



ISSN: 2447-3359

REVISTA DE GEOCIÊNCIAS DO NORDESTE

Northeast Geosciences Journal

v. 10, nº 1 (2024)

<https://doi.org/10.21680/2447-3359.2024v10n1ID34802>



Inversão gravimétrica aplicada ao estudo do relevo do embasamento do sistema Rift Recôncavo-Tucano-Jatobá no Nordeste do Brasil

Gravimetric inversion applied to the study of the basement relief of the Recôncavo-Tucano-Jatobá Rift System in Northeast Brazil

Diego Menezes Novais¹; Joelson da Conceição Batista²; Milton José Porsani³

¹ Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências/Departamento de Geofísica, Salvador/BA, Brasil. Email: diego.m.novais@gmail.com

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-0558-1687>

² Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências/Departamento de Geofísica, Salvador/BA, Brasil. Email: jdbatista@ufba.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9256-6586>

³ Universidade Federal da Bahia, Instituto de Geociências/Departamento de Geofísica, Salvador/BA, Brasil. Email: porsani@ufba.br

ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4668-8579>

Resumo: Este artigo apresenta resultados da implementação de um algoritmo de modelagem inversa que considera o sinal da anomalia Bouguer, para estimativa e melhor entendimento do limite entre o pacote sedimentar e o embasamento das sub-bacias do sistema rifte Recôncavo-Tucano-Jatobá. O algoritmo para a modelagem do relevo do embasamento, considerou um meio constituído por um conjunto de prismas bidimensionais discretos, com fixos contrastes de densidades entre sedimento e embasamento, e profundidades variáveis. Este, foi aplicado inicialmente a modelos sintéticos, resultando em curvas de variações da profundidade do topo do embasamento concordantes com o modelo verdadeiro. Em seguida, esta metodologia foi aplicada a dados gravimétricos de satélite obtidos a partir do modelo de campo gravitacional terrestre de alta resolução denominado SGG-UGM-2. Os resultados desta aplicação, foi comparado com a profundidade da interface Moho estimada abaixo das unidades estudadas e obtida através do uso da metodologia de Parker-Oldenburg. As informações aqui produzidas permitiram a interpretação da anomalia gravimétrica sobre o espaço deposicional das bacias estudadas e a geometria do seu embasamento. Juntamente com o conhecimento de sua estratigrafia, esta interpretação poderá ser analisada para caracterização dos reservatórios da região. Ao interpretar o relevo do embasamento em conjunto com a topografia Moho, este estudo retrata a evolução geotectônica do aulacógeno e sua associação com a estimativa dos depocentros das sub-bacias Recôncavo, Tucano e Jatobá.

Palavras-chave: Sistema Rift; Inversão de Gravidade; Modelo SGG-UGM-2.

Abstract: This article presents results from the implementation of an inverse modeling algorithm that considers the Bouguer anomaly signal to estimate and gain a better understanding of the boundary between the sedimentary package and the basement of the sub-basins within the Recôncavo-Tucano-Jatobá rift system. The algorithm for modeling the basement relief is considered a medium constituted by a set of discrete two-dimensional prisms with fixed density contrasts between sediment and basement and variable depth. Initially, it was applied to synthetic models, resulting in depth variation curves of the basement top that fit well with the true model. Subsequently, this methodology was applied to satellite gravity data obtained from the high-resolution Earth gravity field model called SGG-UGM-2. The results of this application were compared with the depth of the Moho interface estimated beneath the studied units and obtained through the Parker-Oldenburg methodology. The information produced here allowed the interpretation of the gravity anomaly over the depositional space of the studied basins and the geometry of their basement. Together with the knowledge of their stratigraphy, this interpretation may be analyzed to characterize the region's reservoirs. By interpreting the basement relief in conjunction with the Moho topography, this study portrays the geotectonic evolution of the aulacogen and its association with estimating the depocenters of the Recôncavo, Tucano, and Jatobá sub-basins.

Keywords: Rift System; Gravity Inversion; SGG-UGM-2 Model.

Recebido: 11/12/2023; Aceito: 07/02/2024; Publicado: 25/02/2024.

1. Introdução

Bacias sedimentares do tipo rifte se originam de processos tectônicos conhecidos como rifteamento (SZATMARI et al., 1985; MILLANI et al., 1988). Esse fenômeno ocorre quando a crosta continental passa por estiramento e separação, resultando na criação de aberturas na superfície da Terra chamadas de riftes. Tipicamente, o rifteamento é acompanhado por atividade vulcânica e terremotos. Conforme a crosta se estica, ela desce, formando uma depressão central alongada. Sedimentos gradualmente se acumulam nessa depressão ao longo do tempo, dando origem a extensas camadas de rochas sedimentares. Nas bacias do tipo rifte, uma característica comum é a presença de lagos ou mares interiores e sua atividade tectônica pode fazer com que blocos rochosos adjacentes afundem, criando depressões que podem ser inundadas por água do mar ou água doce de rios. Esses corpos d'água criam condições favoráveis para a deposição de sedimentos, levando ao desenvolvimento de seqüências sedimentares distintas nas bacias em rifte.

O Vale do Rift na África Oriental é um exemplo conhecido de uma bacia do tipo rifte que se estende por vários países, incluindo Quênia, Tanzânia e Etiópia. Essa região é distinguida por falhas e abriga numerosos lagos, incluindo o Lago Vitória e o Lago Tanganyika (TIERCELIN, 1990). Do ponto de vista geológico, as bacias do tipo rifte são importantes devido ao seu potencial para recursos naturais valiosos, como petróleo, gás natural e águas subterrâneas. Além disso, essas bacias oferecem insights valiosos sobre a evolução tectônica e geológica de uma região. No Brasil, exemplos de bacias geradas a partir de rifteamento são as bacias do Recôncavo, Tucano e Jatobá, localizadas no noroeste do estado da Bahia. Essas bacias pertencem ao sistema de rifteamento Recôncavo-Tucano-Jatobá, que se originou durante o período Jurássico, quando o supercontinente Gondwana se separou (MAGNAVITA, 1992; MAGNAVITA et al., 2005). Consideradas sub-bacias dentro desse sistema, elas possuem uma história geológica complexa marcada por várias fases de rifteamento e subsidência, resultando em características geológicas distintas para cada sub-bacia. É importante destacar que desde a década de 1940, essas sub-bacias têm sido alvo de atividades exploratórias, estabelecendo-se como contribuintes cruciais para a produção onshore de petróleo e gás natural no Brasil. Essas regiões desempenharam um papel fundamental na indústria petrolífera brasileira, e sua exploração se estende à produção de águas subterrâneas, apresentando um potencial significativo para o desenvolvimento de energias renováveis, incluindo a energia geotérmica.

Esta pesquisa apresenta um algoritmo de modelagem gravitacional inversa não linear especificamente projetado para estimar a profundidade do embasamento de bacias sedimentares do tipo rifte. Esse algoritmo utiliza o método Gauss-Newton aliado à regularização por suavização para aprimorar a estabilidade do processo de inversão. Testes com dados sintéticos foram conduzidos para avaliar a confiabilidade das estimativas de inversão em relação ao parâmetro de profundidade do embasamento modelado. Dois modelos sintéticos foram analisados, introduzindo ruído nos dados gravimétricos sintéticos e aplicando diferentes técnicas de regularização para verificar a eficácia deste algoritmo de inversão. Além disso, o algoritmo desenvolvido foi aplicado a dados gravimétricos coletados por satélite, processados e utilizados para delinear as características estruturais dos depocentros das sub-bacias do Recôncavo, Tucano Central e Jatobá. Estes dados foram discutidos em conjunto com estimativas da profundidade da descontinuidade de Moho, que foi estimada a partir do uso do método de Parker-Oldeburg (PARKER, 1973; OLDENBURG, 1974), por meio do algoritmo de Gómez-Ortiz e Argawal (2005) e aplicado aos dados gravimétricos da anomalia de Bouguer.

2. Contexto Geológico

O sistema de rifts da Bacia do Recôncavo-Tucano-Jatobá (Figura 1) representa uma série complexa de bacias de rift interligadas localizadas próximas à costa da Região Nordeste do Brasil, estendendo-se desde o Estado da Bahia até o Estado de Pernambuco (Gordon et al., 2017). Esse sistema é composto pelas Bacias do Recôncavo, Tucano e Jatobá, formadas durante a separação do supercontinente Gondwana no período Jurássico, e está relacionado a um rift abortado da separação continental entre a América do Sul e a África durante o Mesozoico, que posteriormente gerou o Oceano Atlântico Sul. O estiramento e subsequente separação da crosta continental levaram à formação de vales e bacias de rift na região, caracterizadas por uma combinação de falhas, subsidência e sedimentação. O sistema é limitado ao sul pela Bacia de Camamu, a oeste pelo Bloco Itabuna-Salvador-Curaçá, Bloco de Serrinha, Cinturão Sergipano e pelo Maciço Pernambuco-Alagoas, limitado a leste pelo Cinturão Salvador-Esplanada, Cinturão Sergipano e Maciço Pernambuco-Alagoas, e ao norte pela Zona de Cisalhamento de Pernambuco (SILVA, 2017).

A Bacia do Recôncavo é o componente mais extenso e conhecido desse sistema de bacias de rift, ocupando uma área de aproximadamente 11.500 km², e está localizada próxima à costa nordeste da Bahia, sendo um dos principais produtores de petróleo e gás natural no Brasil desde a década de 1940. Esta bacia é conhecida por seu extenso preenchimento sedimentar, com uma espessura máxima de cerca de 6.900 m, na região de Camaçari inferior, composta por arenito,

folhelhos e calcário depositados ao longo de milhões de anos. Além disso, baseado em SANTOS et al., (1990), a espessura sedimentar no Recôncavo é superior a 6.000 m de largura e está bacía é considerada um rift intracontinental abortado com arquitetura que reflete uma orientação semi-graben NE-SW. A Bacía de Tucano está localizada ao norte da Bacía do Recôncavo e é uma bacía relativamente menor, com uma área aproximada de 30.500 km², e onde seu depósito sedimentar é composto por arenitos, folhelhos e conglomerados, formados durante as fases de rift e preenchimento subsequentes. Características estruturais com direção NW-SE permitem subdividi-la em sub-bacias de Tucano Sul, Central e Norte. Ao norte, a Sub-bacia Central do Tucano se separa do Tucano Norte pela Zona de Vaza-Barris; ao sul, o limite entre a Sub-bacia Sul do Tucano e a Bacía do Recôncavo é dado pelo Alto de Aporá; a leste, as falhas de Inhambupe e Adustina constituem, respectivamente, os limites entre as Sub-bacias Sul e Central do Tucano (MAGNAVITA, 1992). O limite da Sub-bacia Norte do Tucano com a Bacía do Jatobá é dado pela Falha de São Francisco a nordeste. Em seu depocentro, as profundidades estimadas do embasamento são superiores a 6.000 m para a Sub-bacia Sul do Tucano e aproximadamente 8.000 m para a Sub-bacia Central do Tucano (Cícero Dantas Inferior). Para a Sub-bacia Norte do Tucano, no Baixo Salgado do Melão, as profundidades estimadas estão em torno de 6.000 m (MAGNAVITA, 1992). A Bacía do Jatobá é o componente mais ocidental do sistema de rift, com uma área aproximada de 5.000 km², localizada próxima à fronteira com o estado de Pernambuco e com uma orientação NE-SW. As falhas de São Francisco a oeste e Ibimirim ao norte constituem seus principais limites estruturais. As rochas sedimentares da Bacía do Jatobá incluem arenitos, folhelhos e conglomerados, semelhantes às outras bacias do sistema. Seu contato é discordante ou ocorre por meio de pequenas falhas ao sul e ao norte. A mudança na direção da abertura do rift de S-N no Tucano Norte para SW-NE na Bacía do Jatobá pode ser o exemplo mais explícito do controle exercido por estruturas do embasamento no passado. Essa inflexão é condicionada pela Zona de Cisalhamento Pernambuco-Paraíba, cuja reativação durante o Cretáceo Inferior deu origem à Falha de Ibimirim, o limite norte da Bacía do Jatobá (SANTOS et al. 1990; MAGNAVITA, 1992). A profundidade estimada do embasamento em Baixo de Ibimirim é de cerca de 4.000 m (MAGNAVITA, 1992).

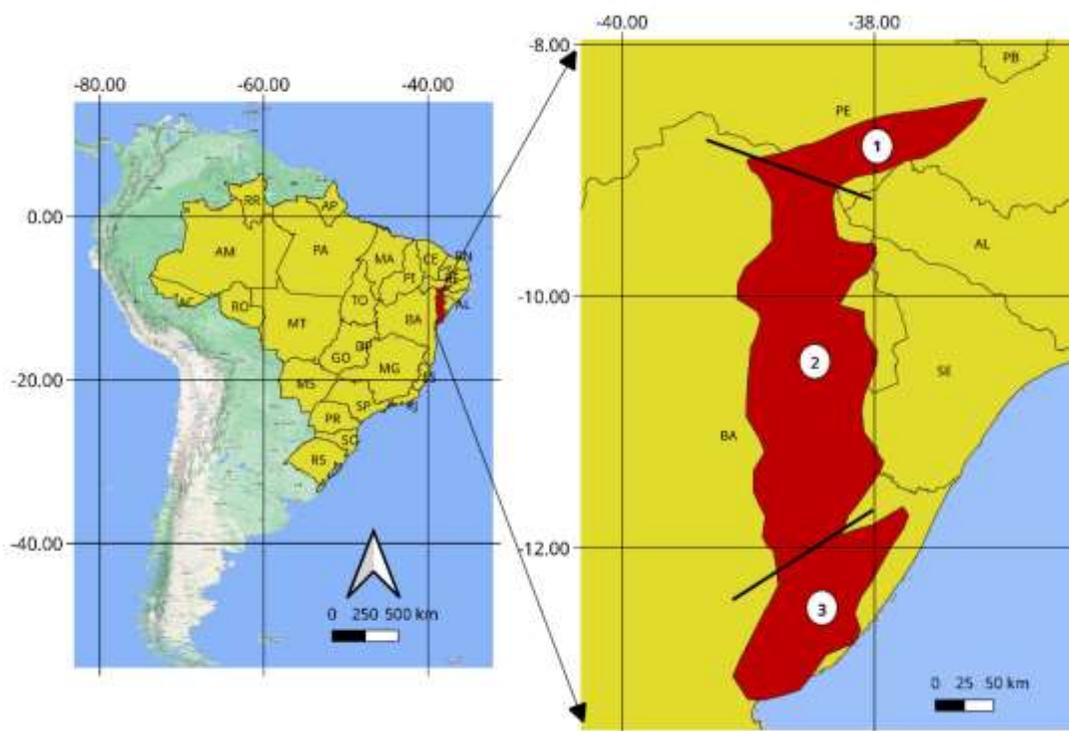


Figura 1 – Localização da área de estudo: (1) Bacía do Jatobá, (2) Bacía do Tucano e (3) Bacía do Recôncavo.
Fonte: Os autores (2023)

3. Processo de Inversão

Nesta pesquisa, uma bacia sedimentar composta por sedimentos e embasamento foi representada por um conjunto de prismas bidimensionais, cada um apresentando um certo contraste de densidade entre a camada sedimentar e o embasamento (Figura 2). Cada prisma possui comprimento variável, representando as diferentes profundidades do topo do embasamento.

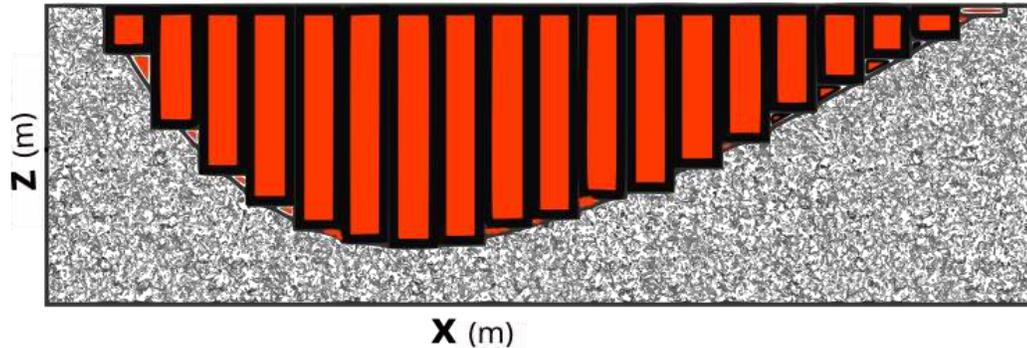


Figura 2 – Ilustração do modelo de prisma usado para modelar uma bacia sedimentar. Prismas têm um contraste de densidade fixo entre o sedimento e o embasamento, com profundidade variável.

Fonte: Adaptado de Uieda (2020)

Seja um vetor com N conjuntos de dados de anomalias gravitacionais produzidas por uma bacia sedimentar. A bacia é composta por um contraste de densidade entre o sedimento e o embasamento ($\Delta\rho$), definido como uma variação na profundidade do embasamento. É possível aproximar o modelo de interpretação através de um conjunto M de prismas justapostos com dimensão 2D. Os prismas são posicionados de forma que seus tipos estejam alinhados com a superfície terrestre e todos os prismas têm a mesma largura (Figura 2).

Considerando os contrastes de densidade definidos e a variação de profundidade dos prismas, a anomalia gravitacional prevista para mapear o embasamento é uma função não linear dos parâmetros z_j , $j = 1, \dots, M$. Seja g_i o conjunto de observações das N Anomalias de Bouguer produzidas pelo relevo do embasamento e o contraste de densidade $\Delta\rho$ entre o sedimento e o embasamento da bacia sedimentar. Assume-se também que possíveis efeitos regionais foram removidos o que gerou a anomalia Bouguer residual, ou simplesmente a anomalia de Bouguer. A espessura dos prismas entre os estratos sedimentares e o embasamento são os parâmetros a serem estimados e estão relacionados com a gravidade g_i através das seguintes relações não lineares:

$$g_i = \sum_{j=1}^M F(p_j, r_i), \quad (1)$$

$$p = [z]^T, \quad (2)$$

onde $F(p_i, r_i)$ é uma função não linear que produz anomalia gravimétrica de um prisma na posição r_i , espessura z_i e contraste de densidade $\Delta\rho$ entre o sedimento e o embasamento (SILVA, OLIVEIRA e BARBOSA, 2010). Utilizamos o método de Gauss-Newton regularizado para o problema inverso não linear com uma estimativa de z_i . Seja $g^o = \{g^o_1, g^o_2, \dots, g^o_M\}^T$ o vetor dos dados gravitacionais observados e g , cujo elemento i -ésimo é a componente vertical da gravidade prevista pela Equação 1. Para estimar os parâmetros a serem invertidos, produzindo dados previstos o mais próximos possível dos dados observados e a função objetivo a ser minimizada é dada por,

$$\tau(p) = \Phi(p) + \mu\Psi(p), \quad (3)$$

onde, μ é o peso atribuído à função de regularização $\Psi(p)$ e $\Phi(p)$ é a função de desajuste dada por

$$\Phi(p) = \frac{1}{N} \|g^0 - g\|_2^2, \quad (4)$$

onde $\|g^0 - g\|_2^2$ representa a norma euclidiana ao quadrado entre os dados observados e calculados.

Um tipo de restrição é implementado para que o problema inverso esteja bem colocado e tenha solução estável. As restrições são introduzidas por meio da regularização de suavidade (também conhecida como Tikhonov de primeira ordem). A regularização de suavidade é introduzida para a profundidade z_j (Ψ), conforme implementado em muitos trabalhos (BARBOSA et al., 1997; BARBOSA et al., 1999; SILVA, OLIVEIRA e BARBOSA, 2010 e BASTOS & OLIVEIRA, 2019). Matematicamente, as regularizações de suavidade para z_j e igualdade com informação a priori para z_j , são dadas por,

$$\Psi(z) = \|S z\|, \quad (5)$$

onde S é uma matriz $2(N - 1) \times M$ dada por,

$$S = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \end{bmatrix}_{2(N-1) \times M}, \quad (6)$$

$$[R]_{ij}, \begin{cases} 1, & j = i \\ -1, & j = i + 1, \\ 0, & \text{de outra forma.} \end{cases} \quad (7)$$

Minimizar o funcional $\tau(p)$, dado na Equação 3, referente à p é um problema não linear que pode ser resolvido iterativamente. O procedimento padrão para realizar esta busca iterativamente começa com uma aproximação inicial particular p_0 e cálculo de uma correção para Δp . Esta correção é então aplicada à aproximação inicial dando origem a um novo vetor p_1 . Este novo vetor é uma aproximação inicial para calcular um segundo vetor p_2 , e assim por diante. O processo termina quando é encontrado um vetor \tilde{p} que minimiza a função em questão. O método Gauss-Newton calcula a correção Δp começando pela expansão em série de Taylor até a segunda ordem da função a ser minimizada. Portanto, o cálculo da correção é realizado resolvendo o sistema de equações,

$$H \Delta p = G, \quad (8)$$

$$H = J^T J + \mu \Psi(z), \quad (9)$$

$$G = J^T [g^0 - g] - \mu \Psi, \quad (10)$$

onde J é a matriz jacobiana de g_i (Equação 1). A solução do sistema de equações descrito na Equação 8 é obtida através do método de Decomposição de Valores Singulares (SVD). O método consiste em decompor a matriz H , de tal forma que,

$$H = U \Sigma V, \quad (11)$$

onde U é uma matriz unitária ($U^* U = U U^* = I$), onde U^* é a transposta conjugada e I a matriz identidade. A matriz Σ is é composta por diagonais com valores singulares de H (SHLENS, 2003).

O processo de inversão adotado visa encontrar o parâmetro ideal de profundidade do substrato para uma bacia sedimentar. Para complementar os estudos geofísicos-geológicos da região, um método de inversão também é implementado para encontrar a profundidade da interface entre a Litosfera e a Astenosfera (Moho). O método de inversão de dados gravimétricos para estimar a profundidade do Moho é baseado no algoritmo de Parker-Oldenburg (OLDENBURG, 1974). O programa descreve a anomalia de densidade dos dados gravimétricos da interface a partir do método iterativo de Parker-Oldenburg. Essa metodologia se baseia na relação entre a Transformada de Fourier dos dados gravimétricos anômalos e a soma da Transformada de Fourier da topografia da interface de densidade. O algoritmo é descrito com mais detalhes em GÓMEZ-ORTIZ et al. (2005). Van der Meijde et al. (2013) aplicaram a metodologia de inversão de Parker-Oldenburg na América do Sul e a compararam com outros modelos propostos. A comparação dos modelos mostrou que a inversão gravimétrica apresenta uma boa correlação com as observações pontuais.

4. Resultados e Discussões

Para avaliar a metodologia implementada em alinhamento com os objetivos estabelecido para esta pesquisa, examinamos inicialmente os resultados derivados da inversão de dados gravimétricos sintéticos, estendendo posteriormente para testes em dados reais.

4.1. Dados Sintéticos

Nos testes sintéticos, geramos dois conjuntos de anomalias Bouguer teóricas utilizando dois modelos diferentes de bacias sedimentares. Estas bacias simulam grabens 2D constituídos por sistemas de falhas, onde o contraste de densidade entre o sedimento e embasamento é representado por $\Delta\rho$. Adicionamos ruído pseudo-aleatório gaussiano a esses dados com média zero e desvio padrão de 0,3 mGal. Estes modelos sintéticos foram construídos com um contraste de densidade $\Delta\rho = -300 \text{ kg/m}^3$.

A Figura 3 mostra a comparação entre os dados observados e calculados, o relevo real e estimado do embasamento e a espessura do pacote sedimentar para o modelo de bacia sintética 1. A Figura 3a ilustra a comparação entre a anomalia Bouguer teórica (pontos) e estimada (linha vermelha), apresentado o resultado do processo de inversão. Esse ajuste resultou em um valor RMS de aproximadamente 0,30. Na Figura 3b, são apresentados o relevo real (linha verde) e estimado (linha azul) do embasamento para o modelo 1. O relevo estimado (Figura 3b), obtido a partir de $\Delta\rho = -300 \text{ kg/cm}^3$, se assemelha muito ao relevo real, validando a eficácia do método neste contexto.

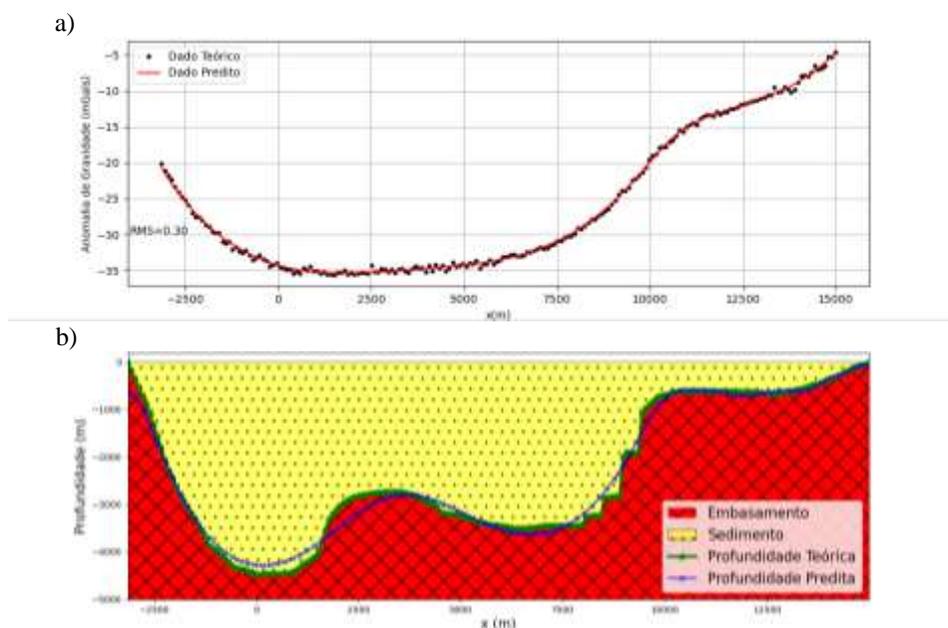


Figura 3 – Resultados sintéticos para o Modelo 1: (a) Anomalia Bouguer teórica e estimada e (b) Relevo real e estimado.

Fonte: Os autores (2023)

Na Figura 4, a comparação entre os dados gravimétricos observados e computados para o modelo sintético 2 é representada juntamente com a variação do relevo do embasamento (variação da profundidade da base da bacia - espessura do pacote sedimentar) para este modelo. A Figura 4a ilustra a comparação entre os dados reais e estimados, resultantes do processo de inversão, produzindo um valor RMS de aproximadamente 0,29. Esta estimativa resultou no relevo estimado (representado pela linha azul) que é comparado com o relevo real (representado pela linha verde), conforme mostrado na Figura 4b. O relevo estimado (Figura 4b), calculado através de $\Delta\rho = -300 \text{ kg/cm}^3$, assemelhou-se muito ao relevo real, validando assim a eficácia do método neste contexto.

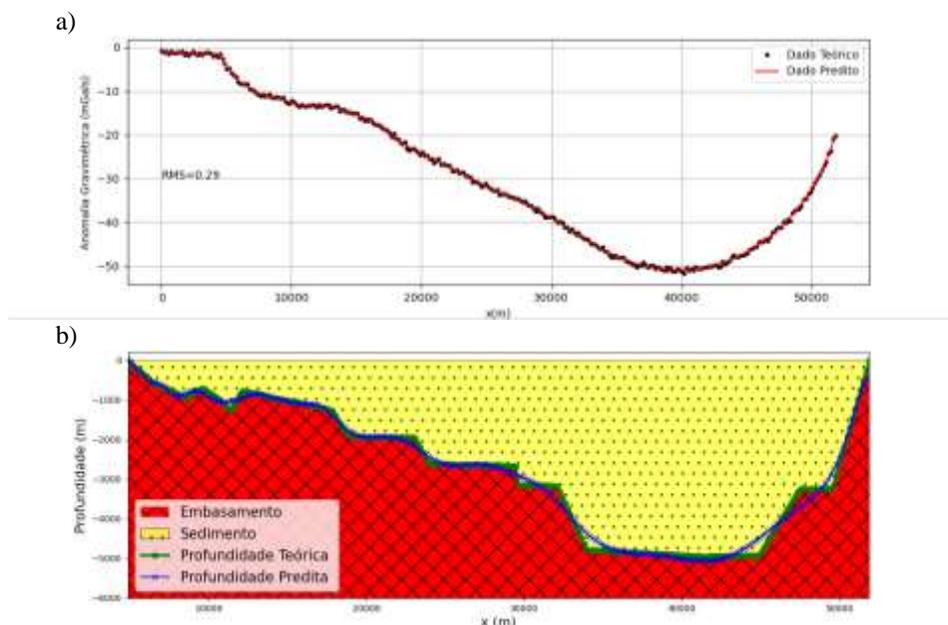


Figura 4 – Resultados sintéticos para o Modelo 2: (a) Anomalia Bouguer teórica e estimada e (b) Relevo real e estimado.

Fonte: Os autores (2023)

Os resultados apresentados para os dados sintéticos reafirmam e validam a técnica de inversão de Gauss-Newton através da modelagem de prismas implementada. Avaliando a métrica do erro quadrático médio (RMS) entre os dados observados e calculados foi possível legitimar a metodologia e avançar para uma análise aplicada a dados reais.

4.2. Dados Reais

Para aplicações reais, empregamos dados gravimétricos de satélite obtidos a partir do modelo de campo gravitacional terrestre de alta resolução denominado SGG-UGM-2. Além disso, foram utilizados dados de gravidade derivados do Modelo Gravitacional da Terra de 2008 (EGM2008), que se baseia na teoria da análise harmônica elipsoidal e coeficientes de transformação (EHA-CT) (LIANG et al., 2020). Esses conjuntos de dados foram delimitados de acordo com a área deste estudo e estão disponíveis no site do Centro Internacional de Modelos Terrestres Globais (ICGEM) (DREWES et al., 2016; INCE et al., 2019), com espaçamento de grade de $0,01^\circ$.

Os dados gravimétricos da anomalia Bouguer foram processados a partir da aplicação da separação regional/residual antes de serem inseridos na inversão. Utilizou-se um polinômio de grau três para este procedimento. A Figura 5 exibe um mapa mostrando dados residuais de anomalias Bouguer processados usando dados de satélite. Para o desenvolvimento desta pesquisa foram gerados perfis de estudo para analisar a estrutura interna das bacias estudadas e este mapa apresenta um conjunto de quatro perfis: AA', BB', CC' e MtMt'. Esses perfis cruzam as Bacias de Jatobá, Tucano Central e Recôncavo, fornecendo valores gravimétricos cruciais para o mapeamento de seus depocentros. Especificamente, o perfil MtMt' foi desenhado intencionalmente para facilitar uma análise comparativa entre sua interpretação nesta pesquisa e os achados delineados no estudo de Corrêa-Gomes et al. (2022).

Um rifteamento é o resultado do processo de estiramento de uma crosta (no caso, continental), onde se gera uma depressão (bacia) preenchida posteriormente por sedimentos. Dada a sua natureza mecânica, o seu principal controle é estrutural, e a sua sedimentação é em grande parte controlada pela tectônica associada. À medida que o processo de rifteamento continua, ocorre o afundamento das camadas superiores da crosta continental, juntamente com a formação de falhas e graben. Essa subsidência gera uma resposta do limite inferior da astenosfera da crosta de acordo com a compensação isostática da região, fazendo com que ela sofra uma atenuação, ou seja, haja uma elevação deste limite. Com esse estiramento, ocorre um afinamento da litosfera, afetando diretamente a resposta gravimétrica da Bacia. Deste modo, é possível analisar através do mapa da Figura 5, a resposta gravimétrica da região, destacando suas anomalias negativas.

Portanto, fica evidente que as áreas de baixa gravidade estão correlacionadas com o compartimento geotectônico associado às Bacias Mesozoicas do Recôncavo-Tucano-Jatobá (RTJ). O sistema RTJ faz parte do sistema de Rift descontinuado (MILANE, 1985), ligado à formação do Oceano Atlântico.

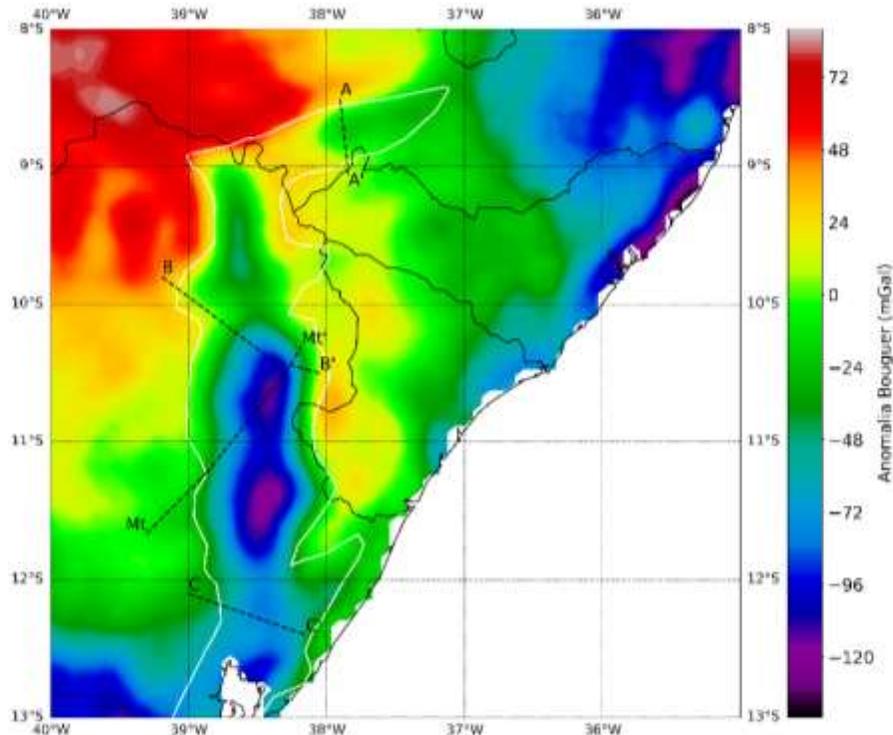


Figura 5 – Localização dos perfis e dados residuais da anomalia Bouguer obtidos do modelo gravimétrico global SGG-UGM-2 da área de estudo.

Fonte: Os autores (2023)

É possível adquirir uma compreensão mais abrangente da estrutura interna das bacias que compõem o sistema RTJ correlacionando suas anomalias gravitacionais com a atenuação das feições topográficas da descontinuidade de Mohorovičić (Moho). Para tanto, utilizamos a técnica de inversão estabelecida por Oldenburg (1974) em dados gravimétricos de satélite do sistema RTJ (Figura 5).

O mapa representado na Figura 6 ilustra os resultados derivados desta aplicação, que levaram às estimativas da profundidade de Moho com um RMS de 10,35. Estas estimativas da profundidade de Moho revelam uma correlação clara entre as maiores profundidades de Moho e as localizações das bacias sedimentares dentro do sistema RTJ. Esta correlação provavelmente decorre do processo de subsidência atribuído ao estiramento da crosta nesta região e à subsequente formação destas bacias, juntamente com os fenômenos de compensação isostática associados. Notavelmente, a Figura 6 destaca duas regiões distintas – a Bacia Central e Sul do Tucano – demonstrando que as profundidades podem exceder 40 km. Ao comparar essas regiões com as áreas equivalentes da Figura 5, há também dois baixos gravimétricos com valores aproximados de -96 e -120 mGal, respectivamente. Estas áreas destacadas indicam os maiores depocentros dentro deste sistema.

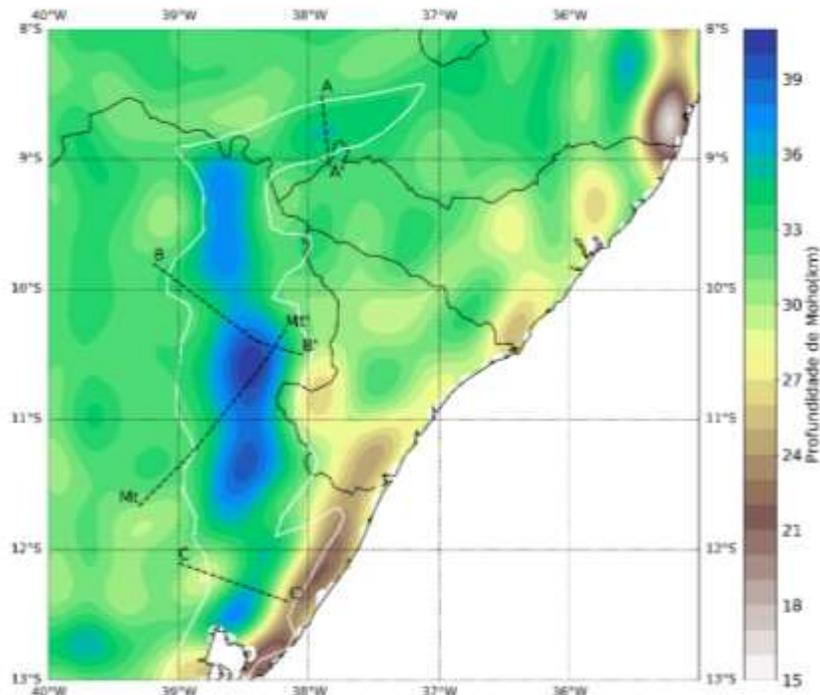


Figura 6 – Localização dos perfis e mapa de profundidade Moho para a área deste estudo, usando o algoritmo Parker-Oldeburg.
Fonte: Os autores (2023)

O perfil AA' cruza a Bacia de Jatobá e os resultados de inversão dos dados gravimétricos ao longo deste perfil estão representados na Figura 7. A Figura 7a ilustra a inversão dos dados de anomalia gravimétrica do perfil AA', mostrando uma comparação entre os pontos observados e a curva calculada (indicada pela linha vermelha), resultando em um valor de ajuste RMS de 0,21, com parâmetro de regularização $\mu = 10^{-4}$. Todos os ajustes das curvas nesta pesquisa foram executados usando o algoritmo de inversão suavemente regularizado desenvolvido e empregando um contraste de densidade de $\Delta\rho = -300 \text{ kg/cm}^3$ entre as camadas de sedimento e embasamento.

Como consequência desta inversão, a Figura 7b apresenta a variação da profundidade do topo do embasamento da Bacia de Jatobá ao longo deste perfil, estimando uma profundidade máxima de aproximadamente 3 km. Nesta região, as anomalias gravitacionais atingem valores da ordem de -35 mGal. Em geral, com base na evolução da deposição sedimentar dentro das bacias do sistema RTJ, os sedimentos de menor densidade que se acumularam, causaram uma redução na resposta gravitacional dentro de suas áreas centrais que sofreram subsidência devido ao rifteamento. Consequentemente, as regiões inferiores sofreram intensas sequências de sedimentação.

Os dados estimados da topografia de Moho foram extraídos ao longo do Perfil AA', permitindo-nos inferir uma profundidade máxima de aproximadamente 35 km (Figura 7c).

O perfil BB' atravessa a Bacia Central do Tucano. Os resultados de inversão obtidos a partir dos dados gravimétricos ao longo deste perfil estão representados na Figura 8. Este ajuste produz um valor RMS de 2,11 e $\mu = 10^{-5}$ (Figura 8a). A profundidade estimada do embasamento ao longo do perfil BB' indica uma profundidade do depocentro de aproximadamente 12 km (Figura 8b) para uma anomalia gravimétrica de aproximadamente -100 mGal e este valor de profundidade é consistente com o trabalho de Santos et al. (2010). A Figura 8c mostra os resultados da inversão para a profundidade de Moho ao longo do perfil BB', indicando uma profundidade de aproximadamente 39 km. Notavelmente, tanto a inversão do embasamento quanto a de Moho apresentam profundidades aumentadas dentro do mesmo intervalo (entre 6 e 8 km de distância). Este alinhamento em profundidade pode ser potencialmente influenciado pela espessura sedimentar dentro da bacia.

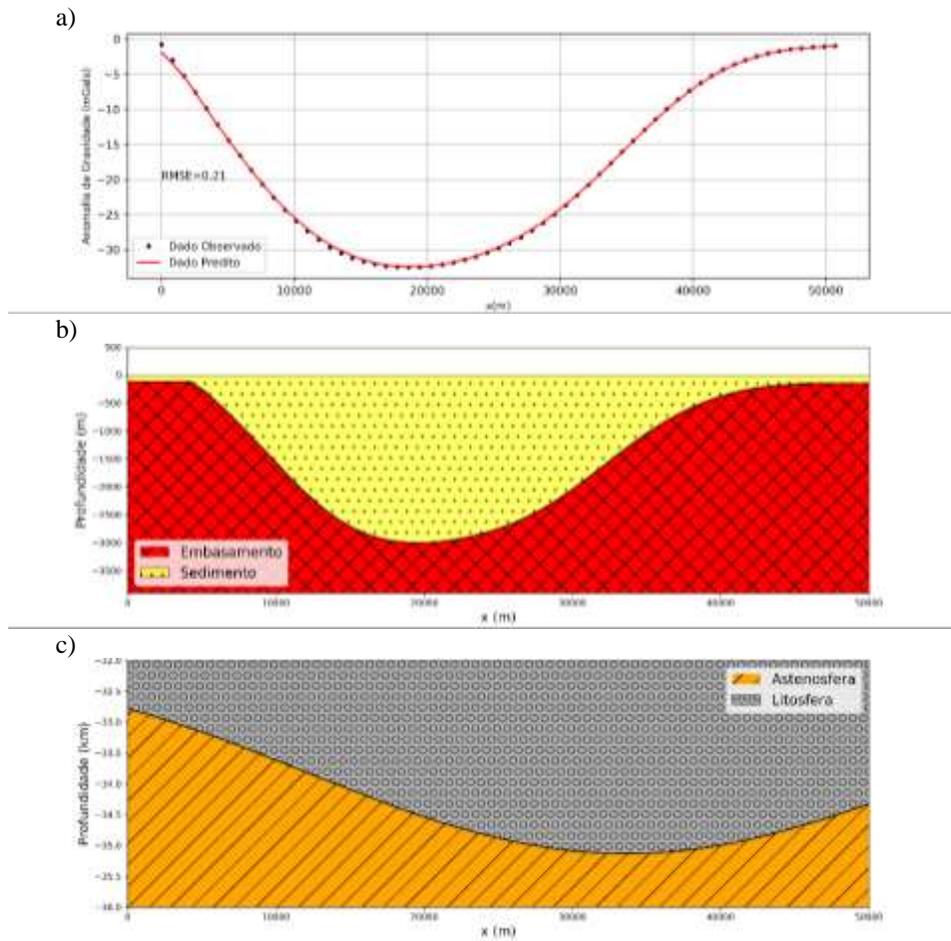
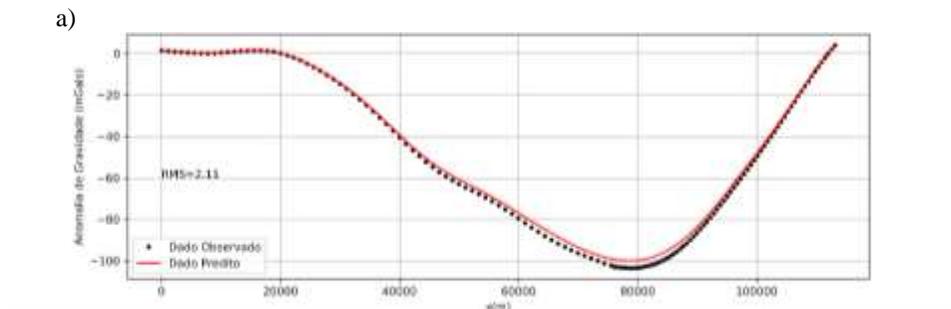


Figura 7 – Dados reais do perfil AA' - Bacia de Jatobá: (a) comparação entre dados gravimétricos observados e calculados, (b) estimativa da profundidade do embasamento ao longo deste perfil e (c) estimativa da profundidade de Moho.

Fonte: Os autores (2023)



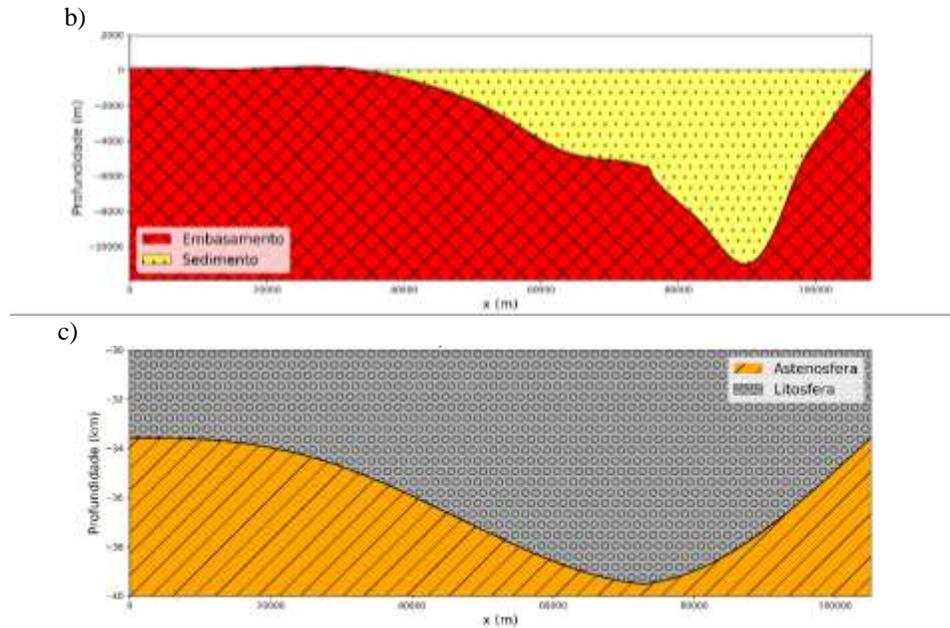
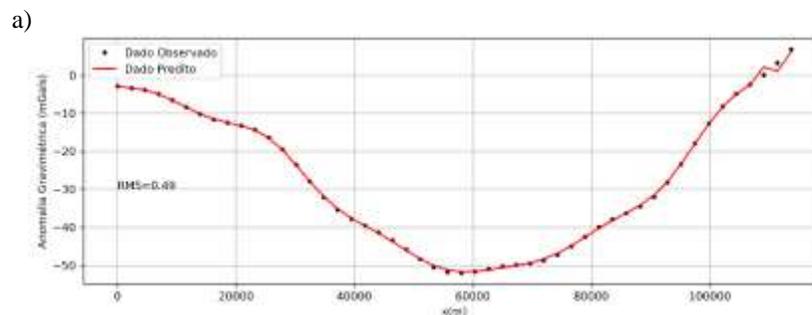


Figura 8 – Dados reais do perfil BB' – Bacia Central de Tucano: (a) comparação entre dados gravimétricos observados e calculados, (b) estimativa da profundidade do embasamento ao longo deste perfil e (c) estimativa da profundidade de Moho.

Fonte: Os autores (2023)

O perfil CC' estende-se pela Bacia do Recôncavo. Os ajustes de inversão obtidos a partir dos dados gravimétricos ao longo deste perfil são apresentados na Figura 9a, resultando em um valor RMS de 0,25 e $\mu = 10^{-5}$. A Figura 9b ilustra a inversão do embasamento desta bacia, sugerindo uma profundidade máxima estimada em torno de 4,5 km para uma anomalia gravimétrica de aproximadamente -55 mGal. Além disso, a inversão de profundidade de Moho, representada na Figura 9c, indica uma profundidade máxima de aproximadamente 36 km. É importante ressaltar que existe uma correlação notável entre o aumento das profundidades do embasamento e a interface Moho, possivelmente atribuída à subsidência.



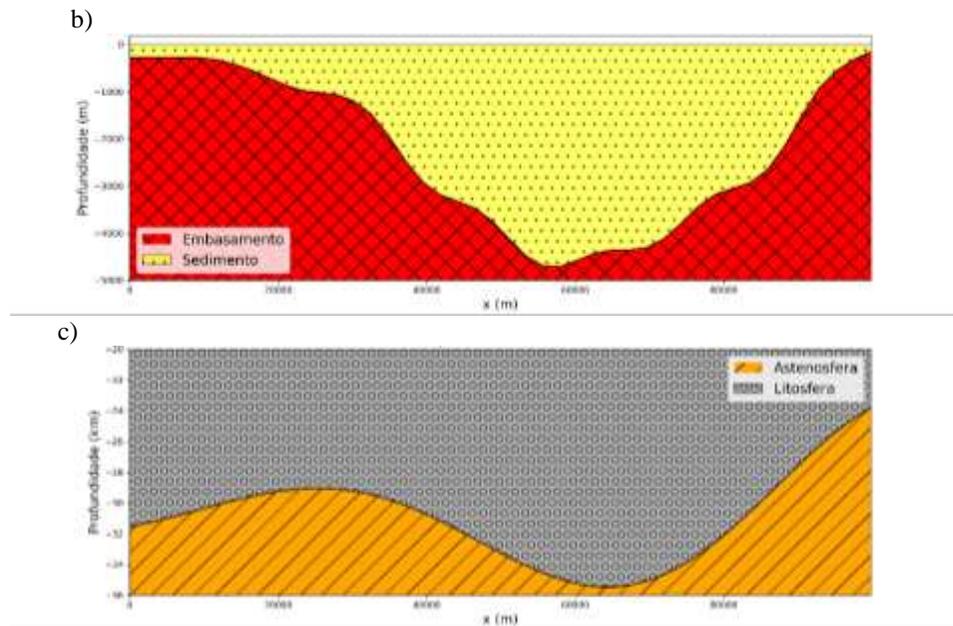
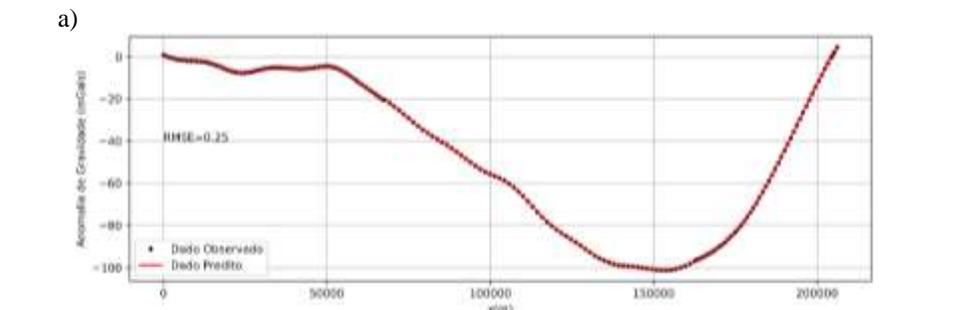


Figura 9 – Real data in the CC' profile – Recôncavo Basin: (a) comparison between observed and calculated gravimetric data, (b) estimation of basement depth along this profile, and (c) estimation of Moho depth.

Fonte: Os autores (2023)

Semelhante ao perfil BB', o perfil MtMt' atravessa a Bacia Central do Tucano, originando-se mais ao sul e cruzando-se com o perfil BB'. Esse perfil mantém a direção planejada interpretada por Corrêa-Gomes et al. (2022). O ajuste entre as curvas observadas e calculadas (Figura 10a) resultou em RMS de 0,25 e $\mu = 10^{-5}$. A interpretação quanto à profundidade do embasamento está representada na Figura 10b. A profundidade máxima atingiu aproximadamente 9,5 km para uma anomalia gravimétrica de aproximadamente -101 mGal, valores de profundidade consistentes com o trabalho de Corrêa-Gomes et al. (2022). A Figura 10c ilustra a profundidade de Moho resultante ao longo deste perfil, aproximadamente 41 km, coincidindo com os valores de pico de espessura de sedimentos observados ao longo deste perfil.



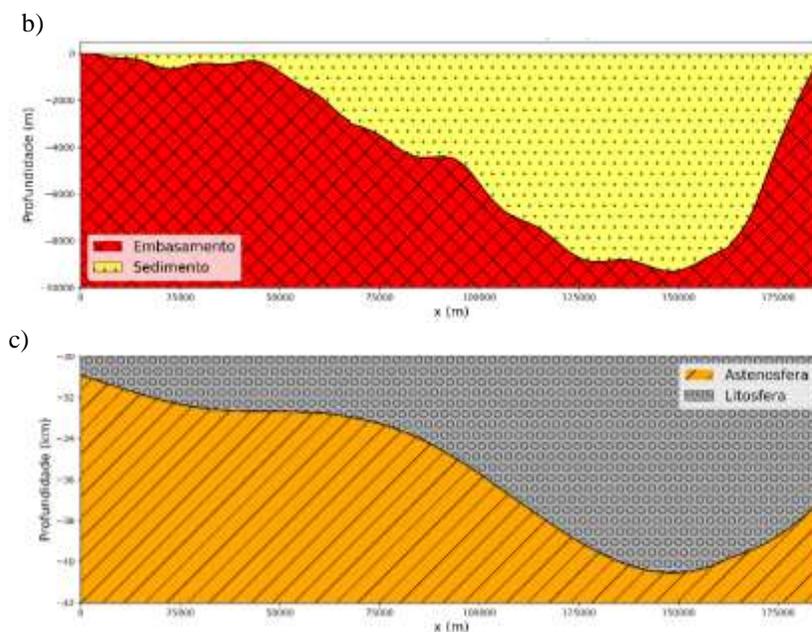


Figura 10 – Dados reais no perfil MtMt' – Bacia Central de Tucano: (a) comparação entre dados gravimétricos observados e calculados, (b) estimativa da profundidade do embasamento ao longo deste perfil, e (c) estimativa da profundidade de Moho.

Fonte: Os autores (2023)

A Tabela 1 apresenta um resumo dos valores estimados de profundidade máxima obtidos através das metodologias de inversão empregadas para a estimativa do relevo da bacia e do Moho.

Tabela 1 – Tabela exibindo um resumo dos resultados da inversão.

BACIA	PROFUNDIDADE DO DEPOCENTE	PROFUNDIDADE DE MOHO
Jatobá	≈ 3.0 km	≈ 35 km
Tucano Central (BB' Profile)	≈ 12.0 km	≈ 39 km
Recôncavo	≈ 4.5 km	≈ 36 km
Tucano Central (MtMt' Profile)	≈ 9.5 km	≈ 41 km

Fonte: Os autores (2023)

Ao correlacionar a anomalia gravimétrica dos perfis com a topografia do embasamento da bacia e do Moho, é possível identificar um rápido aumento da resposta gravimétrica nas suas bordas, resultante do pronunciado deslocamento ascendente do embasamento da bacia. Isso levou ao surgimento de falhas que os delineiam.

Como as bacias apresentam uma atenuação tardia da topografia de Moho, o que significa que não coincide com a localização das bacias, as anomalias negativas decorrem de densidades variadas das rochas dentro da sua estratigrafia. Além disso, o aumento na resposta gravimétrica correlaciona-se com a atenuação da litosfera, atribuída a um deslocamento ascendente no seu limite inferior. Uma rápida transição no aumento das anomalias gravimétricas em direção à área offshore também é evidente, confirmando a atenuação da crosta em resposta ao tectonismo ativo na região.

4. Considerações Finais

Esta pesquisa visou delinear o relevo do embasamento das Bacias Mesozoicas do sistema Rift Recôncavo – Tucano – Jatobá. Nosso modelo interpretativo empregou uma série de prismas justapostos, assumindo um contraste de densidade

fixo e conhecido de -300 kg/m^3 . O algoritmo de inversão implementado utilizou a metodologia de Gauss-Newton com regularização suavizada em conjunto com a técnica de decomposição de valores singulares para estimar o relevo do embasamento das bacias do Sistema Rift mencionadas. Inicialmente validamos a metodologia testando-a com dados sintéticos que simularam duas situações reais de Bacias Sedimentares do tipo Rift. Isso resultou em ajustes próximos entre curvas de anomalia gravimétrica teóricas e calculadas, além de estimativas precisas da geometria e profundidade do embasamento. Consequentemente, este método estimou de forma confiável o relevo do embasamento dentro dos modelos de bacia estudados, assumindo que seu relevo é suave. Foi demonstrado que o método implementado funciona efetivamente com bacias com relevo suave, devido às informações estabilizadoras utilizadas.

As anomalias gravimétricas derivadas de dados de satélite foram utilizadas para aplicação em dados reais, assumindo também um contraste de densidade conhecido de -300 kg/m^3 . Mesmo sem a inclusão de informações a priori, o algoritmo inverso desenvolvido e aplicado à Anomalia Residual Bouguer das Bacias de Jatobá, Tucano Central e Recôncavo, rendeu boas estimativas do relevo do embasamento e da profundidade de seus depocentros. Essas estimativas demonstram valores semelhantes aos encontrados em outros estudos. Essas informações foram correlacionadas com estimativas da profundidade máxima da topografia de Moho (Tabela 1), auxiliando na compreensão do papel do processo de rifteamento do embasamento na formação da bacia e contribuindo para a compreensão da evolução geodinâmica deste sistema.

Portanto, os resultados obtidos nesta pesquisa permitiram a interpretação da anomalia gravimétrica utilizada em função do espaço deposicional das bacias estudadas e da geometria do seu embasamento, o que poderá auxiliar no reconhecimento de estruturas internas resultantes de rifteamento, como falhas e blocos soerguidos no embasamento, que aliados ao conhecimento de sua estratigrafia, podem ser analisados com base nas características dos reservatórios de hidrocarbonetos das bacias estudadas. Além disso, a interpretação do relevo do embasamento em conjunto com a topografia de Moho permitiu a este estudo destacar alguns aspectos importantes deste sistema, retratando a evolução geotectônica do aulacógeno através de assinaturas gravimétricas específicas e sua associação com a estimativa de depocentros das bacias.

Agradecimentos

Agradecimentos ao Instituto Nacional de Ciência e Tecnologia - Geofísica do Petróleo (INCT-GP) pela concessão da bolsa de pesquisa que apoiou o desenvolvimento deste estudo, e à Universidade Federal da Bahia (UFBA) pelo fornecimento da infraestrutura necessária para a condução desta pesquisa.

Referências

- Barbosa, V. C. F., Silva, J. B., Medeiros, W. E., 1997. Gravity inversion of basement relief using approximate equality constraints on depths. *Geophysics*, 62(6), 1745-1757, <https://doi.org/10.1190/1.1444275>.
- Barbosa, V. C., Silva, J. B., Medeiros, W. E. (1999). Stable inversion of gravity anomalies of sedimentary basins with nonsmooth basement reliefs and arbitrary density contrast variations. *Geophysics*, 64(3), 754- 764, <https://doi:10.1190/1.1444585>.
- Bastos, B. M. S., Oliveira Jr, V. C., 2019. Isostatic constraint for 2D non-linear gravity inversion on rifted margins. *Geophysics*, 85(1), G17-G34
- Bessoni, T. P., Bassrei, A., Oliveira, L. G. S. D. (2020). Inversion of satellite gravimetric data from recôncavo-tucano-jatobá basin system. *Brazilian Journal of Geology*, 50.
- Correa-Gomes, L. C., Batista, J. C., Sampaio, E. E., Oliveira, E. P., Barbosa, J. S., & Vitorello, Í. (2022). Geophysical data reveal a tectonic indentation and constrain the transition zone between the São Francisco Craton and the Borborema Paleoplates across the Neoproterozoic Sergipano Orogen, beneath the Cretaceous Tucano Basin, NE Brazil. *Tectonophysics*, 833, 229-296.
- Drewes, H. and Kuglitsch, F. and Adám, J. and Rózsa, S., 2016. The Geodesists Handbook. *Journal of Geodesy* 90(10), 907-1205, <https://doi.org/10.1007/s00190-016-0948-z>.
- Gordon, A., Destro, N., & Heilbron, M. (2017). The Recôncavo-Tucano-Jatobá rift and associated Atlantic continental margin basins. São Francisco Craton, Eastern Brazil: Tectonic Genealogy of a Miniature Continent, 171-185.

- Gómez-Ortiz, D. and Agarwal, B. N. P., 2005. 3DINVER.M: A MATLAB program to invert the gravity anomaly over a 3D horizontal density interface by Parker–Oldenburg’s algorithm. *Computers & Geosciences*, 31(4), 513-520, <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2004.11.004>.
- Ince, Elmas Sinem and Barthelmes, Franz and Reißland, Sven and Elger, Kirsten and Förste, Christoph and Flechtner, Frank and Schuh, Harald, 2019. ICGEM–15 years of successful collection and distribution of global gravitational models, associated services and future plans. *Earth System Science Data*, 11, 647-674, <https://doi.org/10.5194/essd-11-647-2019>.
- Liang, Wei, et al., 2020. A high-resolution Earth’s gravity field model SGG- UGM-2 from GOCE, GRACE, satellite altimetry, and EGM2008. *Engineering* 6.8 6(8), 860-878, <https://doi.org/10.1016/j.eng.2020.05.008>.
- MAGNAVITA, L.P., 1992. *Geometry and kinematics of the Recôncavo-Tucano-Jatobá rift, NE, Brazil*, 493 pp. Thesis (Ph.D.). Department of Earth Sciences, University of Oxford, Oxford.
- Magnavita, L.P., da Silva, R.R., Sanches, C.P., 2005. Guia de campo da Bacia do Recôncavo, NE do Brasil. *Boletim de Geociências da Petrobras*. Rio de Janeiro 13 (2), 301–334 (Edição especial “Bacias Rifte”).
- Milani, E. (1985). Tectônica cissalhante na evolução do Rift do Recôncavo-Tucano-Jatobá. *Revista brasileira de Geociências*, 15.
- Milani, E. J., Lana, M. C., Szatmari, P. (1988). Mesozoic rift basins around the northeast Brazilian microplate (Recôncavo–Tucano–Jatobá, Sergipe–Alagoas). In *Developments in Geotectonics* (Vol. 22, pp. 833-858). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-42903-2.50039-7>
- Oldenburg, D. W., 1974. The inversion and interpretation of gravity anomalies. *Geophysics*, 39(4), 526-536, <https://doi.org/10.1190/1.1440444>.
- Parker, R. (1973). The rapid calculation of potential anomalies. *Geophysical Journal International*, 31(4), 447–455. <https://doi.org/10.1111/j.1365-246x.1973.tb06513.x>.
- Santos, C. D., Cupertino, J. A., & Braga, J. A. E. (1990). Síntese sobre a geologia das bacias do Recôncavo, Tucano e Jatobá. Raja Gabaglia, GP; Milani, EJ (coords.), *Origem e Evolução de Bacias Sedimentares*. Rio de Janeiro: Petrobras, 235-266.
- Shlens, J., 2003. A tutorial on principal component analysis Derivation, Discussion and Singular Value Decomposition, <https://api.semanticscholar.org/CorpusID:8004356>, access August 25, 2023.
- Silva, I. C. (2017) *Evolução Dinâmica do Sistema de Bacias Tipo Rifte Recôncavo-Tucano-Jatobá com Base em Dados de Campo*, Tese de Doutorado, Universidade Federal da Bahia, Salvador, BA.
- Silva, J. B., Oliveira, A. S., & Barbosa, V. C. (2010). Gravity inversion of 2D basement relief using entropic regularization. *Geophysics*, 75(3), I29-I35. <https://doi.org/10.1190/1.3374358>.
- Szatmari, P., Milani, E.J., Lana, M. C., Conceicao, J. C. J. and Lobo, A.P., 1985. How South Atlantic rifting affects Brazilian oil reserves distribution. *Oil Gas J.*, 83: 107- 113.
- Tiercelin, J. J. (1990). Rift-basin sedimentation: responses to climate, tectonism and volcanism. Examples of the East African Rift. *Journal of African Earth Sciences (and the Middle East)*, 10(1-2), 283-305.
- Uieda, L. (2020). Short course on geophysical inversion at RWTH Aachen University graduate school IRTG-2379 Modern Inverse Problems. Department of Earth, Ocean and Ecological Sciences, School of Environmental Sciences, University of Liverpool, UK.
- Van der Meijde, M and Julià, J and Assumpção, M, 2013. Gravity Derived Moho for South America. *Tectonophysics*, 609, 456-46, <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2013.03.023>.