bacia do Recôncavo. *Phoenix*. Ano 5, n. 11, mar. 2003.

RIBEIRO, V. B.; MANTOVANI, M.S.M. Gravimetria do Complexo Alcalino de Tapira (MG) – Método e Interpretação. In: SIMPÓSIO DE VULCANISMO E AMBIENTES ASSOCIADOS, 4, 2008, Foz do Iguaçu. *Anais*. Foz do Iguaçu: [SBG], 2008. 1 CD-ROM.

SOUZA-LIMA, W.; JUNIOR, G.P.H. Bacias sedimentares brasileiras: origem, evolução e classificação. *Phoenix*. Ano 5, n. 49, jan. 2003.

SUGUIO, K. *Geologia Sedimentar*. São Paulo: Edgard Blucher. 2003. 400 p.

TALWANI, M., WORZEL, J. C.; LANDISMAN, M. Rapid gravity calculations for two-dimensional bodies with application to the mendocino submarine fracture zone. *Journal of Geophysical Research*, n. 64, p. 49-59. 1959.

TIKHONOV, A. N.; ARSENIN, V. Y. *Solutions of ill-posed problems*. Washington: V. H. Winston & Sons, 1977. 258p.

TORRES-RIBEIRO, M.; BORGHI, L. Bacias sedimentares Brasileiras: Bacia de Taubaté. *Phoenix*. Ano 7, n. 74, fev. 2005.

VASCONCELOS, M. A. R. *Caracterização geofísica da estrutura de impacto de Araguinha (MT/GO)*. 2007. 157 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica) – Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.