

IDENTIFICAÇÃO DE PARÂMETROS HIDROLÓGICOS RELEVANTES NA DETERMINAÇÃO DE ALTERAÇÕES FLUVIAIS OCASIONADAS POR BARRAGENS EM AMBIENTES TROPICAIS

Laura Melo Vieira Soares^{1}; Hersília de Andrade e Santos²*

Resumo – Dentro da matriz elétrica brasileira, as fontes hídricas desempenham papel importante no atendimento à demanda de energia nacional. A operação das barragens resulta em variações diárias e sazonais nos níveis de água no trecho a jusante, o que pode ameaçar a manutenção dos ecossistemas aquáticos. Em diversos casos, as alterações no regime hidrológico contribuíram para a extinção de espécies nativas, invasão por espécies exóticas e perda de fertilidade dos solos em planícies de inundação. Dessa forma, este estudo visou identificar os parâmetros hidrológicos relevantes na determinação de alterações fluviais ocasionadas pela operação de reservatórios em ambientes tropicais. Para tanto, realizou-se um estudo das vazões diárias defluentes da Usina Hidrelétrica de Itutinga (MG) a partir da metodologia Indicators of Hydrologic Alteration (IHA). Os resultados evidenciam a regulação do regime hidrológico a partir da redução da variabilidade intra-anual, bem como indicam nove parâmetros hidrológicos com alteração elevada, sendo a taxa e frequência das alterações nas condições hidrológicas o grupo mais impactado.

Palavras-Chave – regime hidrológico, operação de barragens, regiões tropicais.

IDENTIFICATION OF RELEVANT HYDROLOGICAL PARAMETERS IN DETERMINING STREAMFLOW ALTERATIONS CAUSED BY DAM OPERATION IN TROPICAL REGIONS

Abstract – Water sources play an important role in Brazilian energy matrix to meet the demand of national power. Dam operation results in daily and seasonal variations in water levels downstream of the dams, which may threaten the maintenance of aquatic ecosystems. In many cases, hydrologic alteration contributed to the extinction of native species, invasion by exotic species and loss of soil fertility on flood plains. In this manner, this study aimed to identify the relevant hydrological parameters in determining flow alterations caused by reservoirs in tropical regions. Therefore, we studied daily flows downstream Itutinga Hydroelectric plant (MG) based on the methodology Indicators of Hydrologic Alteration (IHA). Results indicate regulation on streamflow regime by reduction of intra-annual variability, as well as indicate nine hydrological parameters with high-level alteration. Rate/frequency of hydrograph changes is the most impacted group.

Keywords – hydrologic regime, dam operation, tropical regions.

INTRODUÇÃO

Dentro da matriz elétrica brasileira, as fontes hídricas desempenham papel importante no atendimento à demanda de energia nacional. Para produção de energia hidrelétrica são construídas barragens que regularizam a vazão afluente através da formação de um reservatório. Sua operação é realizada em função da demanda de energia, resultando em variações nos níveis de água a jusante da barragem. Tais variações podem ser de caráter diário, devido a picos de consumo, ou sazonal, em

¹ Universidade Federal de Minas Gerais. lmvsoares@hotmail.com

² Centro Federal de Educação Tecnológica de Minas Gerais. hsantos@civil.cefetmg.br

função da disponibilidade hídrica. A consequência direta da operação das barragens é a regulação do regime hidrológico.

Alterações no regime de vazões podem ser consideradas uma ameaça à manutenção ecológica de rios e suas planícies de inundação (Bunn e Arthington, 2002). A composição biótica, a estrutura e função de ecossistemas aquáticos e a vegetação ripária dependem intrinsecamente do regime hidrológico (Richter *et al.*, 1996). Dessa forma, o estudo do regime de vazões é necessário para identificar as alterações decorrentes da operação de barragens. De acordo com Richter *et al.* (1996), o regime hidrológico é composto por cinco parâmetros que influenciam as comunidades biológicas: *i*) magnitude das vazões; *ii*) período no qual ocorrem condições particulares; *iii*) frequência com que ocorrem as condições particulares; *iv*) duração de cheias e secas; *v*) taxa de alteração das condições hidrológicas.

O presente estudo visou quantificar a alteração no regime hidrológico no trecho a jusante de uma barragem em região tropical. Para tanto, foram calculados indicadores de alteração hidrológica, de acordo com Richter *et al.* (1996), a partir da série das vazões diárias defluentes da Usina Hidrelétrica de Itutinga (Minas Gerais). Foram realizadas análises em dois períodos de tempo: um anterior à construção da barragem (1934 a 1954) e outro posterior (1991 a 2011), o que permitiu identificar os parâmetros hidrológicos relevantes na determinação de alterações fluviais ocasionadas pela operação de reservatórios em ambientes tropicais.

ÁREA DE ESTUDO

A Usina Hidrelétrica de Itutinga localiza-se no município de Itutinga, Minas Gerais e está instalada na cascata hidrelétrica do Rio Grande. De acordo com a empresa geradora de energia (CEMIG, 2013), a barragem foi construída em 1955, possui 550 m de comprimento, altura máxima de 23 m e o volume do reservatório é de 11,4 hm³. Há quatro unidades geradoras responsáveis pela potência instalada de 52 MW (CEMIG, 2013). Devido ao pequeno reservatório (volume de 11,4 hm³), a usina de Itutinga é considerada fio d'água. À montante está localizada a Usina Hidrelétrica de Camargos, responsável pela regularização do regime.

Na área de estudo, o clima é tropical de altitude com invernos frios e secos e verões quentes e úmidos. A temperatura média anual varia de 18°C a 19°C. Está sob influência do evento climático conhecido como Oscilação Sul-El Niño (ENSO) que, segundo Garreaud *et al.* (2008), está associada a chuvas e temperaturas anômalas que constituem-se na principal fonte de variabilidade interanual sobre grande parte da América Latina.

METODOLOGIA

A série histórica das vazões diárias defluentes à Usina Hidrelétrica de Itutinga de 1934 a 1955 e 1991 a 2012 foi obtida a partir de informações da Agência Nacional de Águas (ANA) e da companhia energética responsável pela operação do reservatório (CEMIG).

Procedeu-se análise do regime hidrológico segundo a metodologia Indicators of Hydrologic Alteration (IHA) proposta por Richter *et al.* (1996). O método aborda todos os parâmetros característicos do regime hidrológico e baseia-se na comparação do regime entre dois períodos de tempo, um anterior e outro posterior a determinada alteração ocasionada por atividade antrópica. A alteração em estudo se refere à construção da usina hidrelétrica, ocorrida em 1955, e a operação do reservatório. Para tanto, definiu-se duas séries de dados, uma referente ao período pré-impacto, 1934 a 1954, e outra referente ao pós-impacto, 1991 a 2011. Utilizando-se o software Indicators of Hydrologic Alteration (IHA), calculou-se 32 parâmetros hidrológicos que caracterizam estatisticamente a variação hidrológica intra-anual para cada ano de cada série de dados (Tab. 1) e

34 componentes da vazão ecológica. A série não segue a distribuição normal e desta forma foram utilizadas estatísticas não-paramétricas.

Tabela 1 – Parâmetros hidrológicos empregados nos índices de alteração hidrológica

Grupos estatísticos IHA	Características do Regime	Parâmetros Hidrológicos
Grupo 1: Magnitude das vazões mensais	Magnitude Período	Vazão média mensal
Grupo 2: Magnitude e duração de cheias e secas	Magnitude Duração	Vazão mínima anual Vazão máxima anual Mínima de 3 dias Máxima de 3 dias Mínima de 7 dias Máxima de 7 dias Mínima de 30 dias Máxima de 30 dias Mínima de 90 dias Máxima de 90 dias
Grupo 3: Período no qual ocorrem condições particulares	Período	Dia da vazão máxima anual Dia da vazão mínima anual
Grupo 4: Frequência com que ocorrem condições particulares	Magnitude Frequência Duração	Número de pulsos longos por ano Número de pulsos curtos por ano Duração média dos pulsos longos por ano Duração média dos pulsos curtos por ano
Grupo 5: Taxa e frequência das alterações nas condições hidrológicas	Frequência Taxa de alteração	Duração das flutuações positivas Duração das flutuações negativas Número de flutuações positivas Número de flutuações negativas

Fonte: Richter *et al.* (1996)

A partir destes valores, computou-se a mediana e a dispersão (%) para cada parâmetro, resultando em 64 dados estatísticos inter-anuais para cada série de dados. Finalmente calcularam-se os índices de alteração hidrológica a partir da porcentagem de desvio do período alterado em relação ao não-impactado. O software implementou a metodologia Range of Variability Approach (RVA) descrita por Richter *et al.* (1998). Nesta metodologia, a variação dos parâmetros ocorrida no período pré-impacto atua como referência na definição do grau de alteração do regime hidrológico. O software também forneceu curvas de duração das vazões.

RESULTADOS E DISCUSSÕES

As medianas e a variância obtidas para cada parâmetro avaliado, com suas magnitude e porcentagem de desvio estão apresentadas na Tab. 2. A mediana variou de -92% a 72%, enquanto a variância apresentou valores entre -100% e 363%.

Tabela 2 – Indicadores de Alteração Hidrológica

Grupo IHA	Mediana				Variância			
	Pré-Impacto	Pós-Impacto	Magnitude do Desvio	% de Desvio	Pré-Impacto	Pós-Impacto	Magnitude do Desvio	% de Desvio
Grupo 1: Magnitude das vazões mensais								
Outubro	67,6	88	20	30	1065,56	1041,35	-24	-2
Novembro	92,7	99	6	7	4075,18	4617,81	543	13
Dezembro	151,1	143	-8	-5	11069,83	6933,31	-4137	-37
Janeiro	207,2	181,5	-26	-12	19199,49	28993,19	9794	51
Fevereiro	220,8	180,2	-41	-18	10637,76	17249,12	6611	62
Março	186,3	141	-45	-24	15354,57	4085,83	-11269	-73
Abril	131,5	94,6	-37	-28	1858,44	1960,40	102	5
Maio	101,2	92	-9	-9	513,98	1252,44	738	144
Junho	87,2	91,3	4	5	254,15	395,73	142	56
Julho	75,4	88,2	13	17	199,45	481,59	282	141
Agosto	65	84,5	19	30	188,44	873,27	685	363
Setembro	60,2	82	22	36	470,84	944,70	474	101
Média do Grupo ¹				18%				87%
Grupo 2: Magnitude e duração das condições extremas anuais								
Mínima anual	51,1	44	-7	-14	109,09	162,45	53	49
Mínima de 3 dias	52,2	49,7	-3	-5	97,11	199,45	102	105
Mínima de 7 dias	53,4	51,6	-2	-3	104,41	248,27	144	138
Mínima de 30 dias	55,9	62,3	6	11	120,41	221,92	102	84
Mínima de 90 dias	63,9	77,4	14	21	189,52	303,07	114	60
Máxima anual	503	393,1	-110	-22	35238,67	51444,21	16206	46
Máxima de 3 dias	472,1	385,5	-87	-18	36110,15	50031,43	13921	39
Máxima de 7 dias	400,1	349	-51	-13	30830,81	47552,13	16721	54
Máxima de 30 dias	306,6	235,6	-71	-23	12218,88	14826,88	2608	21
Máxima de 90 dias	236,7	181,0	-56	-24	4768,66	3473,63	-1295	-27
Média do Grupo				15%				62%
Grupo 3: Período no qual ocorrem as condições extremas anuais								
Dia da mínima anual	2431183	2451975	20792	1	3*10 ¹¹	5038063	-3*10 ¹¹	-100
Dia da máxima anual	2430952	2451899	20948	1	3*10 ¹¹	4788197	-3*10 ¹¹	-100
Média do Grupo				1%				100%
Grupo 4: Frequência e duração dos pulsos máximos e mínimos								
Número de pulsos mínimos	92	93	1	1	108,26	50,95	-57	-53
Número de pulsos máximos	92	92	0	0	111,69	32,06	-80	-71
Duração dos pulsos mínimos	60,1	5,0	-55	-92	552,81	21,26	-532	-96
Duração dos pulsos máximos	10,2	8,4	-2	-18	11,28	10,86	0	-4
Média do Grupo				28%				56%
Grupo 5: Taxa e frequência de alteração nas condições hidrológicas								
Duração de flutuações negativas	9,5	12,2	3	28	7,50	5,80	-2	-23
Duração de flutuações positivas	20,5	12,4	-8	-40	32,39	55,93	24	73
Número de flutuações negativas	203	160	-43	-21	562,21	263,06	-299	-53
Número de flutuações positivas	96	165	69	72	290,86	158,75	-132	-45
Média do Grupo				40%				49%

A magnitude das vazões mensais indica que, no período úmido, o mês de dezembro apresentou alteração elevada devido à redução da média das vazões diárias (Fig. 1). Os meses de julho, agosto e setembro, característicos do período seco, apresentaram aumento das vazões defluentes (Fig. 2, 3 e 4). Para a maioria das vazões médias mensais, a variância sofreu acréscimos significativos, indicando maior flutuação mensal nas vazões. Yang *et al.* (2008) identificaram padrão inverso no trecho a jusante da barragem Sanmenxia (China): os coeficientes de dispersão das vazões medianas mensais referentes ao período pós-impacto estão menores em relação ao regime natural.

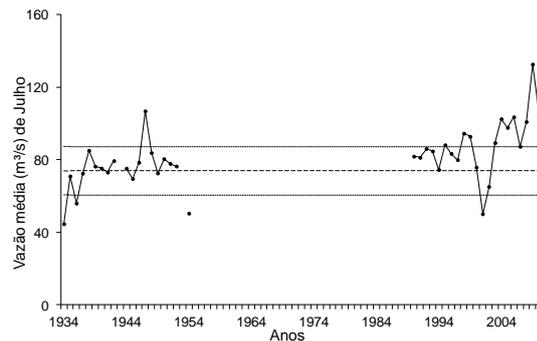
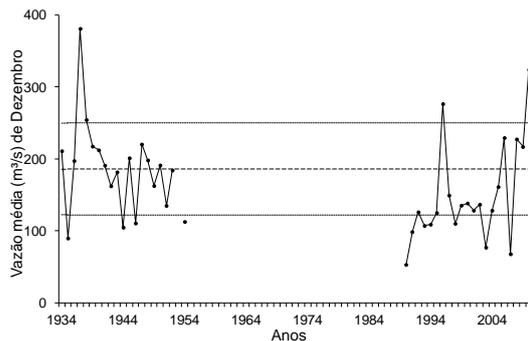


Figura 1 – Vazão média (m³/s) de Dezembro

Figura 2 – Vazão média (m³/s) de Julho

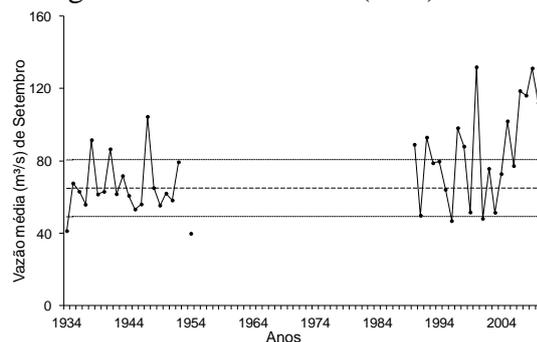
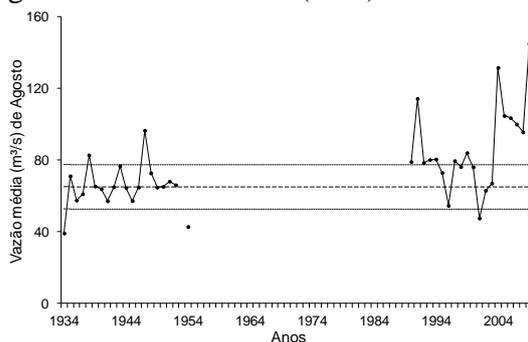


Figura 3 – Vazão média (m³/s) de Agosto

Figura 4 – Vazão média (m³/s) de Setembro

Este comportamento reflete a regularização do regime hidrológico, com redução dos picos de cheia e elevação das vazões durante o período seco, implicando na redução substancial da variação intra-anual da magnitude das vazões. Richter *et al.* (1998) identificaram o mesmo padrão no rio Colorado (Estados Unidos) devido à operação de barragens. Garófano-Gómez *et al.* (2011) observaram o desaparecimento da variação intra-anual no rio Serpis (Espanha). Alterações na variabilidade também foram observadas em outros rios mediterrâneos das regiões leste (Vidal-Abarca *et al.*, 2002) e central da Espanha (Baeza *et al.*, 2003). Belmar *et al.* (2010) identificaram alteração significativa no padrão sazonal das vazões no rio Perea (Espanha) devido à operação de uma barragem.

A duração das condições extremas anuais não apresentou parâmetros com elevada alteração. Yang *et al.* (2008) observaram comportamento semelhante no rio Yellow (China), pois a duração dos pulsos máximos e mínimos permaneceram quase a mesma do período pré-impacto. Richter *et al.* (1998) observaram maior variabilidade na duração dos pulsos máximos. Santos *et al.* (2012) avaliaram as alterações causadas pela operação de barramentos em três trechos do Rio São Francisco e constataram redução significativa na duração de picos de vazões. No trecho Baixo São Francisco, não houve pulsos com longa duração (acima de 90 dias). No que diz respeito ao período no qual ocorrem condições extremas anuais, observou-se alteração significativa no dia em que ocorre a vazão mínima anual: no período pré-impacto, a vazão mínima anual ocorria

preferencialmente no mês de setembro. Após instalação do barramento, não há mais padrão para o período de ocorrência, sendo observados valores mínimos em meses úmidos (Fig. 5). Alterações no dia de ocorrência da vazão mínima anual também foram observadas na bacia do rio Gunnison, Estados Unidos (Richter *et al.*, 1998). Yang *et al.* (2008) observaram a vazão mínima anual movendo-se do 14º dia para o 327º dia do ano. Santos *et al.* (2012) observaram no Rio das Velhas o mesmo padrão de distribuição de pulsos durante os meses de novembro a abril nos períodos anterior e posterior à construção da barragem. No Baixo São Francisco, entre 1940 e 1960, os picos ocorriam entre dezembro e abril, enquanto de 1986 a 2006, os picos de vazões foram observados somente entre janeiro e março. A frequência dos pulsos apresentou maior alteração na duração dos pulsos mínimos, com 100% de alteração em relação ao regime natural (Fig. 6). Santos *et al.* (2012) observaram redução na frequência dos pulsos: no Rio das Velhas, a frequência dos pulsos curtos reduziu 15% e a dos pulsos longos reduziu 3% em relação ao período pré-barragem; no Baixo São Francisco, a frequência dos pulsos curtos reduziu 78% e pulsos longos agora passaram a ocorrer raramente. Richter *et al.* (1996) observaram no rio Roanoke (Estados Unidos) pulsos máximos e mínimos passarem a ocorrer com maior frequência, no entanto, a duração dos pulsos tornou-se significativamente menor. A maior frequência associada à menor duração provoca o aumento do número de flutuações.

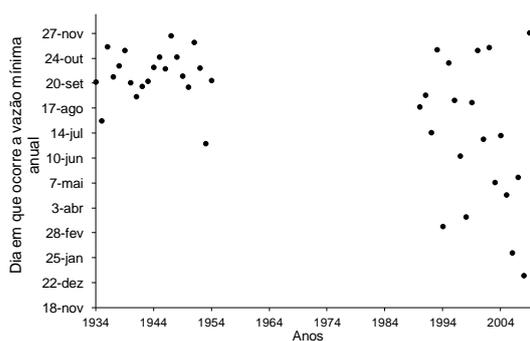


Figura 5 – Período da vazão mínima anual

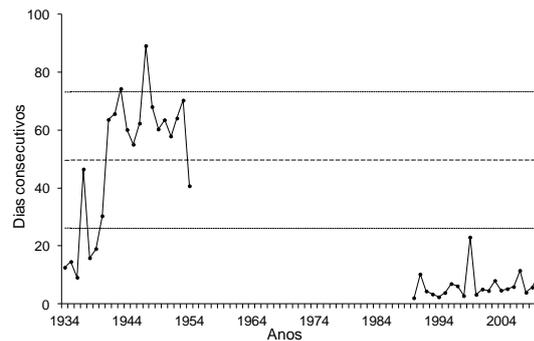


Figura 6 – Duração dos pulsos mínimos

A taxa de alteração nas condições hidrológicas foi o grupo hidrológico de maior alteração da mediana dos valores, 40%. Os parâmetros número de flutuações positivas (Fig. 7), número de flutuações negativas (Fig. 8) e duração de flutuações positivas (Fig. 9) apresentaram elevada alteração.

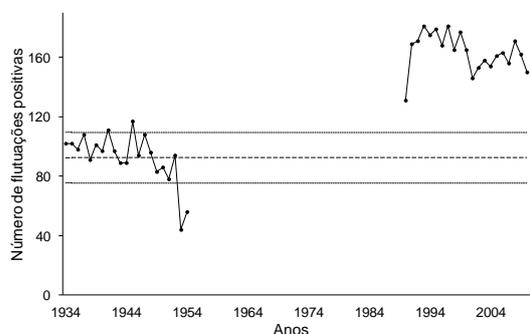


Figura 7 – Número de flutuações positivas

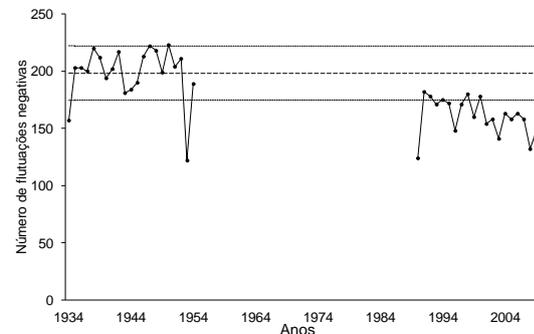


Figura 8 – Número de flutuações negativas

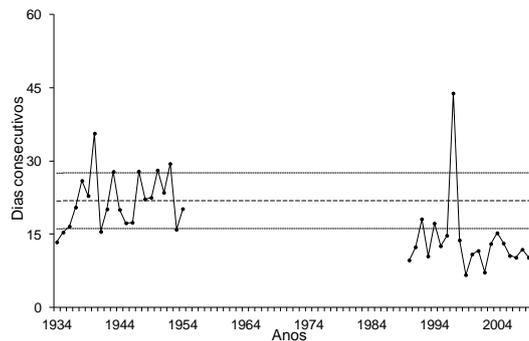


Figura 9 – Duração das flutuações positivas

Nove parâmetros apresentaram alteração elevada: duração dos pulsos mínimos, duração média das flutuações positivas, número de flutuações positivas, número de flutuações negativas e vazão média dos meses de dezembro, abril, julho, agosto e setembro. Richter *et al.* (1998) aplicaram a mesma metodologia e identificaram os parâmetros mais alterados no rio Colorado (Estados Unidos): vazão máxima anual, vazão mínima de 30 dias consecutivos, dia da máxima e mínima anual, duração dos pulsos máximos e número de flutuações. No rio Yellow (China), Yang *et al.* (2008) obtiveram como parâmetros mais alterados: número de pulsos mínimos, duração dos pulsos máximos, número de flutuações negativas, vazão mediana de março e setembro, vazão mínima anual e mínima de 3, 30 e 90 dias. Em outro trecho do mesmo rio, os parâmetros mais alterados foram: vazão mínima de 3 e 7 dias consecutivos, vazões medianas de outubro, abril, junho, julho, janeiro, março e setembro, magnitude e dia da mínima anual, duração dos pulsos máximos e número de flutuações negativas. O parâmetro mais alterado no rio Perea (Espanha) foi a variabilidade das vazões máximas anuais (Belmar *et al.*, 2010).

CONCLUSÕES

As conclusões das análises hidrológicas estão listadas a seguir:

1. Os dados apontaram a redução da variabilidade intra-anual, redução da duração dos pulsos mínimos e aumento do número de ocorrências de flutuações positivas devido ao aumento da frequência com simultânea redução na duração.
2. O número de flutuações negativas e a vazão mediana do mês de setembro apresentaram elevada alteração, bem como nos estudos realizados nos Estados Unidos, China e Espanha; a vazão mínima de 30 dias consecutivos e a duração dos pulsos máximos foram parâmetros muito impactados em ambientes temperados, de acordo com a literatura. Neste estudo, estes parâmetros sofreram pequena alteração.
3. A duração das condições extremas anuais foi o grupo de menor alteração, sendo que nenhum parâmetro apresentou alteração elevada. A taxa e frequência das alterações nas condições hidrológicas apresentou maior alteração.

Ressalta-se a limitação metodológica relacionada à integração do sistema elétrico brasileiro. Há necessidade de uma análise espacial ampliada ao nível de bacia hidrográfica. Este estudo permitiu identificar os parâmetros relevantes na análise de trechos impactados pela operação de reservatórios em regiões tropicais. Análises da comunidade biótica permitirão identificar como as alterações hidrológicas influenciam nos ecossistemas e dinâmicas ecológicas.

AGRADECIMENTOS

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico Tecnológico pelo suporte financeiro ao projeto.

REFERÊNCIAS

- ANA – Agência Nacional de Águas. Disponível em: <<http://hidroweb.ana.gov.br/>> Acesso em: junho 2011.
- BAEZA SANZ, D.; MARTÍNEZ-CAPEL, F.; GARCÍA DE JALÓN, D. (2003). Variabilidad temporal de caudales: aplicación a la gestión de ríos regulados. *Ingeniería del Agua*, 10(4), pp. 469–478.
- BELMAR, O.; VELASCO, J.; MARTÍNEZ-CAPEL, F.; MARÍN, A. A. (2010). Natural flow regime, degree of alteration and environmental flows in the Mula stream (Segura River basin, SE Spain). *Limnetica*, 29(2), pp. 353-368.
- BUNN, S. E.; ARTHINGTON, A. H. (2002). Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity. *Environmental management*, 30(4), pp. 492-507.
- CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais. Usinas hidrelétricas. Disponível em: <<http://www.cemig.com.br/MemoriaCemig/Paginas/UsinasHidreletricas.aspx>> Acesso em 6 fev 2013.
- GARÓFANO-GÓMEZ, V.; MARTÍNEZ-CAPEL, F.; PEREDO-PARADA, M.; MARÍN, E. J. O.; MAS, R. M.; COSTA, R. M. S.; PINAR-ARENAS, J. L. (2011). Assessing hydromorphological and floristic patterns along a regulated Mediterranean river: The Serpis River (Spain). *Limnetica*, 30(2), pp. 307-328.
- GARREAUD, R. D.; VUILLE, M.; COMPAGNUCCI, R.; MARENGO, J. (2008). Present-day South American climate. *Paleogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.*
- RICHTER, B. D.; BAUMGARTNER, J. V.; BRAUN, D. P.; POWELL, J. (1998). A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network. *Regul. Rivers: Res. Mgmt*, 14, pp. 329-340.
- RICHTER, B. D.; BAUMGARTNER, J. V.; POWELL, J.; BRAUN, D. P. (1996). A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. *Conservation biology*, 10(4), pp. 1163-1174.
- SANTOS, H. A.; POMPEU, P. S.; KENJI, D. O. L. (2012). Changes in the flood regime of São Francisco River (Brazil) from 1940 to 2006. *Reg Environ Change*, 12, pp. 123-132.
- VIDAL-ABARCA, M. R.; SUÁREZ, M. L.; GÓMEZ, R. (2002). Caudales y aportaciones en la Cuenca del Segura: ¿Son significativos los datos hidrológicos? In: *Actas del III Congreso Ibérico de Gestión y Planificación del Agua*. Sevilla, España. 10 pp.
- YANG, T.; ZHANG, Q.; CHEN, Y. D.; TAO, X.; XU, C.; CHEN, X. (2008). A spatial assessment of hydrologic alteration caused by dam construction in the middle and lower Yellow River, China. *Hydrol. Process.* 22, pp. 3829–3843.