



Proposta metodológica para projeto de redes hidrométricas: Parte II - Exclusão, rearranjo e inclusão de estações

Abrahão A. A. Elesbon¹, Demetrius D. da Silva², Gilberto C. Sedyama³,
Abelardo A. A. Montenegro⁴, Carlos A. A. S. Ribeiro⁵ & Hugo A. S. Guedes⁶

¹ TSA/IFES, Colatina, ES. E-mail: abrahao@ifes.edu.br (Autor correspondente)

² DEA/UFV, Viçosa, MG. E-mail: demetrius@ufv.br

³ DEA/UFV, Viçosa, MG. E-mail: g.sedyama@ufv.br

⁴ DTR/UFRPE, Recife, PE. E-mail: abelardo.montenegro@yahoo.com.br

⁵ DEF/UFV, Viçosa, MG. E-mail: cribeiro@ufv.br

⁶ CEng/UFPel, Pelotas, RS. E-mail: hugo.guedes@ufpel.edu.br

Palavras-chave:

análise geoestatística
rede de monitoramento
fluviométrico
rede de monitoramento
pluviométrico

RESUMO

Este artigo apresenta a segunda parte da metodologia desenvolvida para projeto de redes hidrométricas de monitoramento quantitativo em bacias hidrográficas, com ênfase na exclusão, rearranjo e inclusão de estações de monitoramento. A proposta metodológica apresentada tem, como área de estudo, a Bacia Hidrográfica do Rio Doce (BHRD) e se baseia na análise espacial dos mapas gerados pela krigagem para as variáveis regionalizadas: vazão específica mínima com 7 dias de duração e período de retorno de 10 anos ($q_{7,10}$) e precipitação do semestre mais seco (P_{ss}). Aplicando-se a metodologia desenvolvida para a BHRD, verificaram-se melhorias significativas nos desvios padrão percentuais das estimativas de vazão para seis das nove ottobacias estudadas, culminando com o rearranjo de 18 estações e exclusão de duas estações na rede de monitoramento fluviométrico. Verificou-se, ainda, que houve melhorias nas estimativas espacializadas de precipitação com o rearranjo espacial de 12 estações porém se destaca a necessidade de inclusão de 67 estações na rede de monitoramento pluviométrico. A metodologia mostrou-se adequada para o objetivo proposto podendo ser aplicada a qualquer bacia hidrográfica.

Key words:

geostatistical analysis
fluviometric monitoring network
rainfall monitoring network

Methodological proposal for hydrometric network design: Part II - Exclusion, rearrangement and inclusion of monitoring stations

ABSTRACT

This paper presents the second part of the methodology developed to project hydrometric networks of quantitative monitoring of watersheds, emphasizing exclusion, inclusion and rearrangement of monitoring stations. The presented methodology has as study area the Doce River Basin (DRB) and it is based on spatial analysis of maps generated by kriging for regionalized variables: minimum specific flow of 7 days duration and return period of 10 years - $q_{7,10}$ and precipitation of dry season - P_{ss} . Applying the methodology developed for the DRB, it was concluded that there were significant improvements in the standard deviations of estimates of flow for 6 of the 9 ottobacias, culminating with the rearrangement of 18 stations and excluding 2 stations in the gauging monitoring network. It was also observed that there were improvements too in the estimates of spatialized precipitation enabling the spatial rearrangement of 12 stations. It is noteworthy, however, the need for inclusion of 67 stations in the network monitoring rainfall. The methodology was adequate for the proposed objective and can be applied to any watershed.

INTRODUÇÃO

A Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), instituída pela Lei 9.433/97, foi um marco legal no tratamento dos recursos hídricos do Brasil. Um dos instrumentos de gestão de recursos hídricos previstos na PNRH é o Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SINGREH) sendo um dos seus objetivos atualizar, permanentemente, as informações sobre disponibilidade e demanda de recursos hídricos em todo o território nacional; entretanto, o SINGREH só alcançará este objetivo se houver a disponibilidade de uma rede de monitoramento hidrológico confiável em nível nacional.

A Organização Meteorológica Mundial (OMM, 1994) recomenda a revisão periódica das redes hidrométricas levando-se em conta a redução das incertezas hidrológicas trazidas desde a última análise da rede, redução de custo de operação e manutenção da rede e as necessidades de dados confiáveis que garantam os usos múltiplos dos recursos hídricos. Aplicando esses quesitos à rede hidrológica brasileira, urge reorganizá-la, tanto em quantidade dos postos hidrométricos instalados quanto em qualidade das informações fornecidas.

Spence et al. (2007) quantificaram o impacto que a redução do número de estações hidrométricas pode causar na previsão

de vazões extremas na região norte do Canadá. Segundo os autores, a exclusão de 12 estações de monitoramento fluviométrico, devido a pressões fiscais sobre o governo do país, proporcionou um aumento no erro espacial da estimativa de vazão de aproximadamente 16% para todos os regimes de escoamento.

A importância da qualidade da informação hidrológica pode ser observada no trabalho desenvolvido por Mishra & Coulibaly (2009) Os autores desenvolveram uma ampla revisão sobre técnicas de elaboração de projetos de redes hidrometeorológicas em nível mundial dentre elas se destaca a técnica geoestatística.

A técnica de geoestatística vem sendo aplicada em várias áreas do conhecimento científico, podendo-se citar: geologia (Mouslopoulou & Hristopulos, 2011); propriedades físicas dos solos (Motomiya et al., 2011; Bohling et al., 2012; Santos et al., 2012); recursos minerais (Abichequer et al., 2012); climatologia (Fouquet et al., 2011; Ramos et al., 2011; Wanderley et al., 2012); e hidrologia (Ávila et al., 2009; Castro et al., 2010).

Nour et al. (2006) utilizando a técnica geoestatística consideraram as implicações que o projeto de uma rede de monitoramento pluviométrico pode acarretar no mapeamento de precipitações e concluíram que, a partir da krigagem ordinária, a análise geoestatística forneceu bons resultados na identificação de locais para instalação de estações pluviométricas, possibilitando a redução dos erros de estimativa espaciais.

Redes de monitoramento hidrométrico nos moldes previstos na Lei nº 9.433/97 devem priorizar estimativas espaciais que reduzam as incertezas associadas às variáveis de interesse sentido em que este artigo apresenta a segunda parte da metodologia desenvolvida para projeto de redes hidrométricas de monitoramento quantitativo em bacias hidrográficas enfatizando a exclusão, o rearranjo e a inclusão de estações de monitoramento a partir da análise geoestatística dos dados de redes de monitoramento hidrométrico na Bacia Hidrográfica do Rio Doce (BHRD).

MATERIAL E MÉTODOS

A BHRD se situa na região Sudeste do Brasil, entre os paralelos 17° 45' e 21° 15' S e entre os meridianos 39° 30' e 43° 45' W, com altitude média de 578 m. Possui área de drenagem de aproximadamente 83.400 km², dos quais 86% pertencem ao estado de Minas Gerais e 14% ao estado do Espírito Santo. A população na bacia é de aproximadamente 3,1 milhões de habitantes em que 70% se encontram na zona urbana. As principais atividades econômicas desenvolvidas são mineração, siderurgia, silvicultura e agropecuária (PIRH, 2013).

O trabalho foi desenvolvido com base nas séries de dados de 61 estações fluviométricas e 112 estações pluviométricas pertencentes às redes hidrometeorológicas gerenciadas pela Agência Nacional de Águas – ANA e pelo Instituto Nacional de Meteorologia – INMET (Figura 1). As séries empregadas foram constituídas por dados anuais consistidos, correspondentes a um período-base de 30 anos (1976 a 2005).



Figura 1. Distribuição espacial das estações de monitoramento consideradas no estudo

Com o intuito de facilitar a apresentação do trabalho, a BHRD foi subdividida em ottobacias, conforme Resolução nº 30/2002 do Conselho Nacional de Recursos Hídricos. No presente estudo foram consideradas duas variáveis hidrológicas: vazão específica mínima média de sete dias consecutivos e período de retorno de 10 anos - $q_{7,10}$ e precipitação do semestre mais seco - P_{ss} . A variável $q_{7,10}$ foi escolhida por se tratar da vazão mínima de referência adotada pelo estado de Minas Gerais abrangendo 84% da área da bacia; já a variável P_{ss} foi selecionada por apresentar grande variabilidade no âmbito da bacia, segundo PIRH (2013).

Para a espacialização dos resultados foi utilizado o Sistema de Informações Geográficas ArcGIS® 10.0, desenvolvido pelo Environmental Systems Research Institute – ESRI enquanto para a análise geoestatística utilizou-se a ferramenta GEO-EAS®.

A metodologia para exclusão, rearranjo e inclusão de estações de monitoramento em redes fluviométricas e pluviométricas se baseia na técnica de krigagem a partir da aplicação do semivariograma teórico ajustado, validade e espacialização das variáveis hidrológicas e respectivos erros de estimativa, conforme fluxograma apresentado na Figura 2.

Analisando o fluxograma da Figura 2 observa-se que, após a análise geoestatística, além do mapa das variáveis hidrométricas espacializadas, apresentado na primeira parte do trabalho, a krigagem fornece o mapa de desvios padrão das estimativas da espacialização.

A krigagem possibilita a previsão do valor de uma variável regionalizada em certo local em um campo geométrico. Trata-se de um processo de interpolação que leva em consideração os valores observados fornecendo não apenas estimativas em locais não amostrados mas também o erro ou incerteza associada a tais estimativas.

Segundo Landim (2003), os desvios padrão, associados à estimativa, distinguem o método da krigagem em relação aos demais algoritmos de interpolação. Os menores valores do

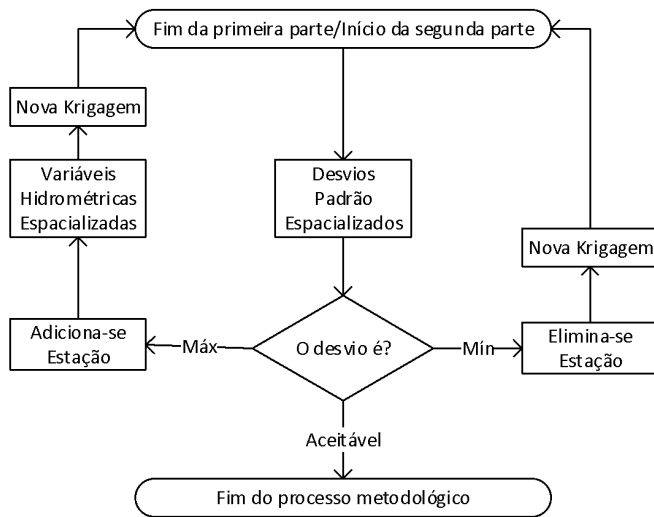


Figura 2. Fluxograma da metodologia proposta para exclusão, rearranjo e inclusão de estações de monitoramento em redes fluviométricas e pluviométricas em operação

desvio padrão coincidem com as áreas de maior densidade de pontos e caso um ponto já conhecido seja um nó da rede, a estimativa neste ponto será livre de erro.

Para estimar a variância dos erros das estimativas pode-se utilizar a função semivariograma para uma distância de separação “h” ao local de interesse. O valor do desvio padrão da estimativa em qualquer ponto é a raiz quadrada do somatório da multiplicação dos pesos obtidos na krigagem pela função semivariograma teórica encontrada.

A proposta metodológica apresentada classifica os desvios padrão das estimativas segundo três configurações possíveis: erro local máximo, erro local mínimo ou desprezível e erro global aceitável. Ressalta-se que a avaliação dos erros das estimativas deverá ser feita pelos órgãos responsáveis pela rede de monitoramento e dependerá de uma série de fatores de cunho estratégico e gerencial, tais como: previsão orçamentária, prioridades na gestão da bacia hidrográfica, propósito da rede e número de profissionais envolvidos, entre outros.

O erro local mínimo ou desprezível pode ser encontrado em regiões em que a densidade de estações é maior que a necessária ou em regiões da bacia nas quais a variabilidade espacial dos dados é pequena. Esta configuração espacial indica a possibilidade de exclusão ou reposicionamento (rearranjo) de estações de monitoramento.

Em bacias nas quais o número de postos é superior ao previsto por OMM (1994) tal otimização pode até resultar numa diminuição do número total de estações, permitindo reduzir os custos de monitoramento sem perder a qualidade da informação.

O erro local máximo normalmente é encontrado em regiões da bacia hidrográfica cuja densidade de estações é baixa ou a variabilidade dos dados é grande. Identifica-se, neste caso, uma região potencialmente propensa a receber uma estação de monitoramento adicional e, caso existam regiões com erros locais desprezíveis, os postos inicialmente excluídos serão reposicionados nessas regiões.

Considerando a estacionariedade do processo de krigagem admitiu-se o valor observado nos locais de inserção das novas estações hidrométricas propostas como sendo igual ao valor simulado (primeira parte do trabalho) obtido no mapa espacializado de cada variável analisada.

Após este procedimento inicial a análise de krigagem para a bacia estudada deverá ser refeita encontrando-se novos locais onde os erros de estimativa serão máximos e se repetindo o procedimento até que o erro global de estimativa da bacia hidrográfica seja considerado aceitável. O erro global será considerado aceitável quando a configuração dos postos excluídos, reposicionados ou incluídos, estiver de acordo com a densidade mínima de estações sugerida pela OMM (1994) e disposta de forma a se obter reduções representativas nos erros de estimativa a serem avaliados pelos responsáveis pela rede.

Com a aplicação da metodologia proposta é possível identificar locais potenciais para a instalação de estações hidrométricas mas para se definir o local exato de implantação das estações de monitoramento devem ser levadas em consideração as condições locais para sua implantação.

Segundo OMM (1994), algumas variáveis intervenientes do processo de escolha do novo local para instalação da estação de monitoramento fluviométrico são: acessibilidade (estradas ou pontes); facilidade de operação; geometria do local (seção encaixada); adaptabilidade às medições (seções retilíneas, com escoamento permanente e uniforme, distante de zonas de remanso, lagoas naturais e lagos artificiais) estabilidade da seção (curva-chave) e sensibilidade quanto à variação de nível (instalação de seção de réguas).

Apesar da evolução dos equipamentos de medição indireta de vazão, as condições hidráulicas e de operação das estações de monitoramento fluviométrico sempre deverão ser avaliadas in loco, de modo a aumentar a confiabilidade das informações geradas; já na escolha de um local para instalação de uma estação de monitoramento pluviométrico também se deve considerar as propriedades físicas e climáticas da região de instalação. Algumas variáveis intervenientes, segundo OMM (1994), para instalação da nova estação de monitoramento pluviométrico são: direção e intensidade do vento; obstáculos que impeçam a circulação natural da precipitação, além de altura do coletor.

Ressalta-se novamente que a abordagem científica proposta apenas identifica regiões da bacia hidrográfica nas quais deverão ser selecionados locais adequados para instalação de novas estações de monitoramento, segundo as orientações específicas da OMM (1994).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Com base nas 61 estações de monitoramento fluviométrico e nas 112 estações de monitoramento pluviométrico utilizadas para a BHRD, estimaram-se as semivariâncias experimentais de $q_{7,10}$ e P_{ss} utilizando-se o estimador clássico.

Para a variável $q_{7,10}$ foram utilizados o incremento (lag) de 13 km, a distância de separação mínima de 10 km e a distância de separação máxima de 100 km. A variável P_{ss} teve de ser preliminarmente transformada logaritmicamente para garantir

a normalidade dos dados de chuva, conforme sugerido por Landim (2003), sendo utilizados o incremento de 21 km e a distância de separação máxima de 190 km para a variável $\log P_{ss}$.

Após a obtenção dos semivariogramas experimentais foram ajustados os modelos teóricos procurando-se caracterizar o comportamento espacial das variáveis estudadas da melhor forma possível; assumiu-se a isotropia do domínio no tocante à estrutura de dependência espacial.

Aplicando a técnica de interpolação de krigagem a partir dos semivariogramas teóricos ajustados obtiveram-se os mapas espacializados apresentados na primeira parte do trabalho e os respectivos mapas de desvio padrão das estimativas (Figura 3) para $q_{7,10}$ e P_{ss} , respectivamente. A transformação logarítmica inversa foi aplicada para apresentação dos dados espacializados da variável P_{ss} .

Mishra & Coulibaly (2009) destacam a técnica geoestatística para análise de redes de monitoramento pluviométrico ressaltando a importância desta informação hidrológica para as bacias canadenses.

Na análise da Figura 3A fica evidenciado que os maiores erros de estimativa para a variável $q_{7,10}$ ocorrem nas regiões de cabeceira, ottobacias 761 (Rio São José), 764 (Rio Suaçuí Grande), 766 (Rio Santo Antônio) e 769 (Rio Piranga). Os desvios padrão associados à estimativa de $q_{7,10}$, em $L s^{-1} km^{-2}$, variaram de 0,78 a 1,66.

As áreas mais deficientes de monitoramento pluviométrico da BHRD, com base na Figura 3B, são as regiões de cabeceira evidenciadas nas ottobacias 766, 768 e 769, as regiões centrais, ottobacias 764 e 765 e a região próxima à foz, ottobacia 761. Os desvios padrão associados à estimativa da precipitação P_{ss} , variaram de 10,13 a 23,26 mm.

A partir da análise geoestatística dos dados de precipitação constatou-se que, além de quantitativamente não atender às condições de densidade mínima de estações sugerida pela OMM (1994), a distribuição espacial da rede de monitoramento pluviométrico da BHRD pode ser aprimorada, sobretudo pelo rearranjo das estações localizadas em regiões densamente monitoradas para locais com monitoramento deficitário.

Nour et al. (2006) identificaram, utilizando a análise geoestatística a partir da krigagem ordinária, locais ideais para a instalação de estações pluviométricas que possibilitaram a redução de erros das estimativas espaciais no Canadá.

Com o objetivo de se comparar os resultados obtidos para as variáveis em análise, dividiu-se a matriz de desvio padrão pela sua respectiva matriz de estimativas obtendo-se o desvio padrão percentual para a área em estudo. Na Tabela 1 são apresentados os desvios padrão percentuais obtidos para a rede de monitoramento fluviométrico e pluviométrico existentes na BHRD dividida por ottobacias.

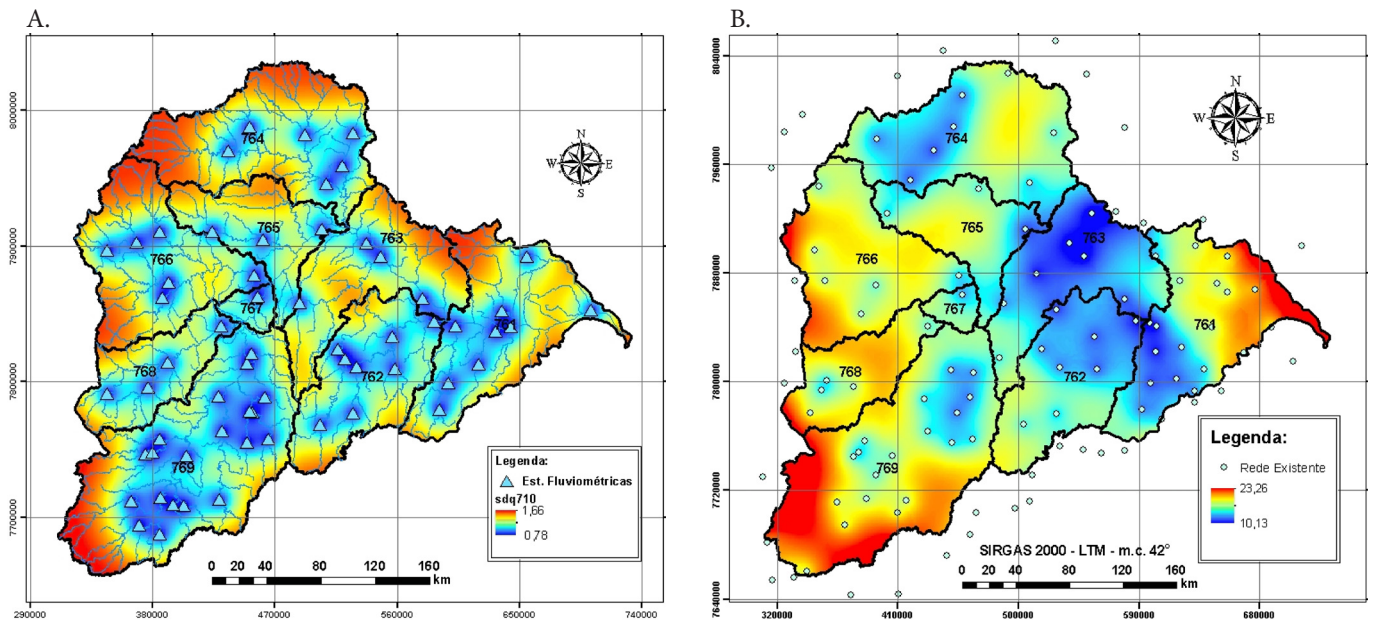


Figura 3. Mapas de desvio padrão da estimativa de $q_{7,10}$ em $L s^{-1} km^{-2}$ (A) e P_{ss} em mm (B) para a rede de monitoramento da bacia do rio Doce

Tabela 1. Desvios padrão percentuais de $q_{7,10}$ e P_{ss} para a rede de monitoramento da bacia do rio Doce

Variável	Estatística	Desvio padrão percentual das ottobacias										
		761	762	763	764	765	766	767	768	769	76	
$q_{7,10}$	Mínimo	28	22	24	32	21	23	21	15	10	10	
	Médio	70	45	50	79	43	40	30	24	27	48	
	Máximo	116	71	85	219	67	59	40	33	60	219	
P_{ss}	Mínimo	6	6	6	7	7	7	7	6	6	6	
	Médio	7	7	7	8	8	8	8	8	7	8	
	Máximo	11	8	9	9	9	10	8	9	9	11	

$q_{7,10}$ – Vazão específica mínima média de sete dias consecutivos e período de retorno de 10 anos; P_{ss} – Precipitação do semestre mais seco

Analisando a Tabela 1 observa-se que os maiores desvios padrão percentuais, para a variável $q_{7,10}$, ocorreram na ottobacia 764 (Suaçuí) elevando o valor do erro percentual para toda a BHRD (bacia 76). Este resultado se deve sobremaneira ao número reduzido de estações de monitoramento na região e à má-distribuição espacial da rede fluviométrica nesta sub-bacia.

As ottobacias 761 (Baixo Doce), 763 (Caratinga) e 765 (Suaçuí Pequeno) também apresentaram altos desvios padrão percentuais para $q_{7,10}$, tendo, como principal motivo, a má-distribuição espacial da rede fluviométrica. A ottobacia 763, além de possuir uma rede de monitoramento com distribuição espacial inadequada, possui uma estação de monitoramento a menos que o número sugerido pela OMM (1994).

Marques et al. (2009) identificaram, no desenvolvimento de um sistema para gestão de recursos hídricos na BHRD, a dificuldade de obtenção de informações hidrológicas na região devido ao número reduzido e à má-distribuição de estações de monitoramento fluviométrico na área em estudo.

Os menores erros padrão percentuais foram encontrados na ottobacia 769 (Piranga) em razão principalmente do fato desta possuir o maior número de estações de monitoramento de toda a BHRD; entretanto e apesar de densamente monitorada, a ottobacia 769 apresenta erros consideráveis na região de cabeceira do rio principal.

Considerando os resultados obtidos pela análise geoestatística dos dados de vazão específica constata-se que, apesar da rede de monitoramento fluviométrico da BHRD, em grande parte, atender quantitativamente às condições de densidade mínima de estações sugerida pela OMM (1994) sua distribuição espacial pode ser consideravelmente aprimorada, permitindo uma qualidade melhor nas estimativas geradas.

No que diz respeito à variável P_{ss} , observa-se, na Tabela 1, que os desvios padrão percentuais foram pequenos comparando-os aos resultados obtidos para $q_{7,10}$. Castro et al. (2010) constataram que o método de krigagem é o mais eficiente para espacialização de parâmetros climáticos, tais como precipitação; no entanto, devido à má-distribuição espacial das estações deve-se proceder ao rearranjo da rede objetivando uma estimativa ainda melhor dos valores de precipitação na bacia. Ressalta-se que a densidade de estações pluviométricas na BHRD é inferior à sugerida pela OMM (1994).

A partir dos mapas de desvio padrão obtidos (Figura 3) identificaram-se os pontos nos quais os erros locais foram consideráveis (áreas avermelhadas) ou desprezíveis (áreas azuladas) partindo-se, na sequência, para a exclusão, inclusão ou reposicionamento dos postos de monitoramento hidrométrico.

O procedimento foi realizado em etapas iniciando-se pela exclusão de estações em regiões densamente monitoradas (etapa 1) e se prosseguindo com o reposicionamento de estações em regiões que apresentavam os maiores erros de estimativa (etapas seguintes); após cada etapa refaz-se toda a análise geoestatística, gerando-se novos mapas de desvios.

Ressalta-se que os semivariogramas e as configurações adotadas para a análise espacial a partir da técnica de krigagem foram preservados até a conclusão da metodologia proposta, devido à estacionariedade do processo (Ávila et al., 2009).

Na Tabela 2 é disposto, para cada etapa e por região de análise, o número de estações excluídas e incluídas até a conclusão das redes propostas para monitoramento fluviométrico e pluviométrico.

É imprescindível salientar que o número de etapas do trabalho pode variar muito dependendo de uma série de critérios, de cunho estratégico e gerencial, por parte dos órgãos responsáveis pela rede, citados anteriormente.

Analisando a Tabela 2, pode-se observar a exclusão de 20 estações fluviométricas e 12 estações pluviométricas na primeira etapa de aplicação da metodologia proposta. Este é o primeiro ganho gerencial que a metodologia demonstra possibilitando o reposicionamento de estações hidrométricas em regiões densamente monitoradas.

Na etapa dois foram incluídas oito estações fluviométricas (primeiro reposicionamento das estações excluídas anteriormente) e 25 estações pluviométricas (reposicionamento das 12 estações excluídas e inclusão de 13 estações em regiões de erro considerável).

Nas etapas três e quatro foram incluídas seis e quatro estações fluviométricas e 21 e 33 estações pluviométricas, respectivamente, finalizando o procedimento de exclusão, rearranjo e inclusão de estações na rede de monitoramento fluviométrico e pluviométrico da BHRD.

As disposições espaciais das estações existentes e as configurações espaciais propostas para as novas redes de

Tabela 2. Densidade de estações de monitoramento fluviométrico por ottobacia

Ottobacia	Ottocódigo	Número de estações por etapa											
		Atual		Etapa 1		Etapa 2		Etapa 3		Etapa 4		Proposta	
		F	P	F	P	F	P	F	P	F	P	F	P
Baixo Doce - ES	761	9	19	-3	-4	1	3	1	1	1	0	9	19
Rio Manhuaçu	762	8	8	-3	0	1	2	-	4	-	1	6	15
Caratinga	763	4	7	-2	-2	2	4	1	2	1	5	6	16
Rio Suaçuí	764	6	8	-1	0	1	5	1	4	1	5	8	22
Suaçuí Pequeno	765	3	3	-	0	1	1	1	1	-	6	5	11
Rio Santo Antônio	766	6	6	-2	0	1	3	1	1	-	8	6	18
Ipatinga / Santana do Paraíso / Ipaba	767	1	1	-	-1	-	0	-	1	-	1	1	2
Rio Piracicaba	768	4	5	-	-1	-	2	-	1	-	2	4	9
Piranga	769	20	19	-9	-4	1	5	1	6	1	5	14	31
Rio Doce	76	61	76	-20	-12	8	25	6	21	4	33	59	143

F – Estações fluviométricas e P – Estações pluviométricas

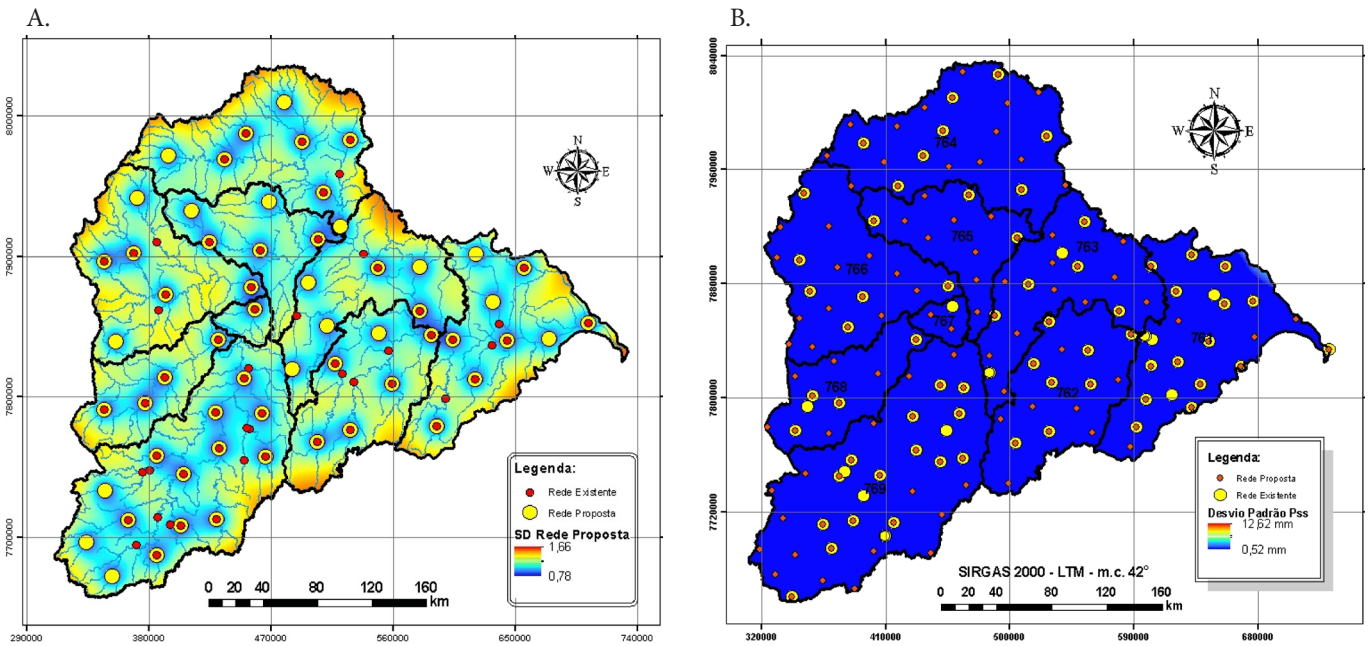


Figura 4. Mapa de desvio padrão da estimativa para $q_{7,10}$ em $L s^{-1} km^{-2}$ (A) e para P_{ss} em mm, da rede fluviométrica e pluviométrica proposta para a Bacia Hidrográfica do Rio Doce, respectivamente

monitoramento fluviométrico e pluviométrico, após quatro etapas avaliadas, são apresentadas na Figura 4. Foi utilizada a mesma paleta de cores e o mesmo intervalo de desvios encontrados inicialmente para comparação gráfica dos resultados obtidos das redes fluviométrica e pluviométrica em análise.

Comparando a distribuição espacial dos desvios padrão observada para a rede de monitoramento fluviométrico proposta (Figura 4A) e para a rede existente (Figura 3A), fica nítida a diminuição dos erros de estimativa principalmente nas regiões de cabeceira das ottobacias 761, 763, 764, 766 e 769.

As regiões onde se encontravam os maiores erros de estimativa (regiões de coloração vermelha) desapareceram e as regiões em que se encontravam os menores desvios padrão (regiões de coloração azul escuro) ficaram mais distribuídas pela área de drenagem da BHRD.

Comparando a distribuição espacial dos desvios padrão observada para a rede de monitoramento pluviométrico proposta (Figura 4B) e para a rede existente (Figura 3B), fica evidente a diminuição dos erros de estimativa para toda a BHRD. Com o intuito de se avaliar quantitativamente os resultados observados na Tabela 3, são apresentados os desvios padrão percentuais obtidos para a rede de monitoramento fluviométrico proposta na BHRD.

Na Tabela 3 foram destacados os erros padrão percentuais que tiveram maiores reduções relativas em comparação com os resultados apresentados na Tabela 2. Analisando a Tabela 3 e a Figura 4, pode-se observar que:

- para a rede fluviométrica as ottobacias que apresentaram reduções mais expressivas nos erros padrão percentuais foram 761, 763, 764, 765, 766 e 767 e, conseqüentemente, a BHRD (76);
- as ottobacias 761, 766 e 767, apesar de não terem recebido nenhuma estação de monitoramento fluviométrico adicional, tiveram seus erros padrão percentuais reduzidos apenas pelo reposicionamento espacial das estações de monitoramento em suas ottobacias (761 e 766) ou nas regiões vizinhas (767);
- para a rede pluviométrica, apesar dos erros padrão percentuais terem sido considerados inicialmente pequenos, a proposição metodológica foi responsável pelo melhoramento das estimativas e diminuição dos erros.

A rede fluviométrica proposta possui duas estações a menos que o número sugerido pela OMM (1994). Foram reposicionadas espacialmente 18 estações totalizando 59 estações de monitoramento fluviométrico para a BHRD após a conclusão das quatro etapas de avaliação sugeridas.

Spence et al. (2007) quantificaram o impacto na redução no número de estações de monitoramento na rede hidrométrica do Canadá e constataram que a exclusão de 12 estações

Tabela 3. Desvios padrão percentuais para a rede de monitoramento proposta

Vazão	Estatística	Desvio padrão percentual das ottobacias									
		761	762	763	764	765	766	767	768	769	76
$q_{7,10}$	Mínimo	28	23	25	25	21	18	20	15	10	10
	Médio	64	46	46	71	39	39	28	23	26	45
	Máximo	112	69	72	171	57	54	33	34	56	171
P_{ss}	Mínimo	0,4	0,3	0,3	1	0,5	0,4	1	1	0,4	0,3
	Médio	3	3	3	3	3	3	3	3	3	3
	Máximo	6	5	4	5	4	4	4	4	4	6

$q_{7,10}$ – Vazão específica mínima média de sete dias consecutivos e com período de retorno de 10 anos; P_{ss} – Precipitação do semestre mais seco

fluviométricas ocasionou o aumento do erro de estimativa em 16% para todos os regimes de escoamento. A exclusão de estações deve ser avaliada cuidadosamente para evitar a perda de informações hidrológicas importantes.

Constatou-se que para a rede de monitoramento pluviométrico na região de estudo o critério sugerido pela OMM mostrou-se excessivamente rigoroso proporcionando pequenas reduções nos erros de estimativa, com o acréscimo de 67 estações de monitoramento. Uma das prerrogativas da densidade espacial mínima de estações sugerida pela OMM (1994) é o ajuste das redes de monitoramento à situação socioeconômica e da bacia.

A ampliação da rede em 67 estações de monitoramento é excessivamente dispendiosa, do ponto de vista logístico e econômico. Uma alternativa exequível seria o reposicionamento das 12 estações pluviométricas substituindo-se os equipamentos tradicionais (pluviômetros) por equipamentos registradores de dados (pluviógrafos), proporcionando o melhoramento tecnológico gradativo desta rede. Tal substituição tecnológica diminuiria o número total de estações, melhoraria a qualidade dos dados coletados e estaria em concordância com a situação socioeconômica atual da BHRD.

Neste sentido, a proposta metodológica apontou locais ótimos para o reposicionamento de estações fluviométricas e pluviométricas. Ressalta-se que foram realizadas apenas quatro etapas de desenvolvimento da metodologia. O raciocínio apresentado por esta nova abordagem científica deve desenvolver-se até se alcançar o nível de precisão da estimativa desejado pelos órgãos gestores da rede de monitoramento.

Esta proposta metodológica se aplica a qualquer bacia hidrográfica. No caso de inexistência de uma rede de monitoramento preliminar pode-se utilizar, inicialmente, estações de bacias ou regiões hidrológicamente homogêneas vizinhas. Cabe salientar que as normas de instalação e de operação das estações de monitoramento fluviométrico (OMM, 1994) deverão ser respeitadas na implantação da nova rede proposta.

CONCLUSÕES

1. A aplicação da metodologia proposta resultou no reposicionamento de 18 estações e na otimização da rede fluviométrica devido à exclusão de duas estações totalizando 59 estações de monitoramento fluviométrico para a BHRD; já em relação à rede pluviométrica, constatou-se rearranjo de 20 estações além da possibilidade de inclusão de 67 estações de monitoramento.

2. A nova configuração espacial proposta para a rede de monitoramento fluviométrico apresentou melhorias nos desvios padrão percentuais para seis das nove ottobacias da BHRD, enquanto em relação à rede de monitoramento pluviométrico os erros de estimativa, por serem inicialmente pequenos, tornaram excessivamente onerosa a proposta de inclusão de 67 novas estações convencionais.

3. A metodologia mostrou-se adequada para exclusão, rearranjo e inclusão de estações hidrométricas podendo, então, ser aplicada a qualquer bacia hidrográfica.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), à Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG), à Universidade Federal de Viçosa (UFV) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo financiamento deste trabalho.

LITERATURA CITADA

- Abichequer, L. A.; Costa, J. F. C. L.; Pásti, H. A.; Marques, D. M.; Koppe, J. C. Reconciliação dos resultados do planejamento de pilhas de homogeneização auxiliada por simulação geoestatística dos teores de minério. *Revista Escola de Minas*, v.65, p.371-376, 2012.
- Ávila, L. F.; Mello, C. R.; Viola, M. R. Mapeamento da precipitação mínima provável para o sul de Minas Gerais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.13, p.906-915, 2009.
- Bohling, G. C.; Liu, G.; Knobbe, S. J.; Reboulet, E. C.; Hyndman, D. W.; Dietrich, P.; Butler Jr, J. J. Geostatistical analysis of centimeter-scale hydraulic conductivity variations at the MADE site. *Water Resources Research*, v.48, p.1-15, 2012.
- Castro, F. S.; Pezzopane, J. E. M.; Cecílio, R. A.; Pezzopane, J. R. M.; Xavier, A. C. Avaliação do desempenho dos diferentes métodos de interpoladores para parâmetros do balanço hídrico climatológico. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.14, p.871-880, 2010.
- Fouquet, C.; Malherbe, L.; Ung, A. Geostatistical analysis of the temporal variability of ozone concentrations: comparison between CHIMERE model and surface observations. *Athmospheric Environment*, v.45, p.3434-3446, 2011.
- Landim, P. M. B. *Análise geoestatística de dados geológicos*. São Paulo: UNESP, 2.ed., 2003. 253p.
- Marques, F. A.; Silva, D. D.; Ramos, M. M.; Pruski, F. F. AQUORA – Sistema multiusuário para gestão de recursos hídricos. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.14, p.51-69, 2009.
- Mishra, A. K.; Coulibaly, P. Hydrometric network evaluation for Canadian watersheds. *Journal of Hydrology*, v.380, p.420-437, 2009.
- Motomiya, A. V. A.; Molin, J. P.; Motomiya, W. R.; Vieira, S. R. Spatial variability of soil properties and cotton yield in the Brazilian Cerrado. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.15, p.996-1003, 2011.
- Mouslopoulou, V.; Hristopulos, D. T. Patterns of tectonic fault interactions captured through geostatistical analysis of microearthquakes. *Journal of Geophysical Research*, v.116, p.1-18, 2011.
- Nour, M. H.; Smith, D. W.; Eldin, M. G. Geostatistical mapping of precipitation: Implications for rain gauge network design. *Water Science Technology*, v.53, p.101-110, 2006.

- OMM - Organização Meteorológica Mundial. Guia para práticas hidrológicas: Aquisição e processamento de dados, análises, estimativas e outras aplicações, 15.ed., 1994. 735p.
- PIRH - Plano Integrado de Recursos Hídricos da Bacia do Rio Doce. <<http://www.pirhdoce.com.br/>>. 25 Mar. 2013.
- Ramos, C. M. C.; Silva, A. F.; Sartori, A. A. C.; Zimback, C. R. L.; Bassoi, L. H. Modelagem da variação horária da temperatura do ar em Petrolina, PE, e Botucatu, SP. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.15, p.959-965, 2011.
- Santos, D.; Souza, E. G.; Nóbrega, L. H. P.; Bazzi, C. L.; Gonçalves Júnior, A. C. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho após cultivo de soja. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.16, p.843-848, 2012.
- Spence, C.; Saso, P.; Rausch J. Quantifying the impact of hydrometric network reductions on regional stream-flow prediction in northern Canada. *Canadian Water Resources Journal*, v.32, p.1-20, 2007.
- Wanderley, H. S.; Amorim, R. F. C.; Carvalho, F. O. Variabilidade espacial e preenchimento de falhas de dados pluviométricos para o estado de Alagoas. *Revista Brasileira de Meteorologia*, v.27, p.347-354, 2012.