



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARÁ**

**CENTRO DE GEOCIÊNCIAS**

**FACULDADE DE GEOFÍSICA**

**TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO**

**JONATHAN CRIS PINHEIRO GARCIA**

**INVERSÃO GRAVIMÉTRICA USANDO ESTABILIZADOR VARIAÇÃO TOTAL  
APLICADA EM BACIAS DO VALE DO CARIRI**

**Belém – Pará**

**2013**

**JONATHAN CRIS PINHEIRO GARCIA**

**INVERSÃO GRAVIMÉTRICA USANDO ESTABILIZADOR VARIAÇÃO TOTAL  
APLICADA EM BACIAS DO VALE DO CARIRI**

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

Área de Concentração: Métodos Potenciais

Orientadora: Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Darcicléa Ferreira Santos.

**Belém – Pará**

**2013**

Dados Internacionais de Catalogação-na-Publicação (CIP)  
Sistema de Bibliotecas da UFPA

G216i Garcia, Jonathan Cris Pinheiro  
Inversão gravimétrica usando estabilizador variação total aplicada em bacias do Vale do Cariri / Jonathan Cris Pinheiro Garcia; Orientadora: Darcicléa Ferreira Santos – 2013  
48 f. : il.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação em geofísica) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de Geofísica, Belém, 2013.

1. Inversão (Geofísica). 2. Gravimetria. 3. Bacias sedimentares – Brasil, Nordeste. 4. Variação Total. 5. Interpretação gravimétrica. 6. Cariri (Brasil). I. Santos, Darcicléa Ferreira, *orient.* II. Universidade Federal do Pará. III. Título.

CDD 22<sup>a</sup> ed.: 550

**JONATHAN CRIS PINHEIRO GARCIA**

**INVERSÃO GRAVIMÉTRICA USANDO ESTABILIZADOR VARIAÇÃO TOTAL  
APLICADA EM BACIAS DO VALE DO CARIRI**

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

Data de Aprovação: 02/08/2013

Conceito: Excelente

**BANCA EXAMINADORA**

---

Prof<sup>a</sup>. Dr<sup>a</sup>. Darcicléa Ferreira Santos - Orientadora  
Doutora em Métodos Potenciais  
Universidade Federal do Pará

---

Prof. Dr. João Batista Corrêa da Silva  
Doutor em Métodos Potenciais  
Universidade Federal do Pará

---

Prof. Dr. Cristiano Mendel Martins  
Doutor em Métodos Potenciais  
Universidade Federal do Pará

Aos meus pais pelo apoio, amor e fé.

## AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pelo dom da vida e por todas as conquistas e derrotas que obtive e os aprendizados com elas carregados.

Ao meu pai, Celio pelas experiências cedidas, conselhos ofertados e suporte dado, com amor e sem esperar nada em troca.

A minha mãe, Ana pelo amor, dedicação, carinho, paciência e fé que sempre foram imensuráveis, e dados em todos os momentos da minha vida.

Ao meu irmão, Alan pelo amor e força passada.

A minha noiva, Denise pelo amor, carinho a Thiago Nascimento, seu irmão, pela força desde o cursinho até esse momento.

Aos meus amigos antigos e novos que ajudaram a escrever parte da minha historia, e a turma de 2008, eu os carregarei no peito.

Gostaria de agradecer a Professora Darcicléa que me concedeu o privilégio de sua orientação e com quem aprendi bastante nestes anos, sempre muito compromissada, paciente e acessível durante a orientação.

Aos demais professores da Faculdade de Geofísica pelos ensinamentos ao longo do curso. Agradeço à UFPA pela infraestrutura necessária à conclusão do curso.

... E as pessoas que não foram citadas mas que foram importantes em muitos momentos da minha vida.

*“Mesmo que a rota da minha vida me conduza a uma estrela, nem por isso fui dispensado de percorrer os caminhos do mundo.”*

**José Saramago**

## RESUMO

Apresentamos as interpretações gravimétricas bidimensionais das bacias do Vale do Cariri usando o método de inversão não linear com o regularizador da Variação Total (VT). O método de inversão gravimétrica da VT é um dos métodos mais indicado para delinear as descontinuidades verticais do relevo do embasamento em ambientes geológicos de bacias sedimentares. Interpretações gravimétricas de dados sintéticos de duas bacias sedimentares simuladas apresentando descontinuidades verticais no relevo do embasamento mostram a eficácia da metodologia usando o funcional da VT. Aplicamos a inversão gravimétrica com a regularização da VT em perfis de dados digitalizados a partir das imagens bitmap dos mapas de anomalia Bouguer das bacias do Vale do Cariri. Comparamos as interpretações gravimétricas bidimensionais, resultantes do funcional da VT, com as interpretações gravimétricas tridimensionais das bacias do Vale do Cariri de trabalho anterior. Verificamos que o emprego da metodologia de inversão não linear com a regularização da VT nas bacias sedimentares do Vale do Cariri produziu estimativas para a superfície do relevo do embasamento apresentando descontinuidades verticais presumivelmente provocadas por esforços tectônicos envolvidos no processo de formação destas bacias sedimentares.

**Palavras chave:** Inversão Gravimétrica. Interpretação Gravimétrica. Variação Total. Bacias do Vale do Cariri.

## ABSTRACT

We present two-dimensional gravimetric interpretations of the Cariri Valley basins using the nonlinear inversion method with the total variation (VT) regularizations. The basins from this area consist of grabens and hemi-grabens. The nonlinear inversion method applying the VT functional produces nonsmooth basement relief typical of sedimentary basins with internal geometry of grabens and hemi-grabens. We present the efficiency of the methodology using the VT functional on synthetic data from two sets of synthetic data produced by simulated 2D grabens. We apply the gravimetric inversion with VT regularization on digitized data profiles of Bouguer anomaly maps over the Cariri Valley basins. We compare the two-dimensional gravimetric interpretations using the VT function with the three-dimensional gravimetric interpretations of Cariri Valley basin of a previous work. We verify that the application of the nonlinear inversion methodology with VT regularization on Cariri Valley sedimentary basins produced a basement relief estimate presenting vertical discontinuities presumably caused by tectonic forces involved in the formation process of these sedimentary basins.

**Keywords:** Gravimetric inversion. Gravimetric interpretation. Total Variation. Cariri Valley basins.

## LISTA DE FIGURAS

<b>Figura 1</b> - Representação esquemática do conjunto de N observações gravimétricas $g^0$ devido uma da bacia sedimentar arbitrária.....	16
<b>Figura 2</b> - Observações gravimétricas e o modelo interpretativo consistido de um conjunto de prismas retangulares bidimensionais.....	17
<b>Figura 3</b> - Ambiente simulado 1. a) anomalia gravimétrica e ajuste (pontos pretos e linha vermelha). b) relevo simulado (linha preta) e interpretação gravimétrica (linha vermelha)....	20
<b>Figura 4</b> - Ambiente simulado 2. a) anomalia gravimétrica e ajuste (pontos pretos e linha vermelha). b) relevo simulado (linha preta) e interpretação gravimétrica (linha vermelha)....	21
<b>Figura 5</b> - Mapa de localização geográfica das bacias do Vale do Cariri. Bacia do Araripe (Azul), Bacia de Iguatu e Bacia Lima campos (Vermelho), Bacia Rio do Peixe (Roxo). .....	22
<b>Figura 6</b> - Bacia Araripe: Ilustração esquemática das principais falhas.....	23
<b>Figura 7</b> - Localização geográfica da bacia sedimentar do Araripe. Perfil transversal da sub-bacia do Araripe orientado NW-SE.....	24
<b>Figura 8</b> - Mapa da anomalia residual Bouguer. Bacia do Araripe, Nordeste brasileiro. Intervalos entre linhas de isovalores de 4mGal.....	25
<b>Figura 9</b> - Perfil HH' da Bacia do Araripe. a) Anomalia gravimétrica (pontos pretos) e anomalia justada (linha vermelha contínua) b) Interpretação do relevo do embasamento. c) Seção xz da interpretação do relevo do embasamento (linha azul) apresentada por Castro e Castelo Branco (1999).....	27
<b>Figura 10</b> - Perfil FF' da Bacia do Araripe. a) Anomalia gravimétrica (pontos pretos) e anomalia justada (linha vermelha contínua) b) Interpretação do relevo do embasamento. c) Seção xz da interpretação do relevo do embasamento (linha azul) apresentada por Castro e Castelo Branco (1999).....	27
<b>Figura 11</b> - Perfil GG' da Bacia do Araripe. a) Anomalia gravimétrica (pontos pretos) e anomalia justada (linha vermelha contínua) b) Interpretação do relevo do embasamento. c) Seção xz da interpretação do relevo do embasamento (linha azul) apresentada por Castro e Castelo Branco (1999).....	28

<b>Figura 12</b> - Perfil MM' da Bacia do Araripe. Sub-bacia Feitoria. a) Anomalia gravimétrica (pontos pretos) e anomalia justada (linha vermelha contínua) b) Interpretação do relevo do embasamento .....	28
<b>Figura 13</b> - Perfil NN' da Bacia do Araripe. Sub-bacia Cariri. a) Anomalia gravimétrica (pontos pretos) e anomalia justada (linha vermelha contínua) b) Interpretação do relevo do embasamento .....	28
<b>Figura 14</b> - Bacia Rio do Peixe: Ilustração esquemática das principais falhas.....	31
<b>Figura 15</b> - Localização geográfica da bacia sedimentar do Rio do Peixe. Perfil transversal da bacia orientado N-S.. .....	32
<b>Figura 16</b> - Mapa da anomalia residual Bouguer. Bacia do Rio do Peixe, Nordeste brasileiro. Intervalos entre linhas de isovalores de 4 mGal. ....	33
<b>Figura 17</b> - Perfil AA' da Bacia do Rio do Peixe. a) Anomalia gravimétrica (pontos pretos) e anomalia justada (linha vermelha contínua) b) Interpretação do relevo do embasamento. c) Seção xz da interpretação do relevo do embasamento (linha azul) apresentada por Castro e Castelo Branco (1999).....	34
<b>Figura 18</b> - Perfil BB' da Bacia do Rio do Peixe. a) Anomalia gravimétrica (pontos pretos) e anomalia justada (linha vermelha contínua) b) Interpretação do relevo do embasamento. c) Seção xz da interpretação do relevo do embasamento (linha azul) apresentada por Castro e Castelo Branco (1999).....	34
<b>Figura 19</b> - Perfil DD' da Bacia Rio do peixe. a) Anomalia gravimétrica (pontos pretos) e anomalia justada (linha vermelha contínua) b) Interpretação do relevo do embasamento. c) Seção xz da interpretação do relevo do embasamento (linha azul) apresentada por Castro e Castelo Branco (1999).....	35
<b>Figura 20</b> - Perfil EE' da Bacia Rio do peixe. a) Anomalia gravimétrica (pontos pretos) e anomalia justada (linha vermelha contínua) b) Interpretação do relevo do embasamento .....	35
<b>Figura 21</b> - Bacia do Iguatu: Ilustração esquemática das principais falhas.....	37
<b>Figura 22</b> - Localização geográfica da bacia sedimentar do Iguatu. Perfil transversal da bacia orientado NW-SE. ....	38

<b>Figura 23</b> - Mapa da anomalia residual Bouguer. Bacia do Iguatu, Nordeste brasileiro. Intervalos entre linhas de isovalores de 4 mGal. ....	39
<b>Figura 24</b> - Perfil PP' da sub-bacia do Iguatu. a) Anomalia gravimétrica (pontos pretos) e anomalia justada (linha vermelha continua) b) Interpretação do relevo do embasamento. c) Seção xz da interpretação do relevo do embasamento (linha azul) apresentada por Castro e Castelo Branco (1999).....	40
<b>Figura 25</b> - Perfil OO' da sub-bacia do Iguatu e sub-bacia de Lima campos. a) Anomalia gravimétrica (pontos pretos) e anomalia justada (linha vermelha continua) b) Interpretação do relevo do embasamento .....	41
<b>Figura 26</b> - PerfilQQ' da sub-Bacia do Iguatu. a) Anomalia gravimétrica (pontos pretos) e anomalia justada (linha vermelha continua) b) Interpretação do relevo do embasamento. c) Seção xz da interpretação do relevo do embasamento (linha azul) apresentada por Castro e Castelo Branco (1999).....	41

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	13
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA</b>	16
<b>3</b>	<b>TESTES EM DADOS SINTÉTICOS</b>	20
3.1	AMBIENTE SIMULADO 1	20
3.2	AMBIENTE SIMULADO 2	21
<b>4</b>	<b>APLICAÇÃO EM DADOS REAIS</b>	22
4.1	BACIAS SEDIMENTARES DO VALE DO CARIRI	22
4.2	BACIA DO ARARIPE	23
<b>4.2.1</b>	<b>Interpretação gravimétrica da Bacia do Araripe</b>	25
4.3	BACIA DO RIO DO PEIXE	30
<b>4.3.1</b>	<b>Interpretação gravimétrica da Bacia do Rio do Peixe</b>	32
4.4	BACIA DO IGUATU	37
<b>4.4.1</b>	<b>Interpretação Gravimétrica da Sub-bacia do Iguatu</b>	38
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES</b>	43
	<b>REFERÊNCIAS</b>	45

## 1 INTRODUÇÃO

As bacias rifte Araripe, Rio do Peixe e Iguatu, situadas na porção central do Nordeste Brasileiro, pertencem ao conjunto de bacias sedimentares do Vale do Cariri. Estão localizadas sobre o embasamento cristalino pertencente à Província Borborema. Nestas bacias, os esforços tectônicos mesozóicos ocorridos na Província Borborema formaram estruturas grabens e hemi-grabens. Estas bacias do Vale do Cariri, classificadas como “strike-slip” (BIZZI et al., 2003) foram submetidas a processos geológicos de rifteamento desenvolvidos sob extensão regional seguido da ocorrência de falhas transcorrentes posteriores.

Ao longo dos planos destas falhas podemos ter o deslocamento e a consequente justaposição de diferentes tipos de rochas sedimentares bem como fluxo e aprisionamento de hidrocarbonetos. Portanto, a informação sobre a provável geometria interna da bacia poderá auxiliar na descoberta de sistemas petrolíferos nestas bacias. Pesquisas voltadas à prospecção de óleo e gás nas bacias sedimentares do Vale do Cariri iniciaram-se a partir da década de 80. Como resultado, a Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustível (ANP) licitou a bacia mesozóica Rio do Peixe, pela primeira vez, na 9ª rodada de licitação de blocos exploratórios. A proximidade geográfica entre a bacia Rio do Peixe e as bacias Araripe e Iguatu permite cogitar a possibilidade de haver petróleo também nas bacias Araripe e Iguatu.

O método gravimétrico tem sido um dos métodos geofísicos aplicados nas pesquisas das bacias do Nordeste brasileiro uma vez que os dados gravimétricos podem contribuir para a interpretação do arcabouço estrutural destas bacias sedimentares. Castro e Castelo Branco (1999) aplicaram o procedimento iterativo de Rao e Babu (1991), obtendo uma interpretação tridimensional das bacias do Vale do Cariri voltada ao delineamento do relevo do embasamento. O método de Rao e Babu (1991) utiliza o modelo interpretativo de prismas retangulares 3D justapostos e estima a profundidade de cada prisma dividindo a anomalia gravimétrica diretamente acima dele por  $2\pi\gamma\Delta\rho(z)$ , sendo  $\gamma$  a constante gravitacional e  $\Delta\rho(z)$  o contraste de densidade entre o pacote sedimentar e o embasamento, variável com a profundidade  $z$  segundo a lei matemática quadrática  $a_0 + a_1z + a_2z^2$ , em que  $a_0$  é o valor do contraste de densidade na superfície e  $a_1$  e  $a_2$  são constantes da função quadrática que controlam o decréscimo do contraste de densidade com a profundidade. No procedimento iterativo apenas para a primeira iteração  $\Delta\rho(z)$  será igual a  $a_0$ . O resíduo entre a anomalia observada e a anomalia gerada por esta estimativa é computada e o processo é repetido substituindo-se a anomalia observada pelo resíduo e somando-se o novo conjunto de correções das profundidades estimadas à estimativa anterior do relevo, até o resíduo se tornar

desprezível. As estimativas das espessuras do conjunto de prismas do modelo interpretativo fornecem uma estimativa do relevo do embasamento.

Porém, Castro e Castelo Branco (1999) mencionam que a ausência de maiores conhecimentos, naquele momento, sobre o comportamento do contraste de densidade com a profundidade levou-lhes a optar pela aplicação do contraste de densidade constante. Neste caso o método de Rao e Babu (1991) com contraste de densidade constante e presumivelmente conhecido é um caso particular do método de Bott (1960). Entretanto o método de Bott (1960) fornece uma delimitação da superfície do relevo do embasamento suave uma vez que o relevo e suas correções iterativas são essencialmente a anomalia gravimétrica multiplicada por uma constante.

Estas características da estimativa de superfícies suaves não se adequam à informação da geometria interna de falhas de alto ângulo e grande rejeito no embasamento das bacias strike-slip do Vale do Cariri. Outra desvantagem do método de Bott está relacionada com a razão sinal-ruído, isto é, o método não possui nenhum parâmetro que controla a estabilidade das estimativas da profundidade dos prismas. Como consequência, mesmo para pequenos níveis de ruído nos dados gravimétricos, as estimativas das profundidades dos prismas tornam-se instáveis para um grande número de iterações.

O presente trabalho propõe interpretar a topografia do embasamento das bacias strike-slip, pertencentes ao conjunto de bacias do Vale do Cariri, usando a metodologia da regularização da Variação Total (VT) e contraste de densidade constante (LIMA, 2009). O método da VT empregado utiliza um modelo interpretativo de prismas retangulares bidimensionais justapostos e resolve o problema de inversão gravimétrica iterativamente minimizando, através de mínimos quadrados, o funcional da VT sujeito ao desajuste dos dados ser aceitável. O funcional da VT é regulado pelo parâmetro  $\alpha$  que controla a estabilidade, a frequência e o tamanho do rejeito das discontinuidades nas estimativas do relevo do embasamento. Como o problema de inversão é não linear, a solução é obtida através de um processo iterativo baseado no método Quasi-Newton e no método de Marquardt (MARQUARDT, 1963). A metodologia da regularização através da VT produz estimativas estáveis e permite variações abruptas nas profundidades do topo do embasamento sendo, portanto, mais adequado para aplicação da interpretação gravimétrica da superfície do relevo do embasamento das bacias do Vale do Cariri do que o método de Rao e Babu (1991).

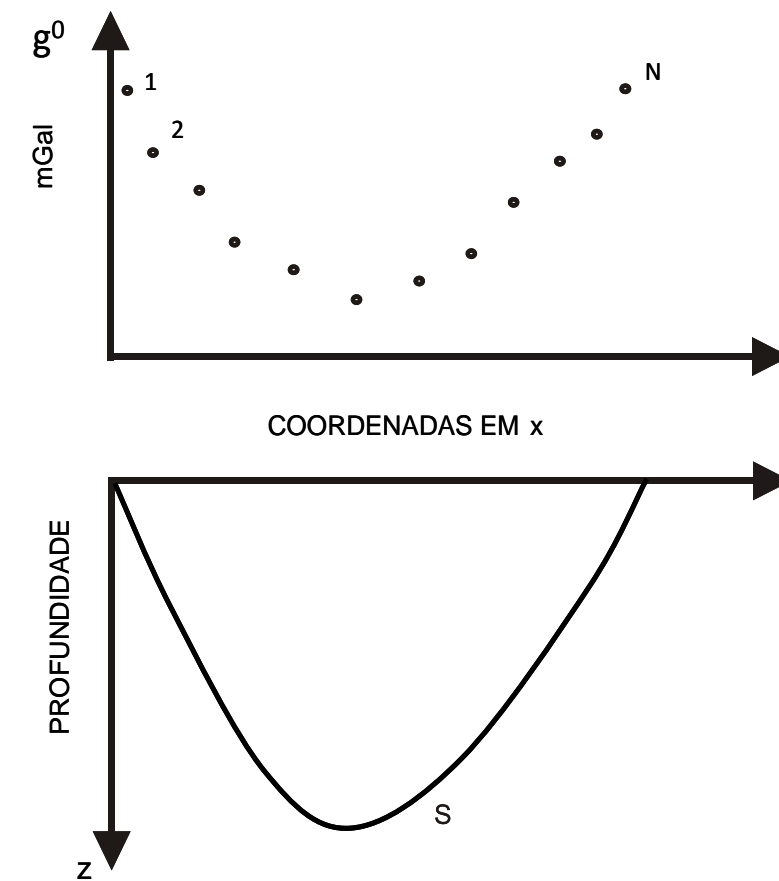
Para certificar a eficiência do método da inversão gravimétrica usando a regularização VT aplicamo-la a dois ambientes geológicos simulados de bacias sedimentares. Adicionalmente, aplicamos a metodologia da regularização da VT em perfis gravimétricos

digitalizados por nós a partir dos mapas de anomalias residuais apresentados por Castro e Castelo Branco (1999). O método aplicado em alguns perfis gravimétricos das bacias strike-slip Araripe, Rio do Peixe e Iguatu, pertencentes ao Vale do Cariri levou a soluções apresentando descontinuidades abruptas no embasamento, sendo a profundidade média do topo do embasamento de 1,5 km.

## 2 METODOLOGIA

Seja um conjunto de  $N$  observações gravimétricas  $g^0$  realizadas ao longo da direção do eixo  $x$  sobre uma seção no plano  $x-z$  de uma bacia sedimentar aproximadamente 2D, alongada na direção do eixo  $y$  de um sistema de coordenadas (Figura 1). Os dados gravimétricos são produzidos por uma bacia que apresenta contraste de densidade  $\Delta\rho$  constante e conhecido entre os sedimentos e o embasamento.

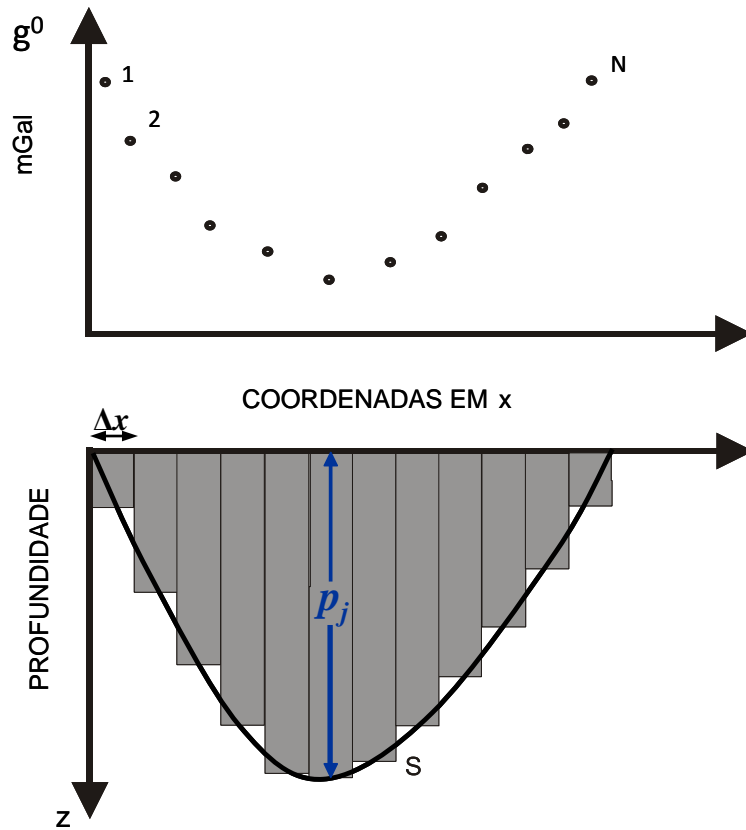
**Figura 1** - Representação esquemática do conjunto de  $N$  observações gravimétricas ( $g^0$ ) devido a uma bacia sedimentar arbitrária com relevo do embasamento  $S$ .



Fonte: Do autor.

Para obter a estimativa do relevo do embasamento  $S$  (Figura 1) a partir dos dados gravimétricos utilizamos um modelo interpretativo composto por um conjunto de  $M$  prismas retangulares justapostos ao longo do eixo  $x$  (Figura 2). Todos os prismas possuem os topos localizados na superfície terrestre, apresentam a mesma espessura horizontal  $\Delta x$  (Figura 2) e são infinitos na direção  $y$ .

**Figura 2** - Observações gravimétricas  $g^0$  e o modelo interpretativo consistido de um conjunto de  $M$  prismas retangulares justapostos com  $j$ -ésima espessura  $p_j$ .



Fonte: Do autor.

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

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

em que  $F(x_i, p_j, \Delta\rho)$  é uma função não linear (TALWANI; WORZEL; LANDISMAN, 1959) que calcula a anomalia  $g_i(\mathbf{p})$  na posição  $x_i$  devido o  $j$ -ésimo prisma de espessura  $p_j$  e contraste de densidade constante,  $\Delta\rho$ .

O problema de inversão gravimétrica consiste em estimar o vetor  $\mathbf{p}$ , a partir do vetor  $\mathbf{g}^0$  contendo as anomalias gravimétricas. A solução deste problema requer que os dados observados sejam ajustados pela equação (1), o que pode ser obtido através da minimização do seguinte funcional não linear:

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

em que  $\|\cdot\|_2$  é a norma Euclidiana e  $\mathbf{g}(\mathbf{p})$  é um vetor  $N$ -dimensional contendo a anomalia teórica (expressão 1), produzida pelo modelo interpretativo e cujas componentes são computadas nas mesmas localizações espaciais das observações do vetor  $N$ -dimensional  $\mathbf{g}^0$ . O problema inverso de estimar o vetor  $\mathbf{p}$  que minimiza o funcional (expressão 2) é mal posto por apresentar soluções instáveis e não únicas (HADAMARD, 1902). Para obter soluções estáveis e únicas incorporamos informação geológica a priori sobre as características da superfície do relevo do embasamento através da técnica de regularização da Variação Total (VT) (MARTINS et al., 2011; LIMA et al., 2011).

A técnica da regularização VT estima soluções estáveis permitindo o delineamento de discontinuidades locais no relevo do embasamento das bacias sedimentares através do funcional da VT dado por:

$$\phi^{VT} = \|\mathbf{R}\mathbf{p}\|_1 = \sum_{i=1}^{M-1} |[\mathbf{R}\mathbf{p}]_i|, \quad (3)$$

em que  $\|\cdot\|_1$  é a norma  $L_1$  e  $\mathbf{R}$  é uma matriz de primeiras derivadas discretas cujas linhas contém apenas dois elementos não nulos iguais a 1 e  $-1$ , localizados nas colunas correspondentes aos parâmetros adjacentes  $i$  e  $i+1$ .

Lima (2009) apresentou a técnica da regularização da VT a partir do seguinte problema matemático:

$$\min_{\mathbf{p}} \phi^{VT}, \quad (4)$$

sujeito a

$$\Omega(\mathbf{p}) = N\delta, \quad (5)$$

em que  $\delta$  é uma estimativa da variância do ruído contido nos dados. Utilizando o método da função penalty no problema dado pelas expressões 4 e 5, obtemos a seguinte equação matemática

$$\min_{\mathbf{p}} \left\| \mathbf{g}^0 - \mathbf{g}(\mathbf{p}) \right\|_2^2 + \alpha \|\mathbf{Rp}\|_1, \quad (6)$$

em que o parâmetro  $\alpha$  é um escalar não negativo, que controla de acordo com o que o interprete deseja, o quão estável e o quão abrupta é a solução (estimativas das espessuras dos prismas) produzindo ajuste nas observações,  $\mathbf{g}(\mathbf{p})$ , dentro da precisão experimental.

No entanto, a expressão (6) apresenta problemas de singularidades numéricas não tendo garantia de ser diferenciável em todo o domínio de interesse. Para contornar este problema utilizaremos a seguinte aproximação (BERTETE-AGUIRRE; CHERKAEV; ORISTAGLIO, 2002; LIMA, 2009; MARTINS et al., 2011)

$$\min_{\mathbf{p}} \left\| \mathbf{g}^0 - \mathbf{g}(\mathbf{p}) \right\|_2^2 + \alpha \sum_{i=1}^{M-1} \sqrt{[\mathbf{Rp}]_i^2 + \beta^2}, \quad (7)$$

em que  $\beta$  é um valor pequeno, da ordem de  $10^{-4}$  e fixo neste trabalho, introduzido para restaurar a diferenciabilidade da função-objetivo (equação 6). Utilizaremos neste trabalho a mesma técnica de otimização que Lima (2009) usou para resolver o problema de minimização da expressão (7), ou seja, aplicamos a estratégia do método de Marquardt num algoritmo iterativo do método de otimização Quasi-Newton. O algoritmo termina quando alcança o número máximo de iterações permitido ou quando satisfaz o critério de convergência pré-estabelecido. Usaremos neste trabalho o mesmo critério de convergência que Lima (2009) adotou. Lima (2009) admite que a convergência ocorre quando, durante cinco iterações sucessivas, a diferença entre os valores da função-objetivo se mantém dentro de um limite previamente definido pelo intérprete.

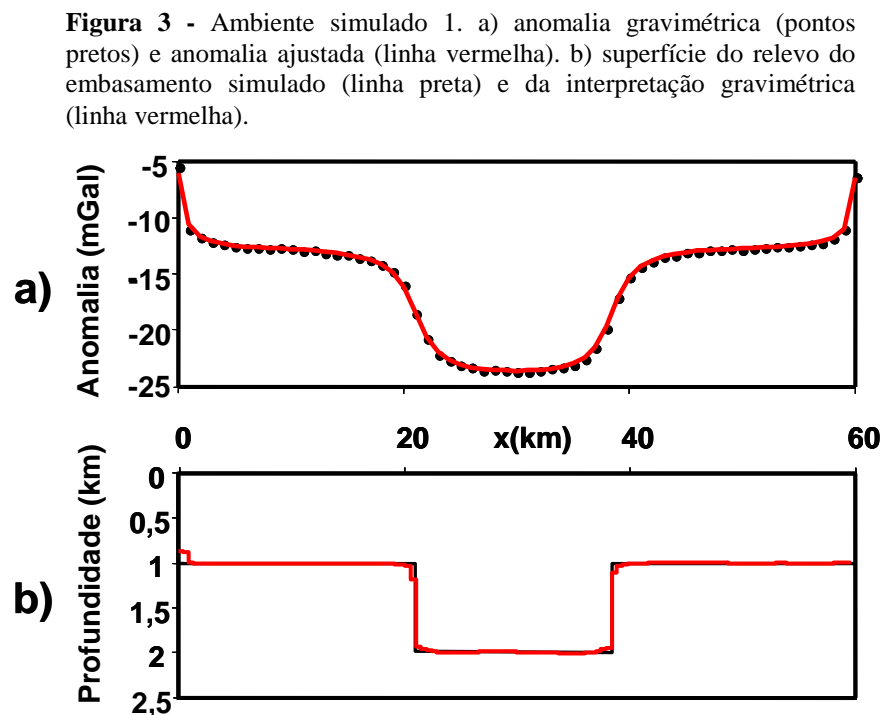
### 3 TESTES EM DADOS SINTÉTICOS

Nesta seção verificamos o desempenho da metodologia (Capítulo 2) aplicando a técnica da regularização da VT aos conjuntos de anomalias gravimétricas produzidas por dois ambientes simulados de bacias sedimentares, cujos relevos do embasamento apresentam, localmente, descontinuidades abruptas.

#### 3.1 AMBIENTE SIMULADO 1

A Figura 3a apresenta 61 observações gravimétricas (pontos pretos, Figura 3a) regularmente espaçadas entre si de 1 km ao longo de aproximadamente 60 km de extensão geradas por uma bacia sedimentar simulada bidimensional com contraste de densidade  $\Delta\rho = -0,3 \text{ g/cm}^3$ . A superfície do relevo do embasamento (linha preta, Figura 3b) apresenta 2 km de profundidade máxima e descontinuidades abruptas locais. As observações gravimétricas foram contaminadas com ruído pseudo-aleatório Gaussiano com média nula e desvio padrão de 0,1 mGal. O modelo interpretativo possui 128 prismas regularmente espaçados ao longo da extensão horizontal de 60 km.

Apresentamos na Figura 3a o ajuste dos dados gravimétricos (linha contínua vermelha) usando o regularizador da VT  $\alpha = 1,5$ . A solução usando a regularização da VT apresentou uma estimativa da superfície do relevo do embasamento (linha vermelha, Figura 3b) próxima ao relevo do embasamento do ambiente simulado 1 (linha preta, Figura 3b).

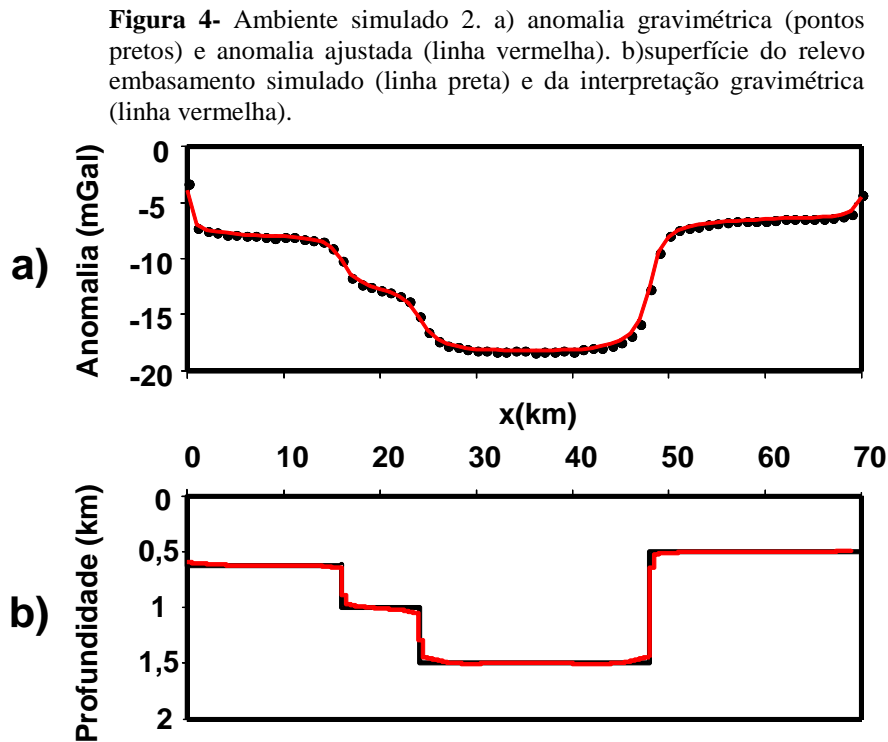


Fonte: Do autor.

### 3.2 AMBIENTE SIMULADO 2

A Figura 4a apresenta 71 observações gravimétricas (pontos pretos na Figura 4a) com espaçamento regular de 1 km ao longo de aproximadamente 70 km de extensão geradas por uma bacia sedimentar simulada 2D. Para este ambiente simulado adotamos o contraste de densidade  $\Delta\rho = -0,3 \text{ g/cm}^3$ . A superfície do relevo do embasamento (linha preta na Figura 4b) apresenta 1,5 km de profundidade máxima e descontinuidades abruptas locais. As observações gravimétricas foram contaminadas com ruído pseudo-aleatório Gaussiano com média nula e desvio padrão de 0,1 mGal. O modelo interpretativo possui 142 prismas regularmente espaçados ao longo da extensão horizontal de 70 km.

Aplicando o regularizador da VT  $\alpha = 5$  obtivemos o ajuste da anomalia gravimétrica (linha vermelha, Figura 4a) e uma estimativa do relevo do embasamento (linha vermelha, Figura 4b) próxima ao relevo do embasamento do ambiente simulado 2 (linha preta, Figura 4b).



Fonte: Do autor.

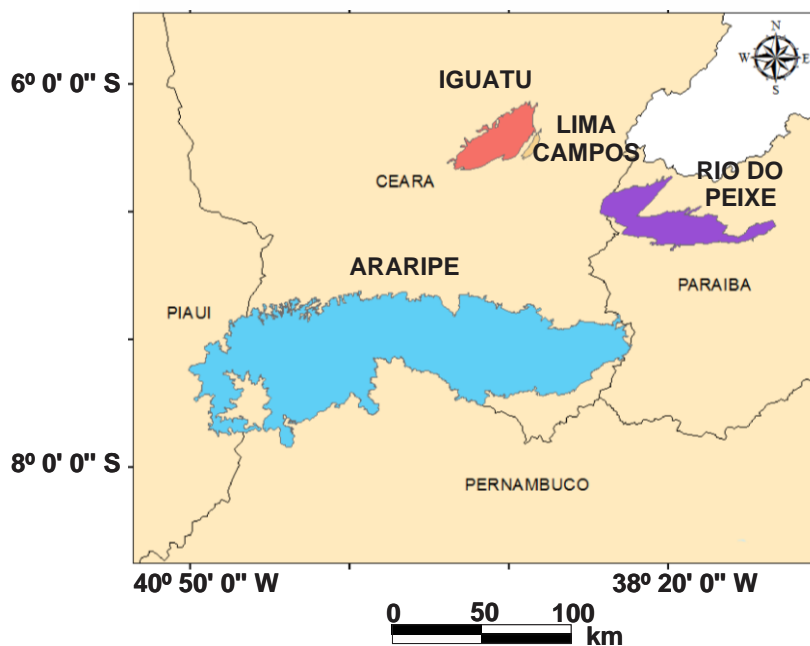
## 4 APLICAÇÃO EM DADOS REAIS

Nesta seção apresentamos as interpretações gravimétricas bidimensionais usando o funcional regularizador da VT em dados gravimétricos das Bacias do Vale do Cariri, os quais, foram digitalizados por nós a partir das imagens bitmaps dos mapas de anomalias residuais Bouguer (CASTRO; CASTELO BRANCO, 1999) que apresentam curvas de contorno no intervalo de 4 em 4 mGal. Comparamos as interpretações bidimensionais do relevo do embasamento com seções xz de interpretações gravimétricas tridimensionais apresentadas por Castro e Castelo Branco (1999). Estas seções xz apresentam as estimativas do relevo do embasamento obtidas a partir de inversões gravimétricas usando o método de Rao e Babu (1991) e contraste de densidade constante (CASTRO; CASTELO BRANCO, 1999).

### 4.1 BACIAS SEDIMENTARES DO VALE DO CARIRI

A região do Vale do Cariri engloba as principais bacias interiores cretáceas do Nordeste do Brasil. As bacias do Vale do Cariri localizam-se entre os estados do Ceará, Paraíba, Pernambuco e Piauí (Figura 5).

**Figura 5** - Mapa de localização geográfica das bacias do Vale do Cariri. Bacia do Araripe (Azul), Bacia de Iguatu (Vermelho) e Bacia Lima Campos (Laranja), Bacia Rio do Peixe (Roxo).



Fonte: Do autor.

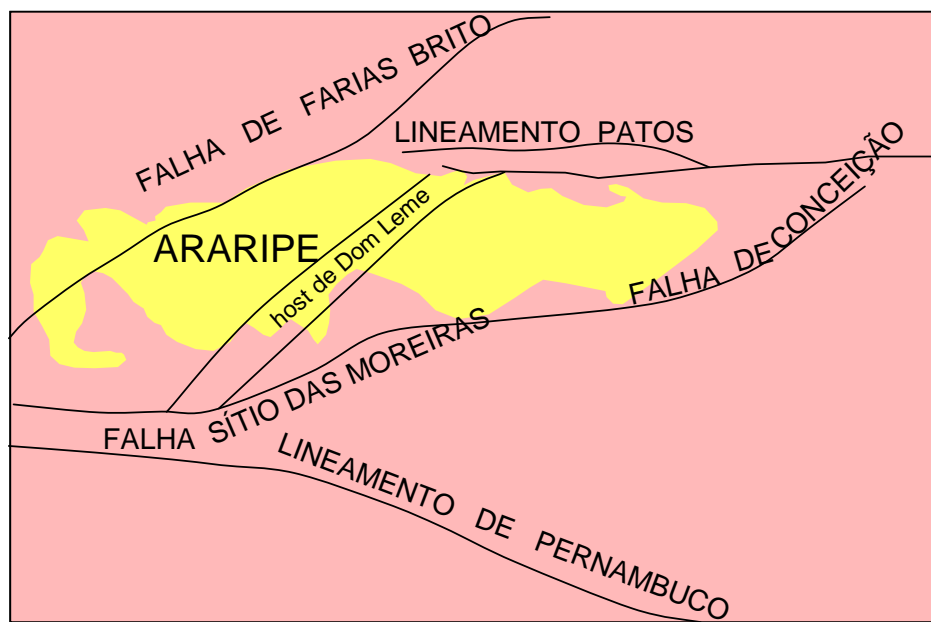
A origem e evolução destas bacias estão relacionadas com os processos geológicos e tectônicos do cretáceo, ligados à abertura do oceano Atlântico, ocasionadas por um regime transcorrente no qual esforços tracionais levaram à formação de falhas normais com abertura de grabens e hemi-grabens na região central do Nordeste brasileiro.

#### 4.2 BACIA DO ARARIPE

A Bacia do Araripe é a mais extensa das bacias interiores do Nordeste do Brasil, situada na chapada do Araripe e na porção sul do Vale do Cariri e estende-se por uma área de 9 000 km<sup>2</sup>. Encontra-se dentro da Província Estrutural de Borborema, uma área marcada por diversos falhamentos do embasamento pré-cambriano (Figura 6) (ALMEIDA et al., 1977).

O arcabouço estrutural da Bacia Araripe é composto por horsts e grabens produzidos por eventos de rifteamento do eocretáceo (ALMEIDA, 2010). Os limites estruturais da bacia (Figura 6) são definidos por grandes lineamentos precambrianos: ao norte pelo ramo principal do Lineamento Patos; a noroeste pela extremidade sudoeste da falha de Farias Brito; ao sul pela falha de Sítio dos Moreiras, que converge na extremidade sudoeste para o Lineamento de Pernambuco; a leste e sudeste pela falha da Conceição, que converge em sua extremidade nordeste para o Lineamento Patos (CAJAZEIRAS, 2007).

**Figura 6** – Bacia Araripe: Ilustração esquemática das principais falhas e lineamentos.



Fonte: Almeida (2010).

A geometria estrutural interna da bacia Araripe é constituída por duas sub-bacias *Cariri* e *Feitoria* separadas pelo alto estrutural ou *horst* de Dom Leme (ALMEIDA, 2010; SUCERQUIA, 2006 ):

(i) sub-bacia do *Cariri* ou *Leste* está limitada a oeste pelo horst de Dom Leme e pela falha de Crato, e a nordeste pela falha de Missão Velha, mergulha suavemente para o SE. Apresenta espessura máxima de 1,4 km;

(ii) a sub-bacia de *Feitoria* ou *Oeste* está quase completamente soterrada sob a chapada do Araripe, limita-se a leste com o horst de Dom Leme e a oeste com a falha de Serrolândia, e tem espessura máxima estimada de 1,9 km.

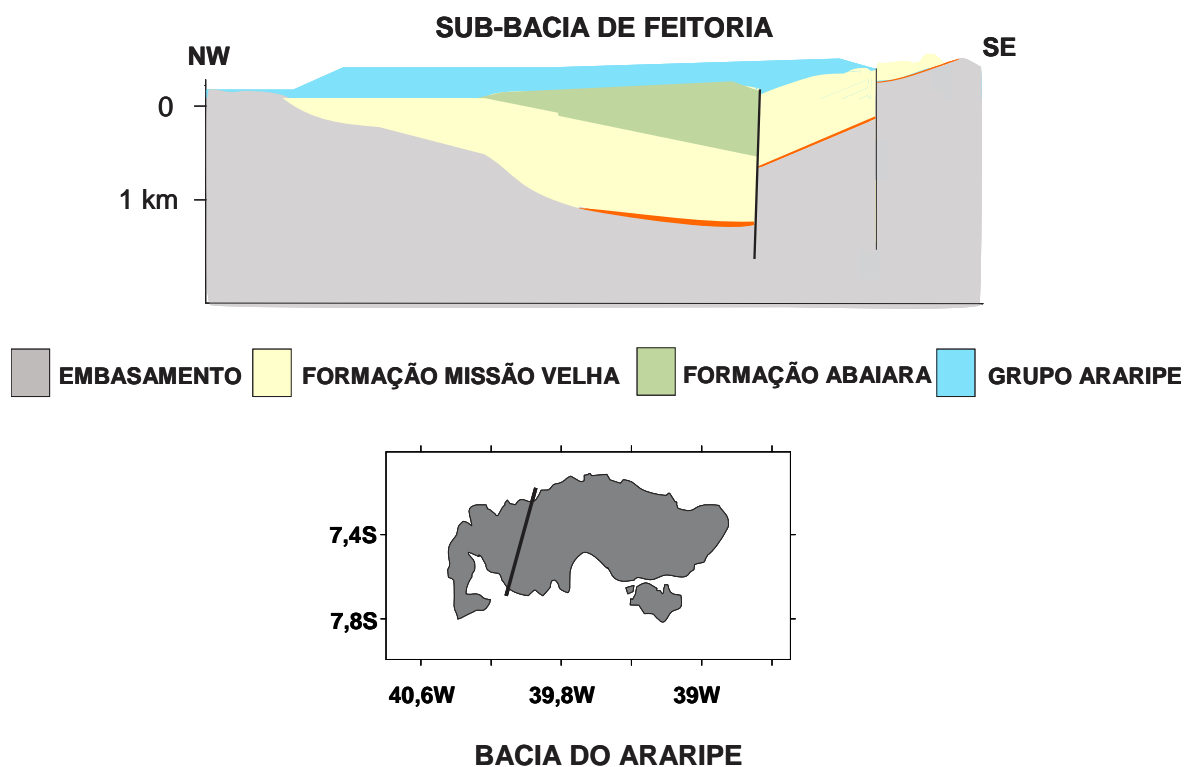
A evolução sedimentar da bacia do Araripe (Figura 7) compreende:

(1) O Grupo Araripe composta pela Formação Mauriti (constituída por conglomerados, arenitos conglomeráticos e componentes de leques aluviais) e pela Formação Brejo Santo (constituída por folhelhos, argilitos, calcários argilosos e siltitos).

(2) A Formação Missão Velha que consiste de depósitos de rios meandantes (basicamente constituída por arenitos grossos).

(3) A Formação Abaiara composta por arenitos finos e siltitos bem selecionados interpretados como depósitos de sistemas flúvio-lacustres (ASSINE, 2007).

**Figura 7** - Localização geográfica da bacia sedimentar do Araripe. Perfil transversal da sub-bacia do Araripe orientado NW-SE. Secção geológica simplificada.

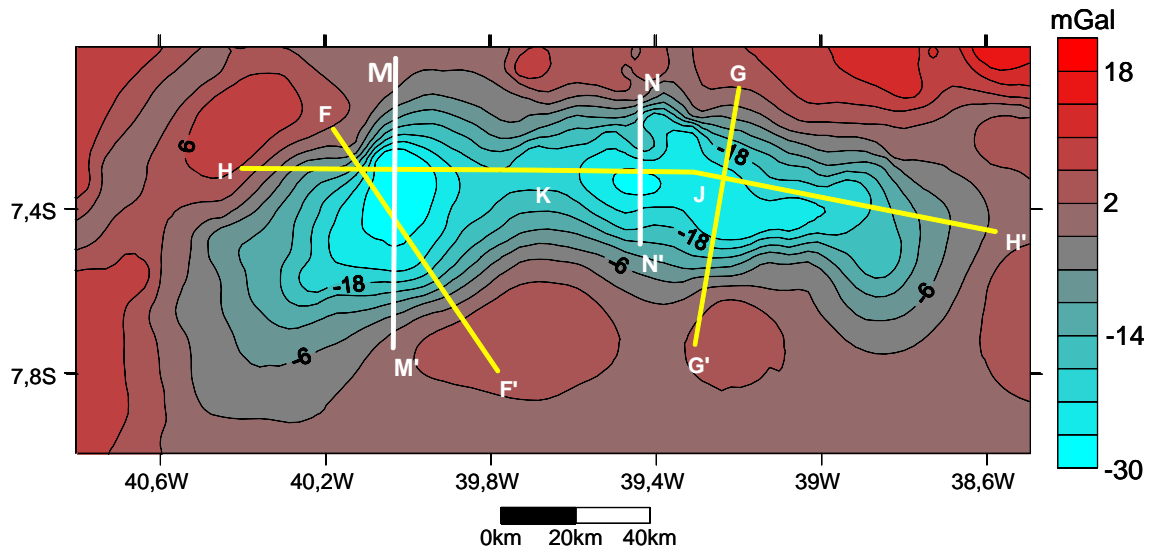


Fonte: Silva (2003).

#### 4.2.1 Interpretação gravimétrica da Bacia do Araripe

O mapa de anomalias Bouguer da Bacia de Araripe (Figura 8) mostra anomalias negativas na direção de alongamento WE, limitadas a norte pelas zonas de cisalhamento do Lineamento Patos. Aplicamos a interpretação gravimétrica bidimensional os perfis gravimétricos HH', FF', GG', MM' e NN' localizados no mapa de anomalia Bouguer (Figura 8). Em todos os perfis desprezamos as anomalias positivas localizadas nos seus extremos.

**Figura 8** - Mapa da anomalia residual Bouguer, Bacia do Araripe, nordeste brasileiro. Intervalos entre linhas de isovalores de 4 mGal. Perfis FF', GG'e HH' (linhas amarelas) e Perfis MM' e NN' (linhas brancas).



Fonte: Castro e Castelo Branco (1999).

Utilizamos neste trabalho o contraste de densidade  $\Delta\rho = -0,5 \text{ g/cm}^3$  empregado por Castro e Castelo Branco (1999). Para obter o contraste de densidade da Bacia do Araripe, Castro e Castelo Branco (1999) utilizaram diferentes valores de  $\Delta\rho$  nas inversões gravimétricas usando o método de Rao e Babu (1991) e usaram a informação da profundidade do embasamento, poço 2-AP-1-CE, de 1 480m (PONTE; HASHIMOTO; DINO, 1991) na interpretação gravimétrica tridimensional. Neste procedimento Castro e Castelo Branco (1999) estimaram o contraste de densidade  $\Delta\rho = -0,5 \text{ g/cm}^3$  que levou a uma profundidade de 1 500 m para a localização do poço 2-AP-1-CE.

O perfil gravimétrico HH' apresenta extensão de 200 km orientado na direção W-E, Figura 8. A interpretação gravimétrica do perfil HH' é apresentada através da interpretação gravimétrica individual de três sub-perfis HK, KJ e JH':

(I) para os sub-perfis HK e JH' utilizamos os estabilizadores da VT  $\alpha = 8$  e  $\alpha = 4$ , respectivamente, e modelo interpretativo de 80 prismas, para cada sub-perfil;

(II) para o sub-perfil KJ adotamos o estabilizador  $\alpha=3$  e o modelo interpretativo de 60 prismas.

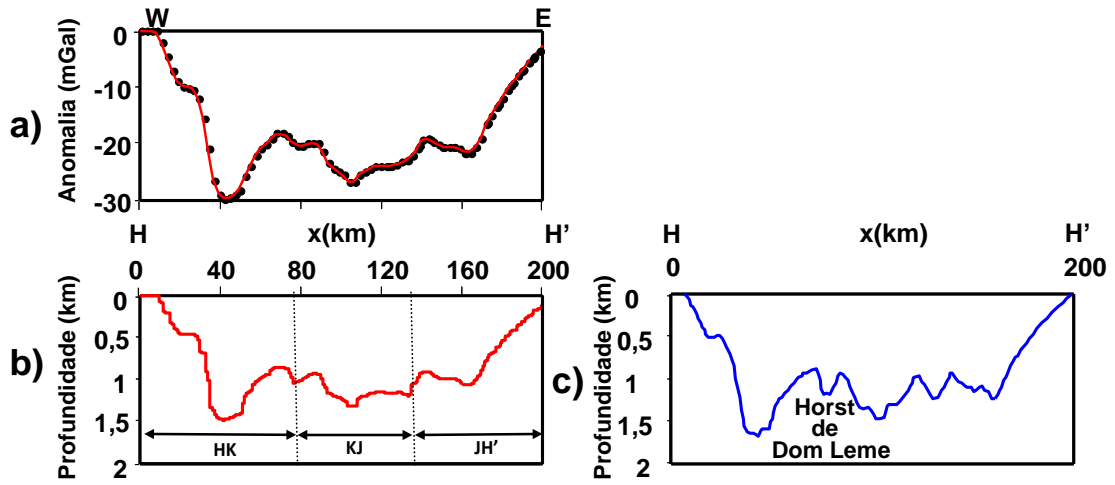
Utilizando no procedimento de inversão gravimétrica bidimensional as informações dos itens (I) e (II) obtivemos interpretações do relevo do embasamento ajustando os dados gravimétricos dos três sub-perfis HK, KJ e JH'. Apresentamos na Figura 9a os perfis gravimétricos HH' formado pela justaposição das anomalias (pontos pretos) e dos ajustes (linha vermelha) gravimétricos dos sub-perfis (HK, KJ e JH'). Na Figura 9b apresentamos a interpretação integrada do relevo do embasamento referentes aos sub-perfis HK, KJ e JH'.

O perfil gravimétrico FF' (pontos pretos, Figura 10a) na direção NW-SE (Figura 8) possui extensão horizontal de 60 km. Utilizando o parâmetro de regularização da VT  $\alpha = 8$  e o modelo interpretativo composto de 80 prismas, obtivemos um ajuste aceitável nos dados gravimétricos e uma interpretação para o relevo do embasamento (linhas vermelhas, Figuras 10a e b).

O perfil gravimétrico GG' (pontos pretos, Figura 11a) no qual foi aplicado o procedimento de inversão bidimensional possui 59 km de extensão orientado na direção NE-SW (Figura 8). Estabelecemos o estabilizador da VT  $\alpha = 1$  e o conjunto de 60 prismas para o modelo interpretativo. A Figura 11b apresenta uma interpretação do relevo do embasamento (linha vermelha) produzindo ajuste aceitável (linha vermelha, Figura 11a) nos dados gravimétricos.

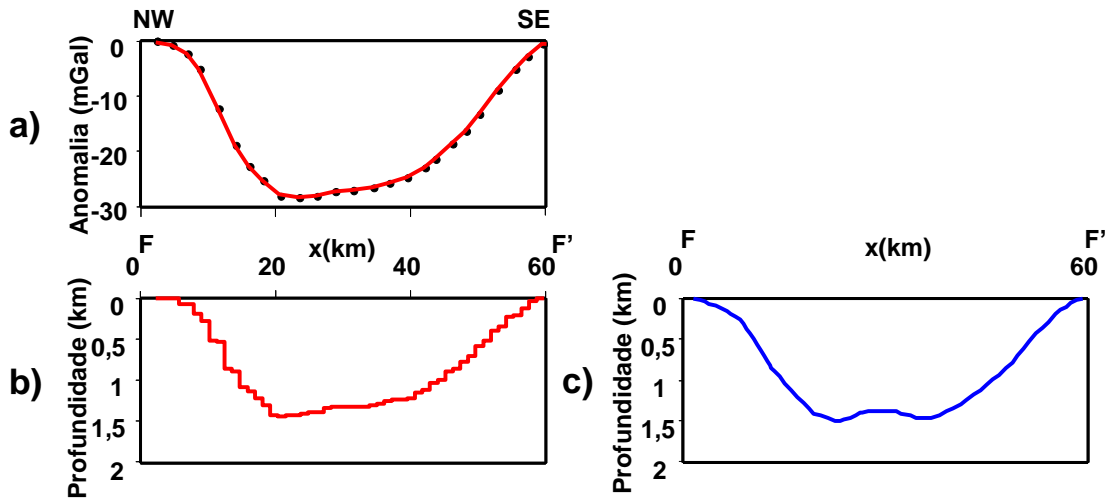
Os perfis gravimétricos MM' e NN' (pontos pretos, Figura 12a e 13a respectivamente) apresentam direção N-S (Figura 8) com 78 km e 59 km de extensão horizontal, respectivamente. Apresentamos nas Figuras 12a e 13a os ajustes aceitáveis aos dados gravimétricos (linha vermelha) usando no procedimento de inversão o parâmetro de regularização da VT  $\alpha = 6$ , para ambos os perfis, produzindo as interpretações dos relevos do embasamento com os modelos interpretativos composto de 108 prismas (Figura 12b) e 82 prismas (Figura 13b).

**Figura 9-** Perfil HH' da Bacia do Araripe. a) Anomalia gravimétrica (pontos pretos) e anomalia ajustada (linha vermelha contínua). b) Interpretação do relevo do embasamento via VT. c) Seção xz da interpretação do relevo do embasamento (linha azul) apresentada por Castro e Castelo Branco (1999). Localização espacial do perfil de HH' orientado na direção W-E.



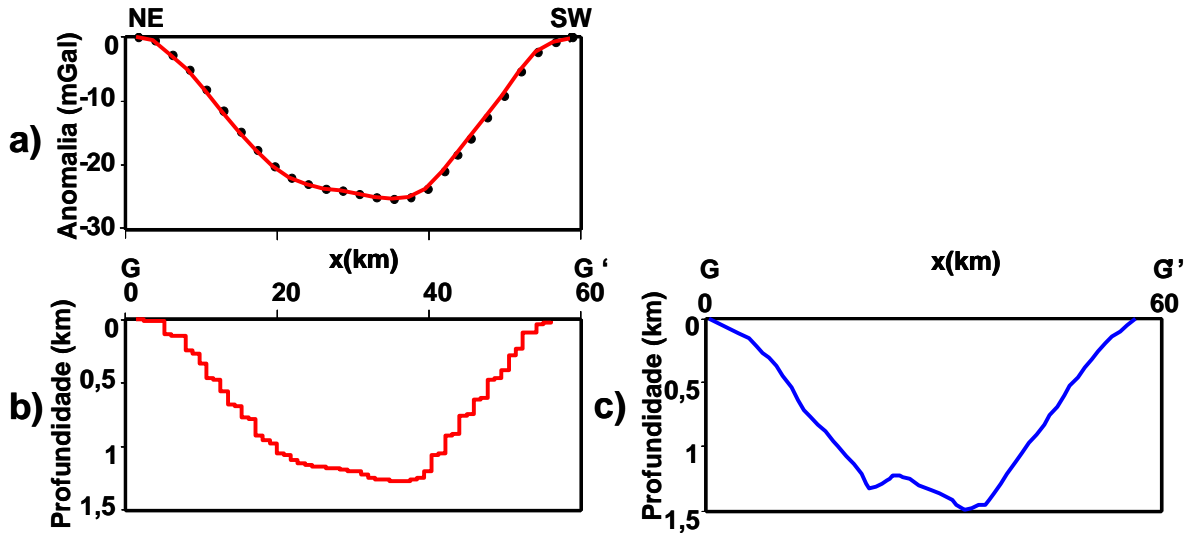
Fonte: Do autor.

**Figura 10 -** Perfil FF' da Bacia do Araripe: Sub-bacia Feitoria. a) Anomalia gravimétrica (pontos pretos) e anomalia ajustada (linha vermelha contínua). b) Interpretação do relevo do embasamento via VT. c) Seção xz da interpretação do relevo do embasamento (linha azul) apresentada por Castro e Castelo Branco (1999).



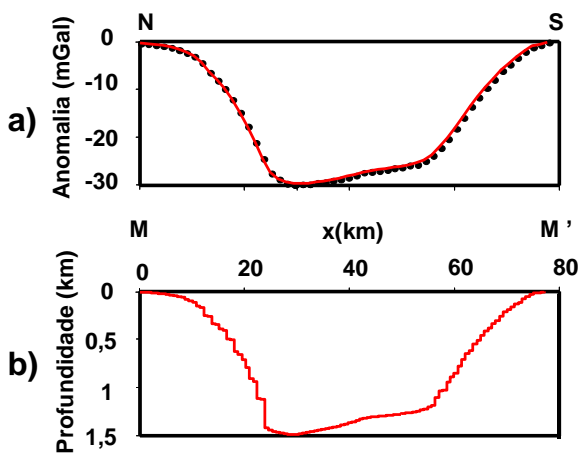
Fonte: Do autor.

**Figura 11** - Perfil GG' da Bacia do Araripe: Sub-bacia Cariri. a) Anomalia gravimétrica (pontos pretos) e anomalia ajustada (linha vermelha contínua). b) Interpretação do relevo do embasamento via VT. c) Seção xz da interpretação do relevo do embasamento (linha azul) apresentada por Castro e Castelo Branco (1999). Localização espacial do perfil de GG' orientado na direção NE-SW.



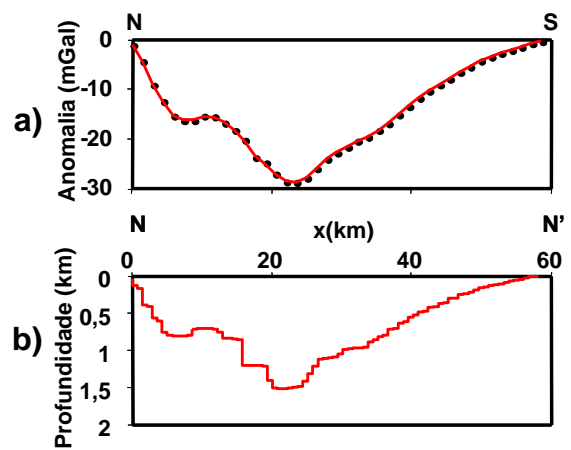
Fonte: Do autor.

**Figura 12** - Perfil MM' da Bacia do Araripe: Sub-bacia Feitoria. a) Anomalia gravimétrica (pontos pretos) e anomalia ajustada (linha vermelha contínua). b) Interpretação do relevo do embasamento via VT.



Fonte: Do autor.

**Figura 13** - Perfil NN' da Bacia do Araripe: Sub-bacia Cariri. a) Anomalia gravimétrica (pontos pretos) e anomalia ajustada (linha vermelha contínua). b) Interpretação do relevo do embasamento via VT.



Fonte: Do autor.

Comparamos as interpretações gravimétricas bidimensionais obtidas via inversão da VT dos perfis HH', FF' e GG' (linhas amarelas, Figura 8) com seções xz das interpretações tridimensionais de Castro e Castelo Branco (1999).

As interpretações bidimensionais do relevo do embasamento para os perfis HH', FF' e GG' usando o regularizador VT (Figuras 9b, 10b e 11b), apresentam profundidades de aproximadamente 1,5 km nos baixos estruturais. Na Figura 9b identificamos o horst de Dom Leme, que separa a Oeste a sub-bacia de Feitoria (Figuras 10b e 12b) e a Leste a sub-bacia de Cariri (Figuras 11b e 13b). A interpretação gravimétrica bidimensional do relevo do embasamento da bacia de Feitoria (Figura 9b), usando o funcional da VT, apresenta descontinuidades verticais mais abruptas do que a interpretação gravimétrica tridimensional do relevo do embasamento (Figura 9c) (CASTRO; CASTELO BRANCO, 1999).

As interpretações gravimétricas tridimensionais e bidimensionais do relevo do embasamento referentes às localizações espaciais dos perfis FF' e GG' (Figuras 10b, 10c, 11b e 11c) determinam formas geométricas de grabens assimétricos colaterais orientados segundo as direções NE-SW para a sub-bacia de Feitoria e WNW-ESE para a sub-bacia de Cariri. As interpretações do relevo do embasamento nas coordenadas dos extremos dos perfis H', F' e G' (Figuras 9b, 9c, 10b, 10c, 11b e 11c) apresentam bordas sul e sudeste do embasamento da bacia com mergulhos mais suaves.

As interpretações gravimétricas bidimensionais dos perfis MM' e NN' do relevo do embasamento apresentam descontinuidades verticais (extremos M e N nas Figuras 12b e 13b), próximas ao extremo norte dos perfis MM' e NN', devido a falhamentos associados ao Lineamento Patos. Próximo ao extremo sul dos perfis MM' e NN', extremos M' e N' nas Figuras 12b e 13b, respectivamente, obtivemos delineamentos dos relevos do embasamento suaves. Identificamos nos perfis MM' e NN' uma geometria interna das sub-bacias de Feitoria (Figura 12b) e de Cariri (Figura 13b) determinada por grabens assimétricos.

As interpretações tridimensionais gravimétricas de Castro e Castelo Branco (1999) estimaram profundidades máximas do relevo do embasamento de 1,6 km para os perfis HH', FF' e GG' (Figuras 9c, 10c e 11c). Como produzimos interpretações gravimétricas bidimensionais de perfis de anomalias gravimétricas de mapas digitalizados estimamos profundidades do relevo do embasamento menores e não conseguimos delinear algumas feições do relevo do embasamento, localizadas nos baixos estruturais das bacias, (Figuras 9b, 10b e 11b) similares àquelas apresentadas por Castro e Castelo Branco (1999) (Figuras 9c, 10c e 11c).

### 4.3 BACIA DO RIO DO PEIXE

A Bacia do Rio do Peixe apresenta uma área superficial de 1 424 km<sup>2</sup> e está localizada na região oeste do Estado da Paraíba (Figura 5), com pequenas porções situadas nos limites do Estado do Ceará. Esta bacia encontra-se entre os domínios estruturais, associadas às faixas Orós-Jaguaribe e Seridó e ao domínio Granjeiro, pertencentes à porção Centro-Norte da Província Borborema (NOGUEIRA; OLIVEIRA; CASTRO, 2004). Situada ao norte do lineamento Patos, esta bacia encontra-se limitada a oeste pela falha de Portalegre e ao sul pela falha de Malta (Figura 14).

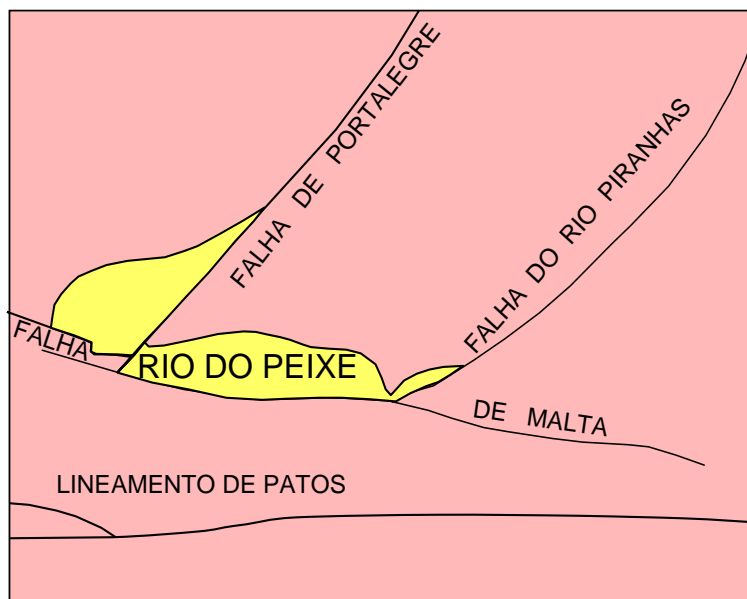
O arcabouço estrutural da bacia é formado por um conjunto de hemi-grabens assimétricos (NOGUEIRA; OLIVEIRA; CASTRO, 2004, CASTRO; CASTELO BRANCO, 1999) basculados para Sul e Sudeste associados a uma larga zona de cisalhamento sinistral que definiu o aparecimento das sub-bacias: Brejo das Freiras, Sousa e Pombal.

(i) A sub-bacia de Brejo das Freiras é alongada na direção NE-SW, de mesma direção da falha de Portalegre (CASTRO; CASTELO BRANCO, 1999). A borda NW deste hemigraben é caracterizada pela justaposição das unidades sedimentares, em não-conformidade, sobre o embasamento. Tais unidades são subordinadamente interceptadas por falhas normais com pequeno rejeito, falhas sintéticas e antitéticas, também presentes no interior do hemigraben (CÓRDOBA et al. 2008).

(ii) A Sub-bacia de Sousa exibe um eixo maior na direção W-E e está limitada ao sul pela falha de Malta (NOGUEIRA; OLIVEIRA; CASTRO, 2004). Este hemigraben apresenta, no limite norte, uma não-conformidade correspondendo à margem flexural e compreendem dois depocentros separados por uma falha normal com direção NE-SW e mergulho para NW (CÓRDOBA et al. 2008). As sub-bacias Sousa e Brejo das Freiras são separadas por um alto estrutural denominado *Alto de Santa Helena*, cujo topo encontra-se a 100 m de profundidade (NOGUEIRA; OLIVEIRA; CASTRO, 2004).

(iii) A Sub-bacia de Pombal está localizada na terminação oriental da Falha de São Gonçalo (SILVA, 2009). O alto estrutural do embasamento conecta a margem flexural desta sub-bacia com a sub-bacia de Sousa (COSTA, 2010), através de uma rampa direcional com suave arqueamento. O limite SE da sub-bacia de Pombal é marcada por uma falha com movimento variando de normal a oblíqua (normal sinistral), ainda balizada por cunhas conglomeráticas associadas a leques aluviais, da Formação Rio Piranhas (SILVA, 2009).

**Figure 14** – Bacia Rio do Peixe: Principais falhas e lineamentos estruturais.

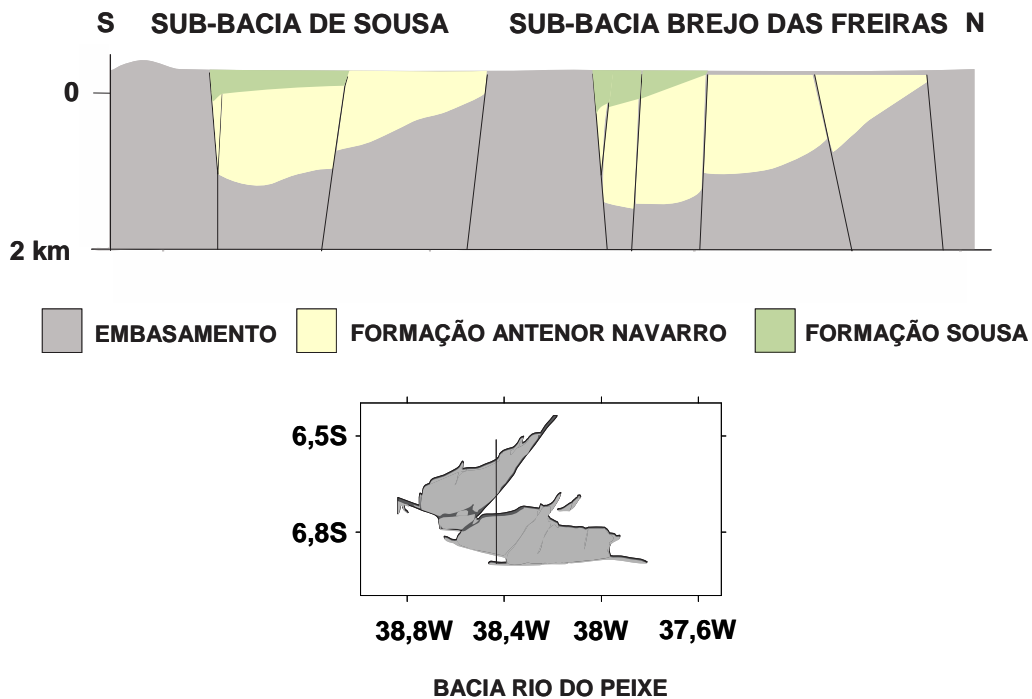


Fonte: ANP, acesso em: 16 de mar 2013.

O arcabouço estratigráfico da Bacia do Rio do Peixe é formado por diferentes litofácies englobadas em três formações Antenor Navarro, Sousa e Rio Piranhas (Figura 15), as quais constituem um único Grupo denominado de Rio do Peixe (CÓRDOBA et al., 2008).

A Formação Antenor Navarro caracteriza-se por conter conglomerados e arenitos conglomeráticos desorganizados, principalmente arenitos conglomeráticos com estratificações cruzadas tabulares e acanaladas tais arenitos representam sistemas de leques aluviais e fluviais (CÓRDOBA et al., 2008). A Formação Sousa é composta por folhelhos e siltitos intercalados a arenitos que exibem desde marcas onduladas, laminações plano-paralelas e cruzadas até gretas de contração, e calcretes de sistemas deposicionais distintos, que vão desde sistemas subaquosos até aqueles formados por drenagens efêmeras (CÓRDOBA et al., 2008). A Formação Rio Piranhas, por sua vez, agrega arenitos finos a grossos com estratificações cruzadas, intercalados a pelitos. Esta formação apresenta também arenitos grossos e conglomerados desorganizados que representam leques aluviais de margem falhada associada a sistemas fluviais entrelaçados (CÓRDOBA et al., 2008).

**Figura 15** – Localização Geográfica da Bacia sedimentar Rio do Peixe. Perfil transversal da bacia N-S. Secção geológica simplificada.



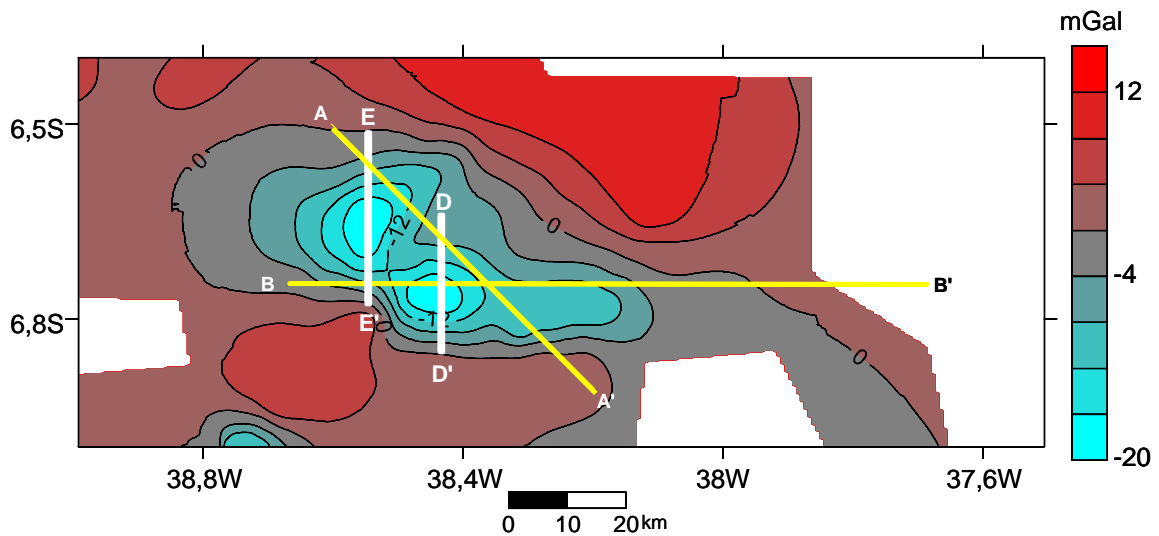
Fonte: ANP, acesso em: 16 de mar 2013.

#### 4.3.1 Interpretação gravimétrica da Bacia do Rio do Peixe

Na análise do mapa de anomalias Bouguer residual da Bacia sedimentar Rio do Peixe identificamos dois baixos gravimétricos, referentes às duas sub-bacias *Brejo das Freiras* (SBF) e *Sousa* (SSO), separadas pelo Alto de Santa Helena (Figura 16). A sub-bacia Brejo das Freiras apresenta direção NE na mesma direção da falha de Portalegre, enquanto que a sub-bacia de Sousa apresenta direção de alongamento E-W que foi estruturalmente determinada pela direção do Lineamento Patos. Neste trabalho não apresentaremos as interpretações da sub-bacia Pombal devido ao mapa da anomalia gravimétrica apresentado por Castro e Castelo Branco (1999) não apresentar cobertura gravimétrica adequada. Na Figura 16 apresentamos as localizações espaciais dos perfis AA', BB', DD' e EE' nos quais desprezamos as anomalias gravimétricas positivas localizadas nos seus extremos.

Adotamos o contraste de densidade  $\Delta\rho = -0,35 \text{ g/cm}^3$  que Castro e Castelo Branco (1999) utilizaram no procedimento de inversão gravimétrica tridimensional. Usando este contraste de densidade Castro e Castelo Branco (1999) estimaram uma profundidade do embasamento de 900 m para uma localidade em que o embasamento apresenta 989,9 m de profundidade.

**Figura 16** - Mapa da anomalia residual Bouguer. Bacia do Rio do Peixe, Nordeste brasileiro. Intervalos entre linhas de isovalores de 4 mGal. Perfis AA', BB' (linhas amarelas), Perfis DD' e EE' (linhas brancas).



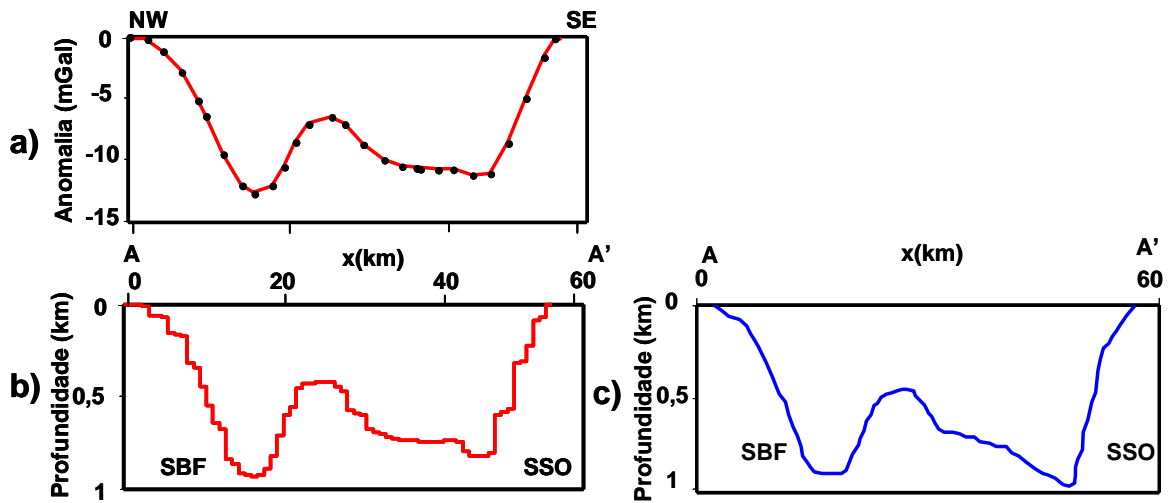
Fonte: Castro e Castelo Branco (1999).

O perfil gravimétrico AA' (pontos pretos, Figura 17a) na direção NW-SE possui extensão horizontal de 56 km. Utilizamos o modelo interpretativo composto de 68 prismas para produzir um ajuste aceitável nos dados gravimétricos e uma interpretação para o relevo do embasamento (linhas vermelhas, Figuras 17 a e b) aplicando o parâmetro de regularização da VT  $\alpha = 1,55$ .

O perfil gravimétrico BB' (pontos pretos, Figura 18a) no qual aplicamos o procedimento de inversão bidimensional possui 80 km de extensão orientado na direção W-E. Para o procedimento de inversão estabelecemos o estabilizador da VT  $\alpha = 0,5$  e o conjunto de 80 prismas para o modelo interpretativo. A Figura 18b apresenta uma interpretação do relevo do embasamento produzindo ajuste aceitável nos dados gravimétricos (linha vermelha, Figura 18a).

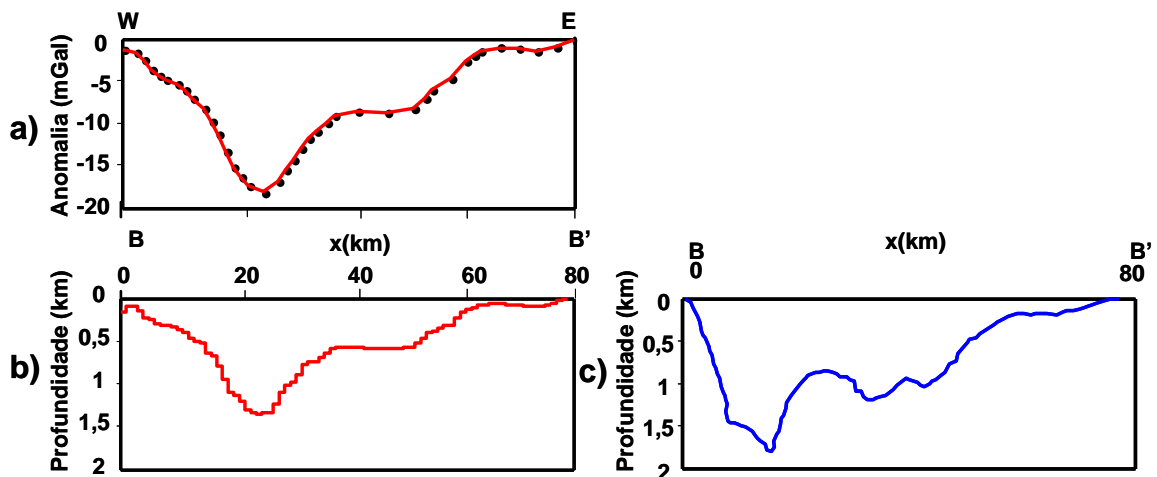
Os perfis EE' e DD' (pontos pretos, Figura 19a e 20a respectivamente) apresentam direção N-S (Figura 16) com 23,5 km e 29 km de extensão horizontal, respectivamente. Apresentamos nas Figuras 19a e 20a os ajustes aceitáveis aos dados gravimétricos (linha vermelha) usando no procedimento de inversão o parâmetro de regularização da VT  $\alpha = 6,5$ , para ambos os perfis, o que resultou nas interpretações dos relevos dos embasamentos com os modelos interpretativos composto de 80 prismas (Figura 19b) e de 90 prismas (Figura 20b).

**Figura 17** - Perfil AA' da Bacia do Rio do Peixe. a) Anomalia gravimétrica (pontos pretos) e anomalia ajustada (linha vermelha contínua). b) Interpretação do relevo do embasamento via VT. c) Seção xz da interpretação do relevo do embasamento (linha azul) apresentado por Castro e Castelo Branco (1999). Localização espacial do perfil de AA' orientado na direção NW-SE. SBF: Sub-Bacia Brejo das Freiras, SSO: Sub-Bacia Sousa.



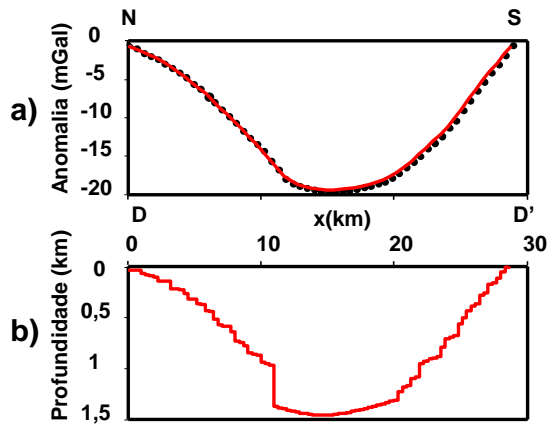
Fonte: Do autor.

**Figura 18** - Perfil BB' da Bacia do Rio do Peixe. a) Anomalia gravimétrica (pontos pretos) e anomalia ajustada (linha vermelha contínua). b) Interpretação do relevo do embasamento via VT. c) Seção xz da interpretação do relevo do embasamento (linha azul) apresentado por Castro e Castelo Branco (1999). Localização espacial do perfil de BB' orientado na direção W-E.



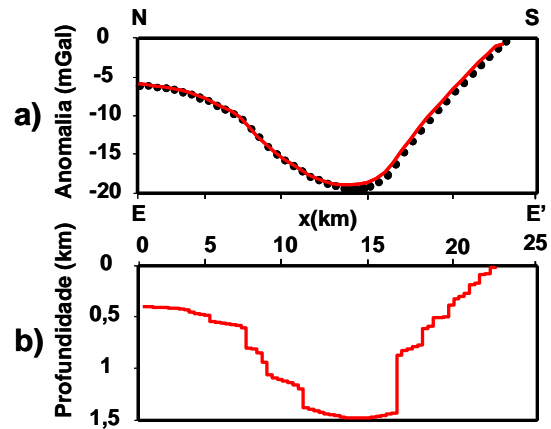
Fonte: Do autor.

**Figura 19** - Perfil DD' da Bacia do Rio do Peixe. a) Anomalia gravimétrica (pontos pretos) e anomalia ajustada (linha vermelha contínua). b) Interpretação do relevo do embasamento via VT.



Fonte: Do autor.

**Figura 20** - Perfil EE' da Bacia do Rio do Peixe. a) Anomalia gravimétrica (pontos pretos) e anomalia ajustada (linha vermelha contínua). b) Interpretação do relevo do embasamento via VT.



Fonte: Do autor.

Comparamos as interpretações gravimétricas bidimensionais dos perfis AA' e BB' (linha amarela, Figura 16) com seções xz das interpretações tridimensionais de Castro e Castelo Branco (1999). As interpretações gravimétricas bidimensionais do relevo do embasamento usando o regularizador da VT (Figuras 17b e 18b) apresentaram profundidades subestimadas de aproximadamente 1,5 km quando comparadas com as respectivas interpretações gravimétricas tridimensionais apresentadas por Castro e Castelo Branco (1999) (Figuras 17c e 18c) que estimaram profundidades maiores que 2 km para os relevos do embasamento.

Na interpretação gravimétrica do perfil AA' (Figura 17b) aplicando a VT, obtivemos uma estimativa de aproximadamente 1 km para a espessura do pacote sedimentar e identificamos nas posições  $x = 17$  km e  $x = 47$  km dois baixos estruturais, correspondentes às sub-bacias Brejo das Freiras (SBF) e Sousa (SSO) separadas por um alto estrutural de aproximadamente 423 m de profundidade. A interpretação gravimétrica do perfil AA' referente à sub-bacia de Sousa apresenta deslocamentos verticais na borda SE no intervalo  $x = 47$  km e  $x = 60$  km (Figura 17b) e profundidade máxima de 800 m. No entanto Castro e Castelo Branco (1999) estimaram profundidade máxima de aproximadamente 1 km para a posição  $x = 47$  km na sub-bacia de Sousa (Figura 17c). Esta diferença de 200 m entre as estimativas das interpretações aplicando os métodos de Rao e Babu (1991) e da VT provavelmente deve-se a falta de dados gravimétricos devido ao processo de digitalização do mapa de anomalias gravimétricas na localização espacial dos dois baixos gravimétricos (Figura 16).

Aplicando a interpretação gravimétrica bidimensional da VT no perfil BB', de direção W-E (Figura 18a) pertencente à sub-bacia Sousa, estimamos para o relevo do embasamento uma profundidade máxima de 1,5 km. Identificamos apenas um depocentro na sub-bacia Sousa na posição  $x = 25$  km (Figura 18a) e delineamos uma superfície do relevo do embasamento suave definindo um patamar no intervalo de  $x = 37$  km e de  $x = 52$  km. Comparamos esta interpretação do relevo do embasamento (Figura 18b) com a seção xz da interpretação apresentada por Castro e Castelo Branco (1999). Utilizando a interpretação tridimensional, Castro e Castelo Branco (1999), identificaram para sub-bacia Sousa (Figura 18c) dois depocentros separados por um alto estrutural de 700 m de profundidade. Castro e Castelo Branco (1999) estimaram profundidades de 1,7 km e 1,1 km para o primeiro e para o segundo depocentro da sub-bacia Sousa na direção W-E do perfil BB' (Figura 18c). Ressaltamos que a diferença entre as interpretações gravimétricas bidimensionais e tridimensionais provavelmente deve-se a falta de dados devido ao processo de digitalização dos baixos gravimétricos.

A interpretação gravimétrica aplicando a VT no perfil DD' (Figura 19b) apresenta profundidade máxima de 1,5 km para o relevo do embasamento da sub-bacia de Sousa, no qual identificamos um deslocamento vertical de aproximadamente 457 m. As estimativas das profundidades do relevo do embasamento da sub-bacia de Sousa delineiam uma superfície do relevo do embasamento suave em direção aos extremos do perfil DD', definindo o graben assimétrico da sub-bacia de Sousa.

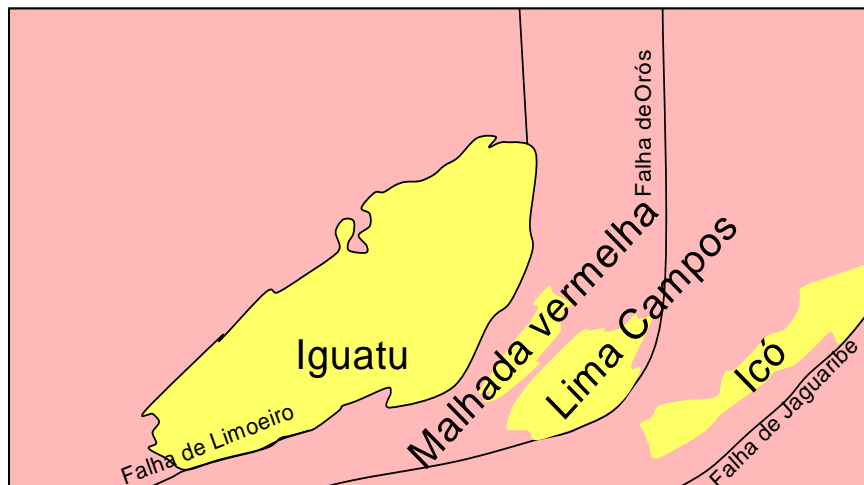
A interpretação gravimétrica bidimensional usando a VT no perfil EE' (Figura 20b), localizado na sub-bacia Brejo das Freiras, apresenta relevo do embasamento suave próximo a posição espacial E e deslocamentos verticais, estimando profundidade máxima de 1,5 km. Em direção ao Sul do perfil identificamos um deslocamento vertical de aproximadamente 560 m no relevo do embasamento. As interpretações bidimensionais (Figura 20b) confirmam a geometria interna de graben assimétrico da sub-bacia Brejo das Freiras.

#### 4.4 BACIA DO IGUATU

A Bacia de Iguatu localizada no sudeste do Ceará (Figura 5) é composta por quatro sub-bacias Iguatu, Malhada Vermelha, Lima Campos e Icó separadas por altos internos do embasamento totalizando uma área descontínua de 1 135 km<sup>2</sup> (ARIMA, 2007) pertencentes à província estrutural de Borborema. Estas bacias interiores orientadas na direção NE-SW representam um agrupamento de bacias rasas com geometria interna do tipo hemi-graben assimétrico condicionadas pelas falhas de Limoeiro, Orós e Jaguaribe (Figura 21). Neste trabalho apresentaremos apenas a sub-bacia Iguatu.

A sub-bacia Iguatu (Figura 21) ocupa uma área de aproximadamente 820 km<sup>2</sup> e sua projeção horizontal tem a forma aproximada de uma elipse orientada segundo a direção NE-SW devido às zonas de cisalhamento neoproterozóicas de Limoeiro e de Orós determinando a geometria interna de hemi-graben para a sub-bacia (CASTRO; CASTELO BRANCO, 1999; BEDREGAL et al., 1992).

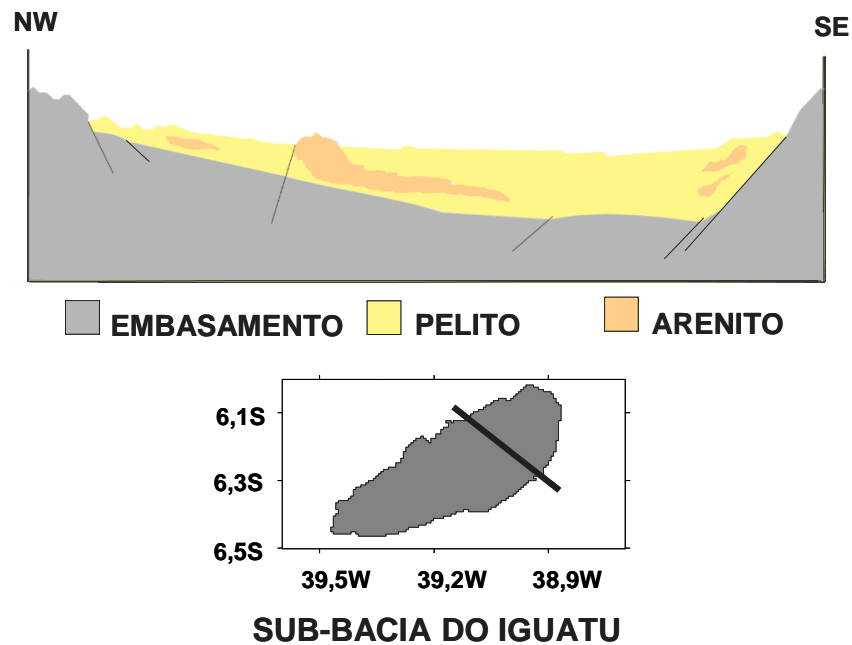
**Figura 21** – Bacia do Iguatu: Ilustração esquemática das principais falhas regionais.



Fonte: adaptada: Castro e Castelo Branco (1999).

O pacote sedimentar da bacia apresenta três formações na sequência deposicional mesozóica: Formação Quixoá (correspondente à Formação Antenor Navarro da bacia do Rio do Peixe; HESSEL, 2006), Formação Malhada Vermelha (correspondente à formação Sousa da bacia do Rio do Peixe; HESSEL, 2006) e Formação Lima Campos (correspondente à Formação piranhas da bacia do Rio do Peixe, HESSEL, 2006).

**Figura 22-** Localização geográfica da sub-bacia sedimentar do Iguatu. Perfil da sub-bacia orientado na direção NW-SE. Secção geológica simplificada.

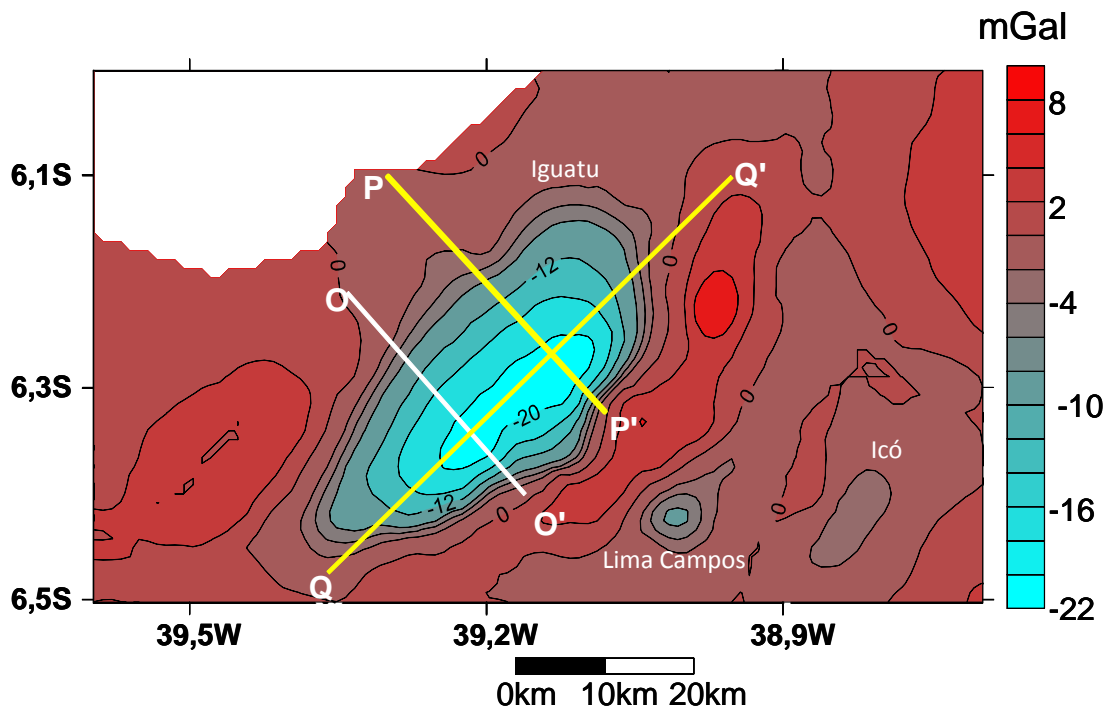


Fonte: Arima (2007).

#### 4.4.1 Interpretação Gravimétrica da Sub-bacia do Iguatu

As anomalias negativas do mapa de anomalia Bouguer da Bacia Iguatu (Figura 23) mostram orientações NE-SW, concordantes com as falhas de Limoeiro, Orós e Jaguaribe. Identificamos no mapa de anomalia Bouguer a sub-bacia do Iguatu apresentando dados gravimétricos também com orientações NE-SW segundo as orientações das falhas de Limoeiro e Orós. Aplicamos a interpretação gravimétrica bidimensional aos perfis de anomalia gravimétrica OO', PP' e QQ' localizados no mapa de anomalia Bouguer (Figura 23) nos quais desprezamos as anomalias positivas localizadas nos extremos dos perfis.

**Figura 23** - Mapa da anomalia residual Bouguer. Bacia do Iguatu, Nordeste brasileiro. Intervalos entre linhas de isovalores de 4 mGal. Perfis OO' (linha branca) e Perfis PP' e QQ' (linha amarela).



Fonte: Castro e Castelo Branco (1999).

Para determinar o contraste de densidade  $\Delta\rho$  da sub-bacia de Iguatu, Castro e Castelo Branco (1999) obtiveram várias interpretações gravimétricas tridimensionais para o relevo do embasamento com diferentes valores para o contraste de densidade. Castro e Castelo Branco (1999) chegaram à determinação do contraste de densidade analisando: as suas várias interpretações gravimétricas tridimensionais, os resultados da interpretação gravimétrica de Bedregal et al. (1992) do relevo do embasamento da sub-bacia de Iguatu e o valor do contraste de densidade,  $\Delta\rho = -0,35 \text{ g/cm}^3$  definido para a Bacia do Rio do Peixe. Após estas análises Castro e Castelo Branco (1999) atribuíram  $\Delta\rho = -0,35 \text{ g/cm}^3$  que adotamos neste trabalho.

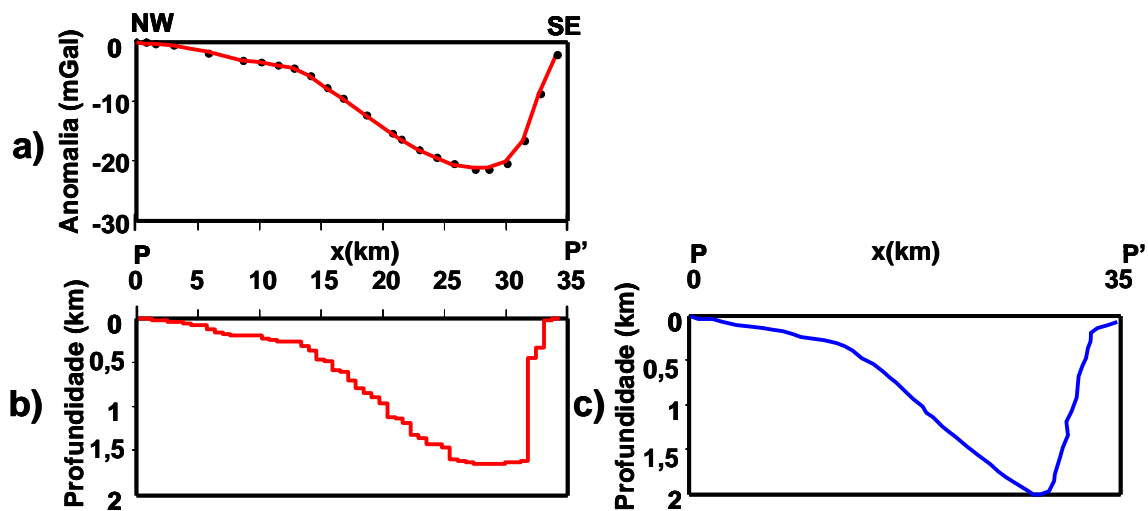
O perfil gravimétrico PP' (pontos pretos, Figura 24a) na direção NW-SE possui extensão horizontal de 35 km. Utilizamos o parâmetro de regularização da VT  $\alpha = 2,2$  para produzir um ajuste aceitável nos dados gravimétricos e uma interpretação para o relevo do embasamento usando o modelo interpretativo composto de 55 prismas (linhas vermelhas, Figuras 24 a e b).

O perfil gravimétrico OO' apresenta 29,1 km de extensão horizontal (pontos pretos, Figura 25a) na direção NW-SE perpendicular a direção de alongamento SW-NE da sub-bacia do Iguatu. Apresentamos nas Figuras 25a o ajuste aceitável (linha vermelha) aos dados

gravimétricos devido à interpretação do relevo do embasamento (Figura 25b) adotando o modelo interpretativo composto de 42 prismas e o parâmetro de regularização da VT  $\alpha = 3$ .

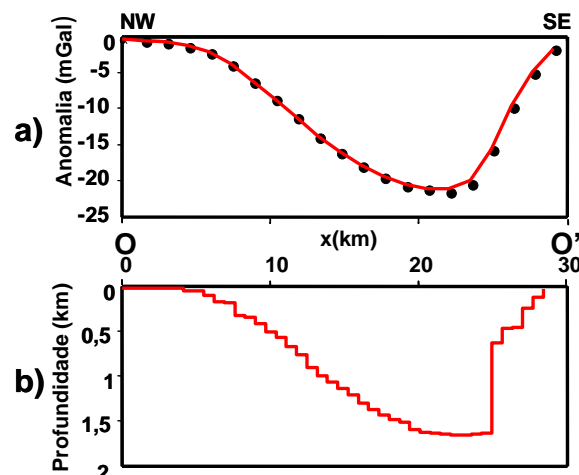
O perfil gravimétrico QQ' (pontos pretos, Figura 26a) na direção SW-NE possui extensão horizontal de 54,3 km. Para o procedimento de inversão bidimensional utilizamos o parâmetro de regularização da VT  $\alpha = 9,5$  e o modelo interpretativo composto de 60 prismas produzindo ajuste aceitável nos dados gravimétricos e uma interpretação para o relevo do embasamento (linhas vermelhas, Figuras 26 a e b).

**Figura 24** - Perfil PP' da sub-bacia do Iguatu. a) Anomalias gravimétricas (pontos pretos) e anomalias ajustadas (linha vermelha contínua). b) Interpretação do relevo do embasamento via VT. c) Seção xz da interpretação do relevo do embasamento (linha azul) apresentado por Castro e Castelo Branco (1999).



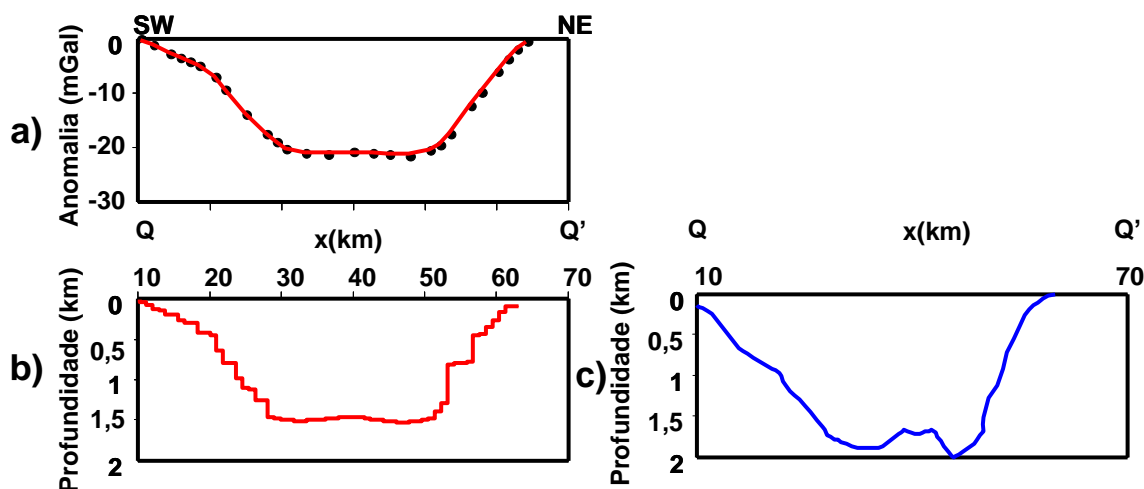
Fonte: Do autor.

**Figura 25** - Perfil OO' da Sub-bacia do Iguatu. a) Anomalias gravimétricas (pontos pretos) e anomalias ajustadas (linha vermelha contínua). b) Interpretação do relevo do embasamento via VT.



Fonte: Do autor.

**Figura 26** - Perfil QQ' da sub-bacia do Iguatu. a) Anomalias gravimétricas (pontos pretos) e anomalias ajustadas (linha vermelha contínua). b) Interpretação do relevo do embasamento via VT. c) Seção xz da interpretação do relevo do embasamento (linha azul) apresentado por Castro e Castelo Branco (1999).



Fonte: Do autor.

Comparamos as interpretações gravimétricas bidimensionais dos perfis PP' e QQ' (linhas amarelas, Figura 23) com seções xz das interpretações tridimensionais de Castro e Castelo Branco (1999).

Nas interpretações gravimétricas bidimensionais da VT dos perfis PP' e OO' (Figura 24b e 25b) observamos que as superfícies dos relevos do embasamento são suaves no intervalo  $x = 0$  e  $x = 25$  km (Figura 24b) e no intervalo  $x = 0$  e  $x = 20$  km (Figura 25b) delineando os baixos estruturais da bacia. A profundidade máxima estimada dos relevos do embasamento é de 1,6 km para ambos os perfis, Figura 24b e 25b. Nas proximidades das posições P' e O' identificamos a presença de um deslocamento vertical nos relevos do embasamento de aproximadamente 1,2 km e 1 km, Figuras 24b e 25b respectivamente. A interpretação gravimétrica tridimensional apresentada por Castro e Castelo Branco (1999), correspondente à mesma localização espacial do perfil PP' (Figura 24c), determinou uma profundidade máxima do relevo do embasamento de 2 km, entretanto, utilizando a interpretação gravimétrica bidimensional usando a VT (Figura 24b) identificamos um deslocamento vertical mais íngreme do que a interpretação apresentada por Castro e Castelo Branco (1999).

A interpretação gravimétrica bidimensional da VT do perfil QQ' (Figura 26b) apresenta superfície do relevo do embasamento suave entre as posições  $x = 10$  km e  $x = 30$  km. Também identificamos no delineamento do relevo do embasamento um baixo estrutural entre as coordenadas  $x = 30$  km e  $x = 50$  km e nas posições compreendidas entre

$x = 50$  km e  $x = 60$  km verificamos deslocamentos verticais no relevo do embasamento. A interpretação gravimétrica tridimensional (CASTRO; CASTELO BRANCO, 1999) para a mesma localização espacial do perfil QQ' (Figura 26c), entre as coordenadas  $x = 50$  km e  $x = 60$  km, apresenta relevo do embasamento suave e profundidade máxima de aproximadamente 2 km.

Como produzimos interpretações gravimétricas bidimensionais de perfis de anomalias gravimétricas de mapas digitalizados, Figuras 24b e 26b, não foi possível interpretarmos a profundidade máxima de 2 km, similares àquelas estimadas aplicando a inversão tridimensional, Figuras 24c e 26c (CASTRO; CASTELO BRANCO, 1999).

As interpretações gravimétricas tridimensionais e bidimensionais do relevo do embasamento, perfis PP', QQ' e OO', (Figuras 24b, 24c, 25b, 26b e 26c) confirmam a geometria interna de um hemi-graben para sub-bacia de Iguatu.

## 5 CONCLUSÕES

Neste trabalho apresentamos uma interpretação gravimétrica bidimensional utilizando a metodologia da Variação Total (VT) no conjunto de perfis gravimétricos das bacias do Vale do Cariri (Bacias Araripe, Rio do Peixe e Iguatu) localizadas na província de Borborema. Os conjuntos de dados gravimétricos foram digitalizados por nós a partir de imagens bitmap do mapa de anomalias residuais Bouguer apresentados por Castro e Castelo Branco (1999).

A metodologia adotada neste trabalho consiste de um método de inversão gravimétrico não linear, que favorece estimativas suaves com descontinuidades locais no relevo do embasamento de uma bacia sedimentar através da sintonização do parâmetro de regularização da VT. Testes em dados sintéticos de dois ambientes geológicos simulados mostraram a eficácia da metodologia da VT em produzir estimativas suaves com descontinuidades locais no relevo do embasamento das bacias simuladas.

Interpretações bidimensionais utilizando o regularizador da VT em perfis gravimétricos das bacias Araripe, Rio do Peixe e Iguatu estimaram profundidades máximas de 1,5 km e descontinuidades abruptas no relevo do embasamento das bacias do Vale do Cariri. Os resultados das interpretações bidimensionais usando a VT nos perfis gravimétricos das bacias Araripe, Rio do Peixe e Iguatu confirmam a geometria interna de grabens e de hemigrabens.

Comparamos os resultados das interpretações gravimétricas tridimensionais apresentadas por Castro e Castelo Branco (1999) com as interpretações bidimensionais utilizando o regularizador da VT. Os resultados das interpretações tridimensionais (CASTRO; CASTELO BRANCO, 1999) produziram profundidades máximas do relevo do embasamento superiores a 1,5 km. Como consequência da aplicação da metodologia bidimensional da VT em dados digitalizados a partir de imagens bitmap dos mapas gravimétricos, não obtivemos interpretações gravimétricas 2D similares às interpretações gravimétricas 3D, localizadas nas respectivas posições espaciais dos baixos gravimétricos e entre os intervalos das curvas de níveis de 4 mGal dos mapas residuais Bouguer. Entretanto, obtivemos na inversão aplicando a VT estimativas de descontinuidades abruptas e identificamos a presença de altos e baixos estruturais no delineamento do relevo do embasamento, nos quais, as respectivas interpretações apresentadas nas seções xz de Castro e Castelo Branco (1999), apresentam estimativas de superfícies suaves no relevo do embasamento para a mesma localização espacial.

Aplicações futuras sobre as pesquisas do arcabouço estrutural das bacias Araripe, Rio do Peixe e Iguatu deverão incluir interpretações gravimétricas tridimensionais utilizando algoritmo de inversão com o regularizador da VT e considerando a informação da variação da densidade com a profundidade do pacote sedimentar. Os procedimentos recomendados para as futuras interpretações gravimétricas tridimensionais deverão ser aplicados no conjunto de dados gravimétricos com maior cobertura espacial contendo informações, além dos baixos gravimétricos e entre os intervalos de 4 mGal, não contemplados neste trabalho, de observações gravimétricas referentes às sub-bacias de pequenos portes existentes no conjunto das bacias do Vale do Cariri, como por exemplo, as sub-bacias: Icó, Malhada Vermelha, Lima Campos e Pombal.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, C. *Análise da deformação pós-rifte na bacia do Araripe, Nordeste do Brasil*. 2010. 88 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Natal, Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.
- ALMEIDA, F. F. M.; HASUI, Y.; BRITO NEVES, B. B.; FUCK, R. A. Províncias Estruturais Brasileiras. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE, 8., 1977, Campina Grande. *Anais...* Campina Grande: SBG, 1977. p. 363-391.
- AGÊNCIA NACIONAL DO PETRÓLEO E BIOCOMBUSTÍVEL - ANP. Nona Rodada De Licitações Da Bacia Do Rio Do Peixe. *Apresentação*. Rio De Janeiro. 2007. Disponível em: <[http://www.brasil-rounds.gov.br/arquivos/Seminario\\_Tecnico\\_R9/Rio-do-Peixe\(portugues\).pdf](http://www.brasil-rounds.gov.br/arquivos/Seminario_Tecnico_R9/Rio-do-Peixe(portugues).pdf)>. Acesso em: 16 de mar. 2013.
- ARIMA, N. *Análise estratigráfica da bacia do Iguatu, CE*. 2007, 138 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.
- ASSINE, M. L. Bacia do Araripe. *B. Geoci. Petrobras*, Rio de Janeiro, v. 15, n. 2, p. 371-389, maio/nov. 2007.
- BEDREGAL, R. P.; LINS, F. A. P. L., BOA HORA, M. P. P., MOREIRA, J. A. M.; MACÊDO, J. W. P. MODELAGEM GRAVIMÉTRICA BI E TRI-DIMENSIONAL DA BACIA DE IGUATÚ, CEARÁ. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 37., v.2. *Resumo Expandido...* São Paulo, 543. p. 383-384. 1992.
- BERTETE-AGUIRRE, H.; CHERKAEV, E.; ORISTAGLIO, M. Non-smooth gravity problem with total variation penalization functional. *Geophys. J. Int*, v. 149, p. 499-507, 2002.
- BIZZI, L. A.; SCHOBENHAUS, C.; VIDOTTI, R. M.; GONÇALVES, J. H. *Geologia, Tectônica e Recursos Minerais do Brasil*. Brasília: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2003. 692 p.

BOTT, M. H. P. The use of rapid digital computing methods for direct gravity interpretation of sedimentary basins: *Geophysics. J. Roy. Astr. Soc.*, v.3, p. 63-67, 1960.

CAJAZEIRAS, C. C. de A. *Qualidade e Uso das Águas Subterrâneas e a Relação com Doenças de Veiculação Hídrica, Região de Crajubar/CE*. 2007. 131 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Ceará. Departamento de Geologia, Fortaleza, 2007.

CASTRO, D. L.; CASTELO BRANCO, R. M. G. Caracterização da Arquitetura Interna das Bacias do Vale do Cariri (NE do Brasil) com base em Modelagem Gravimétrica 3-D. *Brazilian Journal of Geophysics*, v. 17, n. 2,3, p. 129-145, 1999.

CÓRDOBA, V. C.; ANTUNES, A. F.; SÁ, E. F. J.; SILVA, A. N.; SOUSA, D. C.; LINS, F. A. P. L. Análise estratigráfica e estrutural da Bacia do Rio do Peixe, Nordeste do Brasil: integração a partir do levantamento sísmico pioneiro 0295\_RIO\_DO\_PEIXE\_2D. *B. Geoci. Petrobras*, Rio de Janeiro, v. 16, n. 1, p. 53-68, nov. 2007/maio. 2008.

COSTA. A. B. S.; *Diagênese e proveniência dos arenitos da Tectonossequência rifte nas bacias do Rio do Peixe e do Araripe, NE do Brasil*. 2010, 85 f. Dissertação (Mestrado). – Centro de Ciências Exatas e da Terra. Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2010.

HADAMARD, J. Sur les problèmes aux dérivées partielles et leur signification physique. *Bull Princeton Univ.*, v. 13, p. 1-20, 1902.

HESSEL, M. H; TOMÉ, M. E. E.; MOURA, C. R. Ostracodes mesozóicos das bacias do interior do Nordeste brasileiro: o estado da arte. *Revista de Geologia*, v. 19, n. 2, p. 187-206, 2006.

LIMA, W. A. *Inversão gravimétrica do relevo de bacias extencionais através da variação total*. 2009. 54 f. Dissertação (Mestrado em Potenciais) - Programa de Pós-Graduação em Geofísica. Universidade Federal do Pará, Belém, 2009.

LIMA, W. A.; MARTINS, C. M.; BARBOSA, V. C. F.; SILVA J. B. C. Total variation regularization for depth-to-basement estimate: Part 2 — Physicogeologic meaning and comparisons with previous inversion methods: *Geophysics*, v. 76, n.1, p. 13-120, 2011.

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. 11-112, 2011.

NOGUEIRA, F. C. C.; OLIVEIRA, M. S.; CASTRO, D. L. Estudo Magnético e Gravimétrico do Arcabouço Estrutural da Bacia Rio do Peixe – PB. *Revista de Geologia*, v. 17, n. 1, p. 74-87, 2004.

PONTE, F.C., HASHIMOTO, A.T. ; DINO, R. *Geologia das bacias mesozóicas do interior do Nordeste do Brasil*. Rio de Janeiro: Petrobrás/CENPES/DIVEX/SEBIPE, 1991. (Relatório Interno)

RAO, D.B.; BABU, N.R. A Fortran-77 computer program for three-dimensional analysis of gravity anomalies with variable density contrast. *Computers and Geosciences*, v. 17 n. 5, p. 655-667, 1991.

SILVA, A. L. *Estratigrafia Física e Deformação de sistemas lacustres carbonáticos (Aptianoalbiano) da bacia do Araripe em afloramentos selecionados*, 2003, 101 f. Dissertação (Mestrado) – Centro de tecnologia e Geociências, Pós-Graduação em geociências, Universidade federal de Pernambuco, Recife, 2003.

SILVA, A. N. *Arquitetura, litofácies e evolução tectono-estratigráfica da bacia do Rio do Peixe nordeste brasileiro*. 2009, 99 f. Dissertação (Mestrado) – Centro de Ciências Exatas e da Terra. Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2009.

SUCERQUIA, R. P. A. *Gimnospermas eocretáceas da Formação Crato, Bacia do Araripe, Nordeste do Brasil*. 2006. 108 f. Dissertação (Mestrado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.

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.