

Métodos estatísticos na determinação de vazão de referência

Isabel Kaufmann de Almeida*, Teodorico Alves Sobrinho, Bruno Bernardo dos Santos,
Jorge Luiz Steffen, Cláudia Gonçalves Vianna Bacchi

Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Campo Grande, MS, Brasil

*Autor correspondente, e-mail: viaeng@uol.com.br

Resumo

Neste trabalho buscou-se fornecer embasamento a estudos de disponibilidade hídrica sub-bacia hidrográfica do Rio Miranda, Estado de Mato Grosso do Sul, Brasil. Para tanto, objetivou-se analisar a aplicação dos métodos de distribuição de probabilidade teórica Normal, Log-Normal, Weibull, Gumbel e Log-Gumbel aos dados de vazões mínimas de sete dias consecutivos da bacia. Para verificar a aderência das probabilidades estimadas às frequências observadas, aplicou-se o teste de Kolmogorov-Smirnov. Os resultados obtidos comprovam que a distribuição Log-Gumbel demonstra maior precisão na representação dos dados da série histórica e alcança o melhor ajuste do valor da $Q_{7,10}$.

Palavras-chaves: vazão ecológica, sustentabilidade ambiental, recursos hídricos

Statistical methods in determination of reference flow

Abstract

In this study we aimed to provide the foundation studies of water availability in the Miranda river basin, Mato Grosso do Sul, Brazil. Therefore, this study aimed to analyze the application of Normal, Log-Normal, Weibull, Gumbel and Log-Gumbel theoretical probability methods to data of minimum flows for seven consecutive days of the basin. To verify the adherence to the estimated probabilities of observed frequencies, we applied the Kolmogorov-Smirnov test. The results show that the Log-Gumbel distribution show greater accuracy in the data representation of the series and reach the best fit value of $Q_{7,10}$.

Keywords: ecological flow, environmental sustainability, water resource

Introdução

A crescente demanda de água aumenta a necessidade de estudos investigativos a respeito da disponibilidade hídrica em bacias hidrográficas. Conforme Pereira et al. (2007), o desenvolvimento de pesquisas que envolvam o processo de formação do escoamento é uma das maiores demandas ambientais atuais, uma vez que fornecem subsídios à tomada de decisão por parte dos órgãos gestores dos recursos hídricos.

De acordo com Sánchez-Román et al. (2009), a importância na gestão da água está diretamente ligada com a questão da sustentabilidade ambiental, sendo uma função do desenvolvimento dos diversos componentes políticos, econômicos e sociais atuantes dentro da bacia hidrográfica. Mutiga et al. (2010), afirmam que manter a sustentabilidade dos recursos hídricos significa usar os recursos naturais com sabedoria, protegendo os ecossistemas com perspectiva de manutenção para gerações futuras, ou seja, realizar o gerenciamento desse recurso praticando o uso responsável.

Segundo Benetti et al. (2003), uma das estratégias requeridas com vistas à continuidade das funções oferecidas pela água é a manutenção de vazões mínimas que suportem o ecossistema aquático. Essas vazões são definidas através de valores numéricos que representam o volume de água a ser mantido no leito do rio, após as retiradas necessárias para atender os diferentes usos externos.

A aleatoriedade dos processos hidrológicos dificulta sua previsão. No entanto, através de tratamentos estatísticos, dentro de uma margem de erro, pode-se estabelecer o modelo que melhor representa a variável em estudo. Douglas & Vogel (2006) asseguram que dispondo-se de séries históricas de vazão para os cursos d'água, visando previsões futuras, faz-se necessário seu adequado tratamento por meio de análises probabilísticas ou estocásticas. Para Lanna (2004), os dados hidrológicos devem ser reunidos sem uma amostra e posteriormente submetidos a uma análise estatística, visando à definição de probabilidades. Essa análise deve se ajustar melhor possível à amostra, a fim de baseado em seus parâmetros, criar modelos

teóricos de probabilidade.

Os estudos apresentados por Silva et al. (2006); Silvino et al. (2007) e Mello et al. (2010) constituem exemplos de aplicação e análise de modelos de distribuições de probabilidade na estimativa de vazões mínimas em bacias hidrográficas. De acordo com Silvino et al. (2007), a possibilidade de utilização de uma distribuição teórica reside no ajuste às distribuições reais, verificada pela aplicação de testes de aderência. Esses testes possibilitam investigar se os valores amostrais podem ser considerados representativos de uma população.

A Lei 9.433 (Brasil, 1997), apresenta como um de seus instrumentos a outorga de direito de uso dos recursos hídricos. Neste contexto, ressalta-se a importância do conhecimento hidrológico no que se refere à determinação de valores adequados de vazões de referência para disponibilidade hídrica.

A vazão média mínima anual de 7 dias consecutivos e período de retorno de 10 anos, denominada $Q_{7,10}$, é um parâmetro hidrológico frequentemente utilizado em estudos de planejamento e gestão da utilização dos recursos hídricos, pois fornece uma estimativa estatística da disponibilidade hídrica dos escoamentos naturais da água. A $Q_{7,10}$ reflete uma situação crítica de escassez e sua adoção praticamente elimina o risco de suspensão dos usos outorgados na bacia (Oliveira & Fioreze, 2011). Smakhtin & Toulouse (1998) examinaram diferentes tipos de vazões de referência em mais de 200 estações de medição na África do Sul e concluíram que a vazão $Q_{7,10}$ é o índice mais extremo para condições de vazões mínimas. Em alguns estados do Brasil, a legislação relativa à outorga para utilização dos recursos hídricos superficiais em cursos de água estabelece uma porcentagem da $Q_{7,10}$ como vazão residual mínima a ser mantida a jusante das derivações.

A área da sub-bacia hidrográfica do Rio Miranda é uma região de grande desenvolvimento agropecuário. Desta forma, justifica-se a realização de estudos que forneçam informações sobre a vazão de estiagem deste rio, propiciando o aproveitamento otimizado da água, com baixo impacto ambiental.

Neste trabalho objetivou-se analisar e

comparar as distribuições de probabilidades teóricas Normal, Log-Normal a dois parâmetros, Weibull, Gumbel e Log-Gumbel, ajustadas a uma série histórica de vazões médias mínimas anuais de sete dias consecutivos para o Rio Miranda. Para verificar a aderência das probabilidades estimadas às frequências observadas, aplicou-se o teste de Kolmogorov-Smirnov.

Material e Métodos

Área de estudo

O trabalho foi desenvolvido com dados hidrológicos da estação fluviométrica Aquidauana (código: 66945000), pertencente à

rede hidrometeorológica da Agência Nacional de Águas (Latitude: 20°27'30.99"S e Longitude: 55°46'50.99"O). A área de drenagem da sub-bacia é de 15.200 km² (ANA, 2009), sendo o Rio Aquidauana tributário do Rio Miranda, que por sua vez está inserido na bacia do Rio Paraguai (Figura 1).

A bacia hidrográfica do Rio Miranda encontra-se em estágio avançado em relação às outras bacias de Mato Grosso do Sul no que tange a gestão dos recursos hídricos, contando com Comitê de Bacia Hidrográfica (CBH-Miranda) aprovado em 2005 (SEMAG, 2009).

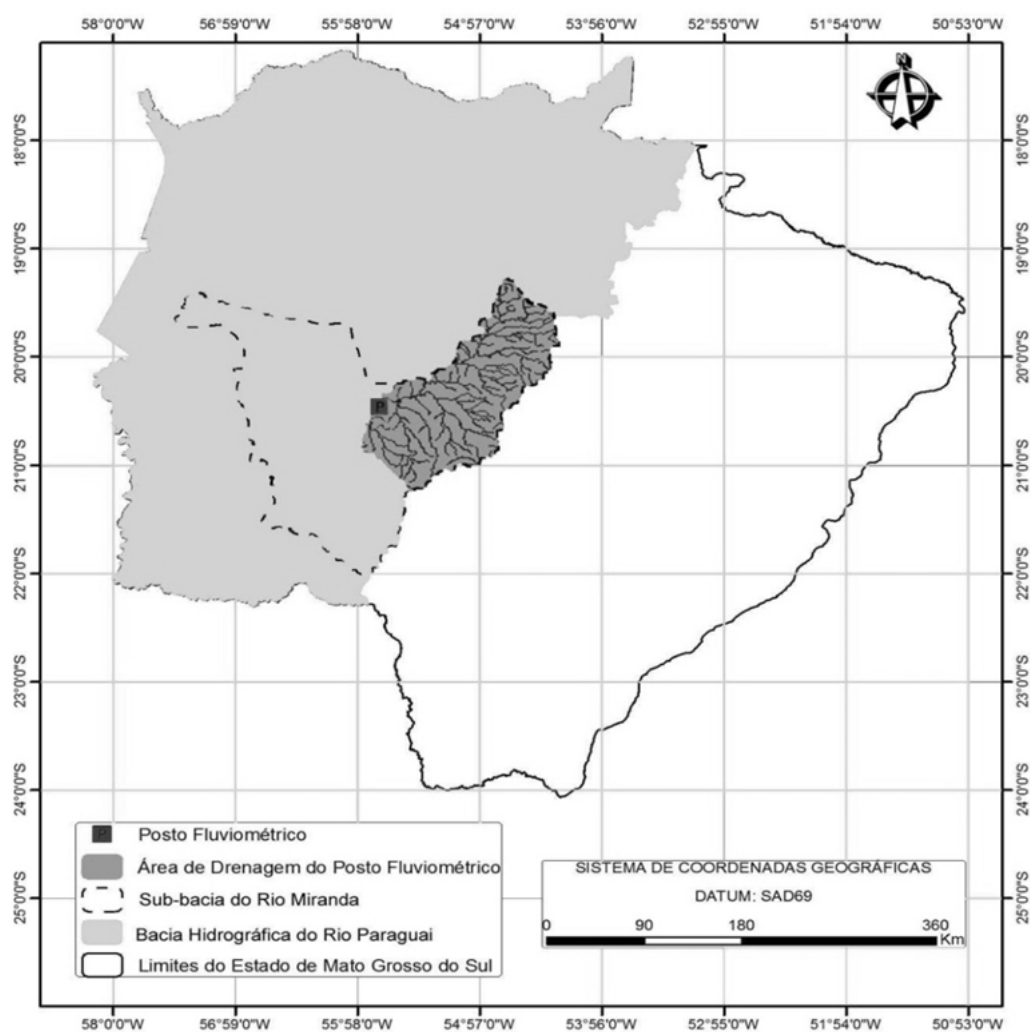


Figura 1. Localização da área de drenagem da estação fluviométrica Aquidauana, inserida na sub-bacia hidrográfica do Rio Miranda, Mato Grosso do Sul, Brasil. Fonte: EMBRAPA (2009).

A principal atividade na região é a pecuária, seguida pela agricultura. A ocupação do território da bacia caracteriza-se por um risco ambiental, pois a mesma vem sendo intensamente alterada pela substituição da

vegetação nativa pela agropecuária (Pereira et al., 2004).

Distribuição de probabilidade empírica
Os dados de vazões diárias da estação fluviométrica foram obtidos no endereço

eletrônico da Agência Nacional de Águas, através do Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos.

Uma série histórica com 31 anos de registros foi utilizada para os cálculos da $Q_{7,10}$. De posse da série de vazões diárias, foram efetuadas as médias de vazão considerando o cálculo da média móvel de sete dias consecutivos (Q_7). Com os menores valores das médias móveis anuais para sete dias consecutivos, formou-se uma série anual, com a qual foram efetuadas as análises estatísticas e ajustadas as funções de probabilidade que permitiram extrapolar o valor para diferentes períodos de retorno. O Período de Retorno é o tempo médio em anos em que determinado evento seja igualado ou superado, ao menos uma vez, em um ano qualquer.

Fez-se a análise de frequência e a determinação da vazão para o período de retorno desejado, utilizando-se a equação (1).

$$p = \frac{m}{N+1} = \frac{1}{T_r} \quad (1)$$

Onde, T_r é o período de retorno em anos; p é a probabilidade de ocorrência de uma vazão igual ou superior àquela considerada, em um ano qualquer; N é o número de anos com dados disponibilizados para a análise; m é a posição da vazão, após ordenamento crescente de valores ($m = 1$ para a menor vazão e $m = N$ para a maior vazão).

Distribuições de probabilidade

As distribuições de probabilidade teóricas investigadas neste estudo foram Normal, Log-Normal a dois parâmetros, Weibull, Gumbel e Log-Gumbel. Tais distribuições encontram-se detalhadamente descritas em Naghettini & Pinto (2007) e Tucci (2004).

Teste de aderência

Usualmente são utilizados testes de hipóteses para verificar a aderência de determinada distribuição de probabilidade para a série de dados. O teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov é um teste não paramétrico, cuja verificação estatística tem como base a diferença máxima entre as funções de probabilidades acumuladas, empírica e teórica,

de variáveis aleatórias contínuas. Naghettini & Pinto (2007) asseguram que o teste não é aplicável a variáveis aleatórias discretas.

Diante de tais considerações, adotou-se o teste de Kolmogorov-Smirnov, detalhado em Naghettini & Pinto (2007), para avaliação do ajuste das diferentes distribuições de probabilidade, por ser um dos mais apropriados para variáveis aleatórias contínuas como vazões. Nesse teste é feita a comparação entre o módulo do máximo desvio que resulta da diferença entre os valores de frequências observadas e as probabilidades teóricas estimadas, com o valor tabelado que considera o tamanho da amostra e o nível de significância do erro.

Empregou-se o teste de Kolmogorov-Smirnov, ao nível de 5% de significância. Tomou-se a hipótese H_0 como sendo a afirmação de que a distribuição obtida pela função densidade de probabilidade avaliada não é diferente da distribuição observada. Utilizou-se o programa computacional R (Paternelli & Mello, 2011) para auxiliar nas análises estatísticas.

Resultados e Discussão

Os valores das menores médias móveis de sete dias consecutivos (Q_7) encontrados para cada ano da série estudada estão representados na Tabela 1.

Na Figura 2 observam-se os valores das vazões ajustadas pela distribuição empírica e pelas diferentes distribuições de probabilidade em função do tempo de recorrência e pode-se avaliar qual dos resultados melhor se aplica à série de dados estudada.

Os valores de probabilidade do teste de Kolmogorov-Smirnov para as distribuições Normal, Log-Normal a dois parâmetros, Weibull, Gumbel e Log-Gumbel constam na Tabela 2.

Observa-se a aderência dos dados de vazão mínima a todos os modelos de probabilidade analisados, sendo que as distribuições Normal, Weibull e Gumbel responderam ao teste de forma semelhante. Com relação aos valores de probabilidade, a distribuição que melhor representa a série de frequências observadas é a Log-Gumbel, enquanto que a Log-Normal apresenta o pior ajuste. Em estudo semelhante, Silva (2006)

concluiu que a distribuição que produziu ajustes de melhor qualidade foi a Log Normal. Já, Silvino et al. (2007) observou que a distribuição de Weibull apresentou maior aderência para

vazões mínimas. A variabilidade de resultados obtidos evidenciam a importância da realização de estudos localizados na bacia hidrográfica.

Tabela 1. Valores das menores média de sete dias consecutivos anuais

Ano	Q(m ³ s ⁻¹)	Ano	Q(m ³ s ⁻¹)	Ano	Q(m ³ s ⁻¹)
1969	19,36	1980	72,11	1997	46,43
1970	23,19	1981	75,66	1998	67,50
1971	23,35	1982	55,86	1999	41,20
1972	31,93	1983	55,34	2000	45,96
1973	27,71	1984	33,74	2001	49,60
1974	47,51	1985	25,29	2002	50,59
1975	54,66	1986	25,93	2004	50,84
1976	53,17	1987	36,40	2005	50,07
1977	58,43	1988	31,43	2006	52,09
1978	53,62	1995	41,29		
1979	59,03	1996	49,77		

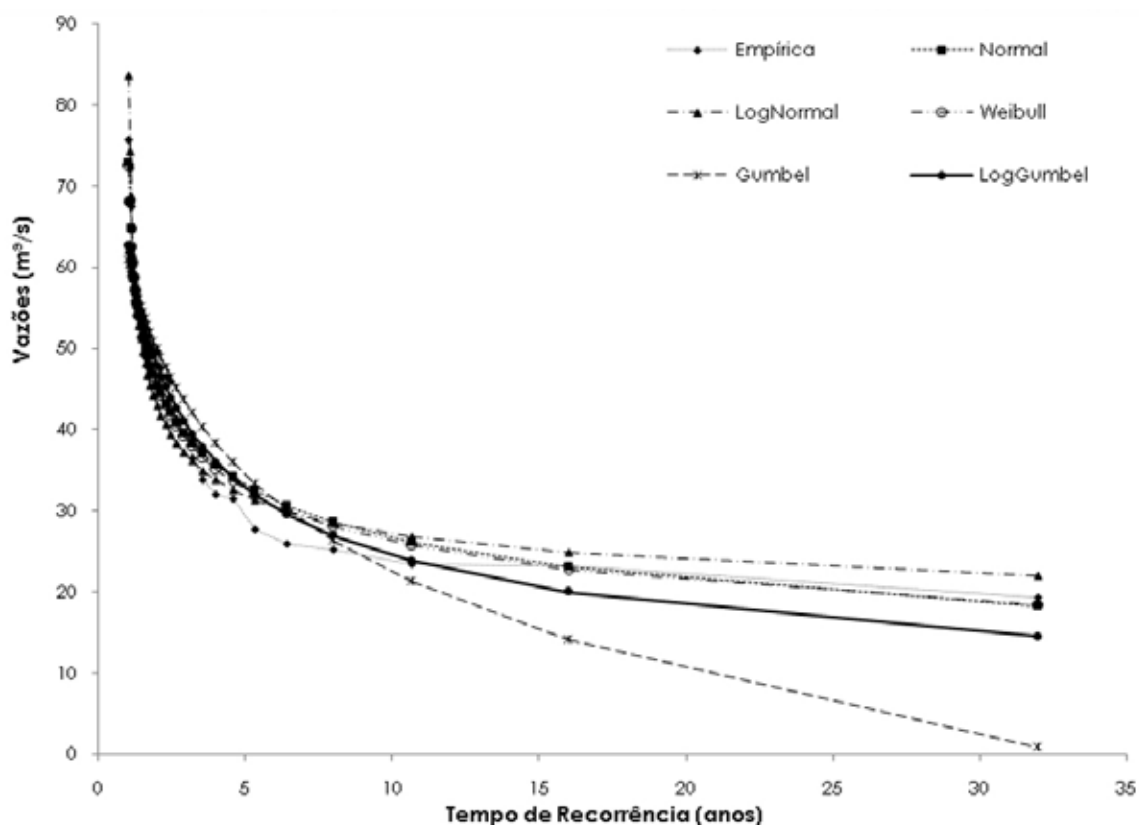


Figura 2. Representação da variação da vazão em função do tempo de recorrência na a estação fluviométrica Aquidauana, localizada na sub-bacia hidrográfica do Rio Miranda, Mato Grosso do Sul, Brasil, no período de 1969 a 2006.

Tabela 2. Valores de probabilidade do teste de Kolmogorov-Smirnov (p value)

Normal	Log-Normal	Weibull	Gumbel	Log-Gumbel
0,9634	0,6150	0,9634	0,9634	0,9991

Na Tabela 3 são apresentados os valores dos máximos desvios em módulo resultantes da diferença entre os valores de frequências observadas e respectivas probabilidades teóricas estimadas. Pelo teste de Kolmogorov-Smirnov (com intervalo de confiança de 95%), ao nível de 5% de significância, o valor crítico do desvio tabelado foi 0,2380. Para todas as distribuições analisadas constata-se a não rejeição de hipótese nula, uma vez que os desvios máximos em módulo obtidos são inferiores ao valor crítico do desvio tabelado.

O desvio máximo do teste de Kolmogorov-Smirnov refere-se à máxima distância entre os valores das probabilidades empíricas e teóricas. Maiores valores de probabilidade (p value) estão associados a menores valores de desvios máximos e, dessa forma, maior certeza de não rejeição da hipótese nula. Do exposto, constatamos que dentre as distribuições analisadas, a que apresentou maior aderência foi a distribuição Log-Gumbel.

Tabela 3. Desvios máximos em módulo

Normal	Log-Normal	Weibull	Gumbel	Log-Gumbel
0,1290	0,1935	0,1290	0,1290	0,0968

Tabela 4. Vazões médias mínimas de sete dias consecutivos e período de retorno de 10 anos, obtidas pelos diferentes métodos (m^3s^{-1})

Empírica	Normal	Log-Normal	Weibull	Gumbel	Log-Gumbel
23,85	26,77	27,10	26,20	22,46	24,48

Tabela 5. Diferenças relativas à comparação do valor de $Q_{7,10}$ obtida através da probabilidade empírica e das distribuições de probabilidade (%)

Normal	Log-Normal	Weibull	Gumbel	Log-Gumbel
12,24	13,63	9,85	5,83	2,64

Conclusões

A distribuição de probabilidade de maior aderência e o melhor ajuste do valor da $Q_{7,10}$ estão associados à distribuição Log-Gumbel. Dentre os métodos estudados, a Log-Gumbel demonstra ser a mais confiável na determinação de vazões mínimas na sub-bacia de referência.

Agradecimentos

Ao CNPq e à CAPES pelos recursos financeiros e bolsas concedidas para realização do trabalho.

Os resultados para as vazões médias mínimas de sete dias consecutivos e período de retorno de 10 anos, obtidos através das diferentes distribuições de probabilidade, estão representados na Tabela 4.

A $Q_{7,10}$ obtida a partir da série histórica foi de $23,85 m^3s^{-1}$. Dentre os métodos analisados para determinação da $Q_{7,10}$ obteve-se o maior valor através da distribuição Log-Normal e o menor valor pela distribuição Gumbel.

A análise comparativa dos valores obtidos para a $Q_{7,10}$ pela distribuição empírica e pelos diferentes métodos de probabilidade resultam no cálculo das diferenças, apresentados na Tabela 5.

A determinação da $Q_{7,10}$ pelo modelo de distribuição Log-Normal apresentou o maior erro, evidenciando que dentre as distribuições de probabilidade analisadas é a que mais se distancia do resultado obtido pela distribuição empírica. O modelo de distribuição Log-Gumbel apresentou o menor erro.

Referências

- ANA. Agência Nacional de Águas. 2009. *Diagnóstico da outorga de direitos de usos de recursos hídricos – Fiscalização dos usos de recursos hídricos no Brasil* Brasília. Disponível em: <http://www.ana.gov.br/sprtew/4/4-ANA.swf>. <Acesso em 03 de Set. 2009>.
- Benetti, A.D., Lanna, A.E., Cobalchini, M.S. 2003. Metodologias para determinação de vazões ecológicas em rios. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos* 8: 149-169.
- Brasil. Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. *Política Nacional de Recursos Hídricos*. MMA/SRH, Brasília, Brasil. 1997.

- Douglas, E.M., Vogel, R.M. 2006. Behavior of floods of record in the United States. *Journal of Hydrologic Engineering* 11: 482-488.
- Embrapa. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. 2009. Brasil em relevo: Embrapa monitoramento por satélite – Download do SRTM. Disponível em: <http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br/fale/index.htm>. <Acesso em 17 de Set. 2009>.
- Lanna A.E. 2004. Elementos de estatística e probabilidades. In: Tucci, C.E.M (org.). *Hidrologia: ciência e aplicação*. UFRGS, ABRH, Porto Alegre, Brasil. p. 79-176.
- Mello, C.R., Viola, M.R., Beskow, S. 2010. Vazões máximas e mínimas para bacias hidrográficas da região Alto Rio Grande, MG. *Ciência e Agrotecnologia* 34: 494-502.
- Mutiga, J.K., Mavengano, S.T., Su, Z., Woldai, T., Becht, R. 2010. Water allocation as a planning tool to minimise water use conflicts in the Upper Ewaso Ng'iro north basin, Kenya. *Water resources management* 24: 3939-3959.
- Naghezzini, M., Pinto, E.J.A. 2007. *Hidrologia Estatística*. CPRM, Belo Horizonte, Brasil. 552p.
- Oliveira L.F.C., Fioreze A.P. 2011. Estimativas de vazões mínimas mediante dados pluviométricos na Bacia Hidrográfica do Ribeirão Santa Bárbara. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 15: 9-15.
- Pereira, M.C.B., Mendes, C.A.B., Dias, F.A., Lange, M.B.R., Becker, M., Barreto, S.R., Grehs, S.A. 2004. *Bacia Hidrográfica do rio Miranda: estado da arte*. UCDB, Campo Grande, Brasil. 177p.
- Pereira, S.B., Alves Sobrinho, T., Fedatto, E., Peixoto, P.P.P., Bonacina, R. 2007. Variação temporal do comportamento hidrológico na Bacia do Rio Dourados. *Engenharia Agrícola* 27: 560-568.
- Peterelli, L.A., Mello, M.P. 2011. *Conhecendo o R: Uma visão estatística*. UFV, Viçosa, Brasil. 185 p.
- Sánchez-Román, R.M., Folegatti, M.V., Orellana-González, A.M.G. 2009. Situação dos recursos hídricos nas bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiá. *Engenharia Agrícola* 29: 578-590.
- SEMACE. Secretaria de Estado de Meio Ambiente, do Planejamento, da Ciência e Tecnologia. 2009. Mato Grosso do Sul. Plano Estadual de Recursos Hídricos. Disponível em: <http://www.semace.ms.gov.br>. <Acesso em 23 Set. 2009>.
- Silva, A.M., Oliveira, P.M., Mello, C.R., Pierangeli, C. 2006. Vazões mínimas e de referência para outorga na região do Alto Rio Grande. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental* 10: 374-380.
- Silvino, A.N.O., Silveira, A., Musis, C.R., Wyrepkowski, C.C., Conceição, F.T. 2007. Determinação de vazões extremas para diversos períodos de retorno para o Rio Paraguai utilizando métodos estatísticos. *Geociências* 26: 369-378.
- Smakhtin, V.Y., Toulouse, M. 1998. Relationships between low-flow characteristics of South African streams. *Water SA*. 24: 107-112.
- Tucci, C.E.M. 2004. Regionalização de vazões. In: Tucci, C.E.M (org.). *Hidrologia: ciência e aplicação*. UFRGS, ABRH, Porto Alegre, Brasil. p. 573-619.