

Artigo de Pesquisa.**CONTROLE ESTRUTURAL SOBRE A DRENAGEM DA BACIA
HIDROGRÁFICA DO RIACHO GRANDE, ALAGOAS****Structural control on the drainage of sub-basins of the Riacho Grande
watershed, Alagoas**

Gabriel do Nascimento Alves¹, Kleython de Araújo Monteiro²

¹ Universidade Federal de Alagoas, Instituto de Geografia, Desenvolvimento e Meio Ambiente, Maceió, Brasil. E-mail. gabriel.alves@igdema.ufal.br

 <https://orcid.org/0000-0002-1111-2345>

² Universidade Federal de Alagoas, Instituto de Geografia, Desenvolvimento e Meio Ambiente, Maceió, Brasil. E-mail. kleython.monteiro@igdema.ufal.br

 <https://orcid.org/0000-0003-4829-3722>

Recebido em 02/09/2021 e aceito em 11/04/2022

RESUMO: O objetivo principal dessa pesquisa se constitui em analisar do controle estrutural nas sub-bacias de quarta ordem na bacia hidrográfica do Riacho Grande, localizada na porção oeste do estado de Alagoas. Assim, se utilizou de dados altimétricos de um modelo digital de elevação TOPODATA derivados do projeto SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) com resolução de 30 metros. O MDE forneceu uma base de dados para a extração de dados de elevação que foram aplicados na obtenção dos índices morfométricos. Os índices utilizados em relação à forma das sub-bacias foram: Fator de forma, índice de circularidade e índice de compacidade. Também foi utilizado o índice de densidade de drenagem e análise de lineamentos. Os resultados mostraram que a maior parte das sub-bacias apresentam uma dinâmica homogênea com formatos circulares com baixa presença de lineamentos, onde a drenagem provavelmente evoluiu impondo sua dinâmica. A sub-bacia H mostrou os resultados mais discrepantes, com um formato alongado e concentração de lineamentos que indicam controles pelas estruturas.

Palavras-chave: Morfometria; lineamentos; Geomorfologia.

ABSTRACT: The main objective of this research is to analyze the structural control in the fourth-order sub-basins of the Riacho Grande watershed, located in the western portion of the state of Alagoas. Thus, altimetric data from a TOPODATA digital elevation model derived from the SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) project at a resolution of 30 meters was used. The MDE provided a database for the extraction of elevation data that were applied to obtain morphometric indices. The indices used in relation to the shape of the sub-basins were: shape factor, circularity index and compactness index. The drainage density index and lineament analysis were also used. The results showed that most of the sub-basins present a homogeneous dynamic with circular shapes with low presence of lineaments, where the drainage probably evolved imposing its dynamic. The H sub-basin showed the most discrepant results, with an elongated format and concentration of lineaments that indicate control by structures.

Keywords: Morphometry; Lineaments; Geomorphology.

INTRODUÇÃO

As análises morfométricas na geomorfologia remontam ao século XIX, buscando medir as formas de relevo e sua evolução através de métodos quantitativos e processos sistemáticos, com maior destaque nos países germânicos (CHRISTOFOLETTI, 1969). Para Christofolletti (op cit.) essa fase inicial da morfometria foi sendo ofuscada a partir de novas concepções geomorfológicas resultantes das publicações William Morris Davis acerca da evolução cíclica do relevo. Nesse sentido as ideias Davisianas trabalhavam com escalas de tempo extensas, que variavam de milhões a centenas de milhões de anos, impossibilitando estudos mais detalhados em termos escalares (BIGARELLA, 2003).

Os estudos morfométricos foram retomados mais efetivamente a partir do final da primeira metade do século XX com o trabalho de Robert E. Horton publicado em 1945. Horton manifestou preocupações advindas da falta de técnicas para os estudos sobre as formas de relevo, afirmando que muitos trabalhos abarcavam apenas aspectos qualitativos, assim o autor sugere técnicas de caráter quantitativo para os estudos voltados para a investigação morfológica e de desenvolvimento do relevo (HORTON, 1945).

A partir da década de 1980, com o advento de ferramentas de sensoriamento remoto e uma maior acessibilidade aos sistemas computacionais, possibilitou-se o uso de técnicas de mensuração de forma remota. Essas técnicas foram de grande importância para o desenvolvimento dos Sistemas de Informação Geográfica (SIG), continuamente incorporado em diversas áreas do conhecimento (CHEREM, 2008). Logo, os métodos quantitativos se tornaram cada vez mais acessíveis e precisos, tornando possível o tratamento de dados numerosos e complexos que possivelmente não seriam viáveis sem o desenvolvimento contínuo da ciência da computação, sensoriamento remoto e SIG's. Assim, potencializaram-se exponencialmente os estudos geomorfológicos com a possibilidade de criação de modelos multiescalares. (CHEREM, 2008; WALCOTT e SUMMERFIELD, 2008; PARANHOS FILHO et al., 2003).

Grande parte da utilização destes índices ocorre sob a perspectiva dos fenômenos processuais de superfície, buscando as relações entre os componentes bióticos (flora) e pedológicos com os fenômenos exógenos produtores de fluxos hídricos e mobilização de sedimentos. Entretanto, não são raras as vezes em que se aplicam parâmetros quantitativos para a compreensão dos aspectos estruturais da paisagem morfológica, na tentativa de entender como o conjunto de elementos do relevo, incluindo aí os fluxos hídricos, respondem aos condicionantes lito-estruturais (MISSURA, 2013; MONTEIRO e CORRÊA, 2020; PETROVSZKI e TIMÁR, 2010; SIDDIQUI et al., 2017).

Logo, frente à possibilidade da aplicação de métodos quantitativos para interpretação dos possíveis ajustes das formas do relevo terrestre aos condicionantes lito-estruturais regionais, o presente artigo tem por objetivo analisar a influência do controle estrutural nos diferentes setores da Bacia Hidrográfica do

Riacho Grande, localizada no estado de Alagoas, através da aplicação de parâmetros morfométricos.

MATERIAIS E MÉTODOS

Área de estudo

A bacia hidrográfica do Riacho Grande (BHRG) é uma sub-bacia do rio São Francisco que se localiza na porção oeste do estado de Alagoas entre as coordenadas 37°36'29", 37°17'41" de longitude oeste e 9°19'12", 9°44'28" de latitude sul. Se inserindo na microrregião de Santana do Ipanema e mesorregião do Sertão Alagoano, drenando uma área de aproximadamente 562 km² que abrange sete municípios (IBGE, 1990).

A BHRG se insere nas depressões interplanálticas em faixas de dobramento e suítes intrusivas, no setor da depressão São Franciscana. Seu embasamento geológico é bastante homogêneo (Figura 1), estruturado por rochas pré-cambrianas, especialmente rochas intrusivas como granitos, sienitos e quartzo monzonitos associadas a plútons e suítes intrusivas. Nessa região se identificam falhas geológicas que orientam a distribuição espacial de relevos residuais, os lineamentos e até trechos dos canais (VILLANUEVA e MARTINS, 2016).

Parte das estruturas que compõem o embasamento da região é composta por rochas do Cráton do São Francisco, apresentando estruturas de processos orogenéticos paleoproterozoicos submetidos à intensos processos de deformação e plataformização (CORRÊA et al, 2019).

Esses processos ocorreram até a reativação tectônica que marcou o período mesozoico, também responsável pela ruptura do continente Gondwana e a abertura do oceano atlântico, com a ocorrência estimada entre 200 e 100 milhões de anos (CORRÊA et al, 2019).

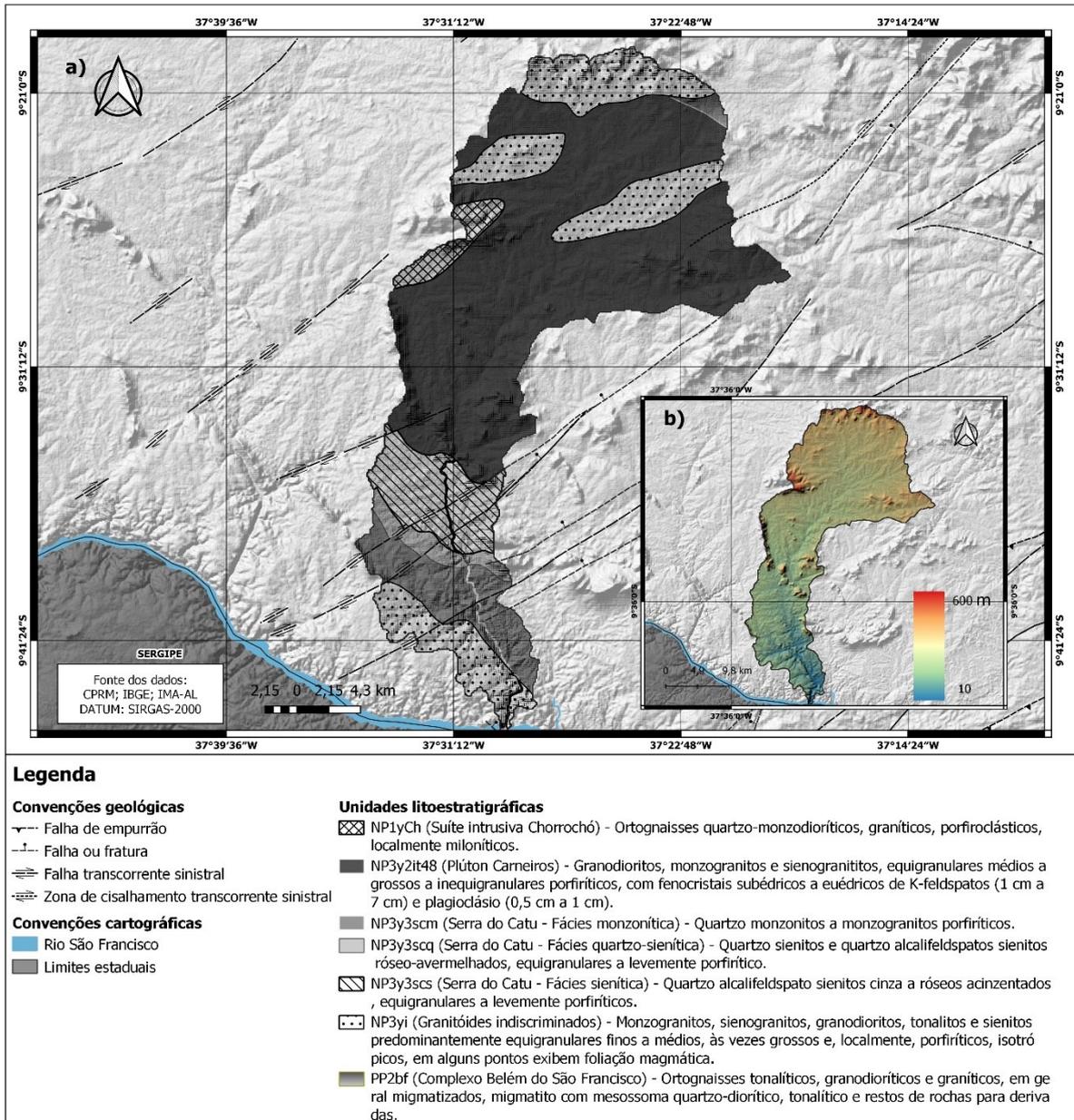


Figura 1. a) Mapa de unidades litoestratigráficas da BHRG; b) Mapa hipsométrico da BHRG.

Fonte: CPRM. Adaptado pelos autores (2022)

Morfologicamente, esta bacia apresenta uma topografia típica do domínio da Depressão Sertaneja meridional, configurando zonas aplainadas por ciclos erosivos antigos onde os processos de denudação excederam os processos de agradação, formando vastas superfícies erosivas que margeiam as bordas de bacias sedimentares e são esculpidas em rochas cristalinas antigas (AB'SABER, 1969; MAIA et al, 2010; AB'SABER, 1998).

Diante disso, na BHRG se identificam níveis de pedimentos intercalados por relevos residuais que se destacam no terreno plano, com morfoesculturas em inselbergs e maciços orientados em direção NE-SW, seguindo o trend regional. Cavalcanti (2010)

classifica a região como subdomínio físico-geográfico da depressão sertaneja meridional e Villanueva e Martins (2016) como Depressão do baixo rio São Francisco.

Seu contexto climático é característico de ambiente semiárido do nordeste brasileiro. Cujas condições de semiaridez são associadas com as células de circulação geral da atmosfera, resultante do processo de subsidência de um ramo descendente da circulação de Walker (MOLION e BERNARDO, 2002).

Reboita et al 2016 também sintetiza as condições de seca do nordeste brasileiro, atribuindo às células de circulação (Walker e Hadley) que acabam por causar o aquecimento do ar por compressão adiabática que faz com que ocorra uma diminuição da umidade relativa (REBOITA et al., 2016).

Seguindo a classificação climática de Thornthwaite, o clima da bacia se insere na faixa de clima semiárido em sua quase totalidade areal, com uma pequena faixa classificada de clima árido na porção sul, a jusante no município de Pão de Açúcar (BARROS et al, 2012). Este tipo climático se caracteriza pela irregularidade de precipitação, com longos períodos de seca e chuvas concentradas, promovendo a remobilização dos rasos mantos de intemperismo que se formam.

Procedimentos metodológicos

Buscando realizar a aplicação dos parâmetros morfométricos na bacia hidrográfica do Riacho Grande, procedeu-se a extração de dados acerca das características geométricas (linear e areal) e topográficas, que serviram como base para os cálculos aplicados. Na primeira etapa foi necessário aplicar um tratamento no Modelo Digital de Elevação (MDE) para realizar correções topográficas. As correções visaram sanar as depressões ou células com fluxo indefinidos presentes no MDE para reparar as drenagens através da ferramenta Fill sinks no software QGIS 2.18.

Em seguida, para a extração da rede de drenagem e bacias hidrográficas fez-se uso da ferramenta ArcHydro presente no software ArcGis 10.5. Uma série de procedimentos automatizados foram empregados em busca destes dados (Figura 2), o critério de escolha para as bacias de quarta ordem partiu do objetivo de se comparar as informações dos dados extraídos e assim ponderar sobre como as estruturas exercem seus controles em cada uma delas. Inicialmente, para obter as características hidrológicas aplicou-se a ferramenta de direção de fluxo (flow direction), esta ferramenta utilizada dados em formato raster e faz uso dos valores dos pixels, criando uma direção de fluxo que flui de determinado pixel para seu vizinho mais íngreme a jusante.

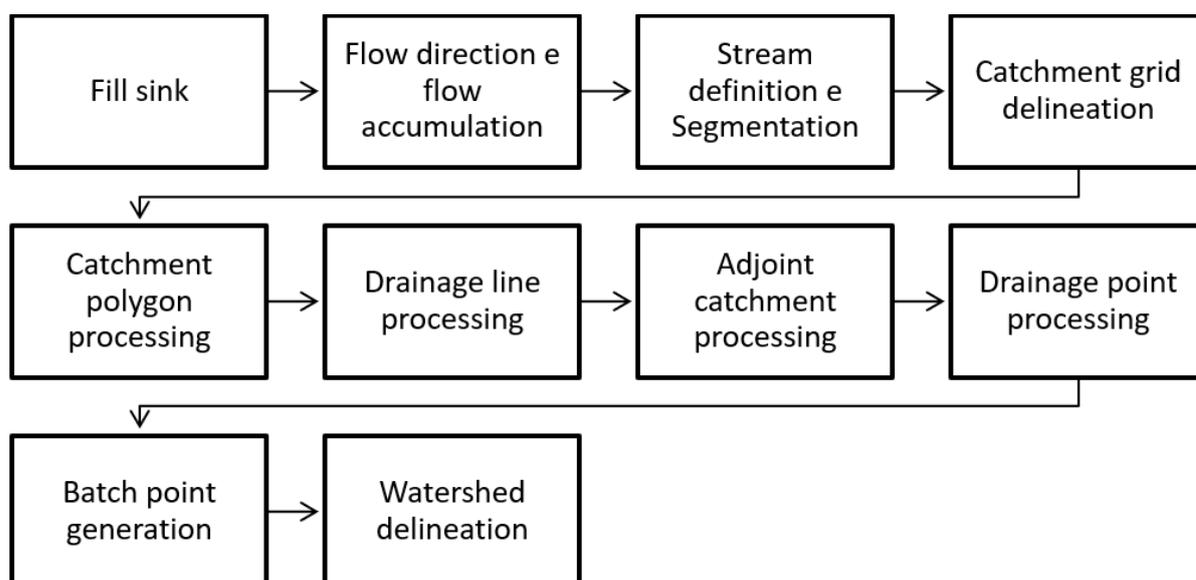


Figura 2. Fluxograma para a obtenção das sub-bacias e rede de drenagem. **Fonte:** Autores (2022)

Em sequência se fez uso da ferramenta Flow accumulation, uma camada raster com o fluxo acumulado em cada célula, aplicando um fator de peso para cada pixel e fluindo para os pixels de fluxo a jusante, este peso foi definido pelo próprio procedimento, desta forma a drenagem em si começa a ser formada em formato raster.

A partir da acumulação de fluxo foi possível avançar na obtenção da rede de drenagem através da ferramenta stream definition para extrair a rede de drenagem em raster (número de células). De forma subsequente se aplica a segmentação de canais (stream segmentation) resultando também em um raster com a drenagem segmentada em trechos.

O emprego da ferramenta de delimitação das quadrículas da bacia (Catchment grid delineation) acabou por gerar as sub-bacias presentes na área de interesse em formato raster. Já a ferramenta de processamento de polígonos da bacia (catchment polygon processing) consistiu em um processo de vetorização destas sub-bacias. A ferramenta de Adjoint catchment processing consistiu em outra vetorização das sub-bacias, porém com maior nível de detalhamento.

Para a obtenção efetiva da rede de drenagem em vetor foi utilizado o procedimento Drainage line processing. Semelhante ao processo para a delimitação das sub-bacias, esse procedimento consistiu na vetorização do raster stream segmentation, obtendo a drenagem já segmentada em trechos a partir do ponto de confluência entre canais.

A ferramenta Drainage point processing é necessária para o processo de delimitação automática da bacia hidrográfica, gerando os pontos de drenagem, em conjunto com o batch point processing que representa o ponto da foz que define o limite da bacia hidrográfica. A partir destes dados se aplica a watershed definition

para a definição em vetor da bacia hidrográfica, e por fim todos esses dados são exportados no formato shapefile.

Hierarquia fluvial

A hierarquização fluvial é um dos principais passos nas análises quantitativas de uma rede de drenagem, ela define o grau de ramificação de uma bacia. Strahler (1952) definiu que os trechos que não recebem tributários são tidos como canais de primeira ordem. Quando dois canais de primeira ordem se confluem, acabam por formar um canal de segunda ordem. A lógica se aplica aos canais de ordem superior (dois canais de ordem n compõem um canal de ordem $n+1$), sendo necessário a junção de dois canais de mesma ordem para que sua ordem aumente. A junção de um canal de dada ordem com um de ordem superior não aumenta a ordem do curso de hierarquia superior. A ordem do canal principal no ponto do exutório da bacia corresponde à ordem da bacia hidrográfica como um todo.

Aspectos areais

Fator de forma

O fator de forma expressa a relação entre a largura média e o comprimento axial da bacia, relaciona a área da bacia com um retângulo. Nesta pesquisa se utiliza a metodologia presente em Cardoso et al. (2006). Pode ser calculado através da equação:

$$Kf = A/L^2$$

Onde Kf é o fator de forma, A é a área da bacia e L é o comprimento axial da bacia, sendo o comprimento axial o comprimento que parte do ponto da foz até o exutório do canal principal.

Segundo o autor, a forma da bacia é influenciada diretamente pela geologia, podendo atuar também sobre os processos hidrológicos ou o comportamento deste sistema fluvial (CARDOSO et al, 2006). Para Villela e Mattos (1975) bacias com baixo fator de forma são menos sujeitas à processos de inundação do que outra com mesmas dimensões, porém com fator de forma maior.

Índice de circularidade

Outro índice relacionado à forma da bacia, o índice de circularidade foi proposto por Miller (1953) e compara a área da bacia com a área de um círculo. O formato da bacia tende a se aproximar de um círculo conforme o valor do índice se aproxima da unidade. Esse índice é dado pela equação:

$$Ic = 12,57 * A/P^2$$

Onde Ic é o índice de circularidade, A é área de drenagem da bacia e P é o perímetro da bacia.

Coeficiente de compacidade

Da mesma forma como ocorre com o índice de circularidade, o coeficiente de compacidade também compara a área da bacia com um círculo, exibindo a relação que ocorre entre o perímetro da bacia e a circunferência de um círculo com área igual à da bacia. Pode ser expresso através da fórmula:

$$Kc = 0,28 * \left(\frac{P}{\sqrt{A}}\right)$$

Onde Kc é o coeficiente de compacidade, um número adimensional, P é o perímetro e A é a área de drenagem.

Segundo Villela e Mattos (1975) o valor do índice aumenta conforme há o aumento da irregularidade da bacia. Neste caso quanto mais próximo a unidade mais circular será a forma da bacia, valores acima de 1 indicam forma mais alongadas.

Densidade de drenagem

O índice de densidade de drenagem representa uma medida de dissecação da bacia hidrográfica, sendo um bom indicativo para o grau de desenvolvimento da bacia. A densidade de drenagem (HORTON, 1932) é dada pela razão entre a soma total dos comprimentos dos canais por unidade de área da bacia, dado em quilômetros por quilômetros quadrados (km/km²). A razão se expressa como:

$$Dd = L/A$$

Onde Dd é a densidade de drenagem (km/km²), L é o comprimento total de todos os canais (km) e A é a área total da bacia hidrográfica (km²).

Este índice pode refletir influências litológicas, topográficas, pedológicas e de vegetação da bacia hidrográfica. O embasamento rochoso e o tipo de solo são determinantes para os valores de Dd, uma vez que o controle geológico determina a resistência da superfície à processos erosivos, bem como a geração de fluxos superficiais. Esse fator expressa uma relação proporcional aos valores de Dd, rochas mais impermeáveis condicionam um maior escoamento superficial, resultando em valores mais elevados deste índice, o contrário ocorre em relação a rochas friáveis, assim como regimes climáticos de baixa intensidade.

Villela e Mattos (1975) propõem uma classificação dos valores de densidade de drenagem, que varia de 0,5 km/km² para bacias de drenagem pobre, a 3,5 km/km² para bacias excepcionalmente bem drenadas.

Outro procedimento para a densidade de drenagem partiu do uso de SIG com a aplicação do método de densidade de *kernel* para confeccionar um *raster* a partir de um *shapefile* de drenagem extraída no processo de obtenção das bacias. O

procedimento relaciona a quantidade de vetores por área dos pixels (30 metros x 30 metros), ou seja, a área da bacia pela quantidade de comprimento dos canais.

Densidade de lineamentos

Os lineamentos são conceituados como feições topográficas lineares observáveis nas imagens fotográficas, que podem representar descontinuidades estruturais. É possível identificar os lineamentos para feições negativas (vales em falhas) e feições positivas (cristas alongadas), sendo um indicativo do controle estrutural (ETCHEBEHERE; SAAD; FULFARO, 2007).

O passo inicial para a extração dos lineamentos foi a aplicação do procedimento de sombreamento derivado do MDE TOPODATA de 30 metros de resolução. Esse método foi aplicado utilizando o *software* QGIS 3.14 por meio da ferramenta "Sombreamento". 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).

Após a obtenção do *raster* de sombreamento os lineamentos foram obtidos de forma manual por meio do processo de vetorização manual no *software* QGIS 3.14, posteriormente utilizados para a composição do diagrama de roseta, que exhibe a direção preferencial dos lineamentos extraídos. Os diagramas de roseta foram confeccionados no *software* SPRING disponibilizado gratuitamente em (<http://www.dpi.inpe.br/spring/>).

Por fim, os lineamentos tanto de feições negativas quanto positivas foram manipulados no programa ArcMap 10.5 para a formação do *raster* de densidade de lineamentos através da ferramenta "*Line Density*" que calcula a densidade linear a partir de um raio delimitado para cada célula do *raster* de saída. Essa densidade é calculada em unidade de comprimento por unidade de área (km/km²). O raio utilizado foi de 4 km, um valor arbitrário definido pela própria ferramenta do *software*.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

A partir da aplicação da classificação de Strahler para hierarquizar a bacia, verificou-se que ela apresenta canais de até a quinta ordem (Figura 3).

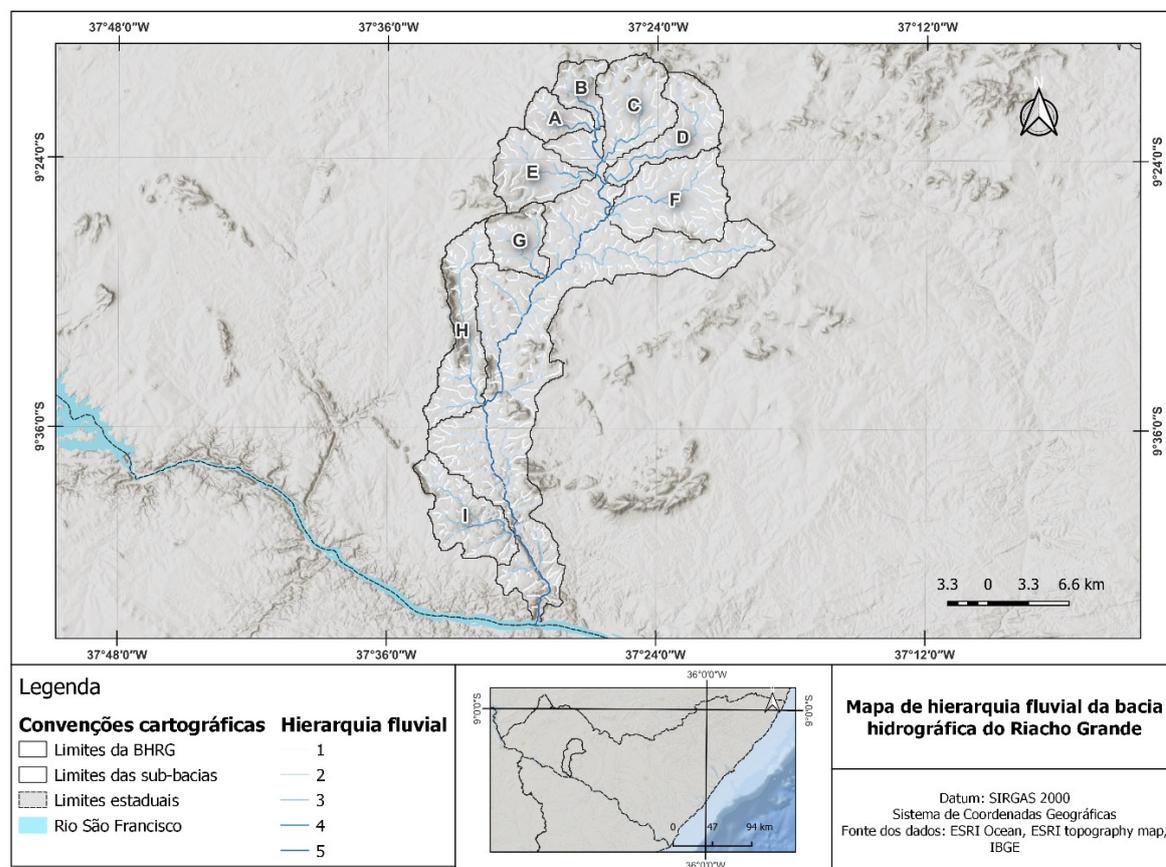


Figura 3. Hierarquia fluvial da bacia hidrográfica do Riacho Grande, conforme classificação de Strahler (1952). **Fonte:** Autores (2022)

A hierarquia permitiu identificar as sub-bacias de quarta ordem que compõem a rede hidrográfica. Estas, por conta de seus graus de desenvolvimento hierárquico, foram estabelecidas como os recortes em que serão aplicados os diversos parâmetros morfométricos sugeridos para esta análise, permitindo uma relação comparativa entre diversos setores da BHRG. As mesmas estão identificadas na Figura 3.

Todavia, devido à escassez de estudos recentes que envolvem morfometria de forma voltados para a compreensão estrutural, onde estes apontam apenas para dinâmicas superficiais e suscetibilidade a enchentes. A discussão entre os resultados obtidos e a literatura para o nordeste brasileiro foi limitada.

Morfometria areal (Kf, IC, Kc)

Os índices areais relacionados à forma normalmente são associados ao tempo de escoamento superficial e os picos de fluxos de descargas hídricas, apontando a tendência que uma bacia hidrográfica apresenta aos processos de inundação. Diversos estudos apontam para a correlação entre formato da bacia e tempo de

escoamento durante períodos de precipitação (VILLELA e MATTOS, 1985; CARDOSO *et al.* 2006; LANA *et al.*, 2011; CONCEIÇÃO DORNELLAS *et al.*, 2020).

Porém, para o que a presente análise propõe, a aplicação desses índices se dá a partir de suas relações com os controles estruturais da rede de drenagem no contexto da BHRG. Alguns autores apontam a relação entre o formato da bacia e contexto estrutural (AVINASH *et al.*, 2014; MAHALA, 2019; THOMAS *et al.*, 2010; DORNELLAS *et al.*, 2020). Avinash *et al.* (2014) e Mahala (2020) afirmam que a forma da bacia pode implicar em seu estágio de evolução geomorfológica, podendo ser jovem, madura ou velha (AVINASH *et al.*, 2014; MAHALA, 2020).

As referidas definições de estágios de evolução remetem à proposta de William Morris Davis (1899) e sua teoria do ciclo geográfico, propondo que o relevo se desenvolvia através de ciclos passando pela juventude, maturidade e senilidade. Porém, essa perspectiva davisiana atualmente vem sendo revista (MONTEIRO, 2001; GIUSTI, 2021).

Logo, os índices são aplicados visando sua relação entre o formato da bacia com a sua estrutura geológica-geomorfológica, além de controles associados. Busca-se também observar o nível de desenvolvimento e papel da drenagem na área de estudo.

O fator de forma apresenta valores que variam de zero à unidade, no qual Kf de até 0,5 indicam bacias alongadas (VILLELA e MATTOS, 1975). O coeficiente de compacidade (Kc) também é associado ao formato da bacia, conhecido ainda como índice de Gravelius, relaciona o perímetro e a área da bacia (VILLELA e MATTOS, 1975). O Kc seria 1 quando a bacia possuísse o formato de um círculo perfeito, sendo mais alongada quanto mais distante da unidade for o valor ($Kc > 1$). Sendo outro índice relativo à forma da bacia, o índice de circularidade compara a área da bacia com um círculo, relacionando sua área e perímetro. Intervalos oscilam entre 0 e 1, onde a unidade indica valores circulares e Ic próximo a 0 indica bacias alongadas (CARDOSO *et al.* 2006). Os valores de Kf, Kc e IC são mostrados a seguir, na Tabela 1:

Tabela 1: Valores de fator de forma (Kf), índice de circularidade (IC) e Coeficiente de compacidade (Kc).

Sub-bacia	Kf	Ic	Kc
H	0,203	0,185	2,307
D	0,322	0,219	2,120
I	0,391	0,297	1,822
C	0,441	0,406	1,557
A	0,450	0,385	1,600
B	0,458	0,323	1,746
E	0,467	0,374	1,623
F	0,479	0,382	1,607
G	0,509	0,396	1,577

Fonte: Autores (2022)

Quando espacializados, os valores areais indicam visualmente as bacias com maior ou menor grau de circularidade, permitindo a setorização das gêneses estruturais que condicionam o desenvolvimento morfológico (Figura 4).

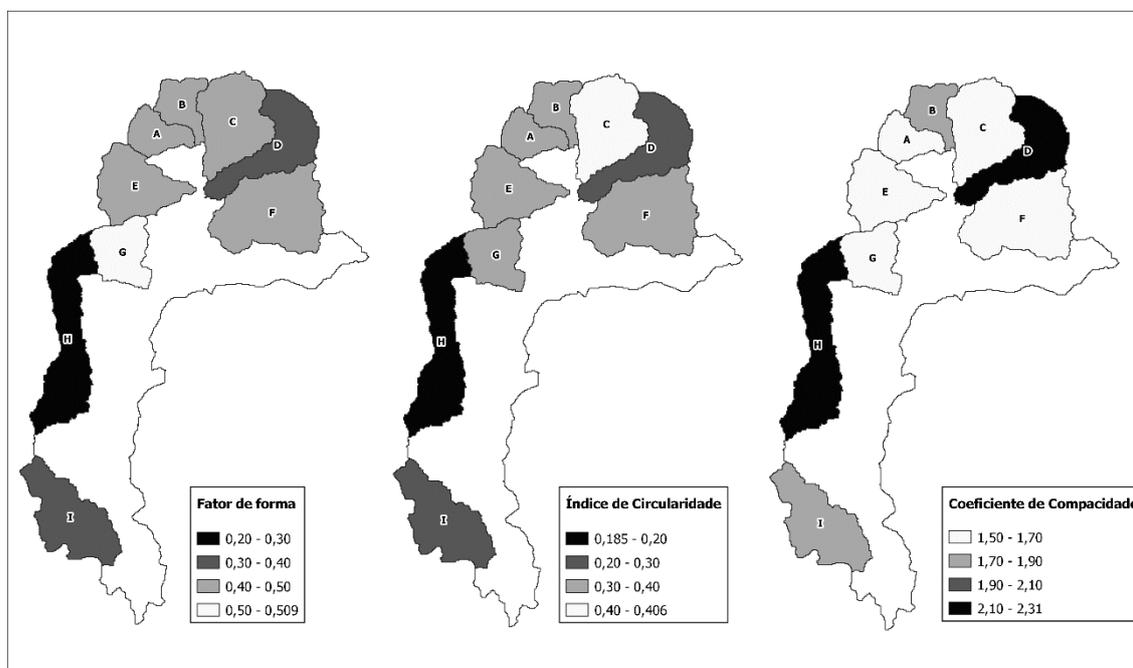


Figura 4. Mapa de valores de Kf, IC e Kc. Fonte: Autores (2022)

As sub-bacias de quarta ordem da BHRG podem ser entendidas como bacias alongadas uma vez que todos os valores de Kf são inferiores à 0,51, os valores de Ic apresentam valor máximo de 0,4 e os dados relativos à Kc (Tabela 1) são consideravelmente maiores que a unidade. A BHRG apresenta sub-bacias com formatos que distam da circularidade, sendo mais relacionáveis a formas retângulas ou ovais, em maior ou menor grau.

Segundo Dornellas *et al* (2020), os valores de índice de circularidade que remetem ao formato alongado se associam principalmente ao controle estrutural da rede de drenagem. Duas das sub-bacias que mostram os maiores valores de índices associados à formatos mais alongados se localizam na porção sul.

Localizada à sudoeste da BHRG, a sub-bacia H se estrutura sobre rochas graníticas e ortognaisses das unidades Chorrochó, Pluton Carneiros e Serra do Catu e se destaca em termos dos valores dos índices tendo em vista que a mesma apresenta os menores valores de fator de forma e índice de circularidade, além do maior valor de coeficiente de compacidade, o que denota sua acentuada forma alongada em comparação com as outras sub-bacias.

Densidade de drenagem

No geral, os dados de densidade de drenagem mostraram pouca variação significativa, com um valor médio de 1,53. A Figura 5 a seguir exhibe os valores obtidos para densidade de drenagem:

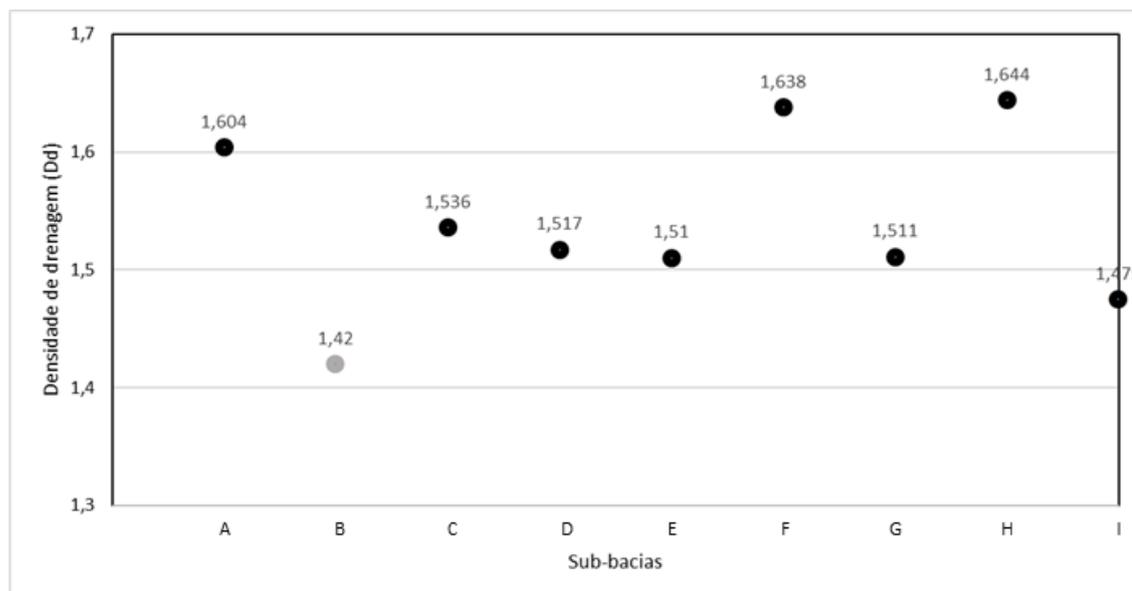


Figura 5. Valores de densidade de drenagem (Dd). **Fonte:** Autores (2022)

A pesquisa incorporou o intervalo de valores proposto por Villela e Mattos (1975), em que os valores variam de 0,5 km/km² para bacias com drenagem pobre e 3,5 km/km² para bacias excepcionalmente bem drenadas. Logo, foi considerado um intervalo que varia de 0,5 a 1,4 km/km² para drenagens pobres, 1,5 a 2,4 km/km² para drenagens medianas e 2,5 a 3,5 km/km² para drenagens ricas.

Os valores de densidade de drenagem para as sub-bacias de quarta ordem variaram entre 1,42 e 1,64 km/km², o que infere que estas bacias apresentam drenagem que atuam no limiar entre drenagens pobres e medianas.

Na BHRG o que se observa é um contexto geológico bastante homogêneo de rochas cristalinas pré-cambrianas. Na porção superior e central da bacia se observam rochas pertencentes à unidade dos Granitoides Indiscriminados e Unidade Chorrochó, pertencentes ao proterozóico, com aproximadamente 2 Ga (VILLANUEVA e MARTINS, 2016).

Porém, o maior predomínio de rochas da bacia está relacionado ao Plúton Carneiros, do domínio de granitoides deformados, que abrange litotipos graníticos maciços, subalcalinos e peraluminosos (VILLANUEVA e MARTINS, 2016).

Na porção meridional se identifica uma maior heterogeneidade litológica com a presença de rochas da unidade Serra do Catú, do domínio de granitoides indiscriminados com litotipos graníticos representados por quartzo-sienito, quartzo-

monzonítico, quartzo álcali-feldspato granitos, biotita granitos de aspecto maciço (VILLANUEVA e MARTINS, 2016).

Estes litotipos, de composição e resistência pouco variada, acaba por gerar compartimentos de relevo sem grandes diversidades, definidos geralmente em níveis de pedimentos, se caracterizando como superfícies aplainadas, variando entre setores conservados e degradados, com a presença de relevos residuais caracterizados como inselbergs e maciços antigos. Portanto, com exceção de porções mais dissecadas e compartimentos mais declivosos, como as encostas dos relevos residuais, a quase totalidade da bacia é estruturada em relevos planos, com pouca variação topográfica abrupta, como pode ser observado em sua declividade (Figura 6).

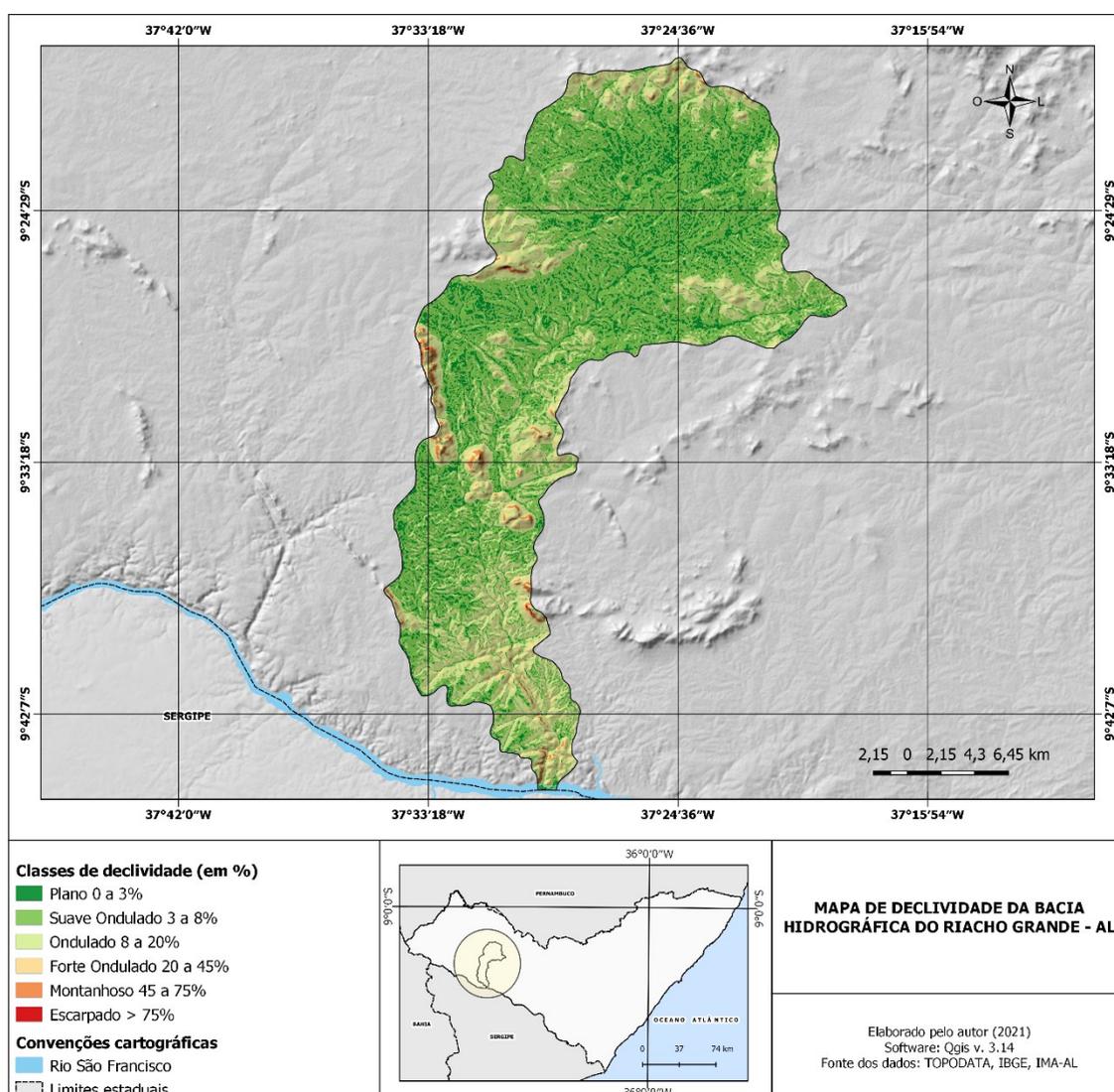


Figura 6. Mapa de declividade da bacia hidrográfica do Riacho Grande. **Fonte:** Autores (2022)

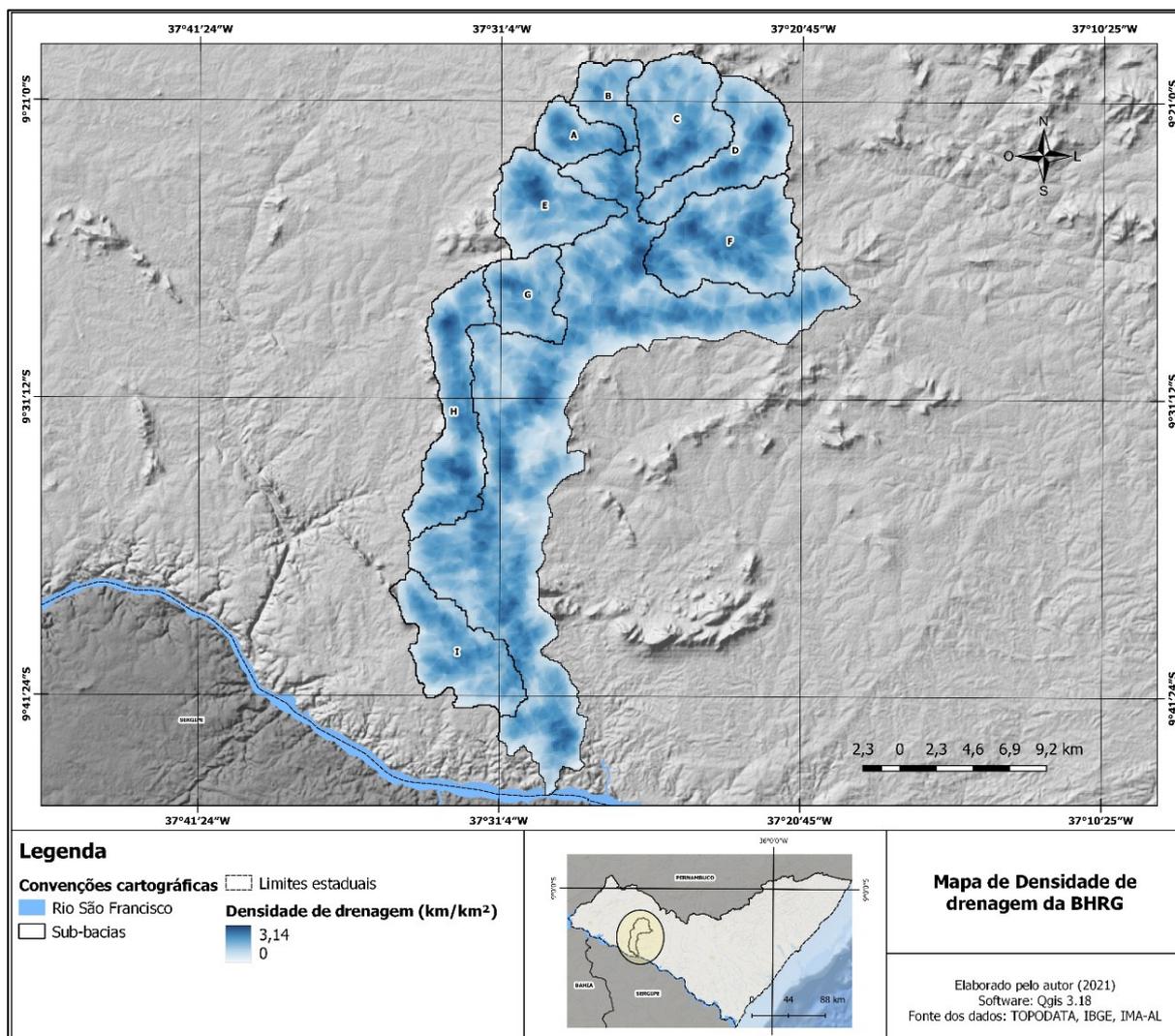
Este contexto geológico e geomorfológico homogêneo com baixas altitudes e variações topográficas (Figura 1) se situa sob influência direta de um clima característico do semiárido, com índices de baixa umidade, megatérmico, com valores elevados de evaporação e evapotranspiração potencial, possuindo pouco ou nenhum suprimento de água (BARROS, 2012).

Ainda, de acordo com Strahler (1964), regiões que apresentam compartimentos de relevo mais suaves e menos dissecados possuem valores de densidade de drenagem menores em comparação àqueles com locais de superfícies mais dissecadas e acentuadas.

Desta forma, apesar de apresentar um embasamento cristalino e predomínio de solos rasos que facilitam o escoamento superficial, os valores baixos a medianos de densidade de drenagem encontrados para a BHRG são associados principalmente ao controle climático atuante em um relevo de domínio de níveis de pedimentos com menor gradiente de declividade.

O *raster* de densidade de drenagem mostrou valores que variaram até 3,14 km/km² (Figura 7). Como supracitado, este procedimento de extração de densidade de drenagem parte do método de densidade de Kernel a partir das feições lineares da rede de drenagem, onde o resultado é um *raster* com a quantidade de vetores por área a partir de um raio de alcance definido pela própria ferramenta. Esta ferramenta permite observar os valores de densidade específicos para determinada área, ao contrário do que ocorre com o método de Horton (1932) que parte de um recorte espacial maior.

Os maiores valores correspondem ao curso principal do canal e as drenagens de maior ordem na hierarquia fluvial. Os números mais elevados também corresponderam às superfícies residuais como maciços e inselbergues na porção norte da bacia, e na crista alongada na sub-bacia H.



A densidade de drenagem pode, além da dissecação, indicar o estágio de desenvolvimento de uma drenagem. Nos estágios iniciais, a incisão dos canais que causa rebaixamento do nível de base dos tributários resulta em baixa densidade de drenagem, enquanto o aumento da extensão da drenagem e expansão do canal causam um aumento do índice. Por fim, quando a drenagem evolui ao ponto das taxas de erosão e incisão não serem mantidas devido a sua extensão máxima para uma determinada área, o índice tende a diminuir devido à integração da rede de drenagem e redução do número de canais (FRYIRS e BRIERLEY, 2012).

Densidade de lineamentos

A análise de feições lineares mostrou feições predominantes na bacia (Figura 8) com destaque para a direção NE-SW, principalmente referente aos azimutes 90°, 315° e 360°. Em seguida se tem numerosas feições de direção preferencial E-W,

com mais expressão nos azimutes 45° , 315° e 360° . Também se destacam lineamentos de direção NW-SE nos azimutes 45° e 90° .

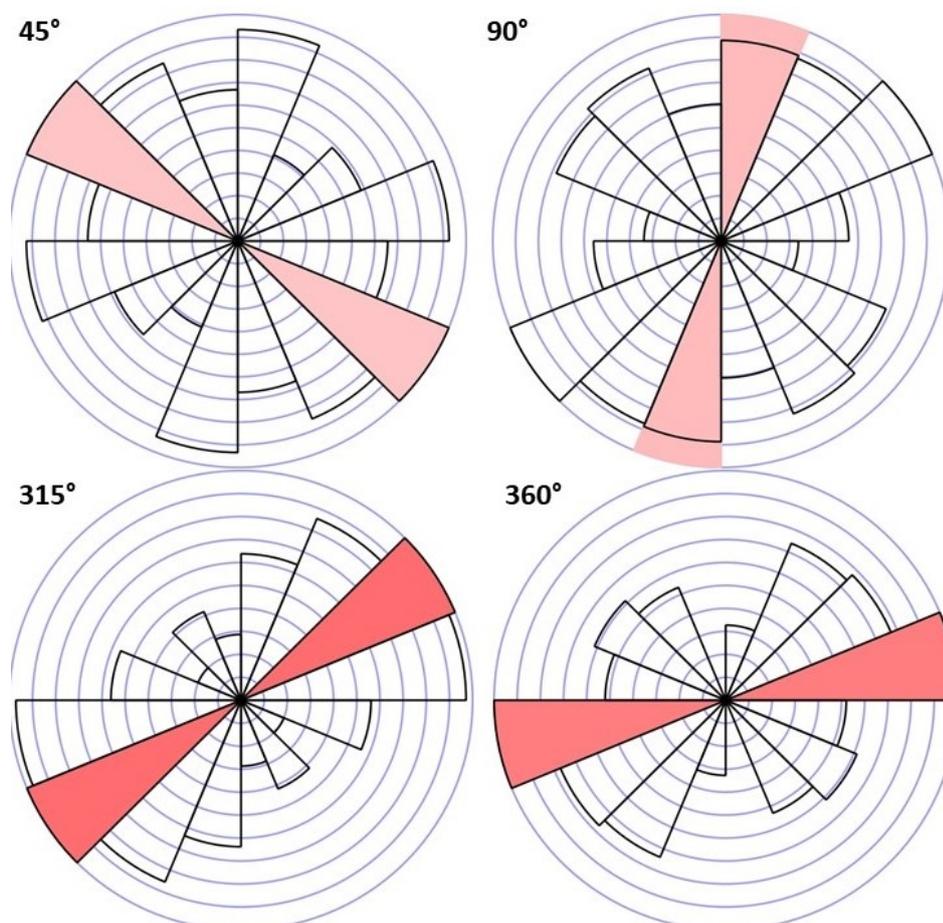


Figura 8. Diagramas de rosetas. **Fonte:** Autores (2022)

Foram identificadas feições positivas em crista com sentido preferencial NE- 30° e NE- 60° , além de falhas estruturadas em sentido NE-SW. Em destaque, se identificam vales encaixados em falhas de direção E-W, principalmente na porção mais a sul da bacia, próximo a sua confluência com o rio São Francisco. O diagrama de roseta mostra uma relativa heterogeneidade de direções, porém com direções nitidamente dominantes. Para as feições negativas, o azimute de iluminação 45° mostrou um predomínio de lineamento de direção NO-SE, E-W, N-S e NNW-SSE. Enquanto o azimute 90° teve direções mais homogêneas NE-SW, NNE-SSW e NNW-SSE. Esses dados mostram falhas predominantes de direção E-W e NE-SW que podem condicionar canais encaixados.

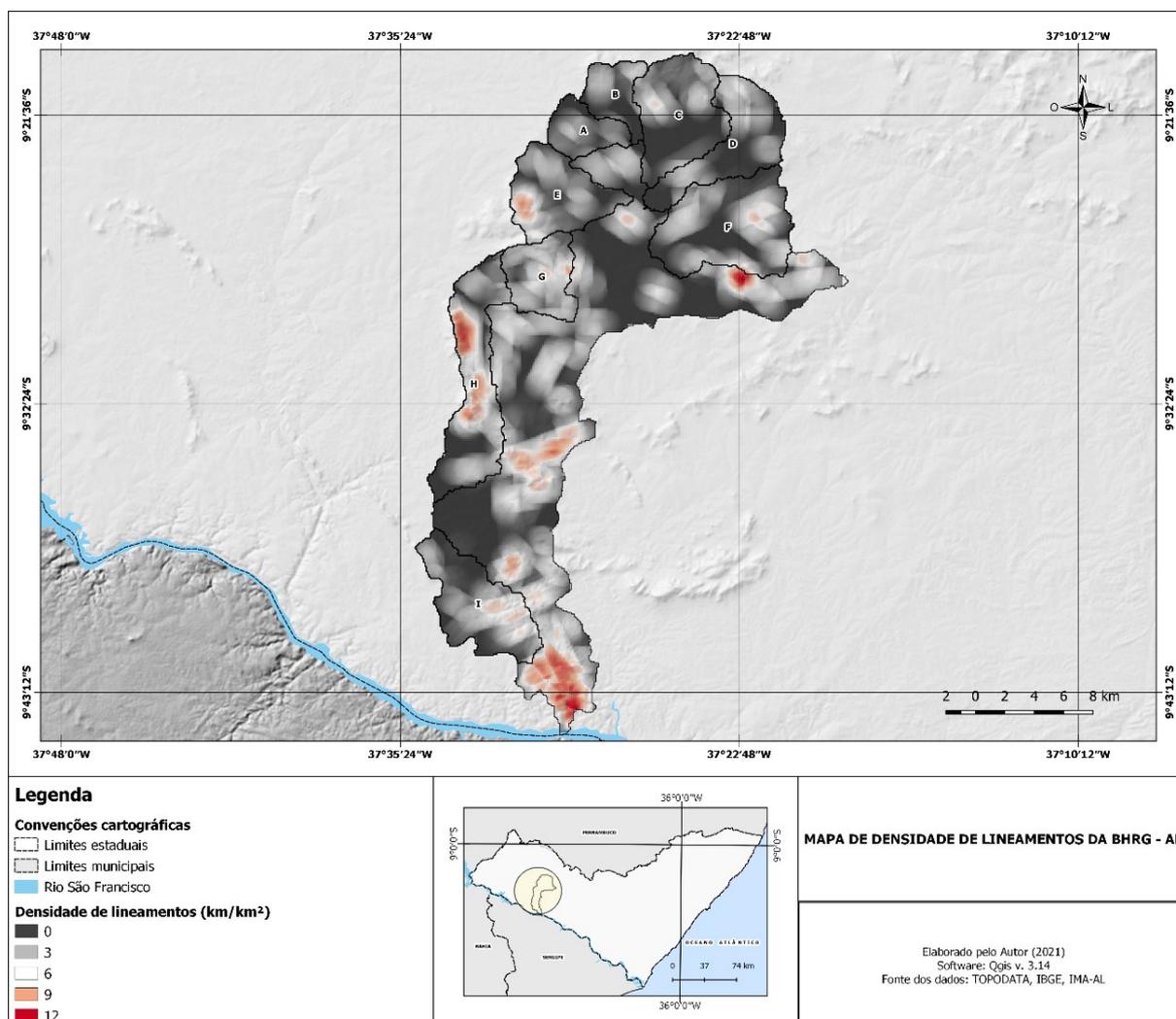
Já nas feições positivas, no azimute de iluminação 315° têm-se um maior número de direção NNE-SSW e menor expressão de E-W. No azimute 360° se destacam as direções NE-SW, NNE-SSW e E-W. Os lineamentos que correspondem a vales retilíneos encaixados nas falhas são predominantes na porção meridional da bacia, com grande expressão areal nos setores sul e sudeste. Enquanto feições positivas

com presença de cristas foram concentradas nas porções central e setentrional. A predominância dos lineamentos em direção NE-SW está condizente com a identificação de zonas de cisalhamento e falhas, demonstradas por Brito et al (2009).

O mapa de densidade de lineamentos (Figura 9) expressa a distribuição da concentração de lineamentos (negativos e positivos) em toda a área da bacia. Nota-se que, com exceção da porção mais meridional da bacia com presença de numerosos lineamentos negativos, o que se observa com destaque é a maior concentração de densidade na sub-bacia H.

A partir deste fator, se torna viável relacionar o controle estrutural representado pela presença de lineamentos com os fatores de forma da bacia. Todas as sub-bacias possuem o mesmo nível de base, o rio principal da BHRG. Logo, uma análise entre seus índices e a presença/ausência de controle estrutural pode ser tecida.

Como supracitado, as sub-bacias não mostram uma grande variabilidade dos valores de K_f , K_c e IC , com exceção da sub-bacia H com os valores que denotam uma bacia de formato mais alongado que as demais. Assim, o controle estrutural na sub-bacia H pode ter condicionado a forma da bacia para seu formato alongado. Esse formato também pode indicar que nesta região, a drenagem não se desenvolveu de forma que permitisse que sua dinâmica hidrológica fosse imposta através da estrutura. Esse fato pode ser comprovado ao se observar o mapa de densidade de drenagem (Figura 7) que mostra os maiores valores de densidade de drenagem da bacia.



Com exceção dos valores associados ao curso principal da BHRG, os valores de densidade com maior variabilidade espacial se encontram na porção superior da bacia, nas sub-bacias de A à F. Porém, alguns dos maiores valores identificados se localizam na sub-bacia H.

Os altos valores de densidade de drenagem na sub-bacia H são possivelmente associados ao efeito de morfoestruturas residuais. Nesta sub-bacia se destaca a crista conhecida como Serra da Taborda, com formações litológicas plutônicas de monzonitos e quatzó-sienitos, rochas resistentes que agem contra a ação de fatores de intemperismo e facilitam o escoamento superficial.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A análise morfométrica da Bacia hidrográfica do Riacho Grande, quando associada aos litotipos encontrados na mesma, se mostrou como uma importante ferramenta

para compreender a influência do controle estrutural nos setores da bacia, sendo possível associar sua morfologia, topografia e estrutura ao sistema de drenagem.

Os valores dos índices morfométricos relacionados às formas das áreas de interesse mostraram que no geral as sub-bacias apresentam formato alongado sob controle estrutural, com destaque à sub-bacia H que apresentou os menores valores de K_f e I_c , em conjunto com o maior valor de K_c .

O índice de densidade de drenagem demonstrou-se como um bom parâmetro para analisar a resposta da rede de drenagem às estruturas das sub-bacias, apresentando um valor de densidade mediano como resposta às rochas plutônicas e metamórficas das unidades geológicas associadas. Estes, associados aos dados de lineamento permitiram aferir que a sub-bacia H apresenta o maior controle estrutural identificado na BHRG.

De maneira mais destacada que nas demais sub-bacias, os dados obtidos para a sub-bacia H indicam maior condicionamento desta à estrutura. Os valores morfométricos variados para um mesmo nível de base sugerem que as estruturas são fatores dominante na paisagem, em especial para a sub-bacia H.

Notou-se, também, uma escassez acentuada de artigos que busquem conciliar a morfometria de formas de bacia nas literaturas atuais, o que restringe a discussão entre o papel da estrutura nas diferentes áreas no nordeste brasileiro.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Universidade Federal de Alagoas (UFAL), ao Instituto de Geografia, Desenvolvimento e Meio Ambiente (IGDEMA-UFAL) e em especial ao Programa de Pós-Graduação em Geografia (PPGG-UFAL) e o Núcleo de Estudos do Quaternário do Nordeste do Brasil (NEQuat – UFAL) pelo apoio técnico e administrativo na produção da pesquisa.

CONTRIBUIÇÕES DOS AUTORES

Concepção: Gabriel do Nascimento Alves e Kleython de Araújo Monteiro. **Metodologia:** Gabriel do Nascimento Alves. **Análise formal:** Kleython de Araújo Monteiro. **Pesquisa:** Gabriel do Nascimento Alves. **Recursos:** Gabriel do Nascimento Alves e Kleython de Araújo Monteiro. **Preparação de dados:** Gabriel do Nascimento Alves. **Escrita do artigo:** Gabriel do Nascimento Alves. **Revisão:** Kleython de Araújo Monteiro. **Supervisão:** Kleython de Araújo Monteiro. Todos os autores leram e concordaram com a versão publicada do manuscrito.

REFERÊNCIAS

- AB'SABER, A. N. Participação das superfícies aplainadas nas paisagens do nordeste brasileiro. **Geomorfologia**, São Paulo, n. 19, p. 1-38, 1969.
- AB'SÁBER, A. N. Participação das depressões periféricas e superfícies aplainadas na compartimentação do planalto brasileiro: considerações finais e conclusões. **Revista do Instituto Geológico**, v. 19, n. 1-2, p. 51-69, 1998.
- AVINASH, K., DEEPIKA, B., & JAYAPPA, K. S. Basin geomorphology and drainage morphometry parameters used as indicators for groundwater prospect: Insight from geographical information system (GIS) technique. **Journal of Earth Science**, v. 25, n.6, p. 1018–1032.
- BARROS, A. H. C. **Climatologia do Estado de Alagoas**. Recife: Embrapa Solos, 2012.
- BIGARELLA, J.J. **Estrutura e origem das paisagens tropicais e subtropicais**. Florianópolis: Ed. Universitária da UFSC, 2003.
- BRITO, M. F. L.; DA SILVA FILHO, A. F.; GUIMARÃES, I. P. Caracterização geoquímica e isotópica do batólito Serra do Catu e sua evolução da interface dos domínios Sergipano e Pernambuco-Alagoas, Província Borborema. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 39, n. 2, p. 324-337, 2009. Disponível em: < <http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/rbg/article/view/7666>>
- CARDOSO, C. A.; DIAS, H. C. T.; BOECHAT, C. P. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do Rio Debossan, Nova Friburgo/RJ. **Revista Árvore**, v. 30, n. 2, p. 241-248, 2006.
- CAVALCANTI, L. C. S. **Geossistemas no estado de Alagoas: uma contribuição aos estudos da natureza em geografia**. Mestrado (Dissertação em Geografia) - Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2010. Disponível em: < <https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/6581>>
- CHEREM, L. F. S. **Análise Morfométrica da Bacia do Alto Rio das Velhas – MG**. Dissertação (Mestrado em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais) – Instituto de Geociências, Programa de Pós-Graduação em Análise e Modelagem de Sistemas Ambientais, Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2008. P. 111. 2008. Disponível em: < <https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/MPBB-7KWLTH>>
- CHRISTOFOLETTI, A. Análise morfométrica de bacias hidrográficas. **Notícia Geomorfológica**, v. 18, n. 9, p. 35-64, 1969.
- CORRÊA, A. C. B.; TAVARES, B. A. C.; LIRA, D. R.; MUTZENBERG, D. S.; CAVALCANTI, L. C. S. (2019) The Semi-arid Domain of the Northeast of Brazil. In: SALGADO, A.; SANTOS L.; PAISANI J. (ed.). **The Physical Geography of Brazil**. Geography of the Physical Environment. Cham: Springer, 2019. p.119-150.
- DORNELLAS, P. C. et al. ANÁLISE MORFOMÉTRICA DA BACIA DO ALTO RIO PARAÍBA, REGIÃO SEMIÁRIDA DO ESTADO DA PARAIBA MORPHOMETRIC

ANALYSES OF HIGH PARAIBA RIVER BASIN, SEMIÁRID REGION OF PARAIBA STATE. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 21, n. 3, 2020. Disponível em: < <http://www.lsie.unb.br/rbg/index.php/rbg/article/view/1757> >

DAVIS, W. M. The geographical cycle. **The Geographical Journal**, v. 14, n. 5, p. 481-504, 1899.

ETCHEBEHERE, M. L. C; SAAD, A. R; FULFARO, V. J. ANÁLISE DE BACIA APLICADA À PROSPECÇÃO DE ÁGUA SUBTERRÂNEA NO PLANALTO OCIDENTAL PAULISTA, SP. **Geociências (São Paulo)**, v. 26, n. 3, p. 229-247, 2007. Disponível em: < <http://ppegeo.igc.usp.br/index.php/GEOSP/article/view/9657> >

FRYIRS, Kirstie A.; BRIERLEY, Gary J. **Geomorphic analysis of river systems: an approach to reading the landscape**. John Wiley & Sons, 2012.

GONÇALVES, R. B; FONSECA, D. N; CORREA, A. C. B. Padrões de Fotolineamentos Aplicados à Análise Morfoestrutural da Bacia do Rio Mamanguape, Paraíba. **Revista do Departamento de Geografia**, v. 34, p. 43-54, 2017. Disponível em: < <https://www.revistas.usp.br/rdg/article/view/133284/137147> >

GIUSTI, CHRISTIAN. TWO RE-EVALUATIONS OF DAVIS 'GEOGRAPHICAL CYCLE" AT THE TURN OF THE 1960S. **William Morris Davis-Revista de Geomorfologia**, v. 1, n. 2, p. 21-59, 2021.

HORTON, R.E. Drainage basin characteristics. **Trans. Am. Geophys. Union**, v. 13, p. 350-36, 1932.

HORTON, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins; hydrophysical approach to quantitative morphology. **Geological society of America bulletin**, v. 56, n. 3, p. 275-370, 1945.

LANA, C. E; ALVES, J. M. de P; CASTRO, P. T. A. Análise morfométrica da bacia do Rio do Tanque, MG-Brasil. **Rem: Revista Escola de Minas**, v. 54, n. 2, p. 121-126, 2001. Disponível em: < <https://www.scielo.br/j/rem/a/ZdVsdMXsxTZ4ZzjNkG6Jmqh/?lang=pt> >

MAHALA, A. The significance of morphometric analysis to understand the hydrological and morphological characteristics in two different morpho-climatic settings. **Applied Water Science**, v. 10, n. 1, p. 1-16, 2020.

MAIA, R. P.; BEZERRA, F. H. R.; SALES, V. C. Geomorfologia do Nordeste: concepções clássicas e atuais acerca das superfícies de aplainamento nordestinas. **Revista de Geografia (Recife)**, v. 27, n. 1. Esp, p. 6-19, 2010. Disponível em: < <https://periodicos.ufpe.br/revistas/revistageografia/article/view/228857> >

MILLER, V.C. A quantitative geomorphic study of drainage basin characteristics in the Clinch Mountain area. Virginia and Tennessee. **Proj. NR 389-402**, Tech. Rep 3, Columbia University, Department of Geology, ONR, New York, 1953.

MISSURA, R. **Bacia do Riacho Pioré-PE, análise morfotectônica e morfoestratigráfica**. Tese (Doutorado em Geografia) - Centro de Filosofia e Ciências Humanas, Programa de Pós-graduação em Geografia, Universidade

Federal de Pernambuco. Recife, 2013. Disponível em: <
<https://repositorio.ufpe.br/handle/123456789/10692>>

MOLION, Luiz Carlos Baldicero; BERNARDO, S. de O. Uma revisão da dinâmica das chuvas no nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 17, n. 1, p. 1-10, 2002.

MONTEIRO, C. A. F. William Morris Davis e a teoria geográfica. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 2, n. 1, 2001. Disponível em: <
<http://www.lsie.unb.br/rbg/index.php/rbg/article/view/4>>

MONTEIRO, K. A; BARROS CORRÊA, A. C. 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.

PARANHOS FILHO, A. C. et al. Avaliação multitemporal das perdas de solo na bacia do Rio Taquarizinho-Ms. **Boletim Paranaense de Geociências**. n. 52, p. 49-59, 2003. Disponível em: < <https://revistas.ufpr.br/geociencias/article/view/4200>>

PETROVSZKI, Judit; TIMÁR, Gábor. Channel sinuosity of the Körös River system, Hungary/Romania, as possible indicator of the neotectonic activity. **Geomorphology**, v. 122, n. 3-4, p. 223-230, 2010.

REBOITA, Michelle Simões et al. Causas da semi-aridez do Sertão nordestino (the causes of Semi-Aridity in the Northeast "Sertão"). **Revista Brasileira de Climatologia**, v. 19, 2016.

STRAHLER, A. N. Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topography. **Geological Society of America Bulletin**, v. 63, n. 11, p. 1117-1142, 1952.

STRAHLER, A. Quantitative Geomorphology of Drainage Basins and Channel Networks. In: Chow, V. **Handbook of Applied Hydrology**. New York: McGraw Hill, 1964. p. 439-476.

SIDDIQUI, Saima; CASTALDINI, Doriano; SOLDATI, Mauro. DEM-based drainage network analysis using steepness and Hack SL indices to identify areas of differential uplift in Emilia–Romagna Apennines, northern Italy. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 10, n. 1, p. 3, 2017.

THOMAS, Jobin; JOSEPH, Sabu; THRIVIKRAMAJI, K. P. Morphometric aspects of a small tropical mountain river system, the southern Western Ghats, India. **International Journal of Digital Earth**, v. 3, n. 2, p. 135-156, 2010.

VILLANUEVA, T. C. B.; MARTINS, V. S. **Geodiversidade do Estado de Alagoas**. Salvador: CPRM, 2016.

VILLELA, S. M.; MATTOS, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGraw-Hill do Brasil, 1975.

STRAHLER, A.N. Hypsometric (area-altitude) analysis and erosional topography. **Geological Society of America Bulletin**, v. 63, p. 1117-1142, 1952.

WALCOTT, R. C.; SUMMERFIELD, M. A. Scale dependence of hypsometric integrals: an analysis of southeast African basins. **Geomorphology**, v. 96, n. 1-2, p.174-186, 2008.



Revista Geonorte, Programa de Pós-Graduação em Geografia. Universidade Federal do Amazonas. Manaus-Brasil. Obra licenciada sob Creative Commons Atribuição 3.0

