Revista de Geografia (Recife) V. 41, Nº. 4, 2024 (Especial)

https://doi.org/10.51359/2238-6211.2024.264834

Licença Creative Commons Atribuição 4.0 Internacional. CC BY - permite que outros distribuam, remixem, adaptem e criem a partir do seu trabalho, mesmo para fins comerciais, desde que lhe atribuam o devido crédito pela criação original.

PKS PUBLIC KNOWLEDGE PROJECT

REVISTA DE GEOGRAFIA
Programa de Pós-Graduação em Geografia da UFPE

OJS OPEN JOURNAL SYSTEMS

https://periodicos.ufpe.br/revistas/revistageografia

Aplicação de métodos morfométricos na análise do recuo da escarpa na bacia hidrográfica do rio Una, Pernambuco

Osvaldo Girão[1] - Orcid: https://orcid.org/0000-0002-5797-4450
Jonas Herisson Santos de Melo[2]- Orcid: https://orcid.org/0000-0003-3508-6433
Bruno de Azevedo Cavalcanti Tavares[3]– Orcid: https://orcid.org/0000-0003-1823-3016
Wemerson Flávio da Silva[4]– Orcid: https://orcid.org/0000-0002-7439-9443

[1]Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil*
[2] Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil **
[3] Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil ***
[4] Universidade Federal de Pernambuco, Recife, PE, Brasil ****

Artigo recebido em 31/10/2024 e aceito em 08/11/2024

RESUMO

A bacia hidrográfica do rio Una possui características morfoestruturais e morfoclimáticas de grande importância para compreensão da paisagem. A presente análise buscou realizar a aplicação de índices morfométricos, sobretudo, para o setor da escarpa oriental do planalto da Borborema que segmenta a bacia hidrográfica, destacando o setor norte da escarpa. O setor em questão é influenciado, estruturalmente, pela presença de uma zona de cisalhamento em sentido NE-SW, gerando um nível de base local, e intensificando processos erosivos somados ao contexto climático da área onde a bacia está inserida, de maneira que tal configuração ocasiona uma feição alveolar. Nesta feição é possível observar, de acordo com os parâmetros morfométricos aplicados, um padrão de valores mais baixos onde é possível observar com os índices de rugosidade, relevo local e densidade de lineamentos. Ademais, é possível verificar um possível controle estrutural sobre o canal principal, levando em consideração o índice de sinuosidade. O presente trabalho destaca que não apenas fatores lito-estruturais tem sua importância para a formação da feição alveolar, mas sim fatores climáticos que se destacam nas feições e processos observados.

Palavras-chave: morfoestrutura; geomorfologia estrutural; planalto da Borborema.

* Docente do Programa de Pós-Graduação em Geografia, UFPE, E-mail: osvaldo.girao@ufpe.br
** Doutorando pela Universidade Federal de Pernambuco (PPGEO - UFPE). Email: jonas.melo@ufpe.br
*** Professor do Departamento de Arqueologia da UFPE. Email: bruno.tavares@ufpe.br
**** Professor Adjunto do Departamento de Ciências Geográficas da UFPE Email: wemerson.silva@ufpe.br

Application of morphometric methods in the analysis of escarpment retreat in the Una river watershed, Pernambuco

ABSTRACT
The Una River watershed has morphostructural and morphoclimatic characteristics of great importance for understanding the landscape. This analysis aimed to apply morphometric indices, particularly to the eastern escarpment sector of the Borborema Highlands, which crosses the watershed, highlighting the northern escarpment sector. This sector is structurally influenced by the presence of a NE-SW oriented shear zone, generating a local base level that intensifies erosive processes combined with the climatic context of the area where the basin is located. Such configuration results in an slope hollow feature, where lower sinuosity values were observed according to the applied morphometric parameters, as seen with roughness indices, local relief, and lineament density. Additionally, considering the sinuosity index, it is possible to observe a potential structural control over the main channel. Therefore, this study highlights that litho-structural factors are significant for forming the hollow feature, and climatic factors play a prominent role in the observed context.

Keywords: morphostructure; structural geomorphology; Borborema plateau.

Aplicación de métodos morfométricos en el análisis del retroceso de la escarpa en la cuenca hidrográfica del río Una, Pernambuco

RESUMEN
La cuenca hidrográfica del río Una posee características morfoestructurales y morfoclimáticas de gran importancia para la comprensión del paisaje. El presente análisis buscó aplicar índices morfométricos, especialmente en el sector de la escarpa oriental del planalto de Borborema que atraviesa la cuenca, destacando el sector norte de la escarpa. Este sector está estructuralmente influenciado por la presencia de una zona de cizalla con orientación SW-NE, creando un nivel de base local que intensifica los procesos erosivos, sumado al contexto climático del área donde se encuentra la cuenca. Esta configuración genera una característica alveolar, donde, de acuerdo con los parámetros morfométricos aplicados, es posible observar un patrón de valores más bajos, como se evidencia en los índices de rugosidad, relieve local y densidad de lineamientos. Además, se puede verificar un posible control estructural sobre el canal principal, considerando el índice de sinuosidad. De esta forma, el presente trabajo destaca que no solo los factores lito-estructurales tienen importancia en la formación de la característica alveolar, sino que también los factores climáticos sobresalen en el contexto observado.

Palabras Clave: morfoestructura; geomorfología estructural; meseta de Borborema.

INTRODUÇÃO

As formas do relevo são reflexo do comportamento dinâmico, nas quais os elementos processuais e suas formas resultantes estão interligados de maneira sistêmica, de maneira que, um conhecimento detalhado sobre estas interações (processos x formas) deve-se considerar nas relações com as forças interatuantes, como as do clima e das dinâmicas geológicas, por exemplo. Conforme atestam Guerra e Cunha (1994), os conjuntos de formas submetidos ao mesmo tipo de clima constituem sistemas morfoclimáticos, o mesmo ocorrendo com os sistemas morfoestruturais em relação à Geologia.

Assim, os sistemas morfoestruturais, podem ser compreendidos como uma paisagem em elevado grau de evolução das formas, onde existe a combinação do elemento estável (estrutura geológica pré-existente) com o elemento dinâmico (agentes exógenos) que modelam a superfície, assim como postularam Gerasimov e Mecherikov (1968) acerca do termo morfoestrutura.

Levando em consideração os conceitos apresentados, é importante destacar que a Bacia Hidrográfica do Rio Uma (BHRU) apresenta em seu contexto geomorfológico e de rede de drenagem, evidências significativas de condicionamento estrutural. Seu posicionamento no contexto do Planalto da Borborema, a BHRU está inserida no Terreno Pernambuco-Alagoas, limitado por zonas de cisalhamento de sentindo E-W e NE-SW. Estando inserida no setor da borda leste do Planalto da Borborema, seu contexto geotectônico compreende reativações de estruturas pré-existente, que geram influência sobre as formas de relevo, sendo de suma importância compreender a evolução da paisagem geomorfológica na conjuntura pós-rifte (Bezerra *et al.*, 2014; Silva *et al.*, 2022).

Assim, é possível conceber que as atuais formas observadas na paisagem foram condicionadas por estruturas geológicas pretéritas, bem como decorrentes das mudanças climáticas ocorridas durante o tempo geológico. No caso do setor da borda leste do Planalto da Borborema, a organização das formas de relevo começou a se estabelecer após a abertura final do oceano Atlântico no Cretáceo Inferior. Deve-se destacar que o recuo da escarpa ocorre a partir de processos denudacionais pela ação dos canais fluviais das principais bacias hidrográficas desse setor (Corrêa *et al.*, 2010; Girão *et al.*, 2013; Monteiro e Corrêa, 2020; Silva *et al.*, 2022).

Levando em consideração o contexto morfoestrutural, morfotectônico e morfoclimático da BHRU, buscou-se compreender os processos localizados do setor da escarpa oriental que segmenta a BHRU, levando em consideração a configuração lito-estrutural e os aspectos climáticos no setor norte da escarpa, onde há presença de rochas ígneas e metamórficas e o desenvolvimento de zonas de cisalhamento, estruturando uma feição alveolar. A compreensão dos processos e das características inerentes a área se deram através da utilização de um conjunto de parâmetros morfométricos, visando a quantificação dos processos que atuam sobre os diferentes elementos analisados.

METODOLOGIA

Base de dados

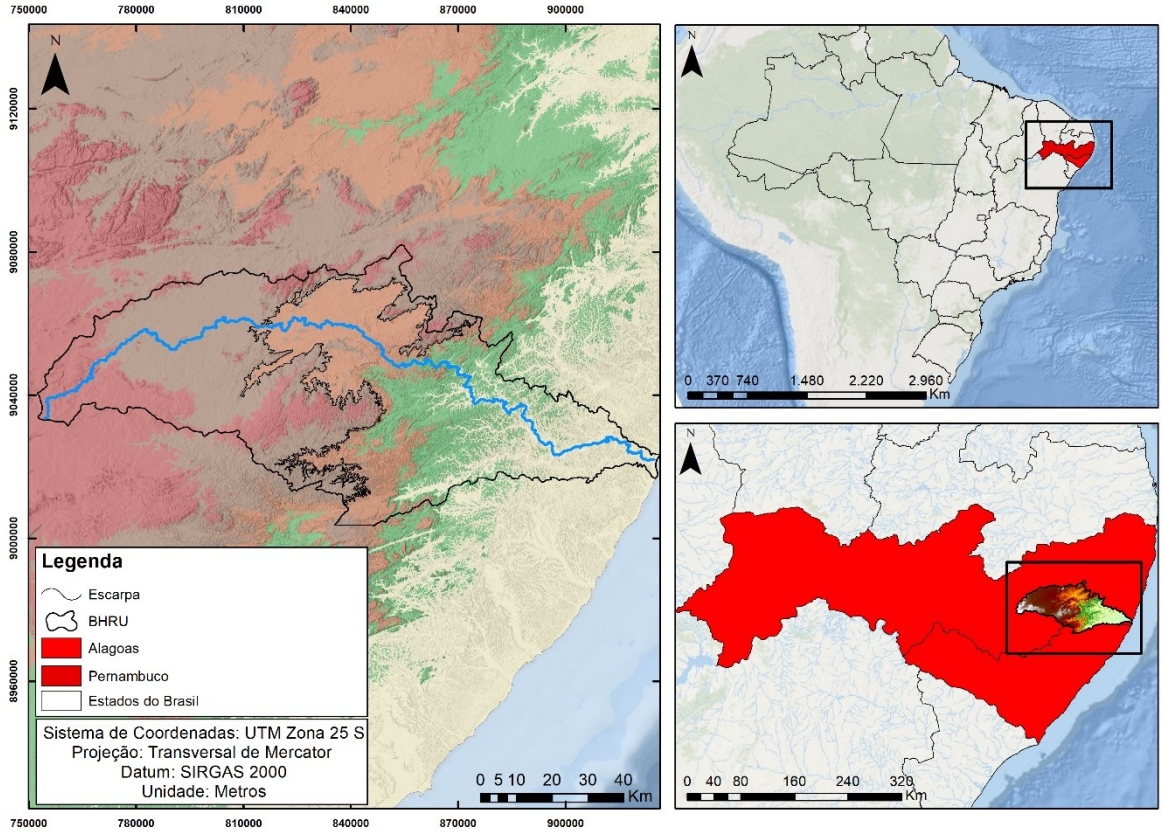
O modelo digital de elevação utilizado como base foi adquirido a partir do Copernicus DEM, baseado em dados de satélite de radar adquiridos durante a Missão TanDEM-X obtidos através da base de dados *OpenTopography*, que fornece acesso ao DSM global de 30 metros (GLO-30). O tratamento dos dados se deu a partir da retirada de dados espúrios, para a realização dos procedimentos de geração, que ocorreram através do pacote de ferramentas *Topotoolbox* desenvolvido por Schwanghart e Scherler (2014), para a posterior construção do material cartográfico em ambiente de Sistema de Informação Geográfica (SIG).

Caracterização Geoambiental

A BHRU possui uma extensão total de 6.740,31 km², e se estende sobre os estados de Pernambuco e Alagoas. Seu curso principal possui 209 quilômetros de extensão, com a BHRU abrangendo 42 municípios, estando sua nascente localizada no município de Capoeiras-PE, na Serra da Boa Vista, com cotas altimétricas que atingem aproximadamente 900 metros nas suas cabeceiras, e tendo a sua foz localizada no município de Barreiros-PE, Zona da Mata Sul do estado (Figura 1).

A BHRU está inserida em quatro macrocompartimentos geomorfológicos: a Planície fluvial a leste, que contempla parte de seu baixo curso, o Planalto Sedimentar Litorâneo, o Piemonte da Borborema, que abarca o médio curso e à oeste do piemonte, o Planalto da Borborema propriamente, que está entre o compartimento do médio curso e e todo o compartimento do alto curso (Silva e Girão, 2016).

Figura 1 – Mapa de localização



Fonte: Os autores (2024).

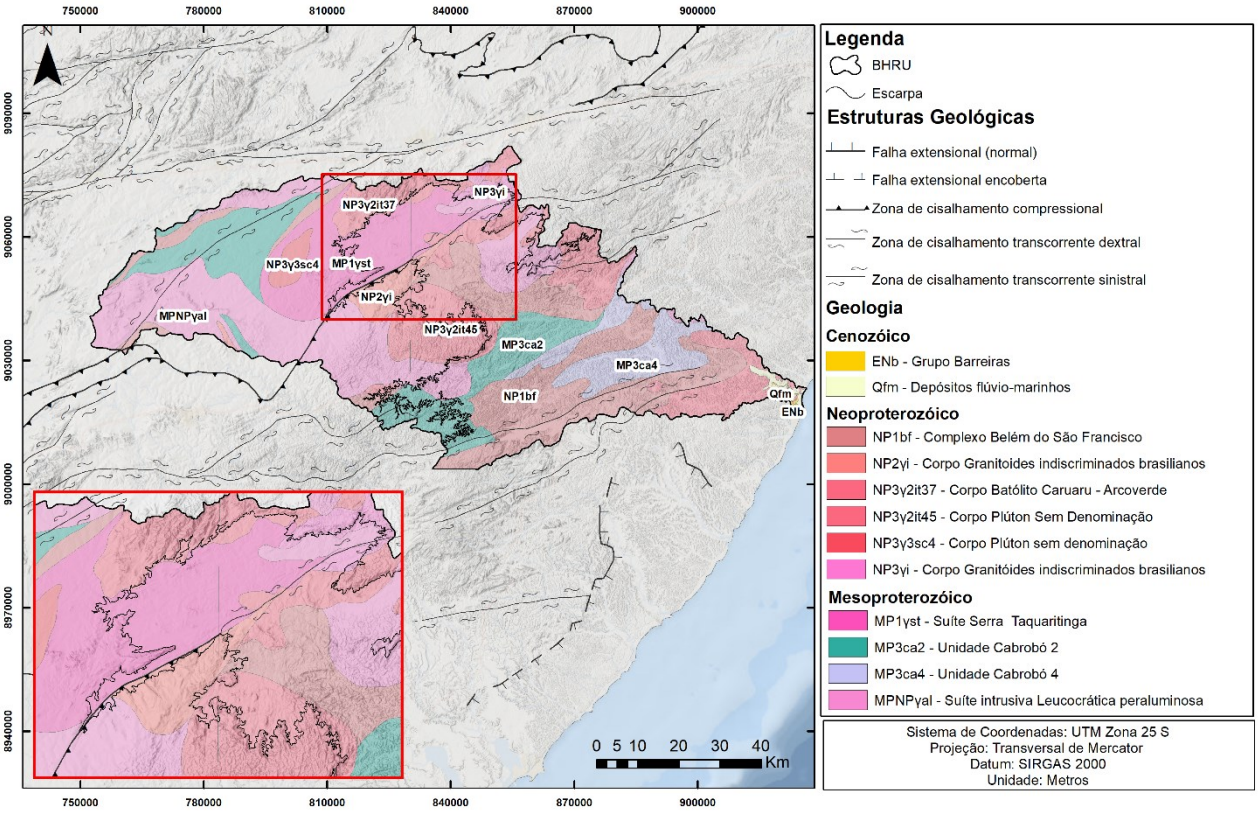
Geologicamente a BHRU se desenvolve sobre unidades datadas do Mesoproterozóico, Neoproterozóico e Cenozóico, onde desenvolvem-se majoritariamente unidades provenientes do Neoproterozóico e Mesoproterozóico, com a presença de corpos plutônicos e granitoides brasilianos (CPRM, 2004).

Em seu contexto estrutural, a BHRU está localizada ao sul do Lineamento Pernambuco, reconhecido como também Sistema de Zona de Cisalhamento Pernambuco (ZCPE) (Neves *et al.*, 2021), estando vinculado a compartimentação morfoestrutural do domínio sul da Província Borborema, ou Domínio Meridional, assim como seu arranjo tectônico (Brito Neves *et al.*, 2001a, 2001b, 2001c; Almeida *et al.*, 2000). Desta maneira, este Sistema de Zona de Cisalhamento exerce importante controle sobre a estrutura física do relevo, possivelmente atrelado a pulsos tectônicos, que são marcados na configuração da rede de drenagem (Silva e Girão, 2016; Monteiro e Corrêa, 2020).

Dentro do Domínio Meridional ocorre a subdivisão dos compartimentos geológicos denominados de subprovíncias. Dessa forma, a BHRU está inserida dentro do Terreno/Maciço Pernambuco-Alagoas composto por granito-migmatito e plútons do Brasiliano, amplos batólitos e gnaisses-migmatito relictuais

do Arqueano atrelados ao ciclo Transamazônico (Brito Neves et al. 2000; Almeida et al. 2003). Devido a significativa complexidade litoestrutural e evolução policíclica e história geotectônica intensa, com presença de amalgamentos de faixas acrescionárias, possivelmente vinculada a uma microplaca pretérita, caracterizam o contexto geológico deste setor, podendo ser identificado como "Superterreno" Pernambuco-Alagoas, como sugerido por Brito Neves e Silva Filho (2019) (Figura 2).

Figura 2 – Mapa Geológico



Elaboração: Os autores, fonte: CPRM (2004).

Seu contexto climático apresenta dinâmicas que abarcam a atuação da massa Tropical Atlântica (Ta) e sistemas de perturbações atmosféricas secundárias que dinamizam as condições de tempo dominante, levando a instabilidades nos índices pluviométricos do litoral oriental do Nordeste, sendo estes os eventuais deslocamentos para o sul da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT), a atuação da borda de Vórtices Ciclônicos de Altos Níveis (VCAN), Frentes Frias (FF), Distúrbios Ondulatórios de Leste (DOL) e Linhas de Instabilidades (LI) e, excepcionalmente, a atuação da Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) (Cavalcanti, *et al.,* 2009; Silva e Girão, 2016).

Índice de Concentração de Rugosidade (ICR)

O Índice de Concentração de Rugosidade (ICR) permite o mapeamento e quantificação de dissecção do relevo. O ICR é obtido a partir da transformação do modelo digital de elevação (MDE) em valores de declividade calculados em porcentagem, que é posteriormente convertido para o formato de pontos, armazenando os valores de declividade.

A partir dos pontos, é possível realizar a aplicação do estimador de densidade Kernel, fornecendo dois parâmetros: área de análise (raio de Kernel) e o campo de atributos. Para a obtenção do ICR se emprega como atributo os valores de declividade, o que resulta em um novo arquivo matricial no qual cada pixel apresenta a soma dos valores de declividades de todos os pixels com distância inferior ao raio definido.

O ICR corresponde, portanto, à somatória dos valores de declividade dos pontos existentes dentro de uma determinada área (rugosidade de relevo) sendo condicionado pela quantidade de pontos computados, o que varia em função da resolução espacial do MDE. Os valores obtidos por meio da aplicação do ICR variam do próximo a zero para áreas com relevo muito acidentado, como consequência das variações possíveis para os valores de declividade expressos em porcentagem. Como a resolução espacial do MDE afeta os valores de ICR obtidos em função da quantidade de pontos somados por unidade de área, estes devem ser normalizados, obtendo-se faixas de valores de ICR.

A normalização pode ser feita em ambiente SIG por operação de álgebra de mapas, dividindo-se a matriz resultante da aplicação do kernel pelo número de pixels computados, seguindo-se a lógica da divisão da área de abrangência do kernel pela área do pixel. O ICR pode ser implementado para descrever e diferenciar padrões locais ou globais de relevo (ICR Local e Global).

ICR Global

Na análise global, adota-se como referência a área de 4 km² para aquisição dos valores de ICR, sendo os valores obtidos distribuídos em seis classes com intervalos fixos para cada classe.

Para o ICR Global, a escolha da área de abrangência para aplicação do estimador de densidade por Kernel (área de influência) considerou inicialmente a proposta de Horton (1945), que sugeriu 1 km² como unidade de área ideal para análise da dissecação do relevo, o que em se tratando de circunferência implica no emprego de 564 metros de raio para aplicação do Kernel. Para Horton (1945), esta dimensão seria adequada ao estabelecimento de padrões morfológicos e morfométricos para diferentes tipos de bacias hidrográficas.

Para calibrar o raio de busca a ser empregado pelo estimador de densidade por Kernel na geração do ICR foram testados diferentes valores, partindo-se do raio de 564 metros, conforme proposta de Horton

(1945), chagando a 1128 metros, como valor que apresentou a melhor resposta a análise da influência do relevo (Sampaio, 2008).

Os limites das classes propostas para o ICR divergem, em parte, dos valores usualmente empregados pela geomorfologia para delimitar as classes de declividade, pois são resultantes da análise direta em campo nas áreas já pesquisadas e nas unidades amostradas para fins no estudo de Sampaio e Augustin (2014). Assim, as classes consideram os seguintes intervalos para as seis unidades de relevo:

- Plano – Valores de ICR abaixo de 2,5,
- Suavemente ondulado – Valores de ICR de 2,5 a 6,
- Ondulado – Valores ICR de 6 a14,
- Fortemente ondulado – Valores ICR de 14 a 30,
- Escarpado – Valores ICR de 30 a 45 e,
- Fortemente escarpado – Valores ICR acima de 45.

ICR Local

O ICR local, por sua vez, permite a compartimentação da área em um número variável de classes com diferentes intervalos de valores e área de análise livre (raio de Kernel). Para tanto, sugere-se o emprego de 564 quilômetros de raio (1 km²) como valor de partida para as análises exploratórias, o uso de *quantis* na definição dos limites dos intervalos de classes e o agrupamento inicial dos dados em cinco classes (Sampaio e Augustin, 2014).

Levando em consideração de diferenciar as nomenclaturas empregadas para denominar as unidades de relevo observadas pelo ICR Local, sugere o emprego de termos diferenciados como, por exemplo, Índice de Concentração de Rugosidade: Muito Baixo, Baixo, Médio, Alto e Muito Alto.

O ICR local permite compartimentar qualquer área em unidades com distintos padrões morfométricos de dissecação e recorrência da declividade e, em diferentes números de classes, independentemente da existência das unidades de relevo observadas na análise global ou em mapeamentos prévios (Sampaio e Augustin, 2014).

Relevo Local

A métrica do relevo local é uma medida importante para analisar as variações de elevação em uma determinada região. Ela permite calcular as diferenças entre as elevações máxima e mínima em um raio específico, fornecendo informações valiosas sobre a topografia local. Neste contexto, foi adotado o raio padrão de 2.500 metros como estabelecido por Schwanghart e Scherler (2014). Essa escolha de raio é

comumente utilizada na metodologia para garantir uma análise abrangente, possibilitando a captura das características do relevo em uma escala relevante. Para realizar os cálculos do relevo local, utilizou-se a função "*localtopography*" disponível no pacote de ferramentas Topotoolbox, desenvolvido especificamente para o *software* MATLAB. A aplicação da métrica do relevo local e o uso do *software* MATLAB em conjunto com o pacote Topotoolbox, aportaram rigor e a robustez metodológica à análise das características topográficas da bacia estudada.

Índice de Sinuosidade de canal

No Índice de Sinuosidade é identificado através da relação por projeção ortogonal com a distância vetorial pontos extremos. O índice de sinuosidade é representado pela seguinte equação:

$$Is = \frac{L}{dv}$$

Onde, L é o valor do comprimento do canal principal e dv é a distância vetorial entre os pontos extremos do canal principal. "Os valores próximos a 1,0 indicam que o canal tende a ser retilíneo. Já os valores superiores a 2,0 sugerem canais tortuosos e os valores intermediários indicam formas transicionais, regulares e irregulares" (Schumm, 1963; Lana, 2001).

Índice de sinuosidade de frente de escarpa

A identificação da linha de escarpa de um patamar principal, foi implementada por meio do Índice de Sinuosidade de Frente de Escarpa (Sinuosity Mountain Front – Smf). Para Bull & McFadden (1977) a aplicação deste índice tem como objetivo identificar a existência de feições lineares, e associá-las tanto aos processos estruturais, quanto a processos tectônicos. De maneira que, o índice é aplicado buscando evidenciar a atuação desses processos ao longo de uma escarpa.

O Índice Smf é aplicado a partir da seguinte fórmula:

$$Smf = \frac{Lmf}{Ls}$$

Onde, Smf é o índice de Sinuosidade de Frente de Escarpa; Lmf é a linha da escarpa e Ls é o comprimento em linha reta da projeção da frente da escarpa.

Logo, o resultado da aplicação do Smf, é compreendido de acordo com as seguintes classes: Valores próximos a 1, evidenciam influência de atividade tectônica; valores próximos a 2, indicam estado

intermediário e valores superiores a 3, exprimem uma maior atuação dos processos erosivos na estruturação do relevo, evidenciando os processos erosivos.

De maneira que a setorização da escarpa, permite a identificação dos diferentes processos que atuam sobre a escarpa, identificando a distribuição ou concentração de classes identificadas a partir da aplicação do Smf, realizando associações com as características inerentes ao objeto de estudo.

Extração de lineamentos de relevo

Os lineamentos de relevo são compreendidos como feições espaciais, tais como cristas, bordas de áreas elevadas, alinhamentos de contatos geológicos, vales e fraturas ou zonas de falhas visíveis (Corrêa e Fonsêca, 2010).

O conceito de lineamentos comumente utilizado, é o proposto por Etchebehere, Saad e Fulfaro (2007), onde os lineamentos são definidos como "feições lineares topográficas ou tonais observáveis nas imagens fotográficas, podendo representar descontinuidades estruturais". Esses traços foram anotados de forma que pudessem ser evitadas interferências de extensões ou continuidades no terreno, limitando-se, mais fielmente possível, ao aspecto factual observado nas imagens de sensores remotos, sendo reconhecido por diversos autores (Liu, 1984; Riccomini e Crósta, 1988; Taylor, 1988; Corrêa e Fonsêca, 2010).

A extração dos lineamentos de relevo, se deu através da metodologia proposta por Chiessi (2004) onde, os lineamentos são mapeados a partir de modelos de relevo sombreado (*Hillshade*) elaborados através de Modelos Digital de Elevação (MDE's). Para tal, foram utilizados os azimutes de iluminação 45° e 90° para realçar os fotolineamentos de feições negativas, e azimutes 315° e 360° para realce de feições positivas, como utilizado em Gonçalves, Fonseca e Corrêa (2017).

De maneira a validar a extração de lineamentos, como subproduto do sombreamento do MDE, foram confeccionados diagramas de roseta, os quais agrupam os lineamentos de acordo com suas direções, desta forma, destacou-se os direcionamentos preferenciais (*trends*) do relevo. Os diagramas foram confeccionados separadamente para cada azimute por meio da extensão *Line Direction Histogram* para Qgis.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dentro dos parâmetros utilizados para a análise do setor escarpado da BHRU foi possível observar que os parâmetros apresentam respostas que destacam o setor norte da escarpa. Neste setor, a presença de feições com características de relevo ondulado e de concentração de rugosidade que se configuram como mediana é baixo, como pode ser visto nas figuras 3 e 4. Esta condição reflete a geometria de um alvéolo que marca o contato das cabeceiras (setores de cristas associadas a maciços estruturais) e a superfície subsequente, atrelada aos compartimentos da Cimeira Estrutural Pernambuco-Alagoas (Corrêa *et al.*, 2010).

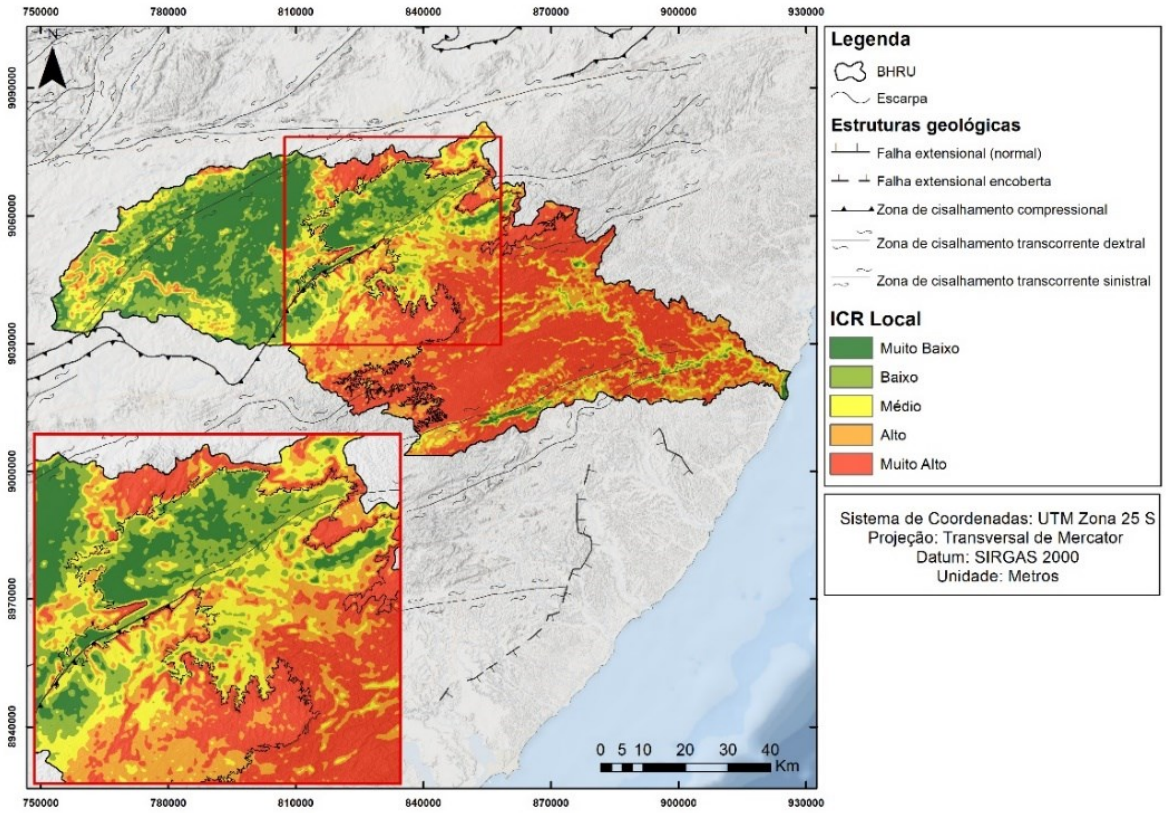
Os resultados dos índices de concentração de rugosidade local e global para a BHRU apresentaram similaridades com relação as classes apresentadas, em que no seu alto curso para o ICR local, a BHRU apresenta valores que variam entre rugosidade muita baixa e média, para o ICR global em seu alto curso, as classes variam entre ondulado e fortemente ondulado. Dentro do contexto de paisagem, as cabeceiras rugosas são controladas pela ZCPE e falhas de transferência associadas sobre o setor do alto curso da BHRU.

Posteriormente, observa-se um setor com menor rugosidade ao sul da Zona Transversal atrelado a Cimeira Estrutural PE-AL. Contudo, após o trecho de recuo da escarpa posteriormente à Zona de Cisalhamento Dextral, é perceptível um significativo alvéolo com baixa rugosidade, também condicionado a cimeira acima destacada. Neste setor, a descida no nível de base pode ter contribuição considerável na característica da rugosidade, sobretudo por apresentar menor dissecação das formas superficiais da paisagem. Portanto, o condicionamento desta área apresenta forte influência estrutural de um bloco mais rebaixado associado aos processos rúpteis que configuram a mecânica crustal ao sul da ZCPE já descrita por Monteiro e Corrêa (2020) e também observada por Silva (2022) na bacia hidrográfica do rio Sirinhaém.

Sobre o médio e baixo curso é perceptível maior rugosidade em função da provável retomada erosiva controlada pelas zonas de cisalhamento e dissecadas pela ação climática dos ventos oriundos do atlântico.

Em direção ao seu baixo curso, para o ICR local tem valores que variam entre médio e muito alto, onde os valores médios se concentram sobre os vales fluviais, o ICR Global apresenta classes que são de fortemente escarpado a ondulado.

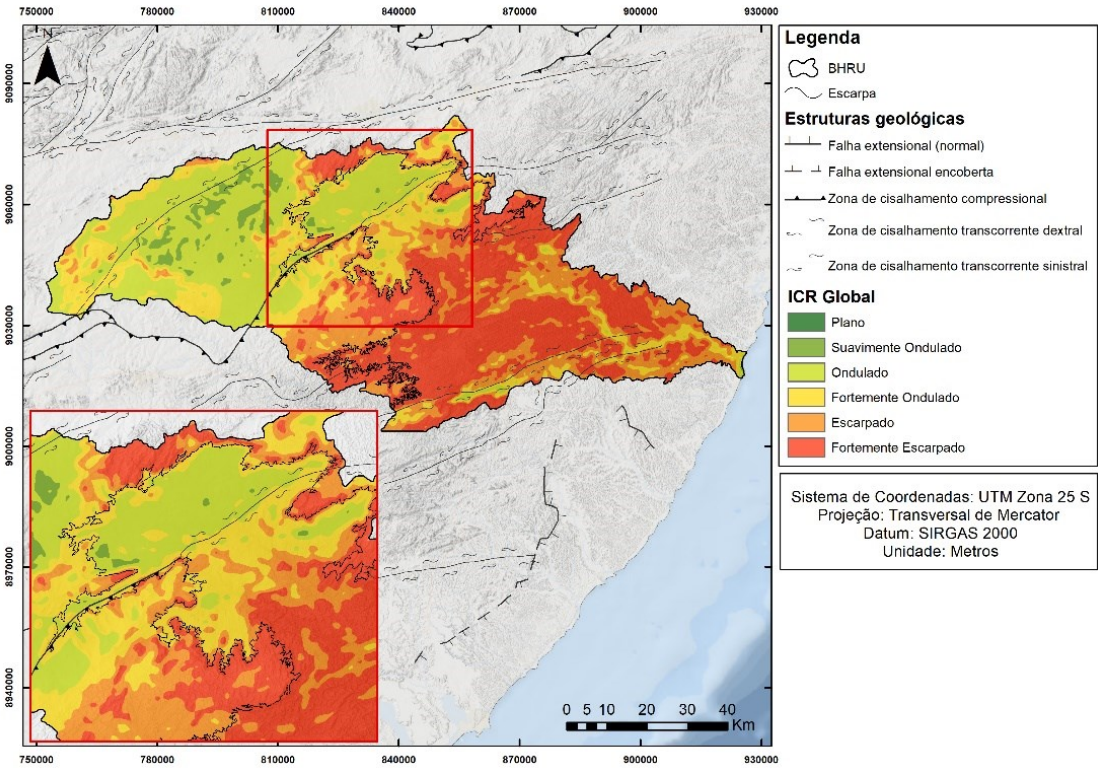
Figura 3 – Índice de Concentração de Rugosidade Local



Fonte: Os autores (2024).

Dentro do observado é possível destacar uma clara divisão em termos de desenvolvimento do relevo, entre os setores de alto e baixo curso, que pode ser indicado pela escarpa. Temos uma condição litológica para o setor das cabeceiras e o alvéolo que indica a presença de corpos plutônicos indiscriminados do Neo e Mesoproterozóico, no entanto, a litologia apresenta uma uniformidade, com litotipos de reologia semelhante, mas a condição estrutural desse setor, indica que o posicionamento dos setores elevados, e do alvéolo no alto curso apresenta uma geometria condicionada pela estrutura das zonas de cisalhamento e falhas de empurrão. Este provável condicionamento estrutural se mostra na paisagem a partir de patamares distintos desconectados entre as cabeceiras, o alvéolo e o setor dissecado à jusante. Essa condição foi indicada por Correia Filho et al., (2019) ao demonstrar condicionamentos tectônicos estruturais para a bacia do Una e sua geometria fortemente associada a reativações das zonas de fraqueza presentes na área.

Figura 4 - Índice de Concentração de Rugosidade Global



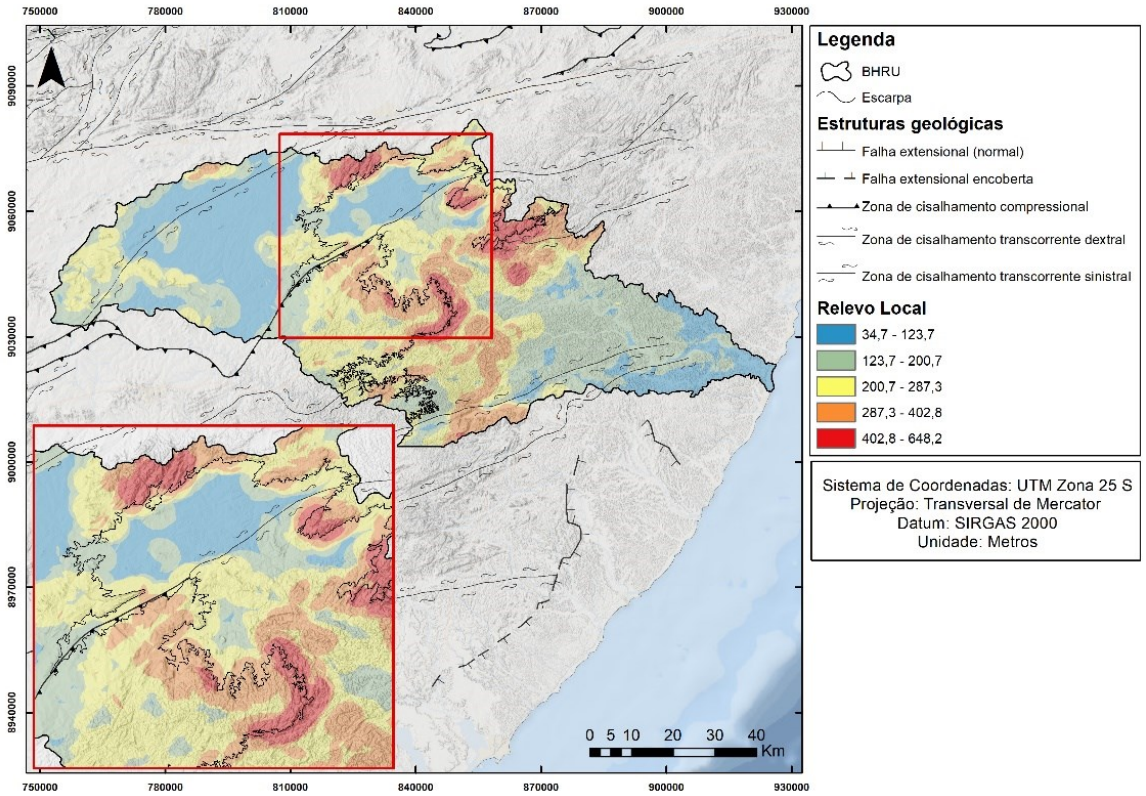
Fonte: Os autores (2024).

Tal setor encontra-se entre o setor de escarpa e uma zona de cisalhamento transcorrente sinistral de sentindo NE-SW, a zona de cisalhamento em questão pode funcionar como um nível de base local, que leva a intensificação dos processos erosivos e a processos de erosão regressiva, ocasionando a configuração observada neste ponto.

Outro fator que pode ser destacado são os valores de relevo local, que dentro do setor destacado possui valores baixos de relevo local, diferente de suas áreas circundantes, indicando que dentro deste setor, não há diferenças expressivas em sua topografia. Os valores de relevo local distribuídos para toda a BHRU, é possível realçar as diferenças topográficas destacadas por meio dos valores de relevo local, o alto curso da bacia hidrográfica possuí valores baixos, indicando topografia mais rebaixadas, já em seu médio curso onde a escarpa se desenvolve topografias mais elevadas, com exceção do setor rebaixado destacado anteriormente.

Os valores em seu baixo curso, voltam a ser baixos, devido a topografia do baixo curso da BHRU, levando em consideração que comumente, estes setores muitas vezes são compreendidos com áreas deposicionais, onde o sistema possui baixo potencial energético, tal padrão também pode ser observado no setor do flanco direito da BHRU, destacada na figura 5.

Figura 5 – Relevo local.

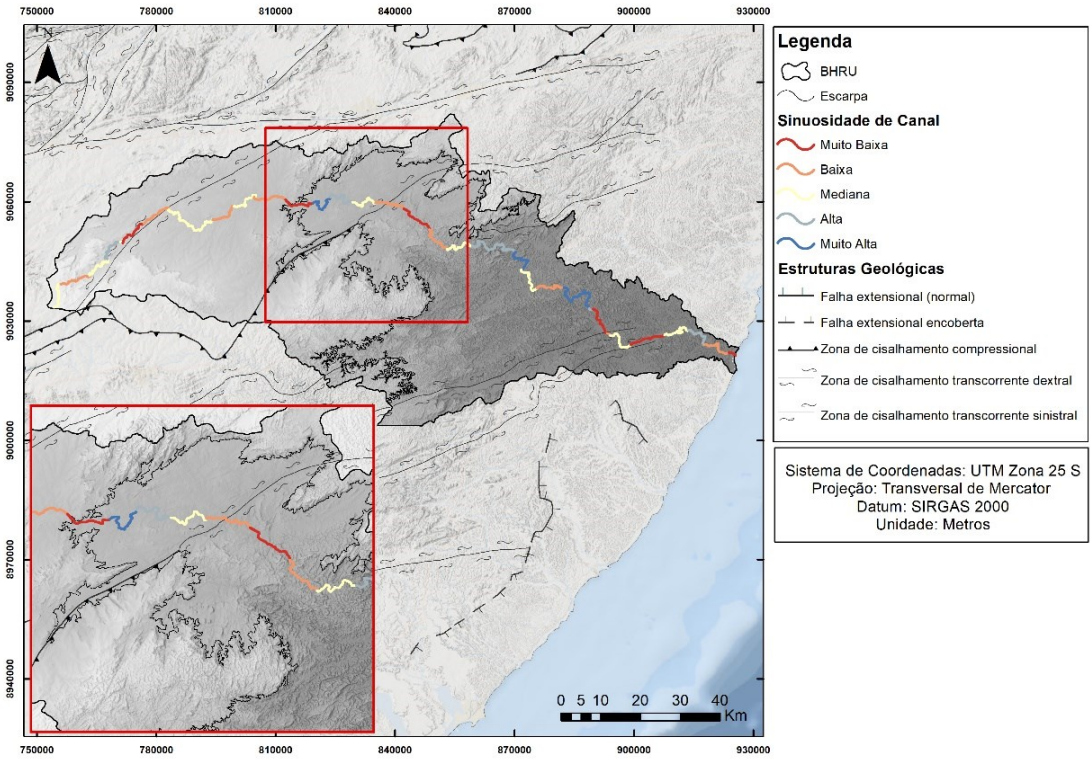


Fonte: Os autores (2024).

Em sua sinuosidade os canais principais da BHRU, possui classes que vão de sinuosidade muito baixa a muito alta, contudo, sua distribuição se concentra nas classes muito alta, alta e mediana, indicando possíveis controles estruturais, ressaltados pela presença de estruturas como Zonas de Cisalhamento dextrais, sinistrais e compressionais, que atuam diretamente sobre o canal fluvial. Estas condições sugerem possíveis rejuvenescimentos dos mecanismos estruturais que atuam na geometria desses canais, condição esta observada por Giaconia et al., (2012) no Sudeste da Espanha e por Oliveira et al., (2023) no contexto das drenagens associadas em setores do Nordeste Setentrional. Em trechos específicos em seu médio e baixo curso é possível observar sinuosidades mais elevadas. É possível destacar em seu baixo curso setores de sinuosidade muito baixa, onde há desenvolvimento de zonas de cisalhamento, indicando possíveis controles estruturais. Este cenário se assemelha as drenagens da bacia do rio Sirinhaém, que nos postulados por Silva et al (2024) foram encontrados forte controles tectono-estruturais no baixo curso da bacia, com sinuosidades elevadas nos canais e forte assimetria da bacia, podendo também sugerir basculamentos nos flancos da bacia hidrográfica em função de movimentos flexurais (Figura 6).

Assim, proximidade do canal com a zona de cisalhamento apresenta uma redução nos valores de sinuosidade de canal, indicando um possível controle estrutural sobre o canal, deixando-o retilíneo nos trechos próximos a ZC, já os setores a montante da ZC apresentam uma maior sinuosidade indicando também um baixo potencial enérgico quando comparado aos setores do canal a jusante da ZC.

Figura 6 – Índice de sinuosidade de canal.



Fonte: Os autores (2024).

Levando em consideração as características supracitadas, as condições do relevo também são atreladas as condições observadas no canal fluvial, onde o relevo com declividade mais suaves, vão possuir canais que tendem a sinuosidade mais elevada.

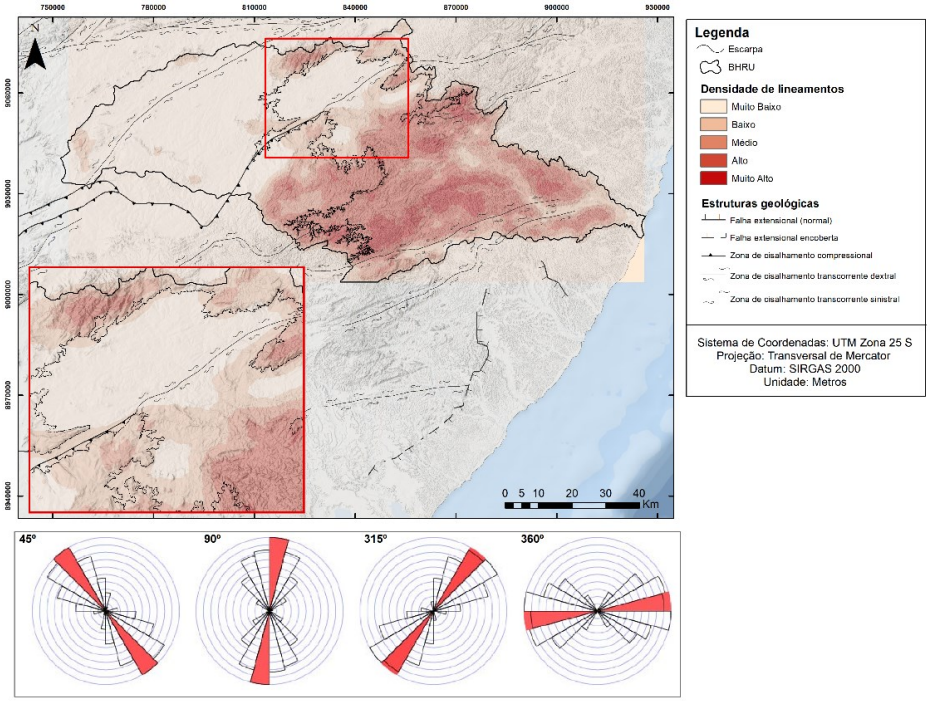
Os lineamentos de relevo presentes na BHRU, tem um maior adensamento nos setores de médio e baixo curso, salvo o setor destacado anteriormente em seu médio curso. Já em seu alto curso não há presença significativa de lineamentos de relevo. Com relação aos *trends* é possível observar que os trends dos azimutes 90º (feições negativas) e 315º (feições positivas) seguem a tendência das zonas de cisalhamento que cortam a BHRU com direção E-NE/S-SW e NE/SW.

Já os azimutes de 45º (lineamentos negativos), não estão seguindo a tendência de nenhuma estrutura de maior ordem e 360º (lineamentos positivos) apresentam tendências discordantes com relação as zonas

de cisalhamento que cortam a BHRU, contudo o azimute 360º segue a tendência E-W, a mesma tendência do Lineamento Pernambuco.

Outro elemento de destaque nesse setor é a ausência de elementos estruturais como lineamentos de relevo, como pode ser observado na figura 7 e 8, onde a partir da densidade de lineamentos de relevo, foi possível observar a densidade muito baixa de lineamentos, de maneira geral a BHRU apresenta maiores concentrações de lineamentos em seu médio e baixo curso, porém em seu médio curso a concentração tem maior representatividade em seu flanco esquerdo, flanco este, que possui em sua escarpa, maior sinuosidade.

Figura 7 – Densidade de lineamentos de relevo.



Fonte: Os autores (2024).

As diferenças na sinuosidade dos setores da escarpa são destacadas por meio dos valores de sinuosidade de frente de escarpa, onde se torna mais clara a diferença entre os valores dos flancos da bacia. Os valores menores indicando tectonismo e processos intermediários que indicam a processos erosivos, condição esta quando comparados a setores que apresentam valores superiores a 3, então concentrados no flanco direito da bacia, desenvolvendo-se sobre o setor analisado da BHRU, onde se destacam os setores A24, A25, A26, A27, A28, A29 e A30 (Tabela 1).

O indicativo de processos tectônicos advindos da atuação das zonas de cisalhamento, condicionam diferentes patamares em seu alto, médio e baixo curso, criando diversos patamares, que atuam como níveis de base locais ao longo da bacia. Tais patamares foram reconhecidos por Silva et al. (2022), que destacaram o condicionamento da drenagem em diferentes aspectos como, quebras topográficas, inflexuras de canais

fluviais e padrão de dissecação a partir do limite móvel dos *knickpoints*. Esses *knickpoints* demarcam locais onde ocorreram mudanças no nível de base, afetando a dinâmica do relevo, também representando limites móveis da paisagem, separando os setores do relevo adaptados a novas condições e outros que ainda mantem sua forma de antes do processo de perturbação (Crosby e Whipple, 2006; Monteiro, 2015; Monteiro e Corrêa, 2020; Silva *et al.*, 2022).

Tabela 1- Valores de SMF da escarpa do flanco direito da BHRU.

Trecho	SMF	Trecho	SMF
A24	2,16	**A28**	1,83
A25	1,88	**A29**	2,35
A26	2,23	**A30**	2,25
A27	2,02		

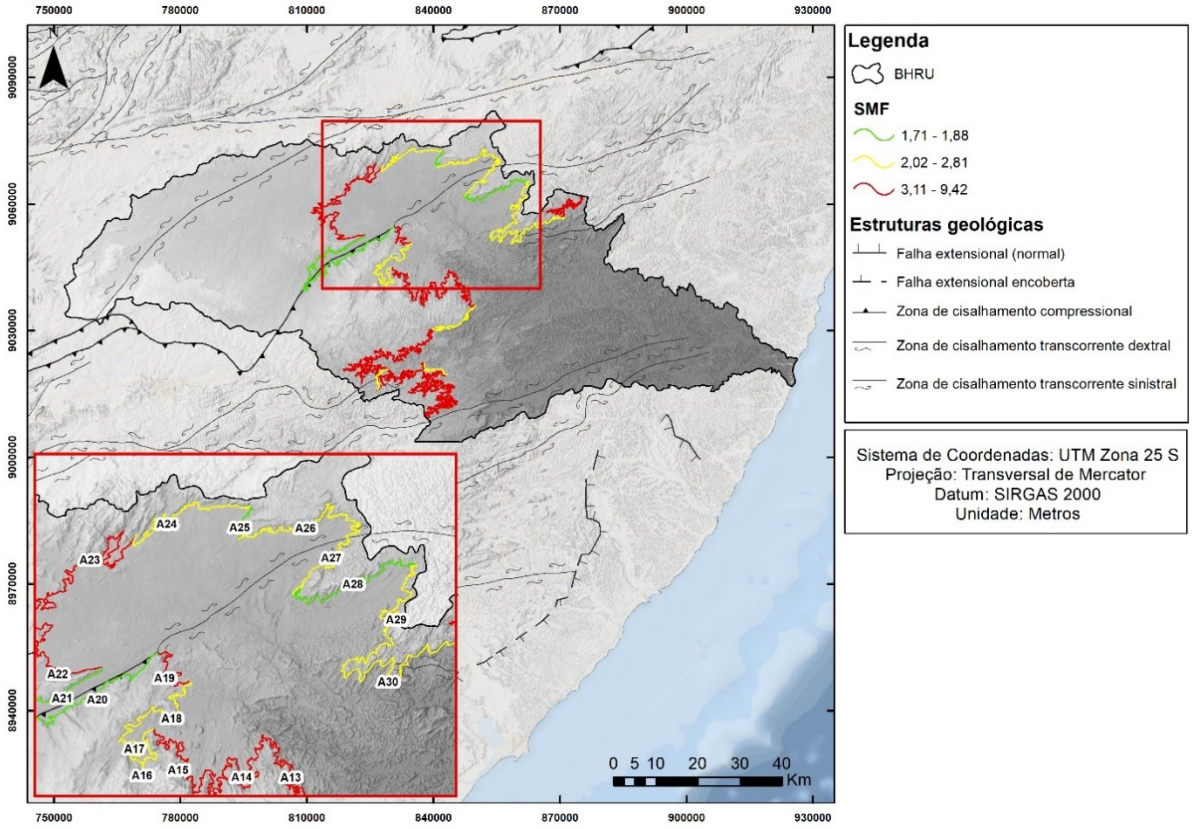
A tectônica cenozoica em contextos de margens passivas opera em regimes escalares distintos. Quando tomamos como base, os setores costeiros que bordeja os patamares elevados do Planalto da Borborema, vemos que em um cenário regional a flexura na porção central do Planalto atua como um condicionante de domeamento dessa megamorfoestrutura e assim controla a retomada erosiva por parte das drenagens que tem seu fluxo para o Atlântico. Esse controle reverbera na dissecação da faixada oriental do Planalto, mais precisamente nas drenagens que encontram seu nível de base geral no litoral paraibano, pernambucano e alagoano. Onde o controle das rupturas se dá em cotas semelhantes indicando um ponto de quebra associado à possíveis reajustes tectônicos cenozóicos (Monteiro e Corrêa, 2020; Correia et al 2019).

No entanto, quando observamos os detalhes na escala da bacia hidrográfica, vemos que os comportamentos se distinguem em face de possíveis mecanismos pontuais de ajustes estruturais nas zonas de fraqueza que ocorrem no contexto dessas bacias. A BHRU apresenta essa condição de que setores específicos da bacia estão mais afetados por ajustes estruturais e/ou tectônicos do que em outras porções. Oliveira et al (2023) ao tratar de questões associadas à retomadas erosivas em bacias no interior do Estado de Pernambuco, verificou que bacias se comportam de maneiras distintas ao longo do seu trajeto. Dito isso, os níveis de base muitas vezes serão redinamizados por mecanismos focais de controle tectônico. Essa dinamização dos níveis de base, confere a BHRU condições distintas de um médio curso associado a um patamar mais suave e com amplos divisores e pedimentos conservados, a uma transição de forte dissecação e quebras de patamares no seu baixo curso. O cenário agora descrito para o baixo curso, indica condições

específicas associados a rupturas no eixo de drenagem principal e seus tributários que vão estar atrelados a reativações das zonas de fraqueza no contato da superfície Borborema (patamar de 600-500m) à escarpa oriental, seguindo para o piemonte, onde a dissecação atua de forma mais competente.

No contexto associado ao piemonte, vamos ter as reativações das zonas de fraqueza, criando diversos knick-points que ocorrem sob a forma de rápidos, cachoeiras e corredeiras no eixo de drenagem principal e os seus afluentes, essa condição permite uma retomada erosiva mais vigorosa nesse setor. Mas, para além das condições de reativação das zonas de fraqueza, estamos dentro do contexto da faixada úmida da escarpa oriental da Borborema. Esse setor é marcado por condições climáticas que facilitam que o trabalho fluvial abrasivo atue de forma competente na criação de novos níveis de base e ajuste dos patamares mais rebaixados associados ao contato do piemonte e o setor costeiro da referida bacia.

Figura 8 – Sinuosidade de frente de escarpa.



Fonte: Os autores (2024).

Outro fator condicionante para a configuração observada, é proveniente do contexto geológico observado no setor, onde a ZC, funciona como limite entre o contato de duas unidades geológicas distintas, a montante de ZC tem-se a Suíte intrusiva Leucocrática peraluminosa (MP1γst), composta por rochas

metamórficas datadas do mesoproterozóico e a jusante o corpo granitóides indiscriminados brasilianos (NP2γi) e Corpo Plúton Sem Denominação (NP3γ2it45), compostas por rochas ígneas datadas do neoproterozóico.

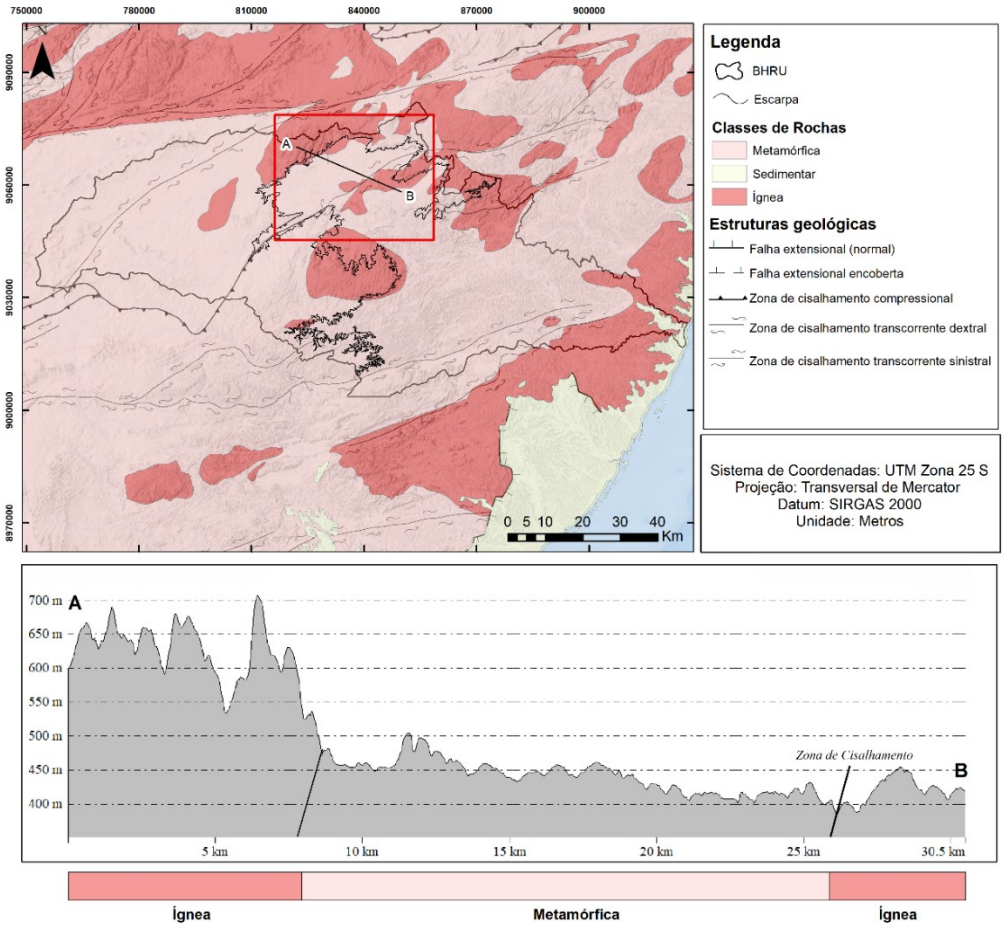
Tendo as rochas metamórficas uma constituição de "menor resistência" que as rochas ígneas, é possível estabelecer as relações de causa e consequência, entre a queda de nível de base, formando um nível de base local devido a presença da ZC estrutura a queda do bloco associado a controles estruturais/litológicos criando um nível de base rebaixado no médio curso da BHRU (Figura 9).

A dissecação acentuada deste setor está relacionada com o contexto climático e os sistemas climáticos caracterizam-se por dinâmicas diferentes que atuam principalmente sobre o alto e médio/baixo curso, em seu alto curso podem ocorrer atuações da Zona de Convergência Intertropical (ZCIT) como destacado por Girão et al., (2013) e Silva et al., (2021), levando a intensificação dos processos de dissecação.

Levando em consideração os diferentes estágios de dissecação do relevo, onde em seu alto curso é possível observar áreas de apesentam menor rugosidade e relevo local de menor expressão topográfica, indicando atuação de sistemas climáticos de penetram sobre a área de bacia. Já em seu médio curso, observa-se relevos de maior expressão geomorfológica, de características escarpadas, relacionada a escarpa oriental do Planalto da Borborema, apresentando diferentes estágios de dissecação apontadas pelo índice de sinuosidade de frente de escarpa, e a partir de análises pretéritas de Monteiro (2015).

Os diferentes níveis de sinuosidade observados podem relacionar-se tanto com questões de cunho estrutural, com os processos de gênese do Planalto da Borborema destacados por Oliveira (2008) e de cunho climático como destacados por Girão et al., (2013) e Silva et al., (2022), devido a atuação e penetração de sistemas climáticos que auxiliam nos processos de dissecação do relevo.

Figura 9 –Classes de rochas e perfil topográfico indicando diferenças litológicas.



Fonte: Os autores (2024).

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir dos resultados alcançados por meio da aplicação dos índices morfométricos, foi possível observar as diferentes configurações presentes da BHRC no que tange as características estruturais e climáticas da área de estudo, de maneira que podem ser traçadas hipóteses com relação a gênese no "alvéolo" estruturado em seu médio curso. No que concerne aos mecanismos de controle na formação dos níveis de base ao longo da bacia, as zonas de cisalhamento atuam diretamente no arranjo geométrico dessas rupturas, criando desarticulações entre os blocos, gerando níveis de base distintos no alto, médio e baixo curso. A formação dos níveis de base leva a uma influência nos processos erosivos a montante deste nível de base local.

Também é importante destacar que os sistemas climáticos que penetram sobre o território da BHRU, também possuem grande participação na dissecação no relevo no contexto do "alvéolo", de maneira que, a soma dos elementos estruturais e climáticos atuam na dinâmica erosiva.

O contexto morfotectônico destacado por Silva et al., (2022) ao qual a BHRU está inserida tem grande importante para as análises realizadas, as características observadas por meio da aplicação dos índices morfométricos, como por exemplo a baixa sinuosidade no canal principal sobre o trecho analisado e ausência de estruturas lineares sobre o setor alveolar, sendo estruturado pela presença das zonas de cisalhamento nos extremos desse setor. Assim, a BHRU possui um contexto de suma importância para o seguimento dos estudos voltadas à análises morfoestruturais em bacias hidrográficas.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento a Fundação de Amparo à Ciência e Tecnologia do Estado de Pernambuco (FACEPE), vinculada à Secretaria de Ciência, Tecnologia e Inovação de Pernambuco (SECTI) pela concessão da bolsa ao Doutorando Jonas Herisson Santos de Melo vinculado ao Programa de Pós-graduação em Geografia, pela UFPE.

REFERÊNCIAS

ALMEIDA, F. F. M., BRITO NEVES, B. B., CARNEIRO, C. D. R. **The origin and evolution of the South American Platform**. Earth-Science Reviews. 50, 2000. p. 77-111.

BEZERRA, F. H. R.; ROSSETI, D. F., OLIVEIRA, R. G.; MEDEIROS, W. E.; BRITO NEVES, B.B.; BALSAMO, F.; NOGUEIRA, F. C. C.; DANTAS, E. L.; ANDRADES FILHO, C.; GÓES, A.M. Neotectonic reactivation of shear zones and implications for faulting style and geometry in thecontinental margin of NE Brazil. **Tectonophysics** (Amsterdam), v. 614, p. 78-90, 2014.

BRITO NEVES, B. B., CAMPOS NETO, M.C., VAN SCHMUS, W.R., FERNANDES, T.M.G., SOUZA, S. O terreno alto Moxotó no leste da Paraíba (maciço Caldas Brandão). **Revista Brasileira de Geociências**, v. 31. 2001 b. p.16-31.

BRITO NEVES, B. B., CAMPOS NETO, M.C., VAN SCHMUS, W.R., SANTOS, E.J. O sistema Pajeú-Paraíba e o maciço São José do Campestre no leste da Borborema. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 31. 2001 a. p. 1-15.

BRITO NEVES, B. B.; VAN SCHMUS, W. R.; FETTER, A. H. Noroeste da África – Nordeste do Brasil (Província Borborema): Ensaio comparativo e problemas de correlação. **Revista do Instituto de Geociências – USP, série científica**, v.1, 2001 c. p.59-78.

CAVALCANTI, I.F.A.; FERREIRA, N. J.; SILVA DIAS, M.A.F.; JUSTI DA SILVA, M. G. A. (Organizadores). **Tempo e Clima no Brasil**. Autores: vários. Editora: Oficina de Textos. ISBN: 9788586238925. Idioma: português. Encadernação: Brochura. 1ª edição, 2009. 464p.

CORREIA FILHO, O.J.; BARBOSA, J.A.; TAVARES, B.A.C.; SILVA, H.A.; MONTEIRO, K.A.; FABIN, C.E.G.; OLIVEIRA, J.T.C.; SANTANA, F.R.; SILVA, S.M. Reativação Tectônica Quaternária no Domínio Sul da Província Borborema, NE do Brasil: Integração de Dados Morfométricos, Geológicos e

Geofísicos da Bacia do Rio Una. **Anuário do Instituto de Geociências** – UFRJ, v. 42 – 4, p. 219-237, 2019.

CORREIA, 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. 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, v. 42, p. 219-237, 2019.

CROSBY, B.T.; WHIPPLE, K.X. Knickpoint initiation and distribution within fluviais networks: 236 waterfalls in the Waipaoa River, North Island, New Zealand. **Geomorphology**, v.82, p.16–38, 2006.

GERAMISOV, I. P.; MESCHEIROV, J. A. Morphostructure. In:FAIRBRIDGE, R. W. (Ed.). The Encyclopedia of Geomorphology – **Encyclopedia of Earth Sciences**. Pennsylvania-Dowden: Hutchinson e Koss Inc., 731-732. 1968.

GIACONIA, F et al. Geomorphic evidence of active tectonics in the Sierra Alhamilla (eastern Betics, SE Spain). **Geomorphology**, v. 145, p. 90-106, 2012.

GIRÃO, O; CORRÊA, A. C. B.; NÓBREGA, R. S. e DUARTE, C. C. O Papel do Clima nos Estudos de Prevenção e Diagnóstico de Riscos Geomorfológicos em Bacias Hidrográficas na Zonada Mata Sul de Pernambuco. In: GUERRA, A. J. T. &OLIVEIRA JORGE, M. C. (org), **Erosão e Movimentos de Massa**: Recuperação de Áreas Degradadas e Prevenção de Acidentes, 2013.

GUERRA, A.J.T.; CUNHA, S.B. (Org.). **Geomorfologia**: Uma Atualização de Bases e Conceitos; Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1994.

LANA, C. E.; ALVES, J. M. de P.; CASTRO, P.T.A. Análise Morfométrica da Bacia do Rio do Tanque, MG-BRASIL. **REM**. Ouro Preto-MG, 2001, Vol 54(2), p. 121-126.

MONTEIRO, K. A. Análise Geomorfológica da Escarpa oriental da Borborema a partir daAplicação de Métodos Morfométricos e Análises Estruturais. 2015. 222 f. Tese (Doutorado emGeografia) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2015.MONTEIRO, K. A.; CORRÊA, A. C. B. 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**, v. 103, p. 1-28, 2020.

MONTEIRO, K. A. Análise Geomorfológica da Escarpa oriental da Borborema a partir da Aplicação de Métodos Morfométricos e Análises Estruturais. Universidade Federal de Pernambuco, Recife, **Tese** de Doutorado (Geografia), 222 p., 2015.

MONTEIRO, K. A.; CORRÊA, A. C. B. 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**, v. 103, p. 102729, 2020.

NEVES, S.; TOMMASI, A.; VAUCHEZ, A.; CARRINO, T. The Borborema Strike-Slip Shear Zone System (NE Brazil): Large-Scale Intracontinental Strain Localization in a Heterogeneous Plate. **Lithosphere**. 2021. 10.2113/2021/6407232, 2021.

OLIVEIRA, R.G. Arcabouço geofísico, isostasia e causas do magmatismo Cenozóico da Província Borborema e de sua margem continental. Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, **Tese** de Doutorado (Geodinâmica e Geofísica), 400p., 2008.

PEREIRA, O. G.; CORRÊA, A. C. B.; TAVARES, B. A. C.; MONTEIRO, K. A. The influence of cenozoic magmatism on drainage rearrangement processes of the northeast sector of the Borborema Highlands, northeastern Brazil. **Journal Of South American Earth Sciences**, v. 121, p. 104124, 2023.

SAMPAIO, T. V. M; AUGUSTIN, C. H. R. R. Índice de Concentração da Rugosidade: uma nova proposta metodológica parao mapeamento e quantificação da dissecação do relevo como subsídio a cartografia geomorfológica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, São Paulo, v.15, n.1, (Jan-Mar) p.47-60, 2014.

SCHUMM, S.A. Sinuosity of Alluvial Rivers in the Great Plains. **Bulletin of the Geological Society of America**, 74, 1089-1100, 1963.

SCHWANGHART, W.**,** SCHERLER, D.: TopoToolbox 2 – MATLAB-based software for topographic analysis and modeling in Earth surface sciences. **Earth Surface Dynamics**, 2, 1-7, 2014.

SILVA, A. C.; SILVA, O. G. Análises dos padrões e estilos de canais a partir da paisagem geomorfológica fluvial na Bacia do Rio UNA/PE. **Revista Cerrados** – Montes Claros/MG, v.14, n. 2, p.71-92, 2016.

SILVA, A.C.; GIRÃO, O. Identificação de influências neotectônicas através de imagens SRTM a partir da morfometria no baixo curso do rio Capibaribe/PE. **Revista de Geologia**, v. 29, n° 2, p. 213-225, 2016.

SILVA, W.; GONÇALVES, R.; SILVA, C.; SANTOS, L.; OLIVEIRA, G.; GIRÃO, O. Condicionantes estruturais e suas influências na paisagem geomorfológica da bacia hidrográfica do rio da Chata - PE. **Revista de Geografia**. 39. 194. 10.51359/2238-6211.2022.251879, 2022.