

Variáveis auxiliares para o mapeamento da rede de drenagem: correlação espacial entre nascentes, unidades de relevo e litotipos na bacia hidrográfica do rio Benevente-ES

Tony Vinicius Moreira Sampaio

Universidade Federal do Paraná (UFPR)

Cristina Helena Ribeiro Rocha Augustin

Universidade Federal de Minas Gerais (UFMG)

p. 624– 634

revista

Geo 
USP
espaço e tempo

Volume 18, nº 3 (2014)

ISSN 2179-0892

Disponível em:

<http://www.revistas.usp.br/geousp/article/view/90071>

Como citar:

SAMPAIO, T. V. M.; AUGUSTIN, T. H. R. R. Variáveis auxiliares para o mapeamento da rede de drenagem: correlação espacial entre nascentes, unidades de relevo e litotipos na bacia hidrográfica do rio Benevente-ES. *GEOUSP – Espaço e Tempo*, São Paulo, v. 18, n. 3, p. 624-634, 2014.



Este artigo está licenciado sob a Creative Commons Attribution 3.0 License.

Variáveis auxiliares para o mapeamento da rede de drenagem: correlação espacial entre nascentes, unidades de relevo e litotipos na bacia hidrográfica do rio Benevente-ES

Resumo

Processos de mapeamento da rede de drenagem têm limitações metodológicas que resultam em imprecisões e restringem seu uso em estudos ambientais. Tais problemas demandam extensos levantamentos de campo e a busca de variáveis auxiliares que otimizem esses trabalhos, permitindo a análise da acurácia dos mapas produzidos. Esta pesquisa mediu a correlação entre nascentes, litotipos e unidades de relevo, caracterizadas pelo índice de concentração da rugosidade (ICR) na bacia hidrográfica do rio Benevente-ES, concentrando-se nas operações de álgebra de mapa e na aplicação de técnicas de estatística espacial. Os procedimentos adotados identificaram as classes de ICR e litotipos que apresentam maior e menor correlação com a distribuição espacial das nascentes, indicando seu potencial de uso como variáveis auxiliares para a verificação da acurácia das bases cartográficas.

Palavras-chave: Mapeamento da rede de drenagem. Estatística espacial. Nascentes. Litotipos. Índice de concentração da rugosidade.

Auxiliary variables for the mapping of the drainage network: spatial correlation between relieve units, lithotypes and springs in Benevente River basin-ES

Abstract

Process of the drainage network mapping present methodological limitations resulting in inaccurate maps, restricting their use in environmental studies. Such problems demand the realization of long field surveys to verify the error and the search for auxiliary variables to optimize this works and turn possible the analysis of map accuracy. This research aims at the measurement of the correlation between springs, lithotypes and relieve units, characterized by Roughness Concen-

tration Index (RCI) in River Basin Benevente-ES, focusing on the operations of map algebra and the use of spatial statistical techniques. These procedures have identified classes of RCI and lithotypes that present the highest and the lowest correlation with the spatial distribution of springs, indicating its potential use as auxiliary variables to verify the map accuracy.

Keywords: Network drainage mapping. Spatial Statistic. Springs. Lithotypes. Roughness Concentration Index.

Introdução

A representação cartográfica da rede de drenagem é, em geral, o elemento que apresenta as mais significativas imprecisões em uma base cartográfica em função de fatores diversos que interferem em seu processo de produção, apesar dos avanços obtidos via implementação de modelos matemáticos e de técnicas de morfologia matemática e processamento digital de imagem (Sampaio, 2008).

O problema da representação cartográfica da rede de drenagem extrapola a questão da experiência dos fotointérpretes, como já mostraram Chorley e Dale (1972), Band (1993) e Dietrich e Dunne (1993), bem como a capacidade dos modelos de extração automática (processamento digital, morfologia matemática, outros) conforme demonstrado por Lin e Oguchi (2004), Colombo (2007) e Sampaio (2008), resultando em limitações para o uso dos dados fornecidos pelas bases cartográficas até os dias atuais.

A busca por elementos que possibilitem melhorar a acurácia do mapeamento da rede de drenagem é de fundamental importância para as pesquisas que demandam seu uso, seja a partir da identificação de parâmetros para construção de modelos matemáticos dedicados à extração automática da drenagem ou à identificação de atributos físicos do ambiente que permitam avaliar e validar os mapeamentos existentes e aqueles ainda a ser gerados.

Diferentes trabalhos, como Glock (1931), Dietrich e Dunne (1993) ou Montgomery e Dietrich (1989), indicam que a distribuição espacial das nascentes e a evolução da rede de drenagem estão correlacionadas a fatores geológicos, geomorfológicos, hidrológicos e pedológicos cuja incorporação na construção das bases cartográficas poderia melhorar seu mapeamento. No entanto, as associações apresentadas por esses autores baseiam-se em observações empíricas e não quantificadas, demandando uma investigação mais minuciosa das possíveis correlações por eles inferidas.

Tanto as nascentes como os elementos associados a seu aparecimento e desenvolvimento – e que poderiam ajudar na avaliação e validação dos mapeamentos – correspondem, do ponto de vista cartográfico, às feições com atributos qualitativos, o que dificulta o estabelecimento de correlações pela estatística clássica.

Tomando como objeto empírico de investigação a bacia hidrográfica do rio Benevente-ES (BHRB), a pesquisa cujos resultados se apresentam aqui visa quantificar, por meio de técnicas de correlação espacial, o nível de relacionamento matemático existente entre a distribuição espacial das nascentes, os litotipos e as unidades de relevo, caracteri-

zadas pelo índice de concentração da rugosidade (ICR), fornecendo subsídios para a formulação de processos de extração automática e para a verificação de acurácia das bases cartográficas já existentes.

Metodologia

O desenvolvimento metodológico para quantificação da correlação espacial adota como fundamento a concepção de que a distribuição espacial das nascentes (evento cartográfico pontual qualitativo) não apresenta padrão independente ou aleatório em relação às unidades de relevo e litológicas da bacia (eventos zonais qualitativos). Assim, espera-se que a distribuição espacial das nascentes não apresente proporcionalidade direta com a área ocupada pelos diferentes atributos apresentados.

Se a distribuição espacial das nascentes apresenta distribuição espacial quantitativamente similar à área ocupada pelos atributos zonais analisados, ou seja, se a quantidade observada das nascentes for proporcional à área ocupada por esses atributos, infere-se que o padrão de distribuição espacial é independente ou aleatório, não sendo possível estabelecer a associação numérica entre eles e, conseqüentemente, inviabilizando esses elementos como auxiliares da cartografia da rede de drenagem.

Sendo o número de ocorrência de nascentes desproporcional à área ocupada pelos atributos testados (unidades litológicas e de relevo), infere-se que há presença de correlação numérica entre eles (positiva ou negativa), podendo esta ser quantificada da seguinte forma:

$$R_{pz} = \{(n_{pz} / \sum p) / (s_z / \sum s)\} - 1 \quad (1)$$

Onde:

R_{pz} – é a correlação numérica entre o atributo pontual (qualitativo) e o zonal (qualitativo ou quantitativo ordenado – séries discretas), cujos valores variam de 0 a $> \pm 1$, sendo os valores maiores e menores que 0 indicativos de correlação positiva ou negativa, ou ainda, R_{pz} – indica quantas vezes o fenômeno pontual ocorreu associado espacialmente ao zonal, sendo valores acima de +0,5 ou abaixo de -0,5, indicadores de possível correlação espacial e, valores entre $\pm 0,5$ (próximos a zero) indicativos de não correlação espacial entre o elemento pontual e o zonal em análise.

n_{pz} – é o número de ocorrências do evento pontual na área do elemento zonal que se deseja analisar. Caso o elemento zonal se apresente espacialmente distribuído em mais de um polígono, n_{pz} corresponderá ao somatório de ocorrências do elemento pontual nos mesmos.

$\sum p$ – somatório das ocorrências do elemento pontual na área total de estudo.

s_z – área do polígono ou somatório das áreas dos polígonos cujo atributo se deseja analisar.

$\sum s$ – somatório das áreas de todos os polígonos da área de estudo ou área total de estudo.

O uso do termo correlação espacial empregado neste trabalho difere em termos de formulação matemática da correlação utilizada pela estatística clássica, mas não no sentido conceitual, sendo também entendido como associação numérica entre duas variáveis e indica o grau de relacionamento linear entre as mesmas (Mingoti, 2005).

O cálculo pode ser feito em duas etapas: na primeira, as operações com as camadas

de dados, incluindo a junção espacial (operador em SIG: *spatial join*), o cálculo das áreas dos polígonos e o número de eventos pontuais por atributo zonal (operadores em SIG: *calculate geometry* e *summarize*); na segunda etapa, calcula-se a correlação espacial propriamente dita, o que se pode fazer com planilhas eletrônicas.

A base geológica empregada na pesquisa foi desenvolvida pelo convênio DNPM/CPRM/UFMG, de 1993, na escala 1:100.000, tendo sido convertida para o formato digital pelo *software* ArcGis 9.3, com apoio em trabalhos de campo e de fotointerpretação sobre imagens Ikonos (resolução espacial de 4 m), CBERS (resolução espacial de 20 m) e Landsat (resolução espacial 30 m) para verificação e ajuste dos limites das unidades.

Ainda, após a construção da base cartográfica digital foram empregados processos de verificação da consistência topológica, objetivando-se remover problemas de vazios ou sobreposições entre polígonos que pudessem interferir nos resultados das análises e cruzamentos de mapas.

As unidades de relevo foram delimitadas empregando-se o índice de concentração da rugosidade global (Sampaio, 2008), por apresentar padrão sistemático e uniforme de compartimentação do relevo e, por apresentar grau de correlação acima de 80% com as unidades geomorfológicas delimitadas por técnicas de interpretação direta (Ross, 1992; IBGE, 1995), sendo a principal vantagem da metodologia a compartimentação padronizada do relevo em unidades com similares níveis de dissecação.

Esse índice é obtido a partir da transformação do modelo digital de elevação (MDE) em valores de declividade, os quais são convertidos para o formato de pontos (vetorial), aos quais se aplica o estimador de densidade por Kernel (Kernel estimator), o que resulta num novo arquivo matricial, em que cada pixel apresenta a soma dos valores de declividade de todos os pixels com distância inferior ao raio definido (raio de busca).

O ICR pode ser local ou global (Sampaio, 2008), sendo o local empregado para compartimentações exploratórias de unidades locais de relevo (raio de busca livre) e, o ICR global para análise regional e comparativa entre unidades de relevo, empregando como raio de busca 1.128 m (equivalente a aproximadamente 4 km²).

O ICR global destina-se a identificação e delimitação de unidades morfológicas e hidro-lógicas que configuram padrões regionais de relevo, podendo ser usado como modelo quantitativo de comparação entre diferentes ambientes morfológicos, sendo a sua eficácia demonstrada por diferentes trabalhos (Sampaio, 2008; Sampaio; Augustin, 2008; Nascimento, Reis Neto; Rebelo, 2010; Fonseca, 2010).

Caracterização litológica e unidades de relevo da BHRB

Com área aproximada de 1.092 km² e perímetro aproximado de 240 km, a bacia hidrográfica do rio Benevente-ES fica na região sudeste do estado do Espírito Santo e integra a Região Hidrográfica do Atlântico Sudeste, conforme divisão nacional das bacias hidrográficas da Agência Nacional de Águas (2006).

A geologia apresenta estabilidade tectônica, sendo que as intrusões mais recentes são do Neoproterozoico com aproximadamente 560 Ma. Contudo, apresenta grande número de falhas e extensos contatos geológicos, com indícios de que boa parte das nascentes que compõem a bacia está relacionada a essas feições estruturais (Féboli, 1996).

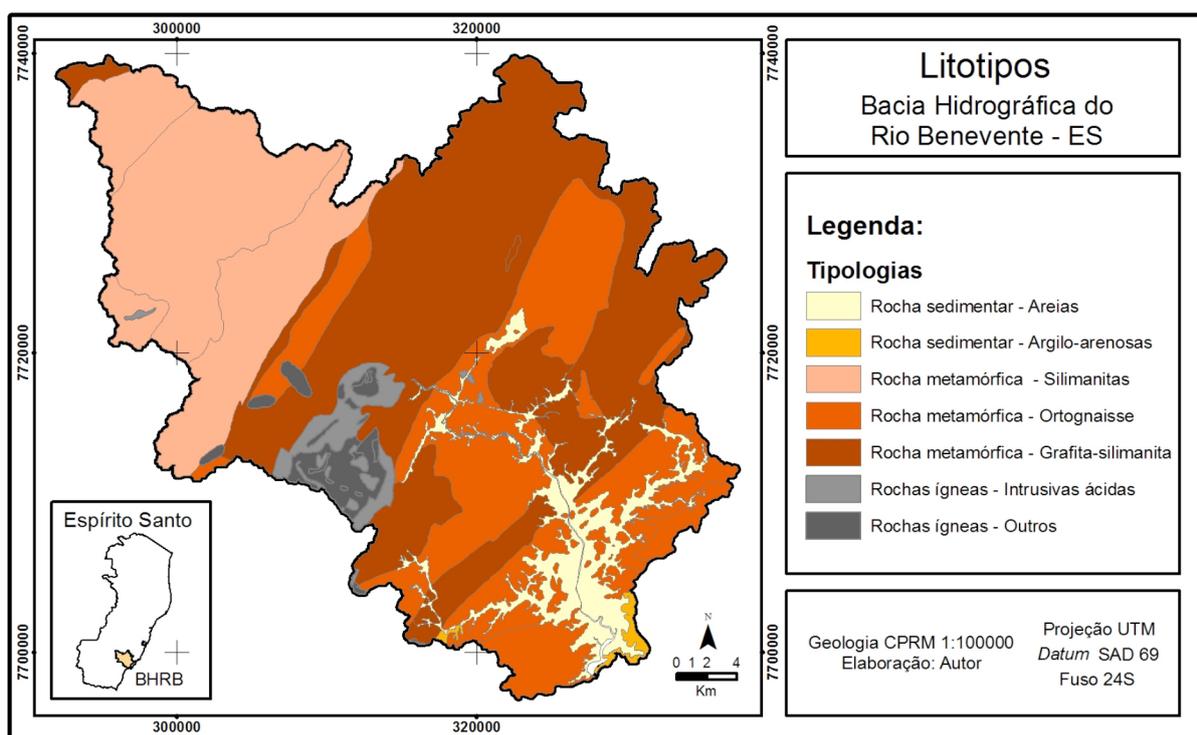
Após a vetorização, ajuste dos limites das unidades litológicas com apoio em trabalhos de campo e verificação da consistência topológica da base cartográfica, constatou-se que BHRB é constituída basicamente por rochas metamórficas, as quais respondem por 87,75% da área total da bacia, com destaque para as grafitas-silimanitas (38,17%) e para as silimanitas (24,67% da bacia), que se caracterizam por se formar sob média pressão e alta temperatura, apresentando grande variabilidade nos valores de porosidade primária e secundária.

No grupo das rochas metamórficas, destacam-se ainda os ortognaisses (derivados de rocha ígnea), que na área da bacia em geral apresentam baixa porosidade primária e secundária, recobrendo 24,67% da área total da mesma.

O segundo litotipo mais recorrente, (Figura 1) corresponde as rochas sedimentares, 6,89% da área da bacia, sendo que 6,44% são depósitos inconsolidados de areias fluviais e, apenas 0,45% de sedimentos areno-argilosos do grupo Barreiras.

Apresenta ainda, rochas ígneas (5,06%), com destaque para o granito 2,39% e para o granodiorito (1,85%) demais intrusivas ácidas (0,13%). Os demais litotipos ocupam porções menores da bacia, em geral com áreas inferiores a 1% do total da mesma.

Figura 1
Litotipos na BHRB-ES



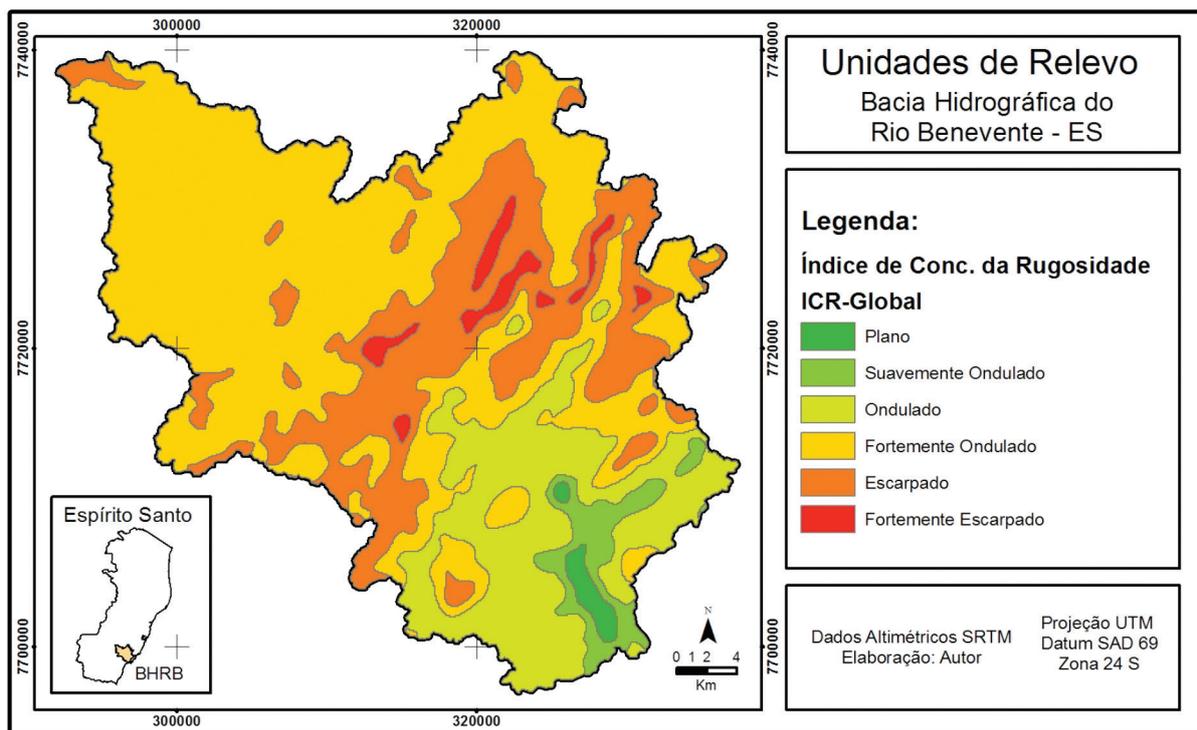
fonte: Féboli (1996). – adaptação: Os autores.

A diversidade de paisagens na bacia hidrográfica do rio Benevente, proporcionada pela associação de diferentes litologias à ocorrência de grandes amplitudes altimétricas (1.880 m) e aos diferenciados regimes de precipitação, sendo inferior a 1.000 mm no leste e superior a 1.800 mm de médias anuais no extremo oeste (Sampaio, 2008), promove o surgimento de distintas unidades geomorfológicas.

Dessa maneira, é possível identificar a ocorrência de áreas planas, associadas à deposição de sedimentos fluviais, outras, suavemente onduladas a onduladas desenvolvidas em material sedimentar areno-argilosos do grupo Barreiras, datado do Terciário, de rochas intrusivas ácidas e básicas das suítes intrusivas e, áreas com predominância de vertentes escarpadas, no domínio das rochas granito-gnaíssicas do Complexo Paraíba do Sul (centro-norte da bacia).

A aplicação do índice de concentração da rugosidade global para a BHRB (Figura 2) possibilitou a identificação das unidades morfológicas com padrões similares de dissecação, agrupadas em seis classes, a saber: Plano: associadas exclusivamente aos depósitos fluviais e marinhos; suavemente ondulado: áreas associadas aos sedimentos fluviais (areias) e holocênicos (argilo-arenosos) do grupo Barreiras; ondulado: correspondente a áreas com solos mais espessos (latossolos), também do grupo Barreiras e a áreas de cambissolos sobre rochas xistosas do Complexo Paraíba do Sul; fortemente ondulado: predominante em cambissolos recoberto diferentes tipos de ortognaisses; fortemente ondulado: correspondendo as áreas de solos espessos (latossolos) sobre rochas metamórficas (silimanitas) e escarpado e fortemente escarpado: áreas de solos rasos, principalmente neossolos, comuns em rochas ácidas do Complexo Paraíba do Sul (grafita-silimanita).

Figura 2
Unidades de relevo na BHRB – ICR global



fonte: Os autores.

Correlações espaciais: nascentes, litotipos e classes de ICR

Os valores de correlação espacial obtidos (Tabela 1) referem-se às observações resultantes da análise da distribuição espacial das nascentes na BHRB, portanto, demandam outras análises mais abrangentes para fins de incorporação dos resultados nos processos de mapea-

mento por extração automática da drenagem, em modelos de regressão ou para fins de uso como variável auxiliar para validação e verificação da acurácia de mapeamentos existentes em outras áreas.

O processo de cruzamento de mapas e tabulação (Tabela 1) dos dados permitiu observar que o maior percentual de nascentes (36,04%) ocorre na área das rochas do Complexo Paraíba do Sul (grafita-sillimanita-cordierita-granada-biotita), que também corresponde à unidade litológica de maior ocorrência espacial na BHRB (38,17% da área da BHRB), indicando ausência de correlação espacial entre as mesmas (-0,056).

Tabela 1
Correlação espacial entre nascentes e litotipos na BHRB-ES

litotipo	área ocupada (%)	nascentes (%)	correlação espacial (Rpz)
areias fluviais	6,44	0,66	-0,897
sedimentos areno-argilosos	0,45	0,25	-0,445
rochas sedimentares (subtotal)	6,89	0,91	-0,868
biotita-hornblenda-diorito	0,45	0,39	-0,138
granito	2,39	1,33	-0,444
granodiorito e quartzo micaxisto	1,85	1,30	-0,298
monzodiorito	0,08	0,08	0,012
muscovita-biotita-granito	0,46	0,28	-0,400
rochas intrusivas ácidas	0,13	0,03	-0,786
rochar ígneas (subtotal)	5,36	6,40	-0,365
grafita-silimanita-cordierita-granada-biotita	38,17	36,04	-0,056
grafita-silimanita-cordierita-granada-biotita c/ quartzo	0,08	0,11	0,450
metagranodiorito	0,15	0,11	-0,257
ortogneisse de composição granítica	12,56	12,23	-0,026
ortogneisse de composição tonalítica	6,47	5,17	-0,201
ortogneisse tonalítico	3,55	3,21	-0,095
ortogneisse enderbítico a tonalítico	2,11	1,55	-0,266
similimanita-biotita	12,22	13,97	0,143
similimanita-biotita granitífero xistoso	12,45	23,29	0,870
rochas metamórficas (subtotal)	87,75	95,68	0,090

Como vemos na Tabela 1, os maiores valores de correlação espacial positiva e negativa para os litotipos presentes na bacia referem-se, respectivamente, à associação das nascentes com o litotipo silimanita-biotita granatífero xistoso (0,870) e com as areias fluviais (-0,897), sendo esse último valor esperado uma vez que tais depósitos apresentam características físicas e topográficas desfavoráveis à formação de nascentes.

As rochas intrusivas ácidas também apresentaram correlação espacial significativa (-0,786), sendo observada a ocorrência de apenas uma nascente nesta unidade. Para os demais litotipos analisados, os valores de correlação espacial encontrados foram inferiores a 0,5 (Tabela 1), indicando pouca ou baixa correlação, positiva e negativa, como é o caso das rochas monzodiorito, granodiorito e quartzo micaxisto, rochas intrusivas ácidas e para o granito.

Na análise da correlação espacial por grupos de rochas (sedimentares, ígneas e metamórficas), observou-se que o maior valor de correlação se deu para as rochas sedimentares (correlação negativa de -0,868) sendo, contudo este valor consequência da forte correlação observada com as areias fluviais e, em menor escala com os depósitos areno-argilosos do grupo Barreiras.

O grupo das rochas ígneas apresentou fraca correlação espacial negativa (-0,365), o que pode estar associado à presença de afloramentos rochosos e de rochas em geral recobertas por solos rasos (neossolos), desfavorecendo a formação de nascentes. Destaca-se que todos os litotipos deste grupo apresentam correlação espacial negativa.

No que se refere a análise da correlação espacial com o grupo das rochas metamórficas, observou-se que a mesma não foi significativa, apresentando comportamento variado entre os litotipos, com valores de correlação negativa e positiva, o que pode estar associado à grande variabilidade espacial dos valores de porosidade primária e secundária, como observaram Coriolano (2002) e Neves (2005), que também demonstraram que variações no grau de metamorfismo e na idade rocha (grau de alteração) afetam a porosidade secundária das rochas, provocando significativas variações locais.

Quanto à correlação com as classes de ICR, observou-se que, das seis classes empregadas, quatro (ondulado, fortemente ondulado, escarpado e fortemente escarpado) (Tabela 2) apresentaram fraca correlação espacial com a distribuição das nascentes, ou seja, que em função da área ocupavam, o número de nascentes mostrou-se dentro do esperado na área de estudo.

Tabela 2
Correlação entre nascentes e classes de ICR na BHRB-ES

unidade de relevo (ICR global)	área ocupada (%)	nascentes (%)	correlação espacial (Rpz)
plano	4,363	0,000	-1,000
suavemente ondulado	5,782	0,857	-0,852
ondulado	13,278	12,666	-0,046
fortemente ondulado	50,286	63,108	0,255
escarpado	24,719	21,488	-0,131
fortemente escarpado	1,572	1,881	0,196

Contudo, a classe de ICR Plano (Tabela 2) apresentou o maior valor de correlação espacial negativa (-1,000) em função da ausência de nascentes nesta área, apesar da mesma ocupar 4,36% da área da bacia. Esse fato encontra explicação na relação direta desta com os depósitos de sedimentos fluviais (areias) do Quaternário, resultando em ambiente restritivos à formação de nascentes em função da elevada porosidade, permeabilidade e profundidade dos depósitos.

O segundo maior valor de correlação espacial negativa se deu com a unidade de relevo suavemente ondulado, ambiente formado pela associação de sedimentos fluviais (areias) com os argilo-arenosos do grupo Barreiras (Terciário), constituindo também áreas muito restritivas à formação de nascentes em função da elevada profundidade dos depósitos associada a elevada porosidade e permeabilidade dos mesmos.

Já o maior valor de correlação positiva com as unidades de relevo da BHRB foi com a classe fortemente ondulada (0,255) (Tabela 2) que, apesar de não significativa, indica um quantitativo de nascentes pouco superior ao esperado para esta unidade em função da área ocupada pela mesma (50,28% da área da bacia). Esse valor pode estar associado à predominância de rochas do Complexo Paraíba do Sul (granitos e gnaisses pouco porosos) recobertos por solos pouco ou moderadamente espessos (neossolos e cambissolos), favorecendo a formação de nascentes em função da baixa capacidade de estocagem associada ao elevados volumes precipitados.

Conclusão

Os procedimentos implementados, referentes aos processos de cruzamento de mapas, tabulação dos dados via SIG e cálculo da correlação espacial entre feições pontuais e zonais com atributos qualitativos, mostraram-se eficientes e de fácil operacionalização, permitindo verificar a correlação entre a distribuição espacial das nascentes com os litotipos e as unidades de relevo delimitadas para a BHRB.

A pesquisa mostrou que a distribuição espacial das nascentes na BHRB tem correlação espacial direta (ora positiva, ora negativa) com determinados litotipos (variando de 0,870 a -0,897) e unidades de relevo caracterizadas pelo ICR (variando de -1 a 0,255), reforçando as inferências de autores como Montgomery e Dietrich (1989) e Dietrich e Dunne (1993) sobre o condicionamento da rede de drenagem por elementos físicos (geologia e relevo) e indicando seu potencial como variáveis auxiliares para validação dos mapas de drenagem, bem como para identificação de unidades hidrogeomorfológicas.

A noção de condicionamento espacial da rede de drenagem já havia sido apresentada por Sampaio (2010) para a mesma bacia, mas a partir de análise empregando modelos de regressão.

Por apresentar expressivos valores de correlação negativa e positiva e mais unidades com correlação significativa, a base geológica mostrou maior potencial para validação dos mapeamentos da rede de drenagem, indicando áreas com maior e menor propensão à ocorrência de nascentes. No entanto, a disponibilidade de bases cartográficas em escala de detalhe ou semidetalhe (1:100.000 e maiores) é muito restrita no Brasil, limitando sua aplicação a trabalhos de mapeamento com grande recobrimento espacial.

Apesar de apresentar valores de correlação espacial menores para o conjunto das classes avaliadas, o ICR também apresentou potencial de emprego para análise dos mapeamentos da rede de drenagem, principalmente para valores negativos de correlação (unidades plano e

suavemente ondulado), facilitando a identificação de áreas restritivas à ocorrência de nascentes e, conseqüentemente, aquelas que cartograficamente devem apresentar menores densidades para a rede de drenagem.

Os valores observados da correlação espacial entre nascentes e ICR são coerentes com as unidades delimitadas, uma vez que estas estão associadas a depósitos sedimentares, permeáveis, porosos e muito profundos, restringindo a formação de nascentes.

Ressalta-se que, pelo fato de o ICR ser obtido diretamente a partir de modelos digital de elevação, inclusive pelo emprego dos dados altimétricos SRTM (Shuttle Radar Topography Mission) disponibilizados gratuitamente pela Agência Espacial Norte-Americana, ele tem grande potencial para auxiliar a verificação de mapeamentos com extensas áreas de recobrimento.

Referências

- ANA. AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Ministério do Meio Ambiente, Secretaria de Recursos Hídricos. *Plano Nacional de Recursos Hídricos: síntese executiva*. Brasília: MMA, 2006.
- ANDRIOTTI, J. L. S. *Fundamentos de estatística e geoestatística*. Porto Alegre: Ed. UNISINOS, 2003.
- BAND, L. E. Extraction of channel networks and topographic parameters from digital elevation data. In: BEVEN, K.; KIRKBY, M. J. *Channel network hydrology*. England: John Wiley & Sons, 1993. p. 447-451.
- CÂMARA, G. S.; CARVALHO, E. J. *Análise de dados espaciais*. Brasília: Embrapa, 2001.
- CHORLEY, R. J.; DALE, P. F. Cartographic problems in stream channel delineation. *Rev. Cartography*, New York, p. 188-201, 1972.
- COLOMBO, R. et al. Deriving river networks and catchments at the European scale from medium resolution digital elevation data. *Catena*, v. 70, n. 3, p. 296-305, 2007.
- CORIOLANO, A. C. F. *Reavaliação de critérios estruturais na hidrogeologia de terrenos cristalinos, com ênfase na neotectônica e sensoriamento remoto*. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Norte, Natal, 2002.
- DIETRICH, W. E.; DUNNE, T. The channel head. In: BEVEN, K.; KIRKBY, M. J. (Eds.). *Channel Network Hydrology*. New Jersey: J. Wiley & Sons, 1993. p. 175-219.
- FÉBOLI, W. L. (Org.). *Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil – Domingos Martins*. DNPM. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. Folha SF24-V-A-VI. Espírito Santo. Escala: 1:100.000. Brasília, DF: DNPM/CPRM/UFMG, 1996.
- _____. *Programa levantamentos geológicos básicos do Brasil – Piúma*. DNPM. DEPARTAMENTO NACIONAL DE PRODUÇÃO MINERAL. Folha SF24-V-A-VI. Espírito Santo. Escala: 1:100.000. Brasília, DF: DNPM/CPRM/UFMG, 1993.
- GLOCK, W. S. Development of Drainage System: A synoptic View. *Geographical Review*, Published by the American Geographical Society, v. 21, n. 3, p. 475-482, July 1931. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/209434>>. Acesso em: 8 maio 2014.

- IBGE. INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. *Manual Técnico de Geomorfologia*. Rio de Janeiro: IBGE, 1995. (Série: Manuais Técnicos em Geociências.)
- LIN, Z.; OGUCHI, T. Drainage density, slope angle and relative basin position in Japanese bare lands from high-resolution DEMs. *Geomorphology*, n. 63, p. 159-173, 2004. Disponível em: <www.sciencedirect.com>. Acesso em: 12 dez. 2014.
- MINGOTI, S. A. *Análise de dados através de métodos de estatística multivariada: uma abordagem aplicada*. Belo Horizonte: Ed. UFMG, 2005.
- MONTGOMERY, D. R.; DIETRICH, W. E. Source areas, drainage density, and channel initiation. *Journal of the American Water Resources Association*, New York, v. 25, n. 8, p. 1907-1918, 1989.
- NASCIMENTO, E. R.; REIS NETO, J. M.; REBELO, A.M.A. Aplicação do índice de concentração da rugosidade do relevo no entendimento do nível de exposição dos sistemas cársticos ocorrentes na região norte do município de Curitiba, PR. *Revista Brasileira de Geomorfologia*, v. 11, n. 2, p. 61-68, 2010.
- NEVES, M. A. *Análise integrada aplicada à exploração de água subterrânea na bacia do rio Jundiá (SP)*. Tese (Doutorado em Geologia Regional) – Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual Paulista, Rio Claro, 2005.
- ROSS, J. O registro cartográfico dos fatos geomórficos e a questão da taxonomia do relevo. *Revista do Departamento de Geografia da USP*, São Paulo, n. 6, p. 17-30, 1992.
- SAMPAIO, T. V. M. Álgebra de mapas e correlação espacial entre feições pontuais e zonais com atributos qualitativos: uma análise a partir da correlação entre a distribuição espacial das nascentes e litotipos da bacia hidrográfica do rio Benevente-ES. In: ABGE/CTCGG, Simpósio Brasileiro de Cartografia Geotécnica e Geoambiental, 7., 2010, Maringá. *Anais... maringá*, 2010. p. 1-11.
- SAMPAIO, T. V. M. *Parâmetros morfométricos para melhoria da acurácia do mapeamento da rede de drenagem: uma proposta baseada na análise da bacia hidrográfica do rio Benevente-ES*. Tese (Doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- SAMPAIO, T. V. M.; AUGUSTIN, C. H. R. R. Análise das incongruências dos índices de dissecação e rugosidade. In: Encontro Nacional de Geomorfologia, 7., 2008, Belo Horizonte. *Anais... Belo Horizonte*, 2008.
- SOARES, A. *Geoestatística para as ciências da terra e do ambiente*. Portugal. Instituto Superior Técnico, 2000.
- VOGT, J. V.; COLOMBO, R.; BERTOLO, F. Deriving drainage networks and catchment boundaries: a new methodology combining digital elevation data and environmental characteristics *Geomorphology*. *Science Direct*, n. 53, p. 211-245, 2003.