



Geomorfologia estrutural e compartimentação geomorfológica obtidas através de dados aeromagnéticos e SRTM na porção Oeste do Batólito Ipojuca-Atalaia, Província Borborema, Nordeste do Brasil

Structural geomorphology and geomorphological compartmentation obtained through aeromagnetic and SRTM data in the West portion of the Ipojuca-Atalaia Batholith, Borborema Province, Northeast of Brazil

Sanmy Silveira Lima, Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Brasil, sanmy_lima@hotmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-6609-2767>

Adejardo Francisco da Silva Filho, Departamento de Geologia e Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Brasil, afsf@ufpe.br

 <https://orcid.org/0000-0002-6341-2286>

Ignez de Pinho Guimarães, Departamento de Geologia e Programa de Pós-graduação em Geociências, Universidade Federal de Pernambuco, Brasil, ignez@ufpe.br

 <https://orcid.org/0000-0002-5037-3820>

Gabriela Menezes Almeida, Programa de Pós-graduação em Geologia, Universidade de Brasília, Brasil, geol.gmalmeida@gmail.com

 <https://orcid.org/0000-0002-1577-0660>

Resumo: O uso e interpretação de dados e imagens obtidos através de sensores remotos permitem importantes aplicações nas geociências. Neste artigo, foram utilizados dados aeromagnéticos e SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) com resolução de 30 metros para, respectivamente, capturar indicadores geológicos e geomorfológicos na porção oeste do Batólito Ipojuca-Atalaia. Técnicas de geoprocessamento foram utilizadas para correlacionar os fatores geológicos e geomorfológicos e como produto final obter a compartimentação geomorfológica da área. Para tanto, aplicou-se as metodologias de extração da hipsometria, grau de declividade, imagem sombreada e drenagem no MDT (modelo digital de terreno) do SRTM, além dos filtros da amplitude do sinal analítico (ASA) e da primeira derivada vertical (DZ) nos dados aeromagnéticos. Como resultado foi possível distinguir nove compartimentos geomorfológicos distintos, enquadrados em cinco categorias de acordo com os processos geológico-geomorfológicos dominantes na região, sendo elas a cimeira estrutural, os planaltos, o pediplano, o pedimento e as planícies. A compartimentação da área auxiliou o entendimento dos processos ocorridos e atuantes na porção oeste do Batólito Ipojuca-Atalaia e como o regime tectônico atua como agente primário na evolução do relevo na região.

Palavras-chave: Modelo digital do terreno (MDT); Amplitude do sinal analítico (ASA); Primeira derivada vertical (DZ); Compartimentação geomorfológica.

Abstract: The use and interpretation of data and images obtained through remote sensors allow important applications in geosciences. In this article, aeromagnetic data and SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) with a resolution of 30 meters were used to, respectively, capture geological and geomorphological indicators in the western portion of the Ipojuca-Atalaia Batholith. Geoprocessing techniques were used to correlate the geological and geomorphological factors and as a final product to obtain the geomorphological compartmentalization of the area. For this purpose, the methodologies

used to extract hypsometry, degree of slope, shaded image and drainage in the MDT (digital terrain model) of the SRTM, in addition to the filters of the analytical signal amplitude (ASA) and the first vertical derivative (DZ) in aeromagnetic data. As a result, it was possible to distinguish nine distinct geomorphological compartments, framed in five categories according to the dominant geological-geomorphological processes in the region, namely the structural summit, the plateaus, the pediplane, the pediment and the plains. The compartmentalization of the area helped to understand the processes that occurred and were active in the western portion of the Ipojuca-Atalaia Batholith and how the tectonic regime acts as a primary agent in the evolution of the relief in the region.

Keywords: Digital terrain model (MDT); Analytical signal amplitude (ASA); First vertical derivative (DZ); Geomorphological compartmentalization.

Introdução

O processo de decomposição progressiva de rochas através do intemperismo é denominado *etching* e o mesmo condiciona a erosão diferencial (Lima *et al.*, 2019; Migón, 2006). Tal processo é subordinado a fatores tectônicos e estruturas originadas por eles (dobras, zonas de cisalhamento, falhas, fraturas etc.), podendo ocasionar em perda das características originais da rocha, como mineralogia, resistência e densidade.

Estruturas geológicas lineares são uma das responsáveis pela criação de zonas de fraqueza em rochas, indicando um “caminho” preferencial para a percolação de fluídos (Pinotti e Carneiro, 2013; Lima *et al.*, 2017a; Lima *et al.*, 2017b; Lima, 2020). Dessa forma, a evolução de modelados graníticos segue a teoria da Etchplanação, onde a concepção de duplo “aplainamento” tem sido utilizada para explicar a evolução de áreas graníticas, tendo em vista não só os processos físicos superficiais, mas também levando em conta os processos intempéricos (químicos) que ocorrem no interior dos granitoides (Büdel, 1982; Twidale, 2005). Essa teoria concentra suas discussões na evolução do modelado a partir da dinâmica estrutural e climática (fatores endógenos e exógenos) ao longo do tempo geológico, indicando uma poligenia na formação do modelado granítico.

De acordo com Lima *et al.* (2017a, 2017b) o estudo integrado de fatores geológicos e geomorfológicos é uma importante ferramenta para a caracterização de uma determinada área. A evolução do modelado é o somatório dos fatores endógenos e exógenos impressos nas rochas e a evolução da paisagem pode ser constatada através do mapeamento geológico-geomorfológico (Cavalcanti, 2014). Rosa (2005), Carrino *et al.* (2007) e Lima *et al.* (2017a, 2017b) indicam que as geotecnologias constituem poderosas ferramentas para a aquisição de dados e tomada de decisões.

Segundo Carrino *et al.* (2007), o uso de geotecnologias tem subsidiado de forma crescente campanhas de mapeamento geológico e geomorfológico de cunho regional e local (e.g. Almeida *et al.*, 2003; Crósta *et al.*, 2003; Lima *et al.*, 2017a; Lima *et al.*, 2017b). O sensoriamento remoto e a aerogeofísica estão entre os métodos indiretos mais utilizados para a avaliação de áreas, devido à rapidez, acurácia e economia na obtenção dos dados (Madrucci *et al.*, 2003).

Em geral, os dados aerogeofísicos são pouco difundidos na geomorfologia, mas são de grande importância para o reconhecimento e validação de estruturas geológicas

(e.g. Carrino *et al.*, 2007; Almeida *et al.*, 2021; Lima *et al.*, 2021). A aeromagnetometria além de ressaltar as estruturas em subsuperfície pode confirmar os lineamentos obtidos através dos dados SRTM, uma vez que o sensor aerotransportado mede a suscetibilidade magnética da rocha, ou seja, a influência causada pelo campo magnético terrestre, ao longo do tempo geológico, em rochas que contenham minerais magnéticos.

Dessa forma, o uso de dados aeromagnéticos é imprescindível para o reconhecimento de delimitação de estruturas lineares (Carrino *et al.*, 2007; Almeida *et al.*, 2021; Lima *et al.*, 2021), para a obtenção dos demais parâmetros morfodinâmicos (hipsometria, declividade, forma e densidade de drenagem e extração de lineamentos) foram utilizados dados SRTM (Souza Filho, 2003; Cordeiro *et al.*, 2010; Tavares *et al.*, 2014).

Inserido nesse contexto o presente artigo busca avaliar as anomalias presentes nos dados supracitados utilizando técnicas de geoprocessamento para analisar os fatores geológicos e geomorfológicos na porção oeste do Batólito Ipojuca-Atalaia e obter como produto final a compartimentação geomorfológica da área.

1. Caracterização da área

A área está localizada na divisa entre os estados de Pernambuco e Alagoas. Região sudeste da Província Borborema (Figura 1).

Em regiões altamente deformadas o processo de Etchplanação ocorre não só por diferenças de resistência física e química das rochas, mas também pela deformação impressa na área. É o caso do Batólito Ipojuca-Atalaia (Figura 1B). A evolução desse batólito está ligada a evolução da Província Borborema (PB; Figura 1A) e por consequência as implicações causadas durante a Orogênese Brasiliana, onde inúmeros corpos graníticos intrudiram na Província Borborema e conseqüentemente no Batólito Ipojuca-Atalaia. Essas rochas exibem morfologias diversas, logo, não existindo uma paisagem granítica padrão para a região estudada (Twidale, 1992).

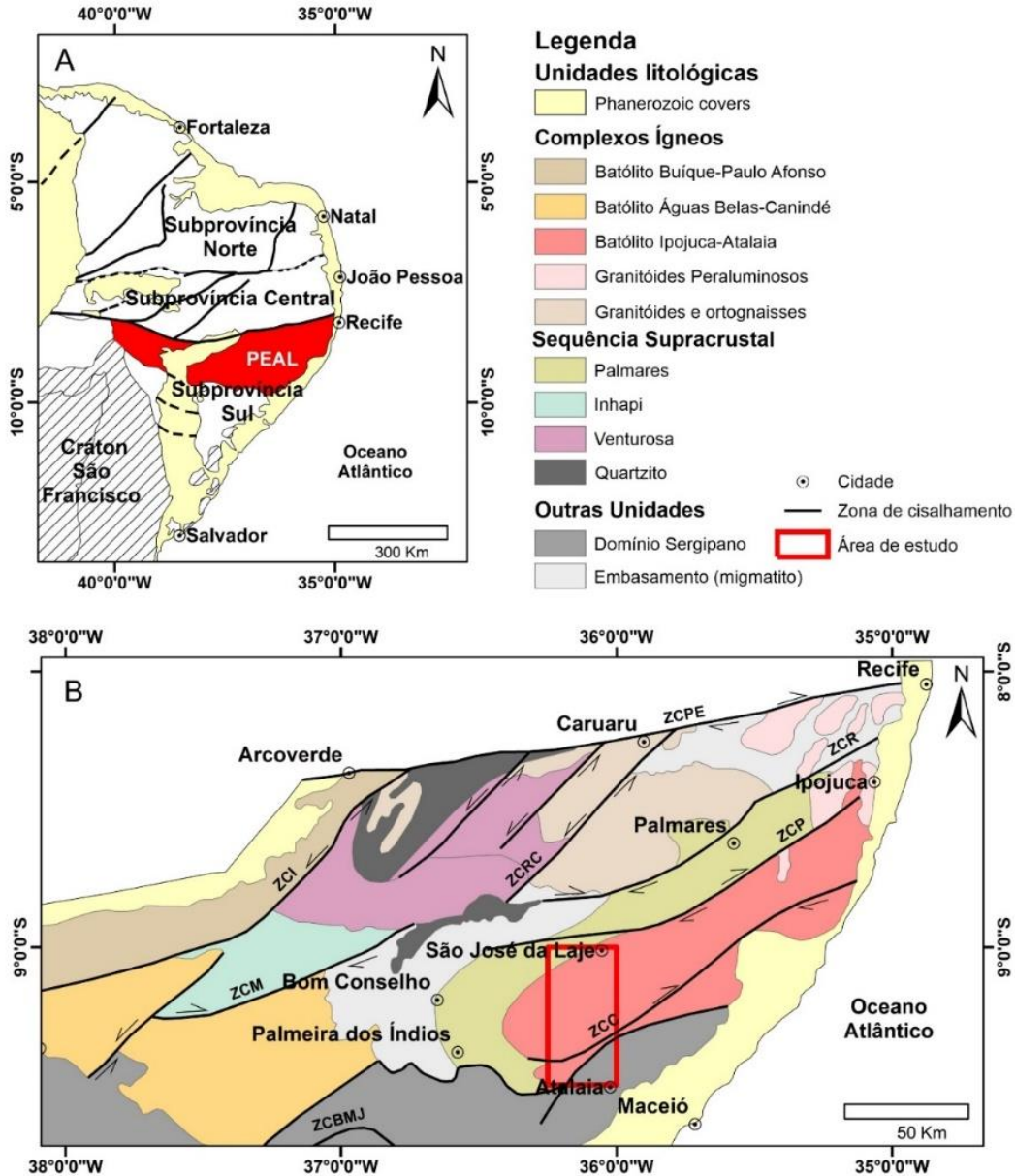


Figura 1: Localização da área de estudo. (A) Mapa simplificado da Província Borborema (Van Schumus *et al.*, 2008); (B) Mapa do Superterreno Pernambuco-Alagoas (PEAL) (Silva Filho *et al.*, 2016), com identificação da área de estudos em vermelho. Zonas de cisalhamento (ZC): ZCBMJ - Belo Monte Jeremoabo, ZCC - Cajueiro, ZCI - Itaíba, ZCM - Maravilha, ZCP - Palmares; ZCPA - Patos, ZCPE - Pernambuco, ZCR - Ribeirão, ZCRC - Rio da Chata.

A região estudada é controlada por dois conjuntos de zonas de cisalhamento. O primeiro conjunto, de cunho regional, é composto pelas zonas de cisalhamento: Palmares, Palmeira dos Índios e Cajueiro e o segundo conjunto é composto por 5 zonas de cisalhamento não denominadas (SD-1, 2, 3, 4 e 5; Figura 2). O controle tectônico da região, com suas feições e estilos, foi o principal critério de análise geomorfológica para a área estudada. Segundo Martins-Ferreira e Campos (2017) os fatores tradicionais (drenagem, altitude e declividade) também precisam ser levados em consideração, atuando como guias para a identificação e compartimentação dos padrões geomorfológicos.

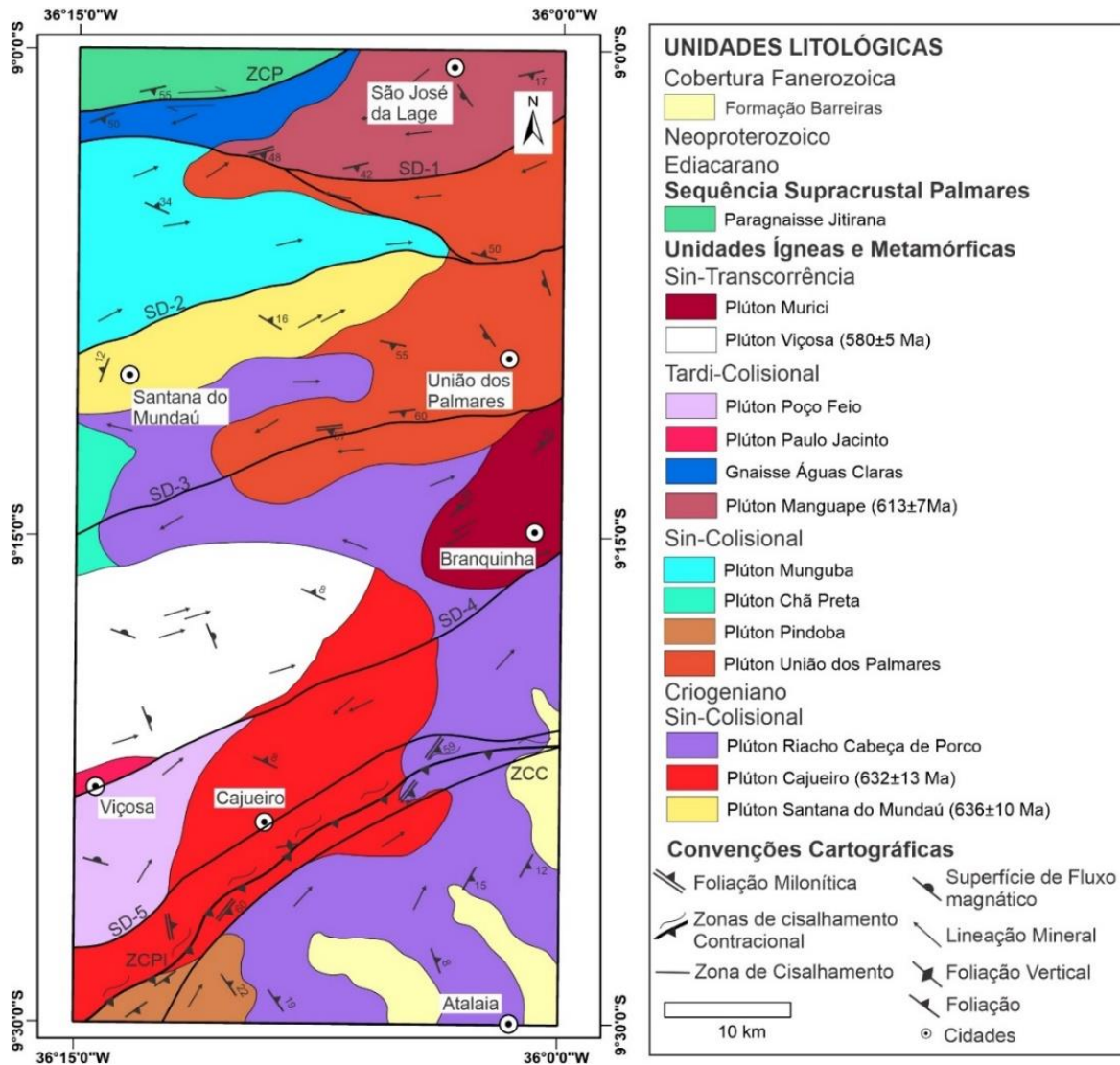


Figura 2: Mapa geológico simplificado (modificado de Lima *et al.*, 2021). Zonas de cisalhamento (ZC): ZCP - Zona de Cisalhamento Palmares; SD-1, SD-2, SD-3, SD4 e SD-5 – zonas de cisalhamento sem denominação; ZCPI - Zona de Cisalhamento Palmeira dos Índios; ZCC - Zona de Cisalhamento Cajueiro.

Geomorfologicamente a região estudada compreende a cimeira estrutural, a escarpa e o pedimonte da porção sudeste da PB. Monteiro e Côrrea (2020) indicam que a evolução geomorfológica da área está associada às estruturas e rochas derivadas de processos acrescionários ocorridos no Ciclo Orogênico Brasileiro (Neoproterozoico).

1.1. Contexto geológico regional: A Província Borborema, o Superterreno Pernambuco-Alagoas e o Batólito Ipojuca-Atalaia

A Província Borborema (Figura 1A) foi formada pela convergência e colisão entre os crátons do Oeste da África, Congo-São Francisco e Amazônia, há cerca de 600 Ma. (Trompette, 1994; Van Schmus *et al.*, 1995, 2008, 2011; Toteu *et al.*, 2001; Dantas *et al.*, 2003). Essa colisão resultou na amalgamação de segmentos litosféricos distintos, associados concomitantemente a diferentes tipos de bacias com crostas proto-

oceânicas formadas entre eles. As subsequentes interações entre estes blocos, descendentes de Rodínia (Frasca, 2015; Brito Neves e Silva Filho, 2019), ocorreram de acordo com as circunstâncias tectônicas locais, de um segmento litosférico para a outro, até a colisão de todas as bacias, em diferentes fases da convergência por todo o Neoproterozoico, desde o Toniano ao Cambriano (Frasca, 2015; Lima *et al.*, 2021).

O Domínio Pernambuco-Alagoas (PEAL) (Figura 1B) ocorre ao longo da parte sudeste da Província Borborema. Essa entidade tectônica é delimitada, a norte e a sul, por falhamentos com mergulho para dentro da mesma e é caracterizada por gnaisses de alto grau, migmatitos e granitoides brasileiros que surgiram como largos maciços estruturais durante a deformação brasileira (Silva Filho *et al.*, 2002, 2006, 2016; Van Schmus *et al.*, 2008; Brito Neves e Silva Filho, 2019). Trabalhos posteriores (Silva Filho *et al.*, 2002, 2006, 2016; Oliveira *et al.*, 2008; Van Schmus *et al.*, 2008; Brito Neves e Silva Filho, 2019; Lima *et al.*, 2021), sugerem que o Superterreno PEAL é uma amálgama de vários terrenos com idades diversas. As idades modelos de Sm-Nd, de 1,0 a 1,5 Ga, mostram que grande parte do protólito (incluindo fontes para muitos plútons brasileiros) são Mesoproterozoicos ou mais jovens (Silva Filho *et al.*, 2002, 2006), embora muitos gnaisses também apresentem origem Arqueana a tardi-paleoproterozoica (Brito Neves e Silva Filho, 2019).

O Batólito Ipojuca-Atalaia ocorre com forma alongada, segundo eixo NNE-SSW, entre as cidades de Ipojuca (PE) e Atalaia (AL). Constitui-se, predominantemente, por plútons cálcio-alcálicos, que intrudem ortognaisses e metatexitos Proterozoicos. Estes plútons apresentam litologia variada destacando-se, pela ordem, granitos com álcali-feldspatos e sienogranitos, monzogranitos e quartzo sienitos, e granodioritos (Brito Neves e Silva Filho, 2019; Lima *et al.*, 2021; Lima e Almeida 2021). As rochas graníticas apresentam uma série de determinações Sm/Nd (Silva Filho *et al.*, 2002, 2014), com valores de TDM distribuídos por todo o Proterozoico. Os principais plútons presentes na região são: Murici, Cajueiro, Viçosa, Santana do Mundaú, Poço Feio, Manguape e União dos Palmares (Figura 2).

As zonas de cisalhamento Palmares e Palmeira dos Índios limitam o batólito Ipojuca-Atalaia dentro do Superterreno Pernambuco-Alagoas, indicando seu cunho regional. Essas zonas de cisalhamento são amplamente descritas na literatura (Brito Neves e Silva Filho, 2019; Mendes *et al.*, 2008, 2010). A zona de cisalhamento Palmares apresenta cinemática transcorrente dextral (Mendes *et al.*, 2010) e as rochas, apresentam xistosidade devido ao processo de tensão que reorientou os minerais. A zona de cisalhamento Palmeira dos Índios é caracterizada como uma zona de cisalhamento contraccional e apresenta estruturas S-C e rochas milonitizadas com transporte tectônico para N-NE (Martins, 2018).

1.2. Contexto Geomorfológico

De acordo com Corrêa *et al.* (2010), a região da Província Borborema corresponde a um conjunto de terras altas que se distribuem no nordeste oriental do Brasil, com limites marcados por uma série de desnivelamentos topográficos, sendo comum não apresentar solução de continuidade litológica em relação ao relevo rebaixado

adjacente. Sua gênese está associada a dois eventos geológicos. O primeiro é o magmatismo associado aos processos ocorridos no Ciclo Orogênico Brasileiro e o segundo é a quebra do Pangea amplamente descritos na literatura (Silva Filho *et al.*, 2002, 2006, 2016; Van Schmus *et al.*, 2008; Brito Neves e Silva Filho, 2019; Monteiro e Côrrea, 2020). Esses dois eventos atuaram sobre estruturas herdadas, dando origem a um mosaico de subcompartimentos com características distintas do ponto de vista morfoestrutural (Corrêa *et al.*, 2010). A área de estudo está localizada entre a Cimeira estrutural Pernambuco-Alagoas, a Encosta Oriental (Planalto da Borborema) e os Tabuleiros Costeiros.

A cimeira estrutural Pernambuco-Alagoas, segundo Corrêa *et al.* (2010), apresenta uma feição topográfica homogênea, onde predominam as cristas e relevos residuais. A elevação varia de 550 a 700 metros. Sua morfologia plana é o resultado da homogeneidade litológica do Batólito Ipojuca-Atalaia (rochas graníticas). A tectônica presente na região estrutura as zonas de topo na direção NE-SW.

A encosta oriental, é descrita por Corrêa *et al.* (2010), como uma faixa de relevo estreita em forma de escarpada que bordejia a porção leste da cimeira estrutural Pernambuco-Alagoas. Na região são encontrados plútons brasileiros dissecados dispostos em um alinhamento NNE-SSW. Lineamentos locais, por vezes, controlam a dissecação do relevo nessa unidade geomorfológica.

Segundo Araújo *et al.* (2012), os tabuleiros costeiros apresentam forma alongada, com altitudes máximas de 165m e largura variando de 40 a 80 km. Estas feições, são constituídas por sedimentos da Formação Barreiras, apresentam topografia ligeiramente ondulada. Normalmente, formam extensos corpos sub-horizontais, com ângulos baixo de declive para SE. Por vezes, a dissecação dos sedimentos da Formação Barreiras faz aflorarem rochas do embasamento Pré-Cambriano, impondo relevo de formas mais acidentadas (Barbosa, 1985).

2. Material e métodos

Para a realização da pesquisa, foi estabelecida uma rotina de processamento de imagens orbitais e dados aerogeofísicos.

Os dados geofísicos utilizados neste trabalho são provenientes do levantamento aéreo: Projeto Geofísico Paulo Afonso-Teotônio Vilela (1104), realizados Serviço Geológico do Brasil (CPRM) em 2011. Esse projeto abrange grande parte do estado de Alagoas, a porção norte de Sergipe e a porção sudeste do estado de Pernambuco. O projeto foi adquirido com linhas de voo de direção N-S, com espaçamento de 500 m e linhas de controle E-W, com espaçamento de 10 km, e altura de voo média de 100 m. Os dados aerogeofísicos apresentam-se no sistema de coordenadas cartesianas bidimensionais UTM (Universal Transversa de Mercator), datum horizontal WGS-84, zona 24 sul. As etapas de processamento e análise dos dados foram realizadas no software da Geosoft Oasis Montaj TM v 9.3.

O processamento dos dados geofísicos e as técnicas de realce de anomalias são essenciais para a caracterização magnética e interpretação de seu significado

geológico-geomorfológico. Para o processamento e interpretação dos dados magnéticos foi utilizado como base o campo magnético anômalo (CMA), adquirido através da redução do campo magnético total pelo Campo Geomagnético Internacional de Referência (IGRF). Não foi realizada a operação de redução ao polo (Baranov, 1957; Baranov e Naudy, 1964) por se tratar de região de baixa latitude magnética, o que dificulta a aplicação da técnica. Como produtos, a partir da imagem do campo magnético anômalo, foram aplicados os filtros da amplitude do sinal analítico (ASA) (Roest *et al.*, 1992), para realce de bordas de alvo magnéticos regionais, e da primeira derivada vertical (DZ) (Milligan e Gunn, 1997), com o intuito de realçar estruturas (zonas de cisalhamento, falhas, lineamentos) e corpos geológicos da região.

O modelo digital do terreno (MDT), foi empregado na extração de drenagem, bem como foram aplicados filtros direcionais para o realce das informações e posterior extração de lineamentos de relevo, em seguida foram obtidos os demais produtos como os mapas de hipsometria e declividade. Por fim foi elaborado um mapa com a compartimentação geomorfológica da área.

Especificamente nessa pesquisa, empregou-se o MDT do SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), caracterizado por 30 metros de resolução espacial e disponibilizadas via o sítio <<https://earthexplorer.usgs.gov/>>. Esta imagem apresenta-se no sistema de coordenadas cartesianas bidimensionais UTM (Universal Transversa de Mercator), datum horizontal WGS-84, zona 24 sul.

O MDT obtido através dos dados SRTM, também possibilitou a obtenção dos mapas hipsométricos e de declividade, seguindo a metodologia abordada por Herz e De Biasi (1989), Menges (1990), Duncan *et al.* (2003), Camolezi *et al.* (2012) e Joshi *et al.* (2013), que estabeleceram oito classes segundo limites usados internacionalmente, bem como estão de acordo com as leis vigentes no Brasil. A hipsometria e a declividade foram obtidas através do software ArcGis 10.

A extração automática de drenagem foi feita no MDT do SRTM, a partir do aplicativo de software Global Mapper 11. A rede de drenagem foi extraída utilizando-se a metodologia de Ros e Borga (1997). Esta metodologia consiste na combinação e reconhecimento do conjunto pixels côncavos como potenciais pontos de transmissão (Flow direction) na atribuição de um sentido de drenagem para cada célula do MDT, e a derivação posterior da rede de drenagem (Flow accumulation). A classificação da drenagem, desenvolvida por Horton (1945) segue a equação $Dd = Lt/A$, onde Dd é a desividade de drenagem, Lt é o comprimento dos canais e A é a área estudada. Lollo (1995) através da equação de Horton (1945) classificou a densidade de drenagem de acordo com a tabela 1.

Tabela 1: Valores de referência para classificação da densidade hidrográfica por Lollo (1995).

Densidade hidrográfica (rios km ²)	Classe
< 3	Ruim
3 – 7	Regular
7 – 15	Boa
>15	Muito boa

Os filtros direcionais aplicados na pesquisa são do tipo kernel 3x3, com diferentes azimutes de iluminação (45°, 90°, 180°) e elaborados no software ENVI 4.3. O objetivo da filtragem foi destacar os lineamentos e suas diferentes direções (Drury, 2001). Os dados obtidos através da técnica da filtragem direcional são fundamentais para a qualificação e quantificação das estruturas geológico-geomorfológicas, que são os principais fatores condicionantes da erosão (Batista *et al.*, 2014). Em seguida foi elaborado um perfil topográfico, com direção NNW-SSE, para a área de estudo.

Para a extração visual de lineamentos aerogeofísicos e do modelado, foi usada a metodologia desenvolvida por Chiang (1984, 1987) e, posteriormente modificada por Lima (2020). Na primeira etapa, em ambiente SIG (Sistema de informação geográfica), foram carregadas as imagens devidamente filtradas do MDT do SRTM (Lima *et al.*, 2017a; Lima *et al.*, 2017b; Lima, 2020). Em seguida, foi observado o contexto regional, levando em conta os aspectos geológicos e geomorfológicos mais estáveis da área (Chiang, 1984). A escala de interpretação utilizada foi 1: 250.000. Na segunda etapa, os lineamentos, representados por vales, cristas retilíneas, falhas e outras estruturas, foram traçados. As escalas utilizadas na segunda etapa variaram entre 1: 250.000 e 1: 100.000. Na última etapa, foi realizado o exame pontual de estruturas que levantaram dúvidas nas etapas anteriores, a partir da interpretação visual de estruturas lineares na escala 1: 75.000 (Lima, 2020). Os lineamentos foram divididos em dois grupos: lineamentos principais, que estão amplamente associados a zonas de cisalhamento e/ou limites de unidades geológicas ou geomorfológicas e lineamentos secundários que foram associados a estruturas lineares ou curvilíneas de menor expressão. Em seguida, todos os produtos obtidos através dos procedimentos metodológicos foram reamostrados para o datum SIRGAS 2000.

Após a compilação dos dados de estruturas lineares provenientes dos dados aerogeofísicos e SRTM e da rede de drenagem, foi elaborada a análise estatística dos mesmos por meio da confecção de diagramas de roseta no software Stereonet, indicando o número total de estruturas lineares em cada direção a partir de sua a sua frequência (Reeves *et al.*, 1983; Souza Jr., 1998).

Para a elaboração da compartimentação geomorfológica, foi utilizado o preceito da sobreposição de camadas (Braga *et al.*, 2002), onde o cruzamento de produtos (geofísicos e geomorfológicos) foi realizado para a caracterização geomorfológica das zonas-alvo. De acordo com Moura *et al.* (2009) o princípio de sobreposição de camadas é um procedimento de análise de multicritérios amplamente utilizado no

geoprocessamento, pois se baseia na lógica básica da construção de um SIG onde são selecionadas as principais variáveis que caracterizam o fenômeno e na representação da realidade segundo diferentes variáveis (geologia, geofísica, geomorfologia), organizadas em camadas de informação (planos de informação). As camadas são integradas na forma de um sistema, que traduza a complexidade da realidade, possibilitando a identificação dos diferentes padrões (geológicos - geofísicos - geomorfológicos) nos planos de informação obtidos através dos dados e imagens adicionados no banco de dados (e.g. Carrino *et al.*, 2007; Moura *et al.*, 2009; Almeida *et al.*, 2021; Lima *et al.*, 2017a, 2017b, 2021; Lima, 2020).

A escala utilizada para a compartimentação foi de 1:100.000, uma vez que os dados aerogeofísicos são limitados por essa escala. A sobreposição foi realizada no software ArcGis 10.

As litologias e estruturas geológico-geomorfológicas também foram visitadas em trabalhos de campo. Dados presentes na literatura apresentam as principais movimentações e o seu sentido (Silva Filho *et al.*, 2002, 2006, 2016; Brito Neves e Silva Filho, 2019; Lima *et al.*, 2021), permitindo uma verificação com os dados obtidos através das técnicas geofísicas e de sensoriamento remoto. Fotografias oblíquas realizadas durante essa visita e permitiram identificar as feições superficiais mais importantes, bem como validar os dados obtidos através da metodologia empregada.

3. Resultados e discussão

3.1. Aeromagnetometria

Nesta sessão abordamos o uso de dados aeromagnéticos para a delimitação e o estudo de lineamentos geológicos (zonas de cisalhamento) a partir da suscetibilidade magnética das rochas da porção oeste do Batólito Ipojuca-Atalaia. Com base no grid (matriz) do campo magnético anômalo (CMA; Figura 3) e seus produtos (filtragens) derivados, como: amplitude do sinal analítico (ASA) e primeira derivada vertical (DZ) foi possível realizar uma análise qualitativa dos tipos de lineamento.

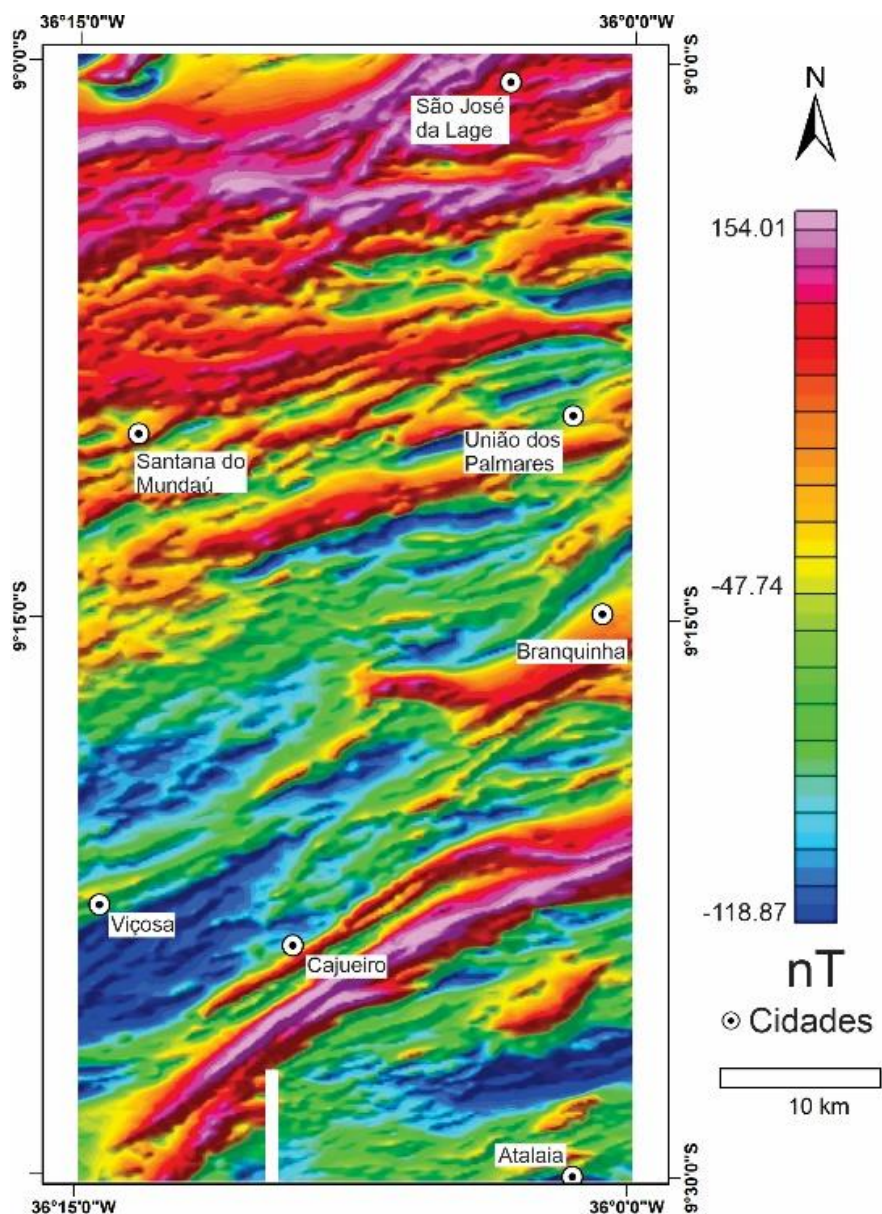


Figura 3: Campo Magnético Anômalo (CMA) e as sedes municipais situadas na porção oeste do Batólito Ipojuca-Atalaia.

Os lineamentos magnéticos foram divididos em dois grupos: lineamentos principais, que estão amplamente associados a zonas de cisalhamento e/ou limites de unidades geológicas e lineamentos secundários que foram associados a estruturas lineares ou curvilíneas de menor expressão. Ao todo foram extraídos 135 lineamentos magnéticos com comprimento variando entre de 0,5 e 30 km, conforme observado na figura 4. As imagens da amplitude do sinal analítico e da primeira derivada vertical e suas interpretações são mostrados na figura 4.

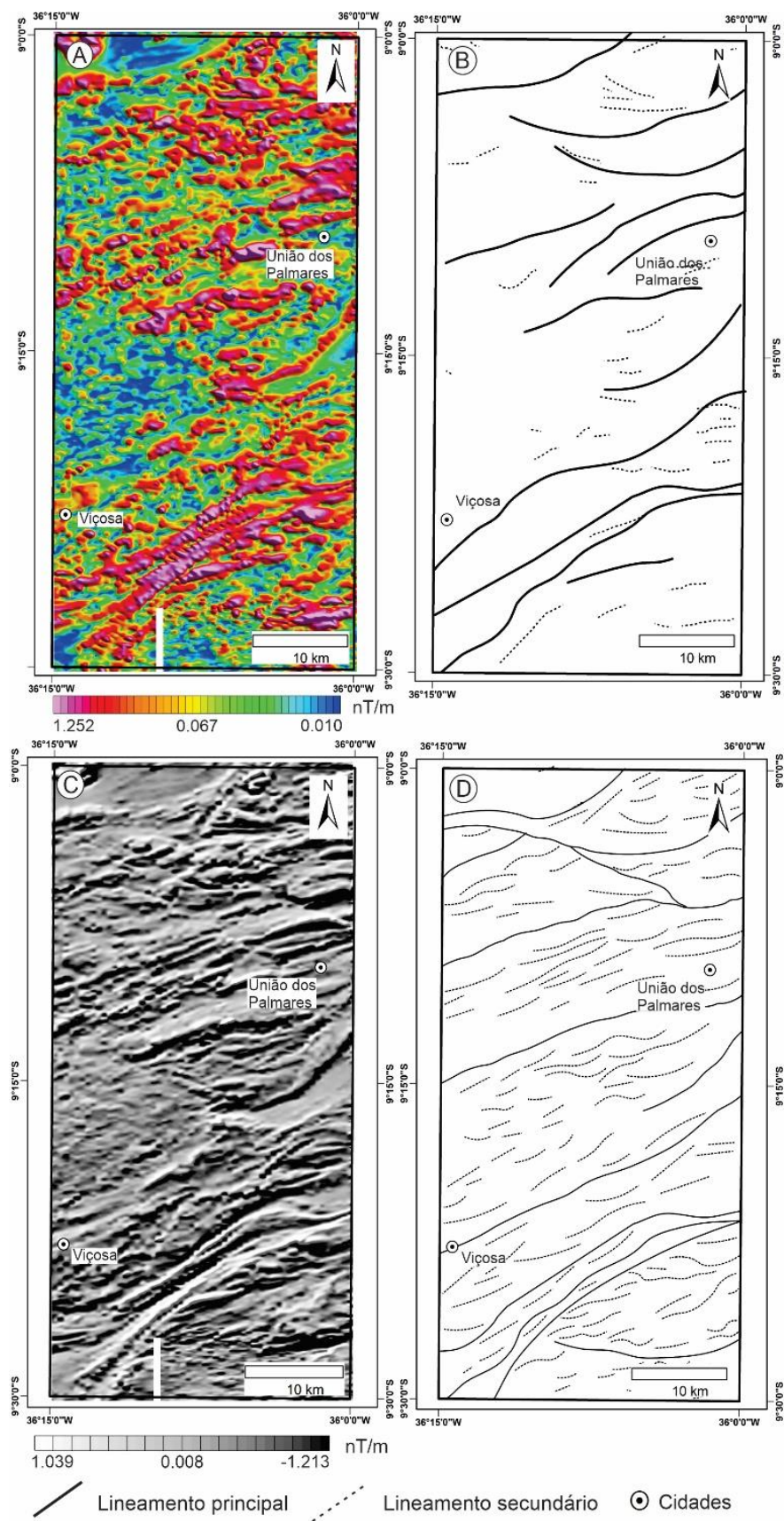


Figura 4: Imagens Magnéticas e lineamentos magnéticos primários e secundários do Batólito Ipojuca-Atalaia. A) Amplitude do Sinal Analítico (ASA); B) Lineamentos interpretados a partir da imagem ASA; C) Primeira derivada vertical; D) Interpretação dos lineamentos da primeira derivada vertical (DZ).

Os diagramas de roseta apresentados na figura 5, indicam um padrão estrutural para os lineamentos magnéticos principais e secundários, com direção predominante para NE-SW, corroborando com os dados apresentados por Silva Filho *et al.* (2002; 2014) e Brito Neves *et al.* (2019).

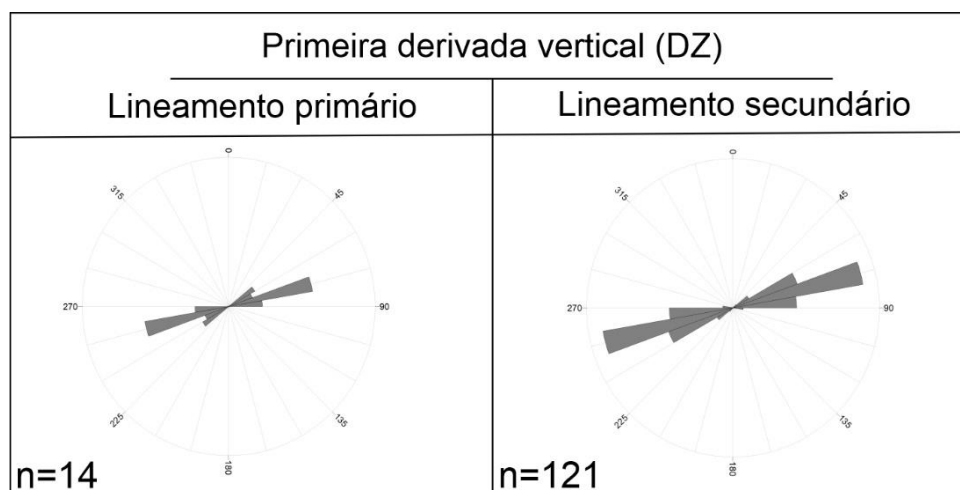


Figura 5: Diagrama de roseta para lineamentos principais e secundários interpretados a partir da imagem DZ.

3.2. Dados SRTM

A partir dos diferentes produtos obtidos através do MDT (modelo digital do terreno) dos dados SRTM foi possível elaborar os mapas: hipsométricos, de declividade e drenagem, bem como dar suporte à aplicação da filtragem direcional e a obtenção do perfil topográfico da região estudada.

O mapa hipsométrico (Figura 6A) foi dividido em oito intervalos, partindo do nível do mar até aproximadamente setecentos e setenta metros de altitude. De acordo com Côrrea *et al.* (2010) a porção noroeste da área representa a Cimeira Estrutural Pernambuco-Alagoas, com altitudes entre 550 e 770 metros (Figuras 6A e 7). A Encosta Oriental também é indicada por Côrrea *et al.* (2010), como localidades onde a altitude varia entre 550 e 165 metros, contemplando as regiões nordeste, centro-oeste, e sudoeste da área de estudo. Por fim, a região de tabuleiros costeiros, descrita por Araújo *et al.* (2012), como localidades de modelado suavemente ondulado e com altitudes partindo do nível do mar até 165 metros (Figura 6A), sendo encontrada nas regiões sudeste e centro-leste.

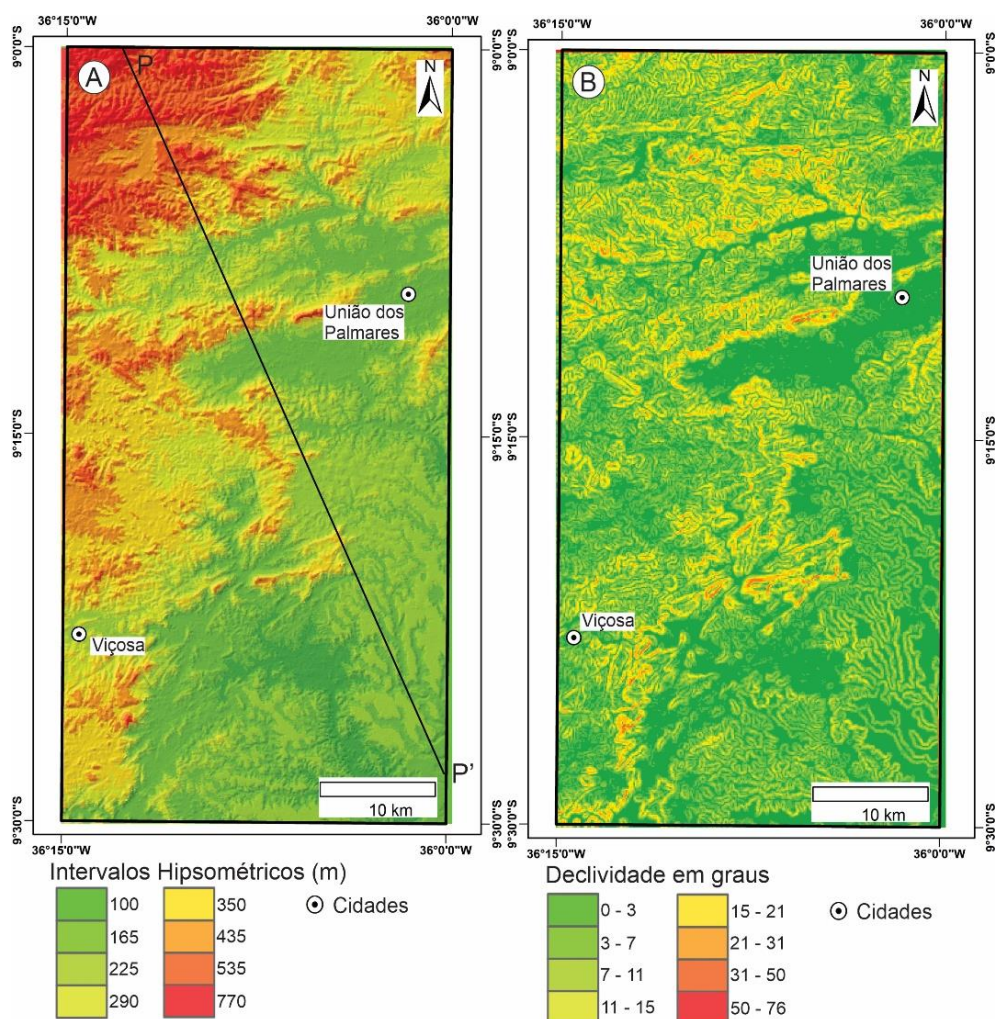


Figura 6: (A) Mapa hipsométrico e corte do perfil topográfico (P-P'); (B): Mapa de declividade ou carta clinigráfica da porção oeste do Batólito Ipojuca-Atalaia.

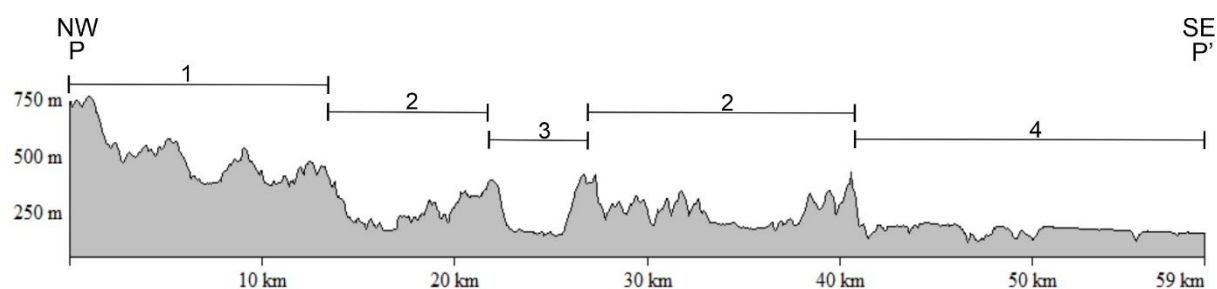


Figura 7: Perfil topográfico (P-P') da porção Oeste do Batólito Ipojuca-Atalaia; 1- corresponde a Cimeira Estrutural Pernambuco-Alagoas, 2- corresponde a Encosta Oriental (Planaltos Dissecados), 3- indica a exposição do embasamento e 4- corresponde aos Tabuleiros Costeiros (zonas de planície).

O mapa de declividade (Figura 6B), foi elaborado para ampliar a percepção do relevo, bem como auxiliar na identificação e correlação dos padrões de declividade com as feições geomórficas e sua relação com a tectônica, haja vista, a heterogeneidade de classes de declividade encontradas na área de estudo.

Analisadas as classes de declividade (Figura 6B) encontradas, a maior área geográfica encontra-se no intervalo de 0-15% que correspondem às áreas tipicamente

tabulares e aos setores de relevo agradacional, como as planícies. A segunda maior classe de declividade verificada corresponde ao intervalo de 15-31% e corresponde às vertentes com inclinação moderada. Esse intervalo de declividade encontra-se nas áreas de vertentes da Cimeira Estrutural PE-AL e da Encosta Oriental. Áreas com intervalo entre 50-76% são raras e estão associadas as serras residuais encontradas nas regiões de borda da Cimeira Estrutural PE-AL.

A drenagem da porção oeste do Batólito Ipojuca-Atalaia conta com 1828 canais perenes e intermitentes (Figura 8). Segundo Souza e Corrêa (2012), o papel desempenhado pela rede de drenagem é fundamental para que ocorra o transporte e a deposição dos sedimentos, que favorece a elaboração de novas formas do modelado. Hooke (2016) constatou que o comportamento do escoamento da água é essencial para a alteração da morfologia dos canais. Assim, a frequência dos fluxos é fator importante, bem como as características geológicas do material de fundo.

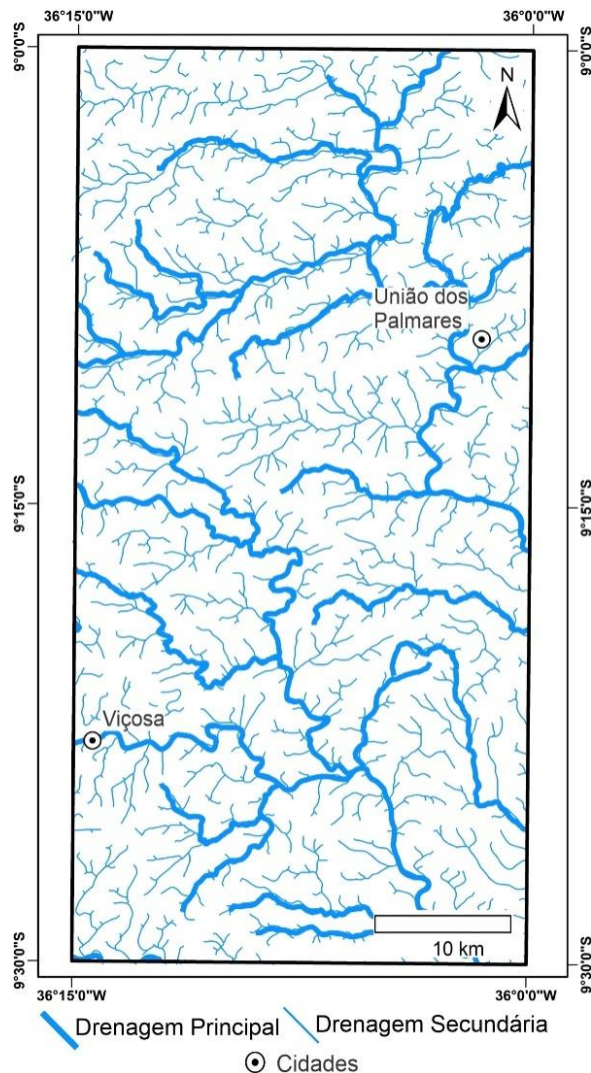


Figura 8: Mapa da drenagem perene (principal) e intermitente ou efêmera (secundária) da área de estudo.

O gradiente de declividade dos canais principais apresentou valores no intervalo de 3-7%, conforme indicado por Côrrea *et al.* (2010) e pela figura 6B. Ainda de acordo com os dados de declividade os canais principais possuem baixo potencial de mobilização de sedimentos, corroborando com os dados apresentados por Nascimento e Xavier (2010). Assim, somente o material fino, constituído de argila e silte, é deslocado. A densidade hidrográfica, apresentou valor de 1,21 canais/km², ou seja, existe uma frequência de 1.21 canais de drenagem para cada km² de área, o que significa uma quantidade regular de canais de acordo com Horton (1945).

As condições litológicas, pedológicas e climáticas favoreceram a formação de rios/riachos devido principalmente a baixa permeabilidade das rochas da porção oeste do Batólito Ipojuca-Atalaia, corroborando com os textos de Soares e Fiori (1976) e Christofolletti (1980). A figura 9 apresenta os diagramas de roseta com duas direções predominantes. Os canais principais apresentam direção predominante NW-SE, caracterizada pelos fatores geomorfológicos exógenos e a drenagem efêmera ou intermitente (secundária), de direção ENE-WSW, está associada aos fatores geológicos, principalmente os de cunho litológico.

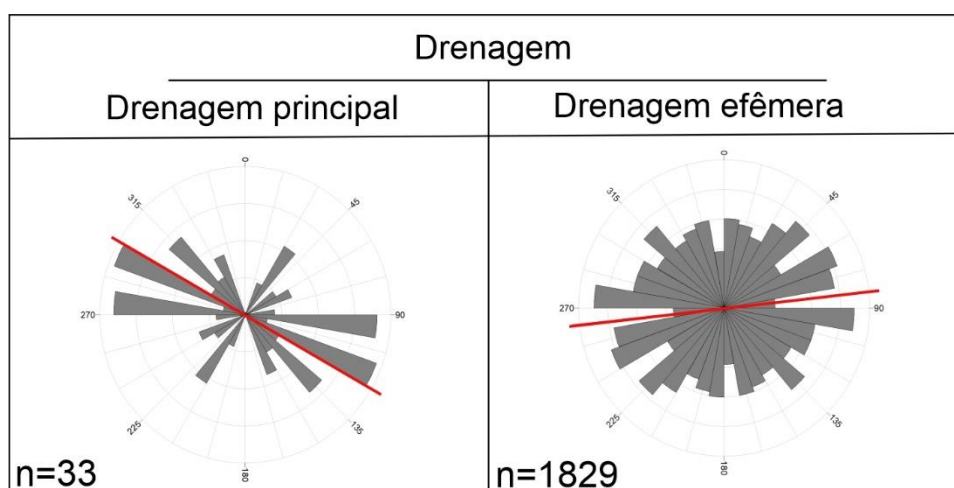


Figura 9: Diagrama de roseta para drenagem principal e secundária interpretados a partir da extração automática de drenagem. A linha em vermelho marca a direção média das rosetas de drenagem principal e efêmera.

Com base na interpretação das imagens obtidas através da filtragem do MDT dos dados SRTM, foi possível extrair 23 lineamentos morfoestruturais primários e 331 lineamentos morfoestruturais secundários, conforme a figura 10. A forma de como as estruturas estudadas (lineamentos morfoestruturais) apresentam-se impressas na paisagem foram analisadas com o objetivo de se estabelecer possíveis padrões entre as estruturas e o os regimes tectônicos a que a área de estudo foi submetida.

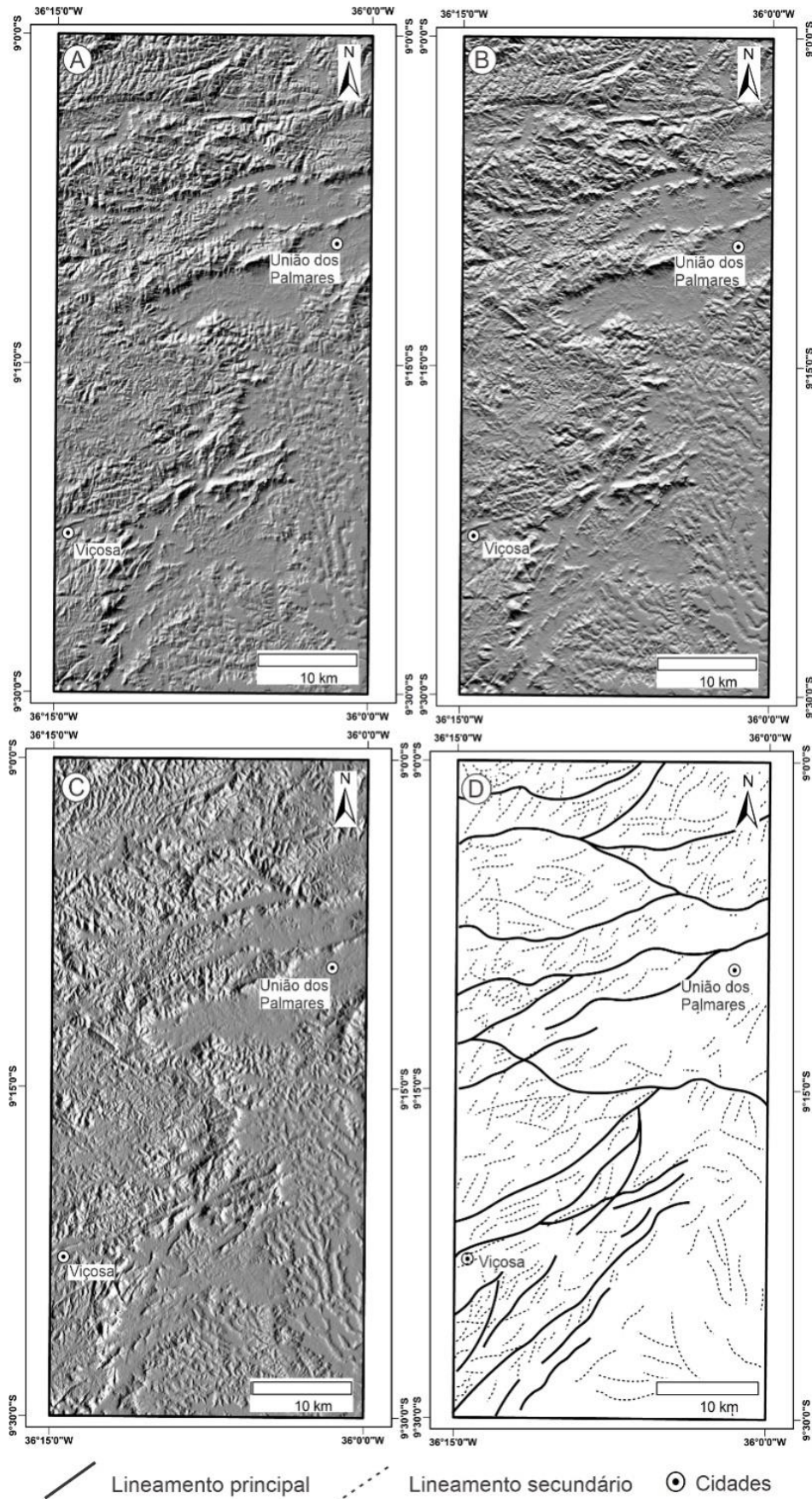


Figura 10: Imagens do MDT dos dados SRTM após aplicação da filtragem direcional. (A) Filtro direcional de 45° Az; (B) Filtro direcional de 90° Az; (C) Filtro direcional de 180° Az; (D) Interpretação dos lineamentos a partir da filtragem direcional.

Os lineamentos morfoestruturais primários estão associadas as zonas de cisalhamento presentes na região, conforme as figuras 2 e 4 e ocorrem controlando alguns cursos de drenagem, principalmente na região noroeste. Os mapas de CMA, ASA e DZ (Figuras 3 e 4) evidenciaram uma forte correlação entre os lineamentos geológicos e os lineamentos morfoestruturais primários (Figura 10D). De maneira semelhante os lineamentos magnéticos e morfoestruturais seguem o mesmo *trend* NE-SW, conforme os diagramas de roseta (Figuras 5 e 11). Os lineamentos secundários estão associados os canais de drenagem secundários ou efêmeros (Figura 8), que são controlados pela componente litológica e apresentaram direção NE-SW, como indicado das figuras 5, 9 e 11.

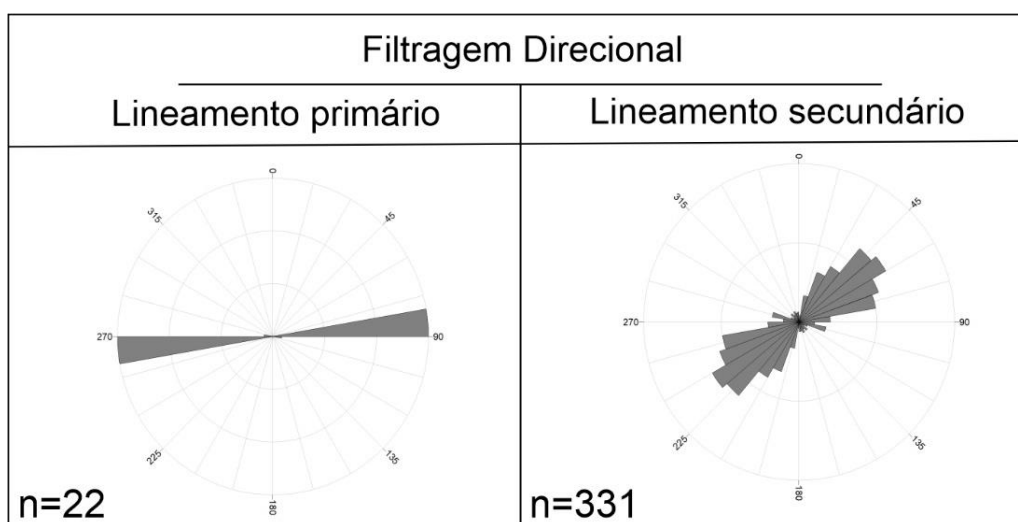


Figura 11: Diagrama de roseta para lineamentos principais e secundários interpretados a partir da filtragem direcional.

3.3. Compartimentação geomorfológica

Nesta seção serão apresentadas as principais características de cada um dos nove compartimentos geomorfológicos obtidos através da metodologia de sobreposição de planos de informação. Cinco conjuntos de compartimentos foram propostos, sendo eles: cimeira estrutural, pedimento, pediplano, planalto e planícies (Figura 12). Os principais critérios utilizados para a compartimentação incluem: padrão de relevo, grau de declividade, hipsometria, densidade de lineamentos e drenagem, bem como aspectos litológicos.

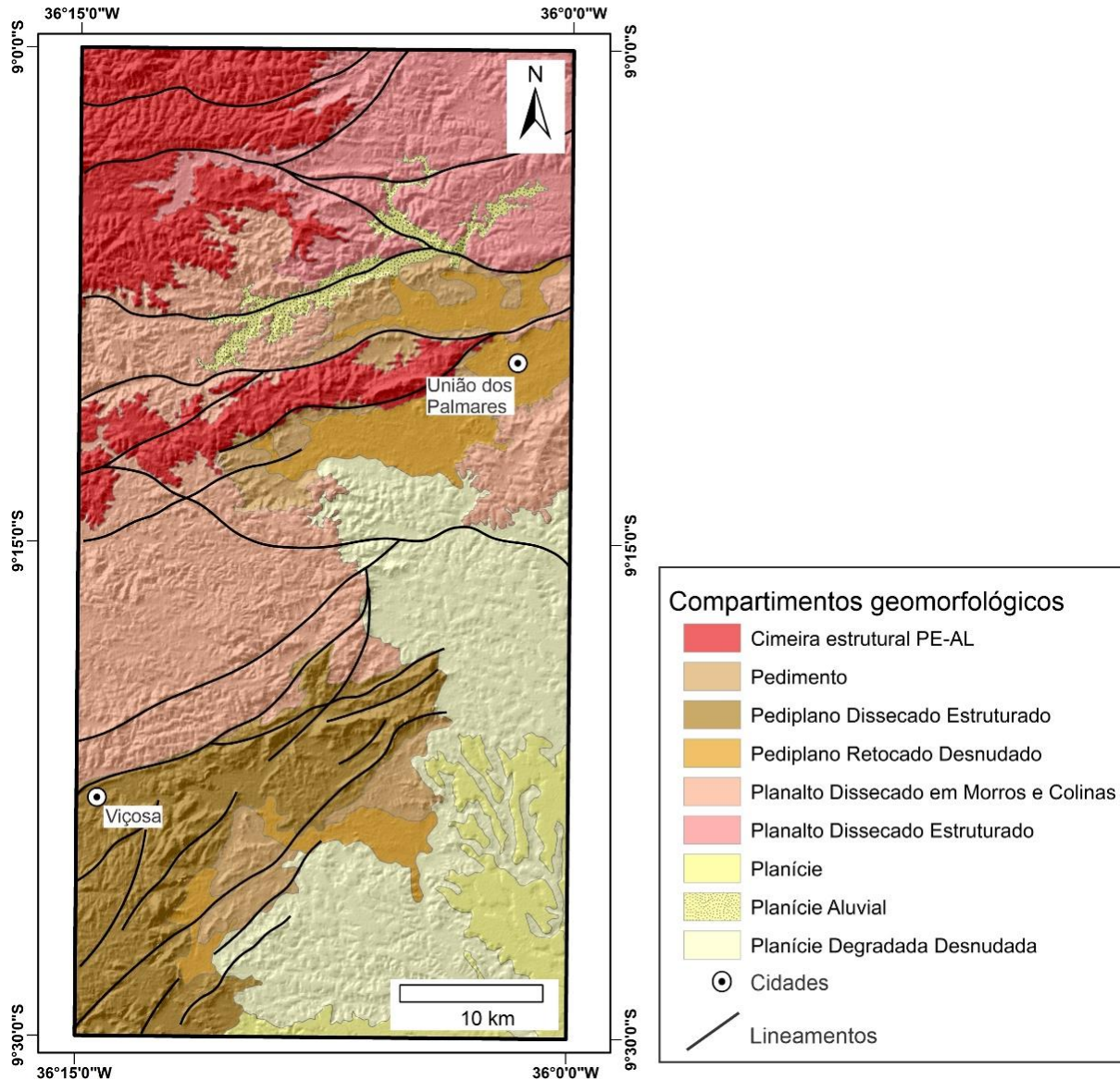


Figura 12: Mapa de compartimentos geomorfológicos da porção Oeste do Batólito Ipojuca-Atalaia e lineamentos obtidos da filtragem direcional do MDT dos dados SRTM.

Cimeira Estrutural PE-AL: Caracterizado por um ambiente de dissecção com modelado rugoso, por vezes, pode apresentar a formação de serras residuais. Apresenta cotas entre 550 e 770 metros, conforme as figuras 6A e 7 e 13A. A densidade de drenagem é moderadamente densa de acordo com Horton (1945) e a drenagem principal, por vezes, se encontra encaixada na principal zona de cisalhamento que compõem a região (Zona de Cisalhamento Palmares). Este compartimento está associado a rochas graníticas (Águas Claras; Munguba; Chã Preta) e supracrustais (Palmares), como indicado nas figuras 1 e 2. Os lineamentos morfoestruturais da região encontram-se vergados por conta da deformação polifásica ocorrida durante o Proterozoico (Silva Filho *et al.*, 2002, 2006, 2016; Brito Neves e Silva Filho, 2019)

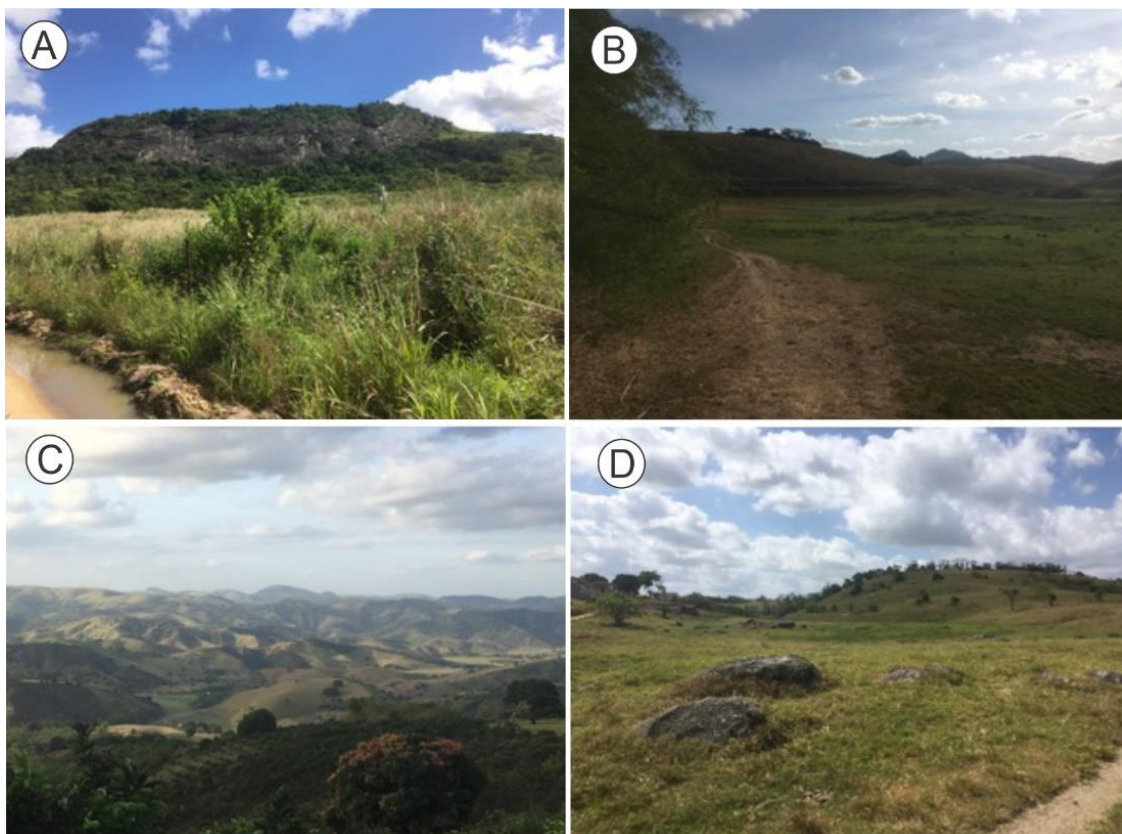


Figura 13: (A) fotografia oblíqua de parte da cimeira estrutural; (B) Fotografia oblíqua da planície degradada desnudada nas imediações no município de Atalaia; (C): Fotografia oblíqua do planalto dissecado nas imediações de Viçosa; (D) Afloramento de composição sienogranítica pertencente ao Plúton Cajueiro: a frente setor de planície e ao fundo, as ondulações que marcam eventos deformacionais provenientes das zonas de cisalhamento.

Planalto Dissecado Estruturado: Definido por um modelado ondulado, sendo este um ambiente de dissecação. Está inserido entre as cotas de 550 e 165 metros (Figuras 6A e 7). Esse compartimento apresenta uma grande diversidade de estruturas secundárias (lineamentos) alinhadas em forma de “V” (vide Figura 10D, extremo nordeste), sendo este um indicador de movimentação para norte-nordeste. A densidade de drenagem na região é regular (Horton, 1945). Esse compartimento está associado ao Plúton Manguape e a porção norte do Plúton União dos Palmares.

Planalto Dissecado em Morros e Colinas: Representa grande parte da porção oeste da área de estudo e é caracterizado como um ambiente de dissecação. O modelado é fortemente ondulado em formas de morros e colinas (Figura 13C). Este compartimento está entre as cotas de 550 e 165 metros (Figura 6A e 7). Não apresenta padrão estrutural definido. A densidade de drenagem é regular de acordo com a equação de Horton (1945) e o padrão de drenagem reconhecido na área foi o dendrítico. Este compartimento apresenta variada litologia granítica, fazendo parte do conjunto os plútons: Murici, Viçosa, Chã Preta, Santana do Mundaú, Riacho Cabeça de Porco.

Pediaplano Dissecado Estruturado: Este compartimento está enquadrado na Encosta Oriental, apresentando relevo rugoso com pequenos setores planos e cotas com intervalo entre 350 e 165 metros (Figura 6A e 13D). Segundo Horton (1945) e Lollo (1995) a densidade de drenagem é ruim e por vezes encontra-se alocada nas estruturas geológicas. Os lineamentos morfoestruturais estão em consonância com as estruturas geológicas representadas pelo conjunto de zonas de cisalhamento Palmeira dos Índios e Cajueiro (Figuras 2, 4 e 10). A litologia desse Compartimento está correlacionada aos monzogranitos do Plúton Poço Feio e aos sienogranitos dos plútons Cajueiro e Pindoba (Figura 13D).

Pediaplano Retocado Desnudado: Esse compartimento apresenta relevo plano e também está associado a Encosta Oriental. A área apresenta padrão de drenagem dendrítico. Segundo Horton (1945) e Lollo (1995) a densidade de drenagem ruim. Esse ambiente geomorfológico de dissecção está correlacionado com o embasamento da porção oeste do Batólito Ipojuca-Atalaia, onde afloram rochas da porção sul do Plúton União dos Palmares, bem como rochas do Plúton Riacho Cabeça de Porco (Figura 2).

Pedimento: Representado por um relevo ondulado, disposto nas soleiras da Cimeira Estrutural PE-AL ou da Encosta Oriental. Apresenta grau de declividade médio em torno de 21 graus e cotas variando 290 e 165 metros (Figura VI). Por vezes, o pedimento está correlacionado com os lineamentos secundários geológicos e morfoestruturais (Figuras 4 e 10).

Planície Degradada Desnudada: Composta por um modelado suavemente ondulado, na área de estudo compõe um ambiente de dissecção, com cota média em torno de 160 metros (Figura 13B). A drenagem é dendrítica e sua densidade é considerada boa pelos padrões de Horton, 1945 e Lollo, 1995. Este compartimento apresenta pequenos vales esculpido pela drenagem que, em raras ocasiões, fazem aflorar rochas graníticas. A componente litológica desse compartimento é dividida entre os sedimentos inconsolidados da Formação Barreiras e os escassos afloramentos do Plúton Riacho Cabeça de Porco.

Planície Aluvial: Apresenta um ambiente de acumulação de sedimentos finos carregados pela drenagem, sendo o planalto dissecado estruturado sua principal fonte de sedimentos. Ocupa uma área de aproximadamente 31 km² formada dentro de um vale em “U” (Figura 6A e 12).

Planície: Este compartimento está enquadrado nos Tabuleiros Costeiros e apresenta modelado suave e cota média em torno de 150 metros de altitude (Figura 7). A drenagem é dendrítica. A componente litológica está exclusivamente associada a Formação Barreiras.

3.4. Correlações entre os dados geológicos e geomorfológicos na porção oeste do Batólito Ipojuca-Atalaia

A compartimentação geomorfológica separou os setores de acordo com seu nível de deformação crustal exposta, cota (mapa hipsométrico), grau de declividade,

densidade de drenagem e tipo de drenagem. Os métodos geofísicos indiretos foram de extrema importância para estudar os tensores de deformação em subsuperfície através da susceptibilidade magnética das rochas.

Os dados aérogeofísicos e SRTM, indicam que a região sofreu uma deformação polifásica, corroborando com a literatura da área e suas adjacências (Silva Filho *et al.*, 2002; Oliveira *et al.*, 2008; Santos *et al.*, 2017). Os lineamentos morfoestruturais, na área de estudo, restringiram a posição e a geometria de grande parte das zonas de cisalhamento, fato corroborado pelos mapas ASA e DZ (Figura 4). A geometria das estruturas (lineamentos) geomorfológicas e geológicas da porção oeste do Batólito Ipojuca-Atalaia, indicaram como principal marcador de movimentação, as zonas de cisalhamento, corroborando com os dados existentes na literatura (Silva Filho *et al.*, 2002, 2006, 2016; Oliveira *et al.*, 2008; Van Schmus *et al.*, 2008; Brito Neves e Silva Filho, 2019).

Os lineamentos morfoestruturais apresentaram boa correlação, principalmente nas regiões graníticas (Figuras 2, 4, 10 e 12), onde os processos erosivos físico-químicos atuaram nas zonas de fraqueza das rochas. Através dos lineamentos morfoestruturais foi possível inferir um possível indicador de movimento para nordeste, movimento este já relatado na literatura (Silva Filho *et al.*, 2002, 2006, 2016; Oliveira *et al.*, 2008; Van Schmus *et al.*, 2008; Brito Neves e Silva Filho, 2019; Lima *et al.*, 2021).

O magmatismo granítico Criogeniano a Ediacarano presente no Batólito Ipojuca-Atalaia está fortemente atrelado a movimentação e deformação em três estágios principais ocorrida na Orogenia Brasileira (Brito Neves e Silva Filho, 2019). O primeiro estágio, sin-colisional, está atrelado a foliação horizontal e a plútons de idade Criogeniana (Figura 2), como o Plúton Santana do Mundaú (636 ± 10 Ma; Ferreira *et al.*, 2016) e o Plúton Cajueiro (632 ± 13 Ma; Mendes *et al.*, 2008), apresentando forma alongada (Figura 2) e associados a cimeira estrutural e ao Pediplano Dissecado Estruturado (Figura 12). O segundo estágio está relacionado ao plutonismo tardi-colisional, tendo como principal característica a presença foliação plana e fraca (Silva Filho *et al.*, 2016), a exemplo, o Plúton Manguape com 613 ± 7 anos (Amostra GUS-152; Silva Filho *et al.*, 2014), este plúton apresenta indicadores cinemáticos por conta de sua proximidade com a Zona de Cisalhamento Palmares, estando ele inserido na unidade geomorfológica planalto dissecado estruturado. O terceiro estágio principal é marcado por plútons sin-transcorrentes, que apresentam foliação vertical e intensa deformação dúctil e rúptil (falhas preenchidas por minerais máficos ou veios de quartzo, sendo esse um dos últimos estágios da amalgamação, Silva Filho *et al.*, 2002; 2014; Brito Neves e Silva Filho, 2019), a exemplo, o Plúton Viçosa com idade de 580 ± 5 Ma (Silva Filho *et al.*, 2013), por conta da deformação, intemperismo e erosão impressas a essas unidades geológicas, as mesmas foram associadas aos Planaltos Dissecados em Morros e colinas.

O mesmo magmatismo granítico presente na porção Oeste do Batólito Ipojuca-Atalaia também foi descrito em outras áreas do PEAL e em outros domínios da Província Borborema (Guimarães *et al.*, 2004; Van Schmus *et al.*, 2011; Silva Filho *et al.*, 2013,

2014, 2016; Caxito *et al.*, 2020), e estão relacionados aos diferentes estágios do Ciclo Orogênico Brasileiro e posteriores deformações (Silva Filho *et al.*, 2014).

Dados estruturais coletados em campo atestam a presença de lineamentos geofísicos e morfoestruturais. Foram encontrados: microfalhas sintéticas (Figura 14A, Zona de Cisalhamento SD-1), minerais estirados (Figura 14B, Zona de cisalhamento Palmares; Figura 14C, Zona de Cisalhamento SD-3), boudins assimétricos e milonitos nas proximidades das principais zonas de cisalhamento, bem como a presença da tectônica rúptil tardia com veios de quartzo cortando as foliações magmáticas ou miloníticas com direção primária NE-SW (Figura 14D) e falhas preenchidas com minerais máficos, também apresentando direção NE-SW (Figura 14E). Esse conjunto de dados comprova a movimentação encontrada neste artigo e na literatura (Silva Filho *et al.*, 2002, 2006, 2016; Oliveira *et al.*, 2008; Van Schmus *et al.*, 2008; Brito Neves e Silva Filho, 2019; Lima *et al.*, 2021). A drenagem, controlada preferencialmente por fatores geomorfológicos, por vezes é encontrada encaixada nas falhas, fraturas ou zonas de cisalhamento, evidenciando um padrão secundário na área, onde em determinados compartimentos seguem o *trend* geológico, como visto nos compartimentos Planalto Dissecado Estruturado e Pediplano Dissecado Estruturado.

As unidades litológicas e os compartimentos geomorfológicos, por vezes, apresentam-se sobrepostos como é o caso do Plúton Cajueiro, inserido no compartimento geomorfológico Pediplano Dissecado Estruturado, onde os processos endógenos, através das zonas de cisalhamento, moldaram o seu formato (Figura 2) e os processos exógenos contribuíram na formação do seu modelado.

Outras correlações também são sinalizadas como o caso dos plútons de idade Brasileira (Murici, Chã Preta, Viçosa, dentre outros), que são em sua grande maioria inseridos no compartimento Pediplano Dissecado em Morros e Colinas, onde a zona central de tais plútons não sofreu alteração significativa pelos processos tectônicos impostos na região oeste do Batólito Ipojuca-Atalaia, logo os processos geomorfológicos como tipo de drenagem e densidade de drenagem assumem um papel primário na evolução do relevo.

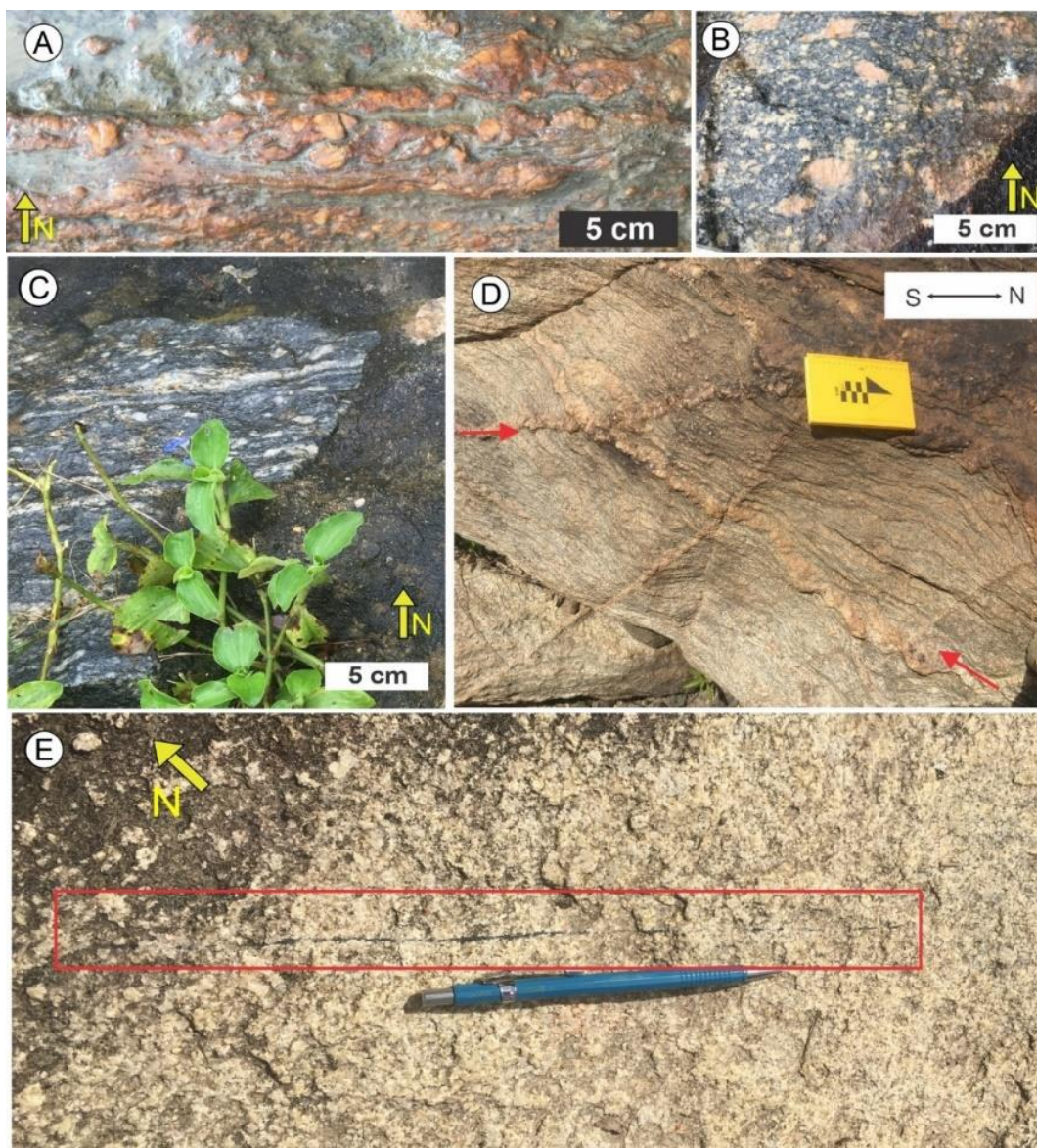


Figura 14: Mosaico de imagens; A) Microfratura sintética com indicador de movimentação dextral – Zona de Cisalhamento SD-1. B) Fenocristal feldspático indicando movimentação (dextral) na Zona de Cisalhamento Pamares; C) Fenocristal de quartzo com movimentação sinistral na zona de cisalhamento SD-3; D) Veios de quartzo cortando a foliação milonítica com direção NE-SW e N-S indicadas por setas vermelhas, localizada entre as zonas de cisalhamento Palmeira dos Índios e Cajueiro; E) Falha preenchida com minerais máficos, com direção NE-SW.

A zona de Tabuleiro costeiro (planícies), por vezes, acoberta as rochas graníticas da região. Essa zona de planícies levemente onduladas apresenta forte correlação com a Formação Barreiras, de idade Fanerozoica. Esse relevo suave reflete a ausência de tectonismo proveniente do Ciclo Orogênico Brasileiro e da quebra do Pangea (Côrrea *et al.*, 2010), sofrendo apenas com eventos neotectônicos de reativação das principais zonas de cisalhamento (Palmeira dos Índios e Cajueiro; Monteiro e Côrrea, 2020).

Conclusões

A avaliação e análise dos produtos aerogeofísicos e SRTM se mostrou uma importante ferramenta para a caracterização de estruturas lineares e compartimentos

geomorfológicos. Com base na metodologia empregada foi possível identificar nove compartimentos geomorfológicos e como as estruturas geológicas imprimem um forte controle morfoestrutural na região. Nesse contexto, o controle estrutural do relevo é evidenciado pela dissecação das zonas de cisalhamento, onde a litologia granítica sofreu uma maior tensão ao longo do tempo geológico.

A porção oeste do Batólito Ipojuca-Atalaia exhibe diferentes feições formadas principalmente entre o Ciclo Orogênico Brasileiro e a quebra do Pangeia. A partir da análise dos lineamentos, foi possível visualizar evidências da deformação polifásica como os indicadores de movimentação para nordeste.

Para fins geológicos a compartimentação geomorfológica da área estudada foi considerada adequada aos objetivos propostos no presente artigo. A metodologia proposta viabilizou análises semiquantitativas na cartografia de estruturas geológico-geomorfológicas, evidenciadas pelos produtos gerados (ASA, DZ, mapa hipsométrico, mapa de declividade, filtragens direcionais, diagramas de roseta e mapa de compartimentos geomorfológicos). No entanto, a metodologia é limitada a resolução espacial dos dados aerogeofísicos que é de 1:100.000.

Os compartimentos exibem diferentes graus de dissecação, de acordo com as componentes estudadas, logo os resultados obtidos por esta pesquisa podem auxiliar no ordenamento territorial da área, uma vez que os mapas servem como fonte de informações tais como: formas do relevo, riscos de erosão, restrições de uso e ocupação urbana. Os dados foram gerados de forma rápida e podem ser atualizados ao longo do tempo, para o aprimoramento dos estudos da porção oeste do Batólito Ipojuca-Atalaia.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Serviço Geológico do Brasil – CPRM pelo apoio e concessão dos dados aerogeofísicos; O primeiro autor agradece ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq, pela concessão da bolsa de estudos modalidade doutorado. O quarto autor agradece a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela concessão da bolsa de estudos modalidade doutorado.

Financiamento

Bolsa de estudos modalidade doutorado concedida pelo Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – CNPq. processo 143557/2017-3; Bolsa de estudos modalidade doutorado concedida pela Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, processo 88887.137872/2017-00.

Bibliografia

Almeida, T. Souza Filho, C. R., Abreu, F. R., Crósta, A. P. (2003). Modelo exploratório para a prospecção de depósitos de Zn-Pb utilizando dados de alta resolução espacial e espectral do sensor GEOSCAN MKII: estudo de caso no depósito Salobro, Porteirinha (MG). Rev. Bras. Geoc., 33, 5-16.

- Almeida, G. M., Fuck, R. A., Lima, D. P. D., Dantas, E. L., 2021. Accretion tectonics in western Gondwana highlighted by the aeromagnetic signature of the Sergipano belt, NE Brazil. *Tectonophysics* 802 (228742). <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2021.228742>
- Araújo, T. C. M., Santos, R. C. A. L., Seoane, J. C. S., Manso, V. A. V. (2012). Erosão e progradação do litoral brasileiro-Alagoas. Brasília: Ministério do Meio Ambiente, 475p.
- Baranov, V. (1957). A new method for interpretation of aeromagnetic maps: pseudo-gravimetric anomalies. *Geophysics*, 22, 359–383.
- Baranov, V., Naudy, H. (1964). Numerical Calculation of the Formula of Reduction to the Magnetic Pole. *Geophysics*, 29, 67-79.
- Barbosa, L. M. (1985). Quaternário costeiro do estado de Alagoas: Influências das variações do nível do mar. Dissertação de mestrado em geologia, UFBA, 58p.
- Batista, C. T., Veríssimo, C. U. V., Amaral, W. S. (2014). Levantamento de feições estruturais lineares a partir de sensoriamento remoto – uma contribuição para o mapeamento geotécnico na Serra de Baturité, Ceará. *Geologia USP, Série Científica*, 14, 67-82.
- Braga, B., Hespanhol, I., Conejo, J. G. L., Mierzwa, J. C., Barros, M. T. L., Spencer, M., Porto, M., Nicci, N., Juliano, N., Eiger, S. (2002). Introdução a Engenharia Ambiental. São Paulo: PearsonPrenticeHall, 318p.
- Brito Neves, B., Silva Filho, A. (2019). Superterreno Pernambuco-Alagoas (PEAL) na Província Borborema: ensaio de regionalização tectônica. *Geologia USP. Série Científica*, 19(2), 3-28.
- Büdel, J. (1982). Climatic geomorphologie. Tradução de Fischer e Busche. New Jersey: Princenton University Press, 443p.
- Camolezi, B. A., Fortes, E., Manieri, D. D. (2012). Controle estrutural da rede de drenagem com base na correlação de dados morfométricos e morfoestruturais: O caso da bacia do ribeirão São Pedro - Paraná. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 13(2), 201-211.
- Carrino, T. A., Souza Filho, C. R., Leite, E. P. (2007). Avaliação do uso de dados aerogeofísicos para mapeamento geológico e prospecção mineral em terrenos intemperizados: o exemplo de Serra Leste, província mineral de Carajás. *Rev. Bras. Geof.*, 25(3), 307-320.
- Cavalcanti, L. C. S. (2014) Cartografia de paisagens: Fundamentos. São Paulo: Oficina de Textos, 95p.
- Chiang, C. L. (1987). A geologia estrutural do estado do Rio de Janeiro, vista através de imagens MSS do Landsat. In: SIMPÓSIO DE GEOLOGIA, 1987, Rio de Janeiro. Resumo expandido... Rio de Janeiro: SBG, Núcleo RJ-ES, 164-168.
- Chiang, C. L. (1984) Análise estrutural de lineamentos em imagens de sensoriamento remoto: aplicação ao estado do Rio de Janeiro. São Paulo, 157 f. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo.
- Christofolletti, A. (1980). Geomorfologia, São Paulo: Edgard Blücher.
- Cordeiro, B. M., Facincani, E. M., Paranhos Filho, A. C., Bacani, V. M., Assine, M. L. (2010). Compartimentação geomorfológica do leque fluvial do Rio Negro, borda sudeste da Bacia do Pantanal (MS). *Revista Brasileira de Geociências*, 40(2), 175-183.

- Côrrea, A. C. B., Tavares, B. A. C., Monteiro, K. A., Cavalcanti, L. C. S., Lira, D. R. (2010). Megamorfolgia e morfoestrutura do Planalto da Borborema. *Revista do instituto geológico*, 31, 35-52.
- Crósta, A. P., Souza Filho, C. R., Azevedo, F., Brodie, C. (2003). Targeting key alteration minerals in epithermal deposits in Patagonia, Argentina, using ASTER imagery and principal component analysis. *International Journal of Remote Sensing*, 24, 4233–4240.
- Dantas, E. L., Silva, A. D., Almeida, T., Moraes, E. (2003). Old geophysical data applied to modern geological mapping problems: a study case in Seridó Belt, NE Brazil. *Revista Brasileira de Geociências*, 33, 65-72.
- Drury, S. (2001). *Image interpretation in geology*. Cheltenham: Nelson Thornes Ltd., 290p.
- Duncan, C., Masek, J., Fielding, E. (2003). How steep are the Himalaya? Characteristics and of along-strike topographic variations. *Geology*, 31, 75–78.
- Frasca, A. S. (2015). *Amalgamas do W-Gondwana na Província Tocantins*. Tese de Doutorado. Universidade de Brasília. 172p.
- Guimarães, I. P., Silva Filho, A. F., Almeida, C. N., Van Schmus, W. R., Araújo, J. M. M., Melo, S. C., Melo, E. B. (2004). Brazilian (Pan-African) granitic magmatism in the Pajeu–Paraíba belt, northeast Brazil: an isotopic and geochronological approach. *Precambrian Research* 135, 23–53.
- Herz, R., De Biasi, M. (1989). *Crerios e legendas para macrozoneamento costeiro*. Ministério da Marinha/ Comissão Interministerial para os Recursos do Mar. Brasília: MM.
- Hooke, J. M. (2016). Morphological impacts of flow events of varying magnitude on ephemeral channels in a semiarid region. *Geomorphology*, 252, 128-143.
- Horton, R. E. (1945). Erosional development of drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geol. Soc. Amer. Bull.*, 56, 275-370.
- Joshi, P. N., Maurya, D. M., Chamyal, L. S. (2013). Morphotectonic segmentation and spatial variability of neotectonic activity along the Narmada–Son Fault, Western India: Remote sensing and GIS analysis. *Geomorphology*, 180-181, 292–306.
- Lima, D. L. S., Bastos, F. H., Cordeiro, A. M. N., Maia, R. P. (2019) Geomorfologia granítica do Maciço de Uruburetama, Ceará, Brasil. *Revista Brasileira de Geomorfologia*. 2, 373-395.
- Lima, S. S., Almeida G. M. (2021) Reflectância espectral e caracterização dos plútons da porção Oeste do Batólito Ipojuca-Atalaia, Província Borborema, Nordeste do Brasil. *Brazilian Applied Science Review*, 5(5), 1971-1989. <https://doi.org/10.34115/basrv5n5-001>
- Lima, S. S., Almeida, J. A. P., Siqueira, J. B. (2017a). Geoprocessamento Aplicado ao estudo de estruturas lineares na Bacia Hidrográfica do Rio Japarutuba, Sergipe, Brasil. *Estudos Geológicos*, 27(1), 159-170. <https://doi.org/10.18190/1980-8208/estudosgeologicos.v27n1p159-170>
- Lima, S. S., Almeida, J. A. P., Siqueira, J. B. (2017b). Sensoriamento Remoto e Geoprocessamento aplicados ao estudo geológico-geomorfológico da Bacia Hidrográfica do Rio Japarutuba, Sergipe - Brasil. *Revista Geonordeste*, 1, 203-214. <https://doi.org/10.33360/RGN.2318-2695.2017.i1.p.203-214>

- Lima, S. S. (2020). Levantamento de drenagem e de feições estruturais através de técnicas de geoprocessamento na microrregião de Boquim, Sergipe. *Brazilian Journal of Development*, 6, 81908-81922. <https://doi.org/10.34117/bjdv6n10-572>
- Lima, S. S., Silva Filho, A. F., Guimarães, I. P., Farias, D. J. S., Almeida, G. M. (2021). Aerogeophysical systematics applied to the geological reconnaissance of the Eastern Pernambuco-Alagoas Domain, Borborema Province: The Ipojuca-Atalaia Batholith. *Journal of South American Earth Sciences*, 112, 103628. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103628>
- Lollo, J. A. (1995). O uso da técnica de avaliação do terreno no processo de elaboração do mapeamento geotécnico: sistematização e aplicação na quadricula de Campinas. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. São Carlos, Brasil. Tese Doutorado em Geotecnia. 267p.
- Martins, E. P. (2018). Análises geométrica e cinemática meso-microscópica das zonas de cisalhamento Palmeira dos Índios e Jacaré dos Homens: significância geodinâmica destas estruturas para a zona de limite entre o Domínio Pernambuco-Alagoas e a Faixa Sergipana. Dissertação de Mestrado – Programa de Pós-graduação em Geociências UFPE. 154 p.
- Martins-Ferreira, M. A. C., Campos, J. E. G. (2017). Compartimentação geomorfológica como suporte para estudos de evolução geotectônica: aplicação na região da Chapada dos Veadeiros, GO. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 18(3), 501-519.
- Mendes, V. A., Brito, M. F. L., Paiva, I. P. (2008). Programa Geologia do Brasil-PGB. Arapiraca. FolhaSC.24-X-D. Estados de Alagoas, Pernambuco e Sergipe. Mapa Geológico .Recife: CPRM, 2009, 1mapa, color, 112,37 cmx 69,42 cm. Escala - 1 :250.000.
- Mendes, V. A., Lima, M. A. B., Morais, D. M. F. (2010) Programa Geologia do Brasil-PGB. Geologia e Recursos Minerais do Estado de Alagoas. Texto explicativo. Recife: CPRM - Serviço Geológico do Brasil. 113p.
- Menges, C. M. (1990). Late Quaternary fault scarps, mountain-front landforms, and Pliocene–Quaternary segmentation on the range-bounding fault zone, Sangre de Cristo Mountains, New Mexico. In: Krinitzsky, E.L., Slemmons, D.B. (Eds.), *Neotectonics in Earthquake Evaluation. Reviews in Engineering Geology*, vol. 8. Geological Society of America, Boulder, Colorado, p. 131–156.
- Migón, P. (2006). *Geomorphological landscapes of the world: granite landscapes of the world*. New York: Oxford University Press Inc., 417p.
- Milligan, P. R.; Gunn, P. J. (1997). Enhancement and presentation of airborne geophysical data. *AGSO Journal of Australian Geology and Geophysics*, 17, 63-75.
- Monteiro, K. A., Corrêa, A. C. B. (2020). Application of morphometric techniques for the delimitation of Borborema Highlands, northeast of Brazil, eastern escarpment from drainage Knick-points. *Journal of South American Earth Sciences*, 103.
- Moura, A. C. M., Freire, G. J., Oliveira, R. Santana, S., Pereira, M., Soares, A. M., Voll, V. L. (2009). Geoprocessamento no apoio a políticas do programa Vila Viva em Belo Horizonte-MG: Intervenções em assentamentos urbanos precários. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 61(2), 177-188.

- Nascimento, P. T. S., Xavier, R. A. (2010). Análise pluviométrica do estado de Alagoas. Anais... 1º SIMAGA - Simpósio Alagoano de Gestão Ambiental, Arapiraca-AL, Brasil, UNEAL, p. 11-19.
- Oliveira, R. G. (2008). Arcabouço geofísico, isostasia e causas do magmatismo cenozóico da Província Borborema e de sua Margem Continental (NE do Brasil). Tese (Doutorado). Natal: Centro de Ciências Exatas e da Terra – UFRN.
- Pinotti, A. M., Carneiro, C. D. R. (2013). Geologia Estrutural na previsão e contenção de queda de blocos em encostas: aplicação no Granito Santos, SP. *Terrae Didactica*, 9(2), 132-168.
- Reeves, R. G., Anson, A., Landen, D. (1983). *Manual of Remote Sensing*. Falls Church: American Society of Photogrammetry, 2440 p.
- Ros, D., Borga, M. (1997). Use of Digital Elevation Model Data for the Derivation of the Geomorphological Instantaneous Unit Hydrograph. *Hydrological Processes*, v. 11, n. 1, p.13-33.
- Rosa, R. (2005) Geotecnologias na geografia aplicada. *Revista do departamento de geografia USP*, 16, 81-90.
- Santos, L. C. M. L., Dantas, E. L., Vidotti, R., Cawood, P., Santos, E., Fuck, R., Lima, H. (2017). Two-stage terrane assembly in Western Gondwana: Insights from structural geology and geophysical data of central Borborema Province, NE Brazil. *Journal of Structural Geology*, 103, 167-184. <https://doi.org/10.1016/j.jsq.2017.09.012>
- Silva Filho, A. F., Guimarães, I. P., Santos, L., Armstrong, R., Van Schmus, W. R. (2016). Geochemistry, U-Pb geochronology, Sm-Nd and O isotopes of ca. 50 Ma long Ediacaran High-K Syn-Collisional Magmatism in the Pernambuco Alagoas Domain, Borborema Province, NE Brasil. *Journal of South American Earth Sciences*, 68, 134-154.
- Silva Filho, A. F., Guimarães, I. P., Silva, J. M. R., Osako, L., Van Schmus, W. R., Cocentino, L., Verde, V. V. (2006). Sm-Nd isotopic mapping and tectonic setting of Proterozoic metamorphic successions, orthogneisses and Neoproterozoic granites from the PEAL massif and its relevance for the crustal evolution of the Borborema Province, In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, Aracajú, Brazil, Abstract, 20 p. 1 CD-ROM.
- Silva Filho, A. F., Guimarães, I. P., Van Schmus, W. R. (2002). Crustal evolution of the Pernambuco–Alagoas complex, Borborema Province, NE Brazil, Nd isotopic data from Neoproterozoic granitoids. *Gondwana Research*, 5, 409–422.
- Silva Filho, A. F., Guimarães, I. P., Van Schmus, W. R., Armstrong, R., Silva, J. M. R., Osako, L., Concentino, L., Lima, D. (2014). SHRIMP U-Pb zircon geochronology and Nd signatures of supracrustal sequences and orthogneisses constrain the Neoproterozoic evolution of the Pernambuco-Alagoas domain, southern part of the Borborema Province, NE Brazil. *Int. J. Earth Sci.*, 21, 2155-2190.
- Soares, P. C., Fiori, A. (1976). Lógica e sistemática análise e interpretação de fotografias aéreas em geologia. *Notícias Geomorfológicas*, Campinas, 16(32), 71-104.
- Souza Filho, C. R., Crosta, A. P. (2003). Geotecnologias aplicadas à Geologia. *Revista Brasileira de Geociências*, 33, 1–4.
- Souza, J. O. P; Corrêa, A. C. B. (2012) Sistema fluvial e planejamento local no semiárido. *Mercator*, Fortaleza, 11(24), 149-168.

- Souza-Junior, M. A. (1998) Sensoriamento Remoto Aplicado no Estudo de Estruturas Geológicas com Ocorrências de Depósitos Minerais, na Porção Centro-norte do Estado da Paraíba. São José dos Campos, 122 p. Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- Tavares, B. A. C., Corrêa, A. C. B., Lira, D. R., Cavalcanti, L. C. S. (2014). Compartimentação geomorfológica e morfotectônica do Gráben do Cariatá, Paraíba, a partir do imageamento remoto. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, 15(4), 523-538.
- Toteu, S. F., Van Schmus, W. R., Penaye, J., Michard, A. (2001). New U-Pb and Sm-Nd data from north-central Cameroon and its bearing on pre-Pan African history of central Africa. *Precambrian Research*, 108, 45-73.
- Trompette, R. (1994). *Geology of Western Gondwana, Pan-african-brasiliano: Aggregation of South America and Africa*. A.A. Balkema, Rotterdam, 350 p.
- Twidale, C. R., Campbelle, M. (1992). On the Origin of pedestal rocks. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 36, 1-13.
- Twidale, C. R., Romani, J. R. V. (2005). *Landforms and Geology of Granite Terrains*. Boca Ratón, USA: CRC Press. 362 p.
- Van Schmus, W. R., Kozuch, M., Brito Neves, B. B. (2011). Precambrian history of the Zona Transversal of the Borborema Province, NE Brazil; Insights from Sm-Nd and U-Pb geochronology. *Journal of South American Earth Sciences*, 31, 227-252.
- Van Schmus, W. R., Brito Neves, B. B., Hackspacher, P. C., Babinski, M. (1995). U/Pb and Sm/Nd geochronologic studies of the eastern Borborema Province, Northeast Brazil: initial conclusions. *Journal of South American Earth Sciences*, 8, 267-288.
- Van Schmus, W. R., Oliveira, E. P., Silva Filho, A. F., Toteu, F., Penaye, J., Guimarães, I. P. (2008). Proterozoic links between the Borborema province, NE Brazil, and the central African fold belt. *Geological Society of London*, 294, 66-69.

Artigo recebido em / Received on: 31/07/2021

Artigo aceite para publicação em / Accepted for publication on: 30/12/2021