

## Identificação de estruturas de sal a partir do estudo de anomalias gravimétricas residuais na Bacia de Santos

Renata Constantino \* (IAG/USP), Eder Cassola Molina (IAG/USP) e Iata Anderson de Souza (UNESP)

Copyright 2015, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 14<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 3-6, 2015.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 14<sup>th</sup> International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

### Abstract

Seismic has been traditionally the principal method used for the identification of salt structures in the ocean basins. In the Santos Basin, numerous 2D and 3D seismic surveys have been carried out in order to get a better image of the geological section to depths beyond the base of the salt layer. Crustal modelling studies that joint seismic interpretation and gravity data are found in the literature, however, there are few studies that relate gravity anomalies directly to salt structures. This work aims to identify salt structures from residual gravity anomalies, and using to validate the model.

### Introdução

A Bacia de Santos está situada na região sudeste da margem continental brasileira, entre os paralelos 23°00'S e 28°00'S, até a cota batimétrica de 3.000 (figura1). Sua área possui cerca de 350.000 km<sup>2</sup>, ao longo dos litorais dos Estados do Rio de Janeiro, São Paulo, Paraná e Santa Catarina (Moreira et al., 2007). O alto potencial econômico devido à exploração de gás e petróleo na Bacia de Santos tem sido assunto de diversos estudos científicos.

Durante a evolução tectono-sedimentar do Atlântico Sul, uma ampla deposição de sal ocorreu no período do Aptiano. O estudo desse sal tem grande importância devido suas propriedades em selar os reservatórios, orientar a migração de hidrocarbonetos e também facilitar a deformação responsável por muitas armadilhas estruturais e estratigráficas (Demercian et al., 1993).

O sal possui propriedades físicas que o diferem amplamente das outras rochas. Estruturas de sal formadas em Bacias Sedimentares podem ser observadas tanto na superfície da Terra quanto nas regiões de águas profundas dos oceanos e segundo Cainelli & Moriak (1999), podem ser interpretadas através de dados geofísicos.

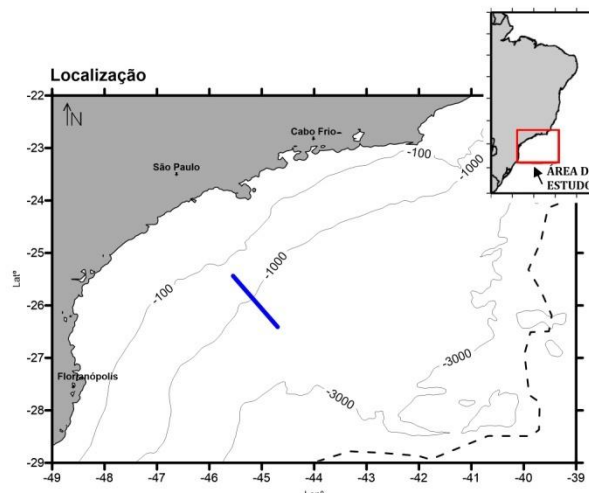


Figura 1: Localização da Bacia de Santos. O limite crustal, segundo Cainelli & Moriak (1999) é representado pela linha tracejada. Estão representadas também as isolinhas batimétricas referentes às profundidades 200, 1000 e 3000 m. A linha em azul representa a posição da linha sísmica utilizada nesse trabalho.

O regime de esforços responsável pela formação de estruturas halocinéticas em bacias de margem passiva, como é o caso da Bacia de Santos, apresenta um esforço principal na direção vertical, resultando em estruturas diversas como domos e muralhas de sal (Mohriak & Szatmari, 2009).

A tectônica de sal, definida por Mohriak & Szatmari (2009) como os mecanismos responsáveis pela deformação da camada mãe de sal e pela formação de diápiros em escala regional, tem sido alvo de diversos estudos ao longo das bacias sul-americanas. Torsvik et al. (2009) estudou um modelo para abertura do Oceano Atlântico Sul incluindo cenários de deformação intraplaca, extensão pré-deriva e espalhamento dos oceanos. O modelo de Torsvik et al. (2009) mostra as bacias de sal aptiana da América do Sul (Brasil) e África em suas posições originais, como parte de uma bacia única.

Moriak et al. (1999) estudaram províncias tectônicas de sal ao longo do limite crustal nas margens brasileira e oeste-africana, revelando quatro principais províncias de sal correspondentes a domínios tectônicos proximal, intermediário, diápiros de sal, crosta oceânica.

Moriak (2001), estudou a tectônica de sal do oceano Atlântico Sul e as evidências geofísicas nas argens brasileira e oeste-africana, mostrando que ao longo das duas margens, o limite crustal é uma feição tectônica de grande importância para exploração de petróleo. Diferente de estudos pretéritos, que sugeriam a presença

de estruturas de sal apenas em crosta continental, Moriak (2001) sugere que tais estruturas possam ser interpretadas tanto em crosta continental quanto em oceânica.

A maioria dos trabalhos que visam estudar estruturas de sal em bacias sedimentares utiliza a sísmica como principal ferramenta. No presente trabalho pretende-se estudar as estruturas de sal na Bacia de Santos a partir de uma metodologia que terá como principal fonte a análise gravimétrica. A metodologia pode ser aplicada futuramente para sugerir possíveis localizações de reservas de sal a partir de dados gravimétricos, facilitando e diminuindo custos de explorações petrolíferas.

## Metodologia

### *Inversão Gravimétrica*

Para estudos que visam modelar gravimetricamente a crosta, é necessário o conhecimento de três principais descontinuidades: Interface crosta manto (Moho), sedimentos e embasamento. Para finalidade deste trabalho, tais interfaces devem ser encontradas com métodos independentes de interpretação sísmica. Para isso, uma metodologia envolvendo inversão gravimétrica foi realizada, seguindo as etapas :

1) Para encontrar a profundidade Moho, o campo gravimétrico deve ser corrigido afim de remover o efeito da cobertura sedimentar. Esse efeito é calculado pelo algoritmo de Parker (1972), que expande a anomalia gravimétrica gerada pela camada de descontinuidade em série até ordem 5. O cálculo pode ser realizado com um contraste de densidade constante para toda a descontinuidade, porém, para considerar a situação mais próxima da real, a compactação sedimentar com a profundidade deve ser considerada. Para isso, será utilizado um modelo de compactação sedimentar descrito por Sclater & Christie (1980), baseado em uma redução exponencial da porosidade com a profundidade. Os valores do modelo foram calibrados com dados de poço disponibilizado pelo BDEP/ANP.

Livre do sinal do efeito da cobertura sedimentar, o campo gravimétrico é invertido com base no método descrito por Braitenberg & Zadro (1999).

2) Nesta etapa, o efeito gravimétrico da Moho encontrada na etapa 2 é calculado aplicando o algoritmo de Parker (1972).

O objetivo deste procedimento é isolar a anomalia de gravidade observada do sinal de gravidade da Moho e dos sedimentos:

$$g_{res} = g_{obs} - g_{CMI} - g_{sed}$$

O campo residual ( $g_{res}$ ) assim obtido pode então ser invertido para o cálculo da topografia do embasamento, que é o objetivo da próxima etapa.

Etapa 3: O último passo consiste da inversão do campo  $g_{res}$ , a partir do Modelo Inverso Iterativo com Vínculos descrito em Braitenberg & Zadro (1999). O procedimento resulta na topografia do embasamento.

### *Modelagem Direta*

Encontradas as interfaces Moho e embasamento, um modelo geológico é elaborado. Para isso, informações sobre a profundidade da camada sedimentar são necessárias. O modelo de espessura foi retirado do "Total Sediment Thickness of the World's Oceans and Marginal Seas, World Data Center for Marine Geology and Geophysics, Boulder". A base de dados digitais de espessura sedimentar foi compilada pela "National Geophysical Data Center" (NGDC) da NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration), (Divins, 2003).

Na etapa de modelagem direta, modelos de densidade 2D são elaborados a fim de calcularmos e compararmos as anomalias gravimétricas observada e calculada.

Os resultados foram validados com base na interpretação de linhas sísmicas e por isso os perfis foram tomados na posição de algumas linhas selecionadas.

Com a posição do perfil selecionada e as três interfaces necessárias, foi calculado o modelo gravimétrico com base em Talwani et al. (1959). Valores de densidades foram inseridos para cada bloco: sedimento superior, sedimento inferior, crosta e manto e a anomalia gravimétrica gerada por esse modelo foi então calculada. A anomalia residual gerada, ou seja, a diferença entre a observada e a calculada referente ao modelo, foi então comparada à anomalia gerada pela camada de sal.

## Resultados

A Moho obtida por inversão gravimétrica é mostrada na figura 2. A inversão do campo gravimétrico livre do efeito da cobertura sedimentar foi realizada para diferentes valores de contraste de densidade e profundidade de referência, variando-se estes parâmetros entre os valores de 300-700 kg/m<sup>3</sup> e 20-35 km, respectivamente.

A partir desses resultados, calculou-se o erro RMS entre os dados obtidos e vínculos sísmicos publicados em Zalán et al. (2011). O melhor resultado, no sentido de se considerar o menor RMS entre os valores obtidos e os vínculos sísmicos, foi obtido para a profundidade de 31 km e um contraste de densidade de 500 kg/m<sup>3</sup>. O erro RMS foi de aproximadamente 0,9 km.

O efeito gravimétrico provocado pela Moho foi calculado segundo Parker (1972). O campo residual referente ao embasamento é então invertido, resultando na topografia do embasamento. A profundidade do embasamento é mostrada na figura 3. A área hachurada representa uma região onde os dados não são confiáveis.

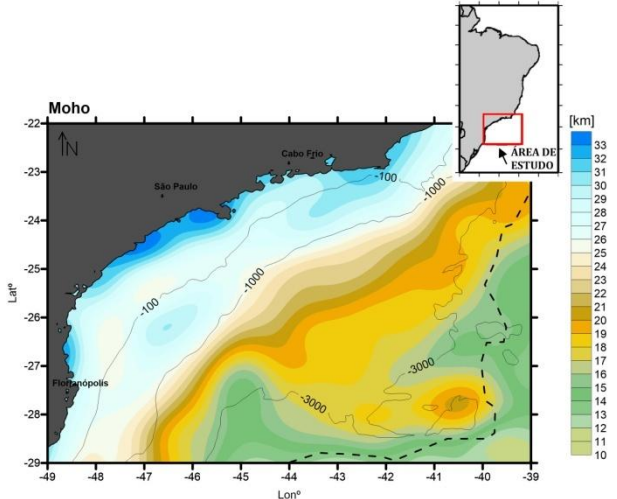


Figura 2: Profundidade da Moho obtida por inversão gravimétrica.

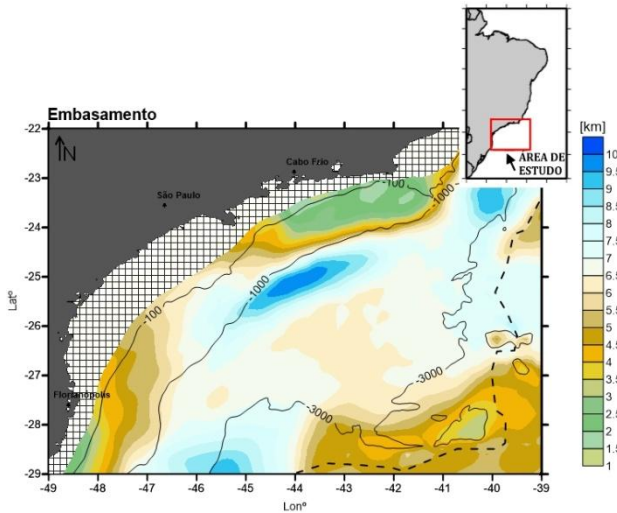


Figura 3: Profundidade do embasamento obtido por inversão gravimétrica.

Na figura 1, a linha em azul representa a posição da primeira linha sísmica utilizada como base para a modelagem. Na posição dessa linha foi feita modelagem direta. O primeiro passo foi construir um modelo de densidades com base nos horizontes encontrados por gravimetria juntamente com os dados sedimentos provenientes da NGDC (Divins, 2003). O segundo passo consistiu em adicionar informações geológicas com base na interpretação da linha sísmica.

A figura 4, quadro inferior, mostra um modelo de densidades com 4 blocos: manto, crosta, sedimento inferior e sedimento superior. O quadro superior mostra a anomalia gravimétrica observada (linha grossa preta) e a anomalia calculada, referente ao modelo criado (linha fina preta). A linha em vermelho representa a diferença entre as duas grandezas. O erro RMS entre as duas anomalias foi de 9.4 mGal.

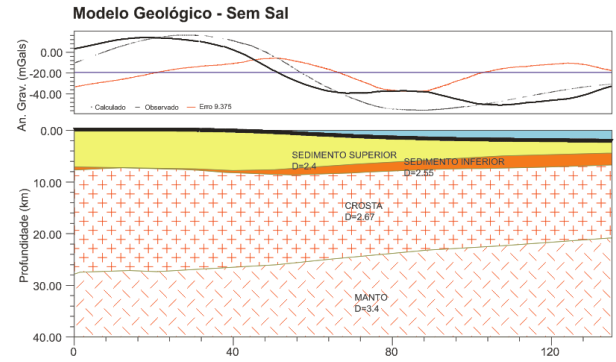


Figura 4: Modelo geológico sem a camada de sal.

Na figura 5, temos outro modelo de densidades. Os mesmos horizontes utilizados no modelo da figura 4 foram usados, porém, nesse modelo feito com base em interpretação sísmica, uma camada de sal (em rosa) e carbonato (azul escuro) foi adicionada. Podemos ver como as anomalias calculada e observada ajustam bem e o erro é reduzido (linha vermelha).

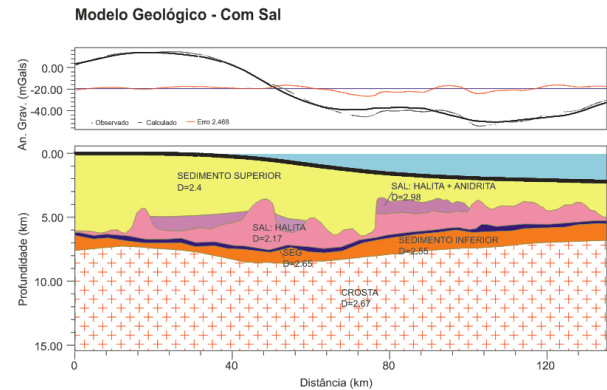


Figura 5: Modelo geológico sem a camada de sal.

Este foi o ataque ao problema utilizado neste trabalho: calculada a anomalia residual do modelo sem considerar o sal, ou seja, a anomalia observada menos a calculada, encontramos a anomalia associada às camadas que não estão no modelo, que podem ser atribuídas ao sal e ao carbonato, e modeladas.

Para verificar se a anomalia residual assim obtida condiz com a gerada pela camada de sal, calculamos, segundo Talwani et al. (1959), a anomalia gerada por este corpo. O resultado é mostrado na figura 6. É possível ver uma forte semelhança entre as anomalias calculada (anomalia gravimétrica residual) e esperada (anomalia gravimétrica da camada de sal). A diferença entre elas pode estar associada a erros de interpretação ou anomalias profundas que não aparecem na sísmica e foram desconsideradas do modelo.

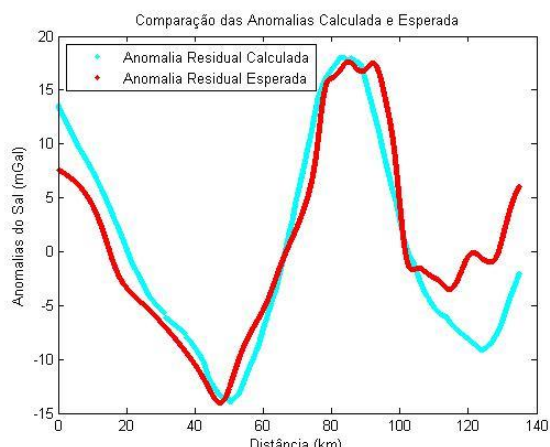


Figura 7: Comparação entre as anomalias calculada (residual) e esperada (anomalia da camada de sal).

## Conclusões

Para avaliar a possibilidade de modelar estruturas de sal na bacia de Santos a partir de dados gravimétricos, um perfil da bacia de Santos foi modelado seguindo-se o procedimento descrito em Braitenberg et al. (2006) e Constantino & Molina (2012).

Os valores encontrados foram usados para a elaboração de um modelo de densidades. O modelo foi feito primeiramente com informações derivadas de interpretações gravimétricas e do modelo de espessura sedimentar da NGDC, disponível publicamente. O modelo gerou um erro elevado e como já era esperado, não ajustou corretamente os dados observados. Posteriormente, um modelo foi criado com informações obtidas pela interpretação da linha sísmica selecionada (Figura 1). Este modelo apresentou um ajuste muito melhor da anomalia gravimétrica observada.

Levando em consideração que a diferença entre os dois modelos foi apenas a camada de sal e o carbonato, pode-se presumir que a anomalia residual do modelo inicial estaria associada ao pacote de sal. Para validar este modelo, calculamos, segundo Talwani et al. (1959), a anomalia gerada por esse corpo. As anomalias do pacote de sal (esperada) e a residual (calculada), foram comparadas e mostraram grande semelhança (figura 6).

A partir dos resultados mostrados nesse trabalho, podemos mostrar que estruturas de sal podem ser identificadas com um método que envolve dados gravimétricos. Tal método é independente de linhas sísmicas, as quais foram utilizadas neste trabalho apenas para validação do modelo. Para chegar em um ajuste com melhores resultados, é sugerido um estudo a nível litosférico, considerando possíveis anomalias de densidade presentes no manto superior podem ser verificadas e modeladas, a fim de ressaltar de forma mais exata o pacote de sal.

## Agradecimentos

Ao Cnpq pelo financiamento da pesquisa. Aos pesquisadores Gabriela Castillo e Sergio Antonio Caceres Contreas pelo auxílio nas interpretações geológicas.

## Referências

- Braitenberg, C. e M. Zadro, (1999). Iterative 3D gravity inversion with integration of seismologic data, *Bollettino Di Geofisica Teorica ed Applicata*, v.40, n.3-4, p. 469-475.
- Braitenberg, C., S. Wienecke, e Y. Wang, (2006). Basement structures from satellite-derived gravity field: South China Sea ridge, *J. Geophys. Res.*, 111, B05407, doi:10.1029/2005JB003938.
- Cainelli, C. e Mohriak, W.U., (1999). Some remarks on the evolution of sedimentary basins along the Eastern Brazilian continental margin. *Episodes*, v. 22, n. 3, p. 206 – 216
- Constantino, R., E.C. Molina (2014). Basement Structure of the Santos Basin from Gravity Data, Gravity, Geoid and Height Systems, *International Association of Geodesy Symposia 141*, DOI 10.1007/978-3-319-10837-7\_1, v.141, p. 319-328.
- Demercian, S., P. Szatmari, and P. R. Cobbold, P. R. (1993). Style and pattern of salt diapirs due to thin-skinned gravitational gliding, Campos and Santos basins, offshore Brazil, *Tectonophysics*, v. 228, p. 393–433.
- Divins, D.L., 2003, Total Sediment Thickness of the World's Oceans & Marginal Seas, NOAA National Geophysical Data Center, Boulder, CO.
- Mohriak, W.U., 2001, Salt tectonics, volcanic centers, fracture zones and their relationship with the origin and evolution of the South Atlantic Ocean, VII Cong. Int. Soc. Bras. Geof., Salvador, BA, CD-Rom, SBGF.
- Moreira, J.L.P., C.V. Madeira, J.A. Gil, Machado, M.A.P Machado, (2007). Bacia de Santos, *Boletim de Geociências da Petrobrás*, v. 15, n.2, 531-549.
- Mohriak, W.U., e P. Szatmari (2009). Tectônica de Sal. In: *Sal: geologia e Tectônica. Exemplos nas bacias brasileiras*. Ed. Mohriak, W.U., Szatmari, P. e Couto, S. M. p. 92-165.
- Mohriak, W.U., Jackson, M.P.A., & Cramez, C., (1999). Salt tectonics provinces across the continental-oceanic boundary in the Brazilian and West African margins, 6th International Congress of the Brazilian Geophysical Society, CD with Abstracts, SBGF 191.
- Parker, R. L. (1972). The rapid calculation of potential anomalies. *Geophys. J. R. Astr. Soc.*, 31, 447-455.
- Sclater, J. G. e P. A. F. Christie (1980), Continental stretching: An explanation of the post mid-Cretaceous subsidence of the central North Sea basin, *J. Geophys. Res.*, 85, 3711 –3739.
- Talwani, M., J. M. Worzel; M. Landisman (1959). Rapid gravity computations for twodimensional bodies with

application to the Mendocino Submarine Fracture Zone.  
Journal of Geophysical Research, v.64. n.1, p. 49-59.

Torsvik, T.H., Rouse, S., Labails, C. & Smethurst, M.A.  
(2009), South Atlantic reconstructions and the Aptian Salt  
Enigma. Geophysical J. International 177,1315-1333.

Zalán, P.V., M.C.G. Severino, C.A. Rigoti, L.P.  
Magnaviva, J.A.B. Oliveira e A.R. Vianna, (2011), An  
Entirely New 3D-View of the Crustal and Mantle Structure  
of a South Atlantic Passive Margin – Santos, Campos  
and Espírito Santo Basins, Brazil, Search and Discovery  
Article #30177