

AVALIAÇÃO DAS ALTERAÇÕES HIDROLÓGICAS NO BAIXO TRECHO DO RIO SÃO FRANCISCO

Fernando Genz¹ & Lafayette Dantas da Luz²

RESUMO --- Dentre as diversas intervenções nos cursos d'água, barragens têm conseqüências mais marcantes, pois alteram fortemente o regime fuvial, assim como a liberação de sedimentos e matéria orgânica e inorgânica para jusante. O rio São Francisco apresenta importantes usinas hidrelétricas, sendo que nos trechos Submédio e Baixo estão instaladas as usinas da CHESF, com potencial instalado de 10.618,327 MW e volume de acumulação de 49,82 bilhões de m³. A quantificação das alterações hidrológicas no baixo curso do rio, considerando a variabilidade hidrológica através do método de classificação da *CHid* (Genz e Luz, 2007), foi efetivada por meio do método dos Indicadores de regime Hidrológico Alterado (IHA), proposto por Richter et al. (1996, 1999). Essa análise, considerando a *CHid*, permitiu identificar alterações nas vazões de forma mais fiel aos efeitos das intervenções no rio, em especial pelas UHEs, evitando confundir eventos de condições hídrico-climáticas distintas. A regularização pelas barragens e o resultado da operação das UHEs foi detectado, mostrando profundas alterações no regime hidrológico. Tais resultados, descrevendo os padrões hidrológicos pré e pós-impacto fornecem condições de contorno e elementos, juntamente com outros fatores, para a análise e busca da definição de padrões fluviais que potencializem funções ecológicas e ambientais no trecho estudado.

ABSTRACT --- Among all human interventions in rivers, dams have stronger consequences due to significant alterations on hydrology and on sediment and organic and inorganic matter fluxes. São Francisco river accommodates important hydropower dams in its sub-medium and lower reaches, with a generation potential of 10,618.327 MW and 49,82 billions de m³ of reservoir capacity. Quantification of hydrological alterations in its lower reach was carried out considering the Indicators of Hydrological Alteration – IHA method (Richter et al., 1996, 1999) and applying the hydrological condition classification method proposed by Genz & Luz (2007). This latter approach allowed more reliable identification of the causal effects of the human interventions on the river avoiding confusion with effects of distinct hydro-climatic conditions. Regularization by the reservoirs and the effects of power plants' operation were detected showing intense hydrologic regime alterations. Such results describing hydrologic patterns pre and post impact give us boundary conditions and elements to analyzing, together with other factors, the flow patterns that should be necessary to enhance ecological and environmental functions and services in the lower reach of São Francisco river.

Palavras-chave: alterações hidrológicas, vazões ecológicas, Rio São Francisco.

¹ Pesquisador do CNPq/CT-ENERG no Departamento de Engenharia Ambiental da Escola Politécnica da UFBA. Rua Aristides Novis, 02, Federação, Salvador/BA, 40210-630. e-mail: rajendra.br@gmail.com.

² Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Ambiental da Escola Politécnica da UFBA. Rua Aristides Novis, 02, Federação, Salvador/BA, 40210-630. e-mail: lluz@ufba.br.

1 INTRODUÇÃO

Dentre as atividades humanas com potencial de gerar pronunciados efeitos sobre o comportamento dos rios, as barragens têm conseqüências marcantes, pois alteram fortemente a magnitude, a frequência e o tempo de resposta da vazão, podendo também mudar a quantidade de sedimento e matéria orgânica e inorgânica liberadas para jusante.

O rio São Francisco (RSF) tem ao longo do seu curso principal importantes usinas hidrelétricas (UHEs), sendo que no trechos Submédio e Baixo estão instaladas as usinas da Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF), constituindo o maior parque de geração de energia hidrelétrica do país (potência total = 10.618.327 kW; volume de acumulação de 49,82 bilhões de m³).

Algumas alterações hidrológicas no baixo curso do RSF foram analisadas por Pruski et al (2003) e Luz et al. (2006). Pruski et al. (2003), analisando a série do posto 48020000 – Juazeiro localizado logo a jusante da Usina Hidrelétrica (UHE) Sobradinho, chegaram às seguintes conclusões: após o início de operação da UHE houve uma redução da vazão média da ordem de 332 m³/s; o efeito de regularização promoveu um aumento na vazão média mensal do mês mais seco de 1.529 m³/s para 1.923 m³/s e uma diminuição de 1.028 m³/s na vazão mensal do mês de maior vazão, passando de 4.886 m³/s para 3.858 m³/s. Luz et al. (2006), analisando as cotas linimétricas diárias da estação Pão de Açúcar, a jusante da UHE Xingó, verificou a eliminação de níveis de enchente e a elevação dos níveis mínimos, destacando as suas conseqüências, tais como: i) a redução da capacidade de arraste e transporte longitudinal de sedimentos; ii) contração das áreas de transição ripárias; e iii) a expansão de feições terrestres em direção à calha fluvial, relacionando-as com as suas funções ecológicas.

Para avaliar as alterações hidrológicas no baixo curso do RSF, este trabalho agrega a consideração da variabilidade das vazões anuais e a metodologia dos Indicadores de regime Hidrológico Alterado – IHA.

A análise das alterações hidrológicas no baixo curso do RSF vem sendo desenvolvida dentro do projeto de pesquisa intitulado “Considerando a Variabilidade Hidrológica na Definição das Vazões Ecológicas no Baixo Curso do Rio São Francisco” – CNPq/CT-ENERG e do projeto “Rede de Estudo do Regime de Vazões Ecológicas para o Baixo Curso do Rio São Francisco: uma Abordagem Multicriterial” - Edital CNPq/CT-HIDRO 045/2006.

2 QUANTIFICAÇÃO DAS ALTERAÇÕES HIDROLÓGICAS

A quantificação das alterações hidrológicas, considerando a variabilidade hidrológica através da *CHid* (Genz e Luz, 2007), foi efetivada através do método dos Indicadores de regime Hidrológico Alterado (IHA), proposto por Richter et al. (1996,1999).

2.1 Dados utilizados

A compilação de dados contemplou a coleta dos dados hidrológicos disponíveis (HIDROWEB/ANA) e preenchimento de séries históricas. Inicialmente foram identificados os postos fluviométricos em operação na calha do rio, a montante e a jusante do complexo de UHEs da CHESF. Embora o trecho de estudo (baixo curso do rio) esteja localizado a jusante da UHE Xingó, a avaliação dos efeitos das usinas no regime hidrológico requereu considerar as características das vazões que entraram no sistema e, por isso, foram selecionados postos fluviométricos a montante da UHE Sobradinho.

A Figura 1 mostra a localização dos postos fluviométricos e das usinas. Os postos do Rio Grande (margem esquerda do RSF) auxiliaram na determinação da vazão afluente ao reservatório de da UHE Sobradinho.



Figura 1. Localização dos postos fluviométricos e das usinas hidrelétricas do sistema da CHESF.

2.2 Método da condição hídrica da bacia hidrográfica (CHid)

O método da *condição hídrica da bacia hidrográfica (CHid)* (Genz e Luz, 2007) define a variabilidade das vazões anuais (Q) em torno da vazão média de longo período (Q_{lp}), através da normalização da série, pelo cálculo da anomalia. A anomalia para as vazões é definida por:

$$\text{Anomalia} = (Q - Q_{lp}) / \sigma \quad (1)$$

Uma vez definida a anomalia e adotando-se um desvio padrão (1σ) para estabelecer os limites, a *CHid* foi classificada diretamente segundo apresenta a Tabela 1.

Tabela 1. Classes da *CHid* com base na anomalia da vazão média anual e 1σ (Genz e Luz, 2007).

<i>Limites</i>	<i>Classe da CHid</i>	<i>Valor da CHid</i>
Anomalia < -1,5	Muito seca	-2
-1,5 < Anomalia < -0,5	Seca	-1
-0,5 < Anomalia < 0,5	Média	0
0,5 < Anomalia < 1,5	Úmida	1
Anomalia > 1,5	Muito Úmida	2

A aplicação do método de classificação da *CHid* no baixo curso do RSF no período posterior a operação da UHE Sobradinho foi realizada com auxílio da série de vazões de referência de montante da UHE Sobradinho, compostas pelo somatório das vazões do posto Morpará (4636000), no Rio São Francisco, e Boqueirão (46902000), no Rio Grande. Esse procedimento foi necessário para classificar os eventos hidrológicos anuais antes de sofrer os efeitos dos reservatórios e da operação das usinas hidrelétricas.

A classificação da *CHid* para o período de 1939 a 1977 da série de Traipu, código 49660000, ($Q_{lp} = 2.912,5 \text{ m}^3/\text{s}$ e $\sigma = 840,7 \text{ m}^3/\text{s}$), resultou em (Genz e Luz, 2007):

1. Muito seca: nenhum evento;
2. Seca: 12 eventos (1953,1954,1955,1956,1959,1962,1964,1971,1972,1975,1976, 1977);
3. Média: 15 eventos (1939,1940,1941,1942,1950,1951,1952,1958,1961,1963,1967,1969, 1970,1973,1974);
4. Úmida: 6 eventos (1944,1948,1960,1965,1966,1968);
5. Muito úmida: 6 eventos (1943,1945,1946,1947,1949,1957).

Para o período de 1978 a 2006, a classificação da anomalia utilizou a série de referência a montante da UHE Sobradinho ($Q_{lp} = 2.856 \text{ m}^3/\text{s}$ e $\sigma = 728 \text{ m}^3/\text{s}$), resultando em (Genz e Luz, 2008):

1. Muito seca: nenhum;
2. Seca: 12 eventos (1987,1988,1989,1991,1995,1996,1998,1999,2000,2001,2002, 2003);
3. Média: 12 eventos (1978,1981,1984,1985,1986,1990,1993,1994,1997,2004,2005, 2006);
4. Úmida: 1 evento (1992);
5. Muito úmida: 4 eventos (1979,1980,1982, 1983).

Em virtude da severa alteração imposta às vazões no baixo curso do RSF por ocasião do enchimento da UHE Sobradinho, o ano de 1978 foi definido como o ano do principal impacto, ficando estabelecido como marco para a análise das alterações hidrológicas e fora das avaliações.

2.3 Indicadores de regime Hidrológico Alterado (IHA)

A avaliação dos efeitos de barragens pode ser mais bem qualificada se as alterações hidrológicas forem identificadas com clareza. Richter *et al.* (1996,1999) propuseram o método de análise de Indicadores de regime Hidrológico Alterado - IHA ("Indicators of Hydrologic Alterations"). O IHA é dividido em cinco grupos principais de análise, cada um enfocando diferentes características do regime hidrológico relacionadas com aspectos dos ecossistemas aquáticos. Dentro de cada grupo vários parâmetros são analisados (Tabela 2).

Tabela 2. Resumo dos parâmetros hidrológicos usados pelo método do IHA (Richter, 1999).

Grupo	Característica	Parâmetro
1. Magnitude das vazões mensais	Magnitude	1 a 12. Vazão média mensal (doze meses)
	Distribuição temporal	
2. Magnitude e duração de vazões anuais extremas	Magnitude	13. Vazão máxima diária
		14. Vazão mínima diária
	Duração	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
		24. Vazão mínima de 7 dias dividida pela vazão média anual (escoamento de base)
3. Época das vazões anuais extremas	Época de ocorrência	25. Dia Juliano de cada vazão máxima diária anual
		26. Dia Juliano de cada vazão mínima diária anual
4. Frequência e duração dos pulsos de vazões altas e baixas	Magnitude	27. Número de eventos de cheia em cada ano
		28. Número de eventos de seca em cada ano
	Duração	29. Duração média dos eventos de cheia anual
		30. Duração média dos eventos de seca anual
5. Taxa/Frequência de mudanças no hidrograma	Frequência da taxa de mudança	31. Média de todas as diferenças positivas de dias consecutivos
		32. Média de todas as diferenças negativas de dias consecutivos
		33. Número de reversões

Dos 33 parâmetros, dezessete são direcionados para a análise da magnitude, duração, tempo de ocorrência e frequência de eventos extremos - grupos 2, 3, 4 (n. 27 e 28) e 5 (n. 33) - devido à forte influência sobre o ecossistema e a geomorfologia. Os demais parâmetros medem a tendência central, tanto da magnitude como da taxa de variação. Em termos de avaliação das alterações hidrológicas, o IHA possibilita destacar mudanças na distribuição temporal das vazões (grupos 1, 2 e 3), além de variações nas características de forma do hidrograma (grupos 4 e 5).

A partir das avaliações do método IHA, com base no paradigma de manutenção do regime hidrológico natural, Richter *et al.* (1997) adotaram uma sistemática de análise que considera um regime de variação admissível – RVA ("Range Variability Approach"). O método RVA usa como

valor padrão ou inicial a média \pm um desvio padrão para definir o limite da faixa de variação, ou a mediana e os valores para os percentis de 25 e 75%. No entanto, segundo os autores, outros limites podem ser escolhidos (p. ex. vazões ecológicas conhecidas, vazões extremas ou com determinada permanência, 2 desvios padrões) a depender das características de cada sistema, podendo ser diferente nos vários parâmetros do IHA. O grau de alteração hidrológica de determinada vazão é definido por:

$$IHA = (Q_{obs} - Q_{esp})/Q_{esp} \quad (2)$$

onde: Q_{esp} = a frequência com que os valores anuais se situam na faixa do RVA correspondente aos valores pré barragem; e Q_{obs} = a frequência com que os valores anuais do período pós barragem estão dentro da faixa do RVA estabelecido

A definição do limites do RVA para análise das alterações hidrológicas do baixo curso do RSF utilizou a média \pm um desvio padrão. Também é importante esclarecer as seguintes definições:

- *Pulso de vazão máxima*: valor maior que a vazão média + um desvio padrão;
- *Pulso de vazão mínima*: valor menor que a vazão média - um desvio padrão.

3 RESULTADOS

3.1 Análise considerando todo o período de dados anterior e posterior à UHE Sobradinho (1939 a 1977 e 1979 a 2006) – Sem distinção da Condição Hídrica da bacia.

As maiores alterações indicadas pela avaliação do IHA (Figura 2) para o período anterior e posterior à UHE Sobradinho (1939 a 1977 e 1979 a 2006), em termos de valores abaixo do limite RVA, por ordem decrescente foram: 1) o dia de ocorrência da vazão mínima; 2) a taxa de decréscimo das vazões; 3) vazão máxima diária; por outro lado, em termos de valores acima do limite RVA, destacaram-se o número de reversões e as mudanças nas vazões médias dos meses de outubro, agosto e setembro.

O efeito do armazenamento de água nos reservatórios e da operação das usinas hidrelétricas, em uma comparação direta entre o período anterior e posterior a UHE Sobradinho, pode ser observado na curva de variação sazonal das vazões médias mensais (Figura 3). Houve aumento nas vazões nos meses do período de estiagem e redução nas vazões do período de enchente, configurando uma menor variabilidade na magnitude das vazões mensais. Além disso, ocorreu a mudança do mês de ocorrência da menor vazão, que antes era em setembro e passou para junho.

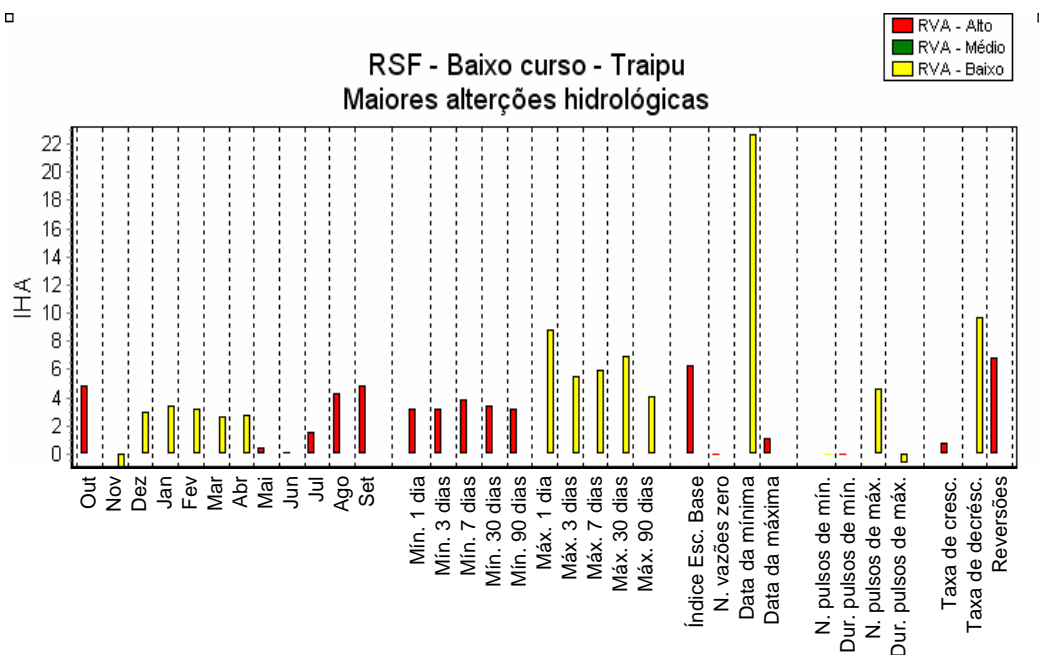


Figura 2. Destaque para as maiores alterações hidrológicas indicadas pelo IHA – Traipu – 1939 a 1977 e 1979 a 2006.

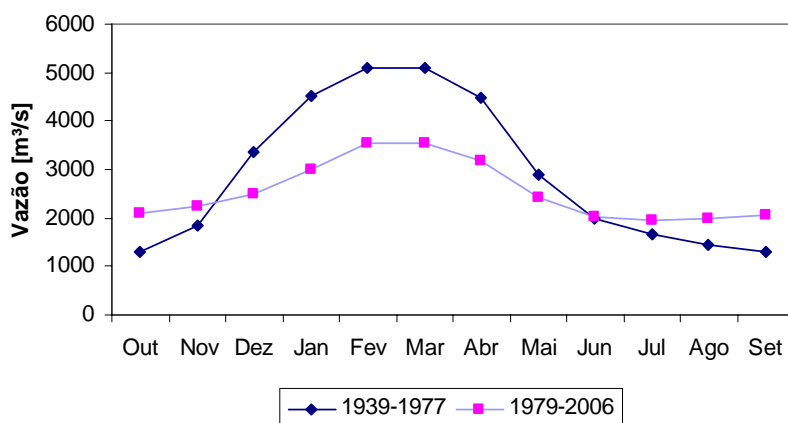


Figura 3. Curva de variação sazonal das vazões médias mensais. Período anterior e posterior a UHE Sobradinho.

Com relação às vazões mínimas de 1 dia, 3 dias, 7 dias, 30 dias e 90 dias (Figura 4), observou-se o aumento dos valores no período pós UHE Sobradinho (média de 42 % - 494 m³/s, variando entre 29 e 50 %). No caso das vazões máximas de 1 dia, 3 dias, 7 dias e 30 dias (Figura 4), resultou em redução dos valores no período pós UHE Sobradinho (média de 29 % - 2082 m³/s, variando entre 28,2 e 29,4 %).

No que se refere às datas de ocorrência das vazões mínimas, observou-se a antecipação média de 88 dias (do dia Juliano 277 para 189) e aumento do desvio padrão (de 28 para 51 dias) no período pós UHE Sobradinho. No caso da vazão máxima, a antecipação foi de 11 dias (média) e o desvio padrão passou de 7 para 10 dias (Figura 5). A taxa de crescimento das vazões (ascensão do

hidrograma) manteve-se equivalente (pré = 101 m³/s/dia e pós = 107 m³/s/dia). Na taxa de decréscimo houve aumento, passando de 68 m³/s/dia para 114 m³/s/dia, ou seja, a recessão do hidrograma foi mais rápida. O número de reversões foi o parâmetro que sofreu maior alteração relativa, passando de 46 para 133 (aumento de 186%) (Figura 5).

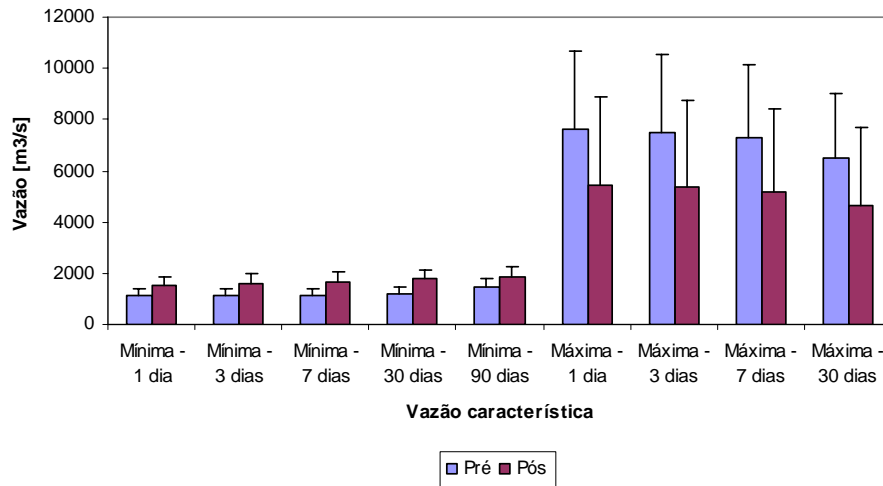


Figura 4. Comparação entre as vazões mínimas e máximas do período anterior e posterior a UHE Sobradinho - média (barra) e desvio padrão (linha vertical).

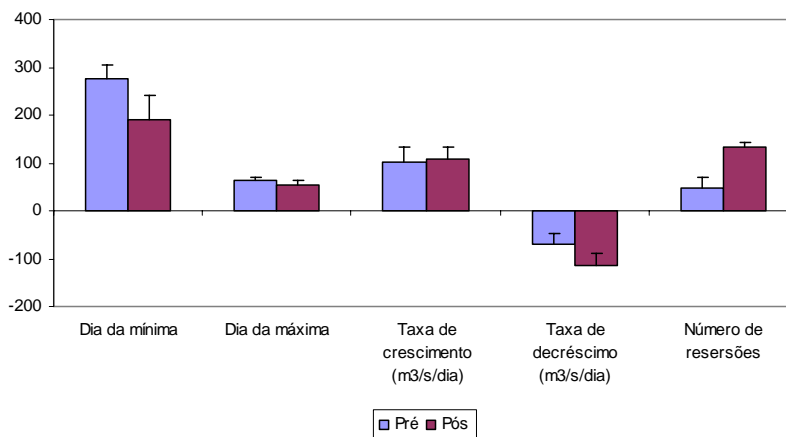


Figura 5. Comparação entre dia de ocorrência da vazão mínima e máxima; taxas de crescimento e decréscimo das vazões; número de reversões - período anterior e posterior a UHE Sobradinho - média (barra) e desvio padrão (linha vertical).

Ainda em relação aos valores extremos de mínimos e máximos, no período posterior a UHE Sobradinho, o número de pulsos de vazão mínima no baixo curso do RSF foi inexistente. Nos pulsos de vazão máxima houve redução no número de 1,7 eventos por ano no período anterior para 0,7 no período posterior à UHE Sobradinho, embora a duração dos eventos tenha se mantido (Figura 6). O limite do pulso de vazão mínima utilizado pelo IHA foi igual a 827 m³/s, enquanto que o de vazão máxima ficou em 4975 m³/s.

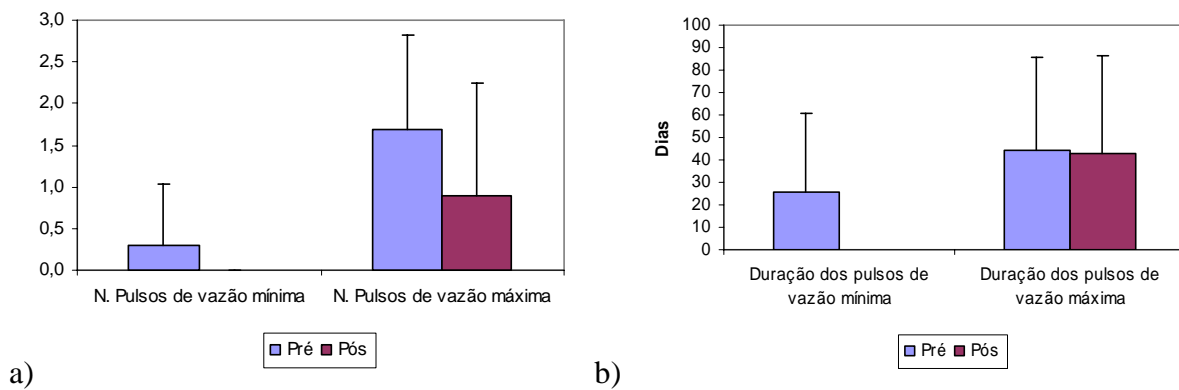


Figura 6. Comparação entre: a) o número de pulsos de vazão mínima e máxima; b) duração dos pulsos de vazão mínima e máxima - período anterior e posterior a UHE Sobradinho - média (barra) e desvio padrão (linha vertical).

3.2 Análise considerando somente os eventos da classe CHid Seca

Quando considerado o método da *condição hídrica da bacia hidrográfica (CHid)*, conforme descrito no item 2.2, na utilização do IHA foi possível perceber os efeitos dos reservatórios de maneira mais específica.

A curva sazonal das vazões caracterizou-se pelo achatamento da curva nos meses de cheia e monotonia geral (Figura 7).

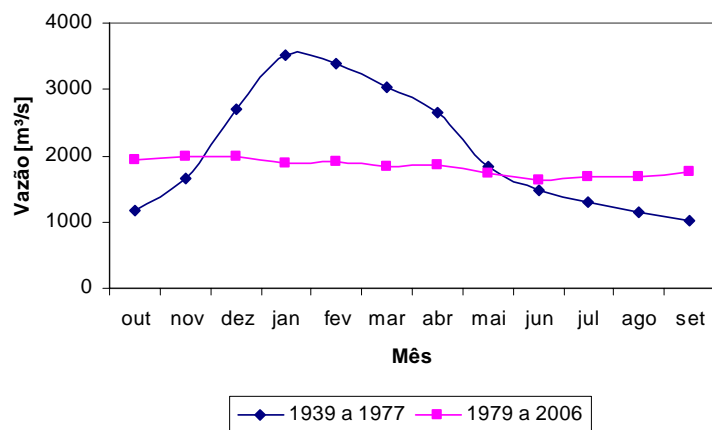


Figura 7. Curvas sazonais de vazões mensais em Traipu – 49660000 – *Chid Seca*. Período anterior (1939 a 1977) e posterior a UHE Sobradinho (1979 a 2006).

As maiores alterações indicadas pela avaliação do IHA (Figura 8) para os anos de *CHid* seca, em termos de valores abaixo do limite RVA, por ordem decrescente foram: 1) a data do dia da vazão mínima; 2) a taxa de decréscimo das vazões; 3) vazão máxima de 30 dias. Por outro lado, em termos de valores acima do limite RVA, destacaram-se as mudanças nas vazões médias dos meses de outubro, agosto e setembro, o número de reversões e as mudanças nas vazões mínimas.

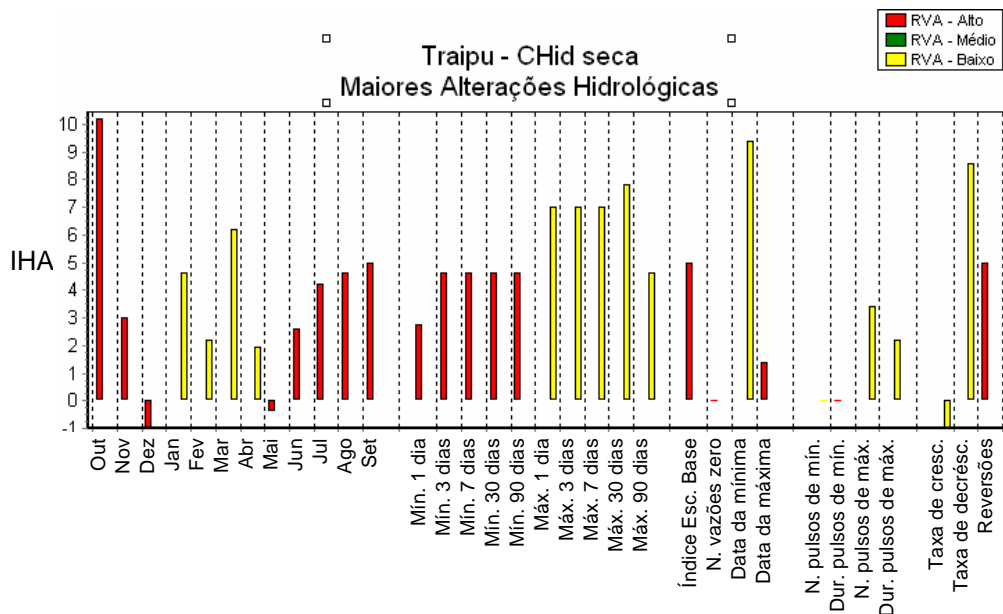


Figura 8. Destaque das maiores alterações hidrológicas indicadas pelo IHA – Traipu – *CHid seca*.

Em relação às vazões mínimas de 1 dia, 3 dias, 7 dias, 30 dias e 90 dias (Figura 9), observou-se o aumento dos valores no período pós UHE Sobradinho para os anos da *CHid seca* (média de 55 % = 516 m³/s, variando entre 42 e 62 %). No caso das vazões máximas de 1 dia, 3 dias, 7 dias e 30 dias (Figura 9), resultou em redução dos valores médios no período pós UHE Sobradinho para os anos da *CHid seca* (média de 50 % = 2545 m³/s, variando entre 42 e 52 %), assim como no desvio padrão (de 1290 m³/s para 600 m³/s em média).

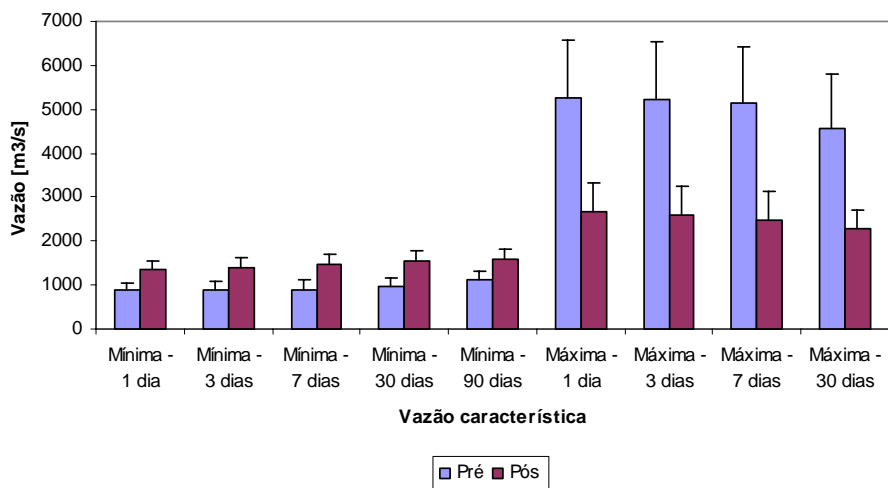


Figura 9. Comparação entre as vazões mínimas e máximas - média (barra) e desvio padrão (linha vertical) – Traipu – *CHid seca*.

No que se refere às datas de ocorrência das vazões mínimas, observou-se a antecipação média de 95 dias (do dia Juliano 256 para 161) e leve aumento do desvio padrão (de 40 para 43 dias) no período pós UHE Sobradinho para os anos da *CHid seca*. No caso da vazão máxima, houve um grande atraso levando o dia de ocorrência do dia Juliano 26 para 309, enquanto que o desvio padrão

passou de 2,5 para 72 dias (Figura 10). A taxa de crescimento das vazões manteve-se equivalente (pré = 94 m³/s/dia e pós = 90 m³/s/dia). Na taxa de decréscimo houve aumento, passando de 64 m³/s/dia para 99 m³/s/dia, ou seja, a recessão do hidrograma foi acelerada. O número de reversões foi o parâmetro que sofreu maior alteração relativa, passando de 59 para 134 (aumento de 129 %).

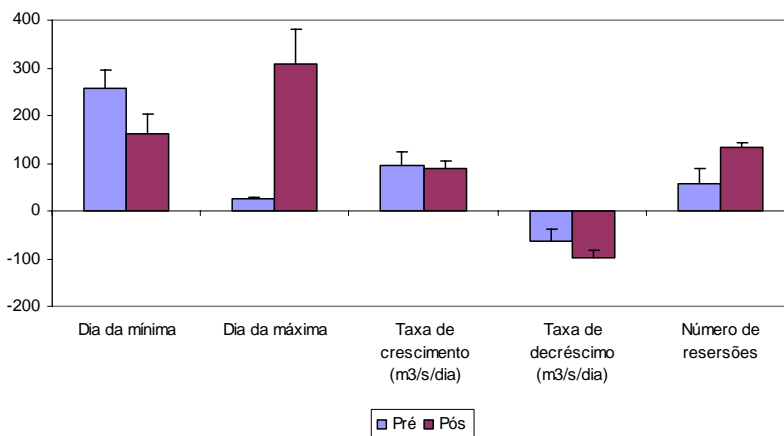


Figura 10. Comparação entre dia de ocorrência da vazão mínima e máxima; taxas de crescimento e decréscimo das vazões; número de reversões – Traipu – *CHid seca*.

Ainda em relação aos valores extremos de mínimos e máximos, no período posterior a UHE Sobradinho para os anos da *CHid seca*, o número de pulsos de vazão mínima no baixo curso do RSF foi inexistente. Nos pulsos de vazão máxima houve redução no número de 2,6 eventos por ano no período anterior para 0,08, bem como na duração dos eventos (de 42 para 17 dias) (Figura 11). O limite do pulso de vazão mínima utilizado pelo IHA foi igual a 836 m³/s, enquanto que o de vazão máxima ficou em 3301 m³/s.

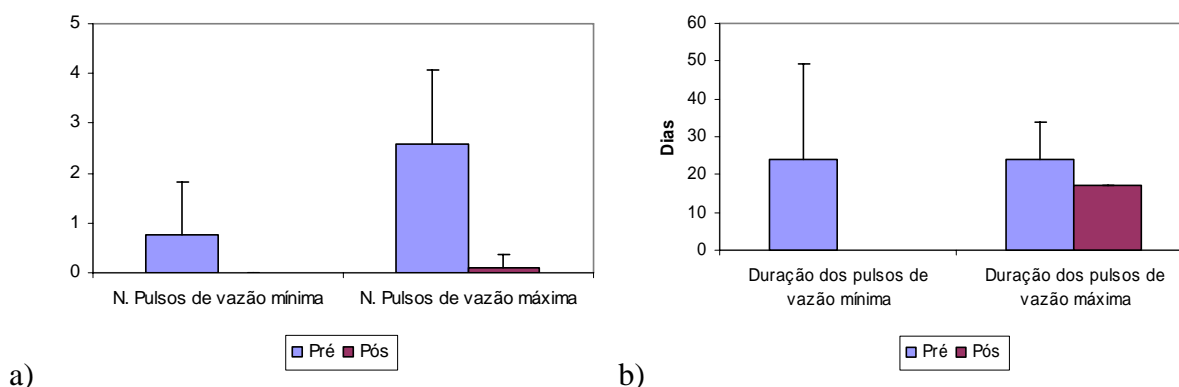


Figura 11. Comparação: a) o número de pulsos de vazão mínima e máxima; b) duração dos pulsos de vazão mínima e máxima - média (barra) e desvio padrão (linha vertical) – Traipu – *CHid seca*.

3.3 Análise considerando somente os eventos da classe *CHid Média*

As maiores alterações indicadas pela avaliação do IHA (Figura 12) para os anos de *CHid média*, em termos de valores abaixo do limite RVA, por ordem decrescente foram; 1) taxa de decréscimo das vazões; 2) data da vazão máxima; 3) data da vazão mínima; por outro lado, em

termos de valores acima do limite RVA, destacaram-se as mudanças nas vazões médias dos meses de outubro, dezembro, agosto e setembro, e as mudanças nas vazões mínimas.

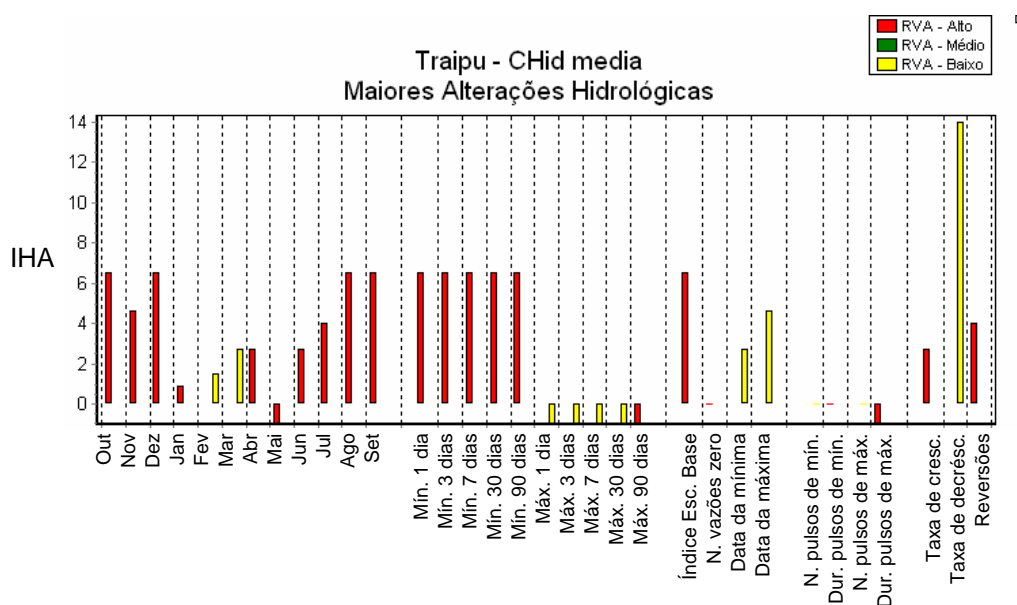


Figura 12. Destaque para as maiores alterações hidrológicas indicadas pelo IHA – Traipu – *CHid média*.

Nas vazões mensais as reduções das vazões do período de cheia continuaram, embora menos severas que aquelas da *CHid seca* (Figura 13).

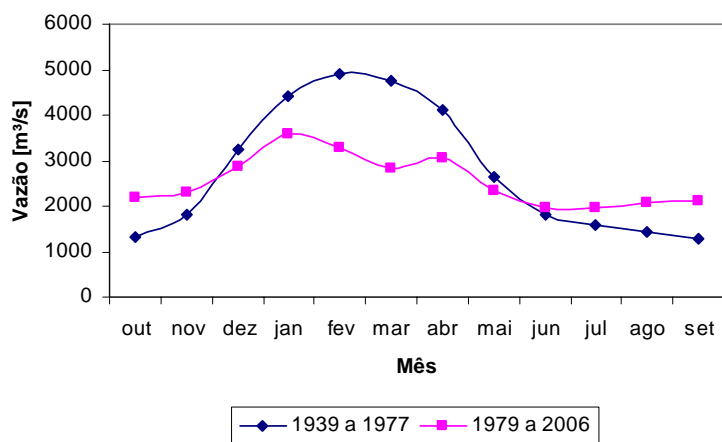


Figura 13. Curvas sazonais de vazões mensais em Traipu – 49660000 – *Chid Média*. Período anterior (1939 a 1977) e posterior a UHE Sobradinho (1979 a 2006).

Com relação às vazões mínimas de 1 dia, 3 dias, 7 dias, 30 dias e 90 dias (Figura 14), observou-se o aumento dos valores no período pós UHE Sobradinho para os anos da *CHid média* (média de 45 % = 536 m³/s, variando entre 38 e 53 %). No caso das vazões máximas de 1 dia, 3 dias, 7 dias e 30 dias (Figura 14), resultou em redução dos valores médios no período pós UHE Sobradinho para os anos da *CHid média* (média de 7 % = 431 m³/s, variando entre 2 e 14 %), porém houve aumento no desvio padrão (de 1172 m³/s para 2346 m³/s em média).

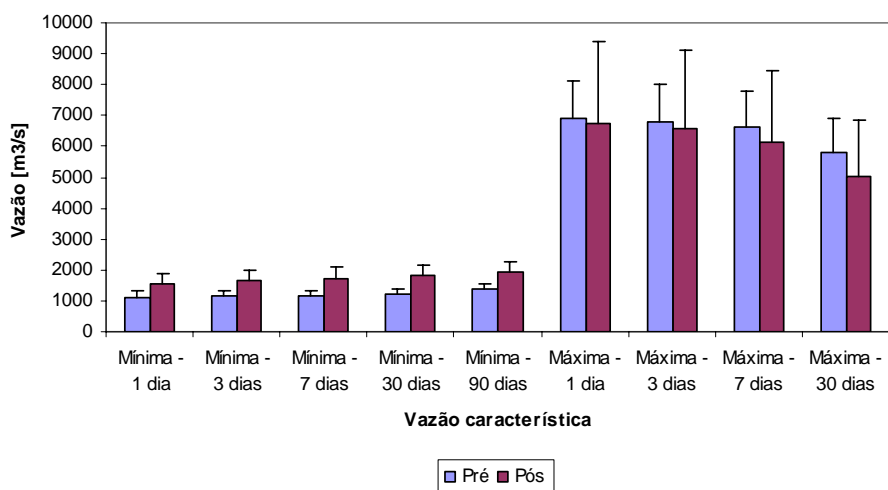


Figura 14. Comparação entre as vazões mínimas e máximas - média (barra) e desvio padrão (linha vertical) – Traipu – *CHid média*.

No que se refere às datas de ocorrência das vazões mínimas, observou-se a antecipação média de 122 dias (do dia Juliano 283 para 161) e o aumento do desvio padrão (de 15 para 40 dias) no período pós UHE Sobradinho para os anos da *CHid média*. No caso da vazão máxima, também houve uma antecedência na ocorrência, do dia Juliano 77 para 57 (Figura 15). A taxa de crescimento das vazões aumentou de 91 m³/s/dia para 119 m³/s/dia, assim como na taxa de decréscimo, que passou de 61 m³/s/dia para 127 m³/s/dia. O número de reversões foi o parâmetro que sofreu maior alteração relativa, passando de 45 para 130 (aumento de 192 %) (Figura 15).

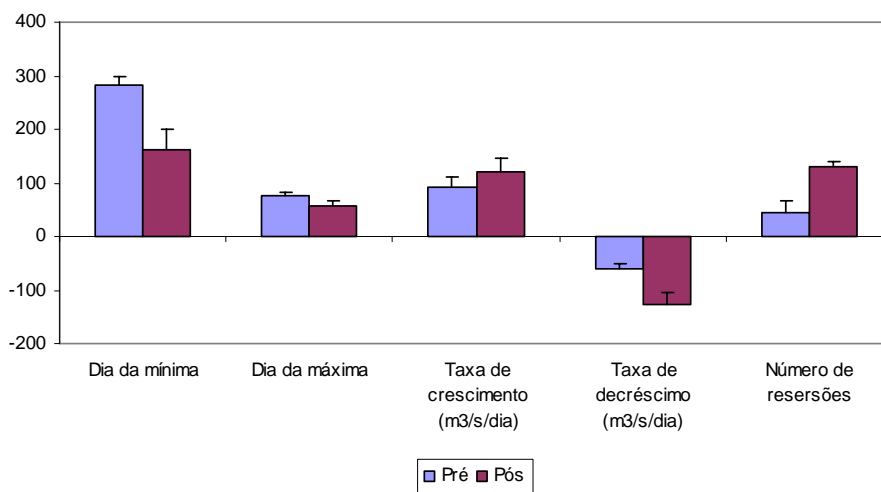


Figura 15. Comparação entre dia de ocorrência da vazão mínima e máxima; taxas de crescimento e decréscimo das vazões; número de reversões - média (barra) e desvio padrão (linha vertical) – Traipu – *CHid média*.

Ainda em relação aos valores extremos de mínimos e máximos, no período posterior a UHE Sobradinho para os anos da *CHid média*, o número de pulsos de vazão mínima no baixo curso do

RSF foi inexistente. Nos pulsos de vazão máxima houve redução no número de 2,5 eventos por ano no período anterior para 1,4, bem como na duração dos eventos (de 46 para 28 dias) (Figura 16). O limite do pulso de vazão mínima utilizado pelo IHA foi igual a 1100 m³/s, enquanto que o de vazão ficou em 4431 m³/s.

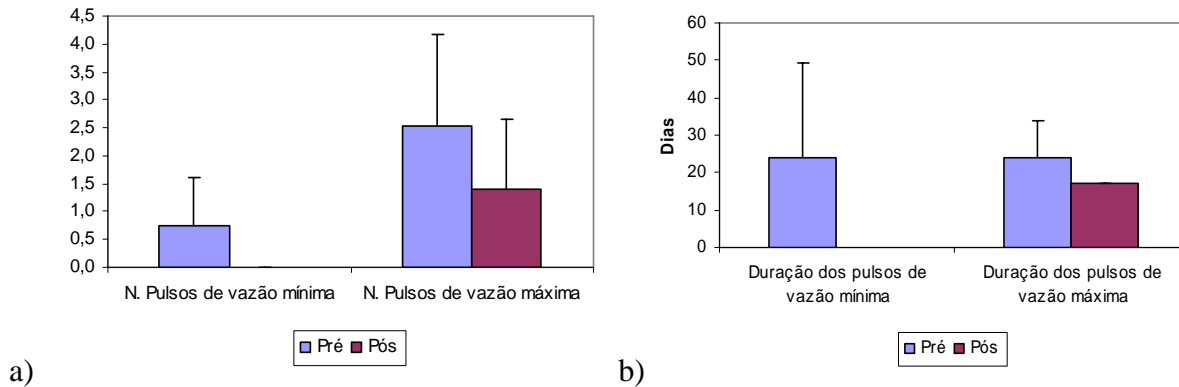


Figura 16. Comparação entre: a) o número de pulsos de vazão mínima e máxima; b) duração dos pulsos de vazão mínima e máxima – Traipu – *CHid média*.

Os resultados da classe *CHid Úmida* não foram apresentados, pois se referem a apenas um ano de dados no período posterior a UHE Sobradinho.

3.4 Análise considerando somente os eventos da classe *CHid Muito Úmida*

As maiores alterações indicadas pela avaliação do IHA (Figura 17) para os anos de *CHid muito úmida*, em termos de valores abaixo do limite RVA, foram a data da vazão mínima e duração dos pulsos de vazão máxima. Em termos de valores acima do limite RVA, destacaram-se as mudanças nas vazões médias dos meses de agosto e setembro e o número de reversões.

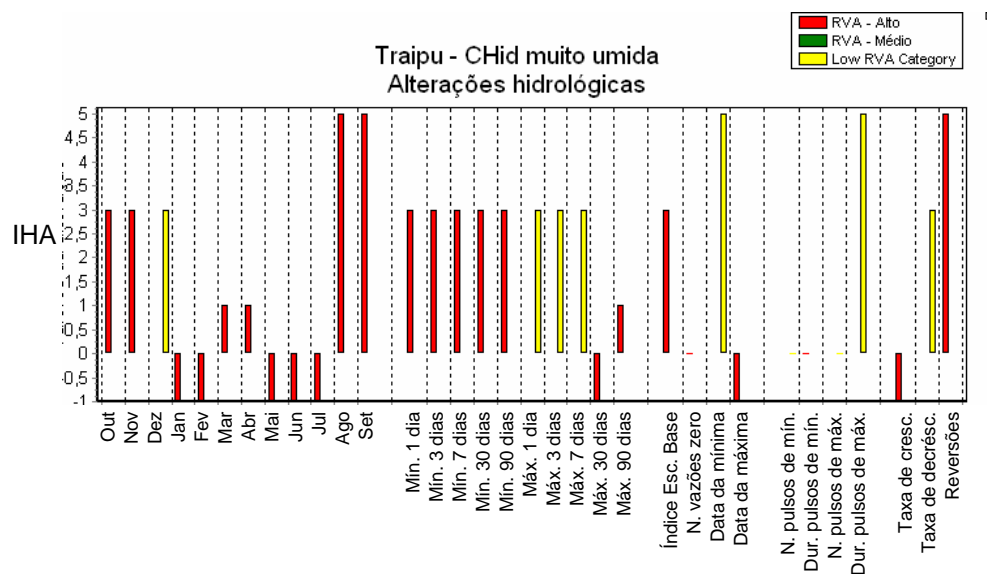


Figura 17. Destaque para as maiores alterações hidrológicas indicadas pelo IHA – Traipu – *CHid Muito úmida*.

As alterações nas vazões mensais, no caso da *CHid Muito úmida*, foram caracterizadas por um retardo de um mês na ocorrência do valor máximo e na recessão o gradiente foi mais acentuado, ou seja, a curva foi “comprimida” (Figura 18).

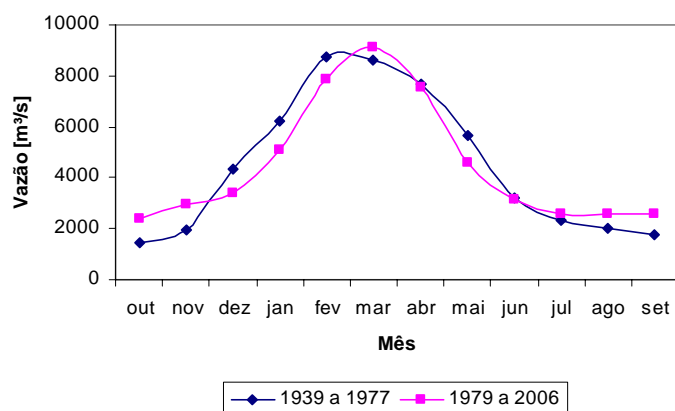


Figura 18. Curvas sazonais de vazões mensais em Traipu – 49660000 – *CHid Muito úmida*. Período anterior (1939 a 1977) e posterior a UHE Sobradinho (1979 a 2006).

Em relação às vazões mínimas de 1 dia, 3 dias, 7 dias, 30 dias e 90 dias (Figura 19), observou-se o aumento dos valores no período pós UHE Sobradinho para os anos da *CHid Muito úmida* (média de 43 % = 616 m³/s, variando entre 21 e 53 %). No caso das vazões máximas de 1 dia, 3 dias, 7 dias e 30 dias (Figura 19), resultou em redução dos valores médios no período pós UHE Sobradinho para os anos da *CHid Muito úmida* (média de 18 % = 2193 m³/s, variando entre 11 e 21 %), enquanto que o desvio padrão se manteve próximo (de 2168 m³/s para 2345 m³/s em média).

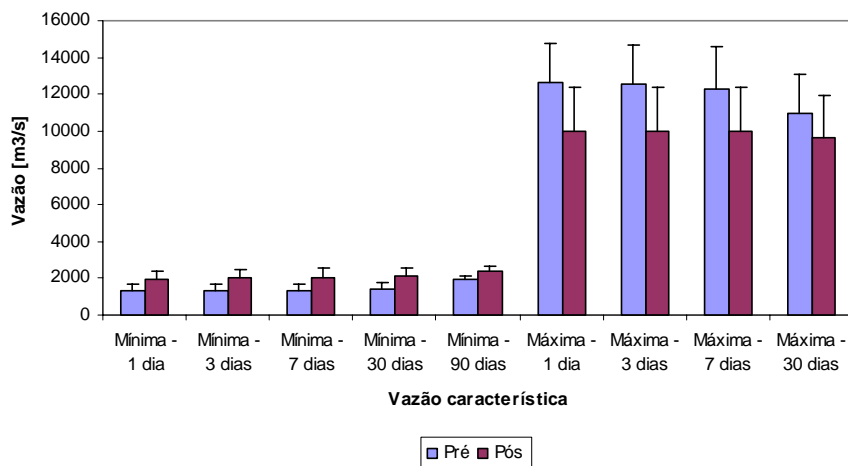


Figura 19. Comparação entre as vazões mínimas e máximas - média (barra) e desvio padrão (linha vertical) – Traipu – *CHid Muito úmida*.

Embora a data de ocorrência das vazões mínimas tenham se mantido equivalentes na média (do dia Juliano 302 para 296), houve aumento do desvio padrão (de 13 para 37 dias) no período pós UHE Sobradinho para os anos da *CHid Muito úmida*. No caso da vazão máxima, houve uma antecedência na ocorrência, do dia Juliano 92 para 71 (Figura 20). A taxa de crescimento das vazões

teve pequena redução (de 127 m³/s/dia para 122 m³/s/dia). No entanto, a taxa de decréscimo apresentou aumento, passando de 80 m³/s/dia para 119 m³/s/dia. O número de reversões foi o parâmetro que sofreu maior alteração relativa, passando de 27 para 144 (aumento de 428 %) (Figura 20).

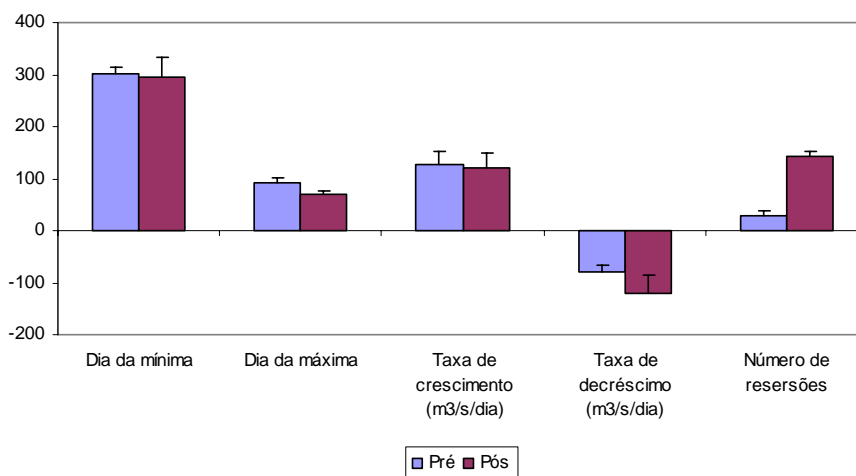


Figura 20. Comparação entre dia de ocorrência da vazão mínima e máxima; taxas de crescimento e decréscimo das vazões; número de reversões– Traipu – *CHid Muito úmida*.

Ainda em relação aos valores extremos de mínimos e máximos, no período posterior a UHE Sobradinho para os anos da *CHid Muito úmida*, houve o aumento do número médio de pulsos de vazão mínima anual no baixo curso do RSF (de 0,3 para 1), porém a duração passou de 45 dias para 1,5 dias. Nos pulsos de vazão máxima também houve aumento (de 2,5 eventos por ano no período anterior para 3,25 no período posterior à UHE Sobradinho para os anos da *CHid Muito úmida*. A duração média dos eventos de pulso de vazão máxima reduziu de 61 para 32 dias (Figura 21Figura 16). O limite do pulso de vazão mínima utilizado pelo IHA foi igual a 1343 m³/s, enquanto que o de vazão ficou em 7589 m³/s.

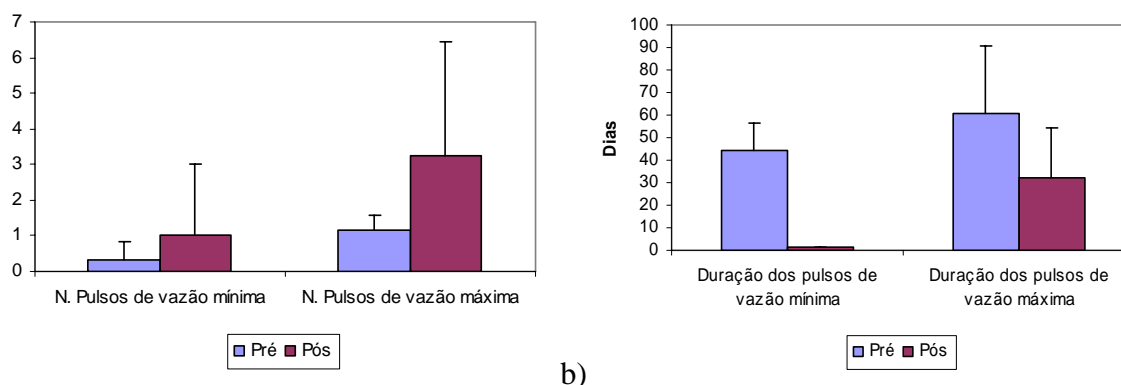


Figura 21. Comparação: a) o número de pulsos de vazão mínima e máxima; b) duração dos pulsos de vazão mínima e máxima - média (barra) e desvio padrão (linha vertical) – Traipu – *CHid Muito úmida*.

3.5 Síntese e análise dos resultados obtidos com o IHA e CHid.

A síntese dos resultados das alterações nas curvas de variação sazonal das vazões no período anterior e posterior à UHE Sobradinho obtida pelo erro relativo para as diversas classes da *CHid* é apresentada na Tabela 3, enquanto que na Tabela 4 constam os resultados das demais variáveis.

Tabela 1. Resumo das alterações na curva de variação sazonal.

		<i>Pré/Pós (Geral)</i>	<i>Seca</i>	<i>Média</i>	<i>Muito úmida</i>
Vazão mensal		(%)	(%)	(%)	(%)
Média	Dezembro a maio	- 27	- 33	- 27	- 17
Máximo		- 33	- 46	- 45	- 24
σ		- 6	- 15	- 26	- 8,4
Média	Outubro,	+ 33	+ 38	+ 39	+ 30
Máximo	Novembro,	+ 59	+ 69	+ 70	+ 70
σ	Junho a setembro	+ 23	+ 23	+ 26	+ 28

Obs. Sinal (-) indica redução e (+) aumento da vazão.

Tabela 2. Resumo das demais alterações hidrológicas – Método do IHA e *CHid*.

		<i>Qmin</i>	<i>Qmax</i>	<i>Dia</i>	<i>Dia</i>	<i>Dur.</i>	<i>Dur.</i>	<i>Taxa</i>	<i>Taxa</i>	<i>Reversões</i>
		(<i>m³/s</i>)	(<i>m³/s</i>)	<i>Qmin</i>	<i>Qmax</i>	<i>Pulso</i>	<i>Pulso</i>	<i>Cresc.</i>	<i>Decresc.</i>	(<i>nº</i>)
						<i>Qmin</i>	<i>Qmax</i>	(<i>m³/s/dia</i>)	(<i>m³/s/dia</i>)	
<i>Pré e</i>	%	+ 42	- 29	- 32	- 17	- 100	- 2	+ 6	+ 167	+ 186
<i>Pós</i>	Magnitude	+ 494	- 2082	- 88	- 11	- 26	- 1	+ 6	46	+ 89
<i>CHid</i>	%	+ 55	- 50	- 37	+ 1088	- 100	- 60	- 4	+ 55	+ 129
<i>Seca</i>	Magnitude	+ 516	- 2545	- 95	+ 283	- 24	- 25	- 4	35	+ 75
<i>CHid</i>	%	+ 45	- 7	- 43	- 26	- 100	- 35	+ 31	+ 108	+ 192
<i>Média</i>	Magnitude	+ 536	- 431	- 122	- 20	- 18	- 16	+ 28	66	+ 85
<i>CHid</i>	%	+ 43	- 18	- 2	- 23	- 97	- 48	- 4	+ 49	+ 428
<i>Muito úmida</i>	Magnitude	+ 616	- 2193	- 6	- 21	- 43,5	- 29	- 5	39	+ 117

Obs. Sinal (-) indica redução e (+) aumento do valor da variável. Durações em *dias*.

O resumo das alterações dos parâmetros hidrológicos descritos anteriormente, sintetizados na Tabela 3 e na Tabela 4, permitiu destacar que:

- o Proporcionalmente, as vazões máximas foram mais afetadas nos eventos da *CHid* Seca;

- Proporcionalmente, o dia de ocorrência da vazão mínima foi grandemente antecipada nos eventos da *CHid Seca e Média*;
- Proporcionalmente, o dia de ocorrência da vazão máxima foi fortemente atrasada nos eventos da *CHid Seca*;
- Os pulsos de vazões mínimas deixaram de existir;
- Proporcionalmente, a duração do pulso de vazão máxima foi mais modificado nos eventos da *CHid Seca e Muito úmida*;
- Proporcionalmente, a taxa de crescimento das vazões na ascensão do hidrograma foi acentuada nos eventos da *CHid Média*;
- A taxa de decréscimo das vazões no ramo de recessão do hidrograma foi acentuada em todas as classes da *CHid*, reduzindo a duração das cheias;
- Proporcionalmente, o número de reversões cresceu a medida que os eventos são de classe de *CHid* mais elevada, ou seja, de maior vazão média anual.

4 CONCLUSÕES

A análise da variabilidade hidrológica através do método de classificação da *CHid* permitiu identificar alterações nas vazões médias anuais no baixo curso do RSF de forma mais fiel ao efeito causal dos usos, em especial pelas UHEs, sem confundir eventos de condições hídrico-climáticas distintas. As principais alterações hidrológicas apontadas pelo método do IHA foram (Tabela 3 e Tabela 4):

- a) O aumento das vazões mínimas;
- b) A redução das vazões máximas;
- c) A antecipação do dia de ocorrência da vazão mínima e máxima;
- d) A eliminação dos pulsos de vazão mínima;
- e) O aumento da taxa de crescimento das vazões na ascensão do hidrograma;
- f) O aumento da taxa de decréscimo das vazões na recessão do hidrograma;
- g) O aumento do número de reversões das vazões.

Ainda pelo método do IHA, quando considerado o método de classificação da *CHid* (Tabela 4), destacou-se que:

- As vazões máximas foram mais afetadas nos eventos da *CHid Seca*;
- O dia de ocorrência da vazão mínima foi grandemente antecipada nos eventos da *CHid Seca e Média*;
- O dia de ocorrência da vazão máxima foi fortemente atrasada nos eventos da *CHid Seca*;
- Os pulsos de vazões mínimas deixaram de existir;

- A duração do pulso de vazão máxima foi mais modificada nos eventos da *CHid Seca* e *Muito úmida*;
- A taxa de crescimento das vazões na ascensão do hidrograma foi acentuada nos eventos da *CHid Média*;
- A taxa de decréscimo das vazões no ramo de recessão do hidrograma foi acentuada em todas as classes da *CHid*, reduzindo a duração das cheias;
- O número de reversões cresceu a medida que os eventos são de classe de *CHid* mais elevada, ou seja, de maior vazão média anual.

A análise da curva de permanência para as classes da *CHid* permitiu verificar que:

- Independentemente da classe, houve aumento nas vazões de maior permanência (efeito de regularização);
- Nas vazões dos anos da *CHid Média* e *CHid Seca*, principalmente, houve completa alteração da curva de permanência, com redução das vazões de menor permanência e elevação das vazões de maior permanência, tornando-as quase monótonas.
- Nas vazões dos anos da *CHid Muito úmida* as alterações nas vazões de menor permanência (vazões de cheia) foram menos marcantes.

Além dos aspectos já descritos, a análise da curva de variação sazonal das vazões para as classes da *CHid* (Tabela 3) apontou que:

- A redução das vazões nos meses do período de cheia no baixo curso do RSF (dezembro a maio);
- O aumento das vazões nos meses do período de estiagem no baixo curso do RSF (outubro e novembro e de junho a setembro);
- A eliminação da variação sazonal nos eventos da classe *CHid Seca*;
- Menor alteração nos eventos da classe *CHid Muito úmida*.

É importante destacar que no período de 1979 a 1985 ocorreram todos os eventos da classe *CHid Muito úmida* e, portanto, têm somente interferência da UHE Moxotó (1975) e Sobradinho (1978). Por outro lado, de 1987 a 2006 houve uma seqüência de anos da classe *CHid Seca* (todos os 12 desde 1979) intercalados com anos da classe *CHid Média* (7 anos) e um ano da classe *CHid Úmida*, ao mesmo tempo que o conjunto das UHEs do Sistema CHESF foi ampliado, com a operação das UHEs Itaparica e Xingó iniciadas em 1988 e 1994, respectivamente. Desta maneira, a operação dos reservatórios das UHEs no RSF, associada à ocorrência de anos de vazão média ou inferior entre 1988 e 2006, resultaram na acentuada alteração das vazões identificadas neste trabalho para a classe *CHid Seca*.

Tais resultados, descrevendo os padrões hidrológicos pré e pós-impacto representam condições de contorno e elementos para análises visando a definição de padrões fluviais que possam potencializar funções ecológicas e ambientais no trecho estudado, o que deverá ser considerado ao lado de outros fatores de ordem limnológica, biológica, geomorfológica, econômica, social e operacional.

AGRADECIMENTOS

Fernando Genz é bolsista CNPq/CT Energ. Os autores o apoio financeiro ao projeto de pesquisa intitulado “Considerando a Variabilidade Hidrológica na Definição das Vazões Ecológicas no Baixo Curso do Rio São Francisco” – CNPq/CT-ENERG e do projeto “Identificação de regime hidrológico compatível com objetivos ecológicos para o baixo curso do Rio São Francisco”, este parte da Rede ECOVAZÃO (“Rede de Estudo do Regime de Vazões Ecológicas para o Baixo Curso do Rio São Francisco: uma Abordagem Multicriterial”) - Edital CNPq/CT-HIDRO 045/2006.

BIBLIOGRAFIA

GENZ, F., LUZ, L.D. (2007). *Metodologia para considerar a variabilidade hidrológica na definição do regime natural de vazões no baixo curso do rio São Francisco*. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. São Paulo/SP.

GENZ, F., LUZ, L.D. (2008). *Considerando a variabilidade hidrológica na avaliação das alterações na curva de permanência das vazões no baixo curso do rio São Francisco*. IX Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Salvador/BA.

LUZ, L.D., AMORIM, F.B., LUZ, J.A.G. (2006). *Alterações Hidrológicas no Baixo Trecho do Rio São Francisco e Aspectos Ecológicos – Elementos para Definição de Vazões Ecológicas*. VIII Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Fortaleza/CE.

PRUSKI, F.F., PEREIRA, S.B., NOVAES, L.F., DA SILVA, D.D. RAMOS, M.M. (2003). *Comportamento hidrológico na estação Juazeiro antes e após a construção da hidrelétrica de Sobradinho*. XV Simpósio Brasileiro de Recursos. Curitiba/PR.

RICHTER, B.D., BAUMGARTNER, J.V., POWELL, J., BRAUN, D.P. 1996. *A Method for Assessing Hydrologic Alteration within Ecosystems*. Conservation Biology, 10, n. 4, 1163-1174.

RICHTER, B.D., BAUMGARTNER, J.V., WIGINGTON, R., BRAUM, D.P. 1997. *How much water does a river need?*. Freshwater Biology, 37, 231-249.

RICHTER, B. 1999. *Characterizing Hydrologic Regimes in Ecologically Meaningful Terms*. Stream Systems Technology Center. United States Department of Agriculture - Forest Service. Stream Notes, January. (<http://www.stream.fs.fed.us/news/>).