

# AVALIAÇÃO DA INFLUÊNCIA DO SISTEMA CANTAREIRA NA BACIA DO RIO PIRACICABA ATRAVÉS DA ANÁLISE DE COMPLEXIDADE

Lázaro Souto ARAÚJO<sup>1,2</sup>  
José Rodrigo S. SANTOS<sup>1,3</sup>  
Moacyr CUNHA FILHO<sup>1</sup>  
Borko D. STOSIC<sup>1</sup>  
Tatijana STOSIC<sup>1</sup>

- RESUMO: Neste artigo aplicamos os métodos Sample Entropy, Cross-Sample Entropy e Multiscale Sample Entropy para análise de complexidade das séries temporais diárias de vazão e de precipitação, nas localizações geográficas mais próximas dos reservatórios do Sistema Cantareira. Este sistema foi construído nas décadas de 1970 e 1980 para reversão interbacias de  $31m^3s^{-1}$  para abastecimento da região metropolitana de São Paulo (RMSP). Os estudos anteriores baseados na análise estatística das séries temporais mensais de vazão e precipitação no período de 1947 a 1991 revelaram a tendência crescente da precipitação anual para toda a bacia e a tendência decrescente da vazão para localizações próximas aos reservatórios. O objetivo geral deste artigo foi avaliar através de métodos da análise dos sistemas complexos a influência do sistema Cantareira na dinâmica de processos hidrológicos da bacia do rio Piracicaba. Os resultados mostraram que depois da construção dos reservatórios a complexidade das séries de vazão foi alterada, enquanto que na dinâmica da precipitação não se observou o mesmo comportamento, indicando a influência dos reservatórios.
- PALAVRAS-CHAVE: Vazão; precipitação; Sample Entropy; Cross-Sample Entropy; Multiscale Sample Entropy.

## 1 Introdução

O uso sustentável dos recursos hídricos e sua conservação é um dos principais desafios do século XXI, na busca do desenvolvimento econômico e social de uma região. Estes recursos são influenciados pelos vários fatores naturais e antropogênicos e representam tipicamente sistemas complexos caracterizados por um grande número de componentes que interagem de forma não linear em uma escala e produzem as

---

<sup>1</sup> Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE - Departamento de Estatística e Informática, PPGBEA, CEP: 52171-900 - Dois Irmãos, Recife, PE, Brasil. E-mail: [moacyr@deinfo.ufrpe.br](mailto:moacyr@deinfo.ufrpe.br); [borkostosic@gmail.com](mailto:borkostosic@gmail.com); [tastosic@gmail.com](mailto:tastosic@gmail.com)

<sup>2</sup> Universidade Federal da Paraíba - UFPB, Departamento de Ciências Fundamentais e Sociais, Campus II, CEP: 58397-000, Areia, PB, Brasil. E-mail: [lazaro.souto@hotmail.com](mailto:lazaro.souto@hotmail.com)

<sup>3</sup> Universidade Federal de Sergipe - UFS, Departamento de Estatística e Ciências Atuariais, CEP: 49100-000, São Cristóvão, SE, Brasil. E-mail: [rodrigo.ufs@gmail.com](mailto:rodrigo.ufs@gmail.com)

propriedades emergentes em outra escala. Para estudar estas propriedades vários conceitos e métodos foram desenvolvidos: fractais, multifractais, redes complexas, criticalidade auto-organizada, dinâmica não linear, automata celulares e teoria da informação (Bak, 1996; Mandelbrot, 1983; Hoekstra et al., 2010; Barrat et al., 2008).

Recentemente várias medidas de entropia baseadas na teoria da informação foram usadas para descrever irregularidades e as taxas de propagação de informação em séries temporais de vazão e precipitação e mostraram se eficientes para detecção das alterações causadas pela atividade humana (Li & Zhang, 2008; Huang et al., 2011; Zhang et al., 2012; Zhou et al., 2012).

As principais causas de degradação da qualidade e da quantidade dos recursos hídricos da bacia do rio Piracicaba são o aumento do consumo de água e das cargas de esgotos urbano e agroindustrial, as mudanças no uso da terra e a transferência de água interbacias (Moraes et al., 1998; Krusche, et al., 1997; Martinelli, et al., 1999).

Uma das intervenções antrópicas de maior impacto sobre o comportamento da vazão foi à construção de quatro reservatórios do sistema Cantareira, localizados nas cabeceiras dos rios Jaguari, Jacareí, Atibainha e Cachoeira. Os reservatórios são interligados por túneis e canais responsáveis pela reversão interbacias de  $31\text{m}^3\text{s}^{-1}$  para abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). Este sistema entrou em operação em 1975 nos rios Atibainha e Cachoeira e em 1982 nos rios Jaguari e Jacareí (Moraes et al., 1998).

Os resultados de Groppo et al. (2009) mostraram uma diminuição sensível das vazões máximas e vazões mínimas nos rios Atibaia e Jaguari após o início das operações. Já no rio Piracicaba, mais distante das barragens, houve um aumento nas vazões máximas.

Os resultados semelhantes foram obtidos nos estudos das séries temporais de precipitação e de vazão em algumas bacias do Estado de São Paulo com diferentes graus de intervenções antrópicas (Groppo et al., 2005; Groppo et al., 2001).

A análise estatística das séries temporais de precipitação e vazão no período de 1947 a 1991 revelou uma tendência crescente da precipitação anual para toda bacia e a tendência decrescente da vazão em locais próximos aos reservatórios (Moraes et al., 1998). Recentemente uma análise multifractal das séries temporais diárias de vazão e de precipitação registradas nestas localizações revelou que depois da construção dos reservatórios a dinâmica da vazão foi alterada em diferentes escalas temporais (Araújo et al., 2014).

Assim analisamos a dinâmica de vazão e de precipitação da bacia do rio Piracicaba antes e depois da instalação do sistema Cantareira. Aplicamos os métodos Sample Entropy (SampEn) (Richman & Moorman, 2000), Cross-Sample Entropy (Cross-SampEn) (Richman & Moorman, 2000) e Multiscale Sample Entropy (MSE) (Costa et al., 2002) nas séries temporais de vazão e de precipitação investigando se a complexidade dos processos hidrológicos da bacia do rio Piracicaba foi alterada com a construção do sistema Cantareira.

## 2 Material e métodos

Foram analisadas as séries temporais diárias de vazão e de precipitação obtidas das estações meteorológicas localizadas na bacia do rio Atibaia, que é sub-bacia do rio Piracicaba. As estações foram escolhidas por serem mais próximas dos reservatórios do sistema Cantareira. Este sistema inclui reservatórios na sub-bacia do rio Atibaia

(construídos no período de 1968 a 1974, nos rios Cachoeira e Atibainha) (Moraes et al., 1998). As estações escolhidas foram: 3D-006 (fluviométrica) e D3-002 (pluviométrica) (Figura 1). Estas estações foram selecionadas por possuírem séries históricas de vazão e de precipitação simultâneas e pela proximidade do reservatório.

A bacia do rio Piracicaba (12.400 km<sup>2</sup>), está localizada no Sudeste do Estado de São Paulo, uma região com aproximadamente 3.000.000 de habitantes e com um crescimento agroindustrial maior que a média do país. Está localizada entre os paralelos 22°00'S e 23°30'S e os meridianos 46°00'O e 48°30'O (Moraes et al., 1998).

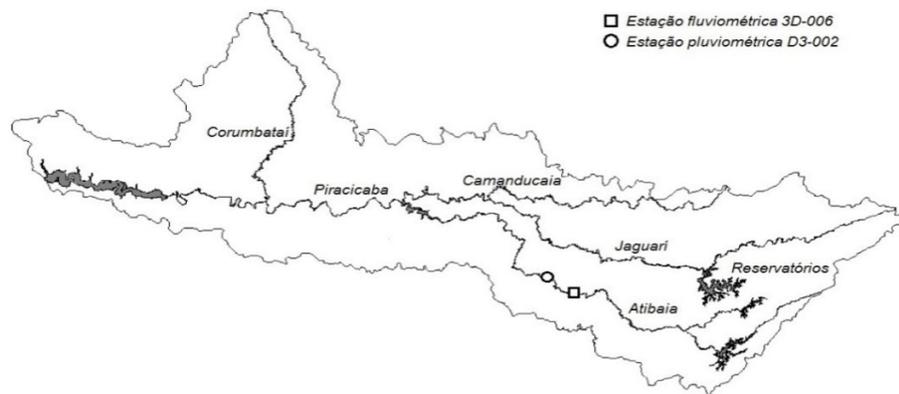


Figura 1 - Posição das estações fluviométrica e pluviométrica estudada neste trabalho, na Bacia do rio Piracicaba, junto com os principais tributários e reservatórios do sistema Cantareira.

Para cada estação foram analisadas séries temporais simultâneas de vazão e de precipitação representando os períodos antes (1961-1967) e depois (1975-1981) da construção dos reservatórios. Como desejamos avaliar o grau de sincronização das séries históricas, fez-se necessário que ambas as séries apresentassem o mesmo tamanho. A falta dessas informações para períodos anteriores a 1961 limitou nossa janela de análise para o intervalo de 6 anos antes a após as obras.

Os dados foram obtidos do Portal do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), que disponibiliza os dados históricos de vazão e de precipitação para o estado de São Paulo, no site <http://www.daae.sp.gov.br/>.

Para diminuir a influência da sazonalidade das séries diárias analisamos as séries temporais das anomalias da vazão  $\tilde{V}_i = (V_i - \langle V_i \rangle) / \sigma_{V_i}$  e da precipitação  $\tilde{P}_i = (P_i - \langle P_i \rangle) / \sigma_{P_i}$ , onde  $\langle V_i \rangle$ ,  $\langle P_i \rangle$  e  $\sigma_{V_i}$ ,  $\sigma_{P_i}$ , são os valores médios e o desvio padrão dos dados registrados no dia calendário (anual) (Kantelhardt et al., 2006).

Todas as análises foram feitas no software Microsoft Visual Studio 6.0. Para o Sample Entropy é disponível um código aberto, em linguagem C, para sua aplicação. Este código foi desenvolvido por Lake et al. (2013) e pode ser obtido através do endereço eletrônico <http://www.physionet.org/physiotools/sampen/c/>. A partir deste código foi possível realizarmos todas as modificações necessárias para sua adequação para aplicação do Cross Sample Entropy e do Multiscale Sample Entropy.

## 2.1 SampleEntropy (SampEn)

Sample Entropy (SampEn) introduzida por (Richman & Moorman, 2000) é definida como sendo o logaritmo natural da probabilidade condicional de que duas sequências similares (dentro de um nível de tolerância  $r$ ) para  $m$  pontos, permanecem similares para  $m + 1$  pontos.

Seja  $X(1), \dots, X(N)$  uma série temporal de tamanho  $N$ , o algoritmo de  $SampEn(m, r, N)$  é descrito como:

- i. Construir  $N - m$  vetores de tamanho  $m$ :

$$x(i) = [x(i), x(i + 1), \dots, x(i + m - 1)]; \quad i = 1, \dots, N - m + 1; \quad (1)$$

- ii. Definir a distância  $d_m$  entre os vetores  $x(i)$  e  $x(j)$ :

$$d_m[x(i), x(j)] = \max_{k=0, m-1} [|x(i + k) - x(j + k)|]; \quad (2)$$

- iii. Para cada  $i = 1, \dots, N - m$ , calcular:

$$B_i^m(r) = \frac{B_i}{(N - m - 1)}; \quad e \quad A_i^m(r) = \frac{A_i}{(N - m)}, \quad (3)$$

onde  $d_m[x(i), x(j)] \leq r$ , sendo:  $B_i$ - o número dos vetores  $x(j)$  de tamanho  $m$  que são similares aos vetores  $x(i)$  dentro da distância  $r$ ;  $A_i$ - o número dos vetores  $x(j)$  de tamanho  $(m + 1)$  que são similares aos vetores  $x(i)$  dentro da distância  $r$ ;

- i. Calcular:

$$B^m(r) = \frac{1}{N - m} \left( \sum_{i=1}^{N-m} B_i^m(r) \right); \quad e \quad (4)$$

$$A^m(r) = \frac{1}{N - m} \left( \sum_{i=1}^{N-m} A_i^m(r) \right),$$

onde:  $B^m(r)$  - probabilidade de dois vetores serem similares para  $m$  pontos;  $A^m(r)$  - probabilidade de dois vetores serem similares para  $(m + 1)$  pontos;

- ii. Por fim, calcular o índice Sample Entropy:

$$SampEn(m, r, N) = -\ln \left( \frac{A^m(r)}{B^m(r)} \right), \quad (5)$$

que representa a probabilidade condicional de duas sequências que são similares para  $m$  pontos permanecem similares para  $m + 1$  pontos (quando um dado consecutivo é adicionado).

Este método serve para quantificar a complexidade em séries temporais não lineares, e foi usado em análise de processos fisiológicos (Tang et al., 2004) e séries climáticas

(Shuangcheng et al., 2006). Uma maior complexidade (menor regularidade) da série temporal gera o valor do SampEn mais alto (Richman & Moorman, 2000).

## 2.2 Cross - Sample Entropy (Cross -SampEn)

Cross - Sample Entropy é uma técnica que avalia o grau de sincronização entre duas séries temporais simultâneas (Richman & Moorman, 2000), e foi utilizada em séries temporais fisiológicas (Xie et al., 2010) e financeiras (Liu et al., 2011).

Seja  $u = (u(1), u(2), \dots, u(N))$  e  $v = (v(1), v(2), \dots, v(N))$  duas séries temporais de tamanho  $N$ . Fixando os parâmetros de entrada  $m$  e  $r$ , onde  $m$  é o comprimento de vetor a ser comparado e  $r$  o nível de tolerância, o algoritmo Cross-SampEn é dado a seguir:

- i. Constrói - se uma sequência de vetores:

$$\begin{aligned} x_m(i) &= (u(i), u(i+1), \dots, u(i+m-1)), & 1 \leq i \leq N-m \\ y_m(j) &= (v(j), v(j+1), \dots, v(j+m-1)), & 1 \leq j \leq N-m \end{aligned} \quad (6)$$

a partir de  $u$  e  $v$ , respectivamente;

- ii. Para cada  $i \leq N-m$ , calcula-se:

$$B_i^m(r)(v||u) = \frac{n^{\circ} \text{ de } 1 \leq j \leq N-m \text{ tal que } d[x_m(i), y_m(j)] \leq r}{N-m} \quad (7)$$

onde:  $d[x_m(i), y_m(j)] = \max\{|u(i+k) - v(j+k)|: 0 \leq k \leq m-1\}$  representa a diferença máxima de seus respectivos componentes escalares;

- iii. Em seguida define-se:

$$B^m(r)(v||u) = \frac{\sum_{i=1}^{N-m} B_i^m(r)(v||u)}{N-m} \quad (8)$$

que é o valor médio de  $B_i^m(r)(v||u)$ ;

- iv. Analogamente, define-se:

$$A_i^m(r)(v||u) = \frac{n^{\circ} \text{ de } 1 \leq j \leq N-m \text{ tal que } d[x_{m+1}(i), y_{m+1}(j)] \leq r}{N-m} \quad (9)$$

$$\text{e } A^m(r)(v||u) = \frac{\sum_{i=1}^{N-m} A_i^m(r)(v||u)}{N-m}$$

que é o valor médio de  $A_i^m(r)(v||u)$ ;

- v. Por fim, calcula-se o índice Cross-Sample Entropy

$$\text{Cross - SampEn}(m, r, N) = -\ln \left\{ \frac{A^m(r)(v||u)}{B^m(r)(v||u)} \right\} \quad (10)$$

Portanto, o Cross-SampEn pode ser usada como uma medida da correlação cruzada entre duas séries temporais simultâneas (Richman & Moorman, 2000).

### 2.3 Multiscale Sample Entropy (MSE)

Multiscale Sample Entropy (MSE) introduzida por Costa et al. (Costa et al., 2002), representa uma generalização do método Sample Entropy (SampEn) (Richman & Moorman, 2000) e serve para avaliar a complexidade da série temporal em diferentes escalas.

A implementação do método MSE exige primeiro a transformação da série original  $x(i), i = 1, \dots, N$  para outras escalas produzindo  $x^\tau(j), j = 1, \dots, N/\tau$  onde

$$x^\tau(j) = \frac{1}{\tau} \sum_{i=(j-1)\tau+1}^{j\tau} x(i), \quad (11)$$

sendo  $\tau$ - fator da escala.

Para cada série transformada calcula-se o valor de SampEn e constrói-se o gráfico SampEn versus o fator da escala  $\tau$ . Este método permite analisar a complexidade de diferentes componentes do processo estocástico (que operam nas escalas distintas), e pode servir para diferenciar entre as séries temporais geradas pelos sistemas diferentes ou pelo mesmo sistema em condições diferentes (Costa et al., 2002).

### 3 Resultados e discussão

As Figuras 2 e 3 representam os dados das séries originais da vazão e da precipitação da bacia do rio Atibaia antes e depois da construção dos reservatórios do sistema Cantareira. Nota-se uma clara sazonalidade nas séries, e uma relação entre as variáveis, onde observamos que os períodos com o aumento da vazão fluvial (Figura 2) coincidem com os períodos de aumento da precipitação (Figura 3) sob a bacia. Este comportamento se reflete em ambos os períodos estudados, antes e após a construção da barragem. Este grau de sincronia entre estas variáveis foi mensurado utilizando o método Cross-Sample Entropy, cujos resultados estão dispostos mais adiante.

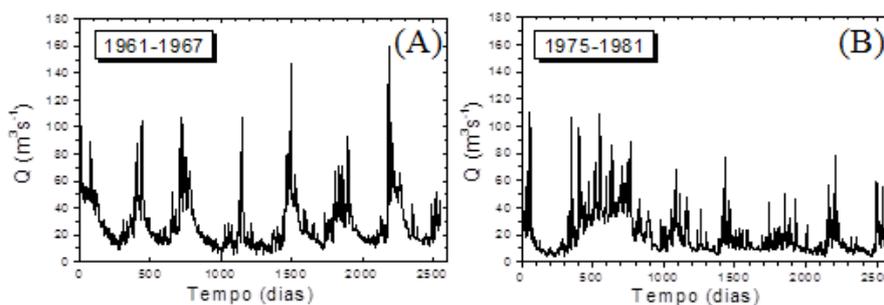


Figura 2 - Séries temporais de vazão (Q) do rio Atibaia (estação 3D-006) para os períodos de 1961 a 1967 (A) e de 1975 a 1981 (B).

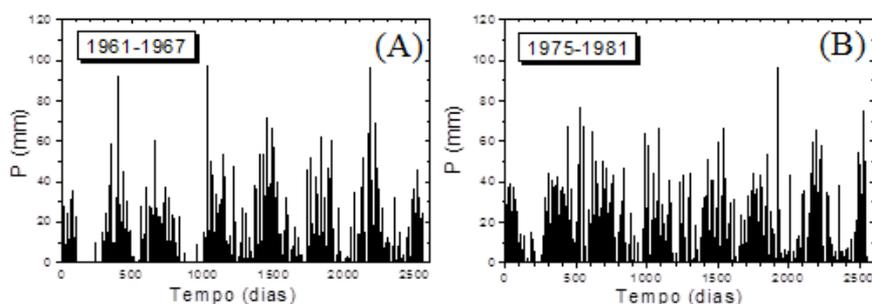


Figura 3 - Séries temporais da precipitação (P) da bacia do rio Atibaia (estação D3-002) para os períodos de 1961 a 1967 (A) e de 1975 a 1981 (B).

A estatística descritiva obtida referente às estações fluviométrica e pluviométrica antes e após a construção do sistema Cantareira está apresentada na Tabela 1.

Tabela 1 - Estatística descritiva dos dados fluviométricos 3D-006 ( $m^3s^{-1}$ ) e pluviométricos D3-002 (mm) da bacia do rio Atibaia

Estação	Amostra	Mínimo	Máximo	Média	D. Padrão
3D-006	61 - 67	4,2	160,4	28,9	19,4
	75 - 81	3,5	110,1	19,81	14,9
D3-002	61 - 67	0,0	96,8	3,5	9,3
	75 - 81	0,0	96,2	3,9	9,7

Pudemos observar que os valores médios, mínimos e máximos de vazão diminuíram depois da construção dos reservatórios. O valor médio da precipitação aumentou no mesmo período, enquanto não houve alteração no valor máximo de precipitação. A variabilidade de vazão também diminuiu após a construção dos reservatórios, enquanto a variabilidade da precipitação aumentou. Estes resultados indicaram que a construção do sistema Cantareira influenciou o regime hidrológico da bacia nos pontos investigados.

A Tabela 2 apresenta os resultados da análise de SampEn e Cross-SampEn para as séries temporais de anomalias de vazão e da precipitação da sub-bacia do rio Atibaia.

Tabela 2 - SampEn e Cross-SampEn ( $r = 0,15$ ) das séries temporais de vazão e precipitação da bacia do rio Atibaia

Estação	Período	SampEn	Cross-SampEn
3D-006	61 - 67	0,79	0,33*
	75 - 81	0,52	0,48**
D3-002	61 - 67	0,46	
	75 - 81	0,49	

\*3D-006/D3-002 (61-67)

\*\* 3D-006/D3-002 (75-81)

Observou-se a diminuição da complexidade da dinâmica da vazão depois da construção dos reservatórios (menor valor de SampEn), no entanto não houve alteração da complexidade da dinâmica da precipitação.

A sincronização entre vazão e precipitação diminuiu (maior valor de Cross-SampEn) depois da construção dos reservatórios.

As Figuras 4 e 5 denotam a aplicação do Multiscale Sample Entropy(MSE)de vazão e de precipitação da sub-bacia do rio Atibaia para os períodos antes e depois da construção dos reservatórios do sistema Cantareira.

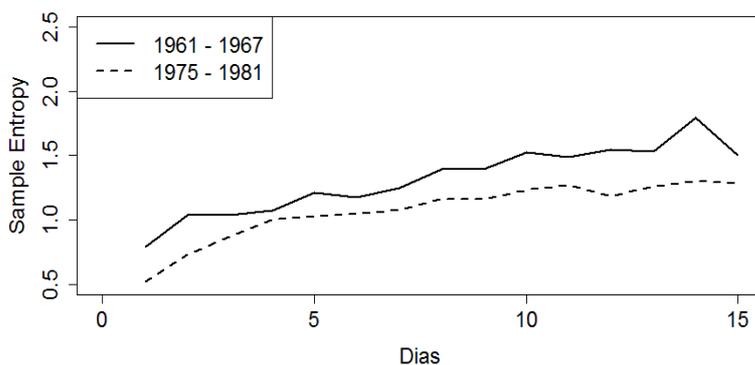


Figura 4 - MSE das séries temporais de vazão do rio Atibaia (estação3D-006) para os períodos de 1961 a 1967 e de 1975 a 1981.

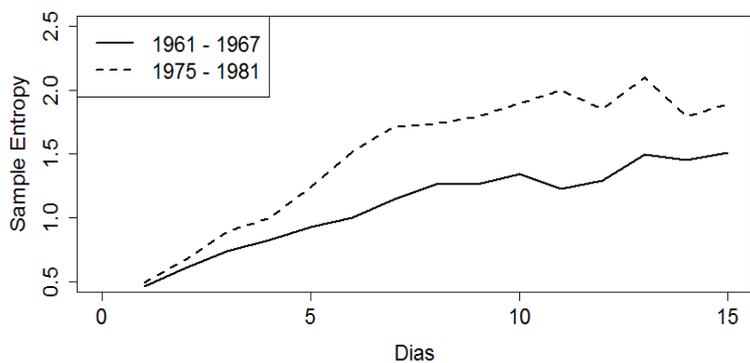


Figura 5 - MSE das séries temporais da precipitação da bacia do rio Atibaia (estação D3-002) para os períodos de 1961 a 1967 e de 1975 a 1981

Observou-se o aumento de complexidade (maior valor de SampEn) nas séries temporais de precipitação em escalas de até duas semanas enquanto para o mesmo intervalo de escala observou-se que diminuiu a complexidade (menor valor de SampEn) das séries temporais de vazão depois da construção dos reservatórios, indicando que a

alteração da dinâmica de vazão causada pela atividade humana pode afetar componentes do ecossistema que operam nestas escalas.

A Figura 6 do Multiscale Cross-Sample Entropy mostrou as alterações em sincronização entre vazão e precipitação, depois da construção dos reservatórios. Observou-se que depois da construção dos reservatórios a sincronização entre os dois processos diminui (maior valor de Cross-SampEn) nas escalas maiores de uma semana.

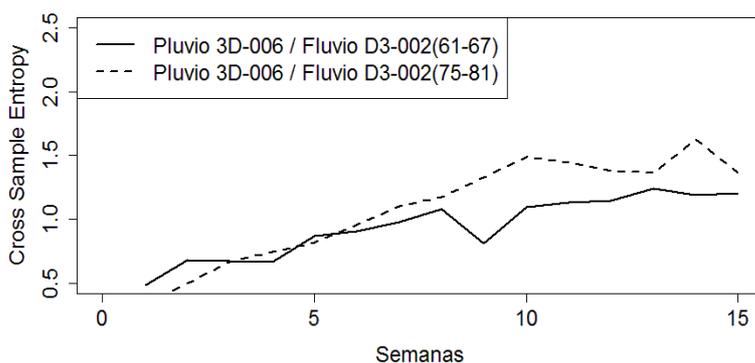


Figura 6 - Cross-MSE das séries temporais de vazão (estação 3D-006) e da precipitação (estação D3-002) do rio Atibaia para os períodos 1961-1967 e 1975-1981.

## Conclusão

Com base nestes resultados podemos concluir que a análise de complexidade pode ser útil em estudos de alterações da dinâmica da vazão de rios causadas pelas atividades humanas. Os métodos utilizados forneceram informações sobre o comportamento dinâmico dos processos hidrológicos nas diferentes escalas temporais, e assim podem contribuir na formação de uma base científica para avaliação e previsão das consequências ambientais em diferentes componentes do ecossistema relacionados à bacia hidrográfica.

ARAÚJO, L. S.; SANTOS, J. R. S.; CUNHA FILHO, M.; STOSIC, B. D.; STOSIC, T. Evaluation of the influence of Cantareira System on the Piracicaba river basin, using complexity analysis. *Rev. Bras. Biom.* São Paulo, v.33, n.3, p.403-413, 2015.

- **ABSTRACT:** *In this work we apply methods Sample Entropy, Cross-Sample Entropy and Multiscale Sample Entropy to analyze the complexity of stream flow and rainfall temporal series at locations that are close to the water reservoirs of Cantareira System. The Cantareira System was built in 70 ties and 80 ties to export  $31\text{m}^3\text{s}^{-1}$  from the basin to the metropolitan region of São Paulo city. Previous studies based on classical statistical analysis of monthly data for the period 1947 a 1991 showed the increasing tendency for rainfall for the whole basin and decreasing tendency for stream flow at locations that are close to the water reservoirs. The objective of this work is to evaluate the influence of Cantareira System on the dynamics of*

*hydrological processes in the Piracicaba river basin by applying the methods of complexity analysis. The results show that after the construction of water reservoirs the complexity of stream flow temporal series was altered, while the precipitation dynamics showed different behavior, indicating the influence of water reservoirs.*

- **KEYWORDS:** *Stream flow, rainfall; sample entropy; cross-sample entropy; multiscale sample entropy.*

## Referências

ARAÚJO, L. S.; FILHO, M. C.; STOSIC, B.; STOSIC, TATIJANA. Avaliação do impacto humano na dinâmica das variáveis hidrológicas da bacia do rio piracicaba através da análise multifractal. *Rev. Bras. Biometria*, São Paulo, v.32, n.1, p.170-179, 2014

BAK, P. How nature works: The science of self-organized criticality. New York, NY: Springer-Verlag, 1996, 175p.

BARRAT, A.; BARTHELEMY, M.; VESPIGNANI, A. Dynamical processes on complex networks. 1ª. ed. New York, NY: Cambridge University Press, 2008, 366p.

COSTA, M., GOLDBERGER, A. L.; PENG, C.-K. Multiscale entropy analysis for complex physiological time series. *Physical Review Letters*, v.89, n.6, p.68-102, 2002.

HOEKSTRA, A. G.; KROC, J.; SLOOT, P. M. A. Simulating complex systems by cellular automata. Springer, 2010, 384p.

HUANG, F.; XIA, Z.; ZHANG, N.; ZHANG, Y.; LI, J. Flow-complexity analysis of the upper reaches of the Yangtze River. *Journal of Hydrologic Engineering*, China v.16, p.914-919, 2011.

GROppo, J. D.; MORAES, J. M.; BEDUSCHI, C. E.; MARTINELLI, L. A. Análise de Séries Temporais de Vazão e Precipitação em Algumas Bacias do Estado de São Paulo com diferentes Graus de Intervenções Antrópicas. UNESP, *Geociências*, São Paulo, v. 24, n. 2, p. 181-193, 2005.

GROppo, J. D.; STENICO, A. C.; SALEMI, L. F.; BEDUSCHI, C. E.; TREVISAN, R. Análise do Efeito da Operação das Barragens do Sistema Cantareira no Regime Hidrológico do Rio Piracicaba. *RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, Porto Alegre, v.14, n.1, p. 41-51, 2009.

KANTELHARDT, J. W.; KONCCIELNY-BUNDE, E.; RYBSKI, D.; BRAUN, P.; BUNDE, A.; HAVLIN, S. Long-term persistence and multifractality of precipitation an driver run off records. *Journal of Geophysical Research*, v.111, D011106, 2006.

KRUSCHE, A. V.; CARVALHO, F. P.; MORAES, J. M.; CAMARGO, P. B.; BALLESTER, M. V.; HORNINK, S.; MARTINELLI, L. A.; VICTORIA, R. L. Spatial and temporal water quality variability in the Piracicaba river basin, Brazil. *Journal of the American Water Resources Association*, v. 33, 1117-1123, 1997.

LAKE, D. K.; MOORMAN, J. R.; HANQING, C. Sample Entropy estimation using sampen. Disponível em: <<http://physionet.org/physiotools/sampen/>>. Acesso em: dez de 2013.

LI, Z.; ZHANG, Y.-K. Multi-scale entropy analysis of Mississippi River flow. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, v. 22, 507-512, 2008.

- LIU, L. Z.; QIAN, X. Y.; LU, H. Y. Cross-sample entropy of foreign exchange time series. *Physica A*, v.389, p.4785-4792, 2011.
- MANDELBROT, B. The fractal geometry of nature. 1a.ed.Macmillan, 1983.
- MARTINELLI, L. A.; KRUSCHE, A. V.; VICTORIA, R. L.; CAMARGO, P. B.; BERNARDES, M.; FERRAZ, E. S.; MORAES, J. D. DE; BALLESTER, M. V. Effects of sewage on the chemical composition of Piracicaba River, Brazil. *Water, Air and Soil Pollution*, v.110, p.67-79, 1999.
- MORAES, J. M.; PELLEGRINO, G. O.; BALLESTER, M. V.; MARTINELLI, L. A.; VICTORIA, R. L. Trends in Hydrological Parameters of a Southern Brazilian Watershed and its Relation to Human Induced Changes. *Water Resources Management*, v.12, p.295-311, 1998.
- RICHMAN, J. S.; MOORMAN, J. R. Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy. *The American Journal of Physiology: Heart and Circulatory Physiology*, v. 278, p.2039-2049, 2000.
- SHUANGCHENG, L.; QIAOFU, Z., SHAOHONG, W.; ERFU, D. Measurement of climate complexity using sample entropy. *International Journal of Climatology*, v.26, p.2131-2139, 2006.
- TANG, X. J.; TIAN, X.; YANG, Z.; ZHANG, T. Complexity measurements of electroencephalograph recordings using sample entropy algorithm in patients with temporal lobe epilepsy. *Acta Biophysica Sinica*, v.20, p.382-392, 2004.
- XIE, H.-B.; GUO, J.-X.; ZHENG, Y.-P. A comparative study of pattern synchronization detection between neural signals using different cross-entropy measures. *Biological Cybernetics*, v.102, p.123-135, 2010.
- ZHANG, Q.; ZHOU, Y.; SINGH, V. P.; CHEN, X. The influence of dams and lakes on the Yangtze River stream flow: long-range correlations and complexity analysis. *Hydrological Processes*, v.26, p.436-444, 2012.
- ZHOU, Y.; ZHANG, Q.; LI, K.; CHEN, X. Hydrological effects on water reservoirs on hydrological processes in the East River (China) basin: Complexity evaluations based on the multi-scale entropy analysis. *Hydrological Processes, China* v.26, p.3253-3262, 2012.

Recebido em 06.04.2015

Aprovado após revisão em 07.06.2015