



**Reativação Tectônica Quaternária no Domínio Sul da Província Borborema, NE do Brasil:
Integração de Dados Morfométricos, Geológicos e Geofísicos da Bacia do Rio Una**
Quaternary Tectonic Reactivation in the Southern Domain of Borborema Province, NE Brazil:
Integration of Morphometric, Geological and Geophysical Data From the Una River Drainage Basin

Osvaldo José Correia Filho¹; José Antonio Barbosa²; Bruno Tavares³; Hewerton Alves da Silva¹,
Kleython de Araujo Monteiro⁴; Carlos Eduardo Guedes Fabin¹, Jefferson Tavares Cruz Oliveira²,
Felipe Ribeiro Santana⁵ & Sidney Marinho da Silva⁶

¹Universidade Federal de Pernambuco, Programa de Pós-graduação Geociências - PPGEOC/UFPE,
Rua Acadêmico Hélio Ramos s/n, Cidade Universitária, 50740-530, Recife, Brasil

²Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Tecnologia e Geociências, Departamento de Geologia - DGEOL/CTG/UFPE,
Rua Acadêmico Hélio Ramos s/n, Cidade Universitária, 50740-530, Recife, Brasil

³Universidade Federal de Pernambuco, Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Departamento de Arqueologia,
Rua Acadêmico Hélio Ramos s/n, Cidade Universitária, 50740-530, Recife, Brasil

⁴Universidade Federal de Alagoas, Instituto de Geografia, Desenvolvimento e Meio Ambiente,
Avenida Lourival Melo Mota s/n, Tabuleiro do Martins, 57072-900, Maceió, Brasil

⁵Escola Estadual Manoel Salustino (E.E.M.S), Mina Brejuí, n. 55, 59380-000, Currais Novos, Brasil

⁶Universidade Federal de Pernambuco, Departamento de Ciências Geográficas,
Rua Acadêmico Hélio Ramos s/n, Cidade Universitária, 50740-530, Recife, Brasil

E-mails: osv.correia@gmail.com; barboant@hotmail.com; brunoactavares@gmail.com; geokleython@gmail.com; dasilva.hewerton@gmail.com; c.e.fabin@hotmail.com; lipegt@hotmail.com; jeffersonfisico@hotmail.com; sidneymarinhogeo@yahoo.com.br

Recebido em: 16/05/2019 Aprovado em: 20/08/2019

DOI: http://dx.doi.org/10.11137/2019_4_219_237

Resumo

Integração de dados em diferentes escalas foi realizada com o objetivo de identificar possíveis efeitos de reativações tectônicas cenozoicas (pós-rifte), relacionadas ao embasamento adjacente à Bacia Pernambuco, sobre o qual está localizada a bacia hidrográfica do Rio Una. O estudo foi baseado na integração de parâmetros morfométricos do canal do Rio Una, modelados a partir de imagens de radar, dados de geologia de superfície e dados de sísmica de reflexão multicanal 2D adquiridos no canal do rio, próximo às cidades de Barreiros e Palmares. A análise morfométrica se baseou no cálculo da relação declividade vs. extensão (RDE) ao longo do perfil longitudinal do Rio Una. Dados geológicos foram coletados em afloramentos no embasamento próximo aos municípios de Barreiros e Palmares. Também foram investigados os depósitos da Formação Barreiras na região costeira, próximo ao município de São José da Coroa Grande. A análise do perfil longitudinal mostrou que o Rio Una está implantado sobre três superfícies criadas por eventos sucessivos de soerguimento e erosão, as quais controlaram a compartimentação de sua bacia hidrográfica. O estudo do índice RDE mostrou a ocorrência de anomalias de primeira ordem, no médio curso, e de segunda ordem, no médio e baixo curso do rio. As anomalias de primeira e segunda ordem estão localizadas sobre as principais zonas de cisalhamento pré-cambrianas que cortam o embasamento com orientação NE-SW. As anomalias também estão relacionadas a falhas e fraturas mais jovens com direção NW-SE. A interpretação dos dados sísmicos mostrou um arranjo de falhas e fraturas de alto ângulo no embasamento que afetaram depósitos sedimentares de idade quaternária e holocênica. Também foram observadas falhas em depósitos da Formação Barreiras (Mioceno) depositados sobre o embasamento próximo a borda da Bacia Pernambuco. A geometria dos planos de falha é indicativa de estruturas do tipo flor, relacionadas a um regime de reativação transcorrente que está atuando sobre a margem continental, com compressão máxima E-W e extensão N-S. Este regime afetou a morfologia do canal do Rio Una, bem como os depósitos sedimentares associados à sua bacia de drenagem.

Palavras-Chave: Neotectônica; Índice morfométrico; Província Borborema

Abstract

An integration of data in different scales was built aiming to identify possible effects of tectonic reactivations of Cenozoic origin (post-rift), related to the continental basement adjacent to the coastal zone of Pernambuco marginal basin, over which was formed the hydrographic basin of the Una River. The study was based in the integration of morphometric parameters of the Una River channel modeled with satellite radar imagery, geological data, and 2D multichannel shallow seismic data acquired over the river channel in the proximities of Barreiros and Palmares cities. Morphometric analysis comprised the calculation of the length-gradient index along the longitudinal profile of the Una River. Geological data were collected from basement outcrops near the cities of Barreiros and Palmares. Barreiras Formation outcrops located in the coastal basin, near the city of São José da Coroa Grande were also investigated. Analysis of longitudinal profile showed that the Una River channel was established over three planed surfaces, created by successive events of uplift and erosion of Borborema Plateau which controlled the compartmentation of this hydrographic basin. The calculation of length-gradient index showed the occurrence of first order anomalies in the middle course, and second order anomalies in the middle and low course of the river profile. Anomalies of first and second order are located over the main shear zones of the Pre-Cambrian basement, trending NE-SW. These anomalies are also related to younger fractures and faults trending NW-SE. Interpretation of seismic sections showed a series of high angle faults within the basement which affected Quaternary and holocenic deposits. The investigation also found faults in deposits of Barreiras Formation (Miocene) located in the coastal zone near the border of the Pernambuco Basin. Faults in basement rocks and in sedimentary deposits formed flower-like structures, which indicates the actuation of a transcurrent regime in the continental margin, with a maximum compression trending E-W and extension trending N-S. This regime affected the morphology of the Una River profile and the sedimentary deposits formed in its drainage basin.

Keywords: Neotectonics; Morphometric index; Borborema Province

1 Introdução

Eventos de reativação tectônica de idade Cenozoica foram reconhecidos na porção oriental do nordeste brasileiro (Bezerra *et al.*, 2007; Bezerra *et al.*, 2014; Lima *et al.*, 2017; Vasconcelos *et al.*, 2019). Os estudos realizados até o presente mostraram os efeitos destes eventos no embasamento adjacente das bacias marginais e na cobertura sedimentar da faixa costeira, em especial para as bacias Potiguar e da Paraíba. A oportunidade de identificar evidências desses processos na região de embasamento adjacente da bacia de Pernambuco, motivou esta pesquisa, que optou por integrar dados de superfície e de subsuperfície, com foco na evolução Cenozoica da bacia hidrográfica do Rio Una. A análise morfométrica realizada por meio da modelagem do perfil longitudinal e da relação declividade *vs.* extensão (RDE) de trechos do canal de um rio, permitem definir a relação entre a evolução do sistema fluvial e as principais mudanças no substrato geológico sobre o qual está implantado. Estes parâmetros podem auxiliar na determinação de atividades tectônicas recentes que exercem influência sobre a drenagem, especialmente durante o Quaternário (Missura, 2005; Etchebehere *et al.*, 2006; Monteiro *et al.*, 2014). O estudo do perfil longitudinal e do índice RDE de um canal permitem identificar setores que mostram anomalias topográficas em relação ao seu perfil de equilíbrio. Este tipo de estudo pode auxiliar na determinação de regiões de risco geológico ao longo do canal. Além disso, a integração entre dados de geologia estrutural e de geomorfologia representa uma importante ferramenta para o estudo da evolução de bacias hidrográficas (Missura, 2005; Etchebehere *et al.*, 2006; Monteiro, 2010; Monteiro *et al.*, 2014).

Mudanças no comportamento do embasamento, provocadas por processos recentes (neotectônica), podem causar variações no perfil longitudinal do rio e conseqüentemente gerar anomalias que podem ser classificadas como de primeira ou segunda ordem, de acordo com sua importância (Hack, 1973; Etchebehere, 2000; Missura, 2005; Etchebehere *et al.*, 2006).

A análise do perfil longitudinal do Rio Una foi elaborada a partir do cálculo do Índice de Rela-

ção Declividade *vs.* Extensão (RDE) de setores do rio selecionados a partir da modelagem da topografia da bacia de drenagem. Esta etapa foi realizada com base no processamento de imagens de radar. Também foram analisados dados de sísmica de reflexão 2D rasos adquiridos ao longo da calha do Rio Una, o que permitiu observar o comportamento dos depósitos recentes formados diretamente sobre o embasamento a partir do qual a calha foi erodida durante o Quaternário. Também foram coletados dados de geologia de superfície do embasamento e em depósitos da Formação Barreiras (Mioceno-Pleistoceno) que recobrem o embasamento adjacente à região costeira da Bacia de Pernambuco. A integração destes três conjuntos de dados permitiu definir que o canal do rio foi afetado por ajustes topográficos importantes, relacionados à reativação de falhas e Zonas de Cisalhamento do embasamento, desde o Neógeno até o Recente (Quaternário).

Pela primeira vez foram documentados, de forma sistemática, evidências de processos tectônicos regionais a partir de dados de superfície e subsuperfície, que continuam transformando a morfologia da faixa costeira, do embasamento adjacente e possivelmente da região *offshore* da Bacia de Pernambuco.

2 Área de Estudo

A Bacia Hidrográfica do Rio Una (BHU) está localizada no estado de Pernambuco, sua área de drenagem abrange 42 municípios e apresenta uma extensão de aproximadamente 6.736 km² (Figura 1). A BHU é uma bacia hidrográfica costeira, inserida nas mesorregiões do Agreste e Zona da Mata Sul do estado de Pernambuco. O Rio Una tem sua nascente localizada a 900 m de altitude, na serra da Boa Vista (município de Capoeiras, Pernambuco). Desde sua nascente até a sua foz, que está localizada no município de São José da Coroa Grande, o Rio Una possui 272 km de extensão. A distribuição de precipitação média anual na área de drenagem apresenta aumento em direção a sua foz, passando de cerca de 501 mm/ano, próximo à sua cabeceira, para 2000 mm/ano na região costeira (APAC/ITEP). É im-

portante destacar que em 2010 o Rio Una produziu enchentes de grandes proporções, e que devido ao processo de urbanização de suas margens, incluindo as sedes de alguns municípios, gerou prejuízo material que afetou milhares de pessoas nas cidades de Palmares, Água Preta e Barreiros. Este rio apresenta grande importância para os municípios atravessados por suas águas, por causa da atividade agrícola e do abastecimento hídrico das populações desta região (Figura 1).

3 Contexto Geológico

A BHU está implantada sobre rochas pré-cambrianas da Província Borborema (Almeida *et al.*, 1977; Van Schmus *et al.*, 1997, 2008; Santos *et al.* 2010; Neves *et al.* 2012; Araújo *et al.*, 2013), especificamente no domínio sul desta província no complexo Pernambuco-Alagoas (Silva Filho *et al.*,

2001, 2013) (Figura 2). Neste domínio ocorrem extensas zonas de cisalhamento transcorrentes pré-cambrianas, com direção principal NE-SW, e que apresentam geometria anastomosada criada pela interação das ramificações entre as zonas de cisalhamento (Brito Neves *et al.*, 2000; Weinberg *et al.*, 2004; Ponce *et al.*, 2013; Neves *et al.*, 2012; Archanjo *et al.*, 2013). Além disso, evidências estabelecidas a partir de dados geofísicos e pelo estudo de modelo digital de terreno sugerem a ocorrência de estruturas rúpteis, com direção NW-SE, que afetaram a trama dúctil criada pelas zonas de cisalhamento neoproterozoicas. A idade destas fraturas e falhas de pequeno rejeito ainda é motivo de debate, embora várias pesquisas realizadas no embasamento adjacente das bacias na região oriental da Província Borborema (bacias de Pernambuco, Paraíba e Plataforma de Natal) sugerem que essas falhas podem estar relacionadas aos processos tectônicos que culminaram na abertura do Atlântico Sul, assim como as reativações

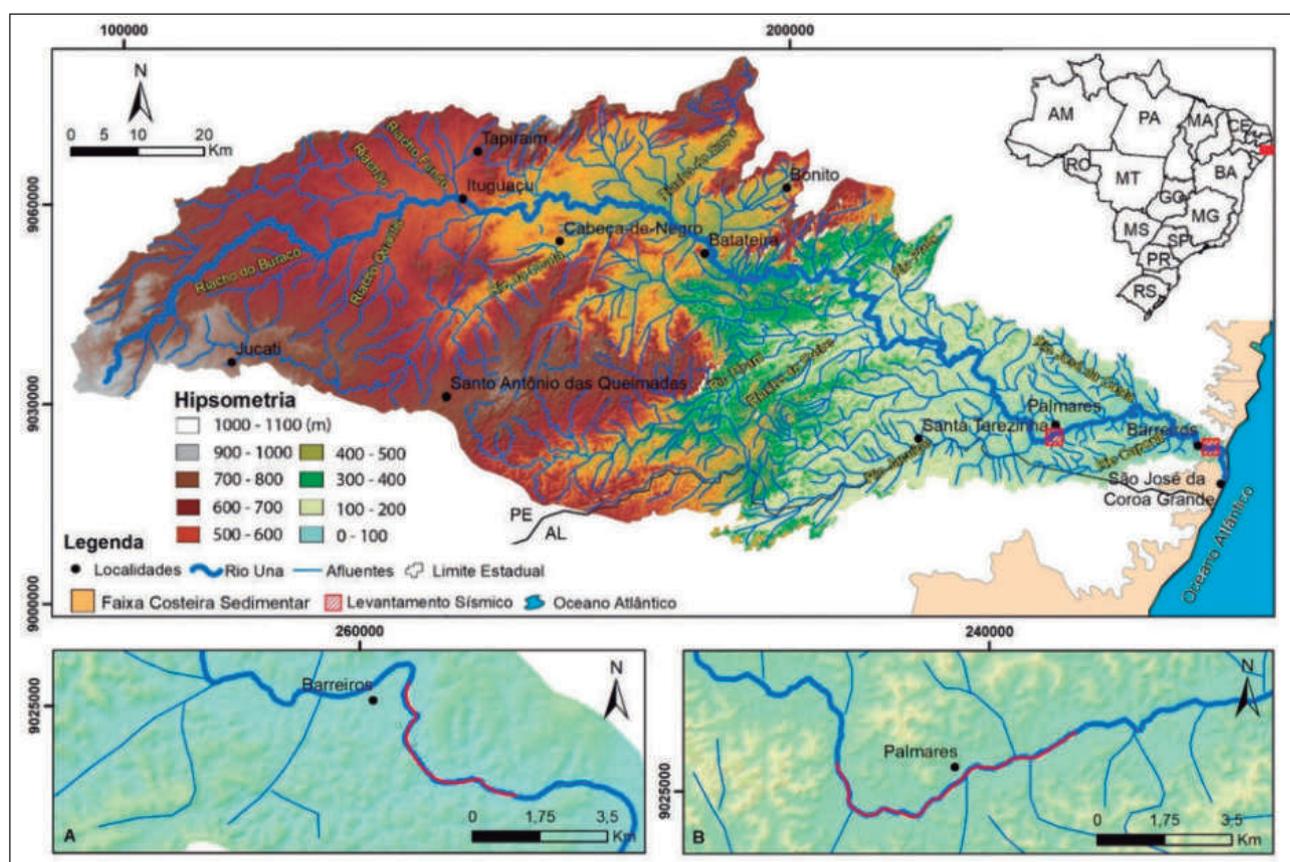


Figura 1 Mapa de localização da bacia hidrográfica do Rio Una, que abrange área de embasamento adjacente à bacia de Pernambuco. O mapa mostra também o comportamento do relevo sobre o qual a bacia está implantada (modelo digital de elevação gerado com base em imagens de radar - SRTM). A) e B) mapas de detalhe da localização das seções sísmicas analisadas, que foram levantadas ao longo do canal do rio, próximo aos municípios de Barreiros e Palmares (linha em vermelho).

ocorridas durante o Cenozoico (Bezerra *et al.*, 2007; Maia & Bezerra, 2011; Bezerra *et al.*, 2014).

Bezerra *et al.* (2014) sugeriram que esta região da Plataforma Sul-Americana (a porção leste da Província Borborema) está sob um regime de compressão E-W e extensão N-S desde o início do Neógeno, o que ocasionou um processo de reativação das estruturas antigas, afetando tanto o embasamento quanto os depósitos sedimentares antigos cretáceos (rifte e pós-rifte) das bacias sedimentares do Nor-

deste do Brasil, bem como depósitos quaternários e recentes (Marotta *et al.*, 2015; Nogueira *et al.*, 2015; Lima *et al.*, 2017).

4 Materiais e Métodos

4.1 Modelagem do Perfil Longitudinal

O perfil longitudinal de um canal fluvial apresenta parâmetros morfológicos que podem ser utilizados para estabelecer uma melhor compreensão dos

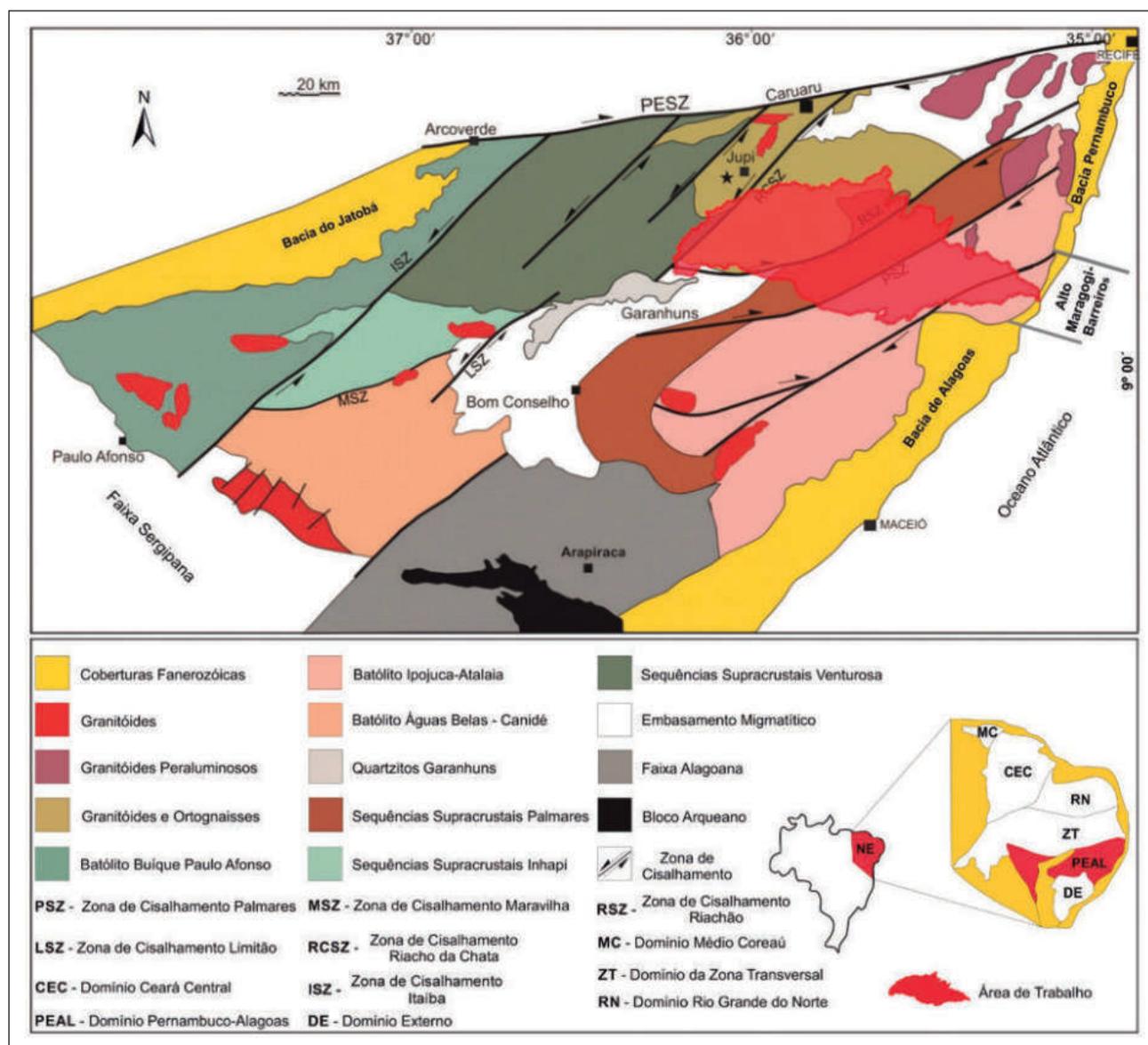


Figura 2 Distribuição dos principais terrenos e litologias do Domínio Sul da PB, limitado a norte pela Zona de Cisalhamento de Pernambuco (modificado de Silva Filho, 2001). As principais zonas de cisalhamento que ocorrem neste domínio apresentam direção principal NE-SW. A Bacia Hidrográfica do Rio Una é representada pelo polígono vermelho, adjacente à região costeira da bacia de Pernambuco.

processos que atuaram no controle da erosão e deposição dos sistemas sedimentares envolvidos. O Perfil Longitudinal representa um gráfico cartesiano que relaciona a extensão de um canal fluvial (eixo x), ou de seu vale, com a variação da altitude (eixo y), em pontos definidos ao longo do perfil (Snyder *et al.*, 2000; Roe *et al.*, 2002; Guedes *et al.*, 2006; Souza *et al.*, 2010; Kirby & Ouimet, 2011; Kale *et al.*, 2014; Byun & Seong, 2015). Considera-se que o perfil de um rio está em seu estado de equilíbrio quando os processos de erosão e deposição sedimentar apresentam um balanço que favorece a estabilidade de seu regime hidráulico. Neste caso, o perfil longitudinal de um rio em equilíbrio apresentará funções logarítmicas com assíntotas longas no eixo x do gráfico de correlação (Bjornberg, 1969a, 1969b; McKeown *et al.*, 1988; Martinez, 2004). Desta forma, o trecho de drenagem que apresenta desajuste em relação ao perfil atual de equilíbrio indica os trechos (ou partes) do perfil que estão em desequilíbrio fluvial. Este fenômeno pode indicar setores cujo desajuste representa o efeito de processos neotectônicos, ou o efeito de diferenças entre compartimentos estruturais que controlam a variação na forma e no gradiente da drenagem (Etchebehere *et al.*, 2004; Monteiro, 2010).

4.2 Relação Declividade-Extensão (RDE)

O Rio Una foi escolhido para a aplicação do índice da Relação Declividade-Extensão (Hack, 1973; Etchebehere, 2000) porque este apresenta um forte controle do embasamento cristalino, adjacente à Bacia de Pernambuco. Além disso, a disponibilidade de dados de sísmica rasa permitiram uma integração de dados de superfície e de sub-superfície em um trecho do perfil do rio estudado.

O sistema fluvial responde de maneira rápida a eventos tectônicos, mesmo quando estes eventos apresentam pequena magnitude, tornando possível detectar seu efeito no padrão de drenagem (Etchebehere, 2004; Monteiro *et al.*, 2010; Lin & Oguchi, 2011; Troiani *et al.*, 2017; Castillo, 2017). Eventos tectônicos recentes geram pequenas modificações nos parâmetros morfométricos, por exemplo, no valor do RDE.

Hack (1973) propôs que a relação da declividade-extensão de um rio pode demonstrar a ocorrência de trechos nos quais ocorre um desajuste em relação à curva de equilíbrio esperada. Este cálculo

permite identificar setores anômalos no perfil longitudinal do rio, considerando o fato de que o gradiente diminui progressivamente em direção à foz do rio, e que seu perfil de equilíbrio é representado por uma curva de concavidade para cima (McKeown *et al.*, 1988; Etchebehere, 2000; Martinez, 2004; Etchebehere *et al.*, 2006). Pode-se calcular o índice RDE a partir das seguintes equações:

$$RDE_{Trecho} = \left(\frac{\Delta H}{\Delta L} \right) \times L; \quad (1)$$

$$2 - RDE_{Total} = \frac{\Delta H}{\ln L}, \quad (2)$$

onde ΔH é a diferença altimétrica entre dois pontos, de início e fim do trecho selecionado; ΔL corresponde à projeção horizontal do trecho analisado; L é a extensão total do canal e L_n é o logaritmo natural de L (Figura 3).

O índice RDE já foi aplicado com sucesso na observação de processos neotectônicos em diferentes contextos geológicos, como por exemplo na região do Himalaia (Seeber & Gornitz, 1983), no nordeste do estado de Arkansas, na América do Norte, próximo à zona sismogênica de New Madrid, a sul do estado do Missouri (McKeown *et al.*, 1988). Alguns estudos também foram realizados na região da falha de San Andreas, na Califórnia, e na região da junção triplíce formada pelas placas tectônicas da América do Norte, do Pacífico e de Gorda (Merritts & Vincent, 1989).

No Brasil, destacam-se alguns trabalhos de referência na região amazônica (Rodríguez & Suguio, 1992), na região do município de São Paulo (Takiya, 1997), na Bacia Hidrográfica do Rio Tracunhaém, no estado de Pernambuco (Monteiro *et al.*, 2010), e na Bacia Hidrográfica do Rio Ipojuca, vizinha à Bacia do Rio Una (Monteiro *et al.*, 2014). Esta metodologia também tem sido aplicada como uma ferramenta importante para a determinação de evidências de reativações provocadas por neotectonismo durante o Quaternário (Missura, 2005; Etchebehere *et al.*, 2006; Monteiro, 2010).

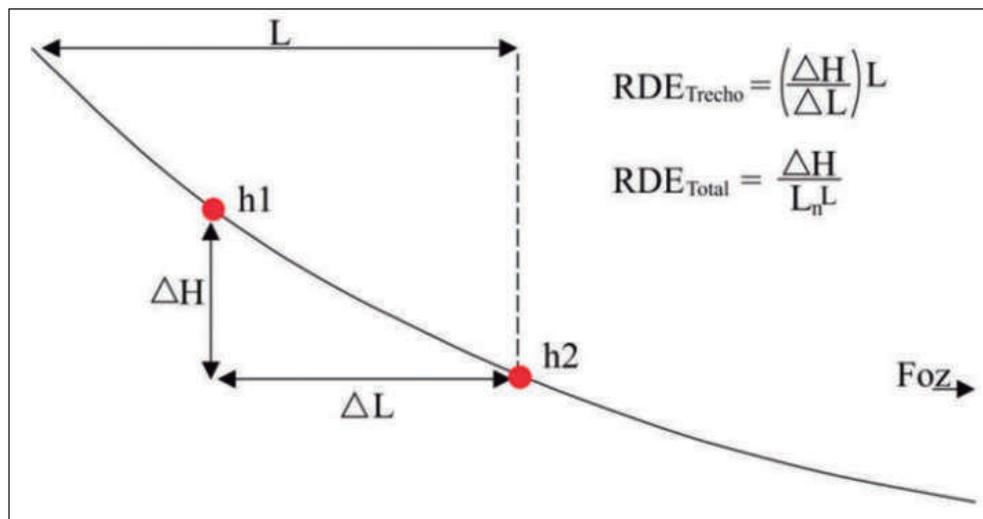


Figura 3 Diagrama esquemático que mostra os parâmetros utilizados para a definição dos valores do índice RDE.

São consideradas como anomalias valores acima de 2 (dois), a partir do cálculo da razão RDE_{trecho}/RDE_{total} (Seeber & Gornitz, 1983). Estas anomalias podem ser subdivididas em anomalias de primeira e segunda ordem. As anomalias de segunda ordem apresentam razão entre 2 e 10, enquanto a anomalia de primeira ordem corresponde a valores maiores que 10 (dez). Normalmente, as anomalias de primeira ordem estão relacionadas a trechos do canal com fortes gradientes topográficos. Estes trechos com forte variação do gradiente, representam setores onde não houve tempo suficiente, ou competência do regime hidráulico, para que o perfil da drenagem fosse ajustado ao perfil de equilíbrio. Já as anomalias de segunda ordem ocorrem em trechos onde a declividade está um pouco acima do perfil de equilíbrio da drenagem (Etchebehere, 2000; Etchebehere, 2004; Martinez, 2004; Etchebehere, 2006; Monteiro, 2015).

4.3 Modelagem dos Dados

4.3.1 Modelo Topográfico e Base de Dados Geológicos

Para a realização do cálculo do índice RDE e a definição dos principais lineamentos topográficos que ocorrem na Bacia Hidrográfica do Rio Una, foram utilizados os dados de altimetria obtidos pelo *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM), fornecidos pelo serviço geológico americano em convênio com a NASA, e obtidos a partir do portal *EarthExplorer* com resolução espacial de 30 m.

Também foram utilizados os dados de geologia de superfície compilados pelo Serviço Geológico do Brasil (GEOBANK-CPRM), os quais foram utilizados para a confecção de mapas com as feições topológicas: *shapefiles* das unidades geológicas e das estruturas, em escala regional (1:500.000).

4.3.2 Processamento dos Dados

A partir da confecção dos mapas de modelo digital de elevação (MDE) da bacia do Rio Una, foi executada a interpretação dos principais lineamentos topográficos identificados nestes mapas e em seguida foi realizada a confecção de diagramas de roseta para a definição dos principais *trends* estruturais da área. Posteriormente, foi executado o cálculo do índice RDE a partir da extração dos valores de altimetria no MDE, considerando intervalos de altitude de 25 m, com auxílio da definição de isolinhas a partir do modelo digital de elevação (Figura 4).

4.4 Dados de Sísmica de Reflexão

Duas seções de sísmica rasa multicanal migradas em tempo (TWT), levantadas no canal do Rio Una, nas proximidades das cidades de Palmares e Barreiros foram interpretadas com o objetivo de se observar o comportamento do embasamento. As seções foram adquiridas por meio de um *array* de prospecção rebocado por uma pequena embarcação. As seções sísmicas alcançaram uma profundidade média de imageamento em subsuperfície de até 20 m (ver localização na Figura 1).

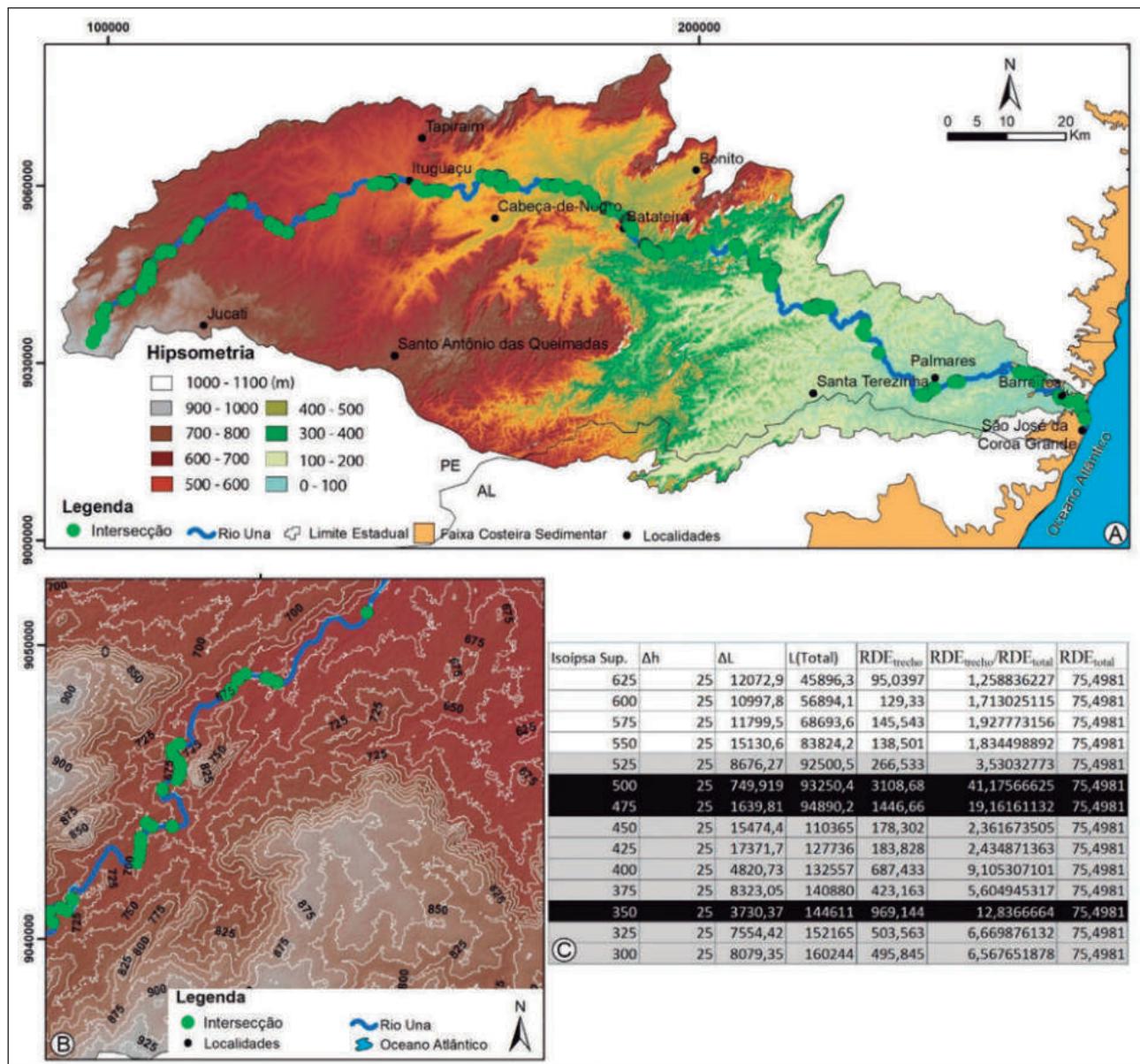


Figura 4 A) Mapa Hipsométrico da Bacia Hidrográfica do Rio Una, a linha azul representa o trajeto de sua calha principal. B) Detalhe que mostra como foram definidos os pontos calculados do índice RDE, considerando pontos espaçados conforme isoipsas a cada 25 m de intervalo; C) Detalhe da tabela utilizada para o cálculo, com destaque em preto de alguns exemplos de trechos onde ocorrem anomalias de primeira ordem, e destaque em cinza para trechos com anomalias de segunda ordem.

5 Resultados

5.1 Arcabouço Estrutural

A bacia hidrográfica do Rio Una está localizada sobre unidades lito-estratigráficas do Complexo Pernambuco-Alagoas (Figura 5). São rochas paleoproterozoicas a neoproterozoicas, representadas por gnaiesses, migmatitos, metasedimentares e granitóides.

No leito do Rio Una, nas proximidades da cidade de Barreiros, afloram corpos graníticos nos quais foram observados cristais centimétricos de feldspato potássico de cor vermelha, cristais milimétricos a centimétricos de plagioclásio, cristais anedrais de quartzo e biotita associada a cristais de anfibólio. Estes corpos apresentam variação composicional macroscópica entre alkali-feldspato sienito a granito, e

comumente apresentam textura porfirítica. Além das rochas que compõem os terrenos pré-cambrianos, o canal do Rio Una possui coberturas sedimentares que recobrem o leito do seu canal, criadas pela erosão a partir de sua configuração recente. O baixo curso deste rio está implantado sobre rochas sedimentares da Bacia Pernambuco, especificamente na porção sul da faixa costeira desta bacia. Neste setor ocorrem depósitos da Formação Barreiras e depósitos pós-Barreiras (Rossetti et al., 2011) na região de São José da Coroa Grande (Figuras 5, 6 e 7). A Formação Barreiras nessa região é representada pela intercalação de camadas arenosas e siltico-argilosas, bioturbadas, com estratificações cruzadas acanaladas e acamamento convoluto (Figura 7). Nos afloramentos visitados foram registradas falhas verticais que cortam a Formação Barreiras, por vezes com padrões geométricos de estruturas em flor, tanto positivas, quanto negativas (Figura 7).

O arcabouço tectônico é representado principalmente pelas zonas de cisalhamento dúcteis, de idade brasileira (Figuras 5 e 6). Estas zonas de cisalhamento apresentam orientação principal NE-SW, com frequência de observação máxima em

45° Az. Com orientação perpendicular as zonas de cisalhamento, ocorre outra família de lineamentos topográficos, com orientação preferencial NW-SE e frequência máxima de observação em 312° Az. Possivelmente, estas estruturas ortogonais as zonas de cisalhamento estão relacionadas a formação de estruturas rúpteis (falhas de transferência) associadas à formação do rifte Atlântico Sul (Polonia, 1997), e fraturas indivisas.

5.2 Perfil Longitudinal

A extensão total do perfil do canal do rio Una tratado neste estudo foi de 272 km (Figura 8) e a variação altimétrica observada foi de aproximadamente 925 m em relação ao atual nível relativo do mar. Um perfil composto pelo ajuste dos dados altimétricos foi calculado ao longo do perfil do canal do rio, representado por uma curva de correlação logarítmica do perfil longitudinal. A concavidade da curva está voltada para cima, indicando uma diminuição progressiva do gradiente topográfico do rio, desde a região distal da bacia hidrográfica até sua foz, o que representaria um perfil de equilíbrio ideal. A mode-

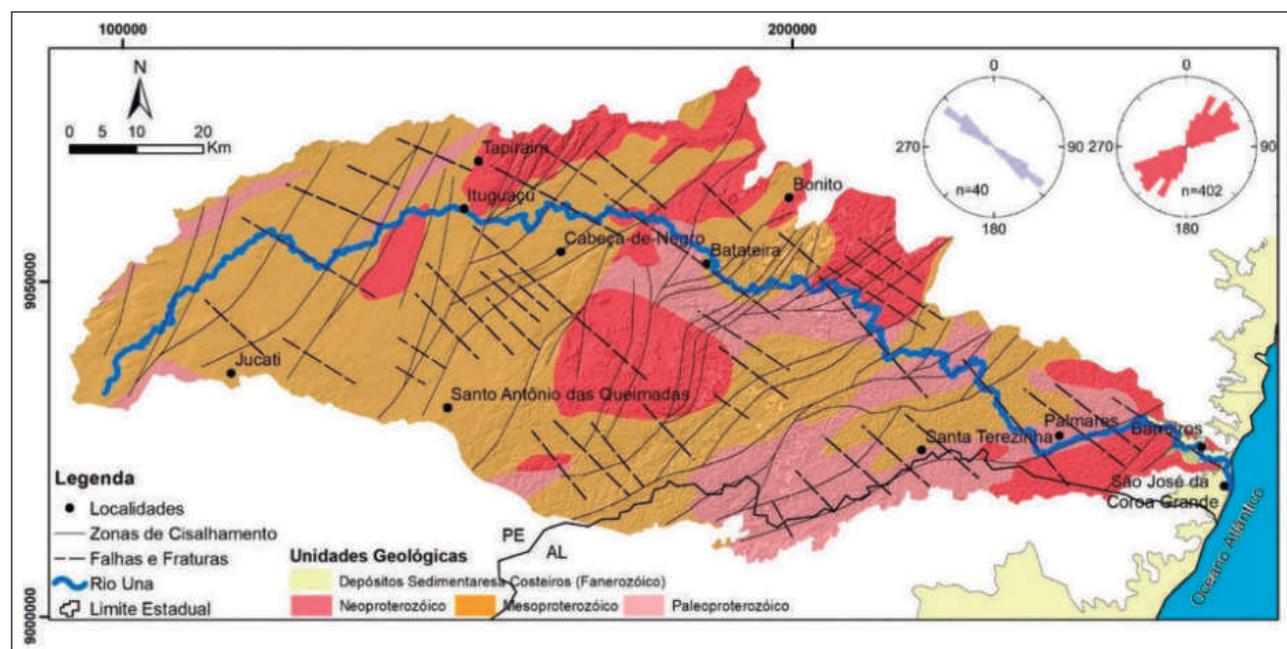


Figura 5 Mapa geológico da região da BHU (litoestratigrafia - GEO-SGB/CPRM) sobreposto ao MDE (dados SRTM). O comportamento dos lineamentos topográficos extraídos do MDE foi representado em diagramas de roseta e individualizados em duas famílias principais: a primeira (em rosa) com *trend* estrutural NE-SW, relacionada às principais zonas de cisalhamento do embasamento, e a segunda (roxo), com *trend* estrutural NW-SE, associada às estruturas rúpteis, falhas de pequeno rejeito e fraturas.

Figura 6 A) Fotografia do canal do Rio Una próximo à cidade de Barreiros. O canal foi erodido sobre o embasamento cristalino; B) Detalhe de um enclave diorítico em um corpo de composição granítica; C) Planos de falha escalonados, apresentando uma cinemática transcorrente dextral; D) Padrão de fraturas ortogonais com duas famílias principais, a primeira com *trend* estrutural NNE-SSW, e a segunda com *trend* estrutural ESE-WNW, identificadas no embasamento adjacente ao canal do rio.

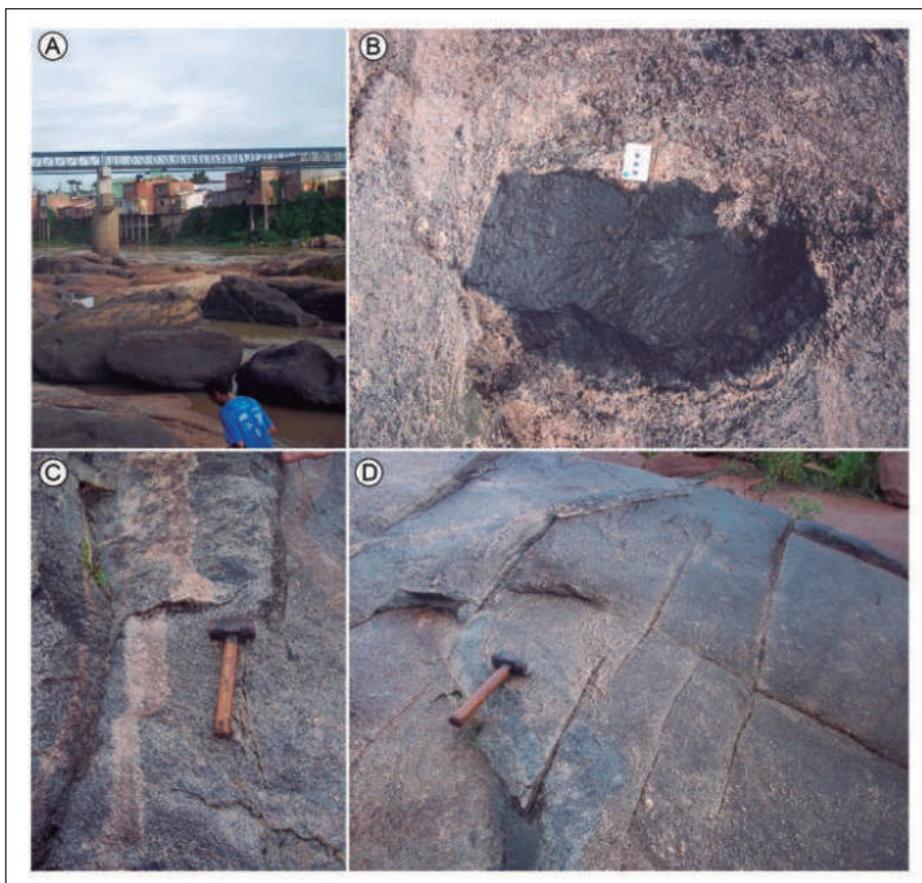
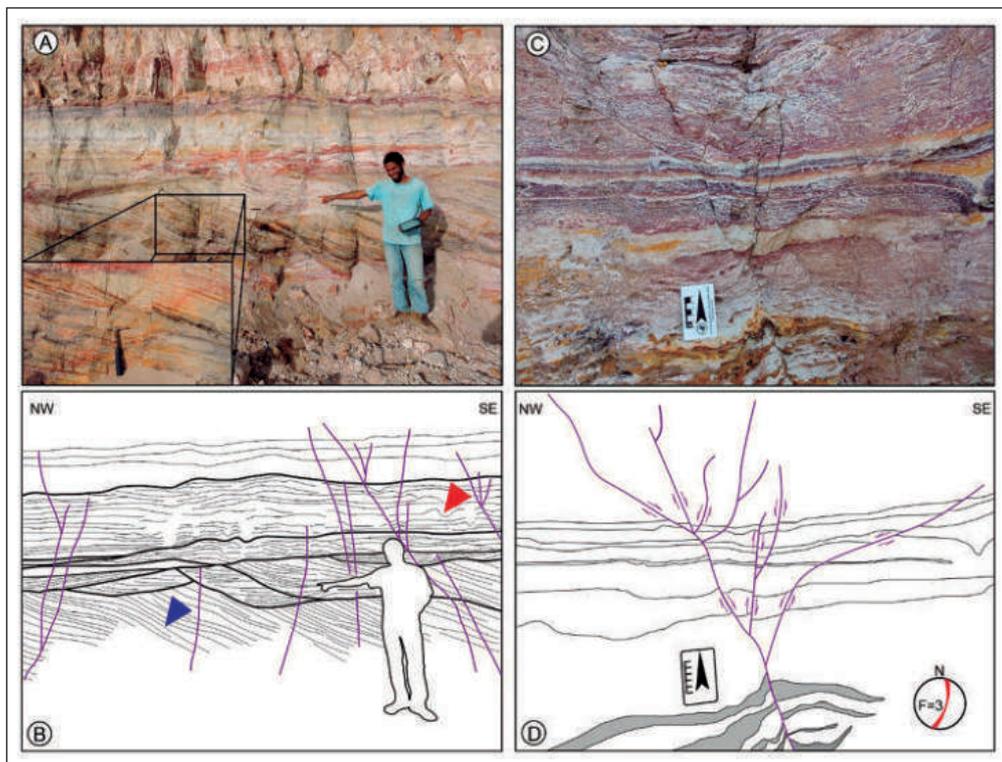


Figura 7 Detalhe da Formação Barreiras nas proximidades do município de São José da Coroa Grande. A) Afloramento localizado as margens da PE-60, exibindo intercalação de arenitos mosqueados e estratificados com camadas siltico-argilosas bioturbadas, detalhe para o plano de falha de rejeito centimétrico. B) Desenho esquemático ilustrando aspectos geométricos das estratificações cruzadas acanaladas (seta azul), acamamento convoluto (seta vermelha) e dos planos de falhas e fraturas que cortam a Formação Barreiras nesta região; C e D) Planos de falhas de pequeno rejeito, associados a uma estrutura em flor negativa.



lagem topográfica do perfil longitudinal do Rio Una sugere que este se desenvolveu sobre um contexto estrutural formado por três superfícies de aplainamento regionais, cujos limites podem ser identificados por três escarpas. As variações de gradiente mais fortes estão situadas próximo à sua nascente e no seu médio curso, entre as cotas de 953 e 755 m, 502 e 433 m e 288 e 159 m (Figura 8). As zonas de menor gradiente estão situadas entre as cotas de 800, 400 e 200 m.

Quando o perfil longitudinal do Rio Una é analisado em conjunto com a curva de tendência dos dados, representada pelo seu perfil de equilíbrio, nota-se que o Rio Una está submetido a um complexo regime hidráulico, com trechos bem marcados indicando pontos de erosão de seu leito. A aproximadamente 25 km de sua nascente, o canal do rio encon-

tra-se sobre regime de erosão e incisão; a partir de 20,5 km até 160 km de sua nascente, seu perfil está em regime agradacional; e por fim, o perfil apresenta novamente um regime erosivo/incisivo próximo à sua foz (Figura 8). No entanto, as principais variações de gradiente ao longo da calha do Rio Una, bem como as mudanças mais abruptas na direção de seu curso, foram controladas por mudanças no arcabouço estrutural sobre o qual o rio foi implantado.

5.3 Índice de Relação Declividade-Extensão (RDE)

A distribuição dos valores de anomalia do índice RDE (RDE_{trecho}/RDE_{total}) observada ao longo do canal do Rio Una apresenta uma amplitude de valores entre 52 até próximo de 0. Os valores das anomalias de RDE de segunda ordem apresentam média de

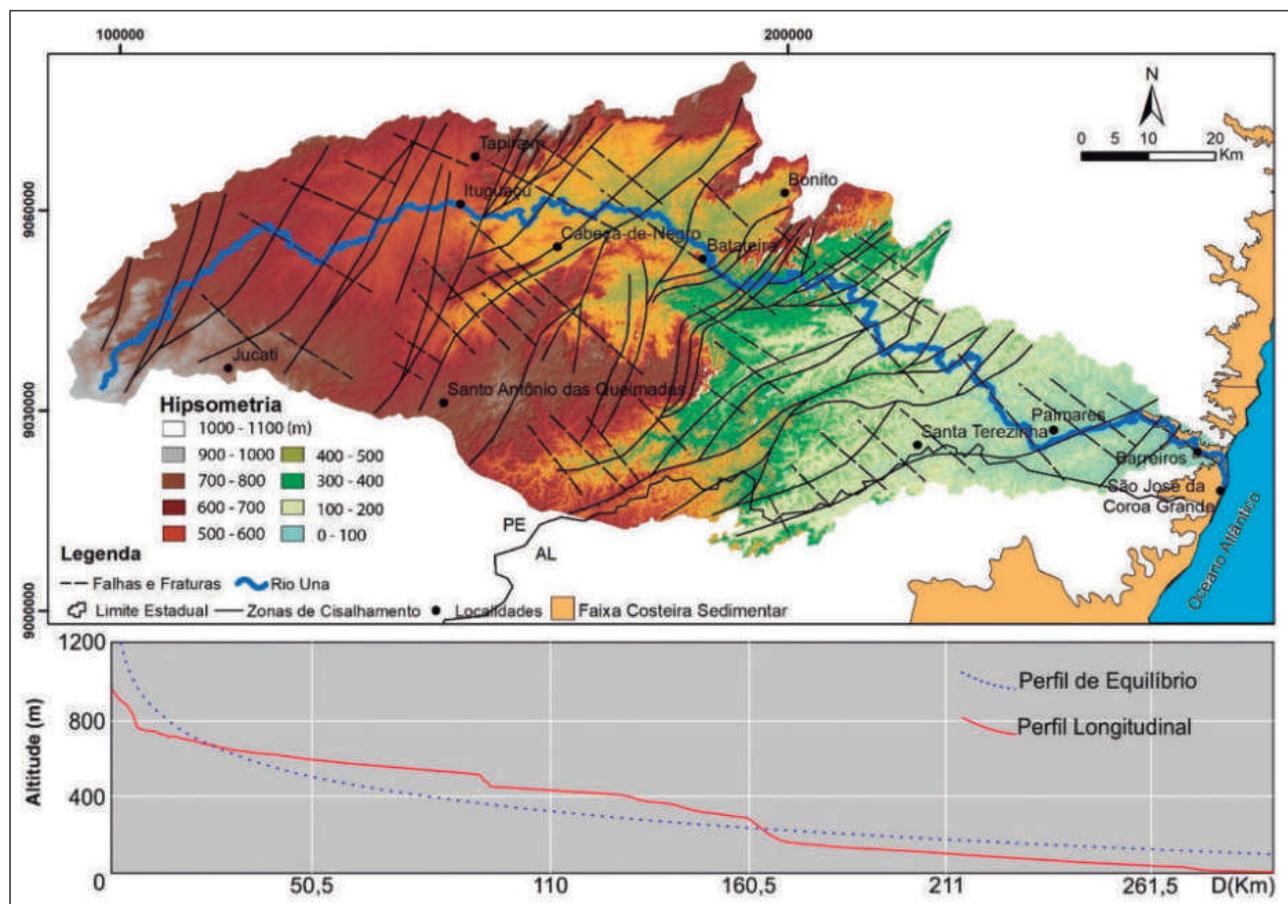


Figura 8 Mapa hipsométrico da BHU com o arcabouço estrutural representado pelas zonas de cisalhamento anastomosadas, falhas e fraturas. Linha vermelha - Perfil longitudinal da calha principal do Rio Una, desde sua nascente até a sua foz; linha azul pontilhada - perfil de equilíbrio calculado com base na correlação dos dados de topografia e de altitude.

5,55, enquanto que as anomalias de primeira ordem apresentam média de 29. Próximo à sua nascente, o Rio Una não apresenta anomalias associadas ao gradiente de declividade. No entanto, a partir de seu médio e baixo curso, as anomalias passam a ocorrer com maior frequência (Figura 9).

A análise integrada do mapa estrutural da região da Bacia Hidrográfica do Rio Una, com os valores do índice de RDE, mostra a forte correlação das anomalias com os principais lineamentos topográficos mapeados a partir do mapa hipsométrico. As anomalias de índice RDE estão localizadas sobre os principais lineamentos representados pelas zonas de cisalhamento brasileiras de direção NE-SW, bem como lineamentos que indicam a presença de falhas e fraturas com *trend* estrutural NW-SE (Figura 9). Esta correlação sugere reativações recentes que cria-

ram variações topográficas a partir do arcabouço tectônico pré-existente, como as zonas de cisalhamento e falhas mais recentes que não apenas capturaram a drenagem, como também continuam criando variações abruptas do gradiente topográfico. Conforme observado no mapa da Figura 9, as anomalias de primeira ordem estão localizadas na transição das três superfícies topográficas regionais, cuja orientação e limites apresentam direção NE-SW, devido ao forte controle provocado pelas zonas de cisalhamento.

5.4 Análise das Seções Sísmicas 2D do Canal do Rio Una

A análise dos padrões sísmicos encontrados nas duas seções sísmicas 2D permitiu o reconhecimento de três unidades sismoestratigráficas associadas a cobertura de sedimentos distintos e ao embasa-

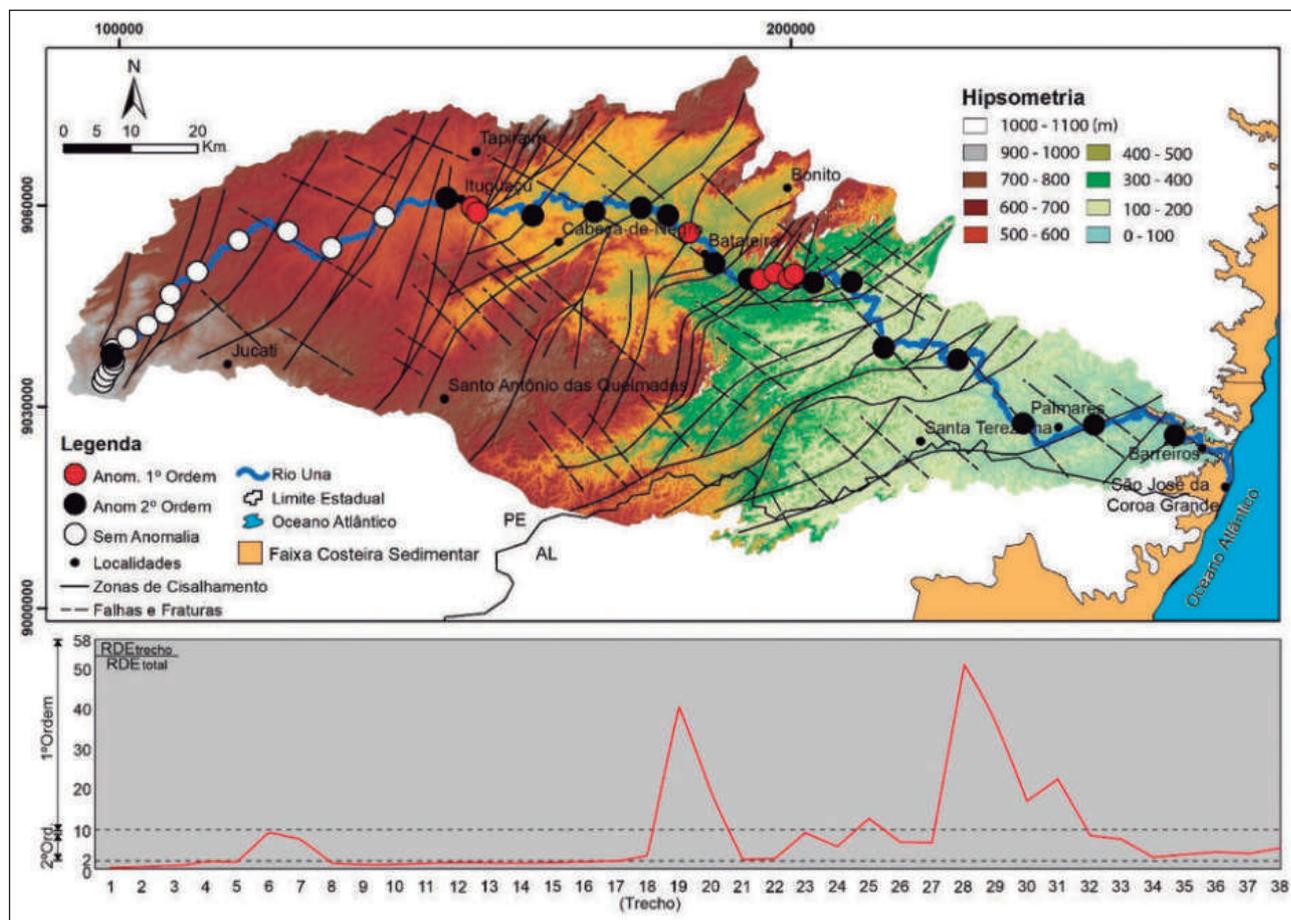


Figura 9 Mapa hipsométrico da Bacia Hidrográfica do Rio Una. Distribuição dos valores encontrados para a razão RDE_{trecho}/RDE_{total} para cada trecho individualizado ao longo do canal do Rio Una. As anomalias de primeira ordem ocorrem nos limites de três superfícies regionais limitadas pelas zonas de cisalhamento principais, com *trend* estrutural NE-SW.

mento. A primeira unidade observada (Unidade-1), corresponde ao embasamento cristalino que forma o substrato no local onde as seções foram levantadas. Este embasamento é composto pelo mesmo corpo granítico que aflora na região estudada (Figura 6). A Unidade-1 está relacionada a reflexões descontínuas, e configuração plano-paralela a caótica, com médias a altas amplitudes (Figuras 10 e 11). Sobre os refletores associados ao embasamento, de forma discordante, ocorre uma segunda unidade (Unidade-2), caracterizada por refletores de baixa continuidade, de média a baixa amplitude e alta frequência, com configuração paralela a ondulada. A interpretação sugere que estes refletores representam a sedimentação mais antiga formada sobre o leito de rochas cristalinas pela ação do rio. Na área adjacente ao seu canal, a cobertura mais profunda é composta por depósitos arenosos de idade quaternária. A terceira unidade identificada (Unidade-3), é caracterizada por um padrão de sismofácies predominantemente *free*, com refletores incipientes que indicam localmente um padrão plano-paralelo a ondulado. Esta sequência está associada à cobertura sedimentar mais recente, holocênica, formada por sedimentos inconsolidados compostos por lama e areia saturados de água. Estes sedimentos formam uma cobertura rasa sobre os depósitos que preenchem as regiões mais

profundas do leito do rio, e também suas margens (Figuras 10 e 11).

A interpretação sistemática das seções sísmicas permitiu identificar falhas normais de alto ângulo, com geometria em dominó. Também foram observadas estruturas do tipo flor, que sugerem um componente de reativação transcorrente das estruturas mais antigas que ocorrem no embasamento da região estudada. Tanto as falhas normais, quanto as falhas com componente transcorrente propagam-se a partir do embasamento e através da Unidade-2. As falhas também afetaram localmente a Unidade-3. A camada de sedimentos da Unidade-3, mostra aumento de espessura contra os planos de falha, e rotação dos refletores, indicando que a reativação foi contemporânea à deposição do material de idade quaternária. Como as falhas controlaram o espessamento local da Unidade-3, e também afetaram esta unidade, é possível inferir que a reativação e a propagação das falhas tenham se estendido até o Holoceno.

6 Discussão

De acordo com Crandall (1910) e Moraes (1924) o topo plano do Planalto da Borborema estaria associado a uma evolução desta unidade ge-

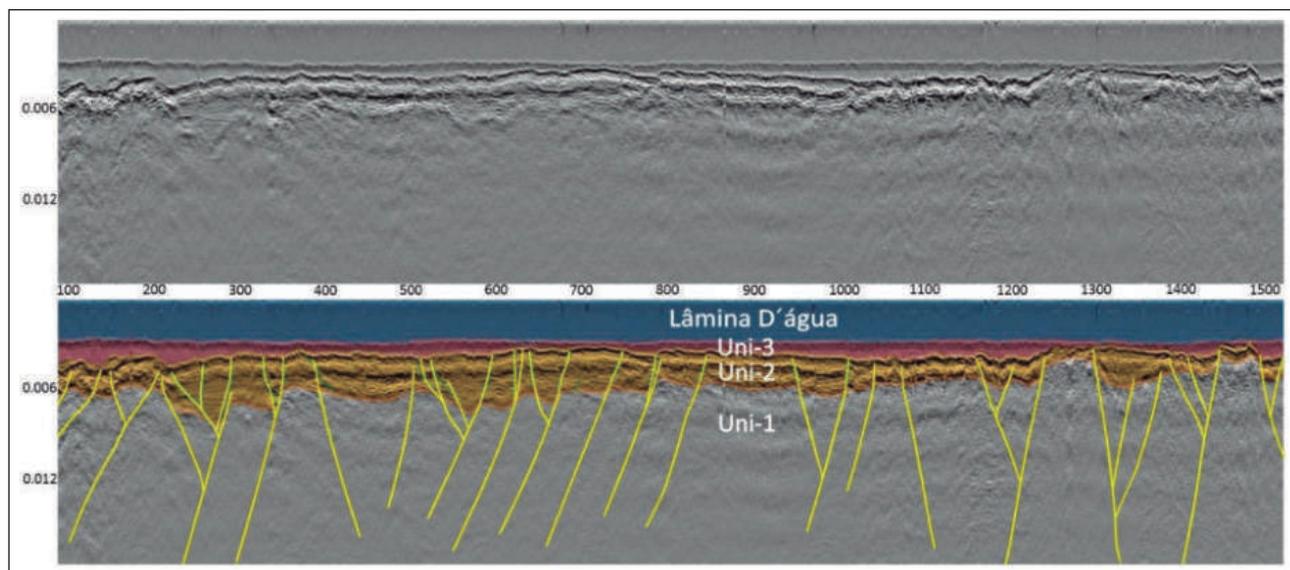


Figura 10 Seção sísmica levantada no canal do Rio Una, próximo à cidade de Barreiros. Três unidades sismoestratigráficas foram identificadas: 1) Unidade-1, que representa o embasamento cristalino; 2) Unidade-2 que representa uma camada de depósitos mais consolidados de possível idade quaternária; e 3) Unidade-3, que representa uma camada de depósitos inconsolidados, areia e lama, de possível idade holocênica. As falhas observadas são de alto ângulo (linhas amarelas), e controlaram o basculamento de blocos do embasamento, afetando os depósitos sedimentares que apresentam crescimento de espessura da camada contra planos de falhas, basculamento do acamamento e dobras.

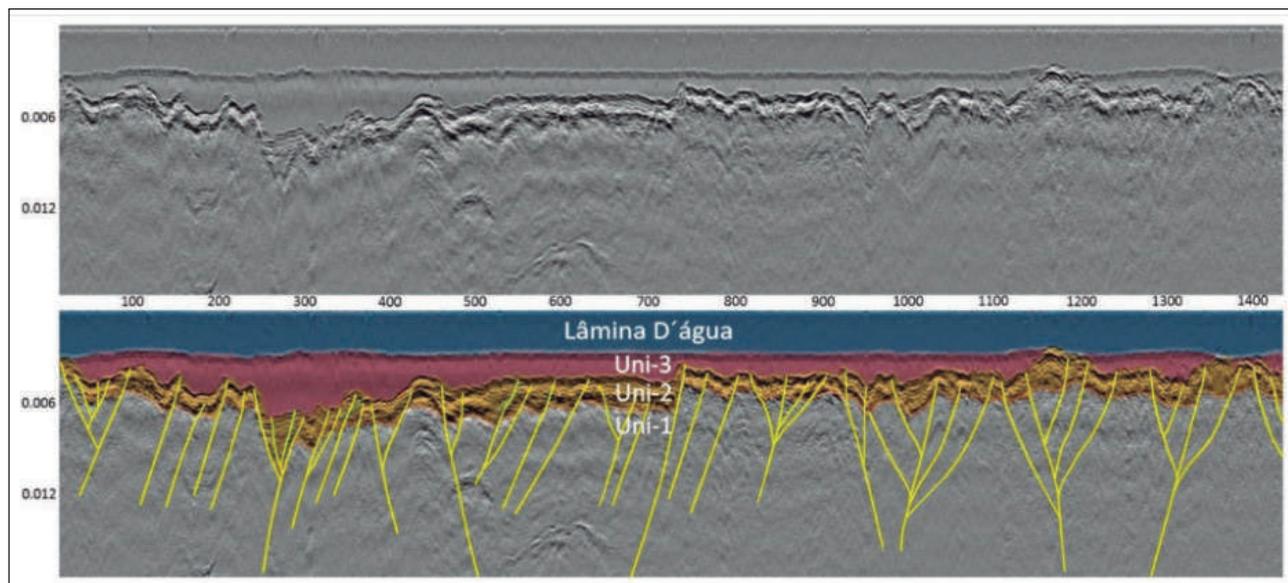


Figura 11 Seção sísmica 2D levantada no canal do Rio Una, próximo à cidade de Palmares. Três unidades sismoestratigráficas foram identificadas: 1) Unidade-1, que representa o embasamento cristalino, 2) Unidade-2 que representa uma camada de depósitos mais consolidados de possível idade quaternária, e 3) Unidade-3, que representa uma camada de depósitos inconsolidados, areia e lama, de possível idade holocênica. As falhas observadas são de alto ângulo (linhas amarelas), e controlaram o basculamento de blocos do embasamento, afetaram os depósitos sedimentares que apresentam crescimento de espessura contra planos de falhas, basculamento do acamamento e dobras.

omorfológica como um peneplano granítico soerguido. De acordo com os modelos clássicos sobre a formação de superfícies de erosão (peneplanos), em relação ao Planalto da Borborema propõe-se a existência de vários compartimentos hierárquicos que se formaram em resposta ao processo de soergimento cenozoico dessa megaestrutura (Corrêa et al., 2001; 2010; Luz et al., 2015).

A origem do soergimento do escudo continental formado pela Província Borborema ainda é motivo de debate (Oliveira & Medeiros, 2018; Garcia et al., 2019). Entretanto, estudos recentes comprovaram que o processo de arqueamento crustal e uma erosão continental ocorreu após o cretáceo (Corrêa, 2001; Corrêa et al., 2010; Peulvast & Bé-tard, 2015), alguns estudos sugerem que o interior da Província Borborema tenha alcançado um soergimento de cerca de 600 a 800 m, uma vez que carbonatos transicionais afloram nestas cotas topográficas na Bacia do Araripe (Davis & Kuszniir, 2004; Morais Neto et al., 2008; Morais Neto et al., 2009; Engelmann de Oliveira & Jelinek, 2017).

A ocorrência de capeamentos sedimentares em cotas elevadas no Planalto da Borborema

é considerada uma evidência do soergimento experimentado por esta parte do Escudo Brasileiro durante o Cenozoico (Morais Neto & Alkmim, 2001; Morais Neto et al., 2009). Conforme estudos com base em traços de fissão em apatitas, encontradas em granitos e gnaisses da Província Borborema, foi sugerido que esta sofreu pelo menos três eventos de soergimento, o primeiro, ainda no Eocretáceo; o segundo no Neocretáceo; e o terceiro no Paleógeno-Neogeno. Este último exerceu um forte controle na sedimentação tanto nas bacias marginais, quanto em bacias do interior do Nordeste (Morais Neto & Alkmim, 2001; Morais Neto et al., 2009; Engelmann de Oliveira & Jelinek, 2017).

Os eventos de soergimento resultaram na formação de superfícies regionais escalonadas criadas pelos sucessivos ciclos de soergimento e aplainamento/erosão (Saadi, 1992; Maia & Bezerra, 2011; Maia & Bezerra, 2014). São reconhecidas quatro superfícies no Planalto da Borborema, a primeira está relacionada a cotas superiores a 1000 m, em relação ao nível relativo do mar, e é correlata à superfície Gondwana de King (1957); a segunda está posicionada em cerca de 900 m e corresponde à su-

perfcie Sulamericana de King (1957), e a terceira apresenta elevação de cerca de 600 m, sendo correlata à superfície Velhas de King (1957). A quarta superfície apresenta cotas de cerca de 300 m e é comumente conhecida como a superfície Paraguaçu (King, 1957; Ab Sáber, 1969; Saadi, 1993; Maia & Bezerra, 2014) (Figura 12).

O estudo dos mapas de elevação (hipsométricos) da região da BHU revelou que a bacia de drenagem está localizada sobre três compartimentos regionais, escalonados, do embasamento cujas cotas altimétricas permitem relaciona-los as seguintes superfícies de erosão regionais da Borborema: Sulamericana, Velhas e do ciclo Paraguaçu (Bigarella & Andrade, 1964) (Figuras 5 e 12).

Além dos mecanismos de soerguimento, que produziram o arqueamento crustal, atualmente é bastante discutido o papel das reativações tectônicas do Cenozoico, que afetaram as estruturas pré-cambrianas, e estruturas produzidas pelo evento de rifteamento cretáceo. Estas reativações apresentam amplo registro em rochas do embasamento e em depósitos sedimentares nas bacias marginais e interiores do NE do Brasil (Bezerra *et al.*, 2014; Nogueira *et al.*, 2015; Lima *et al.*, 2017). No entanto, os mecanismos responsáveis pelos eventos de reativação pós-rifte ainda são motivo de debate (Bezerra & Vita-Finzi, 2000; Dentith & Featherstone, 2003).

Nos últimos anos, vários trabalhos têm tratado a ocorrência de eventos de reativação em bacias de margem passiva, e os modelos propostos se dividem em: 1) deformações pós-rifte ocasionadas por orógenos a partir da propagação do esforço para regiões crustais distantes, a partir dos fenômenos de *far-field* (Vagnes *et al.*, 1998; Brekke, 2000); 2) reativação da trama dúctil do embasamento próximo a bacias marginais devido a acomodações regionais de placa (Doré & Lundin, 1996); 3) esforços promovidos pelas dorsais meso-oceânicas associados ao efeito de *ridge push* (Doré & Lundin, 1996; Boldreel & Andersen, 1998); 4) fenômeno de arrasto na base da placa provocado pelo manto (Mosar *et al.* 2002); 5) em bacias marginais com espessura sedimentar considerável, com mais de 7 km de profundidade, a pressão litostática pode ocasionar acomodações lo-

calizadas, resultando em uma compactação diferencial (Stuevold *et al.*, 1992; Kjeldstad *et al.*, 2003); e 6) processo de domaçaõ vulcânica que pode ocorrer em margens que foram intensamente afetadas por intrusões vulcânicas (Doré *et al.*, 2008).

O interior da Província Borborema é uma região que apresenta certo grau de atividade sísmica. A análise de mecanismos focais provenientes da sismicidade intraplaca na região, permitiu definir que a maioria dos sismos ocorridos nos últimos quarenta anos estão associados às principais zonas de cisalhamento (Bezerra *et al.* 2007; Ferreira *et al.* 2008; Bezerra *et al.*, 2011; Lima Neto, 2013; Correia Filho, 2017). Bezerra *et al.* (2014) realizaram uma integração de dados de sismicidade registrados na PB, a partir de mecanismos focais e dados de campo, e constataram o controle das zonas de cisalhamento no processo de reativação em rochas do embasamento e em depósitos sedimentares nas bacias marginais - Formação Barreiras (Oligo-Mioceno), e coberturas holocênicas pós-Barreiras (Sá, 1969; Rossetti & Truckenbrodt, 1989; Rossetti, 2004; Rossetti *et al.*, 2013).

Dentre estes mecanismos, alguns autores têm sugerido que a reativação de estruturas antigas, e a criação de estruturas rúpteis, durante o Cenozoico, está relacionada ao efeito de *Farfield*; tal esforço teria sido exercido pela cordilheira dos Andes. Conforme este modelo, o ângulo de mergulho da Placa de Nazca, em subducção sob a placa Sulamericana, exerce um papel importante neste contexto, pois quanto maior este ângulo, maior é o regime de esforços direcionados para o nordeste brasileiro (Marques *et al.*, 2013; Fogueira *et al.*, 2015). Este regime, criado pela situação de empuxo da Placa de Nazca contra o deslocamento da placa Sulamericana, é caracterizado pela posição vertical do tensor intermediário e pela disposição horizontal dos tensores mínimo e máximo. Este arranjo sugere o domínio de um regime de transcorrência, com compressão máxima E-W e extensão N-S (Bezerra *et al.*, 2014) (Figura 12).

Os resultados obtidos neste trabalho apontam que os trechos do canal do Rio Una estão encaixados em zonas de cisalhamento com orientação NE-SW,

e em falhas e fraturas de idade ainda incerta, com *trend* NW-SE (Figuras 5 e 12). Este processo gerou um padrão de trechos retilíneos, com mudanças abruptas, devido à captura do canal por estruturas quase perpendiculares entre si (Figuras 5 e 12). A extração de informações da morfologia e o cálculo do índice RDE para a área de estudo permitiu determinar a presença de trechos de gradiente anômalos. A compartimentação dos trechos com anomalias está associada a variação de terrenos e ao controle das zonas de cisalhamento que os limitam (Figura 5). As anomalias de RDE de primeira ordem concentram-se no médio curso do rio, em trechos onde o perfil está soerguido em relação ao seu perfil de equilíbrio, relativo ao nível de base atual, que foi imposto pela última transgressão global. As anomalias de segunda ordem distribuem-se principalmente no baixo curso

e também apresentam forte controle tectônico. No médio curso, observou-se a predominância de anomalias de primeira ordem (Figura 9), com maior efeito da topografia. A correlação positiva entre as anomalias de primeira e segunda ordem e os lineamentos topográficos associados às principais zonas de cisalhamento, falhas e fraturas, sugere que estas estruturas foram reativadas no período Cenozoico, o que gerou as anomalias topográficas identificadas por meio do índice RDE (Figuras 9 e 12).

A interpretação das seções sísmicas 2D permitiu identificar três padrões sismoestratigráficos distintos, relacionados ao arcabouço geológico raso da região; Unidade-1, Unidade-2 e Unidade-3. A Unidade-1 representa o embasamento da região onde as seções foram levantadas, nas cidades de Barrei-

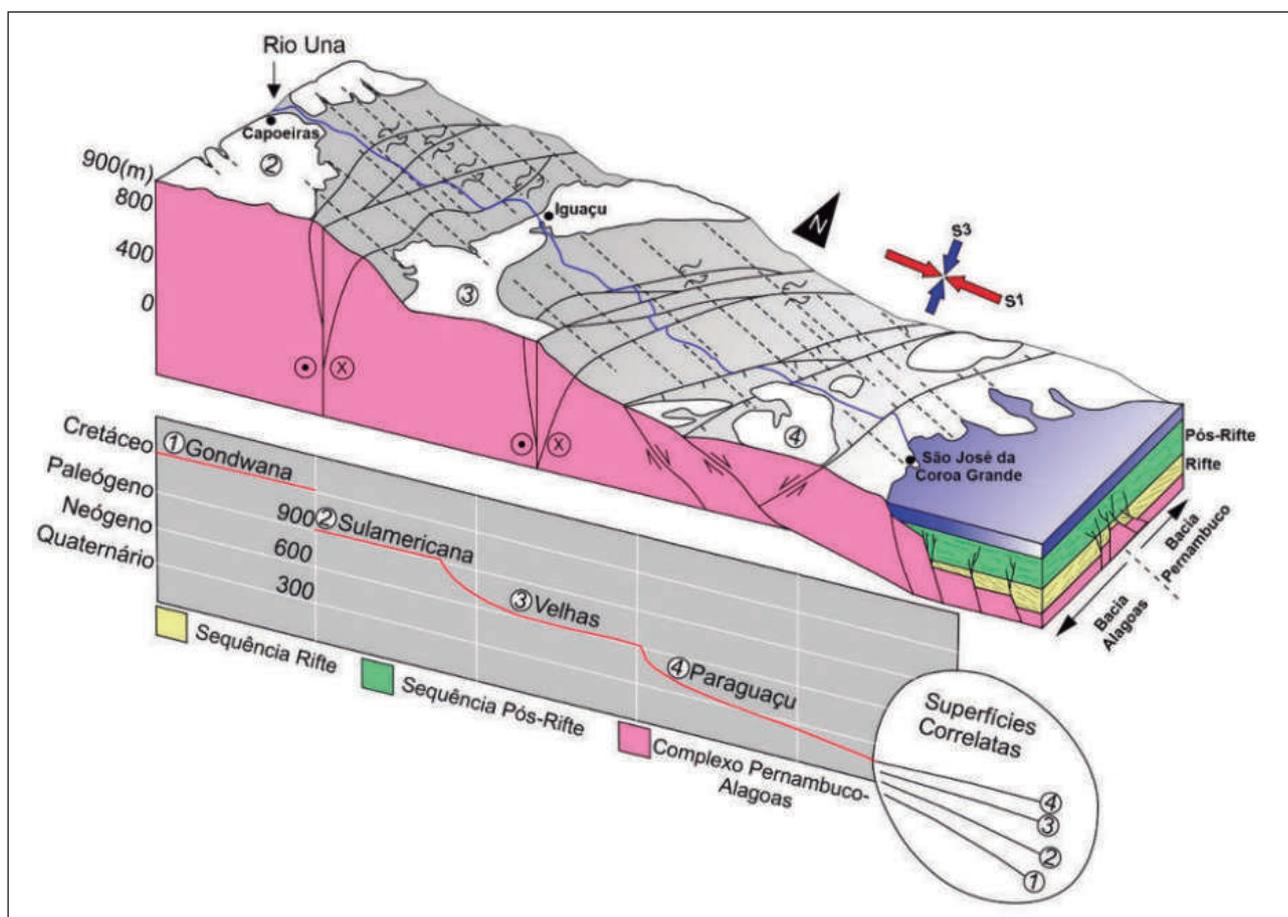


Figura 12 Diagrama que mostra a relação da topografia do embasamento da Borborema na área de estudo, juntamente com o controle das zonas de cisalhamento no comportamento do canal do Rio Una (Modificado de Maia & Bezerra, 2011). As principais superfícies de aplainamento estão representadas com suas respectivas idades (Bigarella & Andrade, 1964). O posicionamento dos campos de tensões regionais atuais (setas azuis e vermelhas), foi proposto com base em Bezerra *et al.* (2014).

ros e Palmares, o qual é composto principalmente por alkali-feldspato sienito, que também aflora em alguns trechos do canal do rio (Marinho, 2016). Estes granitóides estão associados ao Batólito Ipojuca-Atalaia (Guimarães & Silva Filho, 1995; Silva Filho *et al.*, 2001). A segunda unidade (Unidade-2) representa uma cobertura de depósitos com algum grau de consolidação, podendo representar depósitos de idade quaternária produzidos por processos de erosão relacionados as últimas variações de base do Quaternário. Entretanto, não existem dados de campo para comprovar a natureza desses depósitos basais do leito do Rio Una. Segundo Correia Filho (2017), a Formação Barreiras e os sedimentos Pós-Barreiras foram preservados em altos estruturais na região de borda da Bacia Pernambuco. Sobre o Alto de Maragogi-Barreiros, que abrange a região da foz do Rio Una, existem depósitos de até 12 m de espessura expostos sobre o embasamento na região proximal da faixa costeira da bacia Pernambuco. A Unidade-3 representa depósitos menos consolidados compostos por areia e argila. Esta camada de depósitos inconsolidados foi depositada de forma discordante sobre a primeira (Figura 10). A interpretação sugere que estes depósitos representam a cobertura mais jovem do canal do Rio Una, e que foram formados durante períodos de erosão e deposição no Holoceno. Nas seções sísmicas também foi possível confirmar a presença de falhas de alto ângulo e de pequeno rejeito, as quais também são observadas no embasamento adjacente ao canal do rio. Observou-se que as falhas mostram movimento contemporâneo à deposição da Unidade-2, e que estas controlaram a deposição destas sequências em pequenos grabens. As falhas também mostram relação contemporânea com os depósitos da Unidade-3, embora esta influência seja menos evidente. As falhas apresentam componente normal e reverso, o que sugere que os eventos de reativação impuseram um regime transcorrente (transpressão/transensão) as estruturas das antigas zonas de cisalhamento, com a criação de novas falhas, como observado na formação de estruturas do tipo flor negativa e positiva (Figuras 10 e 11). Este processo é condizente com o campo de tensões atuantes na Borborema durante o Cenozoico (Bezerra *et al.*, 2014).

7 Conclusões

A análise integrada de dados geológicos, morfotectônicos e geofísicos da região da bacia do Rio

Una, permitiu definir alguns aspectos importantes em relação à evolução tectônica desta área localizada no Domínio Sul da Província Borborema, adjacente à bacia marginal de Pernambuco:

1 - A bacia hidrográfica do Rio Una está implantada sobre três superfícies regionais de erosão continental. Estas superfícies exibem cotas de 900 m (“Sulamericana”), 600 m (“Velhas”) e 300 m (“Paraguaçu”). Estas superfícies estão relacionadas à ação de sucessivos eventos de soerguimento e intemperismo sobre diferentes conjuntos de litologias que formam o embasamento pré-Cambriano da Província Borborema adjacente a bacia marginal de Pernambuco.

2 - Os trechos do canal principal do Rio Una estão encaixados em zonas de cisalhamento cujo *trend* estrutural principal é NE-SW, e falhas e fraturas com *trend* estrutural NW-SE. A captura da drenagem por trechos dessas estruturas criou padrões retilíneos com mudanças abruptas de direção por causa do controle estrutural com direções dominantes quase perpendiculares.

3 - A análise do índice RDE do canal do Rio Una, mostrou que o perfil topográfico do rio apresenta anomalias de altitude em relação ao seu perfil de equilíbrio. As anomalias mais importantes ocorrem no alto e médio curso, nas regiões de transição entre patamares regionais do embasamento, limitados por zonas de cisalhamento, que formam as superfícies de erosão criadas pelo processo de soerguimento da Província Borborema. Isto sugere a ocorrência de processos de reativação que criaram a modificação da topografia, o que produziu o desajuste recente do canal do rio em relação ao seu perfil de equilíbrio. Nestes pontos o efeito da erosão ainda não produziu o ajuste com a incisão do canal.

4 - O estudo das rochas do embasamento nas proximidades da cidade de Barreiros e Palmares, mostrou que estas rochas apresentam fraturas, e falhas de alto ângulo e pequeno rejeito. A análise de rochas sedimentares na região de São José da Coroa Grande e Maragogi, onde a bacia do Rio Una encontra a faixa costeira da Bacia de Pernambuco, os depósitos da Formação Barreiras (Mioceno) (Lima, 2008), apresentam falhas de alto ângulo e pequeno

rejeito. Estas falhas sugerem um processo de reativação de estruturas do embasamento que afetaram depósitos do Quaternário, sob um regime transcorrente, comprovado pela presença de estruturas em flor, negativas e positivas.

5 - O estudo dos dados sísmicos 2D, demonstrou que a cobertura de sedimentos quaternários e holocênicos que recobrem a calha do Rio Una foi afetada por estruturas do embasamento, falhas de alto ângulo formadas sob regime transcorrente criadas a partir da reativação das zonas de cisalhamento. Existe um controle da deposição dos estratos pelas falhas no leito do rio. Estas exibem padrão de estruturas em flor, negativa e positiva. Os depósitos formados sobre pequenos grabens apresentam seu acamamento basculado, dobras e crescimento da espessura contra os planos de falhas.

6 - Todas as evidências reunidas sugerem que o embasamento que forma o domínio sul da Província Borborema, adjacente à Bacia de Pernambuco, foi afetado por processos de reativação tectônica transcorrente, que afetaram as zonas de cisalhamento Pré-Cambrianas, e falhas mais jovens. A relação das falhas com os depósitos no leito do rio e na borda da bacia indicam que as reativações abrangem o período Quaternário-Holoceno.

8 Agradecimentos

Ao projeto de pesquisa *Seasound* realizado a partir do convênio *Sinochem Brasil/FADE/UFPE* pelo apoio financeiro ao desenvolvimento desta pesquisa. A empresa *Eichonor* pela disponibilidade dos dados sísmicos utilizados no estudo. Aos revisores do periódico, Dr. João Marinho de Moraes Neto e o Dr. André Pires Negrão, pelas sugestões e observações que nos auxiliaram a melhorar a contribuição do manuscrito.

9 Referências

Ab Sáber, A.N. 1969. Participação das superfícies aplainadas nas paisagens do Nordeste Brasileiro. *IGEOG-USP, Bol. Geomorfologia*, 19-38.
Almeida, F.F.M., Hasui, Y., Brito Neves, B.B. & Fuck, R.A. 1977. Províncias Estruturais Brasileiras. In: *VIII SIMPÓSIO DE GEOLOGIA DO NORDESTE*, Campina Grande. Resumo expandi-

do, 363-391.
Araujo, C.E.G., Weinberg, R.F. & Cordani, U.G. 2013. Extruding the Borborema Province (NE-Brazil): a two stage Neoproterozoic collision process. *Terra Nova*, 26(2):157-168.
Archanjo, C.J., Viegas, L.G.F., Hollanda, M.H.B.M., Souza, L.C. & Liu, D. 2013. Timing of the HT/LP transpression in the Neoproterozoic Serido Belt (Borborema Province, Brazil): constraints from UPb (SHRIMP) geochronology and implications for the connections between NE Brazil and West Africa. *Gondwana Res.*, 23:701-714.
Bezerra, F.H.R., Do Nascimento, A.F., Ferreira, J.M., Nogueira, F.C.C., Fuck, R.A., Neves, B.B.B. & Sousa, M.O.L. 2011. Review of active faults in the Borborema Province, Intraplate South America Integration of seismological and paleoseismological data. *Tectonophysics*, 510:269-290.
Bezerra, F.H.R., Rosseti, D.F., Oliveira, R.G., Medeiros, W.E., Neves, B.B. Brito, Balsamo, F., Nogueira, F.C.C., Dantas, E.L., Andrades Filho, C. & Góes, A.M. 2014. Neotectonic reactivation of shear zones and implications for faulting style and geometry in the continental margin of NE Brazil. *Tectonophysics (Amsterdam)*, 614:78-90.
Bezerra, F.H.R., Takeya, M.K., Souza, M.O.L. & Do Nascimento, A.F. 2007. Coseismic reactivation of the Samambaia fault, Brazil. *Tectonophysics* 430:27-39.
Bezerra, F.H.R. & Vita-finzi, C. 2000. How active is a passive margin? Paleoseismicity in northeastern Brazil. *Geology*, 28:591-594.
Bigarella J.J. & Andrade G.O. 1964. Considerações sobre a estratigrafia dos sedimentos cenozoicos em Pernambuco (Grupo Barreiras). *Instituto de Ciências da Terra*, 2:2-14.
Bjornberg, A.J.S. 1969a. *Contribuição ao estudo do cenozoico paulista: tectônica e sedimentologia*. Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade Federal de São Paulo, Tese de Doutorado, 128p.
Bjornberg, A.J.S. 1969b. Critério geomorfológico para determinação de áreas falhadas. In: *XXIII CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA*, Salvador, 65-66.
Boldreel, L.O. & Andersen, M.S. 1998. Tertiary compressional structures on the Faeroe-Rockall Plateau in relation to northeast Atlantic ridge-push and Alpine foreland stresses. *Tectonophysics*, 300:13-28.
Brekke, H. 2000. The tectonic evolution of the Norwegian sea continental margin with emphasis on the Voring and More Basins. Dynamics of the Norwegian Margin. *Geological Society, London, Special Publication*, 167:327-378.
Brito Neves, B.B., Santos, E.J. & Van Schmus, W.R. 2000. Tectonic History of the Borborema Province, Northeast Brazil. Tectonic Evolution of South America. In: 31st IGC, Rio de Janeiro, 151-182.
Byun, J. & Seong, Y.B. 2015. An algorithm to extract more accurate stream longitudinal profiles from unfilled DEMs. *Geomorphology*, 242:38-48.
Castillo, M. 2017. Landscape evolution of the graben of Puerto Vallarta (west-central Mexico) using the analysis of landforms and stream long profiles. *Journal of South American Earth Sciences*, 73:10-21.
Corrêa, A.C.B. 2001. *Dinâmica Geomorfológica dos Sistemas Ambientais dos Compartimentos Elevados do Planalto da Borborema, Nordeste do Brasil*. Universidade Estadual Paulista Julio Mesquita, Tese de Doutorado, 386p.
Corrêa, A.C.B., Tavares, B.A.C., Monteiro, K.A., Cavalcanti, L.C.S. & Lira, D.R. 2010. Megageomorfologia E Morfoestrutura Do Planalto Da Borborema. *Revista do Instituto Geológico*, 31(1/2):35-52.
Correia Filho, O.J. 2017. *Análise de estruturas compressionais na região onshore da Bacia Pernambuco, NE do Brasil – Possíveis influências no potencial petrolífero*. Programa de Pós-Graduação em Geociências da UFPE, Dissertação de Mestrado, 160p.
Crandall, R. 1910. *Geographia, Geologia, Supplimento d'Água, Transportes e Açudagem nos Estados Orientais do Norte do Brasil*. Ceará, Rio Grande do Norte, Parahyba Ministério da Viação e Obras Públicas. Inspeção de Obras Contra as Secas. Série I,

**Reativação Tectônica Quaternária no Domínio Sul da Província Borborema,
NE do Brasil: Integração de Dados Morfométricos, Geológicos e Geofísicos da Bacia do Rio Una**
Osvaldo José Correia Filho; José Antonio Barbosa; Bruno Tavares; Hewerton Alves da Silva, Kleython de Araujo Monteiro;
Carlos Eduardo Guedes Fabin, Jefferson Tavares Cruz Oliveira, Felipe Ribeiro Santana & Sidney Marinho da Silva

- D.H. Hydrologia, geologia, assumptos gerais. Rio de Janeiro. 131 p. (Publicação 4).
- Davis, M., Kusznir, N.J. 2004. Depth-dependent lithospheric stretching at rifted continental margins. In: Karner, G.D., Taylor, B., Driscoll, N.W., Kohlstedt, D.L. (Eds.), *Rheology and Deformation of the Lithosphere at Continental Margins*. Columbia University Press, New York, 92–136 p.
- Dentith, M.C. & Featherstone, W.E. 2003. Controls on intra-plate seismicity in southeastern Australia. *Tectonophysics*, 376:167–184.
- Doré, A.G. & Lundin, E.R. 1996. Cenozoic compressional structures on the NE atlantic margin: Nature, origin, and potetial significance for hydrocarbon exploration. *Petroleum Geoscience*, 2:299-311.
- Doré, A.G., Lundin, E.R., Kusznir, N.J. & Pascal, C. 2008. Potential mechanisms for the genesis of Cenozoic domal structures on the NE Atlantic margin: pros, cons and some new ideas. *The Nature and Origin of Compression in Passive Margins*, *Geological Society, London, Special Publications*, 1-26. DOI: 101144/SP306.1, 2008.
- Engelmann de Oliveira, C.H. & Jelinek, A.R. 2017. História termotectônica da margem continental brasileira a partir de dados de traços de fissão em apatite. *Pesquisas em Geociências*, 44(3):387-400.
- Etchebehere, M.L.C. 2000. *Terraços neokuaternários no vale do Rio do Peixe, Planalto ocidental Paulista: implicações estratigráficas e tectônicas*. Instituto de Geociências e Ciências Exatas da Universidade Estadual Paulista – UNESP, Tese de Doutorado, 336p.
- Etchebehere, M.L.C., Saad, A. R., Fulfaro, V. J. & Perinoto, J. A. J. 2004. Aplicação do Índice “Relação Declividade Extensão – RDE” na Bacia do Rio do Peixe (SP) para Detecção de Deformações Neotectônicas. *Revista do instituto de geociências – USP Série Científica*, 4(2):43-56.
- Etchebehere, M.L.C., Saad, A.R., Santoni, G.C., Casado, F. & Fulfaro, V.J. 2006. Detecção de prováveis deformações neotectônicas no vale do Rio do Peixe, região ocidental paulista, mediante aplicação de índices RDE (Relação Declividade-Extensão) em seguimentos de drenagem. *Geociências*, 25(3):271-287.
- Ferreira, J.M., Bezerra, F.H.R., Sousa, M.O.L., Do Nascimento, A.F., Sa, J.M. & Franca, G. S. 2008. The role of Precambrian mylonitic belts and present-day stress field in the coseismic reactivation of the Pernambuco lineament, Brazil. *Tectonophysics* 456:111–126.
- Folguera, A., Gianni, G., Sagripanti, L., Rojas Vera, E., Novara, I., Colavitto, B., Alvarez, O., Orts, D., Tobal, J., Giménez, M., Introcaso, A., Ruiz, F., Martínez, P. & Ramos, V.A. 2015. A review about the mechanisms associated with active deformation, regional uplift and subsidence in southern South America. *Journal of South America Earth Sciences*, 64:511-529.
- Garcia, X., Juliã, J., Nemocón, A. M. & Neukirch, M. 2019. Lithospheric thinning under the Araripe Basin (NE Brazil) from along-period magnetotelluric survey: Constraints for tectonic inversion. *Gondwana Research*, 68(2019):174-184.
- Guedes, I.C., Santoni, G.C., Etchebehere, M.L., Stevaux, J.C., Morales, N. & Saad, A.R. 2006. Análise de perfis longitudinais de drenagens da Bacia do Rio Santo Anastácio (SP) para detecção de possíveis deformações neotectônicas. *Revista UNG, Geociências*, 75-102.
- Guimarães, I.P. & Silva Filho, A.F. 1995. An example of in situ granite formation in the north boundary of the sergipano fold belt. *Journal of South American Earth*, 38:649-664.
- Hack, J.T. 1973. Stream-profile analysis and stream-gradient index. *Journal Research of the united State geological Survey*, 1(4):421-429.
- Kale, V., Sengrupa, S., Achyuthan, H. & Jaiswal, M. K. 2014. Tectonic controls upon Kaveri River drainage, cratonic Peninsular India: Inferences from longitudinal profiles, morphotectonic indices, hanging valleys and fluvial records. *Geomorphology*, 227:153-165.
- King, L. C. 1957. The uniformitarian nature of hillslopes. *Trans. Geol. Soc. Edinb*, 17:81-102.
- Kirby, E. & Ouimet, W. 2011. Tectonic geomorphology along the eastern margin of Tibet: insights into the pattern and processes of active deformation adjacent to the Sichuan Basin. *Geological Society, London, Special Publications*, 353:165–188.
- Kjeldstad, A., Skogseid, J., Langtangen, H. P., Bjorlykke, K. & Hoeg, K. 2003. Differential loading by propagation sedimentary wedges on continental margins: An arch-forming mechanisms. *Journal of Geophysical Research*, 108, DOI: 101029/2001JB001145.
- Lima Neto, H.C. 2013. *Sismicidade e Correlação com Feições Geológicas: O Caso do Lineamento Pernambuco e seu Entorno*. Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, Tese de Doutorado, 153p.
- Bigarella J.J. & Andrade G.O. 1964. Considerações sobre a estratigrafia dos sedimentos cenozoicos em Pernambuco (Grupo Barreiras). *Arquivos: Instituto de Ciências da Terra*, 2:2-14.
- Lima, J.C.F., Bezerra, F.H.R., Rossetti, D.F., Barbosa, J.A., Medeiros, W.E., De Castro, D. L. & Vasconcelos, S.L. 2017. Neogene-Quaternary fault reactivation influences coastal basin sedimentation and landform in the continental margin of NE Brazil. *Quaternary International*, 438:92-107.
- 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, Programa de Pós-Graduação em Geodinâmica e Geofísica, 251p.
- Lin, Z. & Oguchi, T. 2011. Analyses of watershed longitudinal/transverse profiles and stream-net structure using high-resolution DEMs. *Geomorphometry.org/2011*.
- Luz, R.M.N, Juliã, J., do Nascimento, A.F. 2015. Bulk crustal properties of the Borborema Province, NE Brazil, from P-wave receiver functions: Implications for models of intraplate Cenozoic uplift. *Tectonophysics*, 644–645 (2015) 81–91.
- Maia, R.P. & Bezerra, F.H.R. 2011. Neotectônica, Geomorfologia e Sistemas Fluviais: Uma análise preliminar do contexto Nordestino. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 12 (3):37-46.
- Maia, R.P. & Bezerra, F.H.R. 2014. Condicionamento estrutural do relevo no nordeste setentrional brasileiro. *Marcaror*, 13(1):127-141.
- Marinho, S.S. 2016. *Integração de Dados Geológicos e Geomorfológicos na Identificação de Reativações Neotectônicas ao Longo de um Trecho do Rio Una, Barreiros – PE*. Departamento de Geografia da UFPE, Monografia de Conclusão de Curso de Graduação, 120p.
- Marotta, G.S., França, G.S., monico, J.F.G., Bezerra, F.H.R. & Fuck, R.A. 2015. Strain rates estimated by geodetic observations in the Borborema Province, Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 58:1-8.
- Marques, O.F., Nikolaeva, K., Assumpção, M., Gerya, T.V., Bezerra, F.H.R., Nascimento, A.F. & Ferreira, J.M. 2013. Testing the influence of far-field topographic forcing on subduction initiation at a passive margin. *Tectonophysics*, 608(2013):517-524.
- Martinez, M. 2004. *Aplicação de parâmetros morfométricos de drenagem na bacia do rio Pirapó: o perfil longitudinal*. Departamento de Geografia da Universidade Estadual de Maringá, Monografia de Conclusão de Curso de Graduação, 100p.
- McKeown, F.A., Jones-Cecil, M., Askew, B.L. & Mcgrath, M.B. 1988. Analysis of stream-profile data and inferred tectonic activity, Eastern ozark Mountains region. *Denver: United State Geological Survey Bulletin*, 1-33.
- Merritts, D. & Vincent, K.R. 1989. Geomorphic response of coastal streams to low, intermediate, and high rates of uplift, Mendocino triple junction region, northern California. *Geological Society America Bulletin*, 101:373-388.
- Missura, R. 2005. *Análise morfoestratigráfica da bacia do Ribeirão dos Poncianos - MG*. Programa de pós-graduação em Geografia, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro. Dissertação de Mestrado, 136p.
- Monteiro, K.A. 2010. *Superfícies de Aplainamento e Morfogênese da Bacia do Rio Tracunhaem, Pernambuco*. Programa de Pós-Graduação em Geografia, Dissertação de Mestrado, 124p.
- Monteiro, K.A. 2015. Análise geomorfológica da escarpa oriental da Borborema a partir da aplicação de métodos morfométricos e

**Reativação Tectônica Quaternária no Domínio Sul da Província Borborema,
NE do Brasil: Integração de Dados Morfométricos, Geológicos e Geofísicos da Bacia do Rio Una**
Oswaldo José Correia Filho; José Antonio Barbosa; Bruno Tavares; Hewerton Alves da Silva, Kleython de Araujo Monteiro;
Carlos Eduardo Guedes Fabin, Jefferson Tavares Cruz Oliveira, Felipe Ribeiro Santana & Sidney Marinho da Silva

- análise estruturais. Programa de Pós-Graduação em Geografia, Tese de Doutorado, 219p.
- Monteiro, K.A., Missura, R. & Correia, A.C.B. 2010. Application of the Hack Index - or Stream Length-Gradient Index (SL Index) - to the Tracunhaém river Watershed, Pernambuco, Brazil. *São Paulo, UNESP, Geociências*, 29(4):533-539.
- Monteiro, K.A., Tavares, B.A.C. & Correia, A.C.B. 2014. Aplicação do Índice de Hack no Rio Ipojuca para Identificação de Setores Anômalos de Drenagem e Rupturas de Relevô. *São Paulo, UNESP, Geociências*, 33(4):616-628.
- Moraes, L. J. 1924. Serras e montanhas do Nordeste. *I.F.O.S. Série*, 58.
- Morais Neto, J.M. & Alkmim, F.F. 2001. A deformação das coberturas terciárias do Planalto da Borborema (PB-RN) e seu significado tectônico. *Revista Brasileira de Geociências*, 31(1):95-106.
- Morais Neto, J.M., Green, P.F., Karner, G.D. & Alkmim, F.F. 2008. Age of the Serra do Martins Formation, Borborema Plateau, north-eastern Brazil: constraints from apatite and zircon fission track analysis. *B. Geoci. Petrobras*, 16(1):23-52.
- Morais Neto, J.M., Hegarty, K.A., Karner, G.D. & Alkmim, F.F. 2009. Timing and mechanisms for the generation and modification of the anomalous topography of the Borborema Province, north-eastern Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, 26:1070-1086.
- Mosar, J., Lewes, G. & Torvik, T.H. 2002. North atlantic sea-floor spreading rates: implication for the Tertiary development of inversion structures of the Norwegian-Greeland Sea. *Journal of the Geological Society, London*, 503-515.
- Neves, S.P., Monié, P., Bruguier, O. & Silva, J.M.R. 2012. Geochronological, thermochronological and thermobarometric constraints on deformation, magmatism and thermal regimes in eastern Borborema Province (NE Brazil). *Journal of South American Earth Sciences*, 38:129-146.
- Nogueira, F.C.C., Marques, F.O., Bezerra, F.H.R., De Castro, D.L. & Fuck, R.A. 2015. Cretaceous intracontinental rifting and post-rift inversion in NE Brazil: insights from the Rio do Peixe basin. *Tectonophysics*, 644-645 (2015):92-107.
- Oliveira, R.G. & Medeiros, W.E. 2008. Deep crustal framework of the Borborema Province, NE Brazil, derived from gravity and magnetic data. *Precambrian Research*, 315 (2018) 45-65.
- Peulvast, J.P., Bétard, F. 2015. A history of basin inversion, scarp retreat and shallow denudation: the Araripe Basin as a keystone for understanding long-term landscape evolution in NE Brazil. *Geomorphology*, 233:20-40.
- Polonia, J.A.L. 1997. *Geometria e cinemática do rifte do Cabo, litoral sul do estado de Pernambuco*. Programa de Pós-Graduação em Geociências da UFPE, dissertação de mestrado, 156p.
- Ponce, C., Druguet, E. & Carreras, J. 2013. Development of shear zone-related lozenges in foliated rocks. *Structural Geology*, 2:135-142.
- Rodriguez, S.K. & Suguio, K. 1992. Gradientes hidráulicos das drenagens de 2ª ordem: uma contribuição para os estudos de neotectônica da "Volta Grande" do rio Xingu, Altamira - PA. In: XXXVII CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 598-600.
- Roe, G.H., Montgomery, D.R. & Hallet, B. 2002. Effects of orographic precipitation variations on the concavity of steady-state river profiles. *Geology*, 30:143-146.
- Rossetti, D.F., Rojas, R.R. & Sonia, H.T. 2013. Evolução dos Sedimentos Pós-Barreiras na Zona de Costeira da Bacia São Luís, Maranhão, Brasil. *Boletim do Museu Paraense Emílio Goeldi*, 9(1):11-25.
- Rossetti, D.F., Bezerra, H.R., Góes, M., Valeriano, M.M., Andrades-Filho, C.O., Mittani, J.C.R., Tatum, S.H., Brito-Neves, B.B. 2011. Late Quaternary sedimentation in the Paraíba Basin, Northeastern Brazil: Landform, sea level and tectonics in Eastern South America passive margin. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 300 (2011): 191-204.
- Rossetti, D.F. & Santos, J.R. 2004. Facies architecture in a tectonically-influenced estuarine incised valley fill of Miocene age, Northern Brazil. *Journal South America Earth Science*, 17:267-284.
- Rossetti, D.F. & Truckenbrodt, W. 1989. Estudo paleoambiental e estratigráfico dos sedimentos Barreiras e Pós-Barreiras na região Bragantina, nordeste do Pará. *Bol Mus Par Emílio Goeldi, Ser Cienc Terra*, 1:25-74.
- Sá, J.H.S. 1969. Contribuição à geologia dos sedimentos terciários e quaternários da região bragantina, estado do Pará. *Boletim de Geologia*, 3:20-36.
- Saadi, A. 1993. Neotectônica da Plataforma Brasileira: Esboço de Interpretação preliminar. *Geonomos*, 1(1):1-15.
- Saadi, A. & Torquato, J.R. 1992. Contribuição à Neotectônica do Estado do Ceará. *Revista da Geologia*, 5: 5-38.
- Santos, E.J., Van Schmus, W.R., Kozuch, M. & Neves, B.B.B. 2010. The CaririsVelhos tectonic event in Northeast Brazil. *Journal of South American Earth Sciences*, 29:61-76.
- Seeber, L. & Gornitz, V. 1983. River profiles along the Himalayan arc as indicators of active tectonics. *Tectonophysics*, 92:335-367.
- Silva Filho, A.F., Guimarães, I.P. & Kozuch, M. 1996. Mineral chemistry and tectonic significance of Neoproterozoic ultrapotassic plutonic rocks from the Cachoeirinha-Salgueiro fold belt, Northeastern Brazil. *International Geology Review, Maryland, USA*, 38(7):649-664.
- Silva Filho, A.F., Guimarães, I.P. & Van Schmus, W.R. 2001. Crustal Evolution of the Pernambuco-Alagoas Complex, Borborema Province, NE Brazil: Nd Isotopic Data from Neoproterozoic Granitoids. *Gondwana Research*, 5(2):409-422.
- Silva Filho, A.F., Guimarães, I.P., Van Schmus, W.R., Dantas, E., Armstrong, R. & Concentino, L. 2013. Long-lived Neoproterozoic high-K magmatism in the Pernambuco-Alagoas Domain, Borborema Province, northeast Brazil. *International Geology Review*, 2013.
- Snyder, N., Whipple, K., Tucker, G. & Merritts, D. 2000. Landscape response to tectonic forcing: DEM analysis of stream profiles in the Mendocino Triple junction region, Northern California. *Geological Society of America Bulletin*, 112:1250-1263.
- Souza, D.H., Hackspacher, P.C., Tiritan, C.D., Ribeiro, F.B. & Campani, M.M. 2010. Aplicação de análise morfométrica - Relação Declividade Vs. Extensão e perfil longitudinal das drenagens - na Bacia do Ribeirão das Antas para detecção de deformações neotectônicas no Planalto de Poços de Caldas. *Revista de Geografia, Epec.*, (1):114-127.
- Stuevold, L. M., Skogseid, J. & Eldholm, O. 1992. Post-Cretaceous uplift events on the Voringcontinental margin. *Geology*, 10:919-922.
- Takiya, H. 1997. *Estudo da sedimentação neogêno-quaternária no município de São Paulo: caracterização dos depósitos e suas implicações na geologia urbana*. Instituto de Geociências da Universidade de São Paulo - USP, Tese de Doutorado. 152p.
- Troiani, F., Piacentini, D., Seta, M.D. & Galve, J. 2017. Stream Length-gradient Hotspot and Cluster Analysis (SL-HCA) to fine-tune the detection and interpretation of knickzones on longitudinal profiles. *Catena*, 156:30-41.
- Vagnes, E., Gabrielsen, R.H. & Haremo, P. 1998. Late Cretaceous-Cenozoic intraplate contractional deformation at the Norwegian continental shelf: timing, magnitude and regional implications. *Tectonophysics*, 300:29-46.
- Van Schmus, W.R., Oliveira, E.P., Silva Filho, A.F., Toteu, S.F., Penaye, J. & Guimarães, I. P. 2008. Proterozoic links between the Borborema Province, NE Brazil, and the Central African Fold Belt. In: Pankhurst, R.J., Trouw, R.A. J., Brito Neves, B.B. & De Wit, M.J. (eds) West Gondwana: Pre-Cenozoic Correlations Across the South Atlantic Region. *Geological Society, London, Special Publications*, 294:69-99.
- Van Schmus, W.R., Brito Neves, B.B., Hackspacher, E.C., Babinsky, M., Fetter, A.H. & Dantas, E.L. 1997. Application of U-Pb and Sm-Nd geochronology to understanding the geotectonic history of the Borborema Province, NE Brazil, and its implications for the evolution of West Gondwana. In: PROC. LSR SOUTH AMERICAN SYMP. ON ISOTOPE GEOLOGY, 27-29.
- Vasconcelos, D.L., Bezerra, F.H.R., Clausen, O.R., Medeiros, W.E., Castro, D.L., Vital, H., Barbosa, J.A. 2019. Influence of Precambrian shear zones on the formation of oceanic fracture zones along the continental margin of Brazil. *Marine and Petroleum Geology*, 101:322-333.
- Weinberg, R.F., Sial, A.N. & Mariano, G. 2004. Close spatial relationship between plutons and shear zones. *Geology*, 32:377-380.