



Gravimetria da borda Nordeste da Bacia do Parnaíba: Importâncias e reflexos geológicos e estruturais para a Pesquisa Hidrogeológica.

Raimundo Mariano Gomes Castelo Branco⁽¹⁾, Nilo Costa Pedrosa Junior^(1,2), Robério Boto Aguiar⁽²⁾, Jackson Alves Martins⁽¹⁾, Nilton César Vieira Silva⁽¹⁾, ⁽¹⁾Laboratório de Geofísica – Universidade Federal do Ceará, ⁽²⁾CPRM Serviço Geológico do Brasil.

Copyright 2015, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

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

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

Abstract

This paper deals about gravimetric interpretations of geophysical data collected in NE part of Parnaíba Sedimentary Basin, NE Brazil. These geophysical data were performed in order to know geological informations involving these part of Basin based on processing of geophysical data. Some important lineaments, geometry and depth of sources and determinations of geophysical domains and modeling were performed. Several geophysical products are presented as Bouguer Maps, Modeling results and 3D views. All these results are important to the best knowledge of hydrogeological potentialities of the Serra Grande Aquifer System and maybe to new ideas for groundwater exploration and water supply in NE Brazilian region.

Introdução

O objetivo desse trabalho foi o levantamento geofísico, processamento e interpretações dos dados além de mapear o contorno do topo do embasamento cristalino, resultando na indicação de variações de espessura dos sedimentos do aquífero estudado (Serra Grande). Também foi investigada a existência de descontinuidades (falhamentos/lineamentos) que possam existir na área, condicionando a ocorrência de grábens e horsts. Essa pesquisa foi fruto de parceria entre a CPRM, a Universidade Federal do Ceará através do Laboratório de Geofísica e a Fundação Cearense de Pesquisa e Cultura (FCPC).

Localização da área

O trabalho foi desenvolvido na porção oriental da Bacia do Parnaíba (Figura 1), mais precisamente em uma porção de limite geográfico entre os estados do Ceará e do Piauí, em plenos domínios da Bacia Sedimentar do Parnaíba. Nesta mesma figura se encontram posicionados poços de captação de água subterrânea que foram recentemente estudados e mapeados pela CPRM.

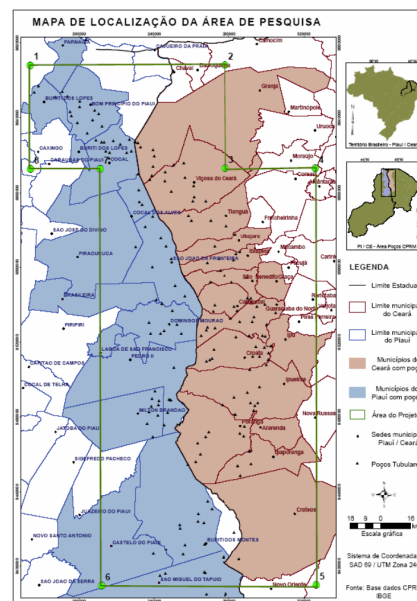


Figure 1: Mapa de localização da área de pesquisa, englobando uma porção do limite estadual entre o Ceará e o Piauí. Destaque para a identificação dos 8 vértices que compõem regionalmente a área de pesquisa e a distribuição de poços tubulares cadastrados pela CPRM.

Características Geológicas Regionais

A área de estudo está situada no NE da Plataforma Sul-americana (Almeida et al., 1981), mais especificamente na porção norte limítrofe entre as províncias Borborema e Parnaíba no nordeste do Brasil. A Província Borborema (PB) representa extenso segmento geológico pré-cambriano, cuja geometria atual é decorrente da colisão entre os crátons Amazônico, São Luiz/Oeste Africano e São Francisco/Congo, evento conhecido como Orogenia Brasileira/Pan-Africana ocorrido no final do Neoproterozóico e início do Fanerozóico (Brito Neves & Cordani, 1991; Brito Neves et al., 2000; Arthaud et al., 2008; Van Schmus et al., 2008). Dentro desse contexto, a área de estudo abrange ainda a transição entre dois domínios crustais distintos: Médio Coreau (DMC) e Ceará Central (DCC), cujo contato ocorre ao longo da Zona de Cisalhamento Sobral-Peró II (ZCSPII) que configura a parte norte do Lineamento Transbrasileiro (LTB).

Por sua vez, a Província Parnaíba, em função da complexidade do quadro tectonossedimentar e evolução policíclica, é compartimentada nas bacias sedimentares

do Parnaíba, Alpercatas, Grajaú e Espigão-Mestre (Figura 2.1) (Góes, 1995). Bizzi et al. (2003) limitam a província a norte pelo Arco Ferrer-Urbano Santos, a leste e a sudeste pelas zonas de cisalhamento Tauá e Senador Pompeu, a oeste pelo Lineamento Tocantins-Araguaia e a noroeste pelo Arco Tocantins. A área de estudo está situada na borda nordeste da Bacia Sedimentar do Parnaíba. A implementação da bacia ocorreu sobre riftes cambro-ordovicianos (Jaibaras) o que a configura como do tipo IF/IS (Fratura Interior/Depressão Interior) (Góes, 1995; Bizzi et al., 2003). Segundo Góes & Feijó, 1994, compreende três superssequências: Siluriana (Grupo Serra Grande), Devoniana (Grupo Canindé) e Carbonífera-Triássica (Grupo Balsas). A figura 2 apresenta o mapa geológico da área investigada.

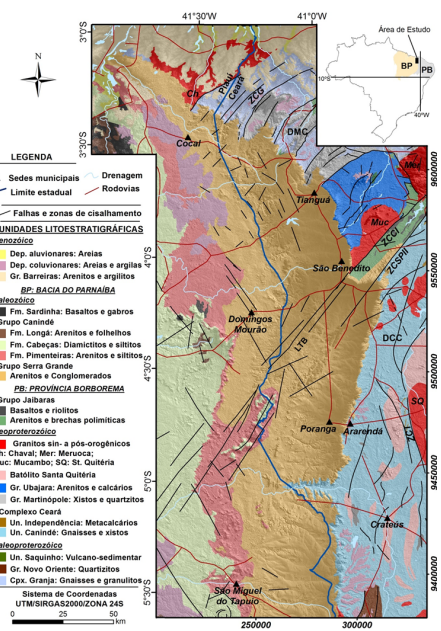


Figura 2: Mapa geológico do arcabouço estrutural da porção oriental da Bacia do Parnaíba. As unidades litoestratigráficas encontram-se descritas no texto. Domínios estruturais: DMC – Médio Coreau; DCC – Ceará Central. Zonas de Cisalhamento: ZCG – Granja; ZCSP - Sobral-Pedro II; ZCC - Café-Ipueiras; ZCT – Tauá. LTB – Lineamento Transbrasiliano (modificado de Cavalcante et al., 2003; Bizzi et al., 2003; Santos et al., 2002, 2008).

Métodos de Aquisição e Materiais

A estratégia para execução do levantamento gravimétrico teve início com levantamento de informações cartográficas na área de estudo a fim de identificar as melhores rodovias e vias de acesso para realização dos perfis e/ou rotas de aquisição para posicionamento das estações gravimétricas e planialtimétricas. Foram utilizadas imagens Landsat Geocover em formato MrSid (órbita 218 e ponto 064 de novembro de 2004), sensor TM-5 (imagens obtidas em <http://www.dgi.inpe.br/CDSR>), dados topográficos SRTM (Shuttle Radar Topographic Mission) adquiridos em formato raster acessando o EROS Data Center, controlado pelo USGS (dados

obtidos em United States Geological Survey), dados altimétricos obtidos pelo sensor ASTER GDEM (Global Digital Elevation Map), com imagens produzidas a partir de pares estereográficos com resolução espacial horizontal de 30m e erro vertical de 20m com 95% de confiança (dados obtidos em <http://gdem.aster.ersdac.or.jp/>). Cartas planialtimétricas da SUDENE na escala 1:100.000 (Folhas digitalizadas envolvendo a borda leste da Bacia do Parnaíba) também foram utilizadas. Para o processamento, georreferenciamento e visualização das imagens foram utilizados os softwares ArcGIS/ArcInfo Desktop 10, Global Mapper (versão 11) e Google Earth (versão 6.2.2). A aquisição dos dados gravimétricos e planialtimétricos foi dividida em quatro etapas que ocorreram no período de abril/2011 a janeiro/2013. A figura 3 exemplifica parte de uma das pranchas com fotografias da aquisição dos dados gravimétricos e planialtimétricos. Foram adquiridas 500 estações gravimétricas e 496 estações planialtimétricas com espaçamento médio entre as estações de 5 e 7 km, como era previsto. Foram utilizadas nove estações gravimétricas base na região norte limítrofe entre os estados do Piauí e Ceará para a aquisição dos dados na borda oriental da Bacia do Parnaíba. Na figura 4 pode ser observado a distribuição das estações gravimétricas e planialtimétricas distribuídas na área de pesquisa.



Figura 3: Parte de uma das pranchas com fotografias da aquisição dos dados gravimétricos e planialtimétricos.

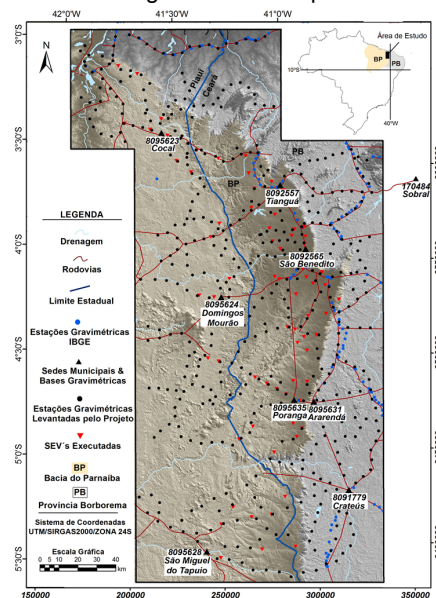


Figura 4: Distribuição das estações gravimétricas base (IBGE/ON), prévias (IBGE) e as novas estações adquiridas na borda NE da Bacia do Parnaíba. As novas estações base foram estabelecidas através de parceria com o IBGE e em uma etapa de campo específica para tal fim.

Gravimetria

O banco de dados gravimétricos adquirido e construído foi importado para o Oasis Montaj da GEOSOFTE. O projeto criado engloba todos os itens no seu diretório de trabalho, desde os arquivos de dados até as ferramentas utilizadas (ferramentas auxiliares, histogramas, diagramas de dispersão, etc). Para a correção dos dados gravimétricos foi utilizada a sequência de processamento característica, que envolve o cálculo dos efeitos da maré, drift instrumental, altura do instrumento e latitude. A partir daí, foram calculados os valores de gravidade em cada estação de medida com base na estação gravimétrica de primeira ordem com objetivo de gerar os mapas do campo de gravidade e suas anomalias Ar-Livre e Bouguer (Geosoft, 2010a).

Após as reduções gravimétricas já comentadas os dados adquiridos e processados foram integrados aos dados gravimétricos disponíveis do IBGE, sobre os quais também foi realizada a correção de terreno. O novo conjunto de dados gravimétricos foi organizado em um banco de dados, com arquivos dispostos no formato XYZ. Previamente, foram realizadas análises estatísticas e da distribuição espacial dos dados com intuito de verificar a consistência entre os bancos de dados gerados. O mapa de anomalias Bouguer foi confeccionado por meio da interpolação dos dados em malha regular de 1,25 km, utilizando o método Kriging (Geosoft, 2010b). O semi-variograma permitiu selecionar o modelo que melhor define a variância do conjunto de dados. A Figura 5 mostra o mapa de anomalias Bouguer da área de estudo, cuja porção norte apresenta anomalias de maior comprimento de onda (50 km) e amplitudes máximas de 3 mGal, orientadas segundo a direção preferencial NE-SW. Já as porções centro-sul e centro-leste apresentam dois expressivos mínimos gravimétricos (< -60 mGal), separados por anomalias arredondadas e de menor comprimento de onda (10 a 20 km) e localizadas na borda NE da Bacia do Parnaíba.

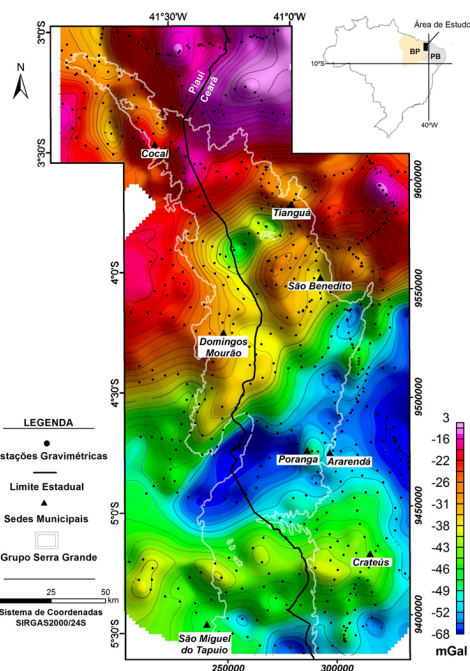


Figure 5: Mapa de anomalias Bouguer da borda NE da Bacia do Parnaíba com a distribuição das estações gravimétricas.

O espectro de potência radial médio do sinal gravimétrico - anomalia Bouguer - foi gerado a fim de se obter melhores resultados na análise dos intervalos de número de onda no que diz respeito à separação espectral das fontes rasas e profundas, causativas das anomalias gravimétricas (Spector & Grant, 1970). Foi verificado que o comprimento de onda ideal é de 40 km, ou seja, a componente residual corresponde a anomalias com comprimentos de onda menores que 40 km e ressaltam fontes essencialmente crustais, enquanto que a componente regional apresentará anomalias de maior comprimento de onda (> 40 km) e conterá fontes mais profundas e relacionadas à interface crosta/manto (Figura 6).

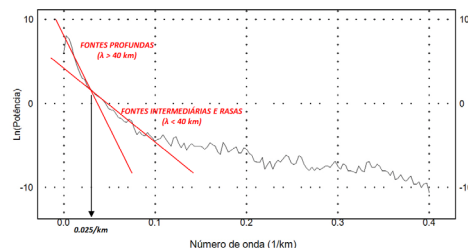


Figura 6: Espectro de potência radial médio do campo gravimétrico anômalo Bouguer da área estudada.

As componentes regional e residual do campo gravimétrico foram separadas por meio de um filtro de separação regional-residual que se baseia na distribuição gaussiana das fontes gravimétricas em função de suas profundidades. Este filtro consiste de um operador

matemático que atua como passa-baixa ou passa-alta das frequências do sinal escolhido no domínio do número de ondas. O trend gravimétrico regional da área pesquisada pôde ser distinguido satisfatoriamente e realça a resposta gravimétrica das heterogeneidades crustais mais rasas que são evidenciadas no mapa de anomalias residuais. Na figura 7 encontram-se os mapas de anomalias Bouguer Regional e Residual.

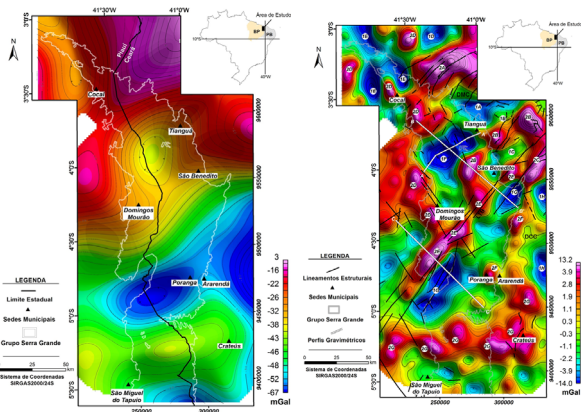


Figura 7: Mapas de anomalias gravimétricas Bouguer regionais e residuais da borda NE da Bacia do Parnaíba, com a localização dos principais linamentos estruturais e perfis gravimétricos A-A', B-B' e C-C' utilizados na modelagem gravimétrica 2-D.

Síntese dos resultados

A SW de Tianguá encontra-se um expressivo baixo gravimétrico (-12 mGal) - anomalia 1F (Figura 7) de forma elipsoidal e trend NE-SW. Tal feição é característica de estrutura grabenforme na borda NE da Bacia do Parnaíba. Este tipo de feição já foi observado em outra porção da Província Parnaíba, na Borda SE da Bacia (Pinheiro, 2011; Cunha, 2012).

O conjunto de anomalias 2E apresentam curto comprimento de onda (5 km), seguindo direção preferencial NE-SW e valores próximos a 10 mGal. Tal padrão anômalo parece estar relacionado a heterogeneidades do arcabouço estrutural que é formado por rochas vulcânicas do Rife de Jaibas associadas às zonas de cisalhamento Café-Ipueiras e Sobral-Pedro II (parte norte do LTB) e que afloram a leste da cidade de São Benedito. A SE dessas anomalias aparecem dois baixos gravimétricos (1G na Figura 7), seguindo o mesmo trend NE-SW e comprimento de onda intermediário (10 km). Essas anomalias podem estar refletindo o pacote sedimentar mais espesso na porção leste da Bacia ou rochas sedimentares da fase rife não aflorantes do Grupo Jaibas.

A porção centro-leste da área, onde afloram as rochas do DCC, é representada por anomalias gravimétricas positivas arredondadas e de alta amplitude (5 mGal), que se prolongam junto a borda NE da Bacia do Parnaíba (anomalias 2F) e anomalias negativas de maior comprimento de onda no extremo leste da área (anomalias 1H). Esses baixos gravimétricos estão associados às rochas supracrustais do Grupo Ceará,

enquanto que os valores intermediários e as anomalias positivas de alta amplitude podem representar corpos anfíbolíticos aflorantes ou não do Grupo Ceará e rochas mais densas do Batólito de Santa Quitéria, como por exemplo, dioritos e anfíbolitos. A região sul da área apresenta anomalias semelhantes, porém de maior tamanho, segundo o trend principal, aquele orientado E-W (anomalias 2G na Figura 7).

Na figura 8 está apresentada uma interpretação gravimétrica regional baseada nos dados da borda oriental da Bacia do Parnaíba, com a localização das principais estruturas gravimétricas.

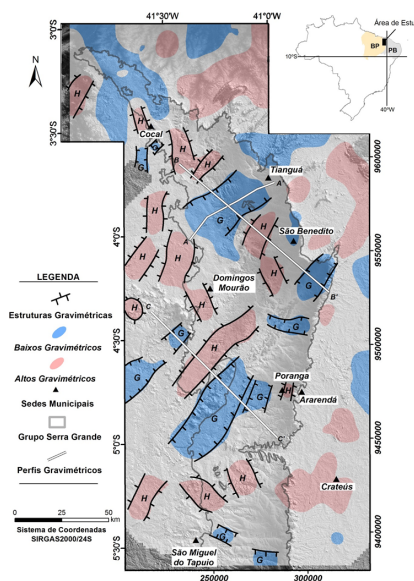


Figura 8: Interpretação gravimétrica na borda oriental da Bacia do Parnaíba, com a localização das principais estruturas gravimétricas (G – Grábens; H - Horsts) e perfis gravimétricos utilizados em modelagem gravimétrica 2-D.

Apenas a título de ilustração mostra-se na figura 9 uma das seções gravimétricas (A A') que foram modeladas e interpretadas à luz dos dados aqui apresentados e na figura 10 uma visualização 3D conjunta entre o mapa de estimativa das profundidades do embasamento com o Bouguer residual.

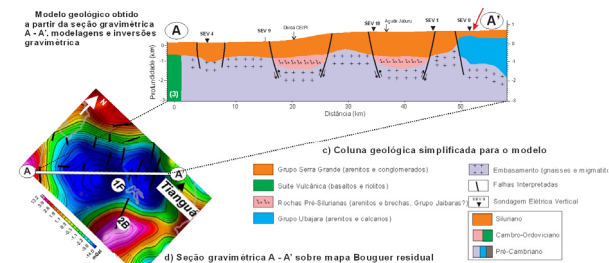


Figura 9: Seção gravimétrica A-A' 2D modelada.

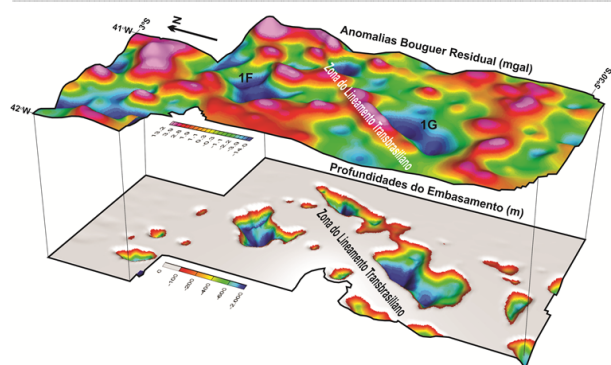


Figura 10: Visualização 3-D do mapa de anomalias Bouguer residual conjugado com o mapa de profundidades do embasamento obtido através da modelagem gravimétrica 3-D.

Síntese das Principais Conclusões

O mapa de anomalias Bouguer regional mostrou fundamentalmente dois domínios gravimétricos e correspondentes aos dois domínios crustais da Província Borborema, o Médio Coreau e o Ceará Central, além do importante trend NE-SW coincidente com o LTB. Há um aumento do campo gravitacional para norte possivelmente representando o afinamento crustal da margem continental.

O mapa de anomalias Bouguer residual apresenta relevo acidentado com anomalias positivas e negativas com curto a médio comprimento de onda e dispostas para NE, NW, N-S e E-W. Diversas anomalias positivas e negativas foram interpretadas como relacionadas a sistemas de grábens e horts, e tiveram suas feições associadas a diversos conjuntos litológicos.

As principais feições gravimétricas têm associações com o LTB que é bem marcado por lineamentos gravimétricos orientados de SW para NE. Ao lado oeste do LTB destacam-se altos gravimétricos e em seu lado leste se posicionam baixos gravimétricos, por vezes bem expressivos. Tudo leva a crer que o arcabouço estrutural da bacia está bem representado no mapa de anomalias Bouguer residual.

De modo geral, a mais importante conotação hidrogeológica que pode estar representada na área é que os baixos gravimétricos (com expressivas extensões) presentes no mapa de anomalias Bouguer estariam refletindo maior espessamento do pacote sedimentar Serra Grande e, conseqüentemente, maior potencial hidrogeológico para o Sistema Aquífero inferior e aquele mais importante.

Os resultados obtidos através da geração do mapa da primeira derivada vertical do campo gravimétrico anômalo denotam os principais trends gravimétricos orientados para NE-SW e, secundariamente NW-SE, E-W e N-S. Neles estão os principais baixos gravimétricos (grábens), também com grandes possibilidades hidrogeológicas.

Por meio da deconvolução de Euler 3-D foi possível estimar que fontes rasas (<2 km) podem ser observadas ao longo dos trends gravimétricos NE-SW e NW-SE.

Assim, é grande a possibilidade de presença de descontinuidades intrabaciais relacionadas a reativações de estruturas do embasamento podendo ter importantes conotações no ponto de vista hidrogeológico, pois estariam servindo de barreiras para acumulação de água subterrânea.

A modelagem gravimétrica 3-D levou em consideração um contraste de densidade de $-0,25 \text{ g/cm}^3$, devendo-se levar em consideração que o objetivo foi avaliar a profundidade do topo do embasamento sabendo-se que esta inversão assume espessura nula onde as anomalias gravimétricas forem positivas. Diversas feições tipo grábens com profundidades superiores a 2 km foram identificadas levando a conclusões importantes relacionadas à espessura total do pacote sedimentar Serra Grande (e/ou de outras formações estratigraficamente abaixo) o que, paralelamente, traz importantes conotações hidrogeológicas.

As regiões mais importantes hidrogeologicamente estão fortemente controladas pelo LTB. Uma região não menos importante aparece a SW de Tianguá. Estas zonas/faixas merecem investigações mais detalhadas.

Agradecimentos

A CPRM – Serviço Geológico do Brasil pela possibilidade de execução dessa pesquisa, aos profissionais da CPRM de Fortaleza (Jaime Quintas, Liano Veríssimo) ao longo do período de realização das pesquisas de campo, à FCPC pelo gerenciamento financeiro desse trabalho. A todos que colaboraram com as atividades de campo.

Referências

- BRITO NEVES, B.B. & CORDANI, U.G., 1991. Tectonic evolution of South America during the Late Proterozoic. In: Stern, R. J. & Van Schmus, W. R. (Eds), *Crustal Evolution in the Late Proterozoic*. Precambrian Research, 53: 23-40.
- BRITO NEVES, B.B., SANTOS, E.J. & VAN SCHMUS, W.R., 2000. The tectonic History of the Borborema Province. In: CORDANI, U.G., MILANI, E.J., THOMAZ FILHO, A., CAMPOS, D.A. (Eds), *International Geological Congress, Rio de Janeiro, Tectonic Evolution of South America*, 31: 151-182.
- ARTHAUD, M.H., CABY, R., FUCK, R.A., DANTAS, E.L., PARENTE, C.V., 2008. Geology of the northern Borborema Province, and its correlations with Nigeria, NW Africa. In: Pankhurst, R. J., Trouw, R. A. J., Brito Neves, B. B., de Witt, M. J. *West Gondwana, Pre-Cenozoic Correlations Across the South Atlantic Region*. Geological Society, London, Special Publications, 294: 49-67.
- BIZZI, L.A. et al. (Ed.), 2003. *Geologia, tectônica e recursos minerais do Brasil: texto, mapas e SIG*. Brasília: CPRM. 674p.

CAVALCANTE, J.C., VASCONCELOS, A.M., et al., 2003. Mapa Geológico do Estado do Ceará – Escala 1:500.000. Ministério das Minas e Energia/Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais, Fortaleza, Brasil.

CUNHA, A.R.A., 2012. Conversão em profundidade de dados migrados em tempo da Bacia do Parnaíba. Trabalho de conclusão de curso (graduação em geofísica) – Universidade Federal do Pará, Instituto de Geociências, Faculdade de Geofísica, Belém, PA. 102 p.

GÓES, A.M., 1995. A Formação Poti (Carbonífero Superior) da Bacia do Parnaíba. Universidade de São Paulo, São Paulo. Tese de Doutorado, 171 p.

GÓES, A.M. & FEIJÓ, F.J., 1994. Bacia do Parnaíba. Boletim de Geociências da PETROBRAS, Rio de Janeiro, 8(1):57-67.

GEOSOFT INC., 2010a. Montaj Gravity & Terrain Correction. Extensão de Processamento de Dados Gravimétricos para o Oasis montaj v. 7.1. Tutorial e guia do usuário. Toronto, ON Canadá, 60 p.

GEOSOFT INC., 2010b. Filtragem montaj MAGMAP. Processamento de dados de campos potenciais no domínio da frequência. Extensão para o Oasis Montaj, v. 7.1. Tutorial e guia do usuário. Toronto, ON Canadá, 77 p.

PINHEIRO, A.G., 2011. Interpretação sísmica 2D e modelagem geológica 2,5D da Bacia do Parnaíba. Trabalho de Conclusão de Curso (graduação em geofísica) – UFPA, Faculdade de Geofísica, Belém, PA. 87 p.

SANTOS, T.J.S., SOUZA, G.M., QUEIROZ, H.B., NOGUEIRA NETO, J.A., PARENTE, C.V., 2002. Tafrogênese estateriana no embasamento paleoproterozóico do NW da Província Borborema: Uma abordagem petrográfica, geoquímica e geocronológica In: 41º Congresso Brasileiro de Geologia, João Pessoa, Anais. Sociedade Brasileira de Geologia (SBG), p. 337

SANTOS, T.J.S., FETTER, A.H., NOGUEIRA NETO, J.A., 2008. Correlation of the west margin of the Transbrasiliano–Kandi Lineament in the Borborema Province (NE Brazil) and Pharusian Belt (NW Africa). In: PANKHURST, R.J., TROUW, R.A.J., BRITO NEVES, B.B., WIT, M.J. (Eds.), West Gondwana: Pre-Cenozoic Correlations A cross the South Atlantic Region. Geological Society, London, Special Publications, 294: 101-119.

VAN SCHMUS, W.R., OLIVEIRA, E.P., SILVA FILHO, A.F., TOTEU, F.; PENAYE, J., GUIMARÃES, I.P., 2008. Proterozoic links between the Borborema Province, NE

Brazil, and the Central African Fold Belt. Geological Society of London. Special Publication, 294, 69-99.