

Análise quantitativa da variabilidade espacial da densidade de drenagem com o estimador de densidade de Kernel em ambiente SIG

Rafael Gomes Siqueira¹
Vinício Coelho Lima²
José João Lelis Leal de Souza¹

¹ Universidade Federal de Viçosa - UFV
Avenida Peter Henry Rolfs, s/n – 36570-900 – Viçosa – MG, Brasil
{rafael.geo.siqueira, jjlelis}@gmail.com

² Universidade de Brasília - UnB
Caixa Postal: 04386 - 70910-900 -Asa Norte - Brasília- DF, Brasil
viniciovcl@gmail.com

Abstract. Defined as the ratio between length of streams and the basin area, the drainage density is recognized as one of the most important morphometric variables in the environmental and hydrological analysis in watersheds. This variable depicts the drainage network efficiency in relief dissection and sediment transport. However, the use of drainage density is still limited because operational and conceptual aspects lack of a suitable methodology, mainly to analysis of spatial variability this parameter. The diversity of mathematical alternatives applied in Geographic Information System - GIS environment brings in not comparable results with different quantitative values. Thus, we aimed to suggest a quanti-qualitatively consistent methodology for the analysis of spatial variability of drainage density. The River Basin Glory, State of Minas Gerais, was defined as study area. The drainage density was calculated using a kernel density estimator in SIG environment and subsequently the numerical values obtained were compared with the drainage density gained with the traditional method of Horton. The drainage density generated by the kernel method was satisfactory, qualitatively and quantitatively, to the River Basin Glory. The parameter allowed analyzing the spatial variability of drainage density, with the support consistent numerical values that contribute to the better understanding of the dynamics of river basins.

Palavras-chave: watershed, morphometric analysis, drainage network, numerical validation, bacia hidrográfica, análise morfométrica, rede de drenagem, validação numérica.

1. Introdução

A densidade de drenagem é reconhecida como uma das variáveis morfométricas mais importantes na análise ambiental e hidrológica de bacias hidrográficas. Parâmetro definido por Horton (1945), este índice é expresso pela relação entre o comprimento total dos cursos d'água de uma bacia e a sua área total (CHRISTOFOLETTI, 1980). Esta variável, associada com a declividade do terreno, retrata a eficiência da rede de drenagem e a disponibilidade de canais para o transporte de materiais detríticos (ALVES e CASTRO, 2003), sendo de extrema utilidade para a representação da dissecação do relevo pela ação fluvial. Além disso, a densidade de drenagem é um parâmetro associado ao comportamento hidrológico das rochas, visto que em litologias onde a infiltração é mais dificultada há maior escoamento superficial, gerando possibilidades maiores para a esculturação de canais permanentes e consequentemente densidade de drenagem mais elevada (TEODORO et al., 2007).

Embora seja útil aos estudos morfométricos, o uso da densidade de drenagem ainda é restrito, uma vez que aspectos conceituais e operacionais carecem de uma metodologia adequada na análise da variabilidade espacial da densidade de drenagem (TUCKER et al., 2001). Tratando-se originalmente de uma grandeza espacial dada por uma média, diferentes alternativas matemáticas vêm sendo implementadas em ambientes de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), e envolvem a aplicação de técnicas (geo) estatísticas (descritores de densidade, análise fractal, krigagem) e de processamento digital de imagens, através de operadores focais em janelas móveis (GROHMANN e RICCOMINI, 2009; GROHMANN et al., 2011; CELARINO e LADEIRA, 2014; SIQUEIRA, 2016).

A diversidade de metodologias empregadas para o cálculo da densidade de drenagem acarreta em resultados com diferentes valores qualitativos e principalmente quantitativos, impedindo a comparação entre estudos com a mesma temática. Embora esses desvios não constituírem um impedimento às pesquisas de cunho qualitativo em análises geomorfológicas (HIRUMA e PONÇANO, 1994; VOLKMER et al., 2010; LIMA, 2015), verifica-se que a simples distribuição numérica em mapas é de pouca utilidade para o entendimento da influência dos fatores que controlam sua distribuição espacial (BETTU e SOARES, 2013).

Desta forma, tem-se como objetivo neste trabalho sugerir uma metodologia para a análise da variabilidade espacial da densidade de drenagem que possua consistência quantitativa e qualitativa, tendo-se como área de estudo a Bacia Hidrográfica do Rio Glória (MG).

2. Metodologia de Trabalho

A Bacia Hidrográfica do Rio Glória (BHRG) localiza-se na mesorregião da Zona da Mata do Estado de Minas Gerais (Figura 1A) e no alto vale da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul. Encontra-se em uma das áreas mais movimentadas do território brasileiro, com diversos dobramentos, falhamentos e escarpas (VIEIRA e GRAMANI, 2015). O relevo da área possui trechos extremamente planos e contínuos, enquanto outros são mais irregulares e heterogêneos. A litologia, clima e vegetação representam, de forma geral, as áreas escarpadas do Sudeste brasileiro.

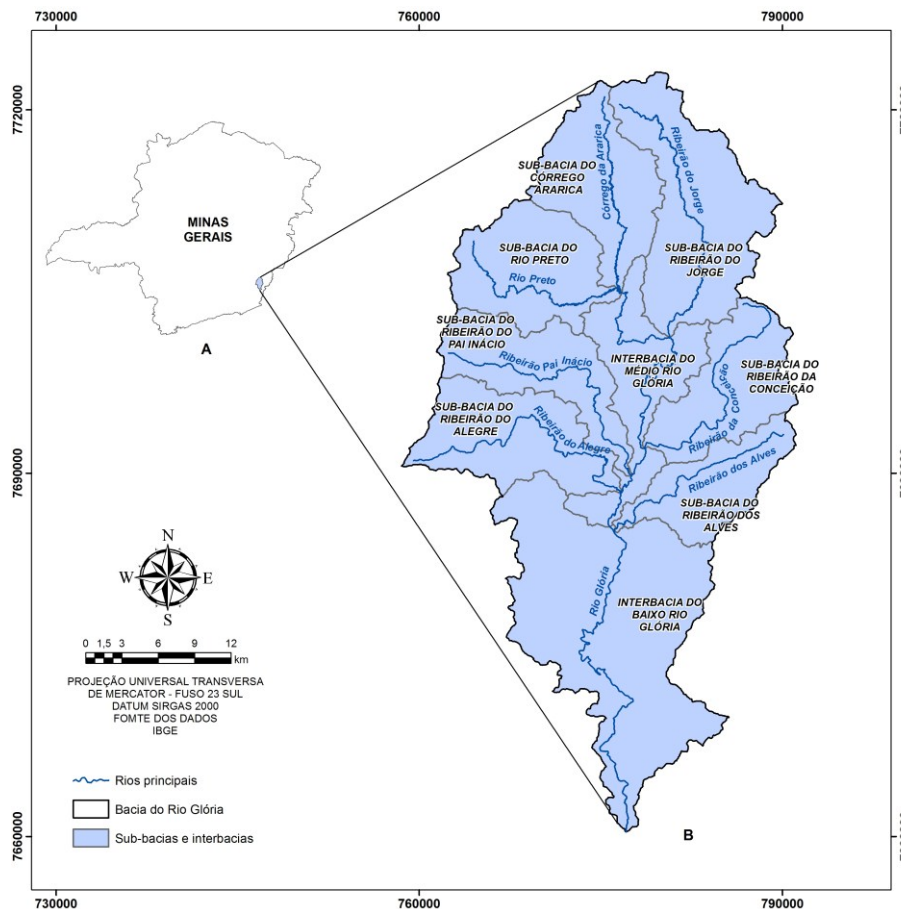


Figura 1. (A) Localização da Bacia Hidrográfica do Rio Glória; (B) Sub-bacias e interbacias da área de estudo.

O processamento dos dados espaciais utilizados nesta pesquisa foi realizado no software

ArcGIS 10.1®. A área precisa da BHRG e das suas sub e interbacias principais (Figura 1b) foi extraída a partir do Modelo Digital de Elevação Hidrológicamente Consistente (MDEHC) de resolução espacial de 10 metros. O MDEHC foi confeccionado a partir de cartas planialtimétricas com curvas de nível de equidistância de 20 metros, pontos cotados e hidrografia em escala de 1:50.000, que foram corrigidos topologicamente (CAMARGO, 2012) antes da interpolação no algoritmo *Topo to Raster*. Posteriormente foi realizada a eliminação das depressões espúrias do MDEHC, garantindo consistência hidrológica ao modelo (CARDOSO et al., 2006).

A densidade de drenagem foi calculada para a BHRG e suas sub e interbacias de acordo com o método original proposto por Horton (1945) (Equação 1), servindo como referência para a validação quantitativa da densidade de drenagem calculada a partir do estimador de Kernel:

$$Dd = L_t / A, \quad (1)$$

sendo Dd a densidade de drenagem (km / km^2), L_t comprimento total de todos os canais (km) e A a área da bacia (km^2).

A densidade de drenagem com o estimador de Kernel foi gerada a partir da hidrografia do IBGE na escala 1:50.000, corrigida topologicamente e orientada para jusante. A rede de drenagem foi estruturada de acordo com os ligamentos ou *links*, que representam os trechos dos canais que não recebem afluentes, estendendo-se entre uma fonte e a primeira confluência, a jusante, entre duas junções consecutivas, ou entre a desembocadura e a primeira junção, a montante (CHRISTOFOLETTI, 1980). Após se calcular o comprimento de cada ligamento, o arquivo linear da hidrografia foi convertido em um arquivo pontual, com os pontos mantendo os atributos geométricos dos seus respectivos ligamentos e localizados na extremidade a jusante destes.

O arquivo pontual foi utilizado como dado de entrada para a aplicação do estimador de densidade de Kernel. O estimador de densidade de Kernel é uma ferramenta geoestatística que permite a análise da dispersão ou concentração de um fenômeno espacial (Figura 2). Nessa análise, o estimador compõe uma superfície cujo valor será proporcional à intensidade de amostras por unidade de área. Esta função realiza uma contagem de todos os pontos dentro de uma região de influência, ponderando-os pela distância de cada um à localização de interesse (CÂMARA e CARVALHO, 2001).

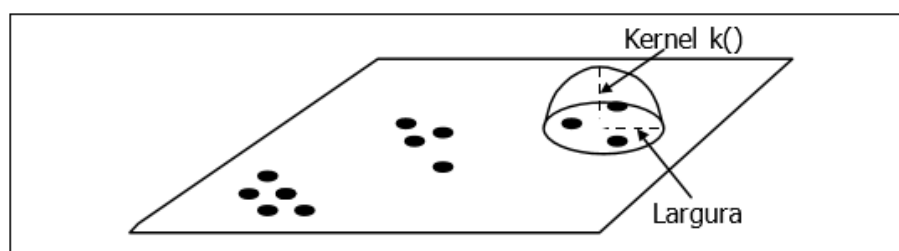


Figura 2. Modelo do estimador de densidade de Kernel (CÂMARA e CARVALHO, 2001).

No caso da aplicação da densidade de drenagem, além da indicação da área de análise (raio do Kernel), é necessário fornecer também os atributos de comprimento da rede de drenagem para o processamento. Com a indicação deste atributo, o Kernel calcula a soma dos valores de comprimento de todos os pixels com distância inferior ao raio definido, e não a contagem dos pontos presentes dentro do raio, como no método da estimação da densidade original. Após a realização de vários testes, optou-se por utilizar como raio de busca do Kernel o valor de 1128 metros, equivalente a aproximadamente 4 km^2 , compatível com a

escala de mapeamento da hidrografia da BHRG. Todas as unidades originais foram mantidas, com a densidade de drenagem sendo apresentada em km/km^2 , o que permitiu a comparação final com o método de Horton (1945).

3. Resultados e Discussão

A densidade de drenagem apresentou valores similares entre as duas metodologias utilizadas, com pouca variação entre as diferentes porções geomorfológicas da Bacia Hidrográfica do Rio Glória (Tabela 1). Em geral, os valores encontrados enquadram-se na classe de baixa densidade de drenagem, de acordo com a classificação de Christofolletti (1969), ou densidade de drenagem média, de acordo com a classificação de Villela e Mattos (1975).

A densidade de drenagem gerada pelo estimador de Kernel variou de 0 a $7,25 \text{ km}/\text{km}^2$ (Figura 4), com valor médio de $2,18 \text{ km}/\text{km}^2$. A baixa variação da densidade de drenagem pode ser atribuída às condições ambientais da área de estudo. Observa-se uma baixa variação da precipitação na BHRG, com valores médios anuais de 1200 a 1500 milímetros. A litologia, componente da unidade cristalina do Escudo Oriental brasileiro, é constituída de gnaisses proterozoicos nas partes mais altas e no médio vale do Rio Glória e granitos de suítes intrusivas nas partes mais baixas da bacia. Desta forma, verifica-se uma resistência à meteorização semelhante em toda a extensão da área de estudo. Por sua vez, os baixos valores estão relacionados às características físicas da litologia e dos solos, com rochas de granulometria fanerítica, e com a predominância de Latossolos Vermelho-Amarelos, que favorecem a infiltração (SIQUEIRA, 2016).

Entre as sub e interbacias, aquela que apresentou o maior valor foi a interbacia do Médio Rio Glória, com $2,35 \text{ km}/\text{km}^2$. Tal valor é relacionado com a maior concentração de falhamentos e de movimentações neotectônicas na região central da BHRG, acarretando em relevos mais dissecados (Figura 3). Os menores valores de densidade de drenagem foram encontrados nas sub-bacias do Córrego do Ararica e do Ribeirão do Jorge ($2,07$ e $2,08$, respectivamente), localizados nos planaltos onde o relevo é menos dissecado e mais plano.

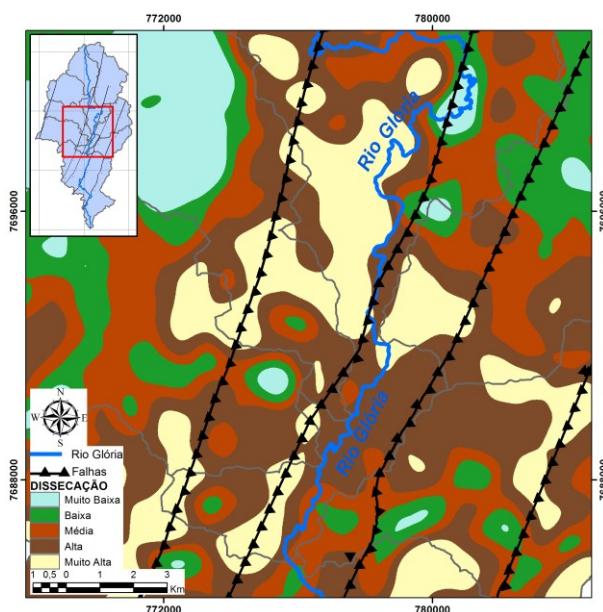


Figura 3. Dissecção do relevo e estrutura geológica no médio vale do Rio Glória

Verificou-se que o cálculo da densidade de drenagem apresentou consistência espacial ou qualitativa ao constatar-se que foi possível discriminar os maiores canais da bacia a partir das zonas de maior densidade de drenagem. A consistência quantitativa do cálculo, considerada

aqui o maior impasse para o estudo da variabilidade espacial da densidade de drenagem, foi avaliada através da comparação dos valores médios do dado gerado pelo Kernel para a BHRG e suas sub e interbacias com os valores adquiridos pela metodologia de Horton (1945) para as mesmas unidades de análise (Tabela 1).

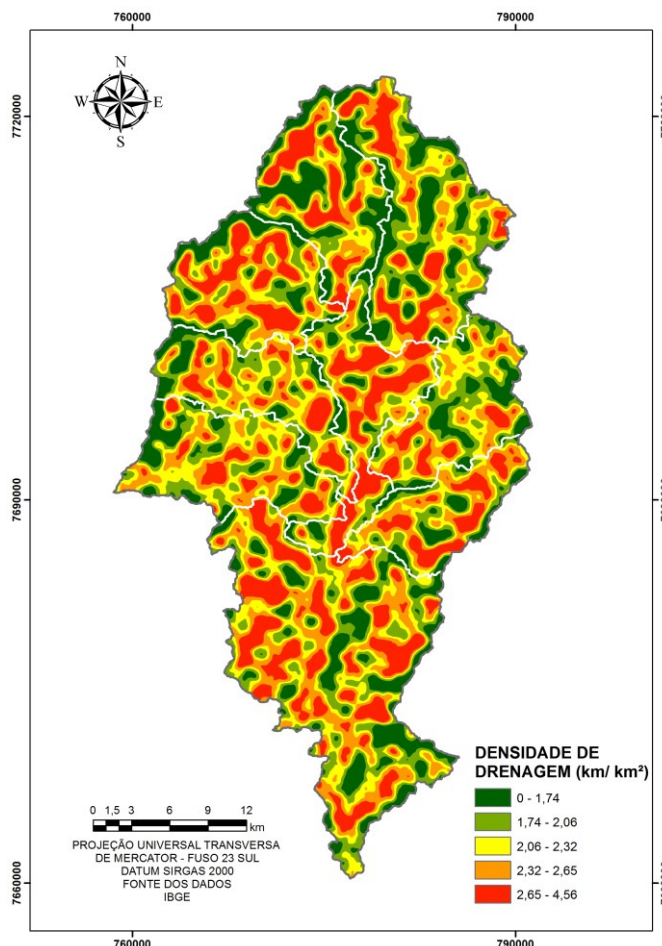


Figura 4. Densidade de drenagem da Bacia Hidrográfica do Rio Glória

Tabela 1. Resultados da densidade de drenagem obtidos nas duas metodologias utilizadas

Bacias Hidrográficas	Kernel (km / km ²)	Horton, 1945 (km/ km ²)	CV (%) do Kernel
Rio Glória	2,18	2,18	25,70
Médio Rio Glória	2,33	2,35	23,60
Baixo Rio Glória	2,23	2,23	24,65
Córrego do Ararica	2,07	2,06	32,20
Ribeirão da Conceição	2,11	2,12	21,80
Ribeirão do Alegre	2,11	2,12	24,17
Ribeirão do Jorge	2,08	2,08	25,48
Ribeirão dos Alves	2,24	2,25	23,65
Ribeirão Pai Inácio	2,17	2,16	23,50
Rio Preto	2,24	2,22	28,57

Verificou-se grande similaridade entre os valores dos dois métodos utilizados para a extração da densidade de drenagem, sendo que três bacias apresentaram valores idênticos

entre o Kernel e a equação de Horton: a própria bacia do Rio Glória, a interbacia do Baixo Rio Glória e a sub-bacia do Ribeirão do Jorge. Entre as bacias que tiveram seus valores variando, nenhuma delas apresentou diferença maior que 0,02 km/km². O coeficiente de variação dos valores de densidade de drenagem variou de 23,50 % na sub-bacia do Ribeirão da Conceição a 32,20 % na sub-bacia do Córrego do Ararica, sendo este último o único valor a extrapolar 30 % de variação, o que influenciou na escolha da média em vez da mediana para a realização da comparação. O coeficiente de correlação dos valores dos dois métodos de 0,99%, ou seja, próximo de 1, confirma estatisticamente a similaridade já identificada visualmente.

Comparando-se os valores de densidade de drenagem obtidos neste trabalho com outras aplicações do estimador de Kernel para a análise morfométrica, verifica-se a importância dos ajustes realizados nos procedimentos para a coerência quantitativa do resultado final. Couto et al. (2011) encontraram valores de densidade de drenagem de 0 a 0,01 km/ km² ao aplicar o parâmetro para análise morfotectônica na Borda Planáltica no Centro-Norte do Paraná, região de condições climáticas semelhantes à bacia do Rio Glória e de litologia mais tenra. Por sua vez, Silva et al. (2009) encontraram valores de grande expressão (0 a 176 km/ km²) no nordeste de Pernambuco, em uma área de condições geológicas e tectônicas semelhantes à bacia do Rio Glória, porém de clima mais seco.

Verifica-se que, dentre as outras técnicas matemáticas encontradas na literatura para o cálculo da densidade de drenagem, a krigagem é a técnica que apresenta a escala de valores mais similar à do estimador de Kernel (CELARINO e LADEIRA, 2014; HARTWIG e RICOMINI,2010). Por sua vez, a análise fractal, apesar de uma técnica muito refinada, possui limitações quanto aos resultados quantitativos, uma vez que os valores mostraram-se sempre restritos a uma escala padrão do método (AZEVEDO, 2002; VESTENA e KOBİYAMA, 2010). É o que conclui ARENAS-RÍOS e SOUZA (data desc.), ao afirmarem que os seus resultados, apesar de consistentes qualitativamente, não permitem afirmar relações diretas em termos quantitativos.

4. Conclusões

O *raster* de densidade de drenagem gerado através do método geoestatístico de Kernel mostrou-se satisfatório tanto qualitativamente como quantitativamente para a Bacia Hidrográfica do Rio Glória, uma vez que foi possível analisar a variabilidade espacial da densidade de drenagem tendo como respaldo valores numéricos consistentes que contribuem para o melhor entendimento da dinâmica das bacias hidrográficas.

Ressalta-se o caráter introdutório deste trabalho, uma vez que se reconhece a existência de algumas variáveis que podem interferir diretamente no resultado final, principalmente nos valores numéricos, como a base cartográfica, a escala de mapeamento e o raio de busca do Kernel. Desta forma, sugere-se que novos testes e trabalhos como este sejam realizados em áreas com condições ambientais e escalas de levantamento distintas, além de se utilizar métodos estatísticos mais apurados para a validação do resultado final.

5. Agradecimentos

Os autores agradecem ao Centro de Estudos e Desenvolvimento Florestal do Instituto Estadual de Florestas de Minas Gerais (CEDEF/IEF) pela disponibilidade da base cartográfica e da infraestrutura e equipamentos necessários para a realização deste trabalho.

6. Referências Bibliográficas

Arenas-Ríos, Mateos; Souza, N. M. Análise Fractal para o Cálculo da Densidade de Drenagem. **Revista Brasileira de Geologia e Engenharia Ambiental**, data desconhecida.

Alves, J.M.P.; Castro, P.T.A. Influência de feições geológicas na morfologia da bacia do rio do Tanque (MG)

baseada no estudo de parâmetros morfométricos e análises de padrões de lineamentos. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 33, n. 2, p. 117- 1245, 2003.

Azevedo, R. B. **Aplicação de análise fractal em rede de drenagem e relevo de bacias hidrográficas de terceira ordem de ramificação**. 2002. 113 p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, Botucatu, 2002.

Bettu, D. F.; Soares, P.C. Interpretação geomorfométrica de parâmetros variográficos do relevo. **Geociências**, v. 32, p. 118-136, 2013.

Câmara, G.; Carvalho, M. S. Análise de Eventos Pontuais. In: Druck, S.; Carvalho, M. S.; Câmara, G.; Monteiro, A. V. M. **Análise Espacial de Dados Geográficos**. Brasília: EMBRAPA, 2004.

Camargo, R. A. **Avaliação da susceptibilidade à erosão e proposição de zoneamento estratégico com vistas à sustentabilidade da bacia hidrográfica do Rio Piranga, MG**. 2012. 104 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa. 2012.

Cardoso, C. A.; Dias, H. C. T.; Soares, C. P. B.; Martins, S. V. Caracterização morfométrica da bacia hidrográfica do Rio Debossan, Nova Friburgo, RJ. **Revista Árvore**, v. 30, n. 2, p. 241-248, 2006.

Celarino, A. L. S.; Ladeira, F. S. B. Análise morfométrica da Bacia do Rio Pardo (MG e SP). **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v.15, n. 3, p. 471-491, 2014.

Couto, E. V.; Manieri, D. D.; Manosso, F. C. ; Fortes, E. Correlação morfoestrutural da rede de drenagem e lineamentos da borda planáltica, Faxinal, Paraná. **Geociências**, v.30, n.3, p. 315-326, 2011.

Christofoletti, A. Análise morfométrica de bacias hidrográficas. **Notícia Geomorfológica**, v. 18, n. 9, p. 35-64, 1969.

Christofoletti, A. **Geomorfologia**. São Paulo: Edgard Blucher, 1980. 188 p.

Grohmann, C. H., Riccomini, C. Comparison of roving-window and search-window techniques for characterising landscape morphometry. **Computers and Geosciences**, v.35, p. 2164-2169, 2009.

Grohmann, C. H., Smith, M. J., Riccomini, C. Multiscale Analysis of Topographic Surface Roughness in the Midland Valley, Scotland. **Geoscience and Remote Sensing, IEEE Transactions on**, v. 49, p. 1200-1213, 2011.

Hartwig, M. E.; Riccomini, C. Análise morfotectônica da região da Serra dos Órgãos, Sudeste do Brasil. **Revista Brasileira de Geomorfologia**, v. 11, n. 1, p.11-20, 2010.

Hiruma, S. T.; Ponçano, W. L. Densidade de drenagem e sua relação com fatores geomorfo-pedológicos na área do Alto Rio Pardo, SP e MG. **Revista do Instituto Geológico**, v. 15, n 1-2, p. 49-57, 1994.

Horton, R. E. Erosional development of streams and their drainage basins - Hydrophysical approach to quantitative morphology. **Bulletin of the Geological Society of America**, v. 56, p. 275-370, 1945.

Lima, V. C. **Caracterização dos solos através da rede de drenagem e sua relação com o índice de intemperismo (Ki) em uma topossequência no SE do Brasil**. 2015. 58 f. Monografia (Bacharelado em Geografia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2015.

Silva, D. G.; Melo, R. F. T.; Corrêa, A. C. B. A influência da densidade de drenagem na interpretação da evolução geomorfológica do complexo de tanques do município de Brejo da Madre de Deus – Pernambuco, Nordeste do Brasil. **Revista de Geografia**, v. 26, n. 3, p. 294-306, 2009.

Siqueira, R. G. **Controle estrutural e climático na dissecação da Bacia Hidrográfica do Rio Glória- MG: aplicação em ambiente SIG**. 2016. 89 f. Monografia (Bacharelado em Geografia) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2016.

Teodoro, V. L. I.; Teixeira, D.; Costa, D. J. L.; Fuller, B. B. O conceito de bacia hidrográfica e a importância da

caracterização morfométrica para o entendimento da dinâmica ambiental local. **Revista Uniara**, n. 20, p. 137-154, 2007.

Tucker, G. E.; Catani, F.; Rinaldo, A.; Bras, R.L. Statistical analysis of drainage density from digital terrain data. **Geomorphology**, v. 36, n. 3-4, p. 187-202, 2001.

Vestena, L. R. A geometria fractal da rede de drenagem da bacia hidrográfica do Caeté, Alfredo Wagner-SC. **Revista Árvore**, v. 34, n. 4, p. 661-668, 2010.

Vieira, B.C.; Gramani, M.F. Serra do Mar: The Most Tormented Relief in Brazil. In: Vieira, B.C.; Santos, L.J.C.; Salgado, A.A.R. **Landscapes and landforms of Brazil**. Springer-Verlag, 2015, p. 285-297.

Villela, S.M.; Mattos, A. **Hidrologia aplicada**. São Paulo: McGRAW-Hill do Brasil, 1975. 245 p.

Volkmer, S.; Camolezi, B. A.; Ribeiro, M. A. G. Geomorfologia da quadricula de Ponta Grossa, PR - uma ênfase aos recursos geotecnológicos utilizados. **Boletim de Geografia**, v. 28, n. 2, p. 29-40, 2010.