

Caracterização morfológica da porção sul da Sub-bacia de Alhandra, Bacia Paraíba, com base em dados SRTM: contribuição na compreensão do arcabouço estrutural

Dilce de Fátima Rossetti¹
Márcio de Morisson Valeriano¹
Francisco Hilário Rego Bezerra²
Benjamim Bley Brito-Neves³
Ana Maria Góes³

¹ Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE Caixa Postal 515 - 12245-970 - São José dos Campos - SP, Brasil (rossetti@dsr.inpe.br; valeriano@dsr.inpe.br)

² Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN, Natal- RN, Brasil (bezerrafh@geologia.ufrn.br)

³ Universidade de São Paulo-USP, Rua do Lago 562, 05508-080 São Paulo-SP, Brasil (bbleybn@usp.br; goes@igc.usp.br)

Abstract. Features related to tectonic faults in deposits of the Barreiras Formation have been increasingly recorded in the literature. However, the record of deformation structures associated to folds in this unit is rare. This work aims to demonstrate that the Barreiras Formation in the south of the Alhandra Sub-Basin shows peculiar terrain characteristics, expressed by morphological and drainage anomalies that conform to the presence of both faults and folds. These features, extracted from SRTM digital elevation data, mostly include the prevalence of trellis drainage pattern and of rivers that change rapidly their courses according to curved trajectories. Field work confirms the presence of anticlines in the Barreiras Formation, probably developed due to NS compression during the Pliocene-Pleistocene.

Key-words: tectônica, morfologia, dobra, cenozóico, drenagem, Sub-bacia Alhandra

1. Introdução

Diversos trabalhos têm ressaltado a importância de movimentações tectônicas durante o final do Cenozóico no nordeste do Brasil (p.e., King 1956, Putzer 1959, Suguio e Martin 1996, Bezerra 1998, Bezerra et al. 1998, 2001, Morais Neto e Alkmin 2001, Brito-Neves et al. 2004). O registro dessas atividades tectônicas acha-se presente, em grande parte, na Formação Barreiras, depositada durante o Mioceno Inferior e Médio (p.e., Arai et al. 1988). Os esforços tectônicos registrados nesta unidade caracterizam episódios distintos de transcorrência de direção variáveis, dependendo de sua localização ao longo da costa nordeste brasileira (Souza et al. 2003; Nogueira et al. 2006), sendo pelo menos em parte, contemporânea à sedimentação (Souza et al. 2003). De acordo com Bittencourt et al. (1999), essas atividades tectônicas representam reativações de falhas antigas e geração de novas falhas produzida por deformação flexural da litosfera devido à carga sedimentar depositada na margem continental.

Embora estruturas distensionais tenham sido descritas com mais frequência, a Formação Barreiras também apresenta feições de encurtamento, com desenvolvimento de dobras amplas e suaves de grandes dimensões (Souza et al. 2003). De acordo com estes autores, estas estruturas teriam sido geradas devido a esforços compressivos associados a episódios de transcorrência.

A Formação Barreiras que ocorre no litoral do Estado da Paraíba, Sub-bacia Alhandra, é ainda pouco estudada, embora trabalhos disponíveis documentem, também, evidências de forte

controle tectônico. De acordo com Brito Neves et al. (2004), essa tectônica inclui reativações de falhas do embasamento proterozóico ao longo de zonas de cisalhamento E-W a ENE-WSW durante o Cenozóico.

Estudo recente incluindo aspectos morfológicos na Sub-Bacia de Alhandra caracterizaram seu relevo como produto de compartimentação por falhas tectônicas em regime distensivo (Furrier et al. 2006). Estes autores atribuem, ainda, a porção sul desta sub-bacia localizada entre o rio Gramame e a Depressão do Abiaí, cuja expressão central é dominada pelo Alto Estrutural Coqueirinho, como sendo representativa de blocos soerguidos resultantes dessa tectônica distensiva.

Este trabalho apresenta uma caracterização morfológica complementar para a região sul da Sub-Bacia de Alhandra, tomando-se por base modelos de elevação digital integrada a informações diretas coletadas em campo. Pretende-se, com isto, contribuir para se rediscutir o arcabouço estrutural dessa área, com a proposição de que os soerguimentos registrados nesse terreno refletem estruturas deformacionais compressivas, e não apenas distensivas.

2. Contexto Geológico

A Sub-Bacia de Alhandra localiza-se na porção central da Bacia Paraíba. Esta bacia compreende uma faixa costeira localizada entre o Lineamento Pernambuco e o Alto de Mamanguape (**Figura 1**), tendo sido originada em função do processo de abertura do Oceano Atlântico, iniciada no Juro-Cretáceo (Szatmari et al. 1987).

A sucessão sedimentar da Bacia Paraíba foi recentemente revisada (Barbosa et al. 2003). Este estudo resultou na proposição de modelo evolutivo que combina fatores tectônicos e eustáticos como causa para a geração de ciclos transgressivos-regressivos desde o Coniaciano, o que produziu uma pilha sedimentar que grada de siliciclástica a carbonática. Os depósitos da base da bacia, representadas pelas formações Beberibe e Itamaracá, registram deposição continental com gradação a marinho-transicional, correspondendo ao primeiro evento transgressivo, de idade Coniaciana a Campaniana. Após máximo de inundação, o nível do mar teria se estabilizado em posição elevada, favorecendo desenvolvimento de extensa plataforma carbonática durante o Maastrichtiano, registrada por rochas calcárias da Formação Gramame. Após fase regressiva, houve nova transgressão durante o final do Paleoceno e Eoceno, o que resultou em calcários marinho-rasos da Formação Maria Farinha. Durante o Neógeno e Quaternário, houve deposição de sucessão pelítico-arenosa, representada pela Formação Barreiras e Sedimentos Pós-Barreiras (senso Rossetti et al. 2007).

Calcários da Formação Gramame afloram em uma pequena faixa na área de estudo, restrita à Depressão do Abiaí. O restante da área é representado em superfície por depósitos da Formação Barreiras e/ou Sedimentos Pós-Barreiras.

3. Material e Métodos

A caracterização morfológica baseou-se na análise de dados digitais de elevação adquiridos pelo *Shuttle Radar Topography Mission* (SRTM). Esses dados, obtidos por radar de abertura sintética na banda C, foram disponibilizados pelo *United States Geological Survey* (USGS) em resolução de 3", ou cerca de 90 m, *datum* e elipsóide de referência WGS84, com dados de *z* em metros inteiros. Esses dados foram processados em aplicativo *Global Mapper* e PCI, utilizando-se procedimentos simples de criação de paletas de cores e de tons de cinza, bem como aplicando-se ajustes lineares manuais e automáticos e equalizadores, a fim melhorar a visualização dos aspectos morfológicos.

A rede de drenagem foi derivada dos dados SRTM utilizando-se os recursos de extração de drenagem do aplicativo PCI. O produto vetorial foi exportado para o aplicativo *Corel Draw*, onde se procedeu com pequenas edições e correções.

Derivações geomorfométricas foram obtidas diretamente a partir do banco de dados TOPODATA-INPE (www.dpi.inpe.br/topodata). Deste banco, foram utilizados os segmentos correspondentes às folhas SB-25-Y-A e SB-25-Y-C da articulação da escala 1:250.000 (1° de latitude por 1,5° de longitude). Os dados deste banco foram gerados a partir de dados refinados da resolução espacial original de 3 arco-segundos (~90m) para 1 arco-segundo (~30m) por krigagem. As variáveis geomorfométricas locais foram obtidas a partir do MDE refinado, com derivações operadas através de janelas móveis. As mesmas foram classificadas e combinadas para a produção de mapas de intervalos e qualitativos, tais como classes de declividade e formas de terreno, editados em representações pictóricas para favorecer a percepção do terreno em seus diversos aspectos.

4. Morfologia e drenagem

A área de estudo é representada por patamares relativamente nivelados que se sucedem de norte a sul, e constituem os interflúvios dos rios que a cortam no trecho final de seus cursos (**Figura 1 A-E**). Embora não haja estratificações altimétricas notáveis para sugerir alguma distinção entre estes, observam-se diferenças consistentes na expressão das variáveis topográficas derivadas.

Levando-se em consideração morfologia e drenagem, a área de estudo pode ser descrita em termos de dois compartimentos. O compartimento I representa a porção entre os rios Gramame e Abiaí (**Figura 2 A,B**), enquanto o compartimento II situa-se ao longo de uma extensa faixa que contorna o compartimento I. O compartimento I apresenta maior variação da declividade e da curvatura vertical relativamente ao compartimento II e, principalmente, em relação ao seu entorno. A média das declividades desta sub-área foi calculada em 11%, enquanto obteve-se 7% para o restante (compartimento II). Adicionalmente, conforme destacado na **Figura 1-D**, o compartimento I mostra um padrão de convexidades acentuadas nos interflúvios (em vermelho), enquanto em seu entorno estes apresentam trechos menos convexos ou retilíneos (em amarelo e branco). Os valores médios de convexidade são maiores (0,0219°/m contra 0,162°/m), assim como seus valores máximos (0,167°/m contra 0,118°/m). Apesar disso, as concavidades são também mais pronunciadas, o que resulta num maior desvio padrão dos valores das curvaturas indistintamente. A partir destas observações, pode-se dizer que a área I apresenta modificações significativas de curvatura vertical, em relação ao padrão retilíneo da área II.

As principais bacias do compartimento I são as dos rios Guruji, Garaú, Mucatu, Água Boa, Salsa, e parte do Abiaí. Esses rios são retos ou recurvados, principalmente no caso dos rios Água Boa, Salsa, e Guruji, que formam curvas apertadas, refletindo a curvatura principal do rio Gramame. Os tributários desses rios são, em geral, retilíneos, curtos, e deságuam no canal principal formando ângulos elevados, porém com trajetórias definidas por curvaturas fechadas, e não ângulos retos. Essas características definem padrão de drenagem predominantemente dos tipos sub-dentrítico treliçado e treliça recurvada. Exceto pela bacia do rio Garaú, as bacias são simétricas a aproximadamente simétricas, e compõem padrão geral radial, com nascentes na porção centro-oeste deste compartimento.

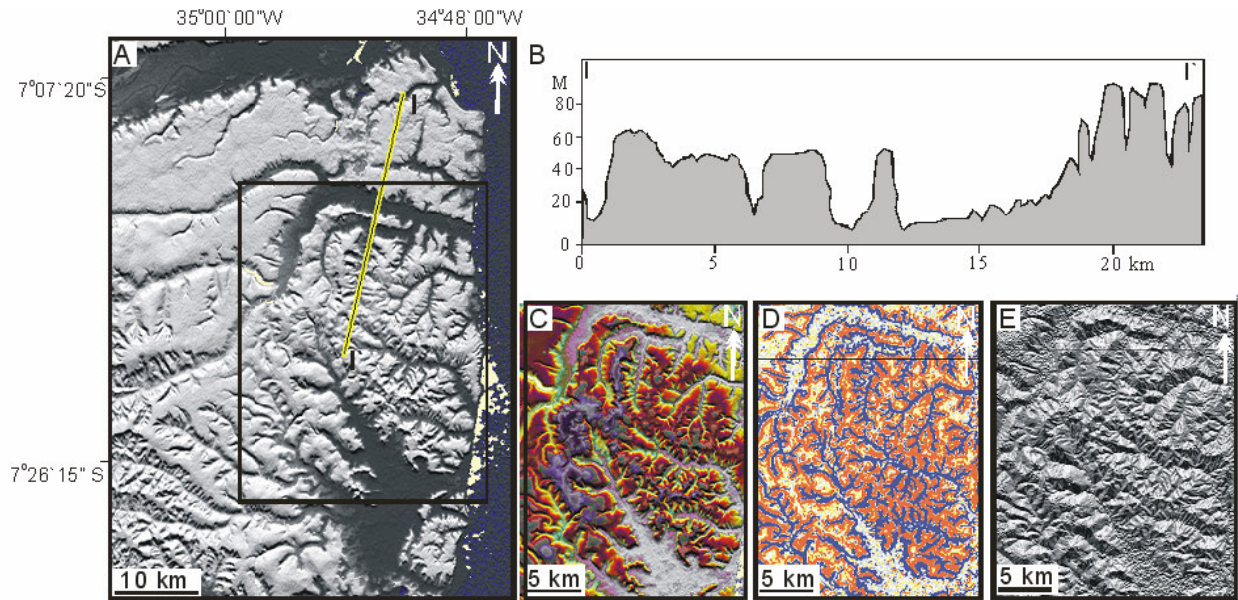


Figura 1 – A) Modelo digital de elevação-SRTM da área de estudo (retângulo), e de seu entorno, na Sub-Bacia de Alhandra, Estado da Paraíba. B) Perfil topográfico derivado dos dados SRTM ao longo do transecto I-I' (ver localização na figura A). C-E) Imagens derivadas da criação de paletas de cores (C) e da extração de variáveis morfométricas indicativas da curvatura vertical (D) e orientação de vertentes (E). (Localização das figuras C-E indicada pelo retângulo na figura A).

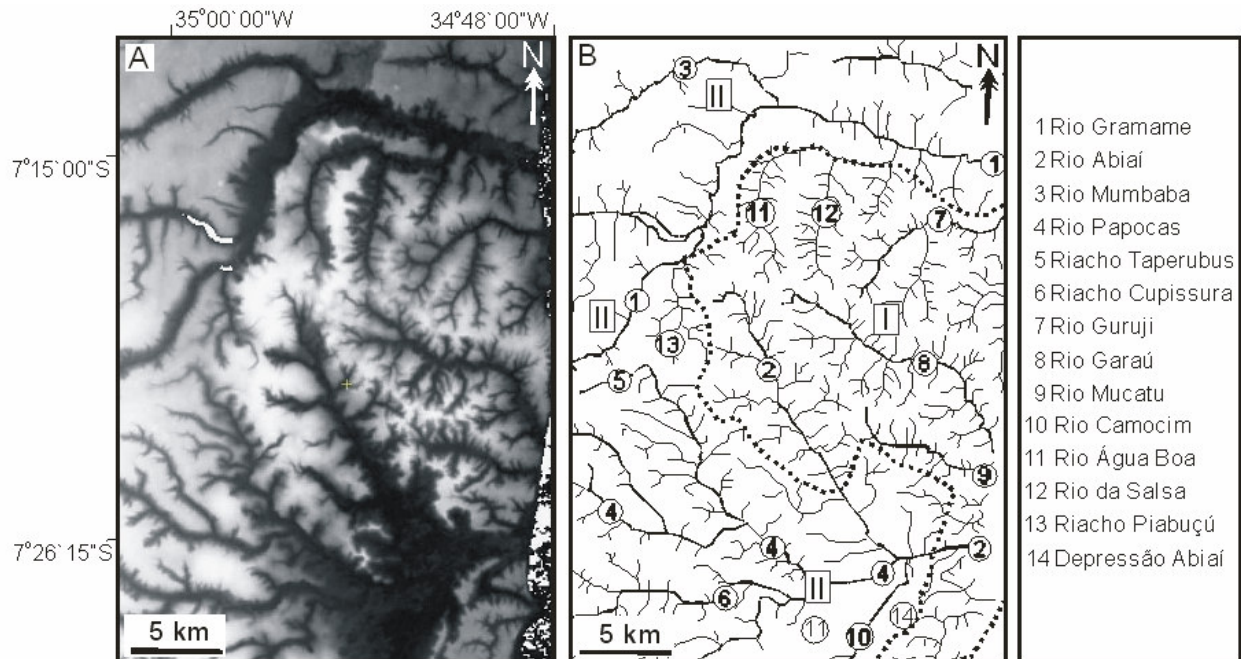


Figura 2 – A) Dados digitais de elevação SRTM (tons de cinza gradando de escuro a claro correspondentes a altitudes progressivamente mais elevadas), com ressaltos das bacias de drenagem da área de estudo. B) Mapa da drenagem, com indicação dos compartimentos (I e II) descritos no texto.

O compartimento II compreende as bacias dos rios Gramame-Mumbaba a norte, e Papocas-Taperubus a sul, além do rio Piabuçu, e mostra forte contraste com o anterior, sendo representado por densidade de drenagem consideravelmente inferior. Além disto, a bacia Gramame-Mumbaba é tipicamente recurvada, com ambos os cursos mudando de direção rapidamente, seguindo percursos de direções aproximadamente oblíquas. Similarmente aos canais curvos do compartimento I, essa mudança de curso não chega a formar ângulos retos, mas configuram curvaturas pronunciadas. Os tributários desses rios são também retilíneos e curtos, formando ângulos retos com os canais principais, porém de distribuição assimétrica quando se comparam as margens dos rios, em ambos os casos revelando áreas relativamente mais elevadas à direita. O padrão de drenagem é de treliça recurvada. Na porção sul do compartimento II, os canais principais compõem drenagem geral dendrítica, com bacias individuais contendo canais curtos e retilíneos arrançados em padrão treliça e sub-dendrítico, com arranjos simétricos e assimétricos.

5. Estruturas em afloramento

Como descrito em trabalhos anteriores, tanto a Formação Barreiras, quanto os Sedimentos Pós-Barreiras expostos na área de estudo mostram-se localmente deformados por falhas e fraturas. Entretanto, além dessas feições, destaca-se a presença de feições deformacionais relacionadas a dobras. Estas se constituem em anticlinais suaves a apertados, de média a grande amplitude, com eixos subhorizontais que mergulham suavemente para E ou W. Os estratos dobrados incluem arenitos finos a médios, e argilitos maciços, ambos maciços ou laminados. É interessante observar que os estratos dobrados correspondem apenas à Formação Barreiras, enquanto que os Sedimentos pós-Barreiras subjacentes, quando presentes, estão em posição horizontal (Figura 3A). Além disto, horizontes de laterização associados a paleossolos, típicos do topo da Formação Barreiras em suas variadas áreas de ocorrência (p.e., Rossetti 2004, Rossetti et al. 2007), também foram afetados pelo processo deformacional (**Figura 3B**).

6. Discussão e conclusão

Embora a Formação Barreiras mostre estruturas deformacionais mais comumente relacionadas com falhas tectônicas, na área de estudo estas estão associadas com feições geradas por esforços compressivos. As feições descritas em campo não deixam dúvidas de que este tipo de comportamento estrutural causou importantes deformações nessa unidade.

Já existe registro prévio da ocorrência de feições compressivas similares às descritas na área de estudo em depósitos da Formação Barreiras expostos em outras áreas da costa nordeste brasileira, como por exemplo, na localidade de Vila Nova, Bacia Potiguar (Souza et al. 2003). Para estes autores, tais estruturas estariam vinculadas a movimentos compressivos associados a sistemas de transcorrência reativados de estruturas cretáceas. Entretanto, tem-se proposto que, após este evento de distensão, houve inversão do campo de tensões, com compressão sub-horizontal E-W e distensão sub-horizontal N-S (Bezerra et al. 2008). Os eixos de direção EW medidas nas dobras da área de estudo indicam compressão N-S. Compressão atual de direção NS, NW e NE tem sido registrada ao longo do litoral que vai da Bahia a Alagoas (ver Figura 8 de Lima et al. 1997). Baseado nos dados aqui apresentados é possível sugerir que esta compressão se estenda até o litoral da Paraíba.

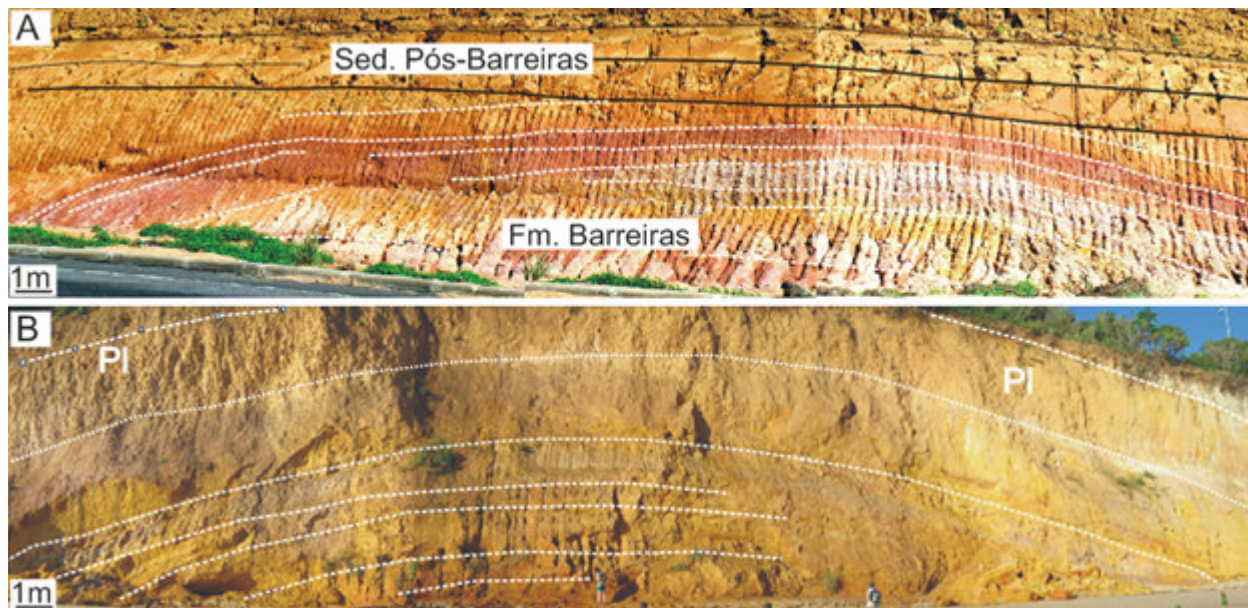


Figura 3 – Dois exemplos de afloramentos onde os estratos sedimentares arenosos (tons amarelos e esbranquiçados) e argilosos (tons vermelhos e róseos) acham-se deformados por dobras de grande amplitude. A) Afloramento na Rodovia BR 101, sul de João Pessoa, onde a Formação Barreiras é dobrada, mas os Sedimentos Pós-Barreiras sobrejacentes estão em posição de deposição original. B) Afloramento em falésia na praia de Cabo Branco, João Pessoa, com dobra na Formação Barreiras. Notar que o paleossolo laterítico (Pl) do topo dessa unidade também segue a configuração geral da dobra.

O tempo do evento compressivo é debatível, podendo ter se iniciado concomitantemente com a deposição da Formação Barreiras. Entretanto, considerando-se que a Formação Barreiras é de idade miocena inferior a média (p.e., Arai et al. 1988), e que o paleossolo laterítico em seu topo foi formado no Mioceno Superior (Lima 2008), sugere-se que o evento de deformação, mesmo se iniciado durante a deposição desta unidade, se manifestou no Plioceno-Pleistoceno. Esta interpretação é consistente com o fato do paleossolo laterítico ter sido afetado pelo evento deformacional, enquanto os Sedimentos Pós-Barreiras estão em sua posição original.

Tendo-se em vista as observações geológicas diretas feitas na área de estudo, atribui-se as características da morfologia e da drenagem ao comportamento estrutural da Formação Barreiras. Esta unidade acha-se especialmente bem exposta neste setor da Sub-Bacia de Alhandra, contrariamente a outras áreas, onde ela é encoberta pelos Sedimentos Pós-Barreiras. Embora estes também ocorram na área de estudo, sua distribuição é restrita no compartimento I. Ou seja, neste compartimento, as feições do terreno extraídas dos dados SRTM refletem, mais especificamente, características relacionadas à Formação Barreiras. Levando-se em consideração que esta unidade mostra evidências de falhas e dobras, interpreta-se que as anomalias de drenagem observadas sejam reflexos dessas feições. Em particular, padrão de drenagem em treliça acha-se comumente relacionado a terrenos afetados por falhas e fraturas, mas os fortes desvios de drenagem, representados por canais recurvados podem estar associados a terrenos miocenos dobrados. Desta forma, a presença de morros acentuados neste setor não parece estar ligada somente ao deslocamento de falhas tectônicas, mas refletem, adicionalmente, estratos que

foram sujeitos a dobramentos. A complexidade estrutural da área de estudo justificaria sua morfologia completamente distinta relativamente às demais áreas da Bacia Paraíba.

Por outro lado, o compartimento II reflete feições compatíveis com terreno relativamente mais jovem que o compartimento I, o que é sugerido por relevo com pouca variação de declividade e curvaturas em padrão retilíneo contendo baixa densidade de drenagem. Sendo mais jovem, não houve tempo do substrato ter sido erodido e/ou dissecado pelo estabelecimento de canais de drenagem. De fato, reconhecimento preliminar de campo revelou que estas áreas mostram predominância dos Sedimentos Pós-Barreiras. A drenagem desenvolvida sobre esta unidade mostra padrão também influenciada por deformação, pelo menos relacionada a falhas, como sugerido pelo arranjo organizado em treliça. Portanto, é possível que após o evento deformacional que gerou falhas e dobras, tenha havido nova manifestação tectônica, que resultou na reativação de falhas posteriormente à deposição dos Sedimentos Pós-Barreiras.

7. Agradecimento

Este trabalho foi financiado pela FAPESP (Projeto #2006/04687).

8. Referências

- Arai, M.; Uesugui, N.; Rossetti, D.F.; Góes, A. M. Considerações sobre a idade do Grupo Barreiras no nordeste do Estado do Pará. In: **Congresso Brasileiro de Geologia**, 35, 1988, Belém, Brasil. Anais...Belém, SBG, 1988, v. 2, p. 738-752.
- Barbosa, J. A.; Souza, E. M.; Lima Filho, M.; Neumann, V. H. A estratigrafia da bacia Paraíba: uma reconsideração. **Estudos Geológicos**, v. 13, p. 89-108. 2003.
- Bezerra, F. H. R. **Neotectonics in Northeastern Brazil**. 1998. Tese de Doutorado - University of London, London. 1998.
- Bezerra, F. H. R.; Lima Filho, F. P.; Amaral, R. F.; Caldas, L. H. O.; Costa Neto, L. X. Holocene coastal tectonics in NE Brazil. In: Stewart, I. S.; Vita-Finzi, C. (Eds.). **Coastal Tectonics**. London: Geological Society of London, 1998. Publicação Especial 146, p. 279-293.
- Bezerra, F. H. R.; Amaro, V. E.; Vita-Finzi, C.; Saadi, A. Pliocene-Quaternary fault control of sedimentation and coastal plain morphology in NE Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 14, p. 61-75. 2001.
- Bezerra, F. H. R.; Brito-Neves, B. B.; Correa, A. C. B.; Barreto, A. M. F.; Suguio, K. Late Pleistocene tectonic-geomorphological development within a passive margin - the Cariatá Trough, northeastern Brazil. **Geomorphology**, v. 1, p. 555-582. 2008.
- Bittencourt, A. C. S. P.; Dominguez, J. M. L.; Ussami, N. Flexure as a tectonic control on the large scale geomorphic characteristics of the eastern Brazilian coastal zone. **Journal of Coastal Research**, v. 15, p. 505-519. 1999.
- Brito-Neves, B. B.; Riccomini, C.; Fernandes, T. M. G.; Sant'Anna, L. G. O sistema tafrogênico terciário do saliente oriental nordestino na Paraíba: um legado Proterozóico. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 34, p. 127-134. 2004.
- Furrier, M.; Araújo, M. E.; Meneses, L.F. Geomorfologia e tectônica da Formação Barreiras no Estado da Paraíba. **Geologia USP-Série Científica**, v. 6, p. 61-70. 2006.
- King, L. C. A geomorfologia do Brasil Oriental. **Revista Brasileira de Geografia**, v. 2, p. 37-72. 1956.
- Lima, M. G. A história do intemperismo na província Borborema Oriental, nordeste do Brasil: implicações paleoclimáticas e tectônicas. Tese de Doutorado – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Recife. 2008.

- Lima, C.; Nascimento, E.; Assumption, M. Stress orientations in Brazilian sedimentary basins from breakout analysis: implications for force models in the South American plate. **Geophys. J. Int.**, v. 130, p. 112-124. 1997.
- Morais-Neto, J. M.; Alkmin, F. F. A deformação das coberturas terciárias do Planalto da Borborema (PB-RN) e seu significado tectônico. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 31, p. 95-106. 2001.
- Nogueira, F. C. C.; Bezerra, F. H. R.; Castro, D. L. Deformação rúptil em depósitos da Formação Barreiras na porção leste da Bacia Potiguar. **Geologia USP-Série Científica**, v. 6, p. 51-59. 2006.
- Rossetti, D. F.; Góes, A. M.; Valeriano, M. M. **Correlação estratigráfica da “Formação Barreiras” no nordeste e norte do Brasil.** In: Congresso da ABEQUA, 11, 2007, Belém, ABEQUA, CD...Belém.
- Rossetti, D. F. Paleosurfaces from northeastern Amazonia as a key for reconstructing paleolandscapes and understanding weathering products. **Sedimentary Geology**, v. 169, p. 151-174. 2004.
- Putzer, H. Movimentos quaternários epirogênicos da costa sudeste do Brasil e o problema do sambaqui. **Notícia Geomorfológica**, v. 2, p. 39-41. 1959.
- Suguio, K.; Martin, L. The role of neotectonics in the evolution of the Brazilian coast. **Geonomos**, v. 4, p. 45-53. 1996.
- Sousa, D. C., Sá, E. F. J.; Matos, R. M. D.; Antunes, A. F. Lima-Neto, F. F., Medeiros, W. E.; Xavier-Neto, P. Deformação cenozóica na região de Icapuí (CE), e sua implicação na estruturação de campos de petróleo na borda ocidental da Bacia Potiguar. In: **Congresso Brasileiro de P&D em Petróleo & Gás**, 2, 2003, Rio de Janeiro. CD...Rio de Janeiro.
- Szatmari, P.; Françolin, J. B. L.; Zanotto, O.; Wolff, S. Evolução tectônica da margem equatorial brasileira. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 17, p. 180-188. 1987.