



Vazões mínimas e de referência para outorga na região do Alto Rio Grande, Minas Gerais

Antônio M. da Silva¹, Polyanna M. de Oliveira², Carlos R. de Mello² & Cyntia Pierangeli³

RESUMO

Analisou-se, neste trabalho, a aplicação de modelos de probabilidade às séries históricas de vazões mínimas diárias anuais e mínimas anuais das médias de 7 dias consecutivos, para 7 estações fluviométricas à montante do reservatório da Usina Hidrelétrica de Camargos – CEMIG (UHE – Camargos) e se desenvolveram modelos matemáticos para regionalização dessas vazões na região, considerando-se características morfométricas e climáticas das bacias de drenagem monitoradas. Avaliou-se, ainda, de forma preliminar, a disponibilidade hídrica para a agricultura irrigada, tomando-se como referência as vazões $Q_{7,10}$ e $Q_{90\%}$ e se aplicaram os modelos de probabilidade Log-normal 3 parâmetros, Weibull e Gumbel, às séries históricas de vazões. Os modelos de regionalização foram gerados por regressão múltipla linear, ajustados pelo método dos mínimos quadrados e procedimento “backward” para seleção de variáveis significativas. As vazões mínima diária anual e média mínima de 7 dias, foram melhor representadas pelo modelo de probabilidades Log-normal 3 parâmetros. Os modelos de regionalização produziram bons ajustes estatísticos. O estudo indicou, ainda, a necessidade de um aprofundamento maior para a fixação dos critérios de outorga.

Palavras-chave: modelos de probabilidade, regionalização hidrológica, disponibilidade hídrica

Minimum and reference discharges for water rights concession criteria in Alto Rio Grande region, Minas Gerais, Brazil

ABSTRACT

The purpose of this study was to evaluate probability distribution models applied to annual minimum daily discharge and mean minimum discharge at seven days duration time in order to adjust regional hydrologic models for these variables working with seven bases located at upstream side of Camargos Hydroelectric Power Plant Reservoir in Alto Rio Grande region, considering topography and weather characteristics of basin as independent variables. Preliminary irrigation water availability was estimated based on $Q_{7,10}$ and $Q_{90\%}$ discharges. Log-normal 3 parameters, Weibull and Gumbel probability distribution models were tested to hydrological long term discharges series. Regional hydrologic models were adjusted by least square methodology and significant variables were selected by “backward” statistical procedure. Annual daily minimum discharge and mean minimum discharge at seven days duration time frequencies of occurrence were better represented by Log-normal 3 parameters probability distribution model, according to qui-square statistical test the regional hydrologic models have good statistical adjusting. This results indicated further necessity of detailed study for fixing water right concession criteria.

Key words: probability distribution models, regional hydrologic models, water availability

¹ Rua Benjamin Constant 125/301, CEP 37200-000, Lavras, MG. Fone: (35)3829-1386. E-mail: marciano@ufla.br. Pesquisador Bolsista CNPq.

² UFLA/DEG, Rua Manoel Fernandes Lima, 260/202, CEP 37200-000, Lavras, MG. Fone: (35)3829-1362. E-mail: polyanna.oliveira@uol.com.br; crmello@ufla.br

³ Prefeitura Municipal de Lavras. Av. Dr. Silvio Menicucci, 1575, CEP 37200-000, Lavras, MG. Fone: (35) 3694-4054. E-mail: cyntiap@hotmail.com

INTRODUÇÃO

Atualmente, a maioria dos governos e grande número de agências internacionais destacam a água como prioridade, dentro do conjunto dos recursos naturais estratégicos.

Em uma política holística e sustentável de recursos hídricos, os fatores hidrológicos e ecológicos crescem em importância, com relação aos tradicionais fatores administrativos, econômicos e políticos (Cruz, 2001). Sob esta ótica, o conceito de disponibilidade hídrica, uma das muitas variáveis a serem consideradas na atividade de gerenciamento de recursos hídricos, apresenta diferentes interpretações. O estabelecimento dos critérios de outorga de direito de uso das águas, além de estar vinculado à disponibilidade hídrica, é dependente dos sistemas jurídicos e econômicos locais.

A vazão de referência é o estabelecimento de um valor de vazão que passa a representar o limite superior de utilização da água em um curso d'água e é, também, um dos principais entraves à implementação de um sistema de outorga (Ribeiro, 2000; Câmara, 2003). A aplicação do critério de vazão de referência, segundo Harris et al. (2000), constitui-se em procedimento adequado para a proteção dos rios, pois as alocações para derivações são feitas, geralmente, a partir de uma vazão de base de pequeno risco.

No Brasil, cada estado tem adotado critérios particulares pragmáticos para o estabelecimento das vazões de referência para outorga sem, no entanto, apresentar justificativas da adoção desses valores; por exemplo, o estado do Ceará estabelece a referência para outorga em 90% da vazão regularizada com garantia de 90%, isto é, somente podem ser outorgados 90% da Q90% (Cabral, 1997; Studart et al., 1997), o que significa que, em tempos de estiagem, deve ser mantida uma vazão no rio correspondente a 10% da vazão Q90%. Em bacias com reservatórios e açudes, a vazão de permanência natural se modifica, sendo preferível chamá-la de vazão de regularização. Esta definição também é utilizada nos Estados do Rio Grande do Norte e Bahia, em que este último estabelece limites variáveis para a vazão de outorga, entre 80% a 95% da vazão regularizada com permanência de 90%, dependendo do manancial (Cruz, 2001); já os Estados de Minas Gerais e Paraná utilizam a vazão $Q_{7,10}$ como referência no estabelecimento das vazões outorgáveis. O Estado de Minas Gerais, extremamente conservador, estabelece a vazão outorgável em 30% da $Q_{7,10}$ (Schvartzman et al., 1999), fixando a vazão ecológica (a vazão que deve permanecer no rio) não inferior a 70% do $Q_{7,10}$. O Rio Grande do Sul estabelece que a outorga de uso dos recursos hídricos está condicionada às prioridades de uso estabelecidas no Plano Estadual de Recursos Hídricos e nos Planos de Bacia Hidrográfica (Rio Grande do Sul, 1996) significando que a vazão de referência poderá variar de uma bacia para outra, respeitando as particularidades de cada local.

Na falta de dados observados, estudos hidrológicos devem ser realizados para conduzir a estimativas de disponibilidade hídrica. Dentre os métodos, o de proporção de áreas, os interpolativos e os de regionalização, constituem-se em técnicas expeditas com ampla utilização, que merecem ser avaliados quanto à aplicabilidade, para suprir a deficiência de

dados e estimar a disponibilidade hídrica para a outorga de uso dos recursos hídricos.

A regionalização consiste num conjunto de ferramentas que exploram ao máximo as informações existentes, visando à estimativa das variáveis hidrológicas em locais sem dados ou informações insuficientes. Esta técnica pode ser utilizada para melhor explorar as amostras pontuais, verificar a consistência das séries hidrológicas e identificar a falta de postos de observação. Os postos selecionados devem ter pelo menos cinco anos de dados. A amostra não é necessariamente representativa para séries curtas na vizinhança de cinco anos, mas o conjunto dos postos pode ser representativo do comportamento das vazões em estudo para a região (Tucci, 2001; Chaves et al., 2002; Tucci, 1998). No estudo de regionalização devem ser consideradas as características morfométricas e climáticas das bacias que mais explicam a distribuição da vazão e sejam mais facilmente mensuráveis. Segundo Tucci et al. (1983), são usados, como características físicas, a área da bacia, o comprimento do curso d'água principal, a densidade de drenagem e a precipitação. Além dessas variáveis, pode-se incluir, também, o tempo de concentração e a altitude média da bacia.

Segundo Euclides (1992) não se pode definir, a priori, a distribuição de probabilidades para descrever a frequência de vazões em hidrologia e, sim, selecionar uma família de curvas indicadas ao tipo de dados analisados e, em seguida, individualizar a lei de probabilidade que mais se adapta a interpretar cada série histórica disponível. Em estudos envolvendo vazões mínimas, Kaviski (1983) aplicou as distribuições de probabilidades Log-normal a três parâmetros, Gumbel e Weibull em pequenas bacias hidrográficas do Estado de Santa Catarina. A distribuição selecionada como a mais adequada foi a de Weibull, sendo adotada em 36 estações. Euclides (1992) estudando a região da bacia do Rio Juatuba, utilizou as distribuições de Gumbel, Log-normal a dois e três parâmetros e Fuller-Coutagne, e concluiu que as vazões mínimas foram mais bem representadas pela distribuição Log-normal a três parâmetros. Há tendência do modelo Log-normal, em suas duas versões, predominar para vazões mínimas, apesar do modelo Weibull ter sido o mais adequado, em estudos no estado de Santa Catarina. Pelos aspectos mencionados objetivou-se, com este trabalho, estudar a aplicação de modelos de probabilidade às séries históricas de vazões mínima diária anual e mínima média de sete dias consecutivos, para 7 estações fluviométricas à montante do reservatório da Usina Hidrelétrica de Camargos – CEMIG (UHE – Camargos), desenvolver modelos matemáticos para regionalização dessas vazões, nesta região, considerando-se características morfométricas das bacias de drenagem em estudo e avaliar impacto dos critérios de vazão outorgável na expansão da agricultura irrigada.

MATERIAL E MÉTODOS

A sub-bacia do Alto Rio Grande vai desde sua nascente, a 1980 m de altitude, próximo ao Parque Nacional do Itatiaia, até a foz do Rio das Mortes, a 800 m de altitude, no

Município de Ijaci abrangendo, total ou parcialmente, 64 municípios que ocupam uma área de 15 mil km².

O trabalho foi desenvolvido com dados relativos à parte de montante da região do Alto Rio Grande, Minas Gerais, até a seção onde se encontra o maciço da represa de Camargos. As características morfométricas das sub-bacias, necessárias ao estudo da regionalização, foram obtidas por meio de carta topográfica do IBGE, na escala de 1:50.000 (área, densidade de drenagem, comprimento do curso d'água principal). Os dados hidrológicos foram disponibilizados pela CEMIG e pela ANA (Agência Nacional de Águas).

Na Tabela 1 apresentam-se informações das estações fluviométricas e algumas características das sub-bacias do Alto Rio Grande utilizadas no trabalho, sendo área (A), comprimento do curso d'água principal (L), tempo de concentração (Tc).

Como primeiro critério para seleção dos postos, foram adotados aqueles que se encontram à montante da Represa de Camargos, constituindo-se séries históricas de trinta anos para as estações pluviométricas e fluviométricas. Realizou-se análise de homogeneidade hidrológica da região, de acordo com Tucci (2001).

Para regionalização da vazão mínima utilizaram-se os valores mínimos diários anuais e os valores mínimos das médias das vazões diárias, em sete dias consecutivos, obtidos por média móvel e se empregaram as distribuições de Gumbel, Weibull e Log-normal a três parâmetros, para representar eventos mínimos. A seleção das distribuições de probabilidade que melhor representaram os dados de cada série histórica disponível foi realizada pelos testes de Kolmogorov-Smirnov e Qui-quadrado. No teste de Kolmogorov-Smirnov é feita a comparação entre o máximo desvio em módulo resultante da diferença entre os valores de frequências observadas e teóricas, com o valor tabelado com base no tamanho da amostra e nível de significância. No teste de qui-quadrado a comparação é feita entre a soma do quadrado dos desvios entre as frequências observadas e teóricas ($\lambda^2_{\text{calculado}}$) e o valor obtido em tabela ($\lambda^2_{\text{tabelado}}$), em função do número de graus de liberdade (n° de classes - n° de parâmetros - 1) e nível de significância. Obteve-se o número de classes de agrupamento pela raiz quadrada do número de dados. Para que o modelo de probabilidades seja considerado adequado, os valores calculados deverão ser iguais ou inferiores aos tabelados para cada teste; em seguida, fez-se o ajuste dos modelos de regionalização por meio de regressões, utilizando-se o programa SAS for Windows. Incluíram-se, como variáveis independentes: área das sub-bacias, precipi-

tação total anual, densidade de drenagem e comprimento do curso d'água principal. No ajuste dos modelos de regionalização empregou-se o método de mínimos quadrados, com base no procedimento backward, o qual seleciona as variáveis significativamente diferentes de zero (0) pelo teste t e a um nível de significância (5%). Os melhores modelos foram selecionados observando-se os maiores valores do coeficiente de determinação, menores valores do erro médio, significância dos parâmetros estimados pelo teste t, dispersão dos valores em torno da reta 1:1 e menor número de variáveis independentes. O erro médio absoluto foi calculado por:

$$e = \frac{\sum_{i=1}^n |V_{ob} - V_p|}{V_{ob} / n} \quad (1)$$

em que V_{ob} é o i-ésimo valor observado (real), V_p é o i-ésimo valor predito pelo modelo e n , o número de dados.

A vazão $Q_{90\%}$ foi estimada a partir da curva de permanência ou de duração de vazões, que relaciona a vazão e a porcentagem do tempo em que ela é superada ou igualada ao longo do período histórico utilizado para sua construção. A técnica de obtenção da curva de permanência é empírica e também amplamente descrita nos livros de hidrologia (Tucci, 1998 e 2001).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Avaliação do ajuste dos dados de vazão aos modelos de probabilidade

Após o agrupamento dos dados, para aplicação do teste de qui-quadrado o número de graus de liberdade para o modelo Log-Normal a três parâmetros foi igual a um e para os modelos Weibull e Gumbel, igual a dois. Assim, considerando-se um nível de significância de 5%, os valores de $\lambda^2_{\text{tabelado}}$ foram de 3,84 para a distribuição Log-Normal a três parâmetros e de 5,99 para as demais distribuições. No teste de Kolmogorov-Smirnov o $\Delta F_{\text{tabelado}}$, para um nível de significância de 5%, foi de 0,242.

Pelos dados da Tabela 2 observa-se que os dados de vazão mínima de 7 dias das estações fluviométricas Bom Jardim e Fazenda Paraíba, não se ajustaram, pelo teste de Qui-quadrado, ao modelo de Weibull; além disso, que houve ajuste dos dados de todas as estações aos modelos Log-normal 3 parâmetros e Gumbel (Assintótica de Valores Mínimos), por ambos os testes. Apesar desta constatação, o modelo Log-normal

Tabela 1. Informações das estações fluviométricas e algumas características das sub-bacias do Alto Rio Grande utilizadas no trabalho

Estação	Curso d'água	Latitude	Longitude	Altitude (m)	A (km ²)	L (km)	Tc (h)
Aiuruoca	Rio Aiuruoca	21° 58' 48"	44° 36' 05"	966	536	58,68	4,03
Andrelândia	Rio Turvo Pequeno	21° 44' 17"	44° 18' 19"	897	274	41,95	8,98
Bom Jardim	Rio Grande	21° 56' 52"	44° 11' 47"	1175	509	92,43	5,24
Carvalhos	Rib. do Francês	21° 59' 52"	44° 27' 48"	1087	105	23,72	1,46
Faz. Laranjeiras	Rio Aiuruoca	21° 40' 33"	44° 20' 34"	905	2083	156,4	9,53
Faz. Paraíba	Rio Turvo Grande	21° 44' 42"	44° 21' 15"	940	381	46,63	6,89
Madre de Deus	Rio Grande	21° 29' 32"	44° 19' 37"	875	2226	260,65	18,74

Tabela 2. Testes de Qui-quadrado e Kolmogorov-Smirnov aplicados para avaliar o ajuste dos dados de vazão mínima média de 7 dias e de vazão mínima diária anual aos modelos de probabilidade, para estações fluviométricas à montante da represa da UHE Camargos

Estação	Modelo	Vazão Mínima Média de 7 dias		Vazão mínima diária anual	
		$\chi^2_{\text{calculado}}$	$ \Delta F _{\text{calc,máx}}$	$\chi^2_{\text{calculado}}$	$ \Delta F _{\text{calc,máx}}$
Aiuruoca	L-N 3	2,80	0,115	0,60	0,135
	Weibull	3,68	0,200	1,86	0,205
	Gumbel	3,10	0,151	1,73	0,165
Andreilândia	L-N 3	1,16	0,125	0,57	0,134
	Weibull	5,02	0,129	3,62	0,127
	Gumbel	3,01	0,097	1,86	0,095
Bom Jardim	L-N 3	2,32	0,095	1,62	0,075
	Weibull	6,07**	0,190	5,23	0,156
	Gumbel	3,31	0,112	2,53	0,099
Carvalhos	L-N 3	0,42	0,070	0,36	0,094
	Weibull	0,037	0,112	0,06	0,124
	Gumbel	0,42	0,070	0,34	0,091
Fazenda Laranjeiras	L-N 3	0,36	0,117	0,39	0,110
	Weibull	3,27	0,146	3,45	0,146
	Gumbel	0,88	0,097	0,90	0,089
Fazenda Paraíba	L-N 3	1,13	0,140	0,89	0,157
	Weibull	6,21**	0,163	0,99	0,192
	Gumbel	3,87	0,150	1,42	0,136
Madre Deus	L-N 3	0,235	0,128	0,11	0,142
	Weibull	3,95	0,142	0,93	0,167
	Gumbel	1,58	0,104	0,12	0,119

**Não adequado

a 3 parâmetros produziu menores valores de qui-quadrado calculado, demonstrando ser, para esta série hidrológica, mais preciso.

Analisando-se os dados de vazão mínima diária anual (Tabela 2) observa-se que ocorreu aderência dos dados de todas as estações fluviométricas a todos os modelos, por ambos os testes. Como no caso anterior, o modelo Log-normal 3 parâmetros produziu ajustes de melhor qualidade, evidenciado pelos menores valores de qui-quadrado calculado. Euclides (1992) analisando dados de vazão mínima em sub-bacias do Rio Juatuba, concluiu que o modelo Log-normal 3 parâmetros foi o mais adequado para estimativa desta variável hidrológica.

Regionalização de vazões mínimas de 7 dias

Apresentam-se, na Figura 1, gráficos que relacionam os valores de vazão mínima diária anual, adimensionalizados pela respectiva vazão média; há de forma nítida, um comportamento similar dos valores de todas as estações em relação aos valores de tempo de retorno, podendo-se considerar que as mesmas se encontram numa região hidrológicamente homogênea permitindo, desta forma, o ajuste de modelos de regionalização tanto para a variável vazão mínima diária anual quanto para a vazão mínima de 7 dias. Observa-se que a estação Fazenda Paraíba apresentou comportamento ligeiramente diferenciado das demais, uma vez que a curva se afasta da média regional em relação às outras sem, entretanto, comprometer o processo.

Na Tabela 3 apresentam-se os modelos gerados para pre-

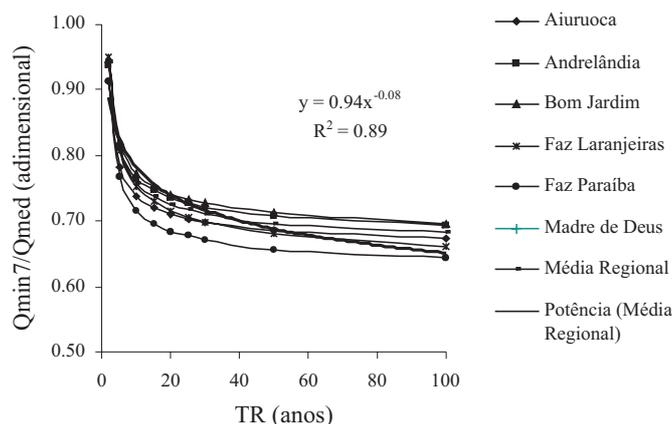


Figura 1. Comportamento dos dados de vazão mínima diária anual adimensionalizados pela vazão média, em função do tempo de retorno para estações fluviométricas da região Alto Rio Grande

dição de vazões mínimas de 7 dias, variável esta de suma importância para projetos de outorga do uso da água no estado de Minas Gerais. Avalia-se, primeiramente, que as variáveis associadas à precipitação produziram melhorias para o modelo geral destacando-se, no entanto, a área das sub-bacias como sendo a única variável morfométrica de significância para a predição da vazão mínima de 7 dias; neste caso, a precipitação, associada ao modelo, é a total anual, pois influencia o comportamento hidrológico das sub-bacias ao longo do ano, especialmente nos períodos de seca.

É possível destacar aspectos relevantes dos modelos ajustados, em que um deles é a qualidade de ajuste, tanto para o modelo geral como para os modelos para cada tempo de retorno, com erros médios pequenos; um outro é a significância das variáveis estimadas. Para estimativa da vazão mínima de 7 dias, ambos os modelos podem ser aplicados, sem dúvida com melhores resultados, ao se aplicar os modelos individuais para cada TR.

Regionalização de vazões mínimas diárias anuais

Na Tabela 4 constam os modelos ajustados para predição da vazão mínima diária anual, variável hidrológica de grande relevância no contexto ambiental e no uso e manejo dos recursos hídricos em bacias hidrográficas. Os modelos ajustados possuem qualidades estatísticas baseadas no coeficiente de determinação e na significância dos parâmetros, que permitem qualificá-lo como ótimo preditor da vazão mínima anual; além disso, apresenta grande semelhança com aquele gerado para vazão mínima média de 7 dias, tanto estrutural, na figura das variáveis de entrada que constituem o modelo, quanto nas suas qualidades estatísticas.

Os modelos para cada tempo de retorno apresentam, da mesma forma que os anteriores, excelente qualidade estatística, permitindo a predição da vazão mínima diária anual com elevada precisão. Os resultados são semelhantes aos gerados para vazão mínima de 7 dias, com erros médios pouco superiores.

Chaves et al. (2002) trabalhando com vazões mínimas associadas a percentis de 90%, ajustaram modelos exponenciais em função da área, extraída de 11 sub-bacias do rio Itapicuru, BA, obtendo coeficientes de determinação

Tabela 3. Modelos ajustados para vazão mínima de 7 dias em sub-bacias à montante do reservatório da UHE Camargos/CEMIG

Tipo de Modelo	Modelo	Significância dos Parâmetros	R ²	Erro (%)
Geral	$Q_{\min 7} = 1,40 - 2,39.10^{-6} AP - 7,264.10^{-3} A + 1,62.10^{-4} A^2 - 1,996.10^{-5} A^2 \ln(A)$	intercepto: 0,0015** AP: 0,0001** A ² *ln (A): 0,0001** A ² : 0,0001** A: 0,0257**	0,995	9,6
TR = 5 anos	$Q_{\min 7} = 2,233 - 0,02019 A + 2,199.10^{-4} A^2 - 2,702.10^{-5} A^2 \ln(A)$	intercepto: 0,0772* A ² *ln (A): 0,009** A ² : 0,0136* A: 0,0452*	0,997	8,3
TR = 20 anos	$Q_{\min 7} = 1,74 - 0,016 A + 1,86.10^{-4} A^2 - 2,286.10^{-5} A^2 \ln(A)$	intercepto: 0,1227 ^{ns} A ² *ln (A): 0,013* A ² : 0,0169* A: 0,0718*	0,997	11,0
TR = 50 anos	$Q_{\min 7} = 1,50 - 0,01406 A + 1,71.10^{-4} A^2 - 2,103.10^{-5} A^2 \ln(A)$	intercepto: 0,1618 ^{ns} A ² * ln (A): 0,0161* A ² : 0,0169* A: 0,0956*	0,997	8,7
TR = 100 anos	$Q_{\min 7} = 1,35 - 0,0127 A + 1,61.10^{-4} A^2 - 1,98.10^{-5} A^2 \ln(A)$	intercepto: 0,1927 ^{ns} A ² * ln (A): 0,0188** A ² : 0,0197* A: 0,1166 ^{ns}	0,996	12,8

** Significativo a 1%; *Significativo a 5%; ^{*}Significativo a 10%; ^{ns}: Não significativo; P – Precipitação total anual, mm; A – Área de drenagem, km²

menores que 60% e com erro médio de predição maior que 280%. Euclides et al. (2001), trabalhando com regressões para regionalização de vazões mínimas anuais e 33 estações fluviométricas na região Alto São Francisco, encontraram coeficientes de determinação médios de 0,94. Esses trabalhos, comparativamente ao presente estudo, demonstram que tanto os modelos gerados para a regionalização de vazões, seja para mínima anual das médias de 7 dias e

mínima diária anual, baseada em modelos de regressão, seja para a metodologia adotada, podem ser implementados.

Na Tabela 5 encontram-se modelos potenciais para as vazões mínimas de 7 dias e mínimas diárias anuais em função da área da bacia hidrográfica. Verifica-se, com base no coeficiente de determinação gerado, que os referidos modelos são de qualidade consideravelmente inferior aos das Tabelas 3 e 4, demonstrando que apenas a variável área,

Tabela 4. Modelos ajustados para vazão mínima diária anual em sub-bacias à montante do reservatório da UHE Camargos-CEMIG

Tipo de Modelo	Modelo	Significância dos Parâmetros	R ²	Erro (%)
Geral	$Q_{\min} = 1,27 - 2,35.10^{-6} AP - 6,404.10^{-3} A + 1,52.10^{-4} A^2 - 1,881.10^{-5} A^2 \ln(A)$	intercepto: 0,0045** AP: 0,0001** A ² * ln (A): 0,0576* A ² : 0,0001** A: 0,0041**	0,994	13,9
TR = 5 anos	$Q_{\min} = 2,181 - 0,02005 A + 2,154.10^{-4} A^2 - 2,646.10^{-5} A^2 \ln(A)$	intercepto: 0,092* A ² * ln (A): 0,0112* A ² : 0,0116* A: 0,050*	0,997	9,2
TR = 20 anos	$Q_{\min} = 1,56 - 0,01479 A + 1,761.10^{-4} A^2 - 2,169.10^{-5} A^2 \ln(A)$	intercepto: 0,1953 ^{ns} A ² * ln (A): 0,0221* A ² : 0,023* A: 0,1169 ^{ns}	0,997	9,7
TR = 50 anos	$Q_{\min} = 1,356 - 0,01276 A + 1,584.10^{-4} A^2 - 1,95.10^{-5} A^2 \ln(A)$	intercepto: 0,2064 ^{ns} A ² * ln (A): 0,022* A ² : 0,0231* A: 0,1271 ^{ns}	0,996	10,9
TR = 100 anos	$Q_{\min} = 1,20 - 0,01135 A + 1,479.10^{-4} A^2 - 1,824.10^{-5} A^2 \ln(A)$	intercepto: 0,2487 ^{ns} A ² * ln (A): 0,0261** A ² : 0,0274* A: 0,1581 ^{ns}	0,996	9,4

** Significativo a 1%; *Significativo a 5%; ^{*}Significativo a 10%; ^{ns}: Não significativo

Tabela 5. Modelos potenciais ajustados para dados de vazões mínimas diárias anuais e mínima anual das médias de 7 dias, em função da área, para sub-bacias hidrográficas à montante da UHE/Camargos-CEMIG

Variável	Tr = 5 anos
Q _{mínima 7 dias}	Q _{min} = 0,0112 A ^{0,973} , R ² = 0,889
Q _{mínima anual}	Q _{min} = 0,0095 A ^{0,992} , R ² = 0,904
Variável	Tr = 20 anos
Q _{mínima 7 dias}	Q _{min} = 0,0052 A ^{1,034} , R ² = 0,876
Q _{mínima anual}	Q _{min} = 0,0072 A ^{1,02} , R ² = 0,909
Variável	Tr = 50 anos
Q _{mínima 7 dias}	Q _{min} = 0,001778 A ^{1,1528} , R ² = 0,872
Q _{mínima anual}	Q _{min} = 0,00621 A ^{1,0315} , R ² = 0,916
Variável	Tr = 100 anos
Q _{mínima 7 dias}	Q _{min} = 0,00611 A ^{1,0389} , R ² = 0,921
Q _{mínima anual}	Q _{min} = 0,005668 A ^{1,0414} , R ² = 0,918

trabalhada na forma de um modelo potencial e/ou exponencial, não produzirá modelos de qualidade comparável aos ajustados por regressão múltipla, pela técnica backward. Tucci (2001) apresenta modelos desse tipo para representar vazões associadas aos percentis de 50 e 95%, porém com coeficiente de determinação acima de 95%. O autor destacou que o acréscimo da variável precipitação não produziu melhorias consistentes aos modelos. Os resultados encontrados neste trabalho indicam que a precipitação total anual é importante para caracterizar as vazões mínimas de 7 dias e mínimas diárias anuais, visto que os coeficientes de ajuste (R²) foram significativamente maiores com a inclusão desta variável nos modelos de regionalização.

Na Tabela 6 encontram-se os valores característicos das vazões mínima diária anual e vazões de referência Q_{7,10} e Q_{90%} para as estações incluídas no estudo, além dos respec-

Tabela 6. Valores das vazões mínimas diária anual, de referência e respectivos rendimentos específicos das estações fluviométricas do Alto Rio Grande – Período 1969- 1999

Estação	Vazões (m ³ s ⁻¹)			Rendimento específico (L s ⁻¹ km ²)		
	Min	Q ₉₀	Q _{7,10}	Min	Q ₉₀	Q _{7,10}
Carvalhos	0,92	1,46	0,98	8,76	13,90	9,33
Andrelândia	1,68	2,85	2,14	6,13	10,40	7,81
Faz. Paraíba	1,6	3,69	2,33	4,20	9,69	6,12
Aiuruoca	4,57	8,45	5,78	8,53	15,76	10,78
Faz. Laranjeira	13,9	24,71	17,25	6,67	11,86	8,28
Bom Jardim	4,5	7,11	4,95	8,84	13,97	9,72
Madre de Deus	11,42	22,02	23,86	5,13	9,89	10,72

tivos valores dos rendimentos específicos, cuja análise dentro de uma mesma rede de drenagem (Carvalhos à Fazenda Paraíba; Aiuruoca à Fazenda Laranjeiras e Bom Jardim à Madre de Deus) permite que se identifique com clareza o decaimento com o aumento da área de drenagem.

Com base nos valores de Q_{7,10} e Q_{90%} montou-se a Tabela 7 considerando-se algumas demandas bruta de irrigação, sob a forma de lâmina por dia (mm d⁻¹). Consideraram-se dois critérios de fixação da vazão máxima de referência, um adotado pelo IGAM para Minas Gerais (até 30% de Q_{7,10}) e o outro pela SRH do estado da Bahia (até 20% de Q_{90%}). Observa-se que, quanto aos critérios, praticamente não há diferença entre os valores resultantes, embora o critério do IGAM tenda a propiciar valores ligeiramente superiores. Quanto à área máxima irrigável em relação à área da bacia hidrográfica, vê-se a redução do valor com o aumento da área de drenagem da bacia. Considerando-se uma demanda bruta de 6 mm d⁻¹ (equivalente à 0,694 L s⁻¹ ha⁻¹) os valores para as

Tabela 7. Área máxima irrigável por km² em função de diferentes demandas de irrigação e de dois critérios de vazão outorgável para as estações fluviométricas do Alto Rio Grande

Estações	Demanda Bruta (mm d ⁻¹)	Área Máxima (%)		Estações	Demanda Bruta (mm d ⁻¹)	Área Máxima (%)	
		20%Q ₉₀	30%Q _{7,10}			20%Q ₉₀	30%Q _{7,10}
Carvalhos (105 km ²) Rib. do Francês	2	12,01	12,09	Aiuruoca (536 km ²) Rio Aiuruoca	2	13,62	13,97
	4	6,01	6,05		4	6,81	6,99
	6	4,00	4,03		6	4,54	4,66
	8	3,00	3,02		8	3,41	3,49
Andrelândia (274 km ²) Rio Turvo Pequeno	10	2,40	2,42	10	2,72	2,79	
	2	8,99	10,12	2	10,25	10,73	
	4	4,49	5,06	4	5,12	5,37	
Faz. Paraíba (381 km ²) Rio Turvo Grande	6	3,00	3,37	Fazenda Laranjeiras (2083 km ²) Rio Aiuruoca	6	3,42	3,58
	8	2,25	2,53	8	2,56	2,68	
	10	1,80	2,02	10	2,05	2,15	
Bom Jardim (509 km ²) Rio Grande	2	8,37	7,93	2	12,07	12,60	
	4	4,18	3,97	4	6,03	6,30	
	6	2,79	2,64	6	4,02	4,20	
	8	2,09	1,98	8	3,02	3,15	
Madre de Deus (2226 km ²) Rio Grande	10	1,67	1,59	10	2,41	2,52	
	2			2	8,55	13,89	
	4			4	4,27	6,95	
	6			6	2,85	4,63	
			8	2,14	3,47		
			10	1,71	2,78		

áreas irrigáveis se encontram na faixa dos 4%, constituindo-se numa forte limitação e sinalizando, para os responsáveis pela gestão dos recursos hídricos, a necessidade de uma avaliação muito criteriosa nos processos de concessão de outorga, já que a agricultura irrigada tem participado com parcelas consideráveis (em média acima de 60%) no uso da água.

A Tabela 8 apresenta os valores de vazão mínima anual das médias de 7 dias e tempo de retorno de 10 anos, obtidos pela metodologia apresentada por Souza (1998) e os calculados neste trabalho. Constata-se que os desvios entre os valores fornecidos pelas duas metodologias estão dentro de um intervalo aceitável em hidrologia.

Tabela 8. Comparação dos valores de vazão mínima anual das médias de 7 dias e 10 anos de recorrência, calculados com base em série histórica e extraído de Souza (1998)

Estações	Q _{7,10} (m ³ s ⁻¹)		Erro%
	Souza (1998)	Calculada	
Aiuruoca	5,780	4,39	24,10
Andrelândia	2,140	1,75	18,43
Bom Jardim	4,950	3,84	22,39
Carvalhos	0,980	0,80	18,16
Faz Laranjeiras	17,240	14,60	15,33
Faz Paraíba	2,330	2,43	-4,17
Madre de Deus	16,950	14,18	46,34

CONCLUSÕES

1. Os modelos de probabilidade Gumbel e Log-normal a 3 parâmetros mostraram-se adequados aos dados de vazões mínima diária anual e mínima média de 7 dias; no entanto, o modelo Log-normal 3 parâmetros produziu ajustes de melhor qualidade.

2. Os modelos de regionalização para vazões mínimas diárias e mínimas médias de 7 dias apresentaram boas qualidades estatísticas e os modelos ajustados para cada tempo de retorno apresentaram qualidade estatística superior à do modelo geral.

3. Quanto aos critérios de fixação da vazão máxima outorgável, no presente estudo não se detectaram diferenças significativas entre eles; entretanto, os valores máximos de áreas potencialmente irrigáveis apresentam-se bastante limitantes.

LITERATURA CITADA

Cabral, B. Legislação Federal de Recursos Hídricos. Senado Federal, Brasília, 1997. Cadernos Legislativos n° 002/97

Camara, A. C. F. C. Análise da vazão máxima outorgável e da introdução simplificada da qualidade da água no processo de outorga da bacia do Rio Gramame (PB). Porto Alegre: UFRGS. 2003. 219p. Dissertação Mestrado

Chaves, H. M. L.; Rosa, J. W. C.; Vadas, R. G.; Oliveira, R. V. T. Regionalização de vazões mínimas em bacias através de interpolação em sistemas de informação geográfica. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Porto Alegre, v.7, n.3, p.43-52, 2002.

Cruz, J. C. Disponibilidade hídrica para outorga: avaliação dos aspectos técnicos e conceituais. Porto Alegre: UFRGS. 2001. 199p. Tese Doutorado

Euclides, H. P. Regionalização de vazões máximas e mínimas para a bacia do rio Juatuba-MG. Viçosa: UFV, 1992. 66p. Dissertação Mestrado

Euclides, 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, Porto Alegre, v.6, n.2, p.81-105, 2001.

Harris, N. M.; Gurnell, A. M.; Hannah, D. M.; Petts, G. E. Classification of river regimes: a context for hydroecology. In: John Wiley & Sons, Hardcover: Hydrological Processes. 2000, v.14, p.2831-2848.

Kaviski, E. Vazões de estiagens em pequenas bacias hidrográficas do estado de Santa Catarina. In: Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, 5, 1983. Florianópolis. Anais ... Florianópolis: ABRH, 1983, p.43-67.

Ribeiro, M. M. R. Alternativas para outorga e a cobrança pelo uso da água: Simulação de um caso. Porto Alegre: IPH/URGS, 2000. 200p. Tese Doutorado

Rio Grande do Sul. Decreto n° 37.033, de 21 de novembro de 1996, regulamenta a outorga do direito de uso da água no Estado do Rio Grande do Sul, prevista nos arts. 29, 30 e 31 da Lei n° 10.350, de 30 de dezembro de 1994. Diário Oficial da República Federativa do Brasil, em 22 de novembro de 1996.

Schwartzman, A. S.; Medeiros, M. J.; Nascimento, N. O. Avaliação preliminar do critério de outorga adotado do estado de Minas Gerais. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 13, 1999, Belo Horizonte. Anais... Belo Horizonte: ABRH, 1999. CD Rom.

Souza, S. M. T. de. Deflúvios superficiais no estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: Hidrossistemas, 1998. 264p.

Stuart, T. M. C.; Campos, J. N. B.; Costa, A. M. A alocação e o uso dos recursos hídricos no Ceará. In: Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 12, 1997, Vitória. Anais... Vitória: ABRH, 1997. CD Rom

Tucci, C. E. M. Modelos hidrológicos. Porto Alegre: UFRGS, ABRH, 1998. 669p.

Tucci, C. E. M. Regionalização de vazões. In: Tucci, C. E. M. (Org.) Hidrologia: ciência e aplicação. 2.ed. Porto Alegre: ABRH/UFRGS, 2001. p.573-620.

Tucci, C. E. M.; Albuquerque, A. L.; Silveira, G. L.; Sanchez, J. E. Estudo regional de vazões máximas e médias do Alto Paraguai. In: Simpósio Brasileiro de Hidrologia e Recursos Hídricos, 5, 1983, Florianópolis. Anais... Florianópolis: ABRH, 1983. p.17 – 42.