

Avaliação da influência da mudança de variáveis de projeto de barragens sobre as alterações hidrológicas e componentes do regime de vazão natural

Assessment of the impact of changing dam project variables on the hydrological alterations and components of natural flow regime

Camilla Hellen Peixoto de Lima¹; Fernando Genz²; Lafayette Dantas da Luz³;

Andrea Sousa Fontes⁴ e Karla Patricia Oliveira-Esquerre⁵

¹Laboratório de Recursos Hídricos e Meio Ambiente, Programa de Engenharia Civil da COPPE, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, RJ, Brasil. camillahpl@gmail.com

² Mestrado em Ambiente Águas e Saneamento - MAASA, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Ba. Brasil
fgenz@pq.cnpq.br

³ Departamento de Engenharia Ambiental, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Ba. Brasil
lluz@ufba.br

⁴ Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Feira de Santana, Ba. Brasil
andreafontes@ufrb.edu.br

⁵ Mestrado em Ambiente Águas e Saneamento - MAASA, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Industrial - PEI, Rede de Tecnologias Limpas da Bahia - TECLIM, Departamento de Engenharia Química, Universidade Federal da Bahia, Salvador, Ba. Brasil
karlaesquerre@ufba.br

Recebido: 02/03/14 - Revisado: 03/05/15 - Aceito: 18/05/15

RESUMO

As barragens beneficiam a sociedade ao gerar energia e abastecer cidades com água, por exemplo. No entanto elas também produzem impactos negativos, tais como alterações hidrológicas a longo, médio e curto prazo. Uma vez que os impactos hidrológicos podem ser preditores das alterações na biota aquática, é de extrema importância que estudos de tais alterações causadas por barragens sejam realizadas ainda na fase de projeto. Este artigo apresenta uma avaliação de como a mudança em variáveis de projeto de barragens influenciam as alterações hidrológicas e os cinco componentes do regime de vazão natural (magnitude, frequência, duração, momento de ocorrência e taxa de mudança). Para isto, foram simuladas as alterações impostas por barragens em um rio perene. De posse dos dados da modelagem, tais alterações foram avaliadas e classificadas com o Indicators of Hydrological Alteration (IHA) e o Dundee Hydrological Regime Alteration Method (DHRAM). Em seguida, executou-se a análise de sensibilidade utilizando conceitos estatísticos do Planejamento Fatorial. As alterações hidrológicas afetaram de forma distinta e com diferentes graus cada grupo de parâmetros hidrológicos do IHA. A classificação do DHRAM indicou que a capacidade de armazenamento influenciou diretamente o impacto da alteração hidrológica. A análise de sensibilidade sugere que a demanda e a vazão remanescente afetam as alterações hidrológicas e os componentes de vazão natural. Os resultados obtidos indicam que o estudo das alterações hidrológicas pode ser feito ainda na fase de projeto para escolha de uma alternativa de projeto que leve em conta, dentre outras questões envolvidas (e.g., técnicas, econômicas), também o menor impacto sobre o regime hidrológico do corpo hídrico.

Palavras Chave: Barragens. Alterações hidrológicas. IHA. DHRAM. Planejamento fatorial

ABSTRACT

Dams provide benefits to the society through hydro power generation and when they supply cities with water, for example. However they also have negative impacts, such as hydrological changes in the long, medium and short term. Once the hydrological impacts can be predictors of changes in aquatic biota, is extremely important that studies of such changes caused by dams are made still in the design phase. This paper presents an assessment of how the change in dam design variables influence the hydrological changes and the five components of the natural flow regime (magnitude, frequency, duration, time of occurrence and rate of change). For this, changes imposed by dams on a perennial river were simulated. In possession of the modeling data these changes were evaluated and classified with the Indicators of Hydrological Alteration (IHA) and the Hydrological Regime Alteration Dundee Method (DHRAM). And then a sensitivity analysis was performed using statistical concepts of Factorial Design. The hydrological changes affected in different ways and with different degrees each group of hydrological parameters of the IHA. The classification of DHRAM indicated that the storage capacity directly influenced the impact of hydrologic alteration. The sensitivity analysis suggests that the demand and the remaining flow affect the hydrological changes and the natural flow of components. The obtained results indicate that the study of hydrological changes can be made even in the design phase to select a project alternative that takes into account, among other issues involved (eg, technical and economic factors), also the least impact on the hydrological regime of a river.

Keywords: Dams. Hydrological alterations. IHA. DHRAM. Factorial design

INTRODUÇÃO

Barragens são estruturas que assumiram papel de grande importância para a sociedade humana pelos benefícios que proporcionam e, por isso, ao longo da história inúmeras foram construídas ao redor do mundo. De acordo com a World Commission on Dams (WCD, 2000) no mundo existem mais de 45.000 grandes barragens.

Porém apesar dos benefícios advindos deste tipo de construção, existem pontos negativos, como por exemplo, os impactos decorrentes de sua implantação sobre o regime hidrológico, as características hidráulicas, o fluxo dos sedimentos, a qualidade da água e a biota (BURKE; JORDE; BUFFINGTON, 2009; GENZ; LESSA, 2015; GENZ; LUZ, 2009; MAGILLIGAN; NISLOW, 2005; MC MANAMAY; ORTH; DOLLOFF, 2012; NILSSON et al., 2005; POFF; HART, 2002; POSTEL; RICHTER, 2003; PRINGLE; FREEMAN, M; FREEMAN, 2000; ROSENBERG; MCCULLY; PRINGLE, 2000; STEVAUX; MARTINS; MEURER, 2009; TAYLOR et al., 2013; ZHAO et al., 2012).

De acordo com Poff e Matthews (2013), tais impactos foram ficando mais evidentes à medida que o número de barragens aumentava, gerando efeitos em escala local, regional e global. Para Bunn e Arthington (2002) o regime hidrológico de um rio define a formação física dos seus habitats e, conseqüentemente, a sua biota e suas estratégias de vida.

Os impactos causados pela alteração no regime de vazão de rios e a resposta da biota foram destacados por Poff e Zimmerman (2010), onde os autores revisaram 165 artigos que relacionavam respostas ecológicas e alterações hidrológicas, sendo que dentre estes artigos, 88 estavam ligados a barragens.

O regime natural de vazões de um rio é caracterizado por variações ao longo do ano, com períodos de seca e cheia, e aquelas interanuais. Ao construir uma barragem, esse rio será impactado. Apesar de ser difícil prever os impactos que as barragens podem causar à biota local e às respostas que estes organismos irão apresentar, Poff et al. (1997) propuseram analisar variáveis hidrológicas que têm atributos relevantes nos processos do ecossistema fluvial e sugeriram uma mudança na gestão de rios através da incorporação e a preservação dos cinco componentes do regime natural de vazão (magnitude, frequência, duração, momento de ocorrência e taxa de mudança) devido a sua relação com a biota. Além disso, Richter et al. (1996) criaram um método para avaliar alterações hidrológicas como preditores de possíveis impactos ambientais.

Quando uma barragem é construída, sabe-se que o regime hidrológico poderá ser afetado de diversas formas e apesar dos estudos de avaliação das alterações hidrológicas causadas por barragens terem evoluído no cenário mundial, esta prática não tem sido realizada ainda na fase de projeto de forma complexa (e.g. utilizando dados diários para simulação dos impactos e demonstrando o grau de impacto hidrológico das possíveis alternativas de barragem).

Por isso, conforme proposto por Lima (2014), uma vez esclarecido como variáveis de projeto de barragens (ex. demanda, tipologia de vale, vazão remanescente e capacidade de armazenamento) tem potencial para alterar os componentes do

regime natural de vazões, a opção por uma barragem de menor impacto poderia ser feita ainda na fase de projeto e, além disso, possibilitaria recomendar a operação do reservatório de maneira a gerar padrões de vazões próximos aos do regime natural.

Este estudo teve por objetivos avaliar como diferentes capacidades de armazenamento e demandas hídricas atendidas pelo reservatório, tipologias de vale e vazões remanescentes influenciam as alterações hidrológicas; e analisar sua influência sobre os cinco componentes do regime de vazão natural (magnitude, frequência, duração, momento de ocorrência e taxa de mudança).

MATERIAIS E MÉTODOS

Para avaliar como a mudança nas variáveis de projeto de barragens influenciariam as alterações hidrológicas e os cinco componentes do regime de vazão natural, definiu-se os seguintes passos:

- Definição dos Cenários Alternativos;
- Simulação da operação dos reservatórios;
- Aplicação das metodologias de avaliação e classificação das alterações hidrológicas; e
- Análise dos fatores impactantes.

Definição dos cenários alternativos

Os cenários necessários para a simulação dos reservatórios foram direcionados pela análise dos efeitos individuais e de interação das variáveis analisadas, obtidos por Planejamento Fatorial. Cenários específicos foram estabelecidos para a definição das variáveis (fatores) e seus níveis (intensidades).

Utilizaram-se conceitos do método estatístico de Planejamento Fatorial Completo, com dois níveis, em sua maioria. Uma vez definido o número de fatores (variáveis independentes) que podem influenciar na resposta da variável em estudo, neste caso as alterações hidrológicas, o número de cenários é dado por: $2k$, sendo o k o número de fatores.

Para tanto, foi considerado a variação dos fatores em seus níveis extremos (máximo e mínimo). No presente estudo os fatores estudados foram a demanda hídrica do reservatório, a tipologia do vale e a vazão remanescente, resultando $k = 3$.

Os cenários alternativos de barragens envolveram ainda: duas capacidades de armazenamento (uma pequena e outra grande), além de dois tipos de demandas hídricas do reservatório (uso consuntivo e não consuntivo), dois tipos de tipologia de vale fluvial (vale encaixado e vale aberto) e dois valores de vazão remanescente (5% e 20% das vazões regularizadas com 90% de garantia).

A demanda hídrica do reservatório variou entre usos consuntivos e não consuntivos, compondo dois arranjos: 100% de uso consuntivo e 100% de uso não consuntivo. Para todos os cenários, o valor numérico adotado como demanda foi de 80% das vazões regularizadas com 90% de garantia e a demanda foi considerada constante ao longo do ano.

As duas tipologias de vale, foram definidas com base nos coeficientes apresentados por Molle e Cadier (1992). Os

valores de vazão remanescente foram 5% e 20% das vazões regularizadas com 90% de garantia, de acordo com a Instrução Normativa nº 01/2007 do Estado da Bahia (BAHIA, 2007). Os valores adotados nos cenários contemplam limites para rios com barramentos.

As capacidades de armazenamento utilizadas correspondem ao volume equivalente a 5% e 85% da vazão média anual de 10 m³/s (o valor correspondente à vazão média anual afluente a barragem de Apertado no Rio Paraguaçu, simulada por Genz, Tanajura e Araújo, 2011 com uma área de drenagem 1.086km²).

A matriz de cenários utilizados para cada capacidade de armazenamento pode ser observada a seguir no quadro 1. Dessa maneira, foram realizadas 8 simulações para cada capacidade de armazenamento.

Quadro 1 - Combinações finais dos cenários que serviram como base na análise fatorial para cada regime e capacidade de armazenamento

Número do cenário	Demanda	Tipologia	VR
1	DNC	VE	VR5%
2	DNC	VE	VR20%
3	DC	VE	VR5%
4	DC	VA	VR20%
5	DC	VA	VR5%
6	DNC	VA	VR20%
7	DNC	VA	VR5%
8	DC	VE	VR20%

DNC-Demanda não consuntiva/ DC-Demanda consuntiva/ VE-Vale encaixado/ VA-Vale aberto/ VR-Vazão Remanescente

Simulação da operação dos reservatórios

Após a definição dos cenários foi executada a simulação do balanço hídrico dos reservatórios hipotéticos no modelo Water Evaluation and Planing System (WEAP).

De posse da série de vazão afluente diária de 29 anos de um rio perene, simulada por Genz, Tanajura e Araújo (2011), representando o regime não alterado, das demandas, das vazões remanescentes, das curvas cota-volume elaboradas para representar cada tipo de vale e a evaporação líquida do reservatório calculada por Silva (2012) para a região, foi possível gerar uma série de 29 anos de vazão a jusante para representar a condição pós-impacto referente à operação das barragens hipotéticas de acordo com a regra simplificada de operação de cada cenário (prioridades de atendimento às demandas e vazões remanescentes).

Aplicação das metodologias de avaliação e classificação das alterações hidrológicas

Para avaliar as alterações hidrológicas foi escolhido

o Indicator of Hydrological Alteration (IHA), em português, Indicadores de Alteração Hidrológica. Esta metodologia foi criada por Richter et al. (1996), com a qual através de 32 indicadores hidrológicos de relevância ecológica (ver Quadro 2) é possível descrever como os padrões de uso da água ou outras intervenções modificaram o regime hidrológico.

Os indicadores hidrológicos do IHA dividem-se em cinco grupos: Grupo 1 (Magnitude das condições de vazão mensais), Grupo 2 (Magnitude e duração das condições de vazões anuais extremas), Grupo 3 (Momento de ocorrência das vazões anuais extremas), Grupo 4 (Frequência e duração dos pulsos de vazões altas e baixas), Grupo 5 (Taxa e frequência de mudança no hidrograma).

Quadro 2: Sumário dos indicadores hidrológicos usados pelo método do IHA

Grupo estatístico do IHA	Parâmetros hidrológicos
Grupo 1: Magnitude das condições de vazão mensais	1-12. Valor médio para cada mês do calendário
Grupo 2. Magnitude e duração das vazões anuais extremas	13. Vazão máxima diária 14. Vazão mínima diária 15. Vazão máxima de 3 dias 16. Vazão mínima de 3 dias 17. Vazão máxima de 7 dias 18. Vazão mínima de 7 dias 19. Vazão máxima de 30 dias 20. Vazão mínima de 30 dias 21. Vazão máxima de 90 dias 22. Vazão mínima de 90 dias 23. Número de dias com vazão nula
Grupo 3. Momento de ocorrência das vazões anuais extremas	24. Dia Juliano de cada máxima de 1 dia anual 25. Dia Juliano de cada mínima de 1 dia anual
Grupo 4. Frequência e duração dos pulsos de vazões máximas e mínimas	26. Número pulsos de máxima em cada ano 27. Número pulsos de mínima em cada ano 28. Duração média do pulso de máxima anual (dias) 29. Duração média do pulso de mínima anual (dias)
Grupo 5. Taxa e frequência de mudança no hidrograma	30. Taxa de ascensão 31. Taxa de recessão 32. Número de reversões

Fonte: Adaptado de TNC (2009)

Esta metodologia provou ser robusta em uma análise feita por Olden e Poff (2003), uma vez que estes 32 indicadores conseguiram representar as informações contidas em 171 índices hidrológicos. O IHA tem sido extremamente utilizado internacionalmente para avaliar as alterações hidrológicas, inclusive no Brasil (GENZ; LESSA, 2015).

Para classificar as alterações hidrológicas foi escolhido o Dundee Hydrological Regime Alteration Method (DHRAM), desenvolvido por Black et al. (2005). Esse método foi elaborado com base na abordagem do IHA e no esquema de cinco classes compatíveis com o requerido pela Diretiva Quadro da Água da União Européia.

O DHRAM é capaz de classificar o risco de danos ecológicos ao rio utilizando a mudança percentual da média e do desvio padrão de cada Grupo do IHA para atribuir pontos de impacto, conforme os limiares de alteração, que pode indicar risco baixo, intermediário ou alto (ver Quadro 3).

Quadro 3 - Limiar das mudanças hidrológicas usado para atribuição dos pontos de impacto

Sumário dos indicadores do IHA	% de mudança na pontuação do grupo do IHA		
	Limiar baixo (1pt*)	Limiar intermediário (2pt)	Limiar alto (3pt)
1a (Médias Grupo 1)	≥ 19,9	≥ 43,7	≥ 67,5
1b (CVs Grupo 1)	≥ 29,4	≥ 97,6	≥ 165,7
2a (Médias Grupo 2)	≥ 42,9	≥ 88,2	≥ 133,4
2b (CVs Grupo 2)	≥ 84,5	≥ 122,7	≥ 160,8
3a (Médias Grupo 1)	≥ 7,0	≥ 21,2	≥ 35,5
3b (CVs Grupo 3)	≥ 33,4	≥ 50,3	≥ 67,3
4a (Médias Grupo 1)	≥ 36,4	≥ 65,1	≥ 93,8
4b (CVs Grupo 4)	≥ 30,5	≥ 76,1	≥ 121,6
5a (Médias Grupo 1)	≥ 46,0	≥ 82,7	≥ 119,4
5b (CVs Grupo 5)	≥ 49,1	≥ 79,9	≥ 110,6

Fonte: Adaptado de Black et al. (2005) *pt- ponto

Uma vez atribuídos os pontos de impacto, estes são somados e uma classificação preliminar fica definida (os pontos podem variar de 0 a 30). A alteração no regime hidrológico pode ser classificada de acordo com a quantidade de pontos obtida (Quadro 4).

Quadro 4 - Definição das Classes do DHRAM

Classificação dos pontos		
Classe	Faixa de pontos	Descrição
1	0	Condição não- impactada
2	1-4	Baixo risco de impacto
3	5-10	Risco moderado de impacto
4	11-20	Alto risco de impacto
5	21-30	Condição severamente impactada

Fonte: Adaptado de Black et al. (2005).

Após essa classificação preliminar, o método exige que sejam feitas duas perguntas que poderão elevar em uma classe de impacto o resultado caso a resposta seja positiva:

(i) as variações sub-diárias causadas pelas atividades humanas excedem 25% das condições não impactadas (vazões com 95% de permanência)? (Sim = + 1 classe); e

(ii) os impactos antropogênicos causam vazão nula? (Sim = + 1 classe).

Depois de verificar estas questões a classificação final é estabelecida.

Análise dos fatores impactantes

Além de ter guiado a definição dos cenários alternativos, os resultados obtidos através do uso dos conceitos de Planejamento Fatorial permitiram a análise da influência dos fatores de projeto nas alterações hidrológicas e sobre os cinco componentes do regime de vazão natural (magnitude, frequência, duração, momento de ocorrência e taxa de mudança).

Conforme citado por Berthouex e Brown (2002), através dele é possível filtrar um conjunto de fatores (variáveis independentes) e descobrir qual ou quais produzem um efeito; estimar a magnitude do efeito produzido pela mudança dos fatores dos cenários; e investigar muitas variáveis utilizando um número reduzido de cenários.

Com base nos dados obtidos pelas metodologias de avaliação e classificação das alterações hidrológicas em função da variação da capacidade de armazenamento, demanda hídrica do reservatório, tipologia do vale e vazão remanescente, foi feita a análise de sensibilidade dos fatores impactantes.

Para avaliar como os fatores influenciam o grau das alterações hidrológicas e estimar a magnitude do efeito produzido pela mudança destas variáveis, foram utilizados os pontos de impacto do DHRAM na construção de duas matrizes, onde foram analisadas as influências nas pequenas e grandes capacidades de armazenamento.

No caso da avaliação de como as variáveis de projeto influenciam os cinco componentes do regime de vazão natural, tal como estimar a magnitude do efeito produzido pela mudança destas variáveis, foram utilizadas as médias dos percentuais de mudança de cada grupo do IHA, resultando na construção de dez matrizes. Pelo fato do IHA possuir cinco grupos de análise, resultaram cinco matrizes para barragens de pequena capacidade

de armazenamento e outras cinco de grande capacidade.

Utilizou-se o Minitab Statistical Software Versão 16.2.1 para o cálculo do efeito principal de cada fator e do efeito da interação entre os fatores.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Avaliação das alterações hidrológicas

Durante a caracterização das séries de vazão do regime pós-impacto, foi possível detectar que as vazões máximas só apresentaram alterações significativas no caso de barragens de grande capacidade de armazenamento.

Já para a Q90 ocorreram dois comportamentos distintos:

1. Em todos os cenários de uso não consuntivo, independentemente da capacidade de armazenamento, o valor da Q90 resultante da operação da barragem, superou o valor do regime não alterado (de 0,2 até aproximadamente 8 m³/s a mais, em percentual 138 a 1541%), gerando uma maior disponibilidade a jusante devido à existência da barragem.
2. Os cenários de uso consuntivo alteraram o rio de forma drástica, observando-se que as vazões liberadas a jusante igualaram-se aos valores definidos para as vazões remanescentes (VR5 ou VR20) com uma frequência de 90% dos períodos de tempo simulados. Neste caso, barragens com este tipo de uso merecem atenção, pois em uma época de pouca vazão ao armazenar água em seu reservatório para atender a suas demandas os impactos a jusante podem ser altos e irreversíveis em alguns casos.

A seguir são descritos as alterações que ocorreram em cada Grupo do IHA.

Grupo 1 (magnitude das vazão mensais)

Em ambos os casos (pequena e grande capacidade de armazenamento) as alterações das vazões mensais para os cenários de uso não consuntivo (1, 2, 6 e 7) e uso consuntivo (3, 4, 5, e 8) agruparam-se por ter o mesmo valor, formando apenas uma curva representado o comportamento do uso consuntivo e outra de uso não consuntivo).

Independentemente da capacidade de armazenamento, os cenários de uso não consuntivo (1, 2, 6 e 7) não impuseram alterações significativas às vazões médias mensais. Enquanto nos cenários de uso consuntivo (3, 4, 5 e 8) ocorreu uma redução da magnitude das vazões, evidenciando o impacto do consumo da água armazenada no reservatório da barragem (ver Figuras 1 e 2).

Para as barragens de pequena capacidade de armazenamento, as alterações nos casos que consideram os usos não consuntivos foram menores do que as dos usos consuntivos (a diferença foi a redução de magnitude da vazão, a menor redução foi de 246% chegando a 288%), sendo que a variação sazonal da vazão seguiu o padrão natural nos dois tipos de demanda. No caso de barragens com grandes capacidades de armazenamento ambos os usos causaram impactos significantes, mudando a

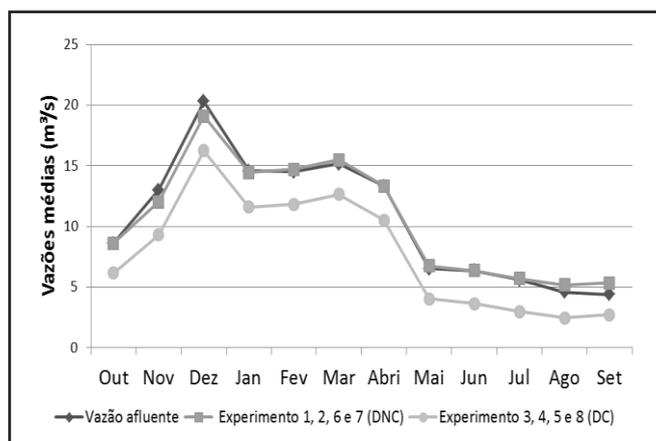


Figura 1: Alterações nas vazões mensais para barragens de pequena capacidade de armazenamento

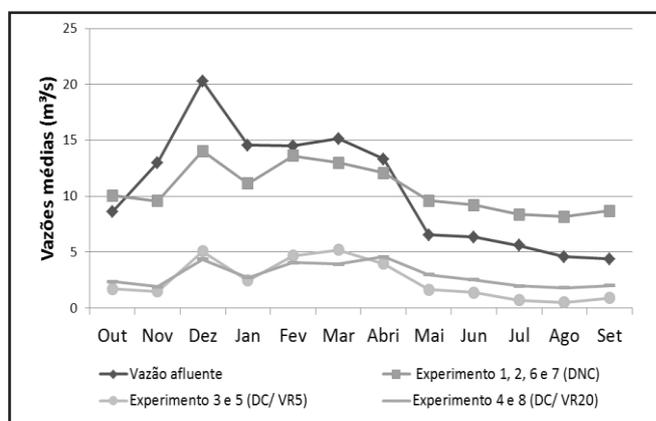


Figura 2: Alterações nas vazões mensais para barragens de grande capacidade de armazenamento

sazonalidade das vazões, principalmente nos cenários de demanda consuntiva.

Esse tipo de alteração no Grupo 1 era previsível, pois as vazões que foram consumidas nos cenários de uso consuntivo não retornam ao rio e quanto maior a capacidade de armazenamento geralmente maior é a vazão que pode ser utilizada pelas demandas.

Grupo 2 (magnitude e duração das vazões anuais extremas)

De modo geral, as alterações impostas pela implantação das barragens resultaram no aumento das vazões mínimas de 1, 3 e 7 dias e, de outro lado, na redução nas vazões máximas.

Quanto às vazões mínimas de 7 dias, os cenários de uso não consuntivo (1, 2, 6 e 7) foram os que sofreram maiores alterações com relação ao regime não alterado, independentemente da capacidade de armazenamento (tais alterações chegaram a superar 600%). Para os cenários 4 e 8 (DC/VR20), das barragens de pequena capacidade o aumento nas vazões mínimas de 1, 3 e 7 dias foi pequeno (>20%), para estes casos ocorreu uma variação de 21% a aproximadamente 40%.

Em relação às vazões máximas, as pequenas barragens não provocaram alterações significativas (alterações inferiores a 15%). Nas barragens de grande capacidade, as reduções nas

vazões máximas chegaram à mais de 60% para os cenários 3 e 5 (VR5) e 4 e 8 (VR20), que variaram entre 60-75%.

Grupo 3 (momento de ocorrência das vazões anuais extremas)

As maiores alterações deste grupo ocorreram nas barragens de grande capacidade. Para os cenários de pequena capacidade de armazenamento o dia de ocorrência da vazão mínima teve maior alteração (15 dias) nos cenários 4 e 8 (DC/VR20).

Para o dia de ocorrência da vazão máxima nenhum cenário de pequena capacidade apresentou alteração maior que 5 dias.

No caso nas grandes capacidades, tanto o dia de ocorrência da vazão mínima quando da máxima apresentaram alterações superiores a 17 dias em todos os cenários.

Vale a pena destacar que, para os cenários de grande capacidade de armazenamento, ocorreram anos de vazão constante, sendo esta uma grande alteração no regime hidrológico. Apesar disso, o IHA apresentou limitações no seu cálculo e os valores numéricos obtidos foram subestimados. Para minimizar este erro, durante a Classificação das alterações hidrológicas, optou-se por atribuir 2 pontos de impacto à Média e ao CV do Grupo 3 nos cenários de grande capacidade de armazenamento.

Grupo 4 (frequência e duração dos pulsos de vazões máximas e mínimas)

Os limites adotados para definição do valor dos pulsos da máxima e da mínima foram calculados pelo IHA utilizando a série da condição do pré-impacto. Assim, independente da capacidade de armazenamento, o limiar dos pulsos de máxima foi de 25,3 m³/s e o limiar dos pulsos de mínima foi de 1,63 m³/s.

Pode-se afirmar que ocorreu a eliminação dos pulsos de mínima para os cenários de uso não consuntivo (1, 2, 6 e 7). Devido à operação da barragem, a água acumulada lançada à jusante, regulariza o regime de tal forma que tais pulsos deixaram de existir. Os pulsos de mínima na maior parte dos cenários de uso consuntivo, sofreram uma redução de frequência de ocorrência, porém a duração média deles aumentou. Possivelmente a operação das barragens conduziu a uma duração mais longa de períodos de pouca vazão devido ao uso e a vazão liberada ter sido a remanescente.

Os pulsos de máxima sofreram menos alterações do que os de mínima para as barragens de pequena capacidade, porém estas alterações foram intensas nas grandes capacidades de armazenamento (pulsos reduzidos a metade ou menos que a metade do que ocorria na condição pré-impacto). Isso decorre da maior capacidade de regularização que os grandes reservatórios exercem no regime hídrico. Para os cenários 4 e 8 (DC/VR20) das barragens de grande capacidade estes pulsos foram eliminados e para os cenários de uso não consuntivo foram reduzidos a metade. A duração destes pulsos não sofreu grande alteração independente da capacidade de armazenamento.

Grupo 5 (taxa e frequência de mudança no hidrograma)

Neste grupo, independente da demanda e capacidade de armazenamento, todos os cenários resultaram em alterações nas taxas de ascensão, recessão e reversão do hidrograma.

Para barragens de pequena capacidade o parâmetro taxa de ascensão não apresentou grandes alterações (ocorreu um aumento na condição do pós-impacto de 1 m³.s-1/dia). Todos os cenários sofreram um aumento pequeno na taxa e o aumento foi uniforme, independentemente da demanda.

No caso das barragens de grande capacidade, o comportamento não foi uniforme, os cenários de uso não consuntivo (1, 2, 6 e 7) sofreram altas alterações (a taxa duplicou ou triplicou) e os de uso consuntivo ou manteve-se a mesma do regime natural (4 e 8) ou aumentou um pouco (3 e 5).

Todos os cenários também resultaram em um aumento na taxa de recessão independentemente da capacidade de armazenamento (150% a 229%), porém vale a pena destacar que ele foi maior nas de grande capacidade. Para os cenários de uso não consuntivo (1, 2, 6 e 7) das grandes capacidades, a taxa chegou a tornar-se o dobro da do regime não alterado.

Quanto ao número de reversões, nas pequenas e grandes capacidades de armazenamento, ocorreu uma grande redução. Porém, para as grandes capacidades esta alteração foi muito mais acentuada, pois passou a ocorrer cinco vezes menos a quantidade de reversões para todos os cenários.

Classificação das alterações hidrológicas

Todas as barragens de pequena capacidade foram classificadas como Classe 2 (baixo risco de impacto). Porém mais da metade das barragens de grande capacidade foram classificadas como Classe 4 (alto risco de impacto) e em três dos oito cenários como Classe 5 (condição severamente impactada).

Quanto aos pontos de impacto (que são computados conforme os limiares de alteração nos grupos do IHA), as barragens de pequena e grande capacidade apresentaram alterações que conduziram a pontos de maneira distinta. Nas de pequena capacidade os grupos do IHA que geraram pontos de impacto foram o 1, 2 e 4, enquanto que para as de grande capacidade todos os grupos geraram pontos de impacto.

Dentre os cenários de pequena capacidade, os de demanda não consuntiva (1, 2, 6 e 7) apresentaram alterações nos grupos 2 e 4 que conduziram a pontos de impacto. Para os cenários de demanda consuntiva ocorreu uma diferença entre os cenários, sendo que o 3 e 5 (DC/VR5) somente tiveram alterações no Grupo 1 que conduziram a pontos de impacto. Por outro lado, os cenários 4 e 8 (DC/VR20), além do Grupo 1, as alterações no Grupo 4 conduziram a pontos de impacto.

Nas grandes capacidades os cenários 1, 2, 6 e 7 (DNC) e os Grupos 2, 4 e 5 apresentaram maior alteração (3 pontos). Nos cenários 3 e 5 (DC/VR5) os maiores pontos de impacto foram nos grupos 1, 4 e 5, enquanto que nos cenários 4 e 8 (DC/VR20) apenas o Grupo 3 não apresentou um alto limiar de alteração.

Análise dos fatores impactantes

Inicialmente está descrita a análise da pontuação de

impacto do DHRAM, seguida da análise dos efeitos dos fatores sobre os grupos do IHA.

Efeitos na pontuação de impacto do DHRAM

Dentre os três fatores estudados (demanda, tipologia e vazão remanescente), a demanda foi o que apresentou maior magnitude de impacto a jusante (ver Figura 3). A tipologia não apresentou nenhum efeito a jusante das barragens de pequena capacidade, enquanto nas de grande capacidade possui efeito. A vazão remanescente apresentou efeito, independentemente da capacidade de armazenamento.

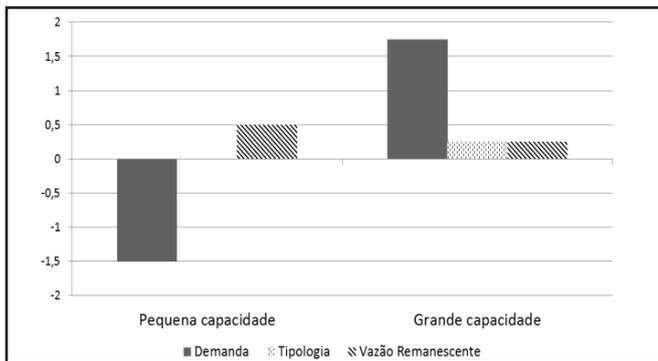


Figura 3 - Comparação dos efeitos dos fatores entre as diferentes capacidades de armazenamento

Para as pequenas capacidades a opção de mudança de demanda de uso não consuntivo para uso consuntivo, resultou na diminuição da quantidade de pontos de impacto de 1,5 pontos em média, causando menor impacto a jusante. Porém nas grandes capacidades essa mesma mudança leva ao aumento do impacto a jusante de 1,75 pontos em média (ver Figuras 4 e 5).

Mudar a tipologia de um vale encaixado para um aberto somente produz efeito no caso das grandes capacidades e, ainda que pequena, ela conduz ao aumento do impacto a jusante de 0,25 pontos em média (ver Figuras 4 e 5). Na vazão remanescente, aumentar de 5% para 20% causa maior quantidade de pontos de impacto (em média de 0,5 nas pequenas e 0,25 nas grandes), ver figuras 4 e 5.

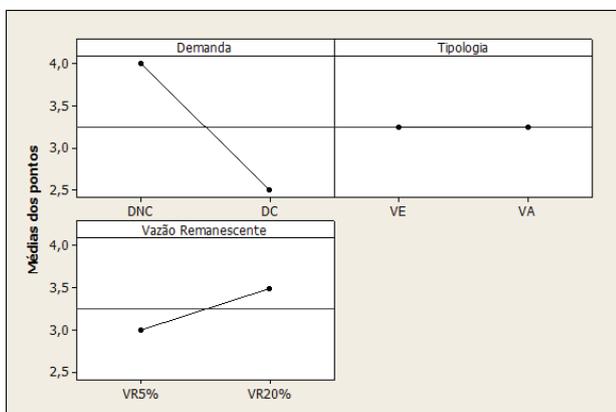


Figura 4 - Efeitos principais sobre os pontos do DHRAM para barragens com pequena capacidade de armazenamento

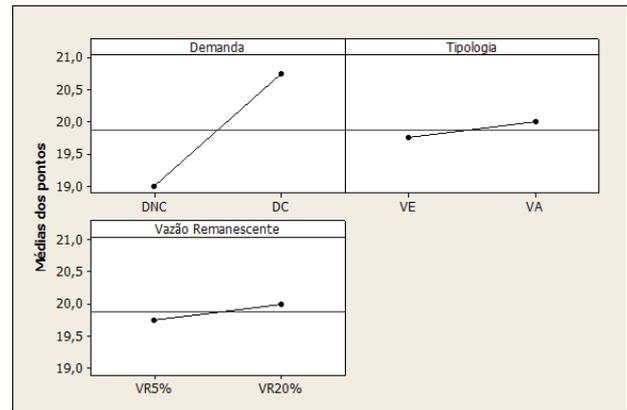


Figura 5 - Efeitos principais sobre os pontos do DHRAM para barragens com grande capacidade de armazenamento

Efeitos nos grupos do IHA

Os cinco grupos do IHA foram alterados de forma mais evidente pela demanda nas barragens de pequena capacidade de armazenamento, enquanto que nas de grande capacidade as alterações, além de serem maiores, as alterações foram causadas principalmente pela demanda e pela vazão remanescente (ver Figuras 6 e 7). Já a tipologia afetou com magnitude relevante

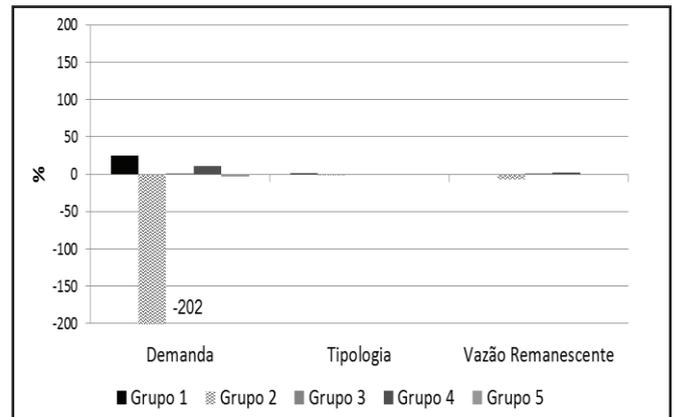


Figura 6 - Efeitos individuais do percentual dos grupos do IHA para pequena capacidade de armazenamento

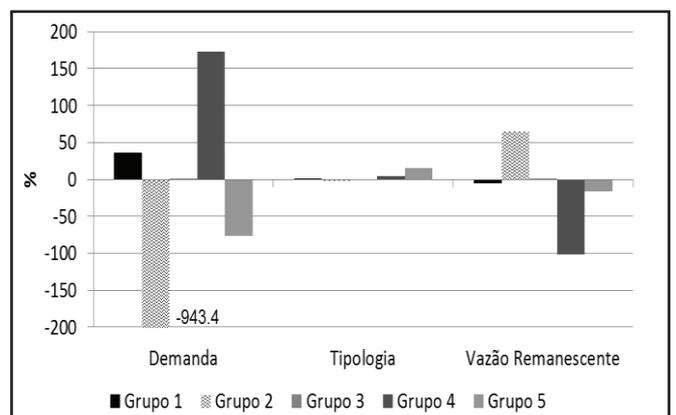


Figura 7 - Efeitos individuais do percentual dos grupos do IHA para grande capacidade de armazenamento

somente os grupos 4 e 5 das barragens de grande capacidade de armazenamento.

Conforme dito anteriormente, dentre os fatores individuais e suas combinações, o que mais se destacou em todos os grupos do IHA para as pequenas capacidades foi o efeito individual da demanda (afetando principalmente os grupos 1, 2, 4 e 5). Sendo que o Grupo 2 (magnitude e duração das condições de vazões anuais extremas) foi o que sofreu alteração de maior magnitude. Para os Grupos 2 e 5, ao passar a demanda de uso não consuntivo para uso consuntivo, o efeito foi negativo, ou seja, conduziu a um menor impacto a jusante nesses grupos. Nos Grupos 1 e 4 o sentido do efeito foi positivo, ou seja, passar a demanda de um uso consuntivo para um não consuntivo causa um maior impacto a jusante relacionado a estes grupos.

A vazão remanescente apresentou efeitos nos cinco grupos, sendo que no Grupo 2 foi de maior magnitude. Para os Grupos 1, 2 e 5, aumentando a vazão remanescente de 5% para 20% verifica-se redução no percentual de impacto, causando menor impacto a jusante. Enquanto que para os Grupos 3 e 4 o efeito é oposto, causa maior impacto a jusante.

O efeito individual da tipologia foi muito pequeno e somente existente para os grupos 2, 4 e 5. Variando a tipologia de um vale encaixado para um aberto reduz o percentual de impacto causando menor impacto a jusante.

Nas barragens de grande capacidade, a demanda afetou com maior magnitude quatro grupos (1, 2, 4 e 5). Para os Grupos 1 e 4, variar a demanda de uso não consuntivo para uso consuntivo aumenta o percentual de alteração. Enquanto que para os Grupos 2 e 5, essa variação diminui o percentual de alteração. Vale a pena destacar que esta variável de projeto afetou com maior intensidade o Grupo 2 e em segundo lugar o Grupo 4.

A variação da tipologia afetou com maior magnitude os Grupos 4 e 5. Para eles variar de um vale encaixado para um aberto aumenta o percentual de alteração causando maior impacto a jusante.

A vazão remanescente afetou com maior magnitude os Grupos 1, 2, 4 e 5. Os Grupos 1 e 5 foram afetados com menor intensidade e o sentido desta alteração foi de um menor impacto a jusante. O Grupo 4 também apresentou este sentido de impacto porém com uma magnitude muito maior. Para o Grupo 2, variar a vazão remanescente de 5% para 20% aumenta ao percentual de alteração causando maior impacto a jusante.

CONCLUSÃO

Este trabalho buscou avaliar como diferentes variáveis de projeto de barragem, entre elas a capacidade de armazenamento, a demanda hídrica, a tipologia de vale e a vazão remanescente, influenciam as alterações hidrológicas e os cinco componentes do regime de vazão natural a jusante de um rio perene.

Foi delineada a relação de tais alterações e as variáveis de projeto através da utilização de dados de vazão diária para a simulação do balanço hídrico juntamente com a aplicação de metodologias de avaliação e classificação das alterações hidrológicas, aliadas a uma análise de sensibilidade realizada com o

Planejamento Fatorial.

Quanto às alterações hidrológicas, o regime hídrico foi afetado de forma distinta e com diferentes graus em cada grupo de parâmetros hidrológicos do IHA. Em alguns casos foi possível identificar um comportamento diferente entre os cenários de uso consuntivo e não consuntivo, demonstrando o poder de alteração da demanda sobre o regime hidrológico.

Com relação à magnitude das vazões mensais médias, magnitude e duração das vazões extremas anuais e da frequência e duração destas (Grupos 1, 2 e 4), ficou mais evidente a influência do tipo de demanda, enquanto, no momento de ocorrência das vazões anuais extremas e características do hidrograma (Grupos 3 e 5) outros fatores influenciaram as alterações.

A classificação do DHRAM indicou que a capacidade de armazenamento é um fator que influencia diretamente o impacto da alteração hidrológica, pois os cenários de barragens com pequena capacidade de armazenamento (volume igual a 5% da vazão média anual) foram classificados como Classe 2 (baixo risco de impacto), enquanto que os cenários de grande capacidade de armazenamento (volume igual a 85% da vazão média anual) ficaram na Classe 4 (alto risco de impacto) e/ou Classe 5 (condição severamente impactada).

Na análise de sensibilidade do efeito das variáveis de projeto sobre as alterações hidrológicas para jusante do rio, os fatores tipo de demanda, tipologia e vazão remanescente apresentaram efeitos nos pontos de impacto do DHRAM e nos cinco grupos do IHA. Os fatores que tiveram maior magnitude de efeito foram o tipo de demanda e a vazão remanescente.

De acordo com os resultados da análise fatorial para os pontos do DHRAM, uma barragem com pequena capacidade de armazenamento em um rio de regime perene utilizada para uso consuntivo (e.g. abastecimento) causaria menor impacto do que se fosse utilizada para uso não consuntivo (e.g. geração de energia elétrica). Porém, quando se trata de uma barragem com grande capacidade de armazenamento, o efeito é inverso e o uso não consuntivo causa menos impacto. Para ambas as capacidades de armazenamento, o impacto é maior com o aumento da vazão remanescente.

Para os cinco grupos do IHA, de acordo com a análise fatorial, quatro grupos foram mais afetados: Grupo 1 (magnitude das condições mensais), Grupo 2 (magnitude e duração das condições de vazões anuais extremas), Grupo 4 (frequência e duração dos pulsos de vazões máximas e mínimas) e Grupo 5 (taxa e frequência de mudança no hidrograma), sendo que a magnitude e sentido da alteração variou em cada variável utilizada. Observou-se que a liberação de uma vazão mínima constante, conforme exige a maior parte das legislações, a depender da forma das características da barragem poderá causar maior impacto para jusante do rio, não alcançando objetivos ditos ecológicos.

Com as ferramentas aplicadas neste trabalho, demonstrou-se que as alterações causadas por barragens podem ser previamente mensuradas antes de sua implantação, ainda na fase de projeto.

Através do uso de tal procedimento, acredita-se que os projetos de barragens poderão ser melhor avaliados e, por consequência, alternativas de uso e medidas mitigadoras possam ser adotadas preventivamente para que venham a minimizar os

impactos no regime do rio para jusante (e.g. estabelecimento de vazões ecológicas com foco nos parâmetros e grupos que mais forem alterados pela barragem).

Este trabalho apresentou algumas limitações tais como: os valores de vazão remanescente escolhidos tiveram base apenas na legislação do Estado da Bahia; não foi analisado o efeito de impactos cumulativos; todos os cenários de demanda e características de armazenamento foram hipotéticos, por isso não foi possível verificar se os grupos do IHA foram afetados conforme previsto no caso de uma barragem real; e, para as barragens de grandes capacidades de armazenamento, devido à presença de anos com vazão constante na condição do pós-impacto o IHA apresentou incoerências no cálculo do dia de ocorrência da vazão mínima e máxima (Grupo 3), sendo necessário adotar valores representativos para os pontos de impacto.

Avanços com relação ao estudo realizado poderão contemplar, por exemplo, a variabilidade climática e incertezas associadas, a análise do impacto cumulativo de barragens em um mesmo rio e diferentes regimes fluviais normalizados.

AGRADECIMENTOS

Ao apoio do CNPq, Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – Brasil, da CAPES, Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior e a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia – FAPESB.

REFERÊNCIAS

BAHIA (Estado). Instrução Normativa nº 01, de 27 de Fevereiro de 2007. Dispõe sobre a emissão de outorga de direito de uso dos recursos hídricos de domínio do Estado da Bahia, assim como a sua renovação, ampliação, alteração, transferência, revisão, suspensão e extinção, e dá outras providências. Diário Oficial, 27 fev. 2007.

BERTHOUEX P. M.; BROWN, L. C. Statistics for environmental engineers. 2nd ed. United States of America: CRC Press, 2002.

BLACK, A. R.; ROWAN, J. S.; DUCK, R. W.; BRAGG, O. M.; CLELLAND, B. E. DHRAM: a method for classifying river flow regime alterations for the EC Water Framework Directive. *Aquatic Conserv.: marine freshwater ecosystems*, v. 15, n. 5, p. 427-446, Sept./Oct. 2005.

BUNN, S. E.; ARTHINGTON, A. H. Basic Principles and Ecological Consequences of Altered Flow Regimes for Aquatic Biodiversity. *Environ. Manage.*, v. 30, n. 4, p. 492-507, Oct. 2002.

BURKE, M.; JORDE, K.; BUFFINGTON, J. M. Application of a hierarchical framework for assessing environmental impacts of dam operation: Changes in streamflow, bed mobility and recruitment of riparian trees in a western North American river. *J. Environ. Manage.*, v. 90, p. S224-S236, July 2009. Suppl. 3.

GENZ, F.; LESSA, G. C. Twenty-six years of uneven change in low flows due to different uses and operation of a large dam in a semiarid river. *RBRH: revista brasileira de recursos hídricos*, v. 20, n. 2, abr./jun. 2015.

GENZ, F.; LUZ, L. D. Avaliação das alterações hidrológicas no baixo trecho do Rio São Francisco. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17., 2009, Campo Grande. *Anais...* Porto alegre: RBRH, 2009.

GENZ, F.; TANAJURA, C. A. S.; ARAÚJO, H. A. Impacto das mudanças climáticas nas vazões dos rios Pojuca, Paraguaçu e Grande – cenários de 2070 a 2100. *Bahia Análise Dados*, Salvador, v. 21, n. 24, p. 807-823, out./dez. 2011.

LIMA, C. H. P. Avaliação das alterações hidrológicas a jusante de barragens por meio de análise de sensibilidade à variação de variáveis de projeto. 2014. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2014.

MAGILLIGAN, F. J.; NISLOW, K. H. Changes in hydrologic regime by dams. *Geomorphology*, v. 71, n. 1-2, p. 61-78, Oct. 2005.

MC MANAMAY, R. A.; ORTH, D. J.; DOLLOFF, C. A. Revisiting the homogenization of dammed rivers in the southeastern US. *J. Hydrol.*, v. 424-425, p. 217-237, Mar. 2012.

MOLLE F.; CADIER, E. Manual do pequeno açude. Recife: SUDENE-DPG-DPP-APR, 1992.

NILSSON, C.; REIDY, C. A.; DYNESIUS, M.; REVENGA, C. Fragmentation and flow regulation of the world's large river system. *Science*, v. 308, n. 5720, p. 405-408, Apr. 2005.

OLDEN, J. D.; POFF, N. L. Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes. *River Res. Appl.*, v. 19, n. 2, p. 101-121, Mar./Apr. 2003.

POFF, N. L.; ALLAN, J. D.; BAIN, M. B.; KARR, J. R.; PRESTEGAARD, K. L.; RICHTER, B. D.; SPARKS, R. E.; STROMBERG, J. C. The Natural Flow Regime: A paradigm for river conservation and restoration. *BioScience*, v. 47, n. 11, p. 769-784, Dec. 1997.

POFF, N. L.; HART, D. D. How Dams Vary and Why It Matters for the Emerging Science of Dam Removal. *BioScience*, v. 52, n. 8, p. 659-668, Aug. 2002.

POFF, N. L.; MATTHEWS, J. H. Environmental flows in the Anthropocene: past progress and future prospects. *Current Opinion Environ. Sustainability*, v. 5, n. 6, p. 667-675, Nov. 2013.

POFF, N. L.; ZIMMERMAN, J. K. H. Ecological responses to altered flow regimes: a literature review to inform the science and management of environmental flows. *Freshwater Biol.*, v. 55, n. 1, p. 194-205, Jan. 2010.

POSTEL, S.; RICHTER B. Rivers for life: managing water for people and nature. United States of America: Island Press, 2003.

PRINGLE, C. M.; FREEMAN, M. C.; FREEMAN, B. J. Regional Effect of Hydrologic Alterations on Riverine Macrobiota in the New World: Tropical-Temperate Comparisons. *BioScience*, v. 5, n. 9. P. 807-823, Sept. 2000.

RICHTER, B. D.; BAUMGARTNER, J. V.; POWELL, J.; BRAUN, D. P. A Method for Assessing Hydrologic Alteration with Ecosystems. *Conserv. Biol.*, v. 10, n. 4, p. 1163-1174, 1996.

ROSENBERG, D. M.; MCCULLY, P.; PRINGLE, C. M. Global-Scale Environmental effects of hydrological alterations: introduction. *BioScience*, v. 50, n. 9, p. 746-751, Sept. 2000.

SILVA, S. F. Análise da disponibilidade e demanda para o sistema de abastecimento de água de Salvador frente a cenário de mudanças climáticas. 2012. 149 p. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade Federal da Bahia, Salvador, 2012.

STEVAUX, J. C.; MARTINS, D. P.; MEURER, M. Changes in a large regulated tropical river: The Paraná River downstream from the Porto Primavera Dam, Brazil. *Geomorphology*, v. 113, n. 3-4, p. 230-238, Dec. 2009.

TAYLOR, D. L.; BOLGRIEN, D. W.; ANGRADI, T. R.; PEARSON, M. S.; HILL, B. H. Habitat and hydrology condition indices for the upper Mississippi, Missouri, and Ohio rivers. *Ecol. Indicators*, v. 29, p. 111-124, June 2013.

TNC - The Nature Conservancy. Indicators of Hydrologic Alteration. Version 7.1 User's Manual. [S.l.]: The Nature Conservancy, 2009.

WCD - World Commission on Dams. Dams and development: a new framework for decision-making. London: Earthscan Publications, 2000.

ZHAO, Q.; LIU, S.; DENG, L.; DONG, S.; CONG; WANG; YANG, Z.; YANG, J. Landscape change and hydrologic alteration associated with dam construction. *Int. J. Appl. Earth Observat. Geoinform.*, v. 16, p. 17-26, June 2012.