

Vazões mínimas e de referência e rendimento específico para o estado de Minas Gerais

Lucas Alves da Silva¹, Antônio Marciano da Silva², Gilberto Coelho¹,
Leandro Campos Pinto³, Eliete Nazaré Eduardo³

¹ Universidade Federal de Lavras, Departamento de Engenharia, Campus Universitario, CEP 37200-000, Lavras-MG, Brasil. Caixa Postal 37. E-mail: lucasas@deg.ufla.br; coelho@deg.ufla.br

² Universidade Federal de Alfenas, Instituto de Ciência e Tecnologia, Rodovia José Aurélio Vilela, 11999 (BR 267 Km 533), Cidade Universitária, CEP 37715-400, Poços de Caldas-MG, Brasil. E-mail: antonio.marciano@unifal-mg.edu.br

³ Universidade Federal de Lavras, Departamento de Ciência do Solo, Campus Universitário, CEP 37200-000, Lavras-MG, Brasil. E-mail: leandcampos@yahoo.com.br; elietenazare@gmail.com

RESUMO

Para a adequada gestão dos recursos hídricos, especialmente nas atividades de administração como, por exemplo, na concessão de uso dos recursos hídricos para uma dada finalidade, a disponibilidade hídrica precisa ser conhecida. Para superar a dificuldade existente na obtenção de informações hidrológicas, necessárias ao adequado gerenciamento dos recursos hídricos de uma região, utiliza-se a técnica de regionalização de vazões. O objetivo deste trabalho foi desenvolver produtos que auxiliem a gestão dos recursos hídricos, visando a obtenção de subsídios para a determinação da disponibilidade hídrica aos órgãos gestores de recursos hídricos do Estado de Minas Gerais. Utilizou-se modelos matemáticos para a estimativa das vazões $Q_{7,10}$, Q_{90} e Q_{MLT} nas bacias hidrográficas dos Rios Doce, Paraíba do Sul, Grande, Paranaíba, São Francisco, Pardo, Jequitinhonha, Mucuri e São Mateus, no estado de Minas Gerais. A espacialização das variáveis hidrológicas foi feita na forma de Rendimento Específico em ambiente SIG. De acordo com os resultados obtidos, tal espacialização mostrou-se com potencial para subsidiar a gestão e o planejamento dos recursos hídricos.

Palavras-chave: disponibilidade hídrica; regionalização de vazão; zoneamento hidrológico

Minimum and reference discharges and specific yield for the state of Minas Gerais, Brazil

ABSTRACT

For proper management of water resources, especially in administration activities such as, for example, in granting use of water resources for a given purpose, water availability needs to be known. To overcome existing difficulties in the attainment of hydrologic information, necessary to an appropriate water resources management of a region, we use the technique of regionalizing streamflows. The purpose of this work was to develop products, which help in water resources management, seeking to obtain subsidies for determining the water availability to water resource management agencies of Minas Gerais State. We used mathematical models for estimating the streamflows $Q_{7,10}$, Q_{90} and Q_{MLT} in the watersheds of the rivers Doce, Paraíba do Sul, Grande, Paranaíba, São Francisco, Pardo, Jequitinhonha, Mucuri and São Mateus, at the Minas Gerais State. The spatialization of hydrological variables was performed as specific yields in SIG environments. According to results obtained, the spatialization was found to be potential for supporting the water resources planning and management.

Key words: water availability; regionalization of flow; hydrological zoning

Introdução

Atualmente, a maioria dos governos e grande número de agências internacionais destacam a água como prioridade, dentro do conjunto dos recursos naturais estratégicos (Silva et al., 2006).

A disponibilidade dos recursos hídricos é objeto de constante preocupação dos órgãos de gestão, sendo justificável uma análise dessa variável.

Nos estudos para a exploração dos recursos hídricos, frequentemente a disponibilidade hídrica precisa ser avaliada em locais onde não existe série histórica de vazão ou, se existe, a extensão da série é insuficiente para avaliação. Assim, torna-se necessário aplicar metodologias que permitam transferir a informação de locais amostrados para outros locais da bacia hidrográfica.

No contexto da gestão dos recursos hídricos, as vazões mínimas têm recebido atenção especial, pois representam a condição crítica da bacia, sendo que ocorrem no período de estiagem, quando a oferta de água é limitada. Diversos estudos de vazões mínimas têm sido realizados com a finalidade de preservar os recursos naturais e, concomitantemente, fornecer informações e ferramentas para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos (Silva et al., 2006; Silvino et al., 2007; Mello et al., 2010; Pinto et al., 2015). Geralmente, em cursos d'água, são adotadas como referência a vazão $Q_{7,10}$ (vazão mínima das médias de 7 dias consecutivos com período de retorno de 10 anos), Q_{90} (vazão mínima esperada em 90% do tempo) ou Q_{MLT} (vazão média de longo termo, corresponde à síntese de todas as vazões ao longo do tempo) (Tucci, 2012).

Para tornar essas vazões de referência mais representativas, recorre-se às vazões ou rendimentos específicos que representam os fluxos drenados por unidade de área. Baena et al. (2004) destacam que um dos maiores desafios em hidrologia é o de conhecer adequadamente o comportamento dos processos hidrológicos, entretanto a caracterização destes geralmente fica restrita a um caráter qualitativo, o que impede o adequado gerenciamento dos recursos hídricos, que requer também informações de caráter quantitativo.

Em decorrência da escassez de informações da rede hidrométrica para estudos de planejamento e gerenciamento de recursos hídricos no estado de Minas Gerais, fica em evidência a necessidade de estudos de regionalização de vazões que se baseiam em metodologias específicas, as quais permitem aperfeiçoar as informações fluviométricas existentes, extrapolando-as para os locais que possuem dados insuficientes ou inexistentes.

Pelos aspectos mencionados, objetivou-se, com este trabalho a obtenção de modelos matemáticos para estimativa das vazões $Q_{7,10}$, Q_{90} e Q_{MLT} em todas as Unidades de Planejamento e Gestão de Recursos Hídricos (UPGRH) do estado de Minas Gerais e a espacialização dessas informações na forma de Rendimento Específico.

Material e Métodos

O estado de Minas Gerais se encontra na região Sudeste do Brasil, com área aproximada de 586.753 km², onde ocorre importante variabilidade climática prevalecendo, ao Sul/

Sudeste e locais de elevada altitude clima Cwb/Cwa pela classificação proposta por Köppen, com invernos frios e verões brandos e chuvosos, clima Aw nas regiões do Triângulo Mineiro, Leste, Norte e Vale do Jequitinhonha com invernos brandos e verões quentes e chuvosos, além de clima BSw na região do extremo Norte de Minas com características semiáridas (Antunes, 1986).

Para o estudo de regionalização das vazões de referência ($Q_{7,10}$, Q_{90} e Q_{MLT}) foram utilizados dados de 553 estações fluviométricas do estado de Minas Gerais e suas proximidades, obtidos por intermédio das séries históricas disponibilizadas pela Agência Nacional de Águas (Hidroweb, 2014).

A utilização das estações fluviométricas foi baseada na extensão das séries históricas, sendo adotado o critério destacado por Vezza et al. (2010), os quais ressaltam a necessidade da existência de um período mínimo de 10 anos de dados observados de vazões diárias.

Na Figura 1 se apresenta a distribuição espacial das estações fluviométricas e as bacias hidrográficas utilizadas no estudo, recortadas dentro do estado de Minas Gerais.

Para a determinação da $Q_{7,10}$ foi identificado para cada ano considerado no estudo e para cada estação fluviométrica, o valor da vazão mínima pertinente à duração de sete dias (Q_7) para, então, estabelecer o modelo probabilístico com melhor ajuste às séries de Q_7 . Os modelos probabilísticos analisados para representar Q_7 foram: log-Normal a dois parâmetros, log-Normal a três parâmetros, Pearson tipo III, log-Pearson tipo III e Weibull.

Visando a obter a vazão Q_{90} , inicialmente, procedeu-se à obtenção da curva de permanência para cada uma das estações fluviométricas em estudo. Posteriormente, determinou-se a vazão associada a 90% de permanência no tempo, a partir da curva de permanência obtida para as diferentes estações.

A vazão média de longo termo (Q_{MLT}) foi obtida para cada estação fluviométrica, pela média da série anual.

Para a obtenção das vazões $Q_{7,10}$, Q_{90} e Q_{MLT} foi utilizado o programa Sistema Computacional para Análises Hidrológicas (SisCAH, 2009).

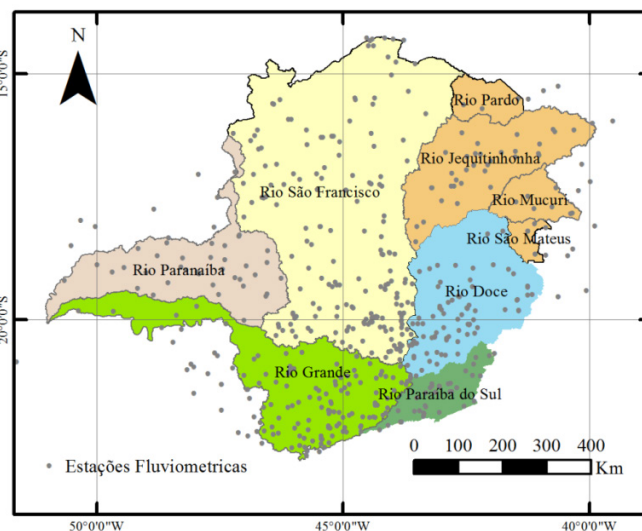


Figura 1. Mapa da distribuição espacial das estações fluviométricas e das bacias hidrográficas utilizadas no estudo, recortadas dentro do estado de Minas Gerais.

Os parâmetros das equações de regionalização das vazões ($Q_{7,10}$, Q_{90} e Q_{MLT}) foram estimados pelo método dos momentos, enquanto a eficiência do ajustamento foi avaliada, aplicando-se o coeficiente de eficiência ajustado (E') (Eq. 1) (Legates & McCabe Júnior, 1999), dado por:

$$E' = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N |Q_{obs} - Q_{est}|}{\sum_{i=1}^N |Q_{obs} - \bar{Q}_{est}|} \quad (1)$$

em que:

Q_{obs} - vazão obtida, a partir da análise da série histórica na estação fluviométrica;

Q_{est} - vazão estimada com base na equação de regionalização;

Q_{obs} - corresponde à média da vazão obtida, a partir da análise da série histórica; e,

N - corresponde ao número de estações fluviométricas utilizadas no estudo.

Na avaliação dos resultados, utilizou-se, além do coeficiente de eficiência ajustado (E'), o coeficiente de determinação (r^2), coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (COE) e o índice de confiança (Ic), proposto por Camargo & Sentelhas (1997) e que, segundo Baena et al. (2004), permite analisar, conjuntamente, a precisão e a exatidão dos resultados obtidos, sendo calculado pelo produto do coeficiente de correlação (r) e do índice de concordância (d), proposto por Willmott (1981), conforme apresentado nas Eq. 2 e 3.

$$Ic = r.d \quad (2)$$

$$d = 1 - \left[\frac{\sum_{i=1}^N (Q_{est} - Q_{obs})^2}{\sum_{i=1}^N (|Q_{est} - \bar{Q}_{obs}| + |Q_{obs} - \bar{Q}_{obs}|)^2} \right] \quad (3)$$

A partir dos modelos ajustados para cada uma das bacias hidrográficas do estado de Minas Gerais, exceto para as bacias dos Rios Pardo, Jequitinhonha, Mucuri e São Mateus que, em função da escassez de dados fluviométricos consistentes, foram agrupadas em uma única região denominada bacia Nordeste, foi feita a espacialização das informações.

De forma a tentar minimizar a influência que o porte da área de drenagem exerce sobre os valores de vazão, a espacialização foi feita sob a forma de rendimento específico (Re), em $L s^{-1} km^{-2}$. Os rendimentos foram estimados em ambiente de sistemas de informações geográficas, tendo sido utilizado o programa computacional ESRI ArcGIS 10.1, com a extensão Spatial Analyst.

Para expressar a disponibilidade hídrica, esta foi agrupada, em termos do Re, em cinco classes que permitem abranger toda a gama de variação dos valores. Adotou-se o critério de classes de Re contido no Zoneamento Ecológico Econômico de Minas Gerais (Mello et al., 2008), tendo as seguintes classes:

< 1,5; 1,5 a 2,5; 2,5 a 3,5; 3,5 a 5,5 e > 5,5 $L s^{-1} Km^{-2}$ para o rendimento específico $Re_{7,10}$ e Re_{90} e o critério de classes de rendimento específico (Re) contido em Souza (1993), tendo as seguintes classes: < 2; 2 a 10; 10 a 20; 20 a 30 e > 30 $L s^{-1} Km^{-2}$ para o rendimento Re_{MLT} .

Resultados e Discussão

Com vistas à espacialização dos valores de $Q_{7,10}$, Q_{90} e Q_{MLT} estimados com base no software SisCAH, para todo estado de Minas Gerais, seguem, na Tabela 1, as equações de regionalização com o intervalo de validade de aplicação por área de drenagem.

Verifica-se que todas as equações de regionalização das vazões $Q_{7,10}$, Q_{90} e Q_{MLT} apresentaram o valor do expoente superior a 0,899, ressaltando a qualidade dos dados utilizados neste estudo.

Os valores dos coeficientes de eficiência de Nash e Sutcliffe (COE) indicam a precisão do modelo na estimativa das vazões mínimas (Tabela 2), e variaram de 0,422 a 0,996, enquadrando-se nas categorias Aceitável e Adequado e Bom. Dessa forma, como o COE é a estatística de precisão mais aplicada e importante para a simulação hidrológica (Viola et al., 2009), pode-se concluir que os modelos produzirão bons resultados, quando aplicados para estimativa da disponibilidade hídrica, sendo uma ferramenta para o planejamento e a gestão dos recursos hídricos no estado de Minas Gerais.

Pela análise dos valores do r^2 (Tabela 2), verifica-se que todos os modelos de regionalização apresentaram boa aderência, apresentando valores de r^2 superior a 0,818 e vêm reforçar os resultados anteriores sobre a qualidade do modelo, bem como sua aplicabilidade.

Apesar dos modelos terem apresentado valores de r^2 próximos à unidade, indicando que a variação das vazões pode ser explicada por estes, Legates & McCabe Júnior (1999) ao analisarem métodos estatísticos para a avaliação de modelos, afirmam que o coeficiente de determinação não deve ser usado unicamente para a avaliação de modelos, uma vez que

Tabela 1. Equações de Regionalização das Vazões $Q_{7,10}$, Q_{90} e Q_{MLT} e Intervalos de área de drenagem para suas aplicações.

Bacia	Equação ($L s^{-1}$)	Intervalo da área para aplicação da equação (Km^2)
Doce	$Q_{7,10}=6,058*Ad^{0,942}$ $Q_{90}=9,932*Ad^{0,932}$ $Q_{MLT}=33,702*Ad^{0,902}$	9 – 115642
Paraíba do Sul	$Q_{7,10}=6,341*Ad^{0,995}$ $Q_{90}=10,395*Ad^{0,981}$ $Q_{MLT}=26,198*Ad^{0,972}$	66 – 11183
Grande	$Q_{7,10}=7,048*Ad^{0,938}$ $Q_{90}=13,898*Ad^{0,911}$ $Q_{MLT}=39,672*Ad^{0,899}$	10 – 619725
Paranaíba	$Q_{7,10}=3,042*Ad^{0,998}$ $Q_{90}=5,337*Ad^{0,999}$ $Q_{MLT}=22,427*Ad^{0,959}$	34 – 71945
São Francisco	$Q_{7,10}=3,099*Ad^{0,968}$ $Q_{90}=6,744*Ad^{0,936}$ $Q_{MLT}=28,896*Ad^{0,911}$	8 – 321586
Rio Pardo, Jequitinhonha, Mucuri e São Mateus	$Q_{7,10}=1,152*Ad^{0,967}$ $Q_{90}=3,813*Ad^{0,910}$ $Q_{MLT}=8,017*Ad^{0,988}$	77 – 151151

Tabela 2. Coeficiente de eficiência de Nash e Sutcliffe (COE), coeficiente de determinação (r^2), coeficiente de eficiência ajustado (E'), o índice de confiança (Ic) e o desempenho dos modelos de regionalização de vazões para estimativa da $Q_{7,10}$, Q_{90} e Q_{MLT} nas bacias hidrográficas em estudo.

	Rio Doce	Rio Paraíba do Sul	Rio Grande	Rio Paranaíba	Rio São Francisco	Rios Nordeste
$Q_{7,10}$						
COE	0,940	0,771	0,607	0,422	0,750	0,969
r^2	0,917	0,855	0,903	0,818	0,892	0,860
E'	0,849	0,621	0,798	0,723	0,723	0,684
Ic	0,975	0,843	0,936	0,921	0,878	0,935
Desempenho	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo
Q_{90}						
COE	0,948	0,872	0,711	0,912	0,850	0,982
r^2	0,931	0,953	0,931	0,897	0,940	0,914
E'	0,860	0,693	0,821	0,833	0,781	0,754
Ic	0,976	0,906	0,948	0,982	0,930	0,967
Desempenho	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo
Q_{MLT}						
COE	0,960	0,915	0,962	0,996	0,982	0,985
r^2	0,955	0,925	0,949	0,905	0,963	0,903
E'	0,888	0,773	0,997	0,925	0,894	0,808
Ic	0,981	0,935	0,991	0,999	0,988	0,967
Desempenho	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo	Ótimo

altos valores de correlações podem ser obtidos por modelos medianos.

Em relação ao coeficiente de eficiência ajustado (E') (Tabela 2), o qual varia de $-\infty$ a 1, os maiores valores indicam melhor desempenho e valores negativos indicam que a média dos valores observados é melhor estimador da vazão estudada que o modelo em análise. Dessa forma, pela ausência de valores negativos para esse coeficiente, verifica-se que os modelos de regionalização ajustados são bons estimadores das vazões de referência nas bacias hidrográficas em estudos. Verifica-se ainda que os valores (E') variaram de 0,621 a 0,997, sendo que o modelo ajustado para Q_{MLT} do Rio Grande apresentou o maior valor de E' , e o modelo ajustado para $Q_{7,10}$ do Rio Paraíba do Sul apresentou o menor valor. Estes resultados indicam que os modelos gerados para a regionalização de vazões podem ser implementados, visto que produziram bons ajustes (Tabela 2).

Em modelos matemáticos para a regionalização de vazões mínimas diárias e mínimas médias de 7 dias na região do Alto Rio Grande-MG, gerados por regressão múltipla linear, ajustados pelo método dos mínimos quadrados, Silva et al. (2006) conseguiram bons ajustes estatísticos, demonstrando que os modelos gerados para a regionalização de vazões podem ser implementados.

Pela Tabela 2, observa-se que os valores dos índices de confiança (Ic) obtidos variaram de 0,843 a 0,999, sendo o modelo ajustado para Q_{MLT} do Rio Paranaíba que apresentou o melhor valor. Assim, no desempenho dos modelos (Tabela 2), conforme a classificação do índice de confiança (Ic), todos foram classificados como “Ótimo”, indicando que os modelos são eficientes na estimativa da $Q_{7,10}$, Q_{90} e Q_{MLT} .

Pela análise das estimativas das vazões de referência $Q_{7,10}$, Q_{90} e Q_{MLT} , no estado de Minas Gerais, obtidos pelos modelos de regionalização de vazões, evidenciou-se que o modelo potencial se apresentou eficiente na estimativa dessas vazões, sendo que sua utilização pode auxiliar a gestão e planejamento de recursos hídricos no estado de Minas Gerais.

Considerando um modelo potencial $Q = a A_d^b$, o valor do coeficiente “a” sinaliza a capacidade de geração do escoamento superficial da unidade de área de drenagem, assim,

quanto maior o valor maior será essa propriedade. O valor do coeficiente “b” sinaliza como essa capacidade varia com o aumento da área de drenagem, assim quanto mais próximo de 1 menor é a amplitude de variação, e, quanto mais afastado de 1 maior será a variação dessa capacidade (Tabela 3).

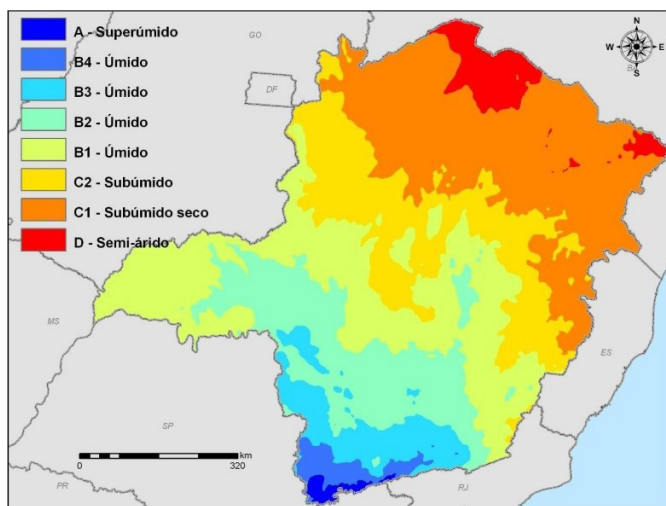
A análise dos valores do coeficiente “a” para as diferentes regiões hidrográficas evidencia a variabilidade na capacidade de gerar escoamento (Tabela 3), onde se constata a maior capacidade da bacia do Rio Grande que cobre o Sul e o Sudoeste de Minas e a menor capacidade das bacias do Nordeste do estado de Minas Gerais, expressão clara da influência do clima, conforme Figura 2, que apresenta a classificação climática do estado de Minas Gerais, tendo como base um balanço hídrico climático (Mello et al., 2008).

Essa condição pode se associar ao grande porte de área dessa bacia, que, naturalmente, traz no seu bojo, uma maior variabilidade climática bem como de seus recursos físicos naturais. Por outro lado, as bacias da região nordeste do estado de Minas Gerais apresentam o parâmetro “b” com valor maior o que implica numa menor variação da capacidade de gerar deflúvio superficial independentemente do porte da área de drenagem.

Quando a análise dos valores do coeficiente “b” é feita tendo como referência a $Q_{7,10}$, constata-se que apenas as bacias das regiões Norte e Nordeste apresentam os menores valores que traduzem uma maior variação da capacidade da unidade de área de drenagem gerar deflúvio superficial, com o aumento da área. Essa condição está associada ao clima da região que não apresenta excedentes hídricos para sustentar o deflúvio superficial.

Tabela 3. Coeficientes “a” e “b” para as equações de regionalização da $Q_{7,10}$, Q_{90} e Q_{MLT} para as bacias hidrográficas em estudo.

Bacias hidrográficas	$Q_{7,10}$		Q_{90}		Q_{MLT}	
	a	b	a	b	a	b
Doce	33,702	0,902	9,932	0,932	6,058	0,942
Paraíba do Sul	26,198	0,972	10,395	0,981	6,341	0,995
Grande	39,672	0,899	13,898	0,911	7,048	0,938
Paranaíba	22,427	0,959	5,337	0,999	3,042	0,998
São Francisco	28,896	0,911	6,744	0,936	3,099	0,968
Rio Pardo, Jequitinhonha, Mucuri e São Mateus	8,017	0,988	3,813	0,910	1,152	0,860



Fonte: Mello et al. (2008).

Figura 2. Balanço hídrico climático do estado de Minas Gerais.

Ao se cotejar os valores do coeficiente “a” das vazões de referência Q_{90} e $Q_{7,10}$ com a Q_{MLT} (Tabela 4) pode-se inferir sobre a redução relativa da capacidade de gerar escoamento da unidade de área de drenagem.

Observa-se, pela Tabela 4, que o Rio Paraíba do Sul apresenta os melhores índices, o que, provavelmente, está associado às condições climáticas mais favoráveis e à menor variabilidade espacial, em razão de seu pequeno porte. O Rio Grande segue o mesmo comportamento do Paraíba do Sul, e os Rios do Nordeste apresentam uma singularidade, um maior índice para situação Q_{90} , sinalizando um regime mais regularizado até esse nível, porém uma acentuada queda quando se estende a análise para $Q_{7,10}$. Há que se considerar que, naturalmente, essa região tem menor capacidade de gerar deflúvio superficial e a amplitude de variação está numa faixa bem mais reduzida do que as constatadas para as regiões mais úmidas. Os índices para a bacia do Rio São Francisco mostram os menores valores, refletindo um menor grau de regularização, que pode estar associado entre outros fatores a uma acentuada variação climática espacial ao longo de sua extensão. Não se pode deixar de considerar a presença de reservatórios destinados a geração de hidroenergia como fator que influencia no regime de escoamento, sobretudo os de grande porte. Na região de estudo destaca-se dois grandes reservatórios d’água: Três Marias, na bacia do Rio São Francisco e Furnas, na bacia do Rio Grande.

A análise dos rendimentos específicos (Figuras 3, 4 e 5) permite constatar que a Bacia do Rio Grande e Bacia do Paraíba do Sul apresentaram os melhores valores para o rendimento específico ($Re_{7,10}$) enquanto que para o Re_{90} além das duas bacias hidrográficas supracitadas, incorporou-se a Bacia do

Tabela 4. Relação entre os coeficientes das vazões de referência Q_{90} e $Q_{7,10}$ com a Q_{MLT} para as bacias hidrográficas estudadas.

Bacias hidrográficas	a_{90}/a_{MLT}	$a_{7,10}/a_{MLT}$
Doce	0,295	0,180
Paraíba do Sul	0,397	0,242
Grande	0,350	0,178
Paranaíba	0,238	0,136
São Francisco	0,233	0,107
Rio Pardo, Jequitinhonha, Mucuri e São Mateus	0,475	0,144

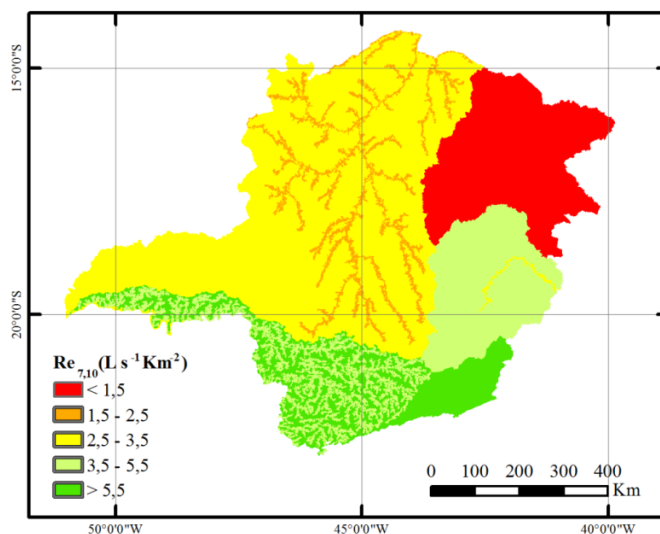


Figura 3. Rendimento Específico $Re_{7,10}$ para o estado de Minas Gerais.

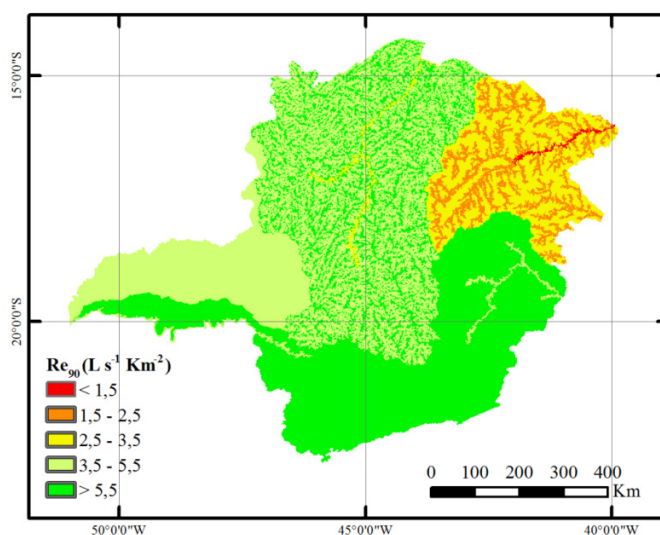


Figura 4. Rendimento Específico Re_{90} para o estado de Minas Gerais.

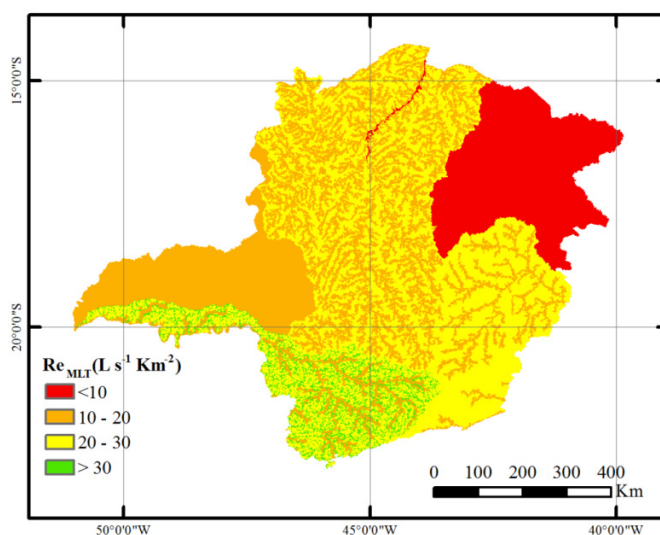


Figura 5. Rendimento Específico Re_{MLT} para o estado de Minas Gerais.

Rio Doce nos melhores resultados para este parâmetro. Já para a Re_{MLT} somente a Bacia do Rio Grande apresentou os melhores resultados de rendimento.

Em uma caracterização do escoamento superficial na sub-bacia hidrográfica do ribeirão Marcela, no Alto Rio Grande-MG, Silva et al. (2006) concluíram que a sub-bacia apresentou ao longo do período de estudo, escoamento subterrâneo de elevada magnitude, mostrando ser a sub-bacia hidrográfica de alto potencial para recarga do aquífero. Esses resultados corroboram com os apresentados neste trabalho, mostrando que as variáveis hidrológicas estudadas podem propiciar melhor entendimento dos processos hidrológicos e subsídios para o planejamento e tomada de decisão relacionados ao gerenciamento dos recursos hídricos.

Já na região de cabeceira da Bacia do Rio Grande-MG, Menezes et al. (2009) citam que predominam solos rasos e pouco profundos (Cambissolos), com pouca capacidade de infiltração de água, gerando valores de rendimento específico menores se comparados à região do baixo Rio Grande com relevo e classes de solos diferentes.

Quanto a ocorrência de superfícies tabulares onduladas na região da bacia do baixo Rio Grande (Triângulo Mineiro), Fernandes et al. (2013) descrevem essa parte da região com superfícies planas, com ocorrência de solos profundos (Latossolos e Neossolos Quartzarênicos), sob vegetação de Cerrado, constituindo-se como áreas de recarga de aquíferos em meio granular.

Para o potencial de recarga das águas subterrâneas em duas sub-bacias hidrográficas da região do Alto Rio Grande-MG, Menezes (2011) verificou uma com predominância de relevo montanhoso e presença de Mata Atlântica e a outra com predominância de um relevo mais suave. Diferentemente do que as características fisiográficas apontavam no contexto do escoamento superficial e recarga de água, o uso do solo e o regime de chuvas teve um papel preponderante no processo de infiltração de água no solo. A autora concluiu que, apesar da sub-bacia com relevo mais suave apresentar características geomorfológicas favoráveis para a infiltração de água, o uso do solo sem técnicas de conservação e manejo adequado e, juntamente, com o regime de precipitação, foram responsáveis pela menor potencialidade de infiltração de água no perfil do solo nessa região, se comparado à sub-bacia em relevo mais movimentado e cobertura do tipo floresta Atlântica. Já Silva et al. (2012) em análise da paisagem na região do Alto Rio Grande-MG, citam a ocorrência de Cambissolos, Neossolos Litólitos e afloramentos de quartzitos, associados a campos rupestres.

Esses resultados colocam em evidência os efeitos do relevo, da vegetação e uso do solo e da precipitação, sobre a capacidade de recarga das bacias estudadas.

A análise dos rendimentos específicos apresentados nas Figuras 3, 4 e 5 evidencia a redução do rendimento específico com o aumento da área de contribuição. Baena et al. (2004) evidenciaram o mesmo comportamento para a bacia do Rio Paraíba do Sul, ou seja, redução do rendimento específico quando do deslocamento das posições próximas à nascente em direção à foz.

Em um estudo na bacia do Rio São Francisco, Pereira et al. (2007) mostraram que em algumas sub-bacias, como a do Rio Pandeiros (Norte de Minas Gerais) que tem uma precipitação média de aproximadamente 1100 mm, somente 17% da precipitação é convertida em vazão.

Nas regiões do Vale do Mucuri e Vale do Médio Jequitinhonha, Figueiredo (2004) cita que o pisoteio provocado pela taxa de lotação excessiva, é um dos principais fatores de degradação dos solos da região, compactando e reduzindo a infiltração da água no solo.

Já em estudo da aptidão agrícola das terras em Minas Gerais elaborada em Sistema de Informações Geográficas (SIG), Silva et al. (2013) citam que as limitações por deficiência hídrica no Estado são principalmente moderadas, no entanto, no Norte do Estado as terras estão com deficiência hídrica com grau forte, relacionado com a ocorrência de regime climático do semiárido.

Em termos de gestão dos recursos hídricos, os órgãos gestores devem estar atentos ao gerenciar esses recursos onde os cursos d'água apresentam menor capacidade de regularização natural, principalmente com relação ao lançamento de efluentes e conservação de ecossistemas. Neste estudo, as bacias que apresentaram essa característica foram as dos Rios do Nordeste (Rio Pardo, Rio Jequitinhonha, Rio Mucuri e Rio São Mateus), região onde se tem o predomínio de clima Subúmido seco e Semi-árido (Mello et al., 2008)

Euclides et al. (2001) recomendam que, em bacias hidrográficas com menor capacidade de regularização natural, que a outorga de uso dos recursos hídricos seja associada à regularização de vazão, por meio da construção de reservatório e sejam adotados critérios de outorga com a utilização de vazões de referência diferenciadas, de acordo com as especificidades de cada bacia hidrográfica.

Nesse sentido, as bacias localizadas na região Nordeste de Minas Gerais são as mais sensíveis à intervenção antrópica, em função de suas características climáticas associadas ao precário sistema de saneamento básico.

Conclusões

O método dos momentos e o modelo potencial se mostraram eficientes para ajuste das equações de regionalização de vazões por bacias hidrográficas no estado de Minas Gerais.

A sistemática de aplicação do processo de espacialização das variáveis hidrológicas em ambiente SIG mostrou grande potencialidade para subsidiar a gestão e o planejamento dos recursos hídricos.

Literatura Citada

- Antunes, F. Z. Caracterização climática do estado de Minas Gerais. Informe Agropecuário, v. 12, n.139, p.9-13, 1986.
- Baena, L. G. N.; Silva, D. D.; Pruski, F. F.; Calijuri, M. L. Regionalização de vazões com base em modelo digital de elevação para a bacia do rio Paraíba do Sul. Engenharia Agrícola, v.24, n.3, p.612-624, 2004. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162004000300013>.
- Camargo, A. P.; Sentelhas, P.C. Avaliação do desempenho de diferentes métodos de estimativa da evapotranspiração potencial no estado de São Paulo. Revista Brasileira de Agrometeorologia, v.5, n.1, p.89-97, 1997. https://www.researchgate.net/profile/Paulo_Sentelhas/publication/284194031. 03 Jan. 2017.

- Euclydes, H. P.; Ferreira, P. A.; Rubert, O. A. Santos, R. M. Regionalização hidrológica na bacia do Alto São Francisco a montante da barragem de Três Marias, MG. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.6, n.2, p.81-105, 2001. <https://doi.org/10.1590/10.21168/rbrh.v6n2.p81-105>.
- Fernandes, M. R. (Coord.). Minas Gerais: caracterização de unidades de paisagem. Belo Horizonte: EMATER, 2013. 92 p.
- Figueiredo, L. H. A. Degradação de pastagens em solos da região do Vale do Mucuri, MG. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2004. 69p. Tese Doutorado. <http://www.locus.ufv.br/handle/123456789/10859>. 05 Mar. 2017.
- Hidroweb. Banco de dados, 2014. <http://www.snirh.gov.br/hidroweb>. 12 Mar. 2017.
- Legates, D. R.; McCabe Júnior, G. J. Evaluating the use of “goodness-of-fit” measures in hydrologic and hydroclimatic model validation. *Water Resources Research*, v. 35, n.1, p.233-241, 1999. <https://doi.org/10.1029/1998WR900018>.
- Mello, C. R.; Silva, A. M.; Coelho, G.; Marques, J. J. G. S. M.; Campos, C. M. M. Recursos Hídricos. In: Scolforo, J. R. S.; Carvalho, L. M. T.; Oliveira, A. D. (Orgs.). Zoneamento ecológico-econômico do Estado de Minas Gerais: componentes geofísicos e biótico. Lavras: Editora UFLA, 2008. v. 1, p.103-135.
- Mello, C. R.; Viola, M. R.; Beskow, S. Vazões máximas e mínimas para bacias hidrográficas da região Alto Rio Grande, MG. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 34, n.2, p. 494-502, 2010. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542010000200031>.
- Menezes, M. D. Levantamento pedológico de hortos florestais e mapeamento digital de atributos físicos do solo para estudos hidrológicos. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2011. 225p. Tese Doutorado. <http://repositorio.ufla.br/jspui/handle/1/3575>. 11 Fev. 2017.
- Menezes, M. D.; Junqueira Júnior, J. A.; Mello, C. R.; Silva, A. M.; Curi, N.; Marques, J. J. Dinâmica hidrológica de duas nascentes, associada ao uso do solo, características pedológicas e atributos físico-hídricos na sub-bacia hidrográfica do Ribeirão Lavrinha, Serra da Mantiqueira, MG. *Scientia Forestalis*, v. 37, n. 82, p.175-184, 2009. <http://www.ipef.br/publicacoes/scientia/nr82/cap07.pdf>. 10 Mar. 2017.
- Pereira, S. B.; Pruski, F. F.; Silva, D. D.; Ramos, M. M. Estudo do comportamento hidrológico do Rio São Francisco e seus principais afluentes. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.11, n.6, p.615-622, 2007. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662007000600010>.
- Pinto, L. C.; Lima, P.L.T.; Silva Junior, J. J. Probabilistic models for estimation extreme values of watershed flow rates. *Revista Agrogeoambiental*, v. 7, n.1, p.105-112, 2015. <https://doi.org/10.18406/2316-1817v7n12015602>.
- Silva, A. M.; Oliveira, P. M.; Mello, C. R.; Pierangeli, C. Vazões mínimas e de referência para outorga na região Alto do Rio Grande, Minas Gerais. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.10, n. 2, p.374-380, 2006. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662006000200019>.
- Silva, L. A.; Silva, A. M.; Coelho, G.; Mello, C. R.; Pereira, D. R. Groundwater recharge estimate at Alto Rio Grande – MG watershed. *Engenharia Agrícola*, v.32, n.6, p.1097-1108, 2012. <https://doi.org/10.1590/S0100-69162012000600011>.
- Silva, V. A.; Curi, N.; Marques, J. J. G. S. M.; Carvalho, L. M. T.; Santos, W. J. R. Soil maps, field knowledge, forest inventory and Ecological-Economic Zoning as a basis for agricultural suitability of lands in Minas Gerais elaborated in GIS. *Ciência e Agrotecnologia*, v. 37, n.6, p.538-549, 2013. <https://doi.org/10.1590/S1413-70542013000600007>.
- Silvino, A. N. O.; Silveira, A.; Musis, C. R.; Wyrepkowski, C. C.; Conceição, F. T. Determinação de vazões extremas para diversos períodos de retorno para o Rio Paraguai utilizando métodos estatísticos. *Geociências*, v. 26, n. 4, p. 369-378, 2007. <http://www.ppegeo.igc.usp.br/index.php/GEOSP/article/view/9652>. 01 Mar. 2017.
- Sistema computacional para análises hidrológicas - SisCAH. Viçosa: UFV, 2009. <http://www.gprh.ufv.br/?area=softwares>. 05 Jan. 2017.
- Souza, S.M.T. Deflúvios superficiais no estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: Hidrossistemas, 1993. 264p.
- Tucci, C. E. M. Regionalização de vazões. 4.ed. Porto Alegre: UFRGS, 2012. 943p.
- Veza, P.; Comoglio, C.; Rosso, M.; Viglione, A. Low flows regionalization in North-Western Italy. *Water Resources Management*, v.24, n.14, p.4049-4074, 2010. <https://doi.org/10.1007/s11269-010-9647-3>.
- Viola, M. R.; Mello, C. R.; Acerbi Júnior, F. W.; Silva, A. M. Modelagem hidrológica na Bacia Hidrográfica do Rio Aiuruoca, MG. *Revista Brasileira Engenharia Agrícola e Ambiental*, v.13, n.5, p.581-591, 2009. <https://doi.org/10.1590/S1415-43662009000500011>.
- Willmott, C. J. On the validation of models. *Physical Geography*, v.2, n.2, p.184-194, 1981.