



## Reconstrução em profundidade de corpos geológicos em bacias sedimentares

Valéria C.F. Barbosa ([valcris@on.br](mailto:valcris@on.br))

Copyright 2008, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

*Este texto foi preparado para a apresentação no III Simpósio Brasileiro de Geofísica, Belém, 26 a 28 de novembro de 2008. Seu conteúdo foi revisado pelo Comitê Técnico do III SimBGF, mas não necessariamente representa a opinião da SBGf ou de seus associados. É proibida a reprodução total ou parcial deste material para propósitos comerciais sem prévia autorização da SBGf.*

### Abstract

I present an illustrative overview of our inversion methods for estimating geologic bodies in-depth (on the x-z plane or on the x-y-z region) from potential field data. I focus attention on our inversion methods that retrieve geologic bodies in sedimentary setting. Specifically, I identify three geologic sources in a sedimentary basin that can be detected from gravity and magnetic data: 1) basement relief of a sedimentary basin; 2) salt bodies; and 3) mafic intrusions in the sedimentary section. I also emphasize gravity inversion approaches to interpret a complex sedimentary setting consisting of a complex basement relief of a sedimentary basin in the presence of salt layers and domes or in the presence of mafic intrusions.

### Introdução

O delineamento da geometria (forma) dos corpos geológicos em subsuperfície é um estudo geologicamente complexo e economicamente dispendioso. Os dados gravimétricos e magnéticos podem ser utilizados na interpretação, em subsuperfície, da localização e da delimitação das formas geométricas dos corpos geológicos. Especificamente, a inversão de dados gravimétricos e magnéticos pode reconstruir corpos geológicos, em subsuperfície, através da estimativa da distribuição da propriedade física ou da estimativa de parâmetros geométricos que descrevem a forma dos corpos. No entanto, tanto a inversão de dados gravimétricos como a inversão de dados magnéticos são problemas complexos, i.e. problemas matematicamente mal-postos que são caracterizados pela não unicidade e instabilidade das soluções estimadas. Concretamente, existem infinitas distribuições de densidade (de susceptibilidade magnética) no interior da Terra que igualmente reproduzem os dados gravimétricos (magnéticos), medidos na superfície da Terra, dentro da precisão imposta pelo ruído contido nos dados.

Nos últimos anos, desenvolvemos métodos de inversão gravimétrica e magnética para a reconstrução, com unicidade e estabilidade, da geometria 2D e 3D de corpos geológicos em diferentes ambientes geológicos. Em ambientes geológicos sedimentares, por exemplo, apresento a reconstrução de fontes salinas (e.g., Domo de sal de Galveston Island, Golfo do México) e do relevo do embasamento de bacias sedimentares (e.g., Bacia de Almada e Bacia do Reconcânvo, Bahia, Bacia de Algarve, Portugal, e Steptoe Valley, Nevada, EUA).

### Metodologia

O problema inverso em métodos potenciais não tem solução única e nem estável, sendo definido como um problema mal-posto. Um problema mal-posto reflete um desequilíbrio entre a quantidade de informação contida nos dados geofísicos e a quantidade de informação demandada pelo intérprete. Desta forma, um problema mal-posto geralmente permite mais de uma solução compatível com o dado geofísico. O primeiro passo para solucionar um problema mal-posto é transformá-lo em um problema bem-posto, ou seja, um problema com solução única e estável. Conceitualmente, há duas abordagens para realizar esta transformação. Na primeira abordagem há uma substancial redução das informações geológicas demandadas pelo do intérprete (e.g., Parker, 1974; Huestis & Parker, 1977). Na segunda abordagem há introdução de informação geológica adicional na formulação do problema inverso. Ao contrário da primeira abordagem, a abordagem de introdução de informação a priori originou muitos métodos de inversão de dados potenciais.

O problema inverso com introdução de informação a priori (Tikhonov & Arsenin, 1977) pode ser formulado como um problema de minimização de um funcional não vinculado do tipo:

$$\Gamma(\mathbf{m}) = \Phi_d(\mathbf{m}) + \mu \Phi_m(\mathbf{m}), \quad (1)$$

em que  $\mathbf{m} \in R^M$  é o vetor dos parâmetros a serem estimados e  $\mu$  é o parâmetro de regularização (escalar não negativo). O primeiro termo de  $\Gamma(\mathbf{m})$  é o funcional dos dados geofísicos que pode ser definido como

$$\Phi_d(\mathbf{m}) = \left\| \mathbf{W}_d (\mathbf{d}^o - \mathbf{d}(\mathbf{m})) \right\|_p, \quad (2)$$

sendo  $\mathbf{d}^o$  e  $\mathbf{d}(\mathbf{m})$  os vetores no espaço  $R^N$  dos dados de campos potenciais,  $\mathbf{W}_d \in \mathbb{R}^{N \times N}$  uma matriz diagonal de pesos definida positiva e  $\| \cdot \|_p$  é uma norma  $p(p \geq 1)$ .

O segundo termo de  $\Gamma(\mathbf{m})$  especifica as informações a priori a serem introduzidas no problema inverso. Estas informações a priori são feições, atributos ou características geológicas que presumimos para as fontes da área em estudo. Tais informações podem ser introduzidas no problema inverso como a combinação linear de  $L$  funcionais não negativos dos parâmetros, i.e.,

$$\Phi_m(\mathbf{m}) = \sum_{k=1}^L \phi_n^k(\mathbf{m}), \quad (3)$$

em que  $\phi_n^k, k = 1, \dots, L$ , são funcionais que impõem diferentes características a solução.

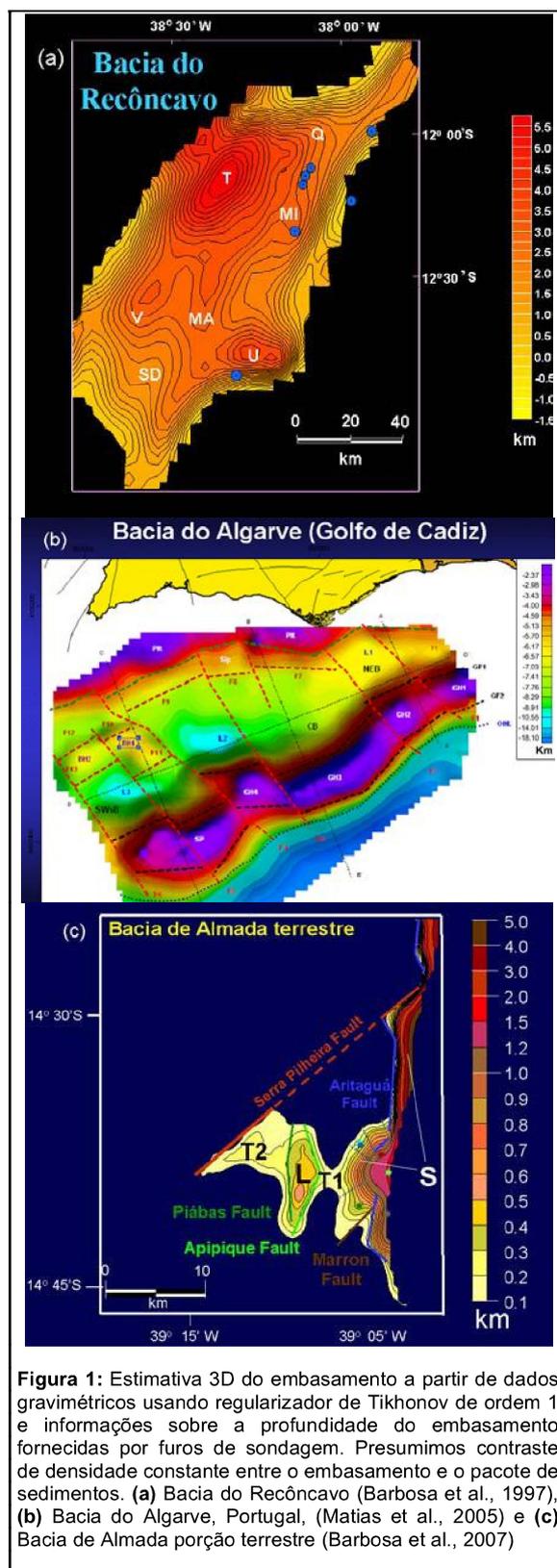
Nos últimos 10 anos, temos desenvolvido métodos de inversão gravimétrica e magnética para a reconstrução, com unicidade e estabilidade, da geometria 2D e 3D de corpos geológicos específicos de ambientes sedimentares. Em todos estes métodos, especificamos diferentes informações a priori ( $\phi_n^k, k = 1, \dots, L$ ) e minimizamos o funcional  $\Gamma(\mathbf{m})$  (equação 1).

Neste trabalho apresento um resumo ilustrado de alguns dos principais resultados que obtivemos na reconstrução de corpos em profundidade em ambientes sedimentares. Destaco a reconstrução: 1) do embasamento de bacias sedimentares, 2) de corpos de sal e 3) de corpos ígneos intrusivos. Apresento também a fase atual do nosso trabalho em que desenvolvemos métodos de inversão de dados de campos potenciais produzidos por ambientes geologicamente complexos. Nesta linha de pesquisa destaco: 1) a reconstrução do relevo do embasamento de bacias sedimentares na presença de corpos geológicos interferentes (e.g., corpos de sal, intrusivas ígneas) e 2) a reconstrução simultânea de corpos geológicos interferentes (e.g., corpos de sal) e do relevo do embasamento de bacias sedimentares.

## Resultados

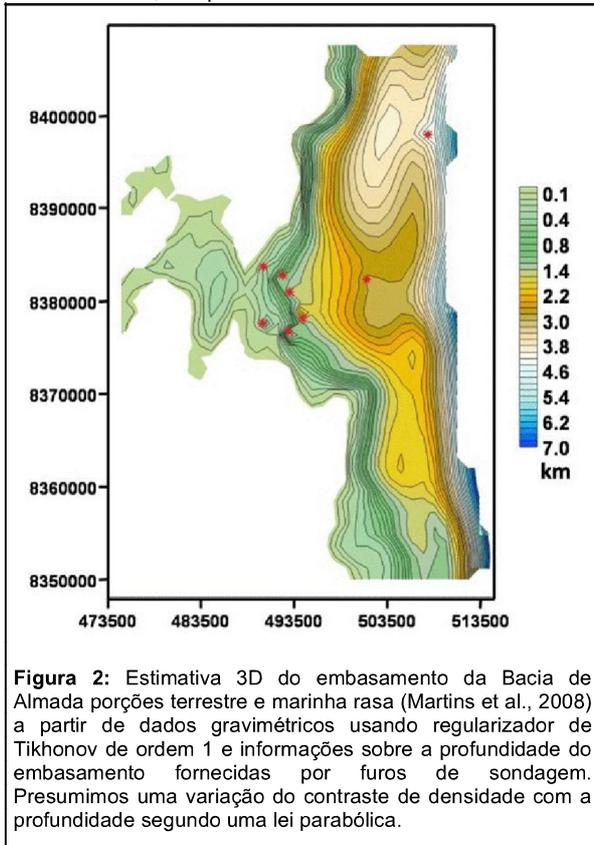
Nesta seção apresento um resumo ilustrativo dos principais resultados de reconstrução, em profundidade, de corpos geológicos em bacias sedimentares. Estes resultados são específicos dos métodos inversos desenvolvidos pelo nosso grupo de pesquisa.

Embasamento de bacias sedimentares - Estimamos, em pontos discretos, as profundidades do embasamento de bacias sedimentares a partir de dados gravimétricos. Barbosa et al. (1997), Matias et al. (2005) e Barbosa et al. (2007) consideram o pacote de sedimentos e o embasamento cristalino homogêneos e os principais resultados destes autores estão nas Figuras 1a-c. Consideramos também o embasamento homogêneo e o pacote sedimentar heterogêneo presumindo-se uma lei monotônica de decaimento do contraste de densidade com a profundidade, como por exemplo as leis parabólica (Silva et al., 2006) e hiperbólica (Martins et al., 2007). A Figura 2 mostra a estimativa 3D do arcabouço estrutural das porções terrestre e marinha rasa da Bacia de Almada (Martins et al., 2008) presumindo uma variação do contraste de densidade com a profundidade segundo uma lei parabólica. Todos estes métodos mencionados introduzem dois tipos de informações a priori: 1) proximidade entre as profundidades estimadas e verdadeiras do embasamento que são fornecidas por furos de sondagem e 2) variação espacial suave para as profundidades estimadas do embasamento (regularizador de Tikhonov de ordem 1). Nunes et. al (2008) usam estas mesmas informações a priori, presumem sedimentos não



**Figura 1:** Estimativa 3D do embasamento a partir de dados gravimétricos usando regularizador de Tikhonov de ordem 1 e informações sobre a profundidade do embasamento fornecidas por furos de sondagem. Presumimos contraste de densidade constante entre o embasamento e o pacote de sedimentos. (a) Bacia do Recôncavo (Barbosa et al., 1997), (b) Bacia do Algarve, Portugal, (Matias et al., 2005) e (c) Bacia de Almada porção terrestre (Barbosa et al., 2007)

magnéticos e estimam, a partir de dados magnéticos, a direção de magnetização das rochas do embasamento e as profundidades do embasamento de bacias sedimentares, em pontos discretos.

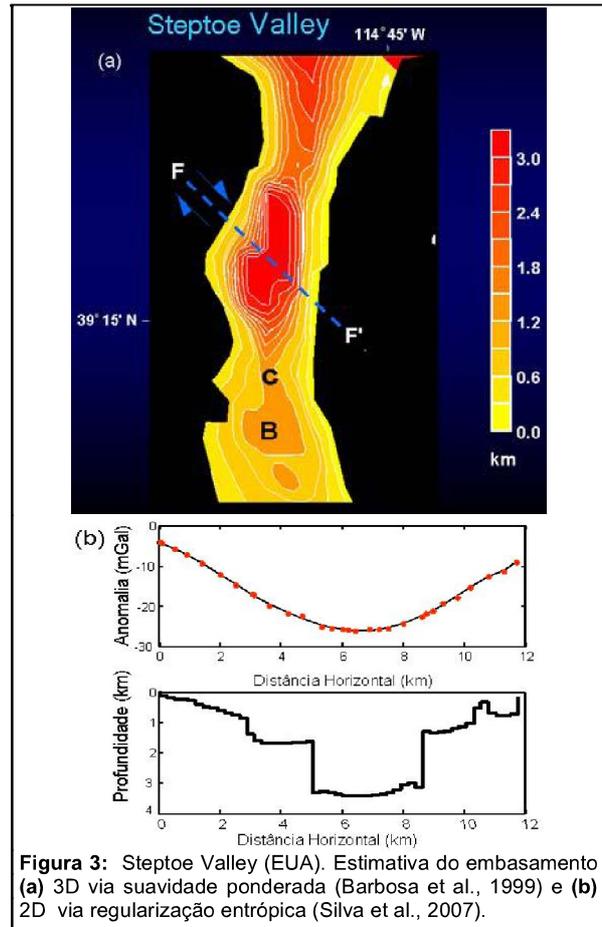


**Figura 2:** Estimativa 3D do embasamento da Bacia de Almada porções terrestre e marinha rasa (Martins et al., 2008) a partir de dados gravimétricos usando regularizador de Tikhonov de ordem 1 e informações sobre a profundidade do embasamento fornecidas por furos de sondagem. Presumimos uma variação do contraste de densidade com a profundidade seguindo uma lei parabólica.

Todos os métodos mencionados anteriormente impõem uma variação suave do relevo do embasamento. O método de inversão de dados gravimétricos de Barbosa et al. (1999) melhora a resolução da estimativa do relevo do embasamento, permitindo o mapeamento de discontinuidades. Este método inverso que denominamos como suavidade ponderada usa um algoritmo iterativo e o funcional com a informação de primeira derivada ponderada dos parâmetros para estimar um relevo do embasamento com comportamento predominantemente suave, mas localmente descontínuo. A Figura 3a mostra o relevo 3D estimado da Bacia Steptoe Valley, Nevada, EUA (Barbosa et al., 1999). No método de regularização entrópica, Silva et al. (2007) minimizaram a medida de entropia de ordem um, combinada com a maximização da medida de entropia de ordem zero do vetor de soluções (profundidades do embasamento) para mapear discontinuidades do embasamento de uma bacia sedimentar a partir de dados gravimétricos (Figura 3b).

**Corpos de sal** - Estimamos a distribuição dos contrastes de densidade em subsuperfície para recuperar a forma de corpos de sal a partir de dados gravimétricos. Para tanto Silva Dias et al. (2007a) desenvolveram a inversão gravimétrica 3D com aprendizagem adaptativa em que, iterativamente, estimam uma distribuição 3D dos

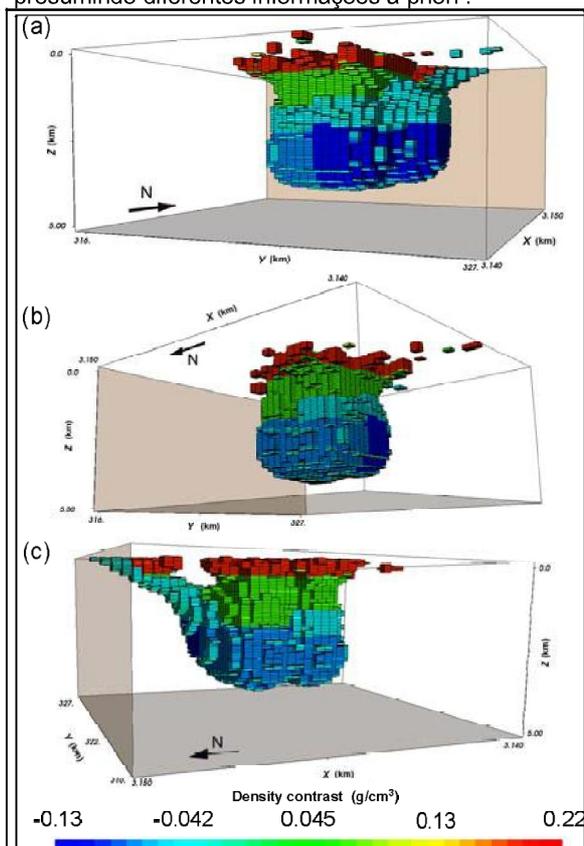
contrastos de densidade em uma malha retangular de cubos que ajuste os dados observados e favoreça fontes geológicas compactas (sem buracos) em torno de elementos geométricos, tais como eixos e pontos. Os elementos geométricos funcionam como esqueletos iniciais dos presumíveis corpos geológicos. Silva Dias et al. (2008) aplicaram este método à anomalia Bouguer do domo de sal de Galveston Island, Texas, EUA, e testaram duas diferentes hipóteses geológicas sobre a variação de densidade entre o domo de sal (homogêneo) e sua encaixante (pacote sedimentar estratificado). A Figura 4 mostra a estimativa da distribuição dos contrastes de densidade (reversa) do domo de sal usando uma das hipóteses postuladas.



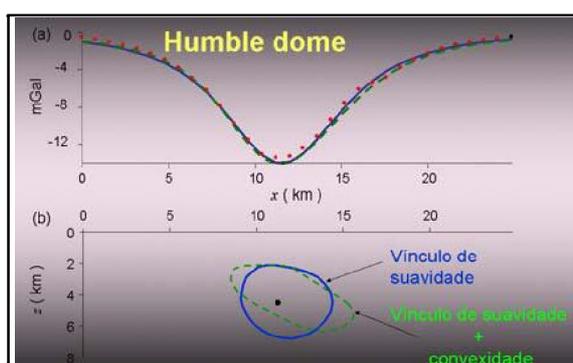
**Figura 3:** Steptoe Valley (EUA). Estimativa do embasamento (a) 3D via suavidade ponderada (Barbosa et al., 1999) e (b) 2D via regularização entrópica (Silva et al., 2007).

Ainda objetivando a recuperação da geometria 2D de corpos de sal, estimamos as coordenadas da superfície externa de corpos isolados de sal aproximando estes corpos por poligonais (Silva & Barbosa, 2004). Especificamente, fornecemos um ponto interno à fonte anômala (corpo salino), o contraste de densidade entre a fonte e o meio e estimamos as coordenadas polares de raios que descrevem uma seção vertical poligonal 2D da fonte geológica. Neste método, que denominamos de inversão radial, usamos funcionais que introduzem diferentes informações a priori (por exemplo, convexidade, regularizadores de Tikhonov de ordens 0 e

1). A Figura 5 mostra um perfil este-oeste da anomalia Bouguer cruzando o centro do domo de Humble, Texas, EUA, e duas estimativas da geometria deste domo presumindo diferentes informações a priori.

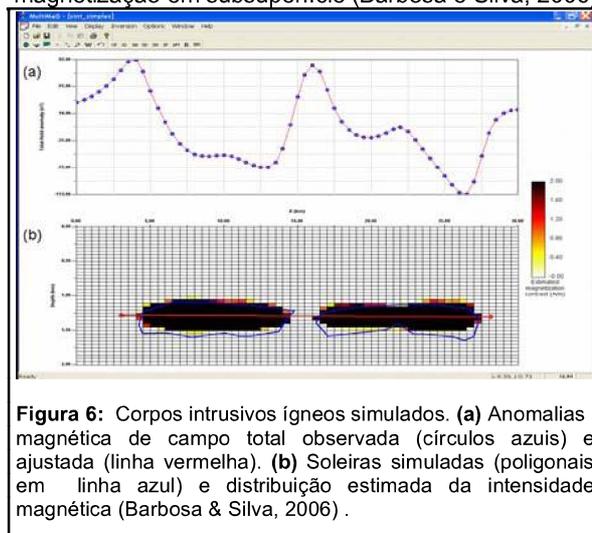


**Figura 4** – Domo de sal de Galveston Island, Texas, EUA. (a), (b), e (c) Vistas em perspectivas das estimativas 3D dos contrastes de densidade (reversa, i.e., encaixante homogêneo e domo de sal heterogêneo) via inversão gravimétrica 3D com aprendizagem adaptativa (Silva Dias et al., 2007a e 2008).



**Figura 5** – Domo de Humble, Texas, EUA– (a) Anomalias gravimétricas observada (pontos vermelhos) e ajustadas (linhas verde e azul). (b) Estimativas da geometria do domo de sal presumindo duas diferentes informações a priori (Silva & Barbosa, 2004).

Corpos intrusivos ígneos - Estimamos a distribuição das intensidades de magnetização em subsuperfície para recuperar a forma de corpos 2D intrusivos ígneos (soleiras e diques) a partir de um perfil de dados magnéticos. Para tanto, Barbosa e Silva (2006) estimam uma distribuição 2D dos contraste de densidade em uma malha retangular de prismas que ajuste os dados observados e favoreça fontes geológicas compactas (sem buracos) em torno de elementos geométricos, tais como eixos e pontos, que descrevem o esqueleto das fontes intrusivas ígneas. A Figura 6 mostra uma simulação numérica de duas soleiras. A Figura 6a mostra as anomalias magnéticas de campo total observada (círculos) e ajustada (linha contínua) e a Figura 6b mostra a estimativa da distribuição da intensidade de magnetização em subsuperfície (Barbosa e Silva, 2006).



**Figura 6:** Corpos intrusivos ígneos simulados. (a) Anomalias magnética de campo total observada (círculos azuis) e ajustada (linha vermelha). (b) Soleiras simuladas (poligonais em linha azul) e distribuição estimada da intensidade magnética (Barbosa & Silva, 2006).

#### Ambientes sedimentares geologicamente complexos:

Nesta seção apresento um resumo de dois métodos que desenvolvemos para ambientes sedimentares geologicamente complexos constituídos por um embasamento complexo e múltiplas heterogeneidades de densidade (referidas como fontes interferentes). Neste caso os espectros da anomalia gravimétrica produzida pelas fontes interferentes apresentam uma superposição relevante com o conteúdo espectral referente à anomalia produzida isoladamente pela interface (embasamento). Esta superposição é causada pelas características geométricas presumidas para o embasamento e para as fontes interferentes, isto é, amplas extensões verticais produzindo anomalias com larga banda espectral. Neste ambiente geológico complexo os métodos clássicos de separação regional-residual da anomalia gravimétrica não permitem interpretações confiáveis para cada uma das componentes (anomalias regional e residual). Os métodos a seguir contornam o problema da impossibilidade da separação regional-residual quando as anomalias, produzidas pelo embasamento e pelas fontes interferentes, apresentam larga sobreposição de conteúdo espectral.

O primeiro método foi desenvolvido por Silva Dias et al. (2007b) que estimam o embasamento complexo de uma bacia sedimentar, na presença de múltiplas heterogeneidades de densidade (referidas como fontes interferentes) localizadas tanto nos sedimentos como no embasamento. Pela combinação de um procedimento de ajuste robusto com a imposição de um alto grau de suavidade para a interface estimada na vizinhança das fontes interferentes, estimamos uma interface capaz de produzir uma anomalia com conteúdo espectral tanto com altos como com baixos números de onda. A Figura 7a mostra observações (pontos) da anomalia Bouguer contaminada com ruído pseudo-aleatório, que foram produzidas por uma bacia sedimentar (Figura 7b) constituída predominantemente de sedimentos homogêneos (área cinza) contendo uma camada de sal e intrusões de diápiros de sal (áreas brancas). A Figura 7b mostra, em linha vermelha, o embasamento estimado via Silva Dias et al. (2007b).

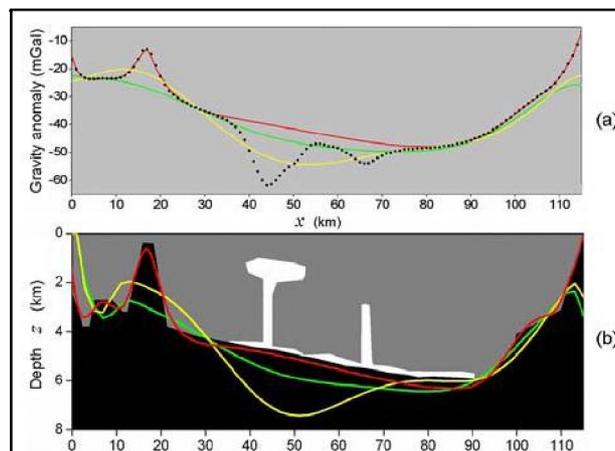
O segundo método foi desenvolvido por Santos et al. (2007) que estimam simultaneamente o relevo do embasamento e a geometria das estruturas salinas a partir de um perfil de dados gravimétricos. O método combina duas técnicas de inversão pré-existentes, que são usadas individualmente para delinear o relevo do embasamento (Barbosa et al., 1997 e 1999) e para delinear o contorno de fontes apresentando formas geométricas complexas como corpos de sal (inversão radial adaptada para múltiplas fontes, Silva & Barbosa, 2004). A Figura 8a mostra a anomalia Bouguer teórica (pontos pretos) produzida por um ambiente sedimentar simulado por bacia sedimentar marginal com relevo descontínuo (interface preta, Figura 8b) e por um corpo de sal (poligonal em linha preta, Figura 8b). O embasamento e o corpo de sal estimados (linhas contínuas vermelhas, Figura 8b) produzem um ajuste aceitável dos dados gravimétricos (linha contínua vermelha, Figura 8a), e recuperam, respectivamente, o relevo descontínuo do embasamento e a geometria do domo salino. A Figura 9a mostra, em pontos pretos, o perfil gravimétrico sobre a Bacia de Campos. Esta anomalia foi corrigida para os efeitos da lâmina d'água e da elevação da Moho em direção ao oceano. A Figura 9b mostra, em linhas contínuas vermelhas, as estimativas do relevo do embasamento e os domos de sal na Bacia de Campos e a Figura 9a mostra, em linha contínua vermelha, o correspondente ajuste da anomalia gravimétrica (Santos et al., 2007).

### Conclusões

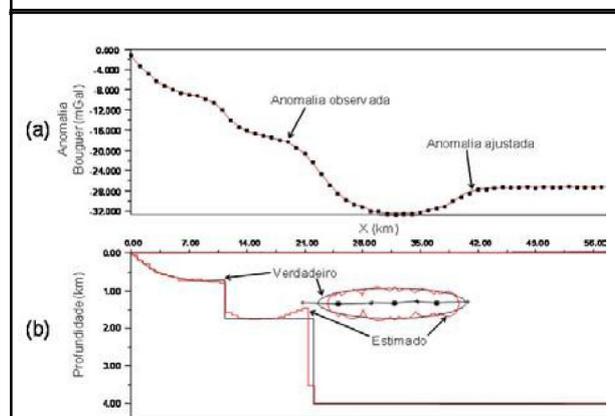
Apresentei uma revisão dos métodos de inversão de dados gravimétricos e magnéticos que desenvolvemos nos últimos 10 anos de trabalho do nosso grupo de pesquisa. Nesta revisão apresentei os principais resultados que obtivemos para a estimativa de corpos geológicos em ambientes sedimentares. Nesta linha de pesquisa, destaco a reconstrução 2D e 3D: 1) do embasamento de bacias sedimentares, 2) de corpos de sal e 3) de corpos ígneos intrusivos. Recentemente, destaco o desenvolvimento de métodos de interpretação de dados gravimétricos produzidos por ambientes

sedimentares complexos consistindo de um embasamento e de corpos geológicos interferentes (e.g., corpos de sal, intrusivas ígneas).

As principais perspectivas, a curto e médio prazos, na área de inversão de dados de campos potenciais são: 1) inversão conjunta das componentes gravimétricas e magnéticas e de seus gradientes; 2) inversão de dados de satélites; 3) inversão conjunta; 4) integração dos resultados de inversão de dados de campos potenciais com interpretações sísmicas; e 5) inversão de dados 4D gravimétricos.



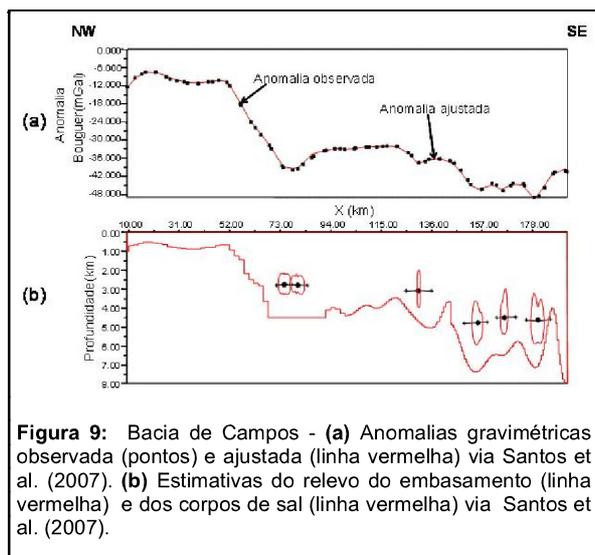
**Figura 7** – Simulação de uma bacia sedimentar tendo domos de sal como fontes interferentes. **(a)** Anomalias Bouguer observada (pontos) e ajustada (linha vermelha) via Silva Dias et al. (2007b). **(b)** O relevo verdadeiro do embasamento é o contato entre as áreas cinza (sedimentos) e preta (embasamento) e os domos de sal são as fontes interferentes (áreas brancas). Embasamento estimado, em linha vermelha, por Silva Dias et al. (2007b). Em (a) e (b) as linhas amarela e verde são soluções estimadas por outros métodos (veja detalhes em Silva Dias et al., 2007b).



**Figura 8** – Simulação de uma bacia sedimentar marginal tendo domos de sal como fontes interferentes. **(a)** Anomalias Bouguer observada (pontos) e ajustada (linha vermelha) via Santos et al. (2007). **(b)** O relevo verdadeiro do embasamento (linha contínua preta) e o corpo de sal (poligonal em linha preta). Estimativa do corpo de sal e do embasamento (linha vermelha) via Santos et al. (2007)

## Agradecimentos

Agradeço o apoio financeiro recebido da FAPERJ via projeto de pesquisa (no. E-26/100.688/2007) e do CNPq via bolsa de pesquisa (no. 301128/2007-3) e via projeto de pesquisa (471913/2007-3). Agradeço principalmente os alunos, ex-alunos e amigos que contribuíram, diretamente, com este trabalho, em especial, Destaco Darcicléa F. Santos, Fernando J.S. Silva Dias, Cristiano M. Martins, Alexandre S. Oliveira, Hugo Matias, Williams A. Lima, Walter E. Medeiros e Paulo de Tarso Menezes. Dedico este trabalho ao meu grande e melhor amigo João Batista C. Silva.



**Figura 9:** Bacia de Campos - (a) Anomalias gravimétricas observada (pontos) e ajustada (linha vermelha) via Santos et al. (2007). (b) Estimativas do relevo do embasamento (linha vermelha) e dos corpos de sal (linha vermelha) via Santos et al. (2007).

## Referências

- Barbosa, V. C. F., Menezes, P. T. L., & Silva, J. B. C., 2007, Gravity data as a tool for detecting faults: In-depth enhancement of subtle Almada's basement faults, Brazil, *Geophysics*, **72**, B59–B68.
- Barbosa, V.C.F., & Silva, J.B.C., 2006, Interactive 2D magnetic inversion: A tool for aiding forward modeling and testing geologic hypotheses: *Geophysics*, **71**, L43–L50.
- Barbosa, V. C. F., Silva, J. B. C., & Medeiros, W. E., 1997, Gravity inversion of basement relief using approximate equality constraints on depths: *Geophysics*, **62**, 1745–1757.
- \_\_\_\_\_, 1999, Gravity inversion of a discontinuous relief stabilized by weighted smoothness constraints on depth: *Geophysics*, **64**, 1429–1438.
- Huestis, S. P., & Parker, R. L., 1977, Bounding the thickness of the oceanic magnetized layer: *J. Geophys. Res.*, **82**, 5293–5303.
- Martins, C. M, Barbosa, V.C.F., Flexor, J.M., & Silva, J. B. C., 2007, Inversão gravimétrica 3D de bacia sedimentar com variação do contraste de densidade com a profundidade segundo uma lei parabólica, 10th international Congress of the Brazilian Geophysical Society, Rio de Janeiro, Brazil.
- Martins, C. M, Barbosa, V.C.F. & Silva, J. B. C., 2008, Estimativa 3D do relevo do embasamento e da variação do contraste de densidade de bacias sedimentares usando dados gravimétricos e de poços. III Simpósio Brasileiro de Geofísica da SBGF, Belém, Brasil (submetido).
- Matias, H. C., Sandnes, F., Barbosa, V. C. F., Menezes, P. T. L., Matias, L. M. & Santos, F. A., 2005, Offshore Algarve Basin, Portugal: morphology of Paleozoic "basement" and influence on Mesozoic sedimentation: Presented at the AAPG 2005 Annual Convention and Exhibition, AAPG.
- Nunes, T.M., Barbosa, V.C.F., & Silva, J. B. C., 2008, Magnetic basement depth inversion in space domain: *Pure and Applied Geophysics* (no prelo).
- Parker, R. L., 1974, Best bounds on density and depth from gravity data: *Geophysics*, **39**, 644–649.
- Santos, D.F., Silva, J.B.C., & Barbosa, V.C.F., 2007, Delineamento simultâneo do relevo do embasamento e de diápiros salinos em pacotes sedimentares com densidade variando com a profundidade através da gravimetria: 10th international Congress of the Brazilian Geophysical Society, Rio de Janeiro, Brazil.
- Silva Dias, F. J. S., Barbosa, V.C.F., & Silva, J. B. C. 2007a, 3D gravity inversion incorporating prior information through an adaptive learning procedure: 77th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 745–749.
- \_\_\_\_\_, 2007b, 2D gravity inversion of a complex interface in the presence of interfering sources. *Geophysics*, **72**, I13–I22.
- \_\_\_\_\_, 2008, Adaptive learning gravity inversion for 3D salt body imaging: 78th Annual International Meeting, SEG, Expanded Abstracts, 746–750.
- Silva, J. B. C., & Barbosa, V.C.F., 2004, Generalized radial inversion of 2D potential field data: *Geophysics*, **69**, 1405–1413.
- \_\_\_\_\_, 2006, Interactive gravity inversion: *Geophysics*, **71**, J1–J9.
- Silva, J. B. C., Costa, D. C. L., & Barbosa, V.C.F., 2006, Gravity inversion of basement relief and estimation of density contrast variation with depth: *Geophysics*, **71**, J51–J58.
- Silva, J. B. C., Oliveira, A.S., & Barbosa, V.C.F., 2007, Inversão gravimétrica do relevo do embasamento usando regularização entrópica: 10th international Congress of the Brazilian Geophysical Society, Rio de Janeiro, Brazil.
- Tikhonov, A. N., & Arsenin V. Y., 1977. *Solutions of ill-posed problems*. V. H. Winston & Sons.