ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage:https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe

Caracterização Estrutural da Região Central do Graben do Cupe, Bacia Sedimentar de Pernambuco: Implicações para o Padrão Atual da Rede de Drenagem

João Carlos Morais de Araújo Júnior[1], Willian Alexandre de Lima Moura [2], Isis Mayara Gomes da Silva [3], Osvaldo José Correia Filho[4], João Adauto de Souza Neto[5]

[1]Mestrando em Geociências; Programa de Pós-Graduação em Geociências; Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). ORCID: http://orcid.org/0000-0001-5392-9831. E-mail: jcmorais.araujo@gmail.com. [2]Mestrando em Geociências; Programa de Pós-Graduação em Geociências; Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). ORCID: http://orcid.org/0000-0002-1471-3752. E-mail: alexandrewillian1995@gmail.com. [3]Mestranda em Geociências; Programa de Pós-Graduação em Geociências; Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). ORCID: https://orcid.org/0000-0001-9533-6989. E-mail: isismayara.gomes@gmail.com. [4]Doutorando em Geociências; Programa de Pós-Graduação em Geociências; Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). ORCID: https://orcid.org/0000-0002-4252-7391. E-mail: osv.correia@gmail.com. [5]Professor do Departamento de Geologia e no Programa de Pós-Graduação em Geociências, Centro de Tecnologias e Geociências; Universidade Federal de Pernambuco (UFPE). ORCID: https://orcid.org/0000-0002-9870-7113. E-mail: adauto@ufpe.br.

Artigo recebido em 19/05/2020 e aceito em 24/08/2020

R E S U M O

A área de estudo está inserida no contexto geológico do Graben do Cupe, região de borda da Bacia Sedimentar de Pernambuco (BPE) com o embasamento cristalino adjacente. O Graben do Cupe é considerado um importante depocentro da região *onshore* dessa bacia e sua origem está ligada à abertura do Oceano Atlântico Sul. A partir da integração de dados gravimétricos, dados altimétricos obtidos por *LIDAR* e dados de campo, foi possível realizar uma caracterização estrutural dos principais lineamentos gravimétricos e topográficos que cortam a região central do Graben do Cupe. O mapa de anomalia *bouguer* residual revelou que o arcabouço estrutural mais profundo da BPE é representado por falhas normais de direção NE-SW, bem como falhas transcorrentes sinistrais, de direção NW-SE e dextrais ENE-WSW. A mesma orientação de lineamentos topográficos foi obtida através da interpretação dos dados altimétricos. Os rios inseridos na área de estudo seguem a mesma orientação dos lineamentos topográficos e gravimétricos, NW-SE e NE-SW. O mapeamento estrutural revelou que os lineamentos gravimétricos e topográficos estão associados à direção da foliação NE-SW, presente no embasamento adjacente a bacia, e às falhas originadas durante a fase rifte da BPE; A) NE-SW e NNE-SSW caracterizadas como falhas normais e B) NW-SE que corresponde a falhas oblíquas. As estruturas mais profundas tanto do embasamento, quanto às estruturas rifte que compartimentam o Graben do Cupe foram responsáveis por controlar a evolução quaternária da paisagem, o que provocou a captura da drenagem de alguns cursos fluviais, e o significante condicionamento tectônico dos vales fluviais.

Palavras-chave: Graben do Cupe, Bacia Sedimentar de Pernambuco, geologia estrutural, captura de drenagem.

Structural Characterization of the Central Region of the Graben Cupe, Pernambuco Sedimentary Basin: Implications for the Current Pattern of the Drainage Network

A B S T R A C T

The study area is inserted in the geological settings of the Cupe Graben, which is located in the border region of the Pernambuco Basin with the adjacent crystalline basement. The Cupe Graben is considered an important depocenter in the onshore region of this basin and its origin is linked to the opening of the South Atlantic Ocean. From the integration of gravimetric data, altimetric data obtained by *LIDAR* and field data, it was possible to carry out a structural characterization of the main gravimetric and topographic lineaments that cut the central region of Cupe Graben. The residual *bouguer* anomaly map revealed that the deep structural framework of the BPE is represented by normal faults NE-SW and NNE-SSW and sinistral strike slip faults NW-SE. The same orientation of topographic lineaments was obtained through the interpretation of the topographic lineaments. The rivers inserted in the study area have the same orientation as the topographic and gravimetric lineaments, NW-SE and NE-SW. The structural mapping revealed that the gravimetric and topographic lineaments are related to foliation in the adjacent basement NE-SW, and the faults originated during the BPE *rift* phase; A) NE-SW and NNE-SSW characterized as normal faults and B) NW-SE which corresponds to oblique faults. The deeper structures of both the basement and the *rift* structures that constraint the Cupe Graben were responsible for

controlling the quaternary evolution of the landscape, which caused the capture of the drainage of some rivers, and the strong conditioning of the drainage network.
Keywords: Cupe Graben, Pernambuco Basin, structural geology, river capture.

Introdução

A Bacia Sedimentar de Pernambuco (BPE) é considerada uma bacia marginal do Atlântico Sul e está localizada na porção oriental do nordeste brasileiro. Sua origem está ligada à abertura do Oceano Atlântico, em pelo menos quatro estágios evolutivos, segundo o modelo de rifte propagante de sul para norte (Matos, 1999; Bueno, 2004; Barbosa et al., 2014).

O setor *onshore* da BPE é composto por três grabens principais; 1 - Graben de Piedade; 2 - Graben do Cupe e o 3 - Graben de Tamandaré. A área de estudo está inserida na região central do Graben do Cupe, que é preenchido por rochas siliciclásticas e vulcânicas relacionadas às fases rifte e pós-rifte da BPE (Barremiano-Albiano) (Maia et al., 2012; Barbosa et al., 2014), e por rochas carbonáticas de sua fase *drifte* (Cenomaniano-Santoniano) (Tomé et al., 2006) (Figura 1). Segundo a classificação de Koppen, o clima predominante na região é o tropical (As´) e apresenta uma precipitação média que pode atingir 2.000 mm/ano. A região é cortada principalmente pelos rios litorâneos Arimbi, Canoas, Merepe e Tapera.

O estudo da distribuição e orientação de lineamentos topográficos e gravimétricos é uma excelente ferramenta de avaliação do arcabouço estrutural de uma região (Celestino et al., 2017). Os lineamentos interpretados podem representar diferentes feições naturais, como por exemplo; vales fluviais (Hung et al., 2005), contatos litológicos (Celestino et al., 2017) e estruturas geológicas como falhas, fraturas, traços axiais de dobras e foliações (Masoud e Koike, 2006; Hashim et al., 2013; Celestino et al., 2017). A análise integrada entre a geologia estrutural e de geomorfologia representa uma excelente ferramenta para a análise da evolução de bacias hidrográficas (Etchebehere et al., 2006; Monteiro et al., 2014).

A validação dos lineamentos gravimétricos e topográficos interpretados na área de estudo foi realizada a partir do mapeamento geológico com foco na geologia estrutural, o que permitiu constatar o forte controle tectônico dos rios Arimbi, Canoas, Merepe e Tapera. O controle tectônico envolvido nas bacias hidrográficas dos rios estudados é exercido através de estruturas geológicas pré-cambrianas, como planos de foliação dos ortognaisses do Complexo Belém do São Francisco, e planos de falhas e fraturas originadas durante o período de abertura da BPE (Barremiano – Albiano) (Buarque et al., 2016).

A abordagem integrada entre dados de sensoriamento remoto, geofísica e mapeamento estrutural representa uma excelente ferramenta para o estudo da evolução de bacias hidrográficas, principalmente quando estas apresentam feição de captura de drenagem por processos de reativação tectônica. Modificações no substrato geológico a partir do qual a rede de drenagem foi estabelecida, alteram substancialmente o curso dos rios e o seu perfil de base.

Este processo de reativação tectônica observado na margem nordeste brasileira é associado a uma dinâmica regional das placas tectônicas da América do Sul e Nazca. O processo de subducção andina, juntamente com o espalhamento da dorsal oceânica, permite que seja instalado um campo de tensões transcorrente (compressão - E-W e extensão - N-S) na porção oriental da Província Borborema (Bezerra et al., 2020).

A partir da integração entre os dados altimétrico, gravimétricos e de mapeamento geológico, o presente estudo objetiva a caracterização do controle tectônico sobre o atual padrão da rede de drenagem na Bacia Sedimentar de Pernambuco.

Material e métodos

O estudo do padrão dos lineamentos foi realizado a partir da integração de dados de gravimetria e de sensoriamento remoto. Foram utilizados dados de imagens de satélite, fotografias aéreas ortorretificadas, dados aerolevantados *LIDAR* e o mapa gravimétrico *bouguer* residual. A integração dos dados, juntamente com sucessivas etapas de mapeamento geológico, permitiu a confecção do mapa geológico da área de estudo em escala 1:50.000 (Figura 1).

Os dados gravimétricos utilizados foram obtidos a partir do Banco de Dados de Exploração e Produção (BDEP) da Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP). São dados adquiridos a partir de estações gravimétricas terrestres ao longo da faixa costeira que compreende a BPE. Foi realizada uma reinterpretação dos lineamentos gravimétricos do mapa gravimétrico *bouguer* residual de Correia Filho (2017). Este mapa apresenta de maneira satisfatória a interface embasamento/bacia, o que permitiu realizar a interpretação das estruturas geológicas que condicionam o arcabouço estrutural mais profundo da BPE.

O mapeamento das redes de drenagem, padrões texturais e o tipo de relevo foi executado através de fotografias aéreas ortorretificadas, na escala 1:30.000, disponíveis no banco de dados do Serviço Brasileiro de Geologia (CPRM), juntamente com imagens de satélite disponíveis pelo *software Google Earth Pro*® com resolução de 15 metros. Além da base cartográfica citada anteriormente, foi obtido acesso às cartas topográficas que recobrem a área de estudo; 1 - Ipojuca (SC-25-V-A-II-4-SE) e 2 - Ponta da Gamboa (SC-25-V-A-III-3-SO), ambas na escala de 1:25.000.

Com o objetivo de realizar uma análise de lineamentos topográficos em uma base cartográfica de melhor resolução, utilizou-se as imagens do aerolevantamento a partir do *Light Detection and Ranging* (*LIDAR*), com resolução espacial de 50 centímetros, financiadas pelo Governo Federal de Pernambuco e intitulado "Pernambuco Tridimensional" (http://www.pe3d.pe.gov.br/), a partir do qual foi obtido o modelo digital de terreno (MDT). Foram geradas versões do MDT utilizando a técnica de sombreamento de relevo a partir de iluminação artificial nos azimutes 0°, 45°, 90° e 135° com propósito de realçar e realizar uma análise mais abrangente dos principais lineamentos topográficos no *software QGIS 2.18*.

Os lineamentos foram agrupados em dois setores: i) embasamento e ii) cobertura sedimentar da BPE. Sobre o MDT também foram confeccionados quatro perfis topográficos ao longo da área de estudo.

Através do *software QGis* 2.18, também foram executados os *plugins* de extração automática da drenagem (através do *plugin GRASS* 7.2.1). Com base na rede de drenagem obtida pela extração automática, foi gerado o mapa de densidade de drenagem a partir da aplicação da ferramenta de interpolação de dados do tipo krigagem. Em seguida, os dados adquiridos foram organizados e interpretados com o objetivo de relacionar os dados gravimétricos e de lineamentos topográficos, sobre o padrão de drenagem atual. As informações obtidas de maneira remota foram certificadas com trabalhos de campo em afloramentos representativos da área de estudo.

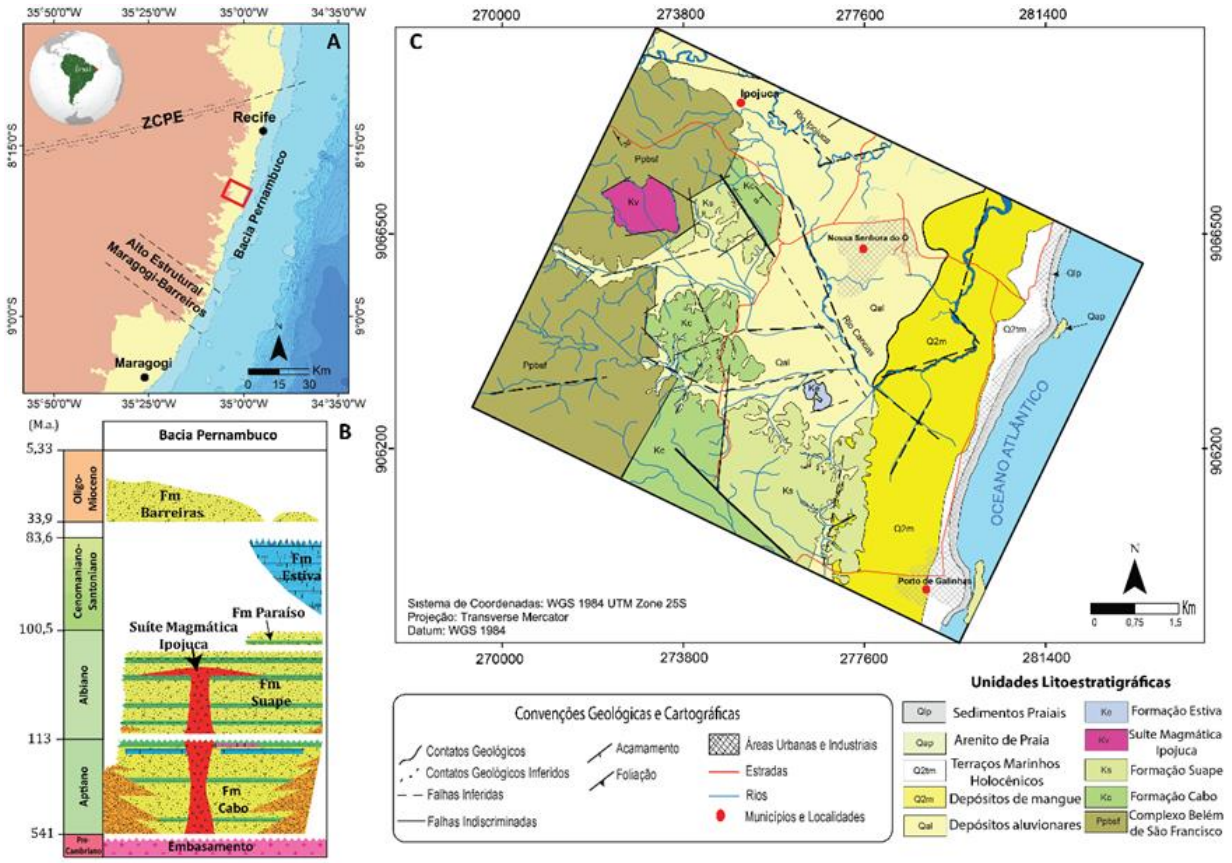

Figura 1. A) Localização da área de estudo na região central da BPE; B) coluna estratigráfica da faixa costeira da BPE (Barbosa et al., 2014); e C) mapa geológico (1:50.000) da área de estudo.

Contexto Geológico Regional

A BPE ocupa a borda leste da Província Borborema (PB) (Almeida, 1981; Santos et al., 2010; Araújo et al., 2013). A PB apresenta uma complexa evolução geológica formada a partir da aglutinação de massas continentais, através de uma série de eventos orogenéticos que ocorreram no Pré-Cambriano (Almeida et al., 1981; Santos et al., 2010). A PB é composta por complexos gnáissicos-migmatíticos, de idade arqueana a paleoproterozoica (Sá et al., 2002; Neves et al., 2012, Dantas et al., 2013; Neves et al., 2015) e rochas supracrustais (Neves et al., 2009). Durante o Neoproterozoico, a PB foi afetada por intrusões graníticas e retrabalhada por extensas zonas de cisalhamento transcorrentes que apresentam direções preferenciais NE-SW e E-W (Vauchez et al., 1995; Neves e Mariano, 1999; Neves et al., 2002).

O embasamento da BPE, está inserido no, recentemente denominado, Superterreno Pernambuco-Alagoas (SPEAL) (Neves e Silva Filho, 2019), situado no Domínio Sul da PB (Araújo et al., 2013). O SPEAL apresenta unidades geológicas extremamente variadas que inclui terrenos arqueanos de alto grau metamórfico, paleoproterozoicos e neoproterozoicos, bem como rochas metavulcanossedimentares (Silva Filho et al., 2001; Neves e Silva Filho, 2019). O SPEAL foi afetado por intrusões graníticas neoproterozóicas, o que vale ressaltar a presença do batólito Ipojuca-Atalaia que aflora na região de embasamento próximo da BPE (Silva Filho et al., 2001). No embasamento da BPE a deformação dúctil é marcada por pelo menos duas zonas de cisalhamento transcorrentes com orientação NE-SW, reconhecidas como Riachão e Palmares por Silva Filho et al. (2001).

Após a complexa evolução geológica pré-cambriana, foram instalados esforços extensionais durante a abertura do Oceano Atlântico (Chang, 1992; Matos, 1999), o que favoreceu a origem das bacias sedimentares marginais brasileiras, entre elas, a BPE (Bueno, 2004; Barbosa et al., 2014). O arcabouço estrutural da BPE é marcado por três famílias de falhas principais relacionadas a sua fase rifte, NE-SW, NNE-SSW e NW-SE, sendo que estas duas primeiras direções foram interpretadas como falhas normais e a última de transferência (Buarque et al., 2016; Correia Filho et al., 2019) Correia Filho et al. (2019) mapeou uma fase de neotectonismo que afetou a BPE. Este evento neotectônico está relacionado à deformação que afetou a Formação Barreiras (Oligo-Mioceno), depositada nos altos estruturais norte e sul que limitam a BPE em relação a suas bacias vizinhas, da Paraíba, a norte, e de Alagoas, a sul (Rosseti et al., 2013; Bezerra et al., 2014; Correia Filho et al., 2019; Bezerra et al., 2020).

A sedimentação da BPE é dominantemente continental, e iniciou durante o Barremiano?-Aptiano com a deposição da Formação Cabo (Córdoba et al., 2007). A Formação Cabo é representada por sedimentos depositados em sistemas de leques aluviais que gradam lateralmente para sistemas lacustres (Maia et al., 2012). São conglomerados, arenitos grossos e arcóseos intercalados a arenito finos e siltitos. A Formação Cabo é associada às principais falhas (NE-SW) de borda da BPE (Córdoba et al., 2007; Barbosa et al., 2014) (Figura 1).

Recobrindo a Formação Cabo, e depositada sobre uma discordância intrarifte regional (Barbosa et al., 2014), ocorrem os arenitos e argilitos flúvio-lacustre da Formação Suape (Maia et al., 2012). A Formação Suape é contemporânea ao magmatismo da Suíte Magmática Ipojuca (SMI) que apresenta pulso principal datado em 102 Ma (Nascimento, 2003) e estende-se até 72 Ma (Nascimento, 2017). Depositados sobre a discordância que marca o final da fase rifte, e início do pós-rifte da BPE, ocorrem as unidades transicionais representadas por arenitos, folhelhos e argilitos flúvio-deltaicos da Formação Paraíso (Maia et al., 2012; Barbosa et al., 2014) (Figura 1).

A fase marinha ocorreu de forma restrita na região *onshore* da BPE, sendo representada por calcários dolomitizados intercalados a margas, relacionados a Formação Estiva (Cenomaniano-Santoniano) (Tomé et al., 2006). Recobrindo as formações cretáceas da BPE, bem como o seu embasamento adjacente, foram depositadas as unidades da Formação Barreiras (Oligo-Mioceno) (Rossetti et al., 2013; Bezerra et al., 2014; Bezerra et al., 2020). São arenitos intercalados a níveis argilosos de ampla continuidade lateral ao longo da BPE (Correia Filho et al., 2019), estes apresentam níveis com intensa bioturbação, e foram interpretados como produto de uma deposição continental, que grada lateralmente para ambientes transicionais de planície de maré (Rossetti et al., 2013) (Figura 1).

Resultados

Gravimetria

O embasamento cristalino próximo à BPE é marcado por anomalias gravimétricas positivas (~1,39 mGal) localizadas no setor oeste do mapa gravimétrico *bouguer* residual (Figura 2). Estas anomalias positivas formam uma estrutura elíptica a partir do limite norte da BPE, que compreende a

zona de cisalhamento Pernambuco (ZCPE), até o seu limite sul, definido como o alto estrutural de Maragogi-Barreiros (Figuras 1 e 2).

O mapa gravimétrico *bouguer* residual mostrou que a região *onshore* da BPE é representada por uma anomalia negativa (~1,25 mGal), estreita e paralela à linha de costa, com direção preferencial NNE-SSW (Figura 2). Nos grabens de Piedade e do Cupe, ambos representados por anomalias gravimétricas negativas, foram perfurados dois poços estratigráficos, o 9 JG-01-PE e o 2 CP-01-PE, respectivamente (Figura 2). O primeiro, atingiu o embasamento em aproximadamente 1.500 metros de profundidade e o segundo alcançou a profundidade de 2.953 metros, sem atingir o embasamento cristalino (Figura 2).

É possível reconhecer no mapa gravimétrico *bouguer* residual a presença de um alto gravimétrico, definido por uma anomalia positiva circular (~1,35 mGal) no centro da BPE. Esta anomalia está associada a ocorrência das rochas magmáticas da SMI na região central da BPE (Figuras 1 e 2), que são representadas por basaltos, traquitos, riolitos e um granito, localmente conhecido como Granito do Cabo de Santo Agostinho, de idade correlata a estas rochas vulcânicas (Sial, 1976; Long et al., 1986; Sial et al., 1980; Nascimento et al., 2008).

Outra região que merece destaque no mapa gravimétrico *bouguer* residual, é a região oeste da área de estudo. Ocorre uma anomalia gravimétrica circular negativa, inserida em uma anomalia positiva maior e relacionada ao embasamento da BPE. A localização da anomalia gravimétrica circular negativa coincide com a localização dos afloramentos dos ignimbritos do Engenho Saco (Figuras 1 e 2). Este fato, suportado pelos mapas gravimétrico e geológico, mostra que além do caráter efusivo, o magmatismo da SMI apresenta eventos de caráter explosivos que afetaram a região central da BPE.

No total foram interpretados 136 lineamentos gravimétricos. A interpretação dos lineamentos foi realizada a partir da mudança de gradiente gravimétrico. A compartimentação estrutural da área estudada revelou que as estruturas mais profundas da BPE e do seu embasamento próximo são representadas por três famílias principais: i) NE-SW, ii) NW-SE e iii) ENE-WSW. A família NE-SW, está associada a um intenso gradiente gravimétrico, o que sugere uma cinemática normal dos planos de falha, esta família de lineamentos gravimétricos é a mais frequente ao longo da área estudada. Estas falhas podem ter sido responsáveis por abrir o espaço de acomodação necessário para a deposição dos sedimentos da fase rifte da BPE (Figura 1). As famílias de lineamentos gravimétricos NW-SE e ENE-SSW são responsáveis por deslocar lateralmente as anomalias gravimétricas positivas. É comum observar esta feição na região de borda da BPE, no setor oeste da área de estudo (Figura 2). O deslocamento lateral associado aos lineamentos gravimétricos NW-SE, permite que estes sejam interpretados como falhas transcorrentes sinistrais, enquanto que a família de lineamentos gravimétricos ENE-SSW, foi interpretada como falhas transcorrentes dextrais (Figura 1).

Lineamentos Topográficos

O dado altimétrico *LIDAR* revelou que os setores oeste e sul da área de estudo são dominados pelas macroformas de relevo em mares de morro (40 - 5 metros de altitude), enquanto que nos setores leste e norte, ocorre o predomínio das planícies costeiras (5 - 0 metros de altitude), estas últimas formadas a partir dos processos de sedimentação ligados ao quaternário (Figuras 3 e 5). Por outro lado, as macroformas de relevo associadas aos mares de morro, estão relacionadas a ocorrência dos domínios de embasamento cristalino da BPE e as Formações Cabo e Suape, conforme o mapeamento geológico da área de estudo revelou (figuras 1 e 5).

A interpretação dos lineamentos topográficos mostrou que possivelmente as formas de relevo estão condicionadas por quatro orientações de lineamentos topográficos: A) NW-SE, B) NNE-SSW, C) NE-SW e D) ENE-WSW, a partir da análise de um total de 357 lineamentos topográficos interpretados. Vale ressaltar que nos setores oeste e sul, os vales fluviais principais estão orientados de forma NW-SE, e os secundários, que estão associados a alguns afluentes, estão orientados de forma NE-SW. É possível perceber no dado altimétrico que existe um arranjo de lineamentos topográficos em vales que formam quase 90º entre si (Figura 3).

Análise do Padrão de Drenagem

Na área de estudo ocorrem pequenas bacias hidrográficas, que segundo o Governo do Estado de Pernambuco, compõe uma série de rio litorâneos. Os rios principais que cortam a área de estudo são os Canoas, Arimbi, Tapera e Merepe (Figura 4).

Com base na orientação dos cursos dos rios principais e de seus afluentes, foi possível perceber que seus cursos assumem a mesma orientação dos lineamentos topográficos e gravimétricos, principalmente NW-SE e NE-SW. Foram observados dois padrões de drenagem, o primeiro localizado no setor oeste, que é marcado pelo padrão de drenagem dendrítico, e o segundo,

representado pelo padrão meandrante, e localizado no setor leste da área de estudo (Figura 4). O mapa de drenagem revelou que a captura das calhas dos rios apresenta padrão em cotovelo. Este padrão ocorre em várias porções do mapa, como na junção entre os rios Canoas e Merepe (porção nordeste do mapa) e ao longo da calha principal do rio Tapera (porção oeste do mapa) (Figura 4).

O mapa de densidade da drenagem mostrou que os setores oeste e sul da área de estudo, apresentam uma elevada densidade que corresponde a 0,0093 - 0,0045 nº/metro^2, enquanto que os setores norte e leste, apresentam uma baixa densidade, de 0,0045 até 0,0009 nº/metro^2 (Figura 5). A variação de densidade de drenagem ao longo da área de estudo, está relacionada às mudanças litológicas. O setor de maior densidade de drenagem compreende o embasamento cristalino e as rochas sedimentares relacionadas a fase rifte da BPE, já no setor que apresenta baixa densidade de drenagem, ocorre o predomínio da sedimentação quaternária (Figuras 1 e 5).

As pequenas bacias hidrográficas relacionadas aos principais rios da região, estão implantadas sobre duas macroformas de relevo principais. A primeira localizada nos setores oeste e sul, e é representada pela macroforma de Mares de Morro, enquanto que a segunda ocorre nos setores leste e norte, e está relacionada à planície costeira (Figuras 1, 3 e 5).

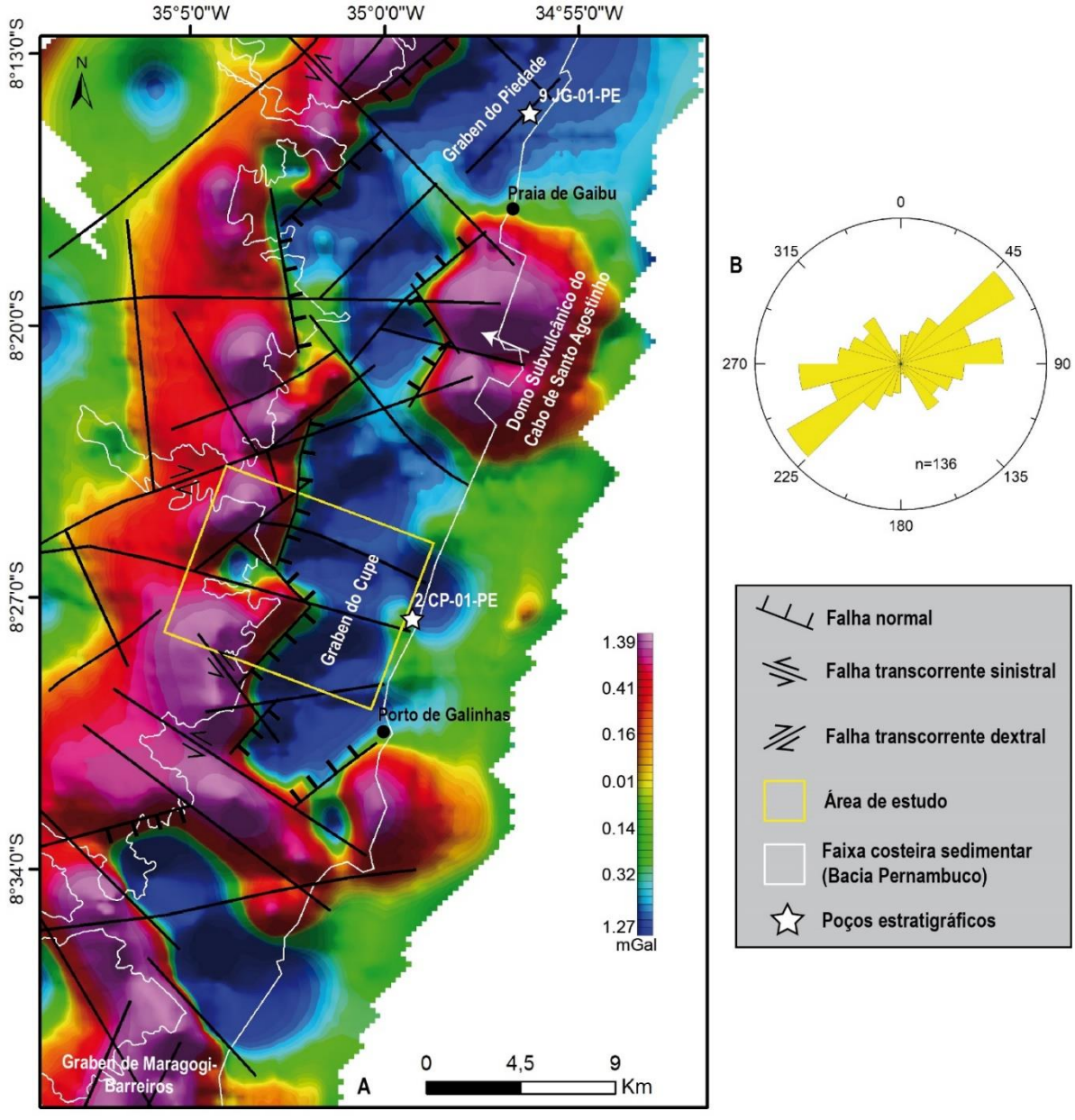

Figura 2. A) Mapa gravimétrico *bouguer* residual da região centro-sul da Bacia Pernambuco. A área de estudo está inserida no contexto do Graben do Cupe (retângulo amarelo). A localização dos dois poços

estratigráficos perfurados na região *onshore* da BPE está representada por estrelas brancas; B) Diagrama de roseta com a direção dos principais lineamentos gravimétricos interpretados na região centro-sul da BPE.

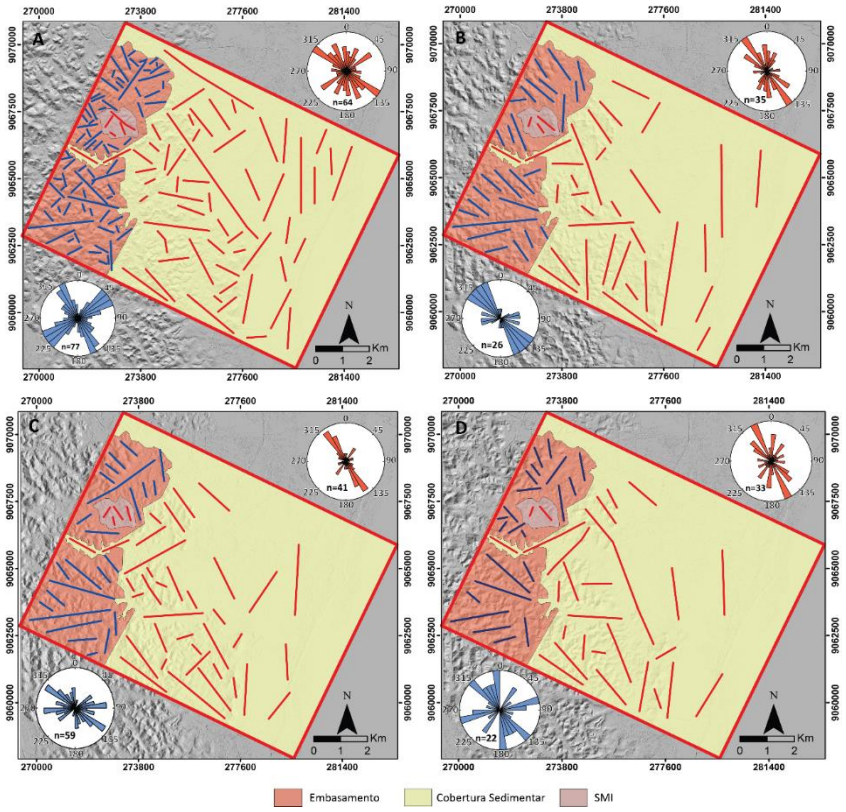

Figura 3. Modelo digital de elevação da região centro-sul da Bacia Pernambuco, com quatro direções de iluminação. 0 Az (A), 45 Az (B), 90 Az (C) e 315 Az (C). Os lineamentos topográficos em azul são para o embasamento adjacente e em vermelho para a cobertura sedimentar.

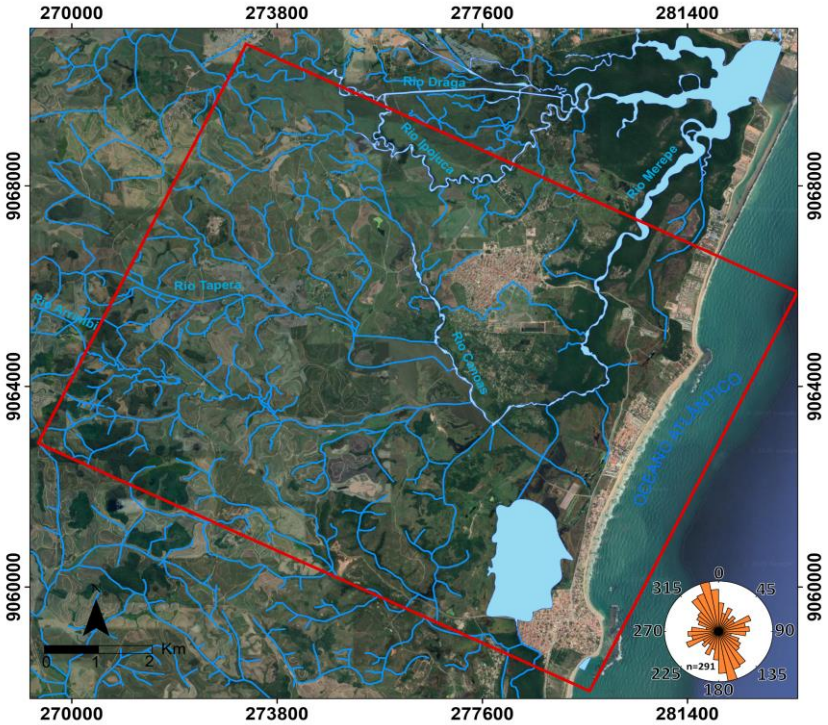

Figura 4. Mapa de drenagem sobreposta a imagem de satélite da região central da BPE, o retângulo vermelho representa a área de estudo. A rede de drenagem mapeada foi obtida através de fotografias aéreas ortorretificadas.

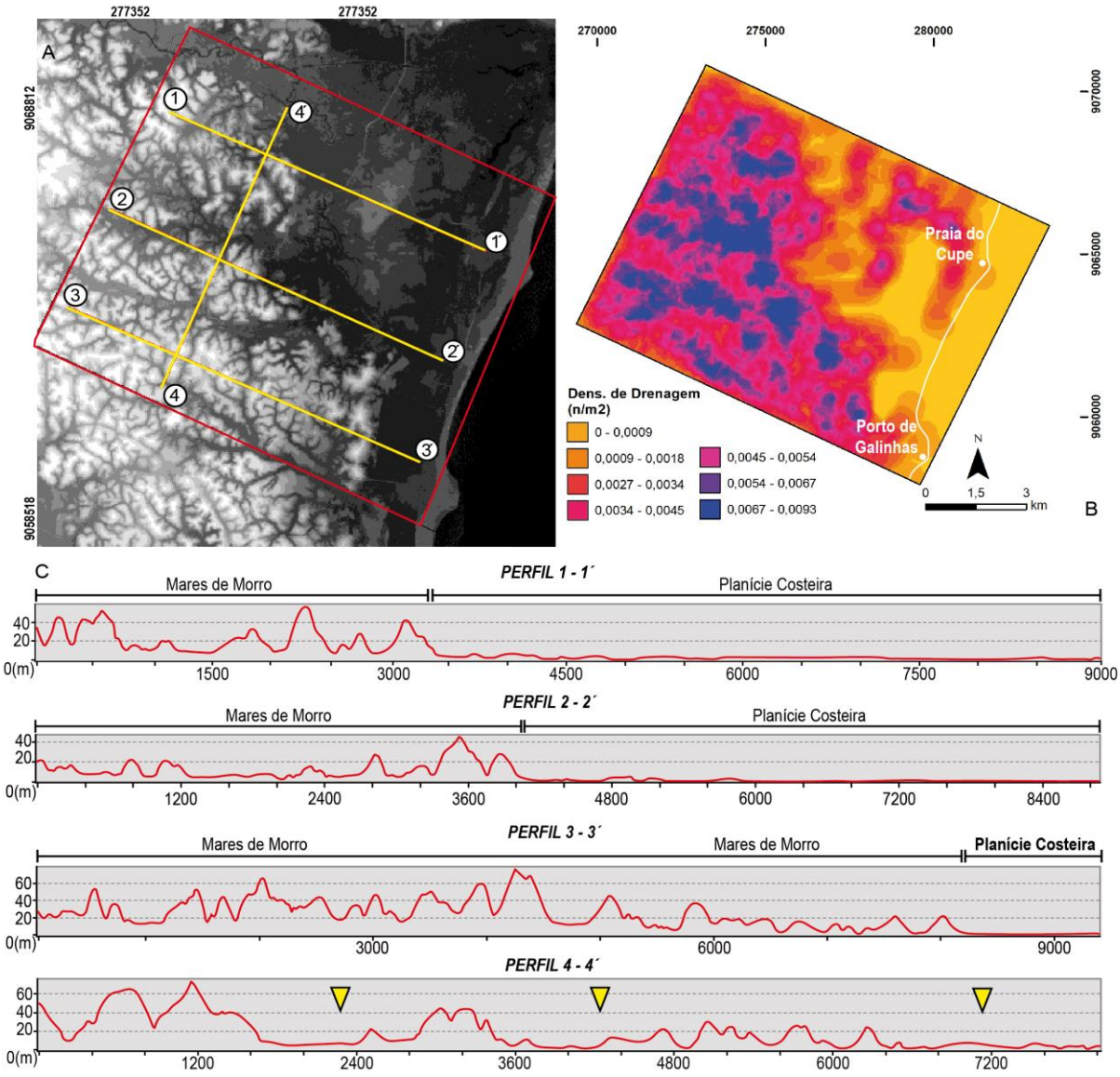

Figura 5. Análise da rede de drenagem inserida na área de estudo. A) Modelo digital de terreno obtido pelo levantamento *LIDAR*. Detalhe para a localização dos perfis topográficos confeccionados através do MDT, cortando os principais vales fluviais da região de estudo; B) mapa de densidade de drenagem e C) perfis topográficos extraídos a partir de duas direções NE-SW e NW-SE. A seta amarela indica a localização dos vales fluviais orientados de forma NW-SE.

Mapeamento Geológico

Com base na interpretação no mapeamento geológico preliminar a partir dos dados geofísicos, que incluem dados gravimétricos, de satélite e *LIDAR*, foram realizadas atividades de campo para validação das informações reunidas, e especialmente, realizar uma caracterização estrutural, dos principais lineamentos interpretados a partir dos dados geofísicos. Estes lineamentos correspondem a eventos de deformação dúctil e rúptil, inseridos no domínio de embasamento adjacente à BPE, e predominantemente rúptil nos domínios sedimentares da BPE.

A seguir, estão apresentados os principais resultados integrados obtidos, agrupados por tipo de deformação, e por tipo de substrato, sendo embasamento e bacia sedimentar:

Deformação Dúctil e Rúptil do Embasamento

A deformação dúctil está bem registrada e relacionada ao plano de foliação das rochas do embasamento cristalino adjacente da BPE. O

embasamento da área de estudo é representado pelo complexo gnáissico-migmatítico Belém do São Francisco (Figura 1). A foliação é de baixo a moderado ângulo, apresenta direção principal NE-SW e em alguns locais pode ser verticalizada devido à proximidade de zonas de cisalhamento (Figura 6). Os planos de foliação também foram dobrados, e desenham dobras monoclinais verticais (Figura 6). Além da deformação dúctil foi observada com menor frequência estruturas rúpteis como falhas e fraturas no embasamento adjacente a área de estudo. As estruturas rúpteis, principalmente os planos de fratura, assumem duas direções principais NW-SE e NE-SW (Figura 6).

Figura 6. Embasamento adjacente à área de estudo, mostrando detalhe para os afloramentos do Complexo gnáissico-migmatítico Belém do São Francisco. A) Afloramento localizado na entrada da via de acesso para a Praia de Porto de Galinhas (PE-60). O plano de foliação apresenta a seguinte orientação 347/42; B) Foliação de baixo ângulo 140/26 e C) Foliação de alto ângulo, verticalizada, de direção NE-SW, a partir da qual é possível identificar uma dobra monoclinal vertical.

Deformação Rúptil na Bacia Pernambuco

A deformação rúptil é representada por planos de fraturas e falhas que cortam os depósitos das Formações Cabo e Suape, além dos ignimbritos relacionados à Suíte Magmática Ipojuca do Engenho Saco (Figuras 1, 7 e 8).

Falhas predominantemente normais ocorrem nos litotipos das Formações Cabo e Suape. São planos de falha que apresentam ângulo de mergulho moderado a alto, com direção NNE-SSW. Estes planos de falha são responsáveis por compartimentar os depocentros da BPE, e atuaram como falhas de borda no processo de abertura desta bacia. Para definir a cinemática do plano de falha, foram utilizados alguns critérios como camadas deslocadas, estrias e degraus (Figura 7).

O segundo padrão de falhas mapeadas em campo, apresenta preferencialmente a direção NW-SE, sendo observados alguns planos de falha que mostram uma componente de movimento preferencialmente direcional. São planos de falha de alto ângulo, responsáveis por deslocar lateralmente à borda da BPE, conforme pode ser observado no mapa gravimétrico *bouguer* residual (Figura 2). Durante o mapeamento geológico, foi possível mapear um desses planos de falha NW-

SE. O plano em questão, corta as formações Cabo (Barremiano-Aptiano) e Suape (Albiano), e é responsável por colocar as duas formações em contato lateral (Figura 7A). As estrias observadas no espelho de falha indicam que a componente de movimento é predominantemente direcional, no entanto, existe uma componente de movimento vertical, provavelmente normal, o que permitiu classificar este plano como uma falha transcorrente oblíqua (Figuras 7).

Na área de estudo também foram mapeados diques de riolito relacionados à SMI, cortando os ignimbritos do Engenho Saco. Os diques apresentam uma orientação NNE-SSW e ENE-WSW, que é compatível com as estruturas rifte mapeadas e de mesma orientação. As falhas e fraturas originadas durante a fase rifte serviram como conduto de ascensão de magma da SMI (Figura 8).

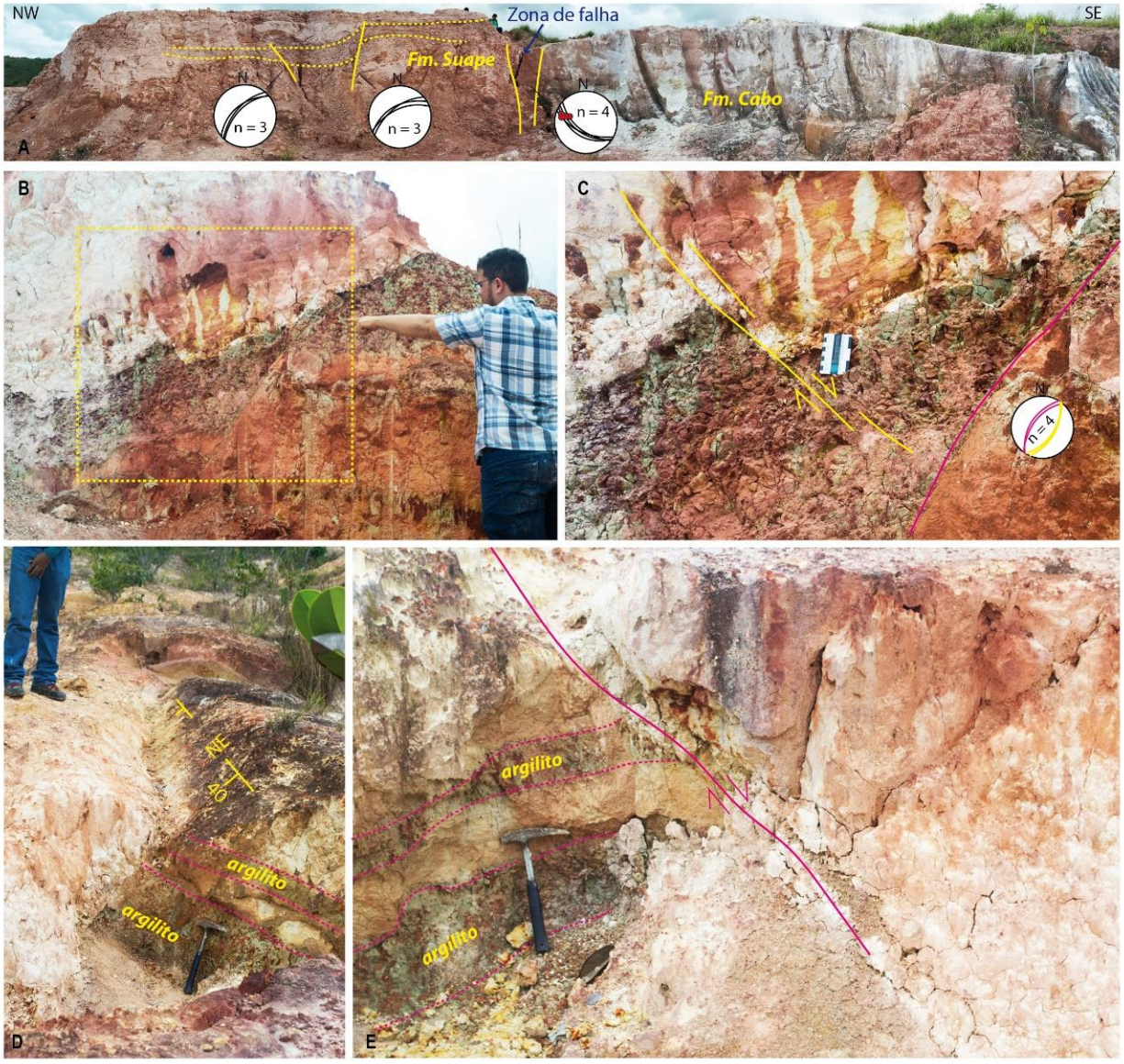

Figura 7. Painel fotográfico das estruturas rúpteis mapeadas na área de estudo. A) Afloramento das Formações Cabo (Barremiano?-Aptiano) e Suape (Aptiano-Albiano). As duas formações estão em contato lateral devido à presença de uma zona de falha NW-SE; B e C) detalhe para os planos de falha normais sintéticos (rosa) e antitéticos (amarelo) cortando a Formação Suape; D e E) planos de falha normais cortando rochas da Formação Suape, mostrando detalhe para a intercalação de arenitos maciços e argilitos mosqueados.

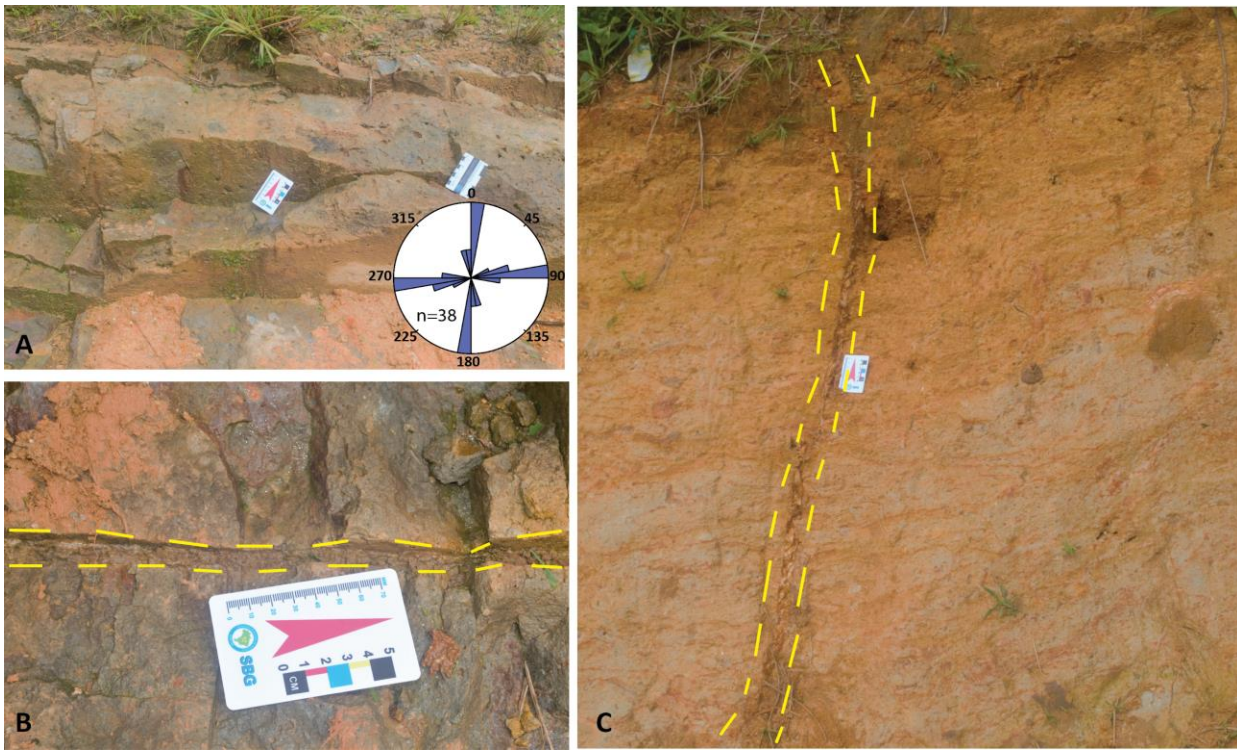

Figura 8. Estampa fotográfica de afloramentos dos litotipos da Suíte Magmática Ipojuca, são ignimbritos que afloram na proximidade da cava principal da mineração Poty, próximo à vila do Engenho Saco. A) Ignimbrito exibindo fraturamento ortogonal, com duas direções principais NNE-SSW e ENE-WSW; B e C) detalhe para o preenchimento das fraturas por injeções tardias de riolito.

Discussões

A análise integrada de dados de diversas fontes permitiu o mapeamento do arcabouço estrutural em várias escalas de observação da região central da BPE. O mapa gravimétrico *bouguer* residual, mostrou que a Bacia Pernambuco apresenta o formato elíptico e é compartimentada em alto e baixos gravimétricos. Os principais depocentros localizados na região *onshore* da BPE são os grabens do Cupe e de Piedade (Lima Filho, 1998; Oliveira, 2013), e os principais altos estruturais, estão relacionados aos altos gravimétricos que marcam a borda da BPE e o alto interno do Cabo de Santo Agostinho (Barbosa et al., 2014) (Figura 2).

A interpretação dos lineamentos gravimétricos sobre o mapa gravimétrico *bouguer* residual, realça estruturas mais profundas relacionadas à interface embasamento/bacia, o que permitiu estabelecer que a BPE está compartimentada em estruturas ao longo de três direções estruturais principais: A) NE-SW, B) ENE-WSW e C) NW-SE. Segundo o gradiente gravimétrico e o deslocamento lateral das anomalias, foi possível inferir a cinemática das três famílias de lineamentos gravimétrico; NE-SW (falhas normais); ENE-WSW e NW-SE (falhas transcorrentes dextrais e sinistrais, respectivamente). Este mesmo arcabouço estrutural também foi mapeado por outros autores, que relacionam a sua origem à complexa evolução de abertura do Oceano Atlântico (Matos et al., 2019). É possível que estas estruturas tenham a sua origem ligada a pelo menos duas fases rifte que afetaram este trecho da margem oriental brasileira (Barbosa et al., 2014; Matos et al., 2019). Segundo Almeida (2003), no início da fase rifte da BPE (Barremiano-Aptiano), os eixos da extensão estiveram posicionados de forma NW-SE, e sofreram uma leve rotação para E-W durante o Aptiano-Albiano, o que favoreceu o surgimento das falhas normais NE-SW e N-S, respectivamente.

Por outro lado, a origem das falhas NW-SE ainda é bastante discutida, tanto no contexto geológico da BPE, quanto no seu embasamento próximo (Correia Filho et al., 2019). Para alguns autores, a origem das falhas oblíquas NW-SE está ligada à acomodação dos esforços extensionais rifte, o que permitiu que estes planos de falha atuassem como zonas de acomodação entre falhas normais (Lima Filho, 1998; Buarque et al., 2016).

No caso da área de estudo, a interpretação dos lineamentos topográficos revelou um padrão espacial similar ao que foi obtido na interpretação

dos lineamentos gravimétricos (Figuras 2 e 3). O que permite afirmar que as estruturas mais profundas da BPE controlaram também a evolução geomorfológica, que resultou na atual configuração da paisagem da área de estudo (Correia Filho et al., 2019) (Figura 5). No mapa obtido através dos dados de *LIDAR*, é possível perceber que ocorre uma orientação preferencial das redes de drenagem NW-SE e NE-SW, o que coincide com as estruturas dúcteis e rúpteis mapeadas tanto no embasamento adjacente da BPE, quando no interior desta bacia sedimentar (Lima Filho, 1998; Almeida, 2003; Correia Filho et al., 2019).

O padrão de drenagem mapeado mostra o intenso condicionamento dos canais dos rios Canoas, Merepe e Tapera às estruturas rúpteis e dúcteis mapeadas. É possível observar, devido ao mapeamento do padrão em cotovelo, que alguns rios foram capturados, o que também pode ser constatado no mapa de densidade de drenagem (Figura 5). Os canais fluviais são extremamente importantes no estudo de eventos de neotectonismo, qualquer reativação de estruturas geológicas do substrato de suas bacias hidrográficas pode desencadear processos de captura de drenagem (Correia Filho et al., 2019).

A etapa de mapeamento geológico revelou que ocorrem pelo menos uma fase de deformação dúctil e outra rúptil no embasamento adjacente à BPE. No interior da BPE foi mapeada apenas uma fase rúptil de deformação registrada nas Formações Cabo, Suape e na Suíte Magmática Ipojuca. No embasamento cristalino a foliação está bem marcada no complexo gnáissico-migmatítico Belém do São Francisco (Neves e Silva Filho, 2019) (Figuras 1 e 6), e apresenta uma direção preferencial NE-SW, com ângulo de mergulho variável de acordo com a proximidade das zonas de cisalhamento do domínio sul da PB (Neves e Mariano, 1999; Neves e Silva Filho, 2019). Além da tectônica dúctil registrada no embasamento da BPE, também foram mapeadas falhas e/ou fraturas cortando o complexo gnáissico-migmatítico com direção preferencial NE-SW e NW-SE. A caracterização cinemática destes planos ficou comprometida devido ao intenso processo de intemperismo que afeta a região na qual a área de estudo está inserida. Estes planos foram tratados como falhas e/ou fraturas indiscriminadas, no entanto, o mapa gravimétrico *bouguer* residual mostrou que algumas anomalias positivas localizadas na região de borda da BPE foram deslocadas lateralmente por lineamentos gravimétricos de mesma orientação.

Nos domínios sedimentares relacionados à BPE, e cortando as Formações Cabo e Suape, foram caracterizadas falhas normais NNE-SSW e falhas oblíquas NW-SE, conforme já tinha sido observada por trabalhos anteriores (Lima Filho, 1998; Almeida, 2003; Correia Filho et al., 2019). Correia Filho et al. (2019) sugerem que a evolução estrutural da BPE não foi encerrada no Albiano, fase final do rifte neste trecho da margem Atlântica (Barbosa et al., 2014; Matos et al., 2019). Estes autores reconheceram pelo menos uma fase de neotectonismo registrada nos afloramentos da Formação Barreiras da BPE. São corredores transpressivos e transtensivos que apresentam a mesma orientação das estruturas rifte da BPE, e são acomodados pela estrutura tipo flor positiva e negativa, respectivamente (Correia et al., 2019). O evento de reativação neotectônica é compatível com o campo de tensões transcorrente registrado na margem oriental da PB (Marotta et al., 2015; Ferreira et al., 2008). É possível que este campo de tensões esteja associado a efeito de *farfield* originado a partir da subducção da placa de Nazca em relação a Sul-Americana, e por outro lado, devido ao efeito de *ridge-push* provocado pelo espalhamento da dorsal Meso-atlântica. Esta configuração tectônica promove um esforço direcionado para o Nordeste do Brasil com compressão E-W e extensão N-S (Bezerra et al., 2014; Lima et al., 2016; Bezerra et al., 2020).

Em resposta a este campo de tensões instalado na margem oriental brasileira, as estruturas, tanto dúcteis quando rúpteis preexistentes, foram reativadas por este novo campo de tensões (Bezerra et al., 2014, Correia Filho et al., 2019; Bezerra et al., 2020). Também foi possível originar novos planos de falhas e fraturas a partir deste campo de tensões cenozoico, bem documentado para o principal marcador de neotectonismo no Nordeste brasileiro, a Formação Barreiras (Oligo-Mioceno) (Furrier et al., 2006; Rossetti et al., 2013).

As bacias hidrográficas inseridas na área de estudo apresentam um intenso condicionamento de seus vales fluviais, às estruturas dúcteis e rúpteis mapeadas no embasamento próximo a BPE, e pelas estruturas rifte da própria BPE. É provável que além do controle estrutural mais antigo, eventos de neotectonismo possam representar um fator importante na modelagem da paisagem atual da área de estudo. Isto está em concordância com o que foi observado através do padrão de captura de drenagem em cotovelo, e pelo rearranjo local do padrão de drenagem, o que provocou incisão dos vales fluviais, de acordo com a orientação das estruturas geológicas preexistentes (Figura 9).

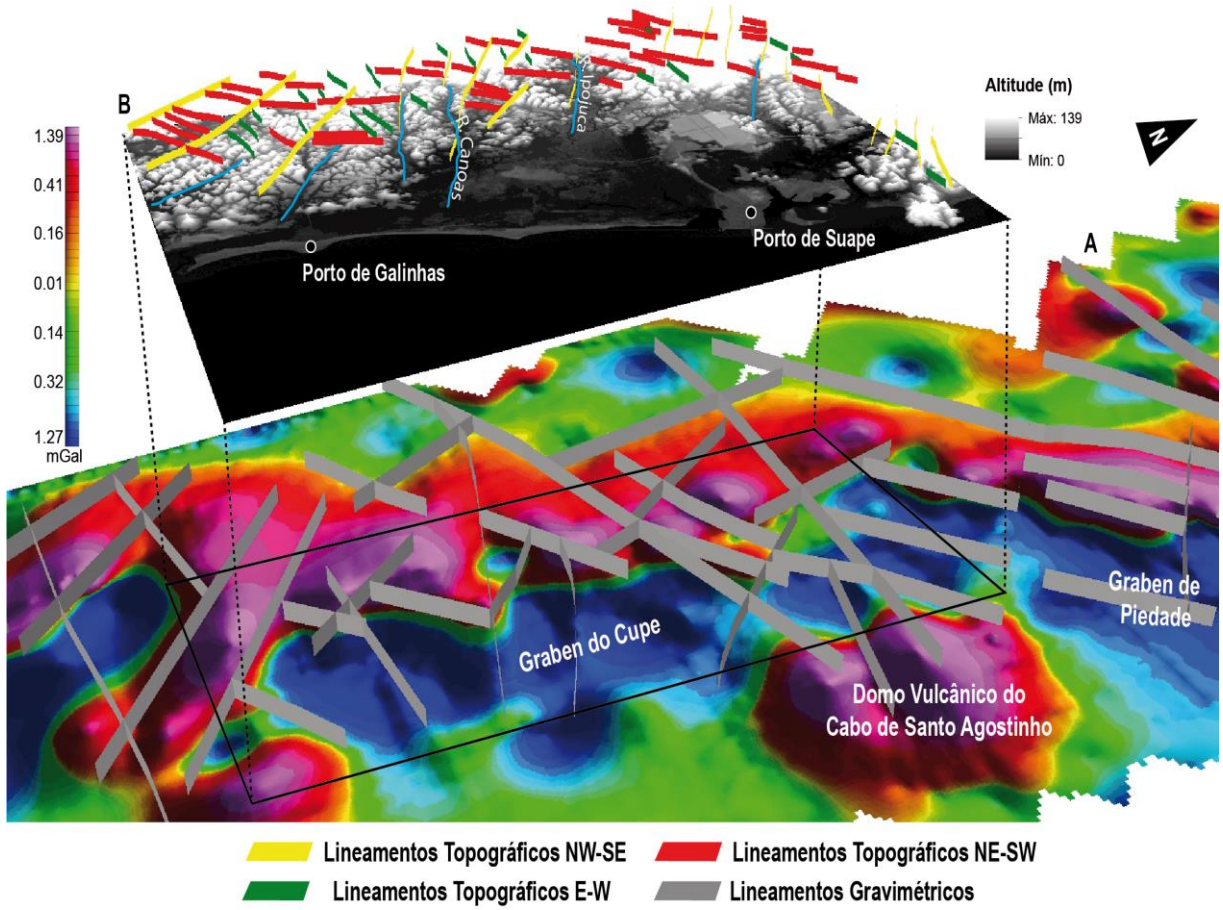

Figura 9. Estampa de integração dos dados utilizados neste trabalho: geologia, gravimetria *bouguer* residual e lineamento topográficos. Detalhe para o controle morfotectônico que as zonas de cisalhamento juntamente com os planos de falha e fratura exerceram sobre a paisagem da região central da BPE, relacionada ao Graben do Cupe. A) Lineamentos gravimétricos interpretados sobre o mapa gravimétrico *bouguer* residual, o que representa estruturas geológicas mais profundas que compartimentam os principais grabens da região *onshore* da BPE; B) Lineamentos topográficos interpretados através do dado de *LIDAR*. Detalhe para a orientação o controle que as estruturas geológicas mais antigas exerceram sobre os principais vales fluviais da área de estudo.

Conclusões

A partir da integração dos dados, foi possível estabelecer um melhor entendimento do arcabouço tectônico da BPE e de seu embasamento adjacente. O mapa gravimétrico *bouguer* residual mostrou que a BPE é compartimentada em três famílias principais de direções preferenciais lineamentos gravimétricos: A) NE-SW; B) ENE-WSW, e C) NW-SE. Um padrão similar foi obtido com a interpretação dos lineamentos topográficos, no entanto, foi possível reconhecer uma quarta família de lineamentos topográficos NNE-SSW.

Estes lineamentos gravimétricos e topográficos obtidos em mapas e em produtos de sensoriamento remoto também foram posteriormente caracterizados em campo, e definidos como traços de foliação e a falhas/fraturas indiscriminadas do embasamento (Complexo gnáissico-migmatítico Belém do São Francisco), resultando nos *trends* estruturais NE-SW para a foliação e NE-SW e NW-SE para as falhas e fraturas indiscriminadas. Também foram mapeadas falhas normais (NE-SW e NNE-SSW) e falhas transcorrentes oblíquas (NW-SE) relacionadas à fase rifte (Barremiano-Albiano) da BPE na área de estudo.

Desta forma, o controle geomorfológico que as estruturas geológicas mapeadas exerceram, juntamente com as estruturas geológicas originadas por processos de reativação neotectônica, foi responsável por lapidar a evolução da paisagem da área de estudo, principalmente de suas bacias hidrográficas. Este processo produziu bacias hidrográficas orientadas preferencialmente NW-SE, com forte controle tectônico de seus vales

fluviais exercido pelas estruturas geológicas mais antigas que foram reativadas durante o Cenozoico.

Agradecimentos

A pesquisa foi apoiada pela Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Programa de Pós-Graduação em Geociências (PPGEOC), Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq, processo n° 312.275/2017-0) e a Companhia de Saneamento Ambiental (COMPESA) pela concessão das imagens de LIDAR.

Referências

Almeida, C.B., 2003. Mapeamento geológico-estrutural na região do Engenho Sibiró - Porto de Galinhas, Sub-bacia de Pernambuco. Monografia. Recife, UFPE.

Almeida, F.F.M, Hassui, Y, Brito Neves, B.B, De, Fuck, R.A., 1981. Brazilian Structural Provinces. An. Introduction. Earth Science Reviews 17, 1–29.

Araújo, 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.

Barbosa, J.A.; Maia, M.F., Lima Filho, M. Magalhães. J.R., Correia Filho, O.J., 2014. Seismic stratigraphy of the onshore portion of Pernambuco Basin: evidence of break up during Middle Albian for the South Atlantic Rift in Northeast Brazil. In: AAPG Annual Exhibition and Convention,Houston, 1, 16. DOI: 10.13140/RG.2.1.2943.2809

Bezerra, F.H., De Castro, D., Maia, R.P., Souza, M.O., Moura-Limac, E., Rossetti, D.F., Bertotti, G., Souza, Z.S., Nogueira, F.C.C., 2020. Postrift stress field inversion in the Potiguar Basin, Brazil – Implications for petroleum systems and evolution of the equatorial margin of South America. Marine and Petroleum Geology, 111, 88–104.

Bezerra, F.H.R., Rossetti, D.F., Oliveira, R.G., Medeiros, W.E., Neves, B.B.B, 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.

Bueno, G.V., 2004. Diacronismo no Rifte Sul-Atlântico. Boletim de Geociências da Petrobrás 12, 203-229.

Buarque, B.V., Barbosa, J.A., Magalhães, J.R.G., Oliveira, J.T.C, Correia Filho, O.J., 2016. Post-rift volcanic structures of the Pernambuco Plateau, northeastern Brazil. Journal of South American Earth Sciences 70, 251-267.

Celestino, M., Miranda, T., Correia Filho, O.J., Barbosa, J., 2017. Aspectos Tectônicos da Borda NE da Bacia De Fátima, Província Borborema-NE do Brasil. Estudos geológicos (UFPE) 27, 3-19.

Chang, H.K., Kowsmann, R.O., Figueiredo, A.M.F., Bender, A.A., 1992. Tectonics and Stratigraphy of the East Brazil Rift system: an overview. Tectonophysics 213, 97-138.

Córdoba, V.C., Jardim De Sá, E.F., Souza, D.C., Antunes, A.F., 2007. Bacia de Pernambuco-Paraíba. Boletim de Geociências da Petrobras 15, 391-403.

Correia Filho, O.J., Barbosa, J.A., Tavares, B., Silva, H.A., Monteiro, K.A., Fabin, C.E.G., Oliveira, J.T.C., Santana, F.R., Silva, S.M., 2019. 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. Anuário do Instituto de Geociências - UFRJ 42, 219-237.

Correia Filho, O.J., 2017. Análise de Estruturas Compressionais na Região Onshore da Bacia Pernambuco, NE do Brasil. Dissertação (Mestrado). Recife, UFPE.

Dantas, E.L., Souza, Z.S., Wernick, E., Hackspacher, P.C., Martin, H., Xiaodong, D., Li, J., 2013. Crustal Growth in the 3.4-2.7 Ga São José de Campestre Massif, Borborema Province, NE Brazil. Precambrian Research 227, 120-156.

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 segmentos de drenagem. Geociências 25, 271-287.

Ferreira, J.M., Bezerra, F.H.R., Sousa, M.O.L., 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.

Furrier, M., Araújo, M.E., Meneses, L.F., 2006. Geomorfologia e tectônica da Formação Barreiras no estado da Paraíba. Geologia USP Série Científica 6, 61–70.

Hashim, M., Ahmad, S., Md Johari, M.A., Pour, A.B., 2013. Automatic lineament extraction in a heavily vegetated region using Landsat Enhanced Thematic Mapper (ETM+) imagery. Adv. Space Res. 51, 874–890.

Hung, L.Q., Batelaan, O., De Smedt F., 2005. Lineament Extraction and Analysis, Comparison of LANDSAT ETM and ASTER Imagery. Case study: Suoimuoi Tropical Karst Catchment, Vietnam. Remote Sensing for Environmental Monitoring, GIS Applications, and Geology 5983, 12.

Lima Filho, M., 1998. Análise Estratigráfica e Estrutural da Bacia Pernambuco. Tese (Doutorado). São Paulo, USP.

Lima, J.C.F., Bezerra, F.H.R., Rossetti, D.F., Barbosa, J.A., Medeiros, W.E., Castro, D.L., Vasconcelos, D.L., 2016. Neogene-Quaternary fault reactivation influences coastal basin sedimentation and landform in the continental margin of NE Brazil. Quaternary International 1, 1-12.

Long, L.E., Sial, A.N, Nekvasil, H., Borba, G.S., 1986. Origin of granite at Cabo de Santo Agostinho, Northeast Brazil. Contrib. Mineral Petrol 92, 341-350.

Maia, M.F.B., Barbosa, J.A., Lima Filho, M., Mort, H.P, Santana, F.R., 2012. Características petrográficas e geoquímicas das Formações siliciclásticas (Aptiano-Albiano) da Bacia de Pernambuco, NE do Brasil. Estudos Geológicos 22, 21.

Marghany, M., Hashim, M., 2010. Lineament mapping using multispectral remote sensing satellite data. Int. J. Phys. Sci 5, 1501–1507.

Marotta, G.S., França, G.S., Monico, J.F.G., Bezerra, F.H., Fuck, R.A., 2015. Strain rates estimated by geodetic observations in the Borborema Province, Brazil. Journal of South American Earth Sciences 58, 1-8.

Masoud, A., Koike, K., 2006. Tectonic architecture through Landsat-7 ETM+/SRTM DEM-derived lineaments and relationship to the hydrogeologic setting in Siwa region, NW Egypt. J. Afr. Earth Sci. 45, 467–477.

Matos, R.M.D., Norton, I., Casey, E., Kruger, A., 2019. An orthogonal zone between the Equatorial and South Atlantic margins: relevance and control in the evolution of the Afro-Brazilian basins. Anais do Sixteenth International Congress Of The Brazilian Geophysical Society. DOI: 10.22564/16cisbgf2019.030

Matos, R.M.D., 1999. History of the northeast Brazilian rift system: kinematic implications for the break up between Brazil and West África. In: N.R. Cameron, R.H. Bate & V.S. Clure, (eds). The oil and gas habitats of the South Atlantic. Geol. Soc. Spec. Pub. 153, 55-73.

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 Relevo. São Paulo, UNESP, Geociências 33, 616-628.

Nascimento, M.A.L., 2003. Geologia, geocronologia, geoquímica e petrogênese das rochas ígneas cretácicas da província magmática do Cabo e suas relações com as unidades sedimentares da Bacia de Pernambuco, NE do Brasil. Tese (Doutorado). Natal, UFRN.

Nascimento, M.A.L., Souza, Z.S., Arnosio, J.M., Vasconcelos, P.M., 2008. Ignimbrito do Engenho Saco, Ipojuca, PE: registro de vulcanismo explosivo cretácico na Província Magmática do Cabo, in: Winge, M., Schobbenhaus, C., Souza, C.R.G., Fernandes, A.C.S., Berbert-Born, M., Queiroz, E.T. (Org.), Comissão Brasileira de Sítios Geológicos e Paleobiológicos (SIGEP), Rio de Janeiro, pp. 237-250.

Nascimento, G.H., 2017. Estudo Geoquímico e Geocronológico de novas ocorrências das Rochas Vulcânicas Albianas e Maastrichtianas da Suíte Magmática Ipojuca, Bacia de Pernambuco. Tese (Doutorado). Recife, UFPE.

Neves, B.B., Silva Filho, A.F., 2019. Superterreno Pernambuco-Alagoas (PEAL) na Província Borborema: ensaio de regionalização tectônica. Geologia USP. Série Científica 19, 3-28.

Neves, B.B., Van Schmus, W.R., Fetter,, 2002. A. North-western Africa-Northeastern Brazil. Major tectonic links and correlation problems. Journal of African Earth Sciences 34, 275-278.

Neves, S.P., Mariano, G., 1999. Assessing the tectonic significance of a large-scale transcurrent shear zone system: Pernambuco Lineamento, Northeastern Brazil. Journal of Structural Geology 21, 1639-1383.

Neves, S.P., Bruguier, O., Silva, J.M.R., Rangel, J.M., Mariano, G., Silva Filho, A.F., Teixeira, C.M.L., 2015. From extension to shortening: Dating the onset of the Brasiliano Orogeny in eastern Borborema Province (NE-Brazil). Journal of South American Earth Sciences 58, 238-256.

Neves, S.P., Bruguier, O., Silva, J.M.R., Bosch, D., Alcantara, V.C., Lima, C.M., 2009. The age distributions of detrital zircons in metasedimentary sequences in eastern Borborema Province (NE Brazil): Evidence for intracontinental sedimentation and orogenesis, Precambrian Research 175, 187-205.

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.

Oliveira, J.T.C., 2013. Análise Integrada de dados Geofísicos da Transição Crustal (Continente-Oceano) da Bacia de Pernambuco, NE do Brasil. Dissertação (Mestrado). Recife, UFPE.

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. Ciência Naturais 9, 11-25.

Sá, J.M., Bertrand, J.M., Leterrier, J., Macedo, M.H.F., 2002. Geochemistry and geochronology of pre-Brasiliano rocks from the Transversal Zone, Borborema Province, Northeast Brazil. Journal of South American Earth Sciences 14, 851-866.

Santos, E.J., Van Schmus, W.R., Kozuch, M., Neves, B.B.B., 2010. The Cariris Velhos tectonic event in Northeast Brazil. Journal of South American Earth Sciences 29, 61-76.

Sial, A.N., 1976. The magmatic province of Cabo de Santo Agostinho, Pernambuco: A brazilian Record of the ascension plume activity., In: Latin American Congress Of Geology, 3, Acapulco, abstract. 1p.

Sial, A.N., Borba, G.S., Villarroel, H.S., Albuquerque, C.A.R., 1980. Geoquímica de Elementos Terras Raras do Granito do Cabo de Santo Agostinho, Pernambuco. Disponível: https://inis.iaea.org/collection/NCLCollectionStore/_Public/22/059/22059675.pdf. Acesso: 18 jun. 20.

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, 409-422.

Tomé, M.E.T.R., Lima Filho, M.F., Neumann, V.H.M.L., 2006. Análise Estratigráfica do Albiano-Turoniano da Bacia Pernambuco: Considerações sobre a Paleogeografia e Geração de Hidrocarbonetos. UNESP, Geociências 25, 49-58.

Vauchez, A., Neves, S.P., Caby, R., Corsini, M., Egydio-Silva, M., Arthaud, M., Amaro, V., 1995. The Borborema shear zone system, Ne Brazil. Journal of South American Earth Sciences 8, 247-266.