



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM GEOFÍSICA

MAYRA MOURA MOREIRA

**TRANSFORMAÇÃO DE ESTIMATIVAS SUAVES
APLICADAS À INTERPRETAÇÃO DE RELEVOS
DESCONTÍNUOS DO EMBASAMENTO**

BELÉM
2014

MAYRA MOURA MOREIRA

**TRANSFORMAÇÃO DE ESTIMATIVAS SUAVES APLICADAS À
INTERPRETAÇÃO DE RELEVOS DESCONTÍNUOS DO
EMBASAMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará - UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre em Geofísica.

Área de Concentração: Métodos Gravimétrico e Magnético.

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Darciléa Ferreira Santos.

BELÉM
2014

Dados Internacionais de Catalogação de Publicação (CIP)
Biblioteca do Instituto de Geociências/UFPA

Moreira, Mayra Moura, 1989-

Transformação de estimativas suaves aplicadas à interpretação de relevos descontínuos do embasamento / Mayra Moura Moreira. – 2014.

43 f. : il. ; 30 cm

Inclui bibliografias

Orientadora: Darcicléa Ferreira Santos

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Geofísica, Belém, 2014.

1. Gravidade (Física) - Medição. 2. Inversão (Geofísica). 3. Prospecção – Métodos geofísicos. I. Título.

CDD 22. ed. 526.7

MAYRA MOURA MOREIRA

**TRANSFORMAÇÃO DE ESTIMATIVAS SUAVES APLICADAS À
INTERPRETAÇÃO DE RELEVOS DESCONTÍNUOS DO
EMBASAMENTO**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica do Instituto de Geociências da Universidade Federal do Pará - UFPA, em cumprimento às exigências para obtenção do grau de Mestre em Geofísica.

Data de aprovação: 21 / 08 / 2014

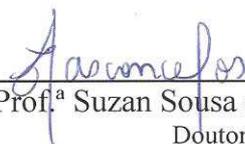
Banca examinadora:



Prof.^a Darcicléa Ferreira Santos – Orientadora
Doutora em Geofísica
Universidade Federal do Pará - UFPA



Prof. João Batista Corrêa da Silva – Membro
Doutor em Geofísica
Universidade Federal do Pará - UFPA



Prof.^a Suzan Sousa de Vasconcelos – Membro
Doutora em Geofísica
Universidade Estadual do Norte Fluminense Darcy Ribeiro - UENF

Dedico a Deus.

“E tudo o que pedires em oração, crendo, o recebereis”.
(Mateus 21: 22)

AGRADECIMENTOS

A Deus em primeiro lugar, por ter me dado a graça de estar finalizando este mestrado, forças para não desistir em meio a tantas dificuldades e por me conceder as ferramentas necessárias para a realização deste e de outros trabalhos.

A minha mãe Maria Damiana do Socorro Moura por ser, depois de Deus, o meu alicerce, que mesmo distante está sempre presente, apoiando-me com seu amor e orações, agradeço também a Deus por ela existir. Ao meu pai, Osmar Nascimento Moreira, por me mostrar a cada dia a importância da constante dedicação ao estudo. Aos meus amados irmãos e amigos Mayara Moura e Márcio Alan pelo constante e incansável apoio.

A minha orientadora e professora Dr.^a Darcicléa Ferreira Santos com quem pude adquirir conhecimentos que se estendem além do universo da Geofísica. Agradeço pelas informações concedidas, por sua paciência, dedicação, compreensão e apoio demonstrado em todas as etapas deste trabalho. Suas orientações sempre seguidas de sugestões e incentivos colaboraram significativamente no desenvolvimento deste trabalho. Aos docentes desta pós graduação, especialmente aos professores Cristiano Martins, Cícero Régis, Fabio Domingos e João Batista, por todos os conhecimentos que me transmitiram durante o curso.

Aos professores João Batista Silva e Suzan Vasconcelos por aceitarem fazer parte da banca examinadora, pelas sugestões e recomendações que contribuíram para o enriquecimento do trabalho.

Aos amigos que fiz neste curso, em especial a Rosilda Lopes e ao Jonathas Maciel pelo apoio e momentos de descontração. Aos amigos do GMAG Boris Freimann, Érico Tenório e Renata Sena.

Aos colegas Anderson Almeida e Matheus Barriga pelas discussões e ajuda nos desafios computacionais que encontrei. Aos demais colegas da pós-graduação em Geofísica, com os quais tive o privilégio de conviver nesses últimos anos.

Ao Programa de Pós-Graduação em Geofísica que me concedeu a oportunidade de obter este título, a CAPES pelo suporte financeiro e as secretarias Benildes e Lucibela por estarem sempre dispostas a ajudar.

As irmãs Preciosinas do Colégio Berço de Belém, em especial minha tia Irmã Domingas Moura, pela ajuda, apoio e estadia. Enfim, agradeço a todos meus familiares e amigos, que contribuíram para a conquista de mais essa vitória em minha vida. Obrigada!

“Não sei o que possa parecer aos olhos do mundo, mas aos meus pareço apenas ter sido como um menino brincando à beira-mar, divertindo-me com o fato de encontrar de vez em quando um seixo mais liso ou uma concha mais bonita que o normal, enquanto o grande oceano da verdade permanece completamente por descobrir à minha frente.”

Isaac Newton

RESUMO

Apresentamos um método para delinear relevos de embasamento de bacias sedimentares, compostos por falhas verticais e patamares horizontais. Presumimos contraste de densidade entre o pacote sedimentar e o embasamento conhecido a priori e que pode ser constante ou decrescer com a profundidade. O método desenvolvido determina as posições verticais dos patamares horizontais e as posições horizontais das descontinuidades verticais a partir de uma estimativa inicial suave do relevo do embasamento. Produzimos esta solução suave através de um método eficiente de delineamento do relevo do embasamento. As posições horizontais de duas falhas adjacentes permitem estimar a extensão do patamar por elas delimitado. Do mesmo modo, as posições verticais de dois patamares adjacentes permitem estimar a extensão da falha por eles delimitada. Avaliamos o desempenho do método proposto comparando o tempo computacional, por ele demandado, com outros dois métodos de inversão que estabilizam a solução através do regularizador da Variação Total. O método proposto sempre produziu soluções em menor tempo computacional em relação ao tempo computacional requerido pelos demais métodos. Testes em dados sintéticos contaminados com ruído pseudoaleatório Gaussiano com média nula e desvio padrão de 0,1 mGal mostram que o método proposto leva a resultados satisfatórios, apresentando relevo estimado próximo ao verdadeiro. Aplicamos o método proposto a dois conjuntos de dados reais: Steptoe Valley (Estados Unidos) e Graben de San Jacinto (Estados Unidos). O método produziu relevos de embasamento apresentando falhas de alto ângulo, condizentes com a informação geológica que as bacias acima mencionadas foram formadas por tectônica extensional com a consequente formação de um arcabouço estrutural condicionado por falhas normais.

Palavras-chave: Gravimetria. Relevo do embasamento descontínuo. Inversão. Interpretação Gravimétrica.

ABSTRACT

We present a method to delineate the basement relief of sedimentary basins composed by vertical faults and horizontal plans. We assume density contrast between the basement and the sediments constant or decrease with depth, and known. The developed method determines the vertical positions for horizontal plans and horizontal positions for vertical faults through an smooth initial solution of the basement relief. We produce this smooth solution through an efficient method which delineates the smooth basement relief. The horizontal positions of two adjacent faults estimates the extension of only one horizontal terrace. Similarly, the vertical position of two adjacent horizontal terraces estimates the extension of the fault between them. The performance of the proposed method is compared with the computational time of two other inversion methods, which stabilize the solution applying the Total Variation functional. The proposed method always produced solutions in less computational time as compared with the computational time required by other methods. Tests on synthetic data contaminated with zero-mean Gaussian pseudorandom noise with a standard deviation of 0.1 mGal show which proposed method produced satisfactory results and estimated basement topographies close to simulated basement topographies. The proposed method was applied to two sets of real Bouguer anomalies: Steptoe Valley (United States) and San Jacinto Graben (United States). The method produced estimated basement topographies presenting high-angle faults in accordance with the available geological information, which the basins above mentioned were formed by extensional tectonics with the consequent formation of structural settings of sedimentary basins conditioned by normal faults.

Key words: Gravimetry. Discontinuous basement relief. Inversion. Gravimetric Interpretation.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

- Figura 2.1 – Anomalia gravimétrica g^o (a) produzida por uma bacia sedimentar bidimensional (b)16
- Figura 2.2 – (a) Anomalia gravimétrica g^o . (b) Poligonal de N vértices em que o i -ésimo vértice está localizado a uma profundidade p_i na posição horizontal x_i17
- Figura 2.3 – (a) Ambiente geológico simulado de uma bacia com relevo do embasamento descontínuo. (b) Solução do relevo do embasamento produzida pelo método de Silva, Santos e Gomes (2014).....20
- Figura 2.4 – (a) Ilustração esquemática dos valores absolutos da aproximação discreta do gradiente ($|s_i|$). (b) Detecção de cada L patamar.....23
- Figura 2.5 – (a) Ilustração esquemática de um relevo descontínuo (linha tracejada) e das j – ésima e j – ésima primeira estimativas da posição horizontal da descontinuidade e da profundidade q_k . (b) Localização dos vértices P_j, P_{j+1}, P_{j+2} e P_{j+3} 23
- Figura 2.6 – Ilustração esquemática dos vértices P_j (pontos vermelhos) cujas profundidades são usadas para produzir o ajuste g24
- Figura 2.7 – Fluxograma ilustrando as etapas realizadas para obter a estimativa do relevo utilizando o método proposto.....25
- Figura 2.8 – Tempo computacional exigido pelo Método Proposto (pontos vermelhos), pelo Método VT_Fitas (pontos azuis) e pelo Método VT_Prismas (pontos verdes) versus o número de observações.....27
- Figura 2.9 – Tempo computacional total exigido pelo Método Proposto (pontos vermelhos) e tempo computacional exigido apenas para a determinação das coordenadas dos vértices (pontos marrons).....28
- Figura 3.1 – Graben isolado. (a) Anomalias observada (pontos azuis) e ajustada (linha vermelha). (b) Relevos simulado (linha azul) e estimado (linha tracejada vermelha).....30
- Figura 3.2 – Bacia marginal. (a) Anomalias observada (pontos azuis) e ajustada (linha vermelha). (b) Relevos simulado (linha azul) e estimado (linha tracejada vermelha).....31
- Figura 3.3 – Graben isolado com extensão horizontal total T de 100 km, em que $E1$ e $E2$ são as extensões horizontais dos patamares e $D1$ e $D2$ são as profundidades dos patamares.....32
- Figura 3.4 – Erro Médio Quadrático entre as profundidades verdadeiras e as profundidades estimadas de ambientes simulados com valores das extensões horizontais $E1$ entre 5 km e 30 km.....33
- Figura 3.5 – Graben Isolado. (a) Anomalias Bouguer observada (pontos azuis) e ajustada (linha vermelha). (b) Relevos simulado (linha azul) e estimado (linha

	tracejada vermelha)	33
Figura 3.6 –	Erro Médio Quadrático entre as profundidades verdadeiras e as profundidades estimadas de ambientes simulados com valores das extensões horizontais E1 entre 30 km e 47 km.....	34
Figura 3.7 –	Graben Isolado. (a) Anomalias Bouguer observada (pontos azuis) e ajustada (linha vermelha). (b) Relevos simulado (linha azul) e estimado (linha tracejada vermelha).....	34
Figura 3.8 –	Erro Médio Quadrático entre as profundidades verdadeiras e as profundidades estimadas de ambientes simulados com valores das profundidades D1 entre 0,25 km e 2,1 km.....	35
Figura 3.9 –	Graben Isolado. (a) Anomalias Bouguer observada (pontos azuis) e ajustada (linha vermelha). (b) Relevos simulado (linha azul) e estimado (linha tracejada vermelha).....	35
Figura 3.10 –	Erro Médio Quadrático entre as profundidades verdadeiras e as profundidades estimadas de ambientes simulados com valores das profundidades D2 entre 3 km e 14 km.....	36
Figura 3.11 –	Graben Isolado. (a) Anomalias Bouguer observada (pontos azuis) e ajustada (linha vermelha). (b) Relevos simulado (linha azul) e estimado (linha tracejada vermelha).....	36
Figura 4.1 –	Steptoe Valley. Mapa gravimétrico residual (após a remoção do efeito de fontes profundas) e localização do perfil gravimétrico utilizado (AA')	38
Figura 4.2 –	Perfil AA' do Steptoe Valley. (a) Anomalias observada (pontos azuis) e ajustada (linha vermelha). (b) Relevo do embasamento estimado (linha vermelha)	39
Figura 4.3 –	Graben do San Jacinto. (a) Anomalias observada (pontos azuis) e ajustada (linha vermelha). (b) Relevo do embasamento estimado (linha vermelha)...	41

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	13
2	METODOLOGIA.....	16
2.1	Método Proposto.....	21
2.2	Avaliação do desempenho do método proposto.....	26
3	TESTES EM DADOS SINTÉTICOS.....	29
3.1	Graben Isolado.....	29
3.2	Bacia Marginal	30
3.3	Limitações do Método Proposto.....	32
4	TESTES EM DADOS REAIS.....	37
4.1	Step toe Valley.....	37
4.1.1	Informações geológicas e geofísicas.....	37
4.1.2	Resultados.....	38
4.2	Graben San Jacinto.....	40
4.2.1	Informações geológicas e geofísicas.....	40
4.2.2	Resultados.....	40
5	CONCLUSÕES.....	42
	REFERÊNCIAS	43

1 INTRODUÇÃO

O método gravimétrico é um dos métodos geofísicos aplicados nas pesquisas de exploração de petróleo (LAFEHR, 1980; LUIZ; SILVA, 1995). As variações de massa entre o pacote sedimentar e o embasamento produzem medidas gravimétricas que podem revelar informações sobre a geometria interna das bacias sedimentares, após aplicação de técnicas de interpretação. O delineamento da superfície, que separa o pacote sedimentar e o embasamento, permite a interpretação de feições geológicas tais como falhas e elevações topográficas que podem estar associadas a acumulações de hidrocarbonetos.

Para estimar o relevo do embasamento através dos dados gravimétricos utilizam-se metodologias envolvendo técnicas de inversão acopladas a estabilizadores matemáticos (BARBOSA; SILVA; MEDEIROS, 1999; LIMA et al. 2011; MARTINS et al., 2011; SILVA; COSTA; BARBOSA, 2006; SILVA; MEDEIROS; BARBOSA, 2001). Estas metodologias produzem soluções estáveis para delinear o relevo do embasamento através de funcionais estabilizadores formulados de modo a incorporar informações a priori sobre um ambiente de bacia sedimentar específico. Por exemplo, o método de inversão da suavidade global é utilizado para delinear relevo de embasamentos suaves de bacias sedimentares usando o regularizador de Tikhonov de ordem um (TIKHONOV; ARSENIN, 1977). Os métodos de inversão aplicados para produzir resultados na estimação do relevo do embasamento com descontinuidades abruptas locais geralmente utilizam vínculos matemáticos para estabilizar a solução, entre estes citamos os métodos suavidade ponderada (BARBOSA; SILVA; MEDEIROS, 1999), regularização entrópica (SILVA; OLIVEIRA; BARBOSA, 2010) e variação total (LIMA et al., 2011; MARTINS et al., 2011).

O crescente aumento do volume de dados gravimétricos nas últimas décadas tem exigido tempo computacional elevado para delinear o relevo do embasamento. Para um conjunto de dados gravimétricos de alta resolução de bacias de grande extensão as técnicas correntes de interpretação ainda demandam elevado tempo computacional. No processo de inversão não linear, por exemplo, o tempo de processamento cresce à medida que elevamos a quantidade de dados gravimétricos e de parâmetros associados às expressões dos estabilizadores matemáticos (BARBOSA; SILVA; MEDEIROS, 1999; MARTINS et al., 2011; SILVA; COSTA; BARBOSA, 2006; SILVA; OLIVEIRA; BARBOSA, 2010).

Os métodos de inversão estimam o conjunto de parâmetros de um modelo interpretativo. Este modelo interpretativo pode ser composto por um conjunto de prismas 2D retangulares justapostos cujas espessuras são os parâmetros que se desejam estimar. Nos métodos de inversão não linear tais parâmetros são determinados resolvendo um ou mais sistemas lineares (BARBOSA; SILVA; MEDEIROS, 1999; SILVA; COSTA; BARBOSA, 2006). Quando a solução é obtida em várias iterações, o tempo computacional cresce, pelo menos uma ordem de grandeza, em relação ao tempo necessário para obter a solução em apenas uma iteração.

Nas situações que o ambiente geológico apresenta relevo do embasamento suave podemos reduzir o tempo computacional através de simples procedimentos iterativos. O algoritmo de Bott (1960), por exemplo, produz delineamento do relevo do embasamento através de uma simples expressão matemática dependente do desajuste dos dados em cada iteração e do contraste de densidade adotado para a bacia. No entanto, o método de Bott (1960) é válido apenas para ambientes geológicos que apresentam contraste de densidade constante. Além disso, o método não apresenta um critério de parada objetivo e as estimativas das profundidades tornam-se instáveis à medida que o número de iterações aumenta.

Por outro lado, Silva, Santos e Gomes (2014) mostram que o método de Bott (BOTT, 1960) pode ser formulado como um problema de inversão não linear. Estes autores demonstram que o procedimento do método de Bott (1960) resolve um simples sistema linear em cada iteração para produzir as estimativas dos parâmetros (SILVA; SANTOS; GOMES, 2014). O método de Silva, Santos e Gomes (2014) estende o método de Bott (1960) para gerar soluções através de um critério de parada objetivo. O método produz soluções estáveis aplicando um operador passa-baixa nas estimativas dos parâmetros. Este método é aplicado em ambientes geológicos que apresentam contraste de densidade constante ou decrescente segundo uma expressão matemática preestabelecida, com a profundidade.

No caso de bacias sedimentares 2D com relevo do embasamento descontínuo a redução do tempo computacional pode ser alcançada através de métodos que resolvem um sistema linear apenas uma vez. Santos (2013) apresenta um método que utiliza um único sistema linear para produzir uma estimativa inicial do relevo do embasamento descontínuo. A solução desse sistema é estabilizada através do regularizador matemático da Variação Total. A estimativa final é obtida através de uma única correção aditiva definida pelo procedimento de Bott (1960), aplicada à estimativa inicial. O método produz soluções comparáveis, mas em

menor tempo computacional (SANTOS, 2013) do que aquelas geradas pelo método de inversão não linear da Variação Total. Entretanto, este método é aplicado apenas a bacias sedimentares que apresentam contraste de densidade constante.

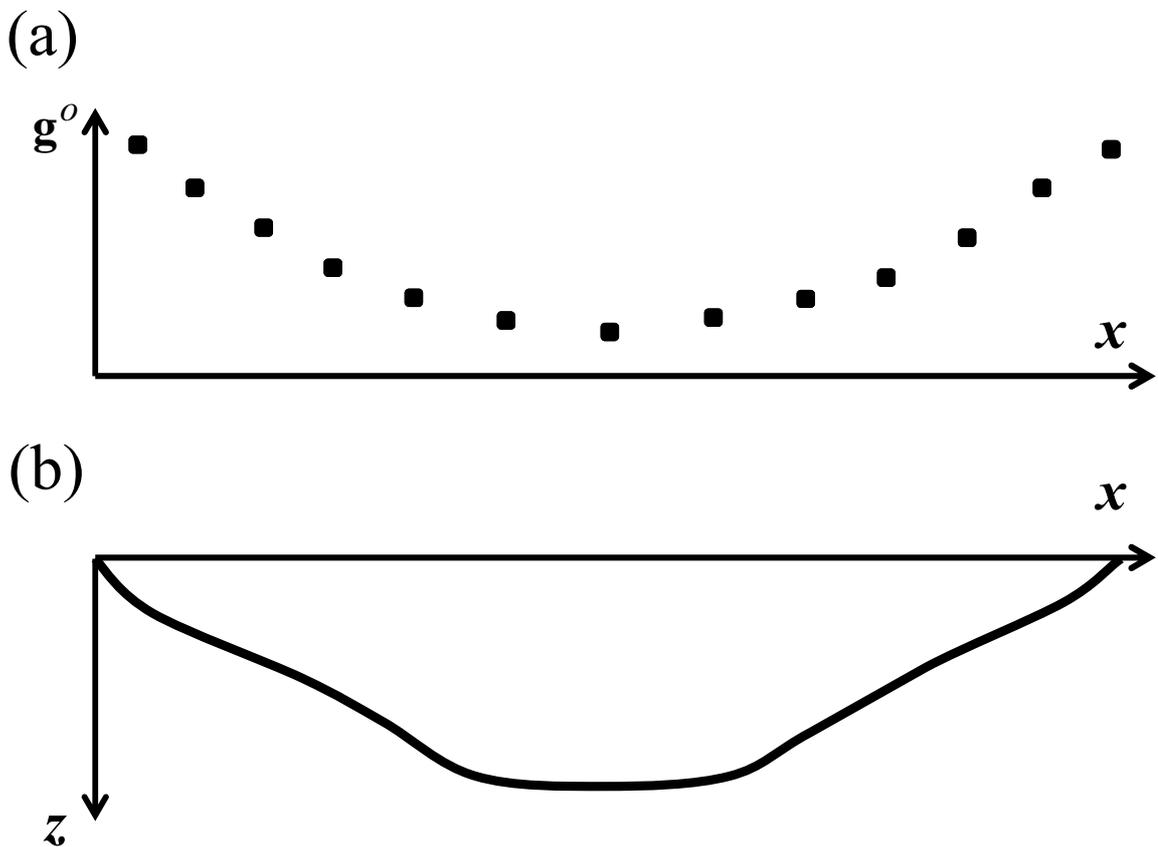
Neste trabalho apresentamos um método para delinear o relevo descontínuo de um embasamento composto por patamares horizontais e falhas verticais. O método proposto utiliza uma solução inicial suave para identificar as posições verticais dos patamares horizontais e as posições horizontais das falhas verticais. A determinação destas posições gera os vértices de uma poligonal que define a seção transversal do pacote sedimentar estimado, a qual utilizamos para produzir o ajuste dos dados. Para reduzir o tempo computacional, geramos a solução inicial através do método de Silva, Santos e Gomes (2014), o que permite a aplicação do método proposto a dados observados produzidos por ambientes geológicos cujos contrastes de densidade são presumidos constantes ou decrescentes, segundo uma lei hiperbólica, com a profundidade.

Aplicamos o método proposto em dados sintéticos produzidos por dois ambientes geológicos simulados. Os testes com dados sintéticos mostram que o método proposto gera bons resultados para delinear relevos de bacias com falhas verticais e patamares horizontais em menor tempo computacional do que as soluções produzidas pelo método de inversão não linear da Variação Total (LIMA et al., 2011; MARTINS et al., 2011) e pelo procedimento apresentado por Santos (2013). O método também foi aplicado a dados reais da bacia do Steptoe Valley, (Estados Unidos) e do graben de San Jacinto (Estados Unidos). As interpretações gravimétricas produzidas pelo método proposto apresentam soluções com estimativas das profundidades máximas de 3 km para o Steptoe Valley e 2,26 km para o graben de San Jacinto.

2 METODOLOGIA

Seja g^o um vetor N -dimensional de observações gravimétricas (Figura 2.1 a) produzidas por um perfil transversal de uma bacia sedimentar bidimensional alongada na direção do eixo y (linha preta na Figura 2.1 b) de um sistema destro de coordenadas. Os dados gravimétricos são produzidos por uma bacia (Figura 2.1 b) cujo pacote sedimentar pode apresentar contraste de densidade em relação ao embasamento constante ou decrescente com a profundidade segundo uma lei hiperbólica (LITINSKY, 1989).

Figura 2.1 – Anomalia gravimétrica g^o (a) produzida por uma bacia sedimentar bidimensional (b).

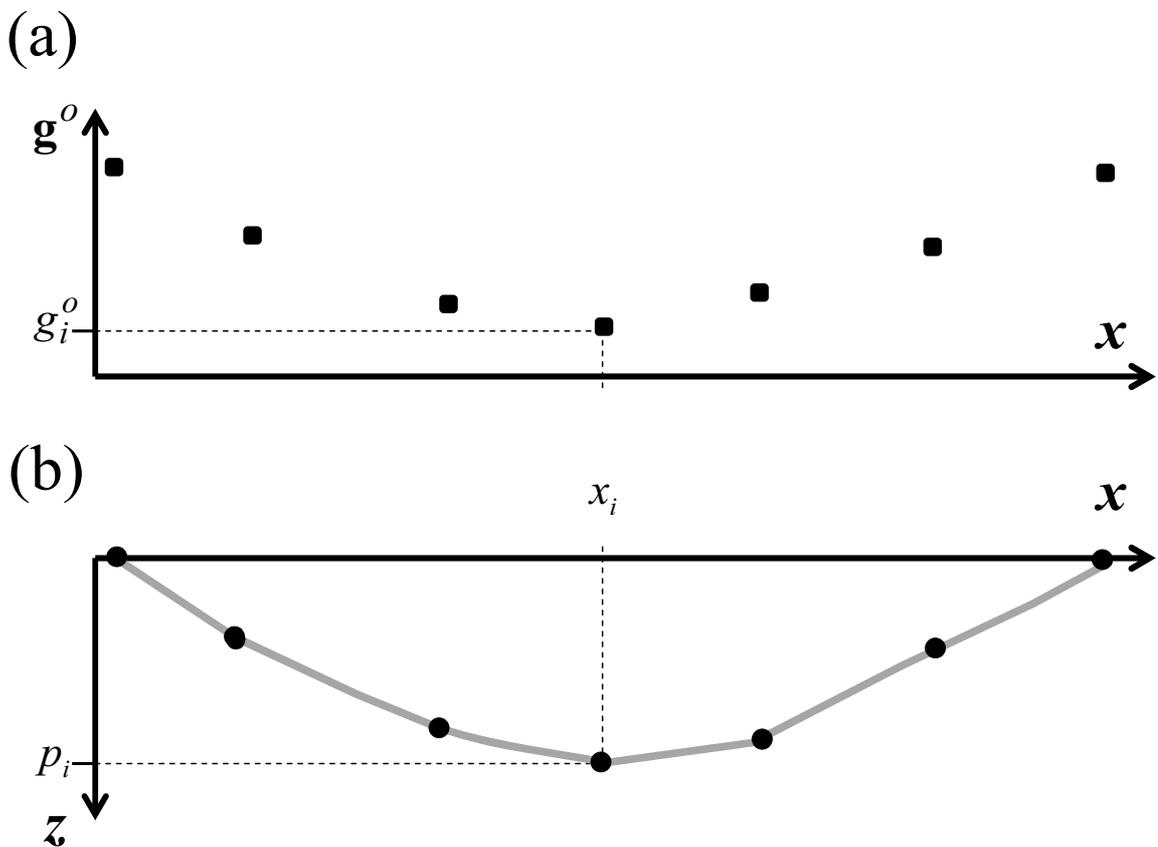


Fonte: Da autora

O problema gravimétrico consiste em estimar a interface que separa os sedimentos e o embasamento de bacias sedimentares. Neste problema supomos conhecida a lei de variação do contraste de densidade entre o pacote sedimentar e o embasamento.

Neste trabalho definimos o modelo interpretativo por uma seção poligonal constituída por N vértices (Figura 2.2 b). Os vértices da poligonal são definidos pelas coordenadas (x_i, p_i) . A coordenada x_i coincide com a coordenada horizontal do i -ésimo elemento g_i^o do vetor de observação gravimétrica \mathbf{g}^o (Figura 2.2 a).

Figura 2.2 – (a) Anomalia gravimétrica g^o . (b) Poligonal de N vértices em que o i -ésimo vértice está localizado a uma profundidade p_i na posição horizontal x_i .



Fonte: Da autora

As profundidades p_j , $j = 1, \dots, N$, são os parâmetros a serem estimados e estão relacionadas com as observações gravimétricas teóricas $g_i(\mathbf{p})$ através da relação não linear:

$$\mathbf{g}(\mathbf{p}) \equiv g_i(\mathbf{p}) = g(x_i, \mathbf{p}, \Delta\rho) = \sum_{j=1}^N f(x_i, p_j, \Delta\rho), \quad i = 1, \dots, N, \quad (2.1)$$

em que $f(x_i, p_j, \Delta\rho)$ é um funcional não linear produzindo a observação gravimétrica teórica g_i na i -ésima posição espacial x_i devido às profundidades p_j e $\Delta\rho$ é o contraste de densidade constante, $\Delta\rho_c$, (TALWANI; WORZEL; LANDISMAN, 1959) ou diminuindo com a profundidade, $\Delta\rho(z)$, segundo uma expressão matemática (VISWESWARA RAO; CHAKRAVARTHI; RAJU, 1994). Neste trabalho admitimos que a expressão do contraste de densidade $\Delta\rho(z)$ é definida por uma lei hiperbólica (LITINSKY, 1989)

$$\Delta\rho(z) = \frac{\Delta\rho_0\beta^2}{(z + \beta)^2}, \quad (2.2)$$

em que β é o fator que controla a diminuição do contraste de densidade com a profundidade, expresso em unidades de comprimento e $\Delta\rho_0$ é o contraste de densidade na superfície.

Em geral obtemos o vetor de estimativa $\hat{\mathbf{p}}$ através de métodos de inversão não linear. Obtemos as N estimativas de profundidades $\hat{\mathbf{p}}$ minimizando a norma da diferença entre os vetores \mathbf{g}^o e \mathbf{g} (N -dimensionais) utilizando o procedimento iterativo de Gauss-Newton modificado pelo método de Marquardt (MARQUARDT, 1963), que necessita de uma estimativa inicial $\hat{\mathbf{p}}^k$ para determinar o novo vetor de parâmetros $\hat{\mathbf{p}}^{k+1}$ através da seguinte expressão:

$$\hat{\mathbf{p}}^{k+1} = \hat{\mathbf{p}}^k + \Delta\hat{\mathbf{p}}^k, \quad (2.3)$$

em que $\Delta\hat{\mathbf{p}}^k$ é o vetor-correção na k -ésima iteração definido por:

$$\Delta\hat{\mathbf{p}}^k = [(\mathbf{A}^k)^T \mathbf{A}^k + \lambda \mathbf{I}]^{-1} (\mathbf{A}^k)^T \Delta\mathbf{g}^k, \quad (2.4)$$

em que \mathbf{T} sobrescrito indica transposição matricial, λ é o parâmetro de Marquardt (MARQUARDT, 1963), um escalar positivo modificado em cada iteração e que controla o tamanho do passo $\Delta\hat{\mathbf{p}}^k$, \mathbf{I} é a matriz identidade de dimensão $N \times N$, \mathbf{A}^k é a matriz Jacobiana de dimensão $N \times N$ da observação gravimétrica teórica \mathbf{g} avaliada em $\hat{\mathbf{p}}^k$ e $\Delta\mathbf{g}^k$ é o vetor N -

dimensional do resíduo gravimétrico definido pela diferença entre as observações \mathbf{g}^o e a anomalia calculada \mathbf{g} . O elemento da matriz Jacobiana é definido por

$$a_{ij}^k = \left. \frac{\partial g_i}{\partial p_j} \right|_{p_j = \hat{p}_j^k} . \quad (2.5)$$

Como mostra a expressão 2.3, neste procedimento de inversão a estimativa do novo vetor de parâmetros $\hat{\mathbf{p}}^{k+1}$ na k – ésima primeira iteração é calculada usando uma estimativa pré-existente $\hat{\mathbf{p}}^k$ da k – ésima iteração somada a um vetor-correção $\Delta\mathbf{p}^k$. O cálculo desse vetor-correção envolve a matriz \mathbf{A}^k e uma matriz inversa. A construção da matriz \mathbf{A}^k (equação 2.5) e o cálculo da matriz inversa em cada iteração produzem um elevado custo no tempo computacional do método de inversão não linear para obter a estimativa $\hat{\mathbf{p}}^{k+1}$.

Por outro lado, Silva, Santos e Gomes (2014) apresentaram um método iterativo que reduz o tempo computacional para obter as estimativas $\hat{\mathbf{p}}$. Este método é aplicado a dados gravimétrico de bacias sedimentares presumindo contraste de densidade constante, $\Delta\rho_c$, ou decrescendo com a profundidade, $\Delta\rho(z)$. A metodologia de Silva, Santos e Gomes (2014) obtém as estimativas $\hat{\mathbf{p}}$ através de um procedimento iterativo de Gauss-Newton definindo o vetor-correção na k -ésima iteração por:

$$\Delta\hat{\mathbf{p}}^k = [(\mathbf{A}^k)^T \mathbf{A}^k]^{-1} (\mathbf{A}^k)^T \Delta\mathbf{g}^k , \quad (2.6)$$

no qual utiliza uma aproximação da matriz Jacobiana :

$$\mathbf{A}^k = b^k \mathbf{I} , \quad (2.7)$$

em que b^k é inicializado com um valor real relativamente grande e positivo (por exemplo, $b^0 = 20$). Nas demais iterações b^k é redefinido modificando o modulo do vetor-correção acelerando a convergência em um menor número de iterações. Silva, Santos e Gomes (2014) sugerem que b^k seja modificado de maneira similar ao procedimento de Marquardt (1963), ou seja, a estimativa-tentativa $p^{k+1}(x_i)$, $i = 1, \dots, N$, dada na k – ésima primeira iteração é aceita se a norma L_2 do vetor de resíduos $\mathbf{g}^o - \mathbf{g}(\hat{\mathbf{p}}^{k+1})$ é menor do que a norma L_2 do vetor de resíduos $\mathbf{g}^o - \mathbf{g}(\hat{\mathbf{p}}^k)$. Neste caso, presume-se que $b^{k+1} = r_1 b^k$, antes de prosseguir para a

iteração seguinte (em que r_1 está entre 0,5 e 1). Caso contrário, a estimativa-tentativa \mathbf{p}^k é rejeitada e um novo valor provisório para a estimativa é calculado substituindo b^k por $\frac{1}{r_2}b^k$ utilizando o valor de b^k empregado na última iteração que foi bem sucedida (em que r_2 está entre 0,1 e 1).

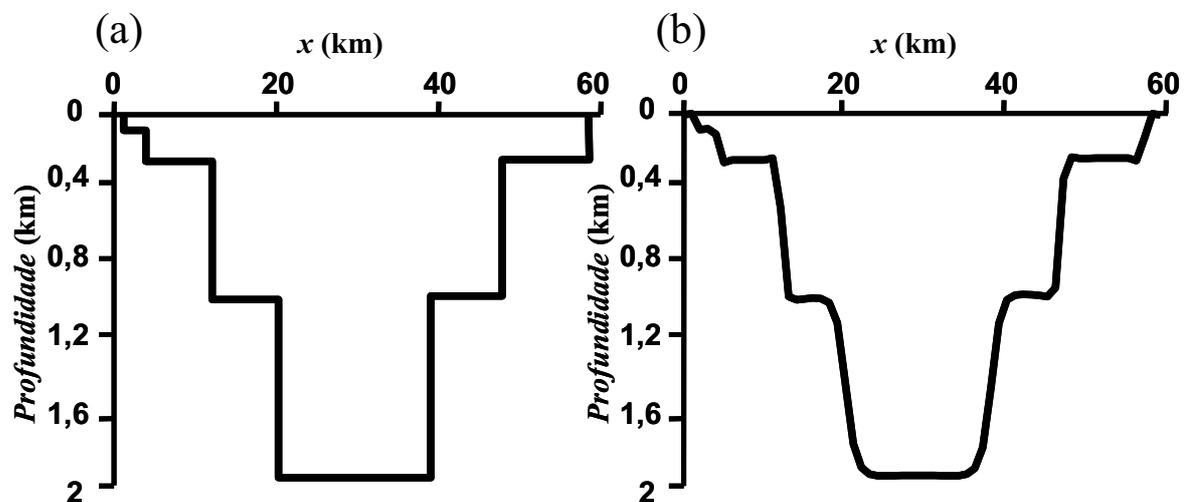
Utilizando as expressões 2.6 e 2.7 no procedimento iterativo de Gauss–Newton podemos apresentar o novo vetor de parâmetros na k – ésima primeira iteração por

$$\hat{\mathbf{p}}^{k+1} = \hat{\mathbf{p}}^k - \frac{1}{b^k} (\mathbf{g}^o - \mathbf{g}(\hat{\mathbf{p}}^k)). \quad (2.8)$$

Para este método, neste trabalho, o critério de parada adotado é definido pelo menor número de iterações cuja solução produz ajuste aceitável.

O procedimento descrito acima (SILVA; SANTOS; GOMES, 2014) não é eficaz para delinear falhas com grandes deslocamentos verticais no relevo do embasamento (Figura 2.3 a). O método de Silva, Santos e Gomes (2014) gera estimativas suaves do relevo do embasamento (Figura 2.3 b), uma vez que, a i –ésima estimativa da profundidade produzida por esse método (expressão 2.8) é essencialmente a soma de resíduos $g^o(x_i) - g(x_i, \hat{\mathbf{p}}^k, \Delta\rho)$ em x_i multiplicados por constantes.

Figura 2.3 – (a) Ambiente geológico simulado de uma bacia com relevo do embasamento descontínuo. (b) Solução do relevo do embasamento produzida pelo método de Silva, Santos e Gomes (2014).



2.1 Método Proposto

Neste trabalho utilizamos as observações gravimétricas \mathbf{g}^o produzidas por uma bacia sedimentar apresentando relevo do embasamento descontínuo (Figura 2.3 a). O método proposto produz uma estimativa do relevo do embasamento através dos seguintes passos:

Passo 1: Gera-se o vetor de estimativas suaves, $\hat{\mathbf{p}}$ (Figura 2.3 b), produzido através do método de Silva, Santos e Gomes (2014), expressão 2.8.

Passo 2: Definem-se os vetores \mathbf{s} e \mathbf{x}' $N-1$ - dimensionais a partir desta estimativa inicial $\hat{\mathbf{p}}$, cujos i -ésimos elementos são

$$s_i = \frac{\hat{p}_{i+1} - \hat{p}_i}{x'_i}, \quad i = 1, \dots, N-1, \quad (2.9)$$

e

$$x'_i = x_{i+1} - x_i, \quad i = 1, \dots, N-1, \quad (2.10)$$

em que s_i é o i -ésimo elemento da aproximação discreta do gradiente da superfície definida pelas estimativas \hat{p}_i , x'_i é a coordenada horizontal associada ao i -ésimo elemento s_i da aproximação discreta do gradiente, e x_i e x_{i+1} são as respectivas coordenadas horizontais relacionadas às estimativas de profundidades \hat{p}_i e \hat{p}_{i+1} .

Passo 3: Determinam-se segmentos ao longo da coordenada x'_i (linha azul na Figura 2.4 b) definidos por valores absolutos de s_i menores que uma tolerância, TOL (e.g. TOL=0,005) (Figura 2.4 a). O número L de segmentos assim definidos também determina o número de patamares. O valor de TOL seleciona as melhores estimativas de profundidades \hat{p}_i a ser utilizadas no cálculo da profundidade média no passo 4.

Passo 4: Estima-se o vetor (L - dimensional), $\hat{\mathbf{q}}$, de profundidades de cada patamar, cujo elemento \hat{q}_k é a média aritmética das estimativas \hat{p}_i associadas a coordenadas x_i localizadas dentro do k -ésimo intervalo definido no passo 3.

Passo 5: Determina-se o vetor \mathbf{xd} ($2L$ - dimensional) de coordenadas horizontais das descontinuidades cujo j -ésimo elemento xd_j (linha vermelha na Figura 2.4 b) é a coordenada horizontal x'_i na qual ocorre o máximo valor absoluto local de s_i (Figura 2.4 a).

Passo 6: Associam-se as coordenadas horizontais xd_j e xd_{j+1} (passo 5) ao k -ésimo elemento de profundidade \hat{q}_k do vetor (L - dimensional) $\hat{\mathbf{q}}$ (Figura 2.5 a). Os vértices P_j e P_{j+1} das descontinuidades são, portanto, definidos por $P_j = (xd_j, \hat{q}_k)$ e $P_{j+1} = (xd_{j+1}, \hat{q}_k)$. Repete-se este procedimento para obter os próximos pares de coordenadas dos vértices P_{j+2} e P_{j+3} (Figuras 2.5 b).

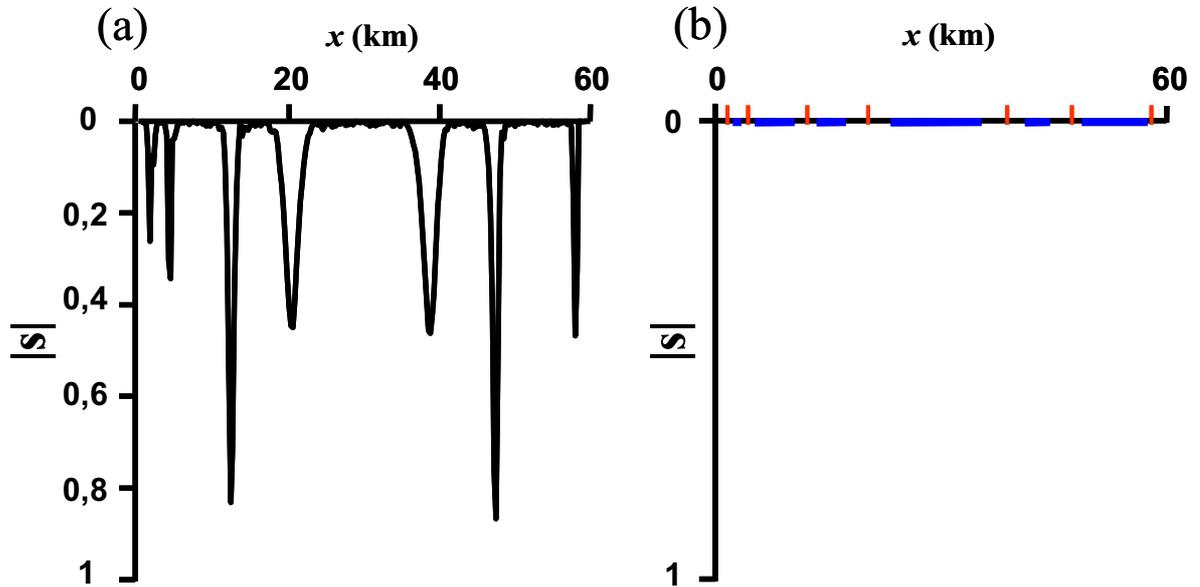
Passo 7: Delineia-se o relevo do embasamento descontínuo através: (i) dos vértices P_j , $j = 3, \dots, 2L$, definidos pelos procedimentos descritos nos passos 4 a 6 e (ii) dos vértices iniciais (P_1 e P_2) e finais (P_{2L+1} e P_{2L+2}) definidos a partir de coordenadas horizontais e de profundidades conhecidas.

Passo 8: Calcula-se o ajuste \mathbf{g} , equação 2.1, utilizando as profundidades dos vértices definidos no passo 7 (Figura 2.6). Caso o ajuste não seja aceitável, modifica-se o valor de TOL e retorna-se ao passo 3. Caso contrário a solução é aceita.

Os vértices P_1 , P_2 , P_{2L+1} e P_{2L+2} , referidos no passo 7 podem ser definidos, por exemplo, a partir das posições inicial e final da seção horizontal da bacia sedimentar nas quais tomamos o perfil gravimétrico \mathbf{g}^o ou podemos adotar os valores da solução inicial, equação 2.8, neste método em particular, definimos $P_1 = (x_1, \hat{p}_1)$, $P_2 = (xd_1, \hat{p}_1)$, $P_{2L+1} = (xd_{2L}, \hat{p}_n)$ e $P_{2L+2} = (x_n, \hat{p}_n)$.

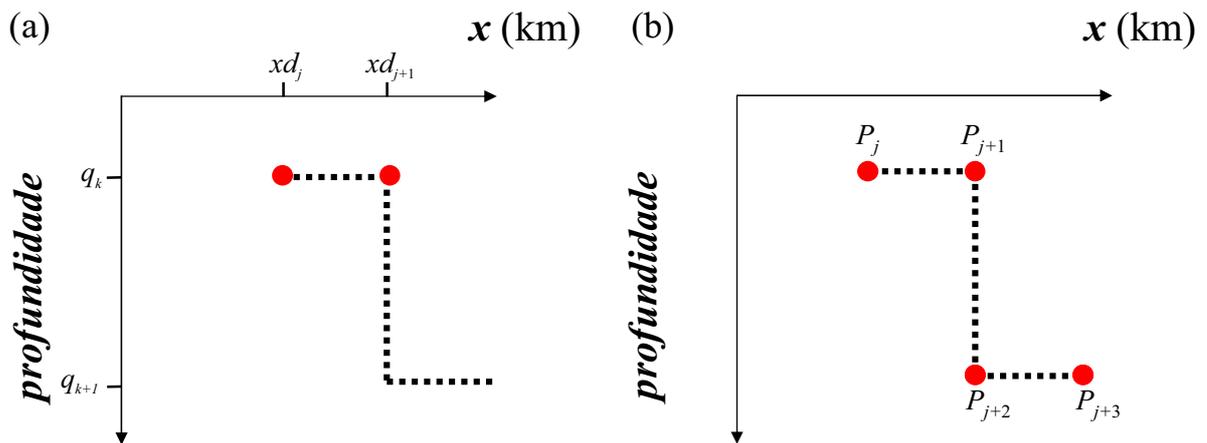
O fluxograma ilustrado na Figura 2.7 apresenta os passos descritos acima.

Figura 2.4 – (a) Ilustração esquemática dos valores absolutos da aproximação discreta do gradiente ($|s_i|$). (b) Detecção de cada L patamar.



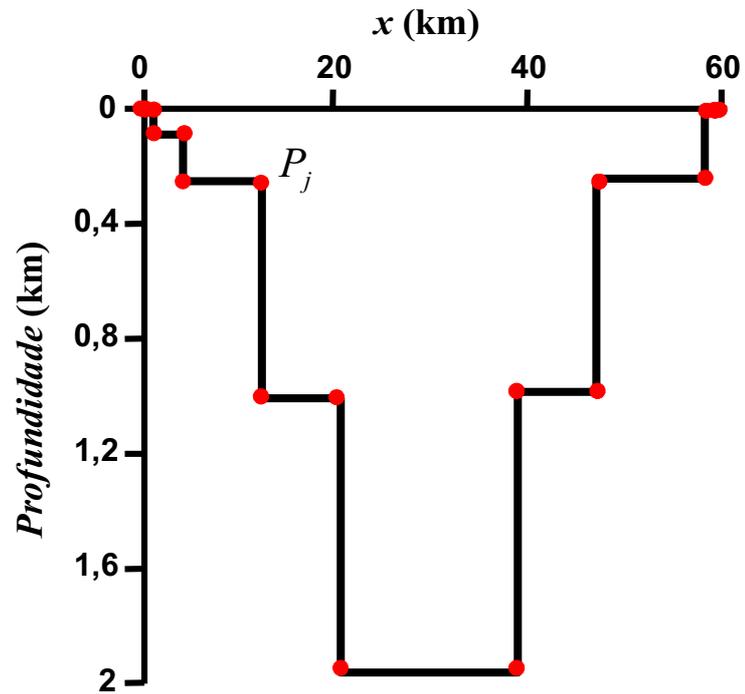
Fonte: Da autora

Figura 2.5 – (a) Ilustração esquemática de um relevo descontínuo (linha tracejada) e das j – ésima e j – ésima primeira estimativas da posição horizontal da descontinuidade e da profundidade q_k . (b) Localização dos vértices P_j, P_{j+1}, P_{j+2} e P_{j+3} .



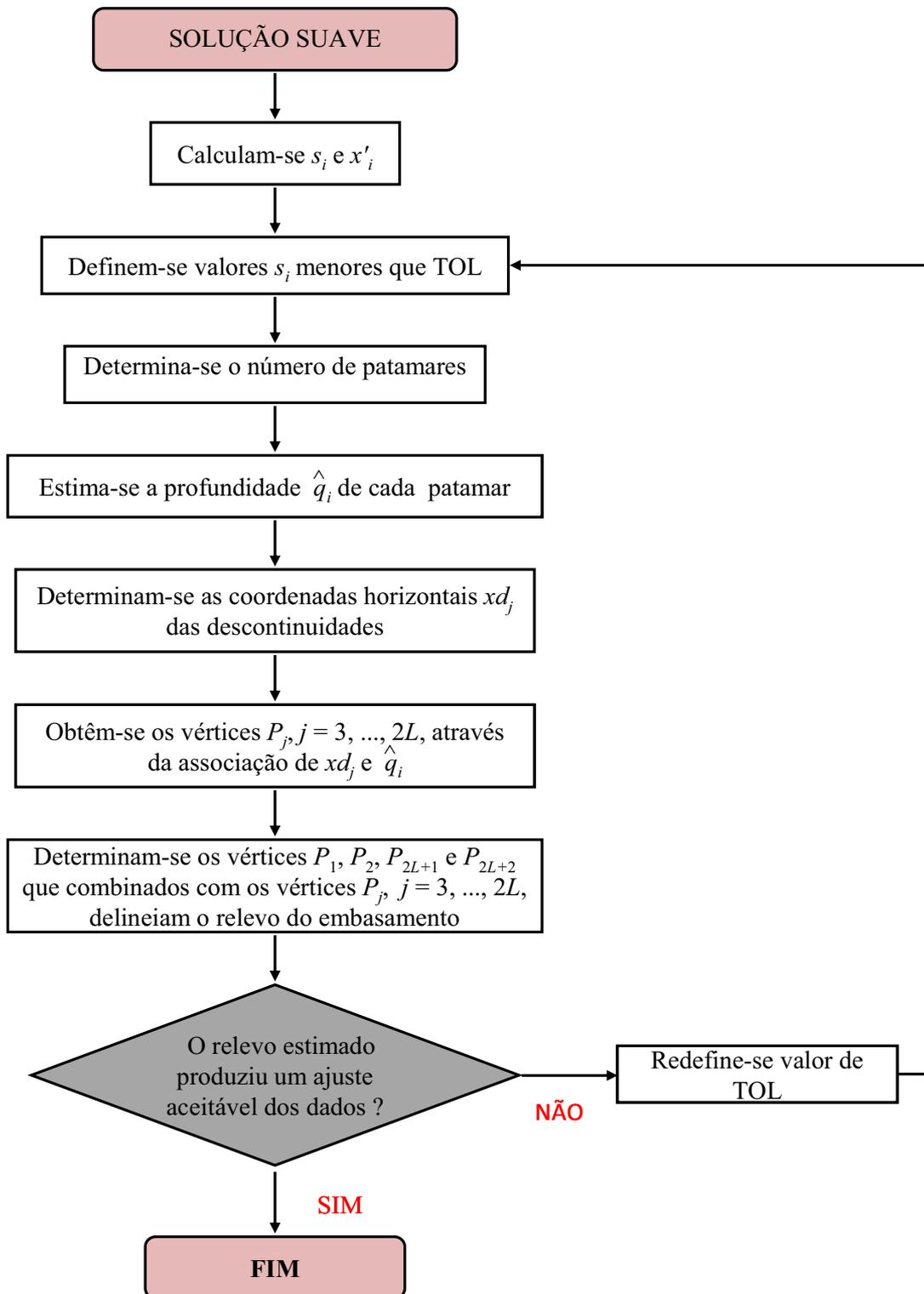
Fonte: Da autora

Figura 2.6 – Ilustração esquemática dos vértices P_j (pontos vermelhos) cujas profundidades são usadas para produzir o ajuste g .



Fonte: Da autora

Figura 2.7 – Fluxograma ilustrando as etapas realizadas para obter a estimativa do relevo utilizando o método proposto.



Fonte: Da autora

2.2 Avaliação do Desempenho do Método Proposto

Avaliamos o desempenho do método Proposto comparando o tempo computacional exigido pelo método, com os tempos exigidos por dois métodos desenvolvidos para delinear discontinuidades abruptas no relevo do embasamento com contraste de densidade constante entre o pacote sedimentar e o embasamento. O primeiro método é denominado neste trabalho de “método VT_Fitas” e o segundo denominamos de “método VT_Prismas”.

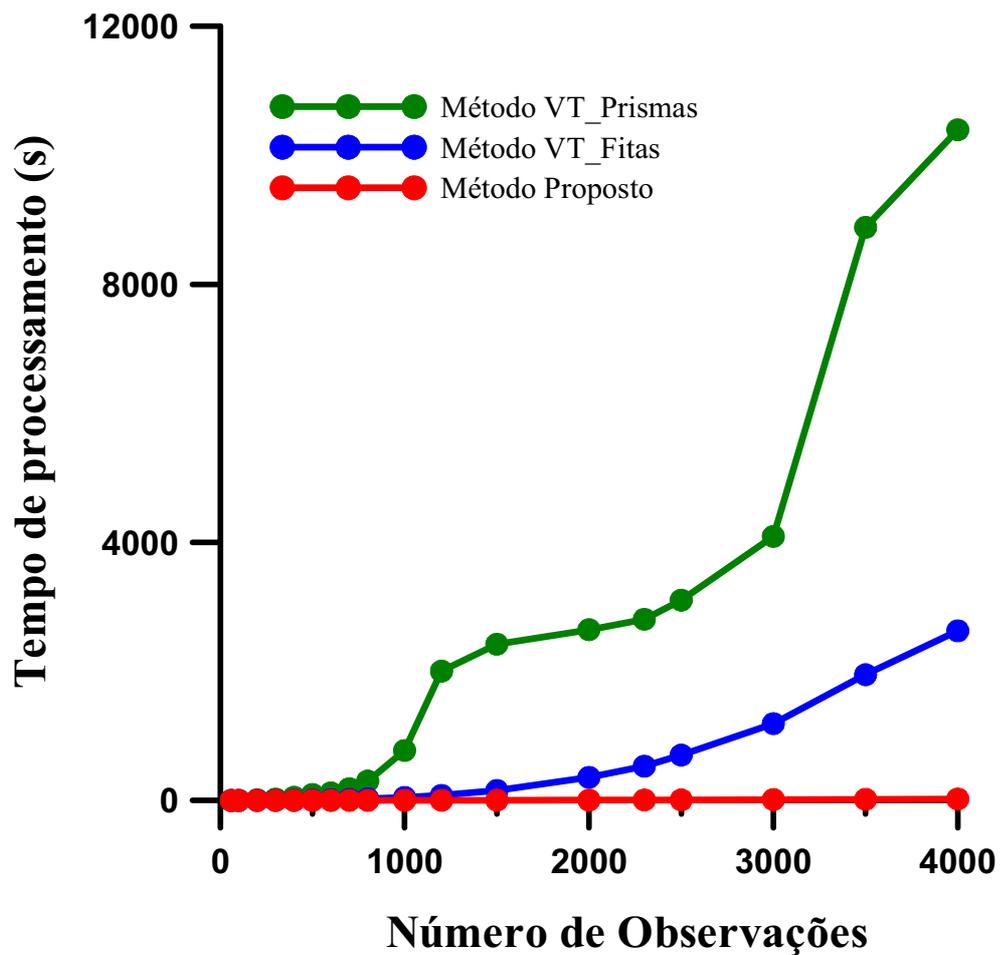
O método VT_Fitas é um procedimento de inversão que utiliza as espessuras de um conjunto de N fitas horizontais para delinear o relevo do embasamento. Este método aplica o funcional regularizador da Variação Total (VT) (SANTOS, 2013) para estabilizar a solução. O método obtém N estimativas das espessuras das fitas, $\hat{\mathbf{p}}_f \equiv \hat{p}_{f_i}, i = 1, \dots, N$, resolvendo um sistema de equações lineares na norma L1 em uma única iteração através do algoritmo de Barrodale e Roberts (1973). A solução final, $\hat{\mathbf{q}}_f \equiv \hat{q}_{f_i}, i = 1, \dots, N$, é obtida após aplicar uma correção a estas N estimativas. Neste trabalho adotamos uma correção multiplicativa para o método VT_Fitas em que cada elemento \hat{p}_{f_i} é multiplicado por uma constante μ . Obtemos a constante μ através do ajuste de mínimos quadrados entre a observação, \mathbf{g}^o , e a observação teórica devida às espessuras das N prismas retangulares justapostos, $\mathbf{g}(\mathbf{p})$, expressão 2.1.

O método VT_Prismas é um procedimento de inversão não linear que delinea o relevo do embasamento utilizando um modelo interpretativo de um conjunto de N prismas verticais. As espessuras dos N prismas são os parâmetros a serem estimados. Este método estabiliza a solução através do funcional regularizador da VT (LIMA et al., 2011; MARTINS et al., 2011). Para obter as estimativas das espessuras dos prismas este método resolve mais de um sistema linear através do algoritmo Least Square Regression – *LSQR* (PAIGE; SAUNDERS, 1982) em cada iteração.

Para os testes desta seção utilizamos um computador com processador Intel (R) Core (TM)2 Duo CPU E7500 @ 2,93 GHz com memória 3,25 GB. Aplicamos todos os métodos (Método Proposto, Método VT_Fitas e o Método VT_Prismas) a conjuntos de observações sintéticas com diferentes números de observações, por simplicidade, presumidos iguais aos números de parâmetros. Todos os métodos geraram soluções equivalentes produzindo ajustes aceitáveis, resultados não apresentados neste trabalho.

A Figura 2.8 apresenta o gráfico do tempo computacional em função do número de observações. Verificamos, na Figura 2.8, que o tempo exigido pelo método Proposto (pontos vermelhos) é sempre menor do que os tempos exigidos pelo método VT_Fitas (pontos azuis) e pelo método VT_Prismas (pontos verdes). Nota-se que a diferença entre os tempos exigidos pelo método Proposto em relação a ambos os métodos, VT_Fitas e VT_Prismas, aumenta continuamente à medida que cresce o número de observações (parâmetros), Figura 2.8. Por exemplo, para um conjunto de 4000 observações, os métodos VT_Fitas e VT_Prismas produziram soluções em 2628,953 e 10394,27 segundos, respectivamente, enquanto que o método Proposto exigiu apenas 22,84 segundos para gerar a solução.

Figura 2.8 – Tempo computacional exigido pelo Método Proposto (pontos vermelhos), pelo Método VT_Fitas (pontos azuis) e pelo Método VT_Prismas (pontos verdes) versus o número de observações.

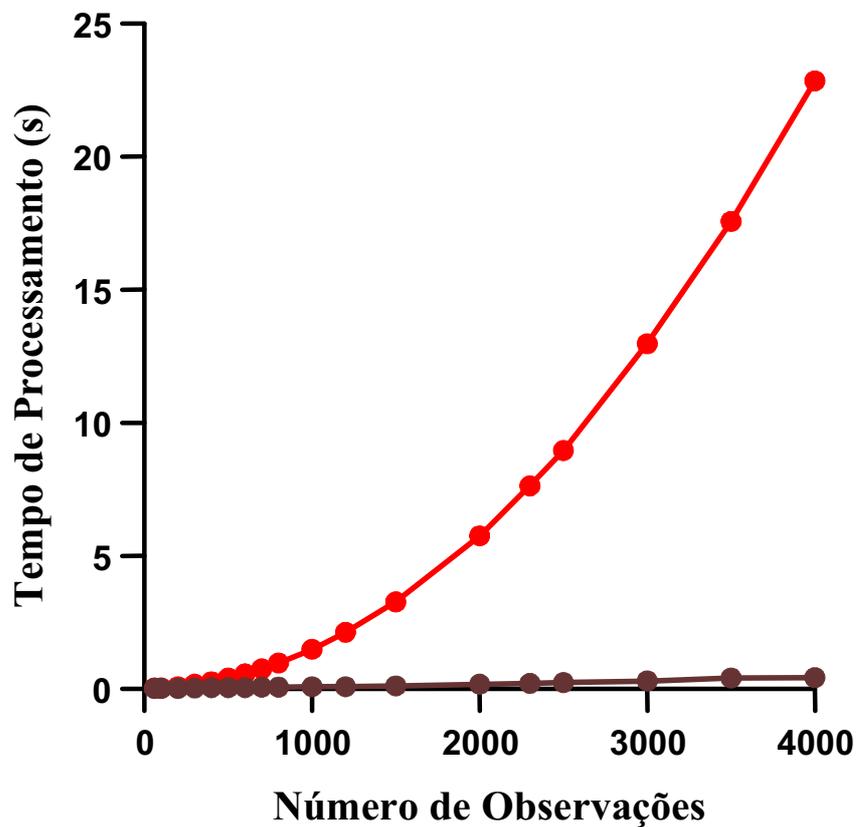


Fonte: Da autora

O tempo computacional exibido pelo método Proposto (pontos vermelhos na Figura 2.8) consiste das contribuições: i) do tempo computacional exigido pelo método de Silva et al (2014) para obtenção da aproximação inicial e ii) do tempo necessário para a determinação das coordenadas dos vértices P_j .

A Figura 2.9 mostra o tempo computacional total requerido pelo método proposto (pontos vermelhos) aplicado aos mesmos conjuntos de observações sintéticas descritos nos testes acima. A Figura 2.9 mostra também o tempo necessário apenas para a determinação das coordenadas dos vértices P_j que é substancialmente menor do que o tempo exigido pelo método Proposto (pontos vermelhos).

Figura 2.9 – Tempo computacional total exigido pelo Método Proposto (pontos vermelhos) e tempo computacional exigido apenas para a determinação das coordenadas dos vértices (pontos marrons).



Fonte: Da autora

3 TESTES EM DADOS SINTÉTICOS

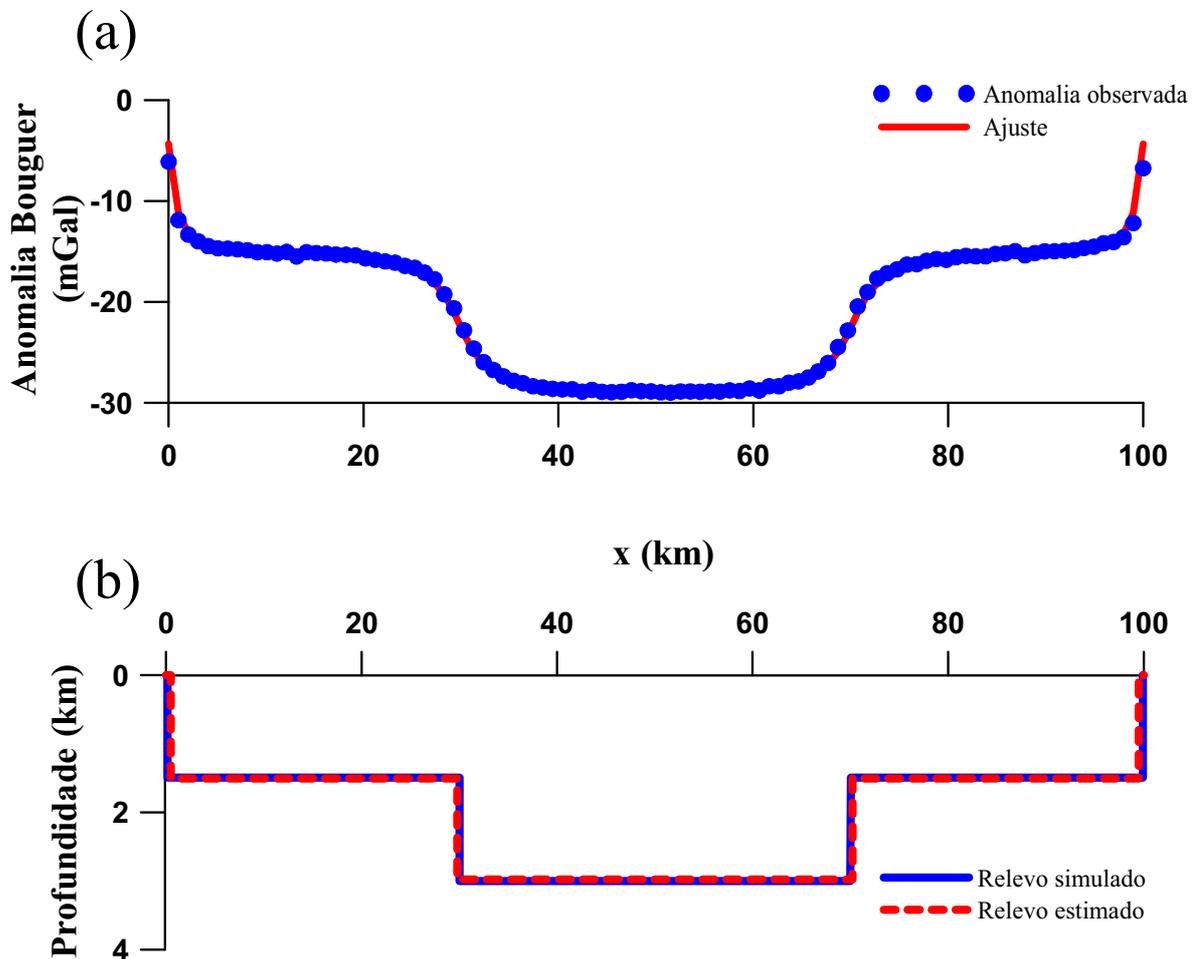
Nesta seção apresentamos o desempenho do método proposto aplicando-o a dados gravimétricos sintéticos produzidos por dois ambientes simulados de bacias sedimentares 2D. Os ambientes geológicos simulados foram: (i) graben isolado apresentando descontinuidades abruptas locais no embasamento e contraste de densidade constante; e (ii) bacia sedimentar marginal apresentando falhas escalonadas no embasamento e contraste de densidade decrescendo com a profundidade segundo uma lei hiperbólica (expressão 2.2). Para testar a estabilidade das soluções adicionamos aos dois conjuntos de dados sintéticos ruído pseudoaleatório Gaussiano com média nula e desvio padrão de 0,1 mGal.

3.1 Graben Isolado

A Figura 3.1 a apresenta em pontos azuis um conjunto de 100 observações gravimétricas regularmente espaçadas ao longo de uma extensão de aproximadamente 100 km geradas por uma bacia sedimentar simulada 2D cujo embasamento (linha azul na Figura 3.1 b) apresenta descontinuidades abruptas locais, simulando o ambiente geológico de um graben. O contraste de densidade entre os sedimentos e o embasamento é presumido constante e conhecido, $\Delta\rho = -0,24 \text{ g/cm}^3$.

A seção transversal da solução obtida pelo método proposto consiste de uma poligonal (linha tracejada vermelha na Figura 3.1 b) que proporcionou um excelente delineamento do relevo do embasamento. A Figura 3.1 a apresenta em linha vermelha a anomalia ajustada utilizando o método proposto.

Figura 3.1– Graben isolado. (a) Anomalias observada (pontos azuis) e ajustada (linha vermelha). (b) Relevos simulado (linha azul) e estimado (linha tracejada vermelha).



Fonte: Da autora

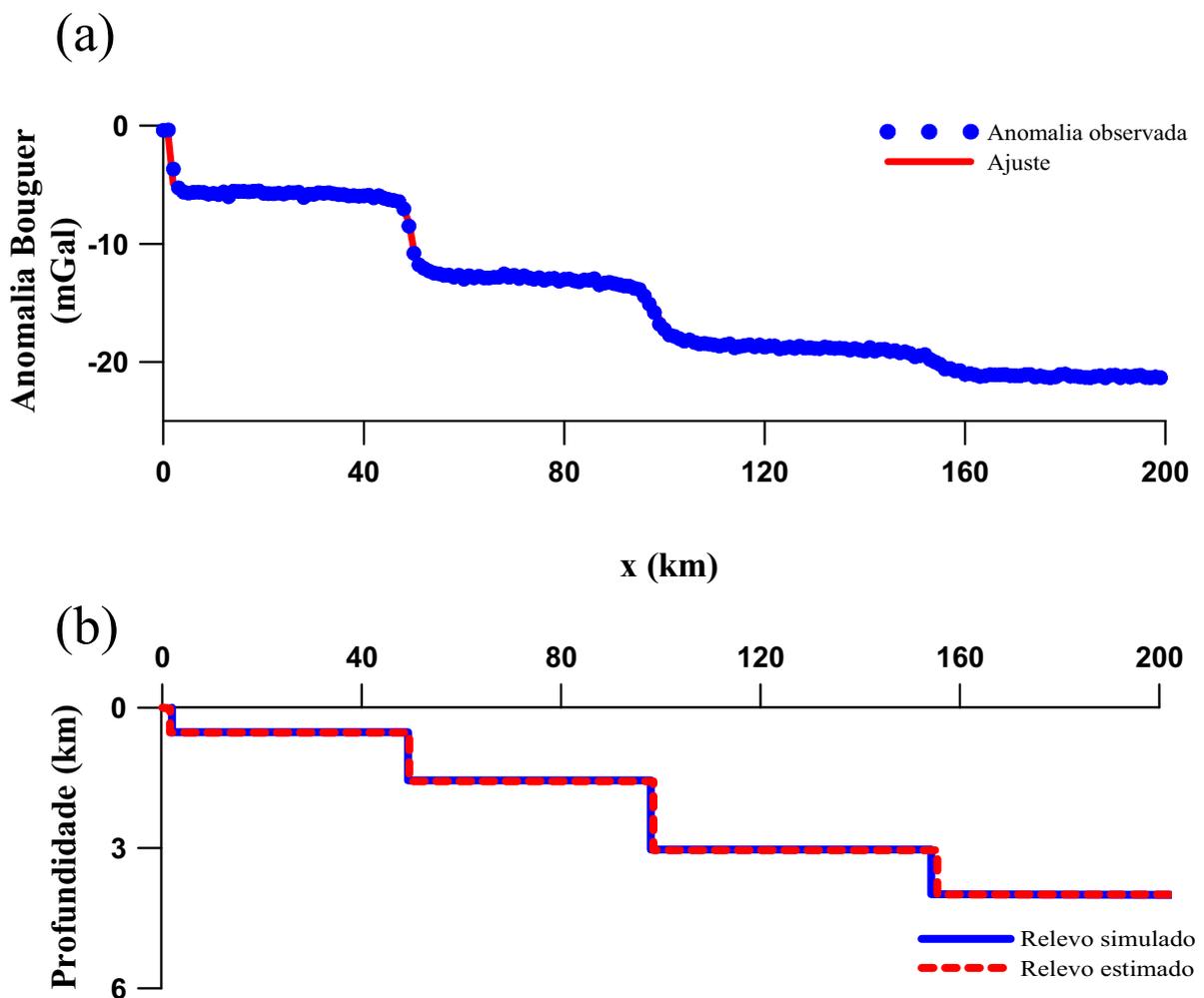
3.2 Bacia Marginal

A Figura 3.2 a apresenta as observações gravimétricas (pontos azuis) regularmente espaçadas ao longo de uma extensão horizontal de uma bacia sedimentar marginal 2D simulada cujo embasamento apresenta falhas escalonadas (linha azul na Figura 3.2 b). Para evitar o efeito de borda aplicamos o método proposto em um conjunto de 250 observações gravimétricas regularmente espaçadas ao longo de uma extensão horizontal de 250 km da bacia sedimentar. Apresentamos nas Figuras 3.2 a (pontos azuis) e b (linha azul) as observações gravimétricas e o relevo do embasamento apenas ao longo de uma extensão de

200 km. O contraste de densidade entre os sedimentos e o embasamento decresce hiperbolicamente com a profundidade em que o contraste de densidade na superfície, $\Delta\rho_0$, é igual a $-0,3 \text{ g/cm}^3$ e o fator de decaimento, β , é igual a 3 km.

O método proposto produziu uma solução presumindo-se os mesmos parâmetros $\Delta\rho_0$ e β , que geraram a anomalia gravimétrica da Figura 3.2 a (pontos azuis). A solução produzida pelo método proposto (linha tracejada vermelha na Figura 3.2 b) apresentou um excelente delineamento do relevo do embasamento. A Figura 3.2 a apresenta em linha vermelha a anomalia ajustada utilizando o método proposto.

Figura 3.2 – Bacia marginal. (a) Anomalias observada (pontos azuis) e ajustada (linha vermelha). (b) Relevos simulado (linha azul) e estimado (linha tracejada vermelha).



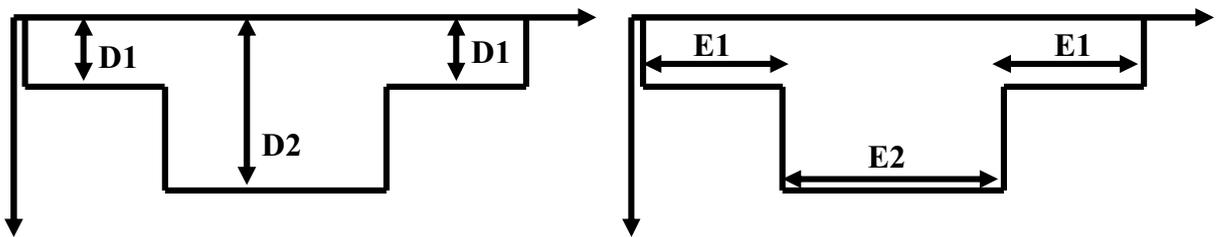
Fonte: Da autora

3.3 Limitações do Método Proposto

Nesta seção apresentaremos as limitações do método proposto através de testes em dados sintéticos. A Figura 3.3 ilustra o ambiente simulado simplificado do graben utilizado para produzir os dados sintéticos. Todos os ambientes simulados apresentam comprimento horizontal total (T) de 100 km. A combinação de diferentes extensões horizontais (E1 e E2) e profundidades (D1 e D2) dos patamares (Figura 3.3) geram o conjunto dos ambientes simulados utilizados nesta seção.

Para os ambientes simulados consideramos o contraste de densidade entre o pacote sedimentar e o embasamento constante em que $\Delta\rho = -0,24 \text{ g/cm}^3$. Os dados sintéticos foram contaminados com ruído pseudoaleatório Gaussiano de média nula e desvio padrão de 0,1 mGal.

Figura 3.3 – Graben isolado com extensão horizontal total T de 100 km, em que E1 e E2 são as extensões horizontais dos patamares e D1 e D2 são as profundidades dos patamares.



Fonte: Da autora

Para avaliação dos resultados dos ambientes simulados apresentamos o EMQ (Erro Médio Quadrático), ε , entre as profundidades verdadeiras p_i e as profundidades estimadas \hat{p}_i definido por:

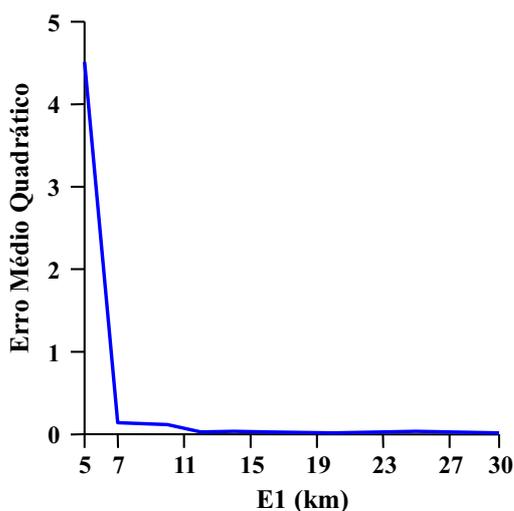
$$\varepsilon = \frac{\sum_{i=1}^N (p_i - \hat{p}_i)^2}{N} \quad (3.1)$$

em que N é o número de elementos de profundidades.

A Figura 3.4 ilustra os valores do EMQ para ambientes simulados do Graben isolado que apresentam extensão horizontal $E1 \in [5 \text{ km}, 30 \text{ km}]$. Para obter os valores do EMQ entre as profundidades p_i e \hat{p}_i (Figura 3.4) geramos ambientes simulados que apresentam valores da profundidade D1 de 3 km, da profundidade D2 de 13 km, das extensões horizontais $E1 \in [5 \text{ km}, 30 \text{ km}]$ e das extensões horizontais $E2 = T - 2E1$, em que T é o valor da extensão horizontal total do Graben. Na Figura 3.4 verificamos que o EMQ é máximo para os valores de E1 e E2 de 5 km e 90 km, respectivamente.

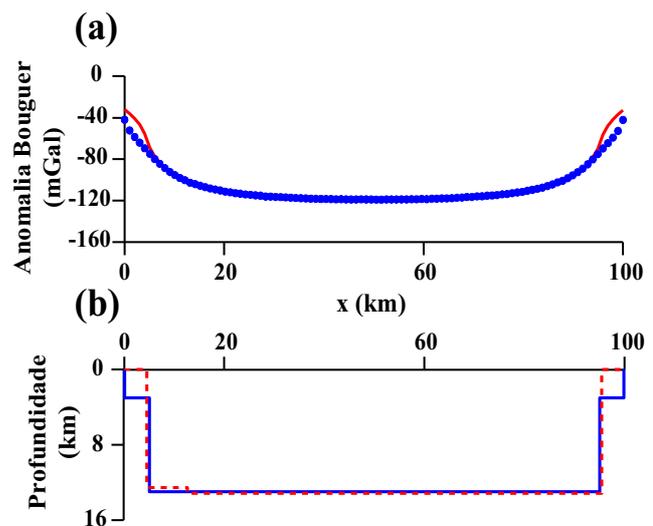
A Figura 3.5 a mostra em pontos azuis as observações gravimétricas geradas pelo relevo do ambiente simulado com extensões horizontais E1 de 5 km e E2 de 90 km (linha azul na Figura 3.5 b). A solução gerada pelo método proposto (linha tracejada vermelha na Figura 3.5 b) não produz um ajuste aceitável nos dados gravimétricos (linha vermelha na Figura 3.5 a). Portanto, para razão entre os valores das extensões horizontais E2 e E1 maiores que 18, o método proposto não produz ajuste aceitável nos dados gravimétricos (Figura 3.5 a).

Figura 3.4 – Erro Médio Quadrático entre as profundidades verdadeiras e as profundidades estimadas de ambientes simulados com valores das extensões horizontais E1 entre 5 km e 30 km.



Fonte: Da autora

Figura 3.5 – Graben Isolado. (a) Anomalias Bouguer observada (pontos azuis) e ajustada (linha vermelha). (b) Relevos simulado (linha azul) e estimado (linha tracejada vermelha).

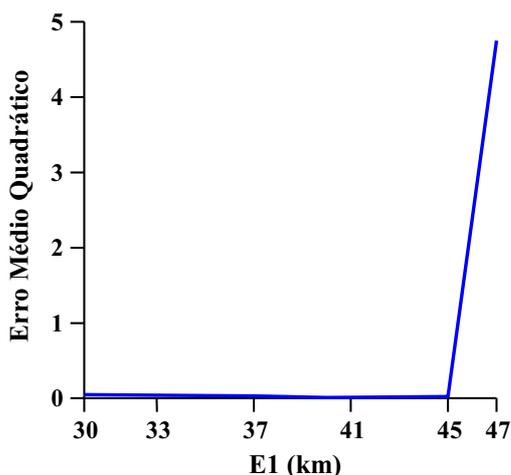


Fonte: Da autora

A Figura 3.6 mostra os valores do EMQ entre as profundidades p_i e \hat{p}_i para ambientes simulados do Graben Isolado que apresentam extensão horizontal $E1 \in [30 \text{ km}, 47 \text{ km}]$. Para obter os valores do EMQ (Figura 3.6) geramos ambientes simulados com valores da profundidade D1 de 3 km, da profundidade D2 de 13 km, das extensões horizontais $E1 \in [30 \text{ km}, 47 \text{ km}]$ e das extensões horizontais $E2 = T - 2E1$, em que T é o valor da extensão horizontal total do Graben. A Figura 3.6 ilustra que o EMQ é máximo para valor E1 de 47 km.

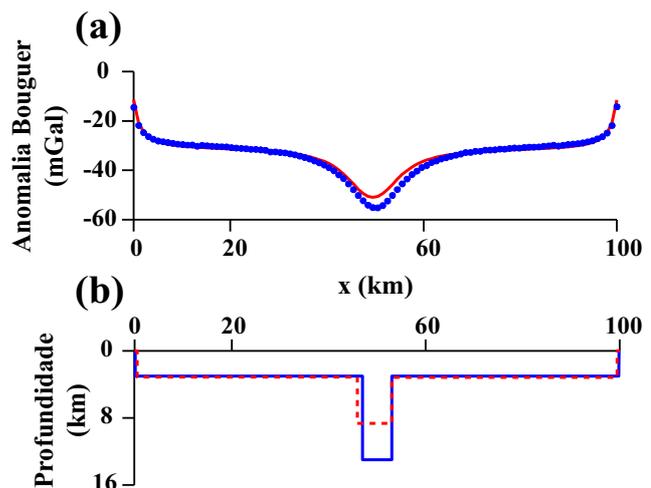
Na Figura 3.7 a apresentamos as observações gravimétricas (pontos azuis) produzidas pelo relevo do embasamento de um ambiente simulado com extensões horizontais E1 de 47 km e E2 de 6 km (linha azul na Figura 3.7 b). A solução gerada pelo método proposto (linha tracejada vermelha na Figura 3.7 b) não produz um ajuste aceitável nos dados gravimétricos (linha vermelha na Figura 3.7 a). Logo, para razão entre as extensões horizontais E1 e E2 maiores que 7,8 o método proposto não produz ajuste aceitável nos dados gravimétricos (Figura 3.7 a).

Figura 3.6 – Erro Médio Quadrático entre as profundidades verdadeiras e as profundidades estimadas de ambientes simulados com valores das extensões horizontais E1 entre 30 km e 47 km.



Fonte: Da autora

Figura 3.7 – Graben Isolado. (a) Anomalias Bouguer observada (pontos azuis) e ajustada (linha vermelha). (b) Relevos simulado (linha azul) e estimado (linha tracejada vermelha).

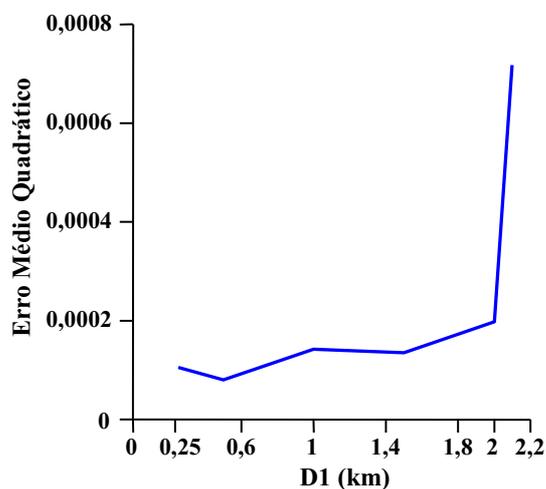


Fonte: Da autora

A Figura 3.8 apresenta os valores EMQ para ambientes simulados do Graben Isolado que apresentam profundidade $D1 \in [0,25 \text{ km}, 2,1 \text{ km}]$. Para obter os valores de EMQ entre as profundidades p_i e \hat{p}_i geramos ambientes simulados com valores da extensão horizontal E1 de 30 km, da extensão horizontal E2 de 40 km, da profundidade $D1 \in [0,25 \text{ km}, 2,1 \text{ km}]$ e da profundidade D2 de 3 km. Na Figura 3.8 verificamos que o EMQ é máximo para o valor de D1 de 2,1 km.

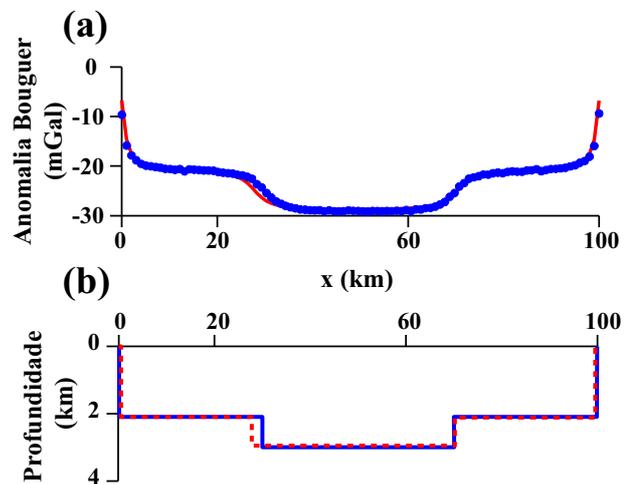
A Figura 3.9 a mostra em pontos azuis as observações gravimétricas geradas pelo relevo do ambiente simulado com profundidade D1 igual a 2,1 km (linha azul na Figura 3.9 b). Podemos notar na Figura 3.9 b que a solução gerada pelo método proposto (linha tracejada vermelha) não produziu um ajuste aceitável nos dados gravimétricos (linha vermelha na Figura 3.9 a). Para este ambiente simulado avaliamos que quando a razão entre D2 e (D2-D1) é maior que 3,3 o método proposto não produz ajuste aceitável nos dados gravimétricos (Figura 3.9 a).

Figura 3.8 – Erro Médio Quadrático entre as profundidades verdadeiras e as profundidades estimadas de ambientes simulados com valores das profundidades D1 entre 0,25 km e 2,1 km.



Fonte: Da autora

Figura 3.9 – Graben Isolado. (a) Anomalias Bouguer observada (pontos azuis) e ajustada (linha vermelha). (b) Relevos simulado (linha azul) e estimado (linha tracejada vermelha).

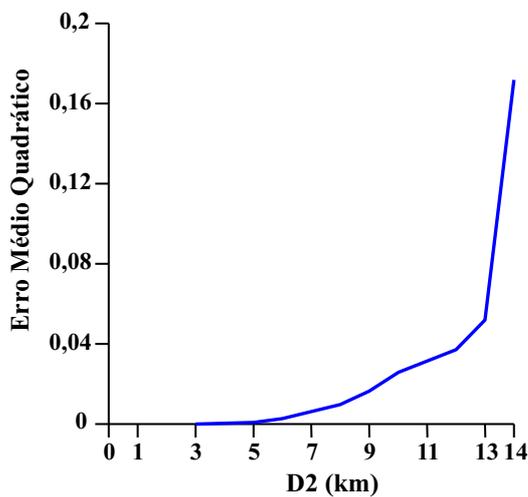


Fonte: Da autora

A Figura 3.10 apresenta os valores de EMQ para ambientes simulados que apresentam profundidades $D2 \in [3 \text{ km a } 14 \text{ km}]$. Para obter os valores de EMQ geramos ambientes simulados com valores da extensão horizontal $E1$ de 30 km, da extensão horizontal $E2$ de 40 km, da profundidade $D1$ de 0,1 km e da profundidade $D2 \in [3 \text{ km}, 14 \text{ km}]$. Na Figura 3.10 verificamos que o EMQ é máximo para o valor de $D2$ de 14 km.

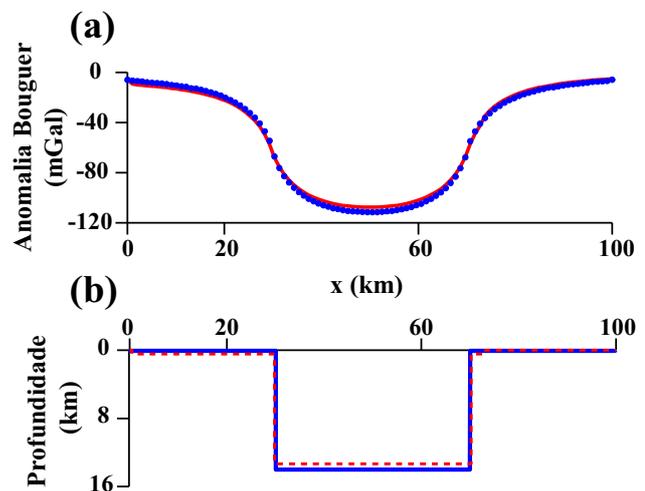
A Figura 3.11 a apresenta em pontos azuis as observações gravimétricas geradas pelo relevo do ambiente simulado com profundidade $D2$ igual a 14 km (linha azul na Figura 3.11 b). A solução gerada pelo método proposto (linha tracejada vermelha na Figura 3.11 b) mostra que o relevo do embasamento estimado não produz um ajuste aceitável nos dados gravimétricos (linha vermelha na Figura 3.11 a). Assim, para razão entre $D2$ e $(D2-D1)$ maiores do que 1 o método proposto não produz ajuste aceitável nos dados gravimétricos (Figura 3.11 a).

Figura 3.10 - Erro Médio Quadrático entre as profundidades verdadeiras e as profundidades estimadas de ambientes simulados com valores das profundidades $D2$ entre 3 km e 14 km.



Fonte: Da autora

Figura 3.11 – Graben Isolado. (a) Anomalias Bouguer observada (pontos azuis) e ajustada (linha vermelha). (b) Relevos simulado (linha azul) e estimado (linha tracejada vermelha).



Fonte: Da autora

4 TESTES EM DADOS REAIS

Nesta seção verificamos a eficiência do método proposto, aplicando-o a dois conjuntos de dados gravimétricos reais referentes à porção norte do Steptoe Valley, localizado no estado de Nevada, nos Estados Unidos e ao graben de San Jacinto, situado no estado da Califórnia, Estados Unidos.

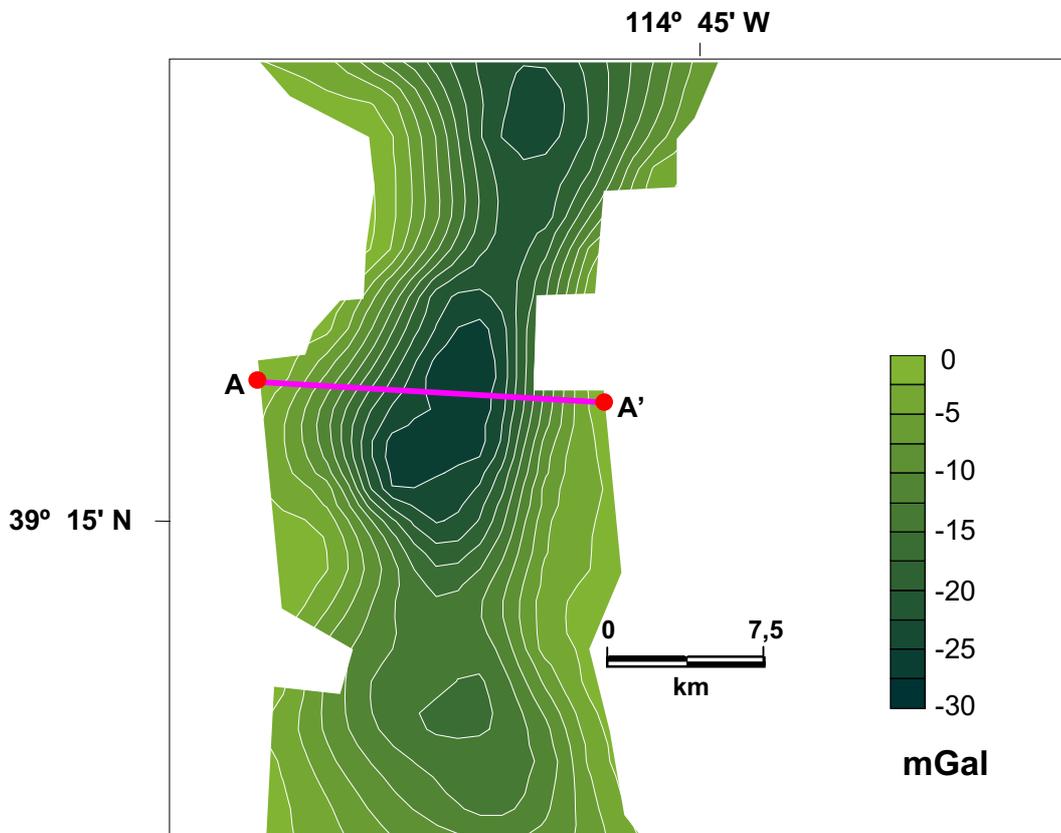
4.1 Steptoe Valley

4.1.1 Informações geológicas e geofísicas

O Steptoe Valley situa-se na província tectônica *Basin and Range*, localizada no estado de Nevada nos Estados Unidos, na qual prevalece uma topografia com alternâncias de cadeias lineares de montanhas e vales alongados intercalados. Esta bacia foi formada por processos tectônicos nos quais grandes forças distensoras causaram abatimentos e soerguimentos de grandes blocos crustais. A importância econômica desta área é devida à grande variedade de depósitos minerais produzidos ao longo de sua história geológica, como ouro, prata, molibdênio, tungstênio, bário, berílio e magnésio, entre outros (CARLSON; MABEY, 1963).

A Figura 4.1 apresenta o mapa da anomalia Bouguer da porção norte do Steptoe Valley, corrigido do efeito de fontes profundas (BARBOSA; SILVA; MEDEIROS, 1999). Esta correção consistiu em retirar das observações originais de Carlson e Mabey (1963) um polinômio de primeiro grau ajustado aos dados gravimétricos pelo método robusto de Beltrão, Silva e Costa (1991). Carlson e Mabey (1963) ressaltaram ainda que os altos gradientes gravimétricos poderiam ser explicados pela presença de falhas de alto ângulo com grandes deslocamentos verticais, diretamente relacionadas ao processo de estiramento crustal sofrido por esta região.

Figura 4.1 – Steptoe Valley. Mapa gravimétrico residual (após a remoção do efeito de fontes profundas) e localização do perfil gravimétrico utilizado (AA').



Fonte: Barbosa, Silva e Medeiros (1999).

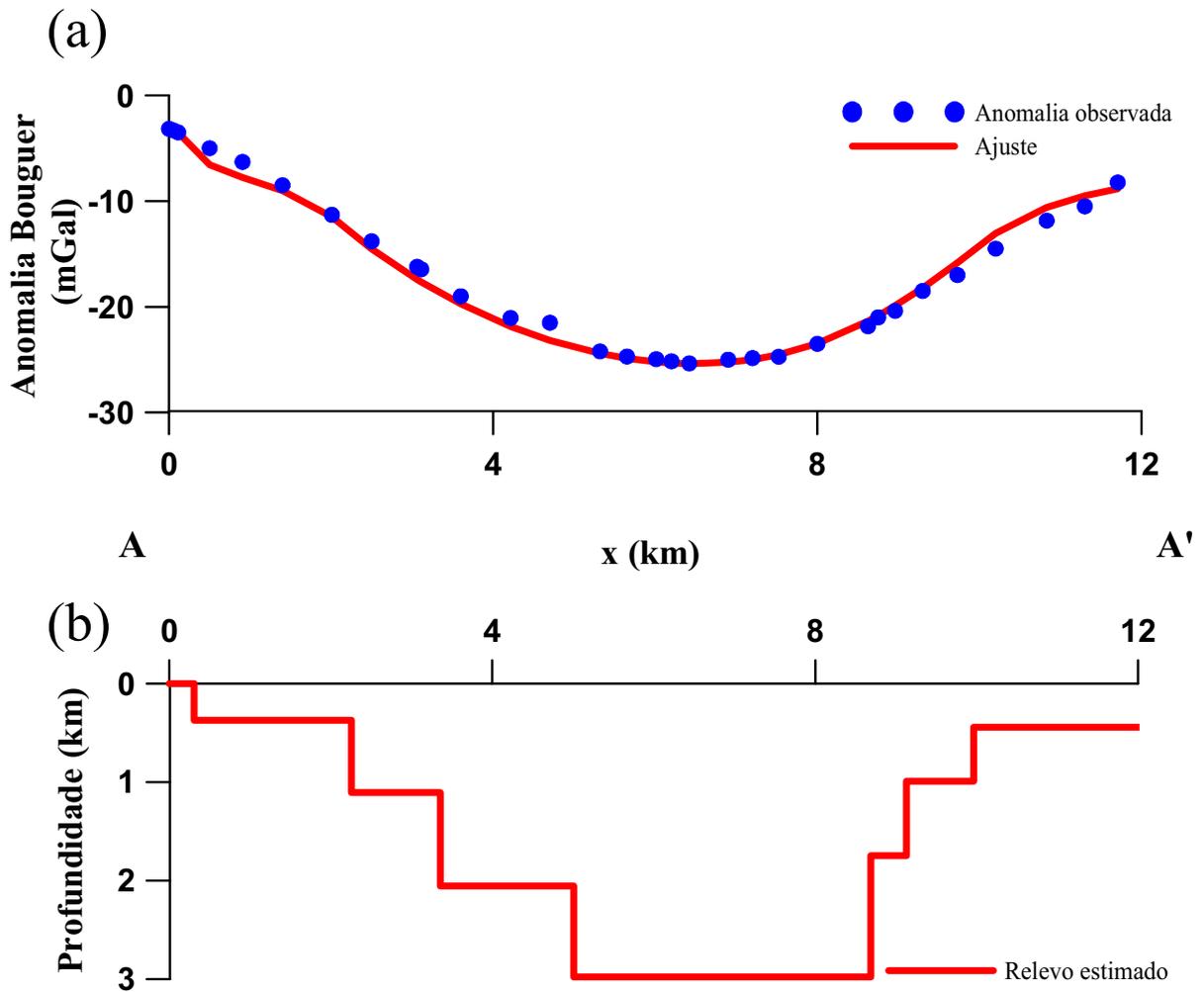
4.1.2 Resultados

O perfil AA' de anomalia gravimétrica (linha vermelha na Figura 4.1) é apresentado em pontos azuis na Figura 4.2 a e possui uma extensão horizontal de 12 km. O contraste de densidade é constante e igual a $\Delta\rho = -0,3 \text{ g/cm}^3$, com base na descrição geológica de Carlson e Mabey (1963).

Aplicando o método proposto produzimos o delineamento do relevo do embasamento (poligonal vermelha na Figura 4.2 b). Na Figura 4.2 a apresentamos em linha vermelha a anomalia ajustada. O relevo do embasamento estimado (Figura 4.2 b) apresenta uma profundidade máxima de aproximadamente 3 km e várias discontinuidades verticais, estando

de acordo com as informações geológicas de forças tectônicas distensoras, dominante na província *Basin and Range*.

Figura 4.2 – Perfil AA' do Steptoe Valley. (a) Anomalias observada (pontos azuis) e ajustada (linha vermelha). (b) Relevo do embasamento estimado (linha vermelha).



Fonte: Da autora.

4.2 Graben San Jacinto

4.2.1 Informações geológicas e geofísicas

O graben de San Jacinto está situado no sul da Califórnia com 24 km de extensão e largura entre 2 e 4 km (LEE et al., 1996). Este graben é limitado por falhas normais e seu embasamento consiste de xistos e gnaisses pré-Terciários junto com tonalitos e granodioritos do Cretáceo (CORDELL, 1973). A densidade do embasamento cristalino é aproximadamente $2,7 \text{ g/cm}^3$. De acordo com informações de dados sísmicos, a profundidade máxima do graben está no entorno de 2,4 km (FETT, 1968). O graben é preenchido por rochas sedimentares detríticas e por alúvios holocênicos e pleistocênicos (CORDELL, 1973).

Neste trabalho utilizamos na expressão 2.2 os valores adotados por Lima e Silva (2014) de $-0,63 \text{ g/cm}^3$ e 2,25 km para os parâmetros $\Delta\rho_0$ e β , respectivamente.

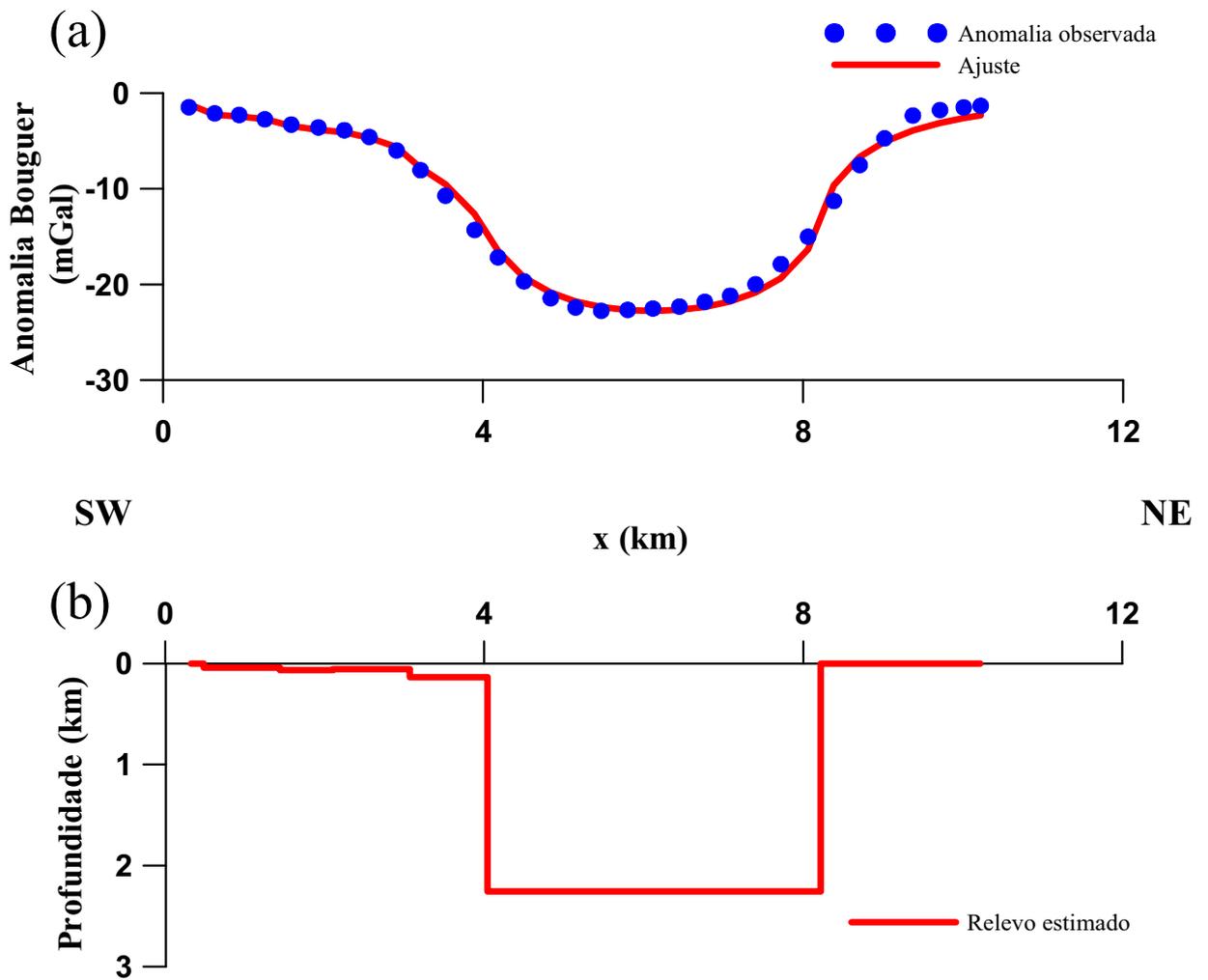
4.2.2 Resultados

A anomalia gravimétrica apresentada na Figura 4.3 a (pontos azuis) refere-se a um perfil transversal ao graben de San Jacinto na direção SW-NE com 10,5 km de extensão.

Apresentamos na Figura 4.3 b a solução obtida pelo método proposto utilizando os valores para o contraste de densidade na superfície, $\Delta\rho_0$, de $-0,63 \text{ g/cm}^3$ e para o fator de decaimento, β , de 2,25 km. A anomalia ajustada é apresentada na Figura 4.3 a em linha vermelha.

O relevo do embasamento estimado (Figura 4.3 b) apresenta grandes deslocamentos verticais em ambas bordas do graben e um fundo achatado de profundidade máxima em torno de 2,26 km.

Figura 4.3 – Graben do San Jacinto. (a) Anomalias observada (pontos azuis) e ajustada (linha vermelha). (b) Relevo do embasamento estimado (linha vermelha).



Fonte: Da autora

5 CONCLUSÕES

Desenvolvemos um método para delinear relevo de um embasamento descontínuo. O método proposto utiliza uma solução inicial suave através de um método eficiente que produz soluções em menor tempo computacional. A partir da solução inicial determinamos os vértices de uma poligonal que estima um relevo do embasamento formado por falhas verticais e patamares horizontais.

Testes em perfis de dados sintéticos mostraram a eficácia do método para delinear relevos descontínuos. Comparamos o desempenho do método com outros dois métodos de inversão que estabilizam a solução através do funcional da variação total. O método proposto aplicado a dados sintéticos apresentou soluções similares às aquelas geradas pelos dois métodos de inversão. No entanto o método proposto sempre produziu soluções em menor tempo computacional. O método apresenta limitações quando as extensões verticais das descontinuidades ou as extensões horizontais dos patamares do ambiente geológico simulado são demasiadamente pequenas.

O método também foi aplicado a dois perfis gravimétricos reais: Steptoe Valley (Estados Unidos) e Graben de San Jacinto (Estados Unidos). Nos dois testes de dados reais produzimos resultados satisfatórios em consonância com as informações geológicas disponíveis.

O método proposto é aplicável apenas em dados gravimétricos 1D, porém o método pode ser estendido para aplicação em dados gravimétricos 2D. A extensão do método para produzir soluções 3D do relevo do embasamento descontínuo poderá apresentar uma redução no tempo computacional considerável em relação à aplicação de métodos de inversão não lineares, como por exemplo, o método de inversão da variação total. Além disso, o método proposto pode ser aplicado em dados gravimétricos reais de bacias intracratônicas do tipo “strike-slip” que apresentam relevos de embasamento com falhas de alto ângulo e de grande rejeito.

REFERÊNCIAS

- BARBOSA, V. C. F.; SILVA, J. B. C.; MEDEIROS, W. E. Gravity inversion of a discontinuous relief stabilized by weighted smoothness constraints on depth. *Geophysics*, n. 64, p. 1429-1438. 1999.
- BARRODALE, I.; ROBERTS, F. D. K. An improved algorithm for discrete L_1 linear approximation. *Journal on Numerical Analysis*, v.10, n. 5, p. 839-848. 1973.
- BELTRÃO, J. F.; SILVA, J. B. C.; COSTA, J. C. Robust polynomial fitting method for regional gravity estimation. *Geophysics*. vol. 56 , p. 80 – 89.1991.
- BOTT, M. H. P. The use of rapid digital computing methods for direct gravity interpretation of sedimentary basins. *Geophysics. J. Roy. Astr. Soc.*, n.3, p. 63-67. 1960.
- CARLSON, J. E.; MABEY, D. R. Gravity and aeromagnetic map of the Ely area, White Pine County. Nevada: U.S. Geological. Survey. 1963. mapa GP-392, escala 1: 250.000.
- CORDELL, L. Gravity analysis using an exponential density-depth function—San Jacinto Graben, California. *Geophysics*, v.38, n. 4, p. 684-690. 1973.
- FETT, J. D. *Geophysical investigations of the San Jacinto Valley, Riverside Country* . 1968. 87f. (Masters Thesis) - Univ. California at Riverside, California. 1968. (unpubl.)
- LAFEHR, T. R., Gravity method, *Geophysics*, v. 45, n. 11, p. 1634-1639. 1980.
- LEE, T. C.; BIEHLER, S.; PARK, S. K.; STEPHENSON, W. J. A seismic refraction and reflection study across the central San Jacinto Basin, Southern California. *Geophysics*, v. 61, n. 5, p. 1258-1268. 1996.
- LIMA, W. A. ; MARTINS, M. C.; SILVA, J. B. C.; BARBOSA, V. C. F. Total variation regularization for depth-to-basement estimate: Part 2 - Physicogeologic meaning and comparisons with previous inversion methods. *Geophysics*, v. 76, n. 1, p. I13-I20. 2011.
- LIMA, W. A.; SILVA J. B. C. Combined modeling and smooth inversion of gravity data from a faulted basement relief. *Geophysics*, v. 79, n. 6, pp. F1-F10. 2014
- LITINSKY, V. A. Concept of effective density: key to gravity determinations for sedimentary basins. *Geophysics*, v. 54, n. 11, 1474-1482. 1989.
- LUIZ; J. G.; SILVA, L. M. C. Geofísica de prospecção. V. 1. Belém: EDUFPA. 1995.
- MARQUARDT, 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.
- MARTINS, C. M.; LIMA, W. A.; BARBOSA, V. C. F.; SILVA, J. B. C. Total variation regularization for depth-to-basement estimate: Part 1 – mathematical details and applications. *Geophysics*, v. 76, n. 1, p. I1-I12. 2011

PAIGE, C. C.; SAUNDERS, M. A. LSQR: An algorithm for sparse linear equations and sparse least squares, *ACM Trans. Math. Softw*, v. 8, n. 1, p 43-71. 1982.

SANTOS, R. di Carlo S. dos. *Inversão gravimétrica rápida do relevo do embasamento aplicando o funcional da variação total* . 2013. 51 f. Dissertação (Mestrado em Geofísica). Programa de Pós Graduação em Geofísica – Universidade Federal do Pará, Belém. 2013.

SILVA, J. B. C.; COSTA, D. C. L; BARBOSA, V. C. F. Gravity inversion of basement relief and estimation of density contrast variation with depth. *Geophysics*. v.71. n.5. p.151-158. 2006.

SILVA, J. B. C.; MEDEIROS, W. E.; BARBOSA, V. C. F. Potential field inversion: choosing the appropriate technique to solve a geologic problem. *Geophysics*, v. 66, n. 2, p. 511-520. 2001.

SILVA, J. B. C. ; OLIVEIRA, A. S. ; BARBOSA, V. C. F. Gravity inversion of 2D basement relief using entropic regularization: *Geophysics*, v. 75, p. I29-I35. 2010.

SILVA, J. B. C.; SANTOS, D. F.; GOMES, K. P. Fast gravity inversion of basement relief. *Geophysics*. v. 79, n. 5. p. G79-G91. 2014.

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.

VISWESWARA RAO, C.; CHAKRAVARTHI, V.; RAJU, M.L. Forward modelling: gravity anomalies of twodimensional bodies of arbitrary shape with hyperbolic and parabolic density functions. *Computers & Geosciences*. Amisterdam. Elsevier, v. 20, n. 5, p. 873-880. 1994.