



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOMETRIA E ESTATÍSTICA APLICADA
NÍVEL DOUTORADO

**Avaliação do impacto humano na dinâmica das variáveis
hidrológicas da bacia do Rio Piracicaba através da análise multifractal
e análise de complexidade**

LÁZARO DE SOUTO ARAÚJO

Tese de Doutorado

RECIFE - PE

2013



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOMETRIA E ESTATÍSTICA APLICADA

LÁZARO DE SOUTO ARAÚJO

**Avaliação do impacto humano na dinâmica das variáveis
hidrológicas da bacia do Rio Piracicaba através da análise multifractal
e análise de complexidade**

Tese apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada do Departamento de Estatística e Informática da Universidade Federal Rural de Pernambuco como requisito parcial para obtenção do título de Doutor em Biometria e Estatística Aplicada.

Área de Concentração: Biometria e Estatística Aplicada

Orientadora: Prof^a. Dr^a. Tatijana Stosic

Co-orientador: Prof^o. Dr. Borko Stosic

RECIFE - PE

2013

Ficha catalográfica

A663a Araújo, Lázaro de Souto
Avaliação do impacto humano na dinâmica das variáveis
hidrológicas da bacia do rio Piracicaba através da análise
multifractal e análise de complexidade / Lázaro de Souto
Araújo. -- Recife, 2013.
97 f. : il.

Orientadora: Tatijana Stosic.

Tese (Doutorado em Biometria e Estatística Aplicada) –
Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento
de Estatística e Informática, Recife, 2013.

Referências.

1. Processos hidrológicos
 2. Análise multifractal
 3. Análise de complexidade
- I. Stosic, Tatijana, orientadora
II. Título

CDD 310

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DE PERNAMBUCO
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOMETRIA E ESTATÍSTICA APLICADA

LÁZARO DE SOUTO ARAÚJO

Tese sobre o título **AVALIAÇÃO DO IMPACTO HUMANO NA DINÂMICA DAS VARIÁVEIS HIDROLÓGICAS DA BACIA DO RIO PIRACICABA ATRAVÉS DA ANÁLISE MULTIFRACTAL E ANÁLISE DE COMPLEXIDADE** apresentada por Lázaro de Souto Araújo e aprovada em 30 de julho de 2013, Recife, Estado de Pernambuco pela banca examinadora constituída por:

Orientadora:

Prof^a. Dr^a. Tatijana Stosic
DEINFO - UFPRE

Banca Examinadora:

Prof^o. Dr. Borko Stosic
DEINFO - UFRPE

Prof^o. Dr. Moacyr Cunha Filho
DEINFO - UFRPE

Prof^o. Dr. Pedro Hugo de Figueirêdo
DF - UFRPE

Prof^o. Dr. Luiz Antônio Martinelli
CENA - USP

A MINHA FAMÍLIA...

Aos meus queridos pais João Pereira de Araújo e Antônia Gení de Souto Araújo, por contribuir na formação dos meus princípios e por me apoiar em todos os momentos da minha vida;

As minhas irmãs e irmão: M^a. Marta, M^a do Patrocínio, M^a Luzia, M^a do Socorro e Felipe Lavoisier aos meus sobrinhos, Matheus Gabriel, Vitória Maria e minhas afilhadas Brenda, Aliandra e a minha avó Gení pela amizade e por estar sempre presente na minha vida;

A minha esposa Maria José por estar sempre ao meu lado e por compreender os momentos em que estive ausente te amo muito;

DEDICO

AGRADECIMENTOS

Primeiramente gostaria de agradecer a Deus por estar sempre presente em todos os momentos da minha vida. A Mãe Rainha e Três vezes admirável de Schoenstatt e a Nossa Senhora da Medalha Milagrosa e ao meu Padrinho Cícero por estarem sempre ao meu lado, pela paciência em me ouvir durante toda minha caminhada. Muito obrigado.

Em especial a minha orientadora a Prof^a. Dr^a. Tatijana Stosic pela paciência, confiança, amizade e tempo dispensado, bem como pela atenção na realização desta tese. Meu muito obrigado.

Ao meu Co-orientador Prof^o. Dr. Borko Stosic, pela compreensão e paciência durante a execução desta tese.

Ao Prof^o. Dr. Luiz Antônio Martinelli por seu profissionalismo, colaboração e contribuição na execução desta tese. Meu muito obrigado.

Aos Professores da banca examinadora Prof^o. Dr. Moacyr, Prof^o. Dr. Pedro Hugo pela contribuição na melhoria desta tese.

Ao Prof^o. Dr. Eufrásio de Souza Santos, ex-coordenador e ex-professor do Programa de Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada por ter acreditado e ter conseguido com que fosse criado um curso de Doutorado em Estatística.

Ao Prof^o. Dr. Manoel Luiz Figueiroa pela amizade sincera e por seu exemplo de dedicação no desenvolvimento da Estatística na Universidade e no estado de Sergipe. Meu muito obrigado.

Ao Prof^o. Samuel por sua amizade, convivência e por seus conselhos sempre oportunos, meu muito obrigado.

Aos professores do curso de Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada nível Doutorado Prof^o. Dr. Cláudio Cristino, Prof^o. Dr. Moacyr Cunha, Prof^o. Dr. Borko Stosic, Prof^o. Phd. Aleixo, Prof^o. Dr. Tiago, e Prof^a. Dr^a. Tatijana Stosic, pelo apoio durante a minha permanência no doutorado.

Ao Prof^o. Dr. Moacyr Cunha, pela amizade e pelas palavras certas nas horas difíceis.

Ao Programa de Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada da Universidade Federal Rural de Pernambuco pela contribuição no meu crescimento intelectual e profissional.

A Universidade Federal de Sergipe.

A Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação da Universidade Federal de Sergipe pela compreensão na minha liberação para cursar o Doutorado.

Ao Departamento de Estatística e Ciências Atuariais e aos Professores do (DECAT) da Universidade Federal de Sergipe por minha liberação para cursar o Doutorado. Meu muito obrigado.

Aos meus colegas de doutorado, Erinaldo, Fábio, Filipe e Kléber, pela amizade e companheirismo durante minha permanência no curso.

Ao amigo, colega e ex-aluno Rodrigo pela amizade, compreensão e colaboração nesta tese. Meu muito obrigado.

Aos meus ex-alunos do curso de Bacharelado em Estatística da Universidade Federal de Sergipe. Meu muito obrigado.

Ao secretário do Programa de Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada, Marcos, pela paciência durante minha permanência no doutorado.

A minha família que sempre me acompanhou durante toda etapa da minha vida.

A minha avó Antônia Gení pela dedicação e força sempre presente em toda minha vida.

A minha tia Socorro Souto e família pela convivência durante todos os momentos da minha vida.

A Dona Paizinha e irmã Antônia pela confiança e amizade e por suas orações sempre guiando meus passos, muito obrigado.

Aos meus colegas Samuel, Rivelino, Dennis, Dejalma, Leda, Evelyn, Èrica e Diego pela amizade adquirida durante minha permanência no curso.

A todas as pessoas que direta ou indiretamente contribuíram para realização deste trabalho.

A CAPES Pró-Doutoral pelo apoio financeiro durante a execução dessa tese durante alguns semestres do curso. Muito obrigado.

“Confia ao Senhor a tua sorte, espera nele e ele agirá.”

(Sal 36:5)

RESUMO

O uso dos recursos naturais para atender as necessidades da geração atual sem comprometer a disponibilidade destes recursos para gerações futuras é um dos maiores desafios para ciência e para as políticas públicas nas primeiras décadas do século 21. Entre os recursos naturais os recursos hídricos são dos mais afetados pela atividade humana, pelo fato que o uso da água exige intervenções que podem alterar o regime natural dos processos hidrológicos nas diferentes escalas temporais e espaciais. Estas alterações podem afetar vários componentes dos ecossistemas relacionados aos sistemas hidrológicos com consequências cada vez mais sérias e menos previsíveis. Para estabelecer políticas públicas eficientes para proteção do meio ambiente é necessário desenvolver métodos matemáticos que possam fornecer as informações sobre as interações entre os componentes dos sistemas hidrológicos em diferentes escalas espaciais e temporais, relevantes para os ecossistemas correspondentes. Recentemente, a análise multifractal e a análise de complexidade (baseada na teoria da informação) foram aplicadas para avaliar os efeitos da atividade humana nos processos hidrológicos e mostraram-se adequadas para detectar as alterações nas dinâmicas destes processos nas diferentes escalas temporais e espaciais. Nesta tese avaliaram-se as alterações nos processos hidrológicos da bacia do rio Piracicaba causada pela construção dos reservatórios do Sistema Cantareira. Este sistema foi construído nas décadas de 60 e 70 para reversão interbacias de 31 ou 33 m^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 1947-1991 revelaram a tendência crescente da precipitação anual para toda bacia e a tendência decrescente da vazão para localizações próximas aos reservatórios. Para providenciar as informações mais detalhadas sobre a influência do sistema Cantareira na dinâmica de processos hidrológicos da bacia do rio Piracicaba, utilizaram-se os métodos *Multifractal detrended fluctuation analysis (MF-DFA)* e *Multifractal detrended cross-correlation analysis (MF-DXA)* para análise multifractal e os métodos *Sample entropy (SampEn)*, *Cross-sample entropy (Cross-SampEn)* e *Multiscale sample entropy (MSE)* para análise de complexidade das séries temporais diárias de vazão e de precipitação, nas localizações geográficas mais próximas dos reservatórios. Os resultados mostraram que a dinâmica da vazão foi alterada depois da construção dos reservatórios, enquanto

que não se observou a alteração correspondente na dinâmica de precipitação, indicando que a dinâmica da vazão foi afetada pela atividade humana e não pelos fatores naturais. Estes resultados também providenciaram as informações sobre o comportamento dinâmico dos processos hidrológicos em diferentes escalas temporais, que são importantes para avaliação e previsão das consequências ambientais em diferentes componentes do ecossistema e para o desenvolvimento dos modelos matemáticos e simulações computacionais que podem servir para análise dos cenários futuros.

Palavras-chave: Processos hidrológicos, Análise multifractal, Análise de complexidade.

ABSTRACT

The use of natural resources to meet necessities of generation and preserve the quantity and quality of these resources for future generations is one of the major challenges for science and public policies in first decades of the 21st century. Among natural resources, hydric resources are among those most affected by human activities because the use of water requires interventions that can alter the natural regime of hydrological processes on different temporal and spatial scales. These alterations can affect various components of ecosystems that are related to hydrological systems, with increasingly serious and unpredictable consequences. To establish efficient public policies for environmental protection, it is necessary to develop mathematical methods that will provide information about the interactions between components of hydrological systems that operate on different temporal and spatial scales and that play a relevant role in corresponding ecosystems. Recently studies have implemented multifractal analysis and complexity analysis (based on information theory) to evaluate the effects of human activity on hydrological processes, and have shown potential for detecting alterations in dynamics of these processes on different temporal and spatial scales. In this work we evaluate alterations of hydrological processes in the Piracicaba River basin caused by the construction of the Cantareira system. This system, composed of a series of reservoirs connected by tunnels, was build during the 1960s and 1970s, to export approximately 31 or $33 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ from the Piracicaba river basin to the metropolitan region of Sao Paulo. Earlier studies based on statistical analysis of monthly temporal series of rainfall and stream flow for the period 1947-1991 found an increasing tendency for rainfall in the basin as a whole and a decreasing tendency for stream flow at certain locations within the basin that are close to the reservoirs. In order to get more information about the influence of the Cantareira system on hydrological processes in this basin, we analyze the multifractal properties of daily stream flow and rainfall temporal series using data recorded at locations close to the Cantareira reservoirs by applying *Multifractal detrended fluctuation analysis (MF-DFA)* and *Multifractal detrended cross-correlation analysis (MF-DXA)*. For complexity analysis we use three methods: *Sample entropy (SampEn)*, *Cross-sample entropy (Cross-SampEn)*, and *Multiscale entropy (MSE)*. We find an alteration of stream flow dynamics after the construction of the reservoirs, but do not observe a corresponding alteration in rainfall

dynamics. Considering that rainfall is the mayor natural factor that governs the stream flow regime, these results indicate that the stream flow dynamics were altered by human activities. Our results also provide new information's about the behavior of hydrological processes in the Piracicaba River basin on different temporal and spatial scales. Such information is important for evaluation and prediction of environmental impacts on different components of the ecosystem, and for the development of mathematical and computational models that simulate future scenarios.

Keywords: Hydrological processes, Multifractal analysis, Complexity analysis.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Bacia do rio Piracicaba, localização, principais tributários, estações fluviométricas, pluviométricas e esquema de reservatórios do sistema Cantareira. As estações fluviométricas utilizadas foram: 4(4D-001), 8(3D-009) na bacia do rio Jaguari e 5(4D-009), 7(3D-006) na bacia do rio Atibaia [28].....	6
Figura 2. Exemplo de um objeto fractal [2].	8
Figura 3. Fractal determinístico <i>Sierpinski Gasket</i> [47].....	9
Figura 4. Ilustração do método <i>MSE</i> : transformação da série original usando fator de escala $\tau = 2$ e $\tau = 3$. [107]. Corrigir o índice da escala 3 e colocar em português Pedro 29	
Figura 5. Análises <i>MSE</i> de séries simuladas de ruído branco e ruído $1/f$. Os parâmetros de <i>MSE</i> são: $m = 2$, $r = 0.15$, e $N = 30.000$ [107].....	30
Figura 6. 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).	34
Figura 7. Séries temporais da precipitação (P) do rio Atibaia (estação D3-002) para os períodos de 1961 a 1967 (a) e de 1975 a 1981 (b).	34
Figura 8. Séries temporais de vazão (Q) do rio Atibaia (estação 4D - 009) para os períodos de 1961 a 1967 (a) e de 1975 a 1981 (b).	35
Figura 9. Séries temporais da precipitação (P) do rio Atibaia (estação E3 - 017) para os períodos de 1961 a 1967 (a) e de 1975 a 1981(b).	35
Figura 10. Séries temporais de vazão (Q) do rio Jaguari (estação 3D - 009) para os períodos de 1967 a 1975 (a) e de 1985 a 1993 (b).	35
Figura 11. Séries temporais da precipitação (P) do rio Jaguari (estação D3 - 018) para os períodos de 1967 a 1975 (a) e de 1985 a 1993(b).....	36

Figura 12. Séries temporais de vazão (Q) do rio Jaguari (estação 4D - 001) para os períodos de 1967 a 1975 (a) e de 1985 a 1993(b).	36
Figura 13. Séries temporais da precipitação (P) do rio Jaguari (estação D4 - 052) para os períodos de 1967 a 1975 (a) e de 1985 a 1993 (b).	36
Figura 14. Séries temporais de anomalias de vazão (Q) do rio Atibaia (estação 3D - 006) para os períodos de 1961 a 1967 (a) e de 1975 a 1981 (b).	37
Figura 15. Séries temporais de anomalias da precipitação (P) do rio Atibaia (estação 3D - 002) para os períodos de 1961 a 1967 (a) e de 1975 a 1981 (b).	37
Figura 16. Séries temporais de anomalias de vazão (Q) do rio da bacia Atibaia (estação 4D - 009) para os períodos de 1961 a 1967 (a) e de 1975 a 1981 (b).	38
Figura 17. Séries temporais de anomalias da precipitação (P) do rio Atibaia (estação E3 - 017) para os períodos de 1961 a 1967 (a) e de 1975 a 1981 (b).	38
Figura 18. Séries temporais de anomalias da vazão (Q) do rio Jaguari (estação 3D - 009) para os períodos de 1967 a 1975 (a) e de 1985 a 1993 (b).	38
Figura 19. Séries temporais de anomalias da precipitação (P) do rio Jaguari (estação D3 - 018) para os períodos de 1967 a 1975 (a) e de 1985 a 1993 (b).	39
Figura 20. Séries temporais de anomalias da vazão (Q) do rio Jaguari (estação 4D - 001) para os períodos de 1967 a 1975 (a) e de 1985 a 1993 (b).	39
Figura 21. Séries temporais de anomalias da precipitação (P) do rio Jaguari (estação D4 - 052) para os períodos de 1967 a 1975 (a) e de 1985 a 1993 (b).	39
Figura 22. Expoente de <i>Hurst</i> generalizado $h(q)$ para vazão do rio Atibaia (estação 3D-006) para os períodos de 1961 a 1967 (◊) e de 1975 a 1981 (■).	41
Figura 23. Expoente de <i>Hurst</i> generalizado $h(q)$ para precipitação do rio Atibaia (estação D3-002) para os períodos de 1961 a 1967 (◊) e de 1975 a 1981 (■).	42

Figura 24. Expoente de <i>Hurst</i> generalizado $h(q)$ para vazão do rio Atibaia (estação 4D-009) para os períodos de 1961 a 1967 (◻) e de 1975 a 1981 (◼).....	42
Figura 25. Expoente de <i>Hurst</i> generalizado $h(q)$ para precipitação do rio Atibaia (estação E3-017) para os períodos de 1961 a 1967 (◻) e de 1975 a 1981 (◼).	43
Figura 26. Expoente de <i>Hurst</i> generalizado $h(q)$ para vazão do rio Jaguari (estação 3D-009) para os períodos de 1967 a 1975 (◻) e de 1985 a 1993 (◼)	43
Figura 27. Expoente de <i>Hurst</i> generalizado $h(q)$ para precipitação do rio Jaguari (estação D3-018) para os períodos de 1967 a 1975 (◻) e de 1985 a 1993 (◼).....	44
Figura 28. Expoente de <i>Hurst</i> generalizado $h(q)$ para vazão do rio Jaguari (estação 4D-001) para os períodos de 1967 a 1975 (◻) e de 1985 a 1993 (◼).....	44
Figura 29. Expoente de <i>Hurst</i> generalizado $h(q)$ para precipitação do rio Jaguari (estação D4-052) para os períodos de 1967 a 1975 (◻) e de 1985 a 1993 (◼).....	45
Figura 30. Expoente <i>Rényi</i> $\tau(q)$ para vazão do rio Atibaia (estação 3D-006) para os períodos de 1961 a 1967 (◻) e de 1975 a 1981 (◼).....	45
Figura 31. Expoente <i>Rényi</i> $\tau(q)$ para precipitação do rio Atibaia (estação D3-002) para os períodos de 1961 a 1967 (◻) e de 1975 a 1981 (◼).....	46
Figura 32. Expoente <i>Rényi</i> $\tau(q)$ para vazão do rio Atibaia (estação 4D - 009) para os períodos de 1961 a 1967 (◻) e de 1975 a 1981 (◼).....	46
Figura 33. Expoente <i>Rényi</i> $\tau(q)$ para precipitação do rio Atibaia (estação E3-017) para os períodos de 1961 a 1967 (◻) e de 1975 a 1981 (◼).	47
Figura 34. Expoente <i>Rényi</i> $\tau(q)$ para vazão do rio Jaguari (estação 3D - 009) para os períodos de 1967 a 1975 (◻) e de 1985 a 1993 (◼).....	47
Figura 35. Expoente <i>Rényi</i> $\tau(q)$ para precipitação do rio Jaguari (estação D3-018) para os períodos de 1967 a 1975 (◻) e de 1985 a 1993 (◼).	48

Figura 36. Expoente Rényi $\tau(q)$ para vazão do rio Jaguari (estação 4D - 001) para os períodos de 1967 a 1975 (◻) e de 1985 a 1993 (◼).	48
Figura 37. Expoente Rényi $\tau(q)$ para precipitação do rio Jaguari (estação D4 - 052) para os períodos de 1967 a 1975 (◻) e de 1985 a 1993 (◼).	49
Figura 38. Espectro multifractal $f(\alpha)$ de vazão da sub-bacia do rio Atibaia para as estações fluviométricas 3D-006 e 4D-009 para os períodos de 1961 a 1967 (◐) e de 1975 a 1981 (▲).	49
Figura 39. Espectro multifractal $f(\alpha)$ da precipitação da sub-bacia do rio Atibaia para as estações pluviométricas D3-002 e E3-017 para os períodos de 1961 a 1967 (◐) e de 1975 a 1981 (▲).	50
Figura 40. Espectro multifractal $f(\alpha)$ de vazão da sub-bacia rio Jaguari para as estações 3D-009 e 4D-001 para os períodos de 1967 a 1975 (◐) e de 1985 a (▲).	50
Figura 41. Espectro multifractal $f(\alpha)$ da precipitação da sub-bacia do rio Jaguari para as estações D3-018 e D4-052 para os períodos de 1967 a 1975 (◐) e de 1985 a 1993 (▲).	50
Figura 42. MSE das séries temporais de vazão do rio Atibaia (estação 3D - 006) para os períodos de 1961 a 1967 e de 1975 a 1981.	56
Figura 43. MSE das séries temporais da precipitação do rio Atibaia (estação D3 - 002) para os períodos de 1961 a 1967 e de 1975 a 1981.	57
Figura 44. MSE das séries temporais de vazão do rio Atibaia (estação 4D-009) para os períodos de 1961 a 1967 e de 1975 a 1981.	57
Figura 45. MSE das séries temporais da precipitação da bacia do rio Atibaia (estação E3 - 017) para os períodos de 1961 a 1967 e de 1975 a 1981.	58
Figura 46. MSE das séries temporais de vazão do rio Jaguari (estação 3D - 009) para os períodos de 1967 a 1975 e de 1985 a 1993.	58

Figura 47. <i>MSE</i> das séries temporais da precipitação do rio Jaguari (estação D3 - 018) para os períodos de 1967 a 1975 e de 1985 a 1993.....	59
Figura 48. <i>MSE</i> das séries temporais de vazão do rio Jaguari (estação 4D - 001) para os períodos de 1967 a 1975 e de 1985 a 1993.....	59
Figura 49. <i>MSE</i> das séries temporais da precipitação do rio Jaguari (estação pluviométrica D4 - 052) para os períodos de 1967 a 1975 e de 1985 a 1993 anos.....	60
Figura 50. <i>Cross-MSE</i> das séries temporais de vazão (estação 3D-006) e da precipitação (estação D3-002) do rio Atibaia para os períodos de 1961 a 1967 e de 1975 a 1981.	60
Figura 51. <i>Cross-MSE</i> das séries temporais de vazão (estação 4D-009) e da precipitação (estação E3-017) do rio Atibaia para os períodos de 1961 a 1967 e de 1975 a 1981.	61
Figura 52. <i>Cross-MSE</i> das séries temporais de vazão (estação 3D-009) e da precipitação (estação D3-018) do rio Jaguari para os períodos de 1967 a 1975 e de 1985 a 1993.	61
Figura 53. <i>Cross-MSE</i> das séries temporais de vazão (estação 4D-001) e da precipitação (estação D4-052) do rio Jaguari para os períodos de 1967 - 1975 e de 1985 - 1993.....	62
Figura 54. <i>MSE</i> das séries temporais de vazão do rio Atibaia (estação 3D - 006) para os períodos de 1953 a 1974 e de 1975 a 1997.....	62
Figura 55. <i>MSE</i> das séries temporais de vazão do rio Jaguari (estação 3D - 009) para os períodos de 1968 a 1981 e de 1984 a 1997.....	63
Figura 56. <i>Cross - MSE</i> das séries temporais de anomalias de vazão das estações dos rios Atibaia (3D-006) e Jaguari (3D - 009) para os períodos de 1968 a 1974 de 1975 a 1981 e de 1984 a 1990.....	63

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Dados das estações fluviométricas da bacia do rio Atibaia.....	32
Tabela 2. Dados das estações pluviométricas da bacia do rio Atibaia.	32
Tabela 3. Dados das estações fluviométricas da bacia do rio Jaguari.	32
Tabela 4. Dados das estações pluviométricas da bacia do rio Jaguari.....	32
Tabela 5. Estatística descritiva dos dados fluviométricos (m^3s^{-1}) da bacia do rio Atibaia.	40
Tabela 6. Estatística descritiva dos dados pluviométricos ($mm. dia^{-1}$) da bacia do rio Atibaia.	40
Tabela 7. Estatística descritiva dos dados fluviométricos (m^3s^{-1}) da bacia do rio Jaguari.....	40
Tabela 8. Estatística descritiva dos dados pluviométricos ($mm. dia^{-1}$) da bacia do rio Jaguari.....	40
Tabela 9. <i>MF-DFA</i> ($\Delta\alpha$) das séries temporais de vazão e de precipitação das bacias dos rios Atibaia e Jaguari.	51
Tabela 10. <i>MF-DFA</i> ($\Delta\alpha$) das séries temporais de vazão dos rios Atibaia e Jaguari. ...	52
Tabela 11. <i>MF-DXA</i> ($\Delta\alpha$) das séries temporais de vazão e de precipitação das bacias dos rios Atibaia e Jaguari.....	53
Tabela 12. <i>MF-DXA</i> ($\Delta\alpha$) das séries temporais de vazão dos rios Atibaia e Jaguari. ..	53
Tabela 13. <i>SampEn</i> e <i>Cross-SampEn</i> das séries temporais de vazão e da precipitação da bacia do rio Atibaia.....	54
Tabela 14. <i>SampEn</i> e <i>Cross-SampEn</i> das séries temporais de vazão e da precipitação da bacia do rio Jaguari.....	54
Tabela 15. <i>SampEn</i> das séries temporais das anomalias de vazão dos rios Atibaia e Jaguari.....	55
Tabela 16. <i>Cross-SampEn</i> das séries temporais de vazão das sub-bacias dos rios Atibaia e Jaguari.....	56

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO.....	1
2.	REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1.	BACIA HIDROGRÁFICA E PROCESSOS HIDROLÓGICOS.....	4
2.1.1.	Bacia Hidrográfica.....	4
2.1.2.	Processos hidrológicos	4
2.1.3.	Bacia do rio Piracicaba	6
2.2.	FRACTAIS E MULTIFRACTAIS	8
2.2.1.	Fractais	8
2.2.2.	Multifractais	12
2.2.3.	Análise multifractal	12
2.3.	PROCESSOS FRACTAIS	14
2.3.1.	Métodos de Análise de Correlações de Longo Alcance em Séries Temporais Fractais.....	15
2.4.	SÉRIES TEMPORAIS MULTIFRACTAIS	21
2.5.	ANÁLISE DE COMPLEXIDADE DAS SÉRIES TEMPORAIS	25
3.	MATERIAIS E MÉTODO	31
3.1.	Descrição dos dados	31
3.2.	Metodologia.....	32
4.	RESULTADOS E DISCUSSÃO	34
5.	CONCLUSÃO.....	64
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	67

1. INTRODUÇÃO

Nas últimas décadas nossa habilidade de tratar vários fenômenos em ciências ambientais aumentou significativamente devido ao aumento do poder computacional, que possibilitou o desenvolvimento e validação dos novos métodos de aquisição e análise de dados e modelos teóricos e computacionais que servem para descrição e previsão da dinâmica dos sistemas naturais e sociais. Por outro lado, a complexidade dos fenômenos ambientais está fortemente influenciada pela atividade humana, tendo como consequências as alterações em vários componentes do meio ambiente. As soluções eficientes dos problemas ambientais exigem um melhor entendimento dos fenômenos relacionados, tanto aos fenômenos naturais quanto aos fenômenos sociais e a interação entre ambos. Os sistemas ambientais representam tipicamente sistemas complexos caracterizados por um grande número de componentes que interagem de forma não linear em uma escala e produzem as propriedades emergentes em outra escala.

Além da emergência, os sistemas complexos apresentam auto-organização e possuem diferentes níveis hierárquicos. 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 [1-4].

De acordo com o Comitê de Pesquisas Ambientais da Fundação Nacional de Ciências dos Estados Unidos (NSF Advisory Committee for Environmental Research and Education) [5], entre os desafios das ciências ambientais nas primeiras décadas do século 21 estão: fragmentação da paisagem, recursos hídricos, propagação de patógenos, biodiversidade e dinâmica de ecossistemas, variabilidade e mudanças climáticas, ciclos biogeoquímicos, criação de novas tecnologias para proteção e melhoramento do meio ambiente e identificação das melhores práticas de estimar o risco e diminuir as consequências de desastres naturais.

A conservação dos recursos hídricos é um dos problemas mais importantes para o desenvolvimento sustentável de uma região. Estes recursos são diretamente influenciados pelos fatores naturais e antropogênicos e são caracterizados pelas interações múltiplas, ainda pouco entendidas, tornando os sistemas hídricos extremamente complexos. Para o estabelecimento de políticas públicas eficientes para proteção do meio ambiente é necessário desenvolver métodos matemáticos que possam

fornecer informações confiáveis sobre a dinâmica destes sistemas. Estas informações sobre os processos estocásticos que geram dados hidrológicos (precipitação e vazão) são cruciais para o desenvolvimento dos modelos matemáticos e simulações computacionais que servirão para análise dos cenários futuros.

Durante as últimas décadas a teoria multifractal [6] inicialmente desenvolvida para estudar flutuações de velocidade na turbulência [7,8] foi extensivamente utilizada para descrever e modelar a distribuição espacial e temporal das principais variáveis hidrológicas, precipitação pluvial e vazão fluvial dos rios [9-19]. Esta metodologia possibilita o estudo dos processos hidrológicos nas diferentes escalas, providenciando as informações necessárias para modelagem de vários fenômenos hidrológicos como inundações, erosão do solo, transporte dos poluentes e infiltração [20,21].

Os métodos alternativos para avaliar a variabilidade e complexidade dos processos hidrológicos são baseados em teoria da informação. Recentemente várias medidas de entropia foram usadas para descrever irregularidades e as taxas de propagação de informação em séries temporais de vazão e precipitação mostraram serem adequadas para detecção das alterações causadas pela atividade humana [22-25].

A bacia do rio Piracicaba está localizada no sudeste do Estado de São Paulo, uma região com crescimento populacional e agroindustrial maior que a média do país, com fortes evidências de degradação dos recursos hídricos em aspectos quantitativos e qualitativos. Estudos anteriores apontam como principais causas destas alterações o aumento do consumo de água e das cargas de esgotos urbanos e agroindustrial, as mudanças no uso da terra e a transferência de água interbacias [26,27,28].

Uma das intervenções antrópicas de maior impacto sobre o comportamento das variáveis hidrológicas da bacia (vazão) foi à construção de quatro reservatórios do sistema Cantareira, localizados nas cabeceiras dos rios Jaguari, Jacaré, Atibainha e Cachoeira. Estes reservatórios são interligados por túneis e canais e são responsáveis pela reversão interbacias de $31m^3s^{-1}$ 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 Jacaré [28]. A análise estatística das séries temporais de precipitação e vazão no período de 1947-1991 revelou a tendência crescente da precipitação anual para toda bacia (com dois subperíodos distintos de 1947-1968 e de 1969-1991 com o segundo subperíodo com tendência positiva) e a tendência decrescente da vazão em locais próximos aos reservatórios. A análise sazonal da

quantidade da chuva mostrou o aumento da precipitação durante o período de seca (junho até agosto) no período de 1969-1991, indicando uma fragmentação do período de seca que pode não ser quantificada utilizando os métodos clássicos da estatística. Para avaliar as alterações da dinâmica da vazão e precipitação da bacia do rio Piracicaba devido à construção dos reservatórios localizados nas cabeceiras dos rios Atibaia e Jaguari, foram aplicadas nesta tese duas metodologias de análise de sistemas complexos: análise multifractal e a análise de complexidade. Foram analisadas as subséries das séries históricas correspondente aos períodos antes e depois da construção dos reservatórios do sistema Cantareira.

O objetivo geral dessa tese é avaliar através de métodos da análise dos sistemas complexos, a influência da construção dos reservatórios do sistema Cantareira, na vazão dos rios Atibaia e Jaguari.

Os objetivos específicos foram:

- a) Aplicar os métodos *Multifractal Detrended Fluctuation Analysis (MF-DFA)* e *Multifractal Detrended Cross-Correlation Analysis (MF-DXA)* nas séries temporais de vazão e de precipitação verificando se os processos hidrológicos da bacia do rio Piracicaba possuem as características multifractais e se estas características foram alteradas com a construção do sistema Cantareira;
- b) Aplicar os métodos *Sample Entropy (SampEn)*, *Cross-Sample Entropy (Cross-SampEn)* e *Multiscale Sample Entropy (MSE)* 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. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. BACIA HIDROGRÁFICA E PROCESSOS HIDROLÓGICOS

2.1.1. Bacia Hidrográfica

A bacia hidrográfica representa uma área de captação natural da água pluvial que escoar para um único ponto de saída, seu exutório. Ela é composta por um conjunto de terras drenadas por um rio principal e seus afluentes, formada através dos desníveis dos terrenos que direcionam os cursos de água das regiões mais altas para as mais baixas. Uma bacia hidrográfica possui a organização hierárquica dos rios, principais e secundários, denominados afluentes e subafluentes, por ordem de volume crescente, que sempre vai das partes mais altas para as mais baixas. Cada bacia hidrográfica pode ser subdividida em suas sub-bacias representando as áreas de drenagem dos tributários do curso d'água principal, sendo que cada bacia hidrográfica interliga-se com outra de maior ordem hierárquica, constituindo, em relação à última, uma sub-bacia [29, 30]. Estas são as unidades básicas para a conservação e o manejo, como definido pela Lei nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997, que incorpora princípios e normas para a gestão de recursos hídricos. Estas normas são baseadas no fato que a característica ambiental de uma bacia reflete as relações de causa e efeito da dinâmica natural e ação humana ocorridas no conjunto das sub-bacias nela contidas, afetando a gestão ambiental como um todo. Assim a preservação e o manejo das bacias hidrográficas em seus aspectos físicos e bioquímicos representa um dos elementos principais considerados no planejamento de desenvolvimento sustentável de uma região.

O estudo das características físicas de uma bacia hidrográfica pode fornecer informações importantes para a prevenção ambiental, avaliações de riscos ambientais, avaliação do grau de degradação ambiental, e alterações em processos físicos e químicos.

2.1.2. Processos hidrológicos

Os processos hidrológicos de uma bacia hidrográfica dependem de suas características geomorfológicas (forma, relevo, área, geologia, rede de drenagem e

solo), do tipo da cobertura vegetal existente [31] e das ações antrópicas (como uso do solo, construção dos reservatórios e barragens) [32].

A vegetação tem papel fundamental no balanço de energia e no fluxo de água, por causa da interceptação da chuva que reduz a variação da vazão ao longo do ano, retarda e reduz os picos de cheias [29] e da influência sobre os processos de evaporação e de transpiração (evapotranspiração) que influem na quantidade da água precipitada que se transforma em vazão [34].

A precipitação é toda água proveniente da atmosfera que atinge a superfície terrestre, em suas diferentes formas tais, como: neblina, chuva, granizo, orvalho, geada e neve desta, a chuva é o tipo de precipitação mais importante para a hidrologia, devido a sua capacidade de produzir escoamento. Da quantidade de precipitação que atinge o solo, parte transforma-se em escoamento superficial, parte infiltra-se no solo. Parte da água que infiltra alimenta os reservatórios subterrâneos que irão alimentar os rios.

O conhecimento do processo de infiltração é de fundamental importância para o manejo e conservação da água e do solo por ser determinante para a quantidade de água da precipitação que escoam superficialmente e a quantidade de água que penetra no solo, incluindo a ocorrência de vários processos importantes para o ambiente como erosão e inundações [35].

Um solo argiloso, por exemplo, pode ter uma alta capacidade de infiltração quando estiver seco, no entanto, após receber umidade pode se tornar quase que impermeável [29].

Todos os fatores que influenciam a taxa de infiltração da água no solo interferem no escoamento superficial, além dos outros fatores como: agroclimáticos (intensidade e duração da precipitação, cobertura e os tipos de uso do solo, evapotranspiração), fisiográficos (área, declividade, e forma da bacia) [37]. A alteração do escoamento superficial tem como consequência a alteração em produção de sedimentos, que se constitui um grande problema no Brasil, onde são perdidos, a cada ano, 600 milhões de toneladas de solo agrícola [38].

O escoamento superficial pode ser gerado em toda superfície da bacia quando a capacidade de infiltração é menor que a precipitação e o escoamento sub-superficial escoam até o rio. Quando toda a precipitação se infiltra existem áreas da bacia onde não ocorre escoamento superficial, o escoamento sub-superficial é transportado através de macroporos, e pode aparecer na superfície através de fontes, produzindo escoamento superficial em conjunto com a precipitação local [39].

O planejamento da ocupação de uma bacia hidrográfica é de extrema importância diante das necessidades crescentes de uso da água em ambas as áreas urbanas e rurais. Tal planejamento requer um conhecimento amplo sobre as necessidades da população, os recursos terrestres e aquáticos disponíveis e sobre o comportamento dos processos naturais na bacia, para racionalmente compatibilizar necessidades crescentes com recursos limitados, garantindo o desenvolvimento sustentável.

2.1.3. Bacia do rio Piracicaba

A bacia hidrográfica do rio Piracicaba, possui uma área total de 12.568,72 km², sendo que, 11.442,82 km² encontram-se no estado de São Paulo, e 1.125,90 km² no estado de Minas Gerais. Está localizada entre os paralelos 22°00'S e 23°30'S e os meridianos 46°00'O e 48°30'O [28]. A localização geográfica da bacia do rio Piracicaba em relação ao estado de São Paulo está apresentada na Figura 1.

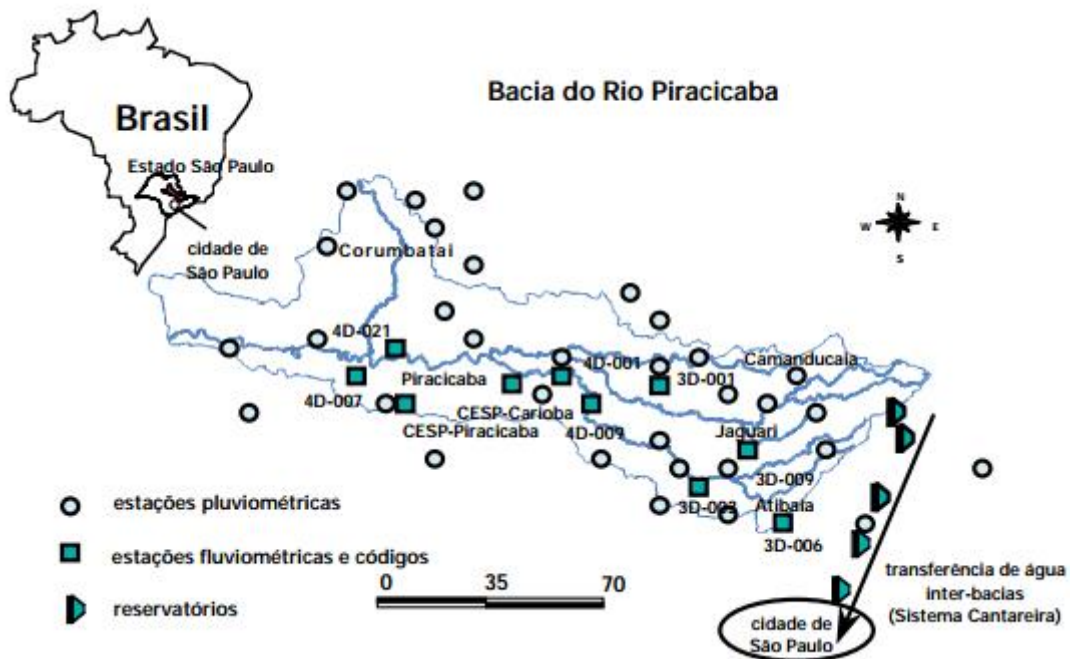


Figura 1. Bacia do rio Piracicaba, localização, principais tributários, estações fluviométricas, pluviométricas e esquema de reservatórios do sistema Cantareira. As estações fluviométricas utilizadas foram: 4(4D-001), 8(3D-009) na bacia do rio Jaguarí e 5(4D-009), 7(3D-006) na bacia do rio Atibaia [28].

O rio Piracicaba apresenta uma vazão média de $144,3 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ e vazão mínima de $35,7 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$, obtidas com base nos estudos de regionalização hidrológica feitos pelo DAEE (Departamento de Águas e Energia elétrica) em 1988 e 1994 e adaptados pelo Relatório de Situação dos Recursos Hídricos das Bacias dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí - 2002/2003 [40].

A bacia do rio Piracicaba faz parte da bacia do rio Tietê em sua porção média e está subdividida em cinco sub-bacias: Piracicaba ($3.700,79 \text{ km}^2$); Corumbataí ($1.679,19 \text{ km}^2$); Jaguari (3.290 km^2); Camanducaia (1.030 km^2); e Atibaia ($2.868,74 \text{ km}^2$). É constituída de 61 municípios, localizados nos estados de São Paulo e Minas Gerais, entre quais os dez municípios mais populosos, em ordem decrescente, são: Campinas, Piracicaba, Jundiaí, Limeira, Sumaré, Americana, Rio Claro, Hortolândia, Santa Bárbara d'Oeste e Indaiatuba [41].

A região da bacia do rio Piracicaba passou, desde a década de 1960, por intenso processo de urbanização, industrialização e mudança no uso da terra para produção agrícola, degradando seus recursos hídricos [42]. De acordo com o Relatório de Situação dos Recursos Hídricos 2007, a demanda de águas superficiais na bacia era de $31\text{m}^3\text{s}^{-1}$, com 44% para setor urbano, 37% para setor industrial e 19% para setor rural [43].

A bacia do rio Piracicaba também conta com uma peculiaridade muito importante, quando se trata da influência humana na disponibilidade hídrica: a presença do sistema Cantareira (Figura 1) que foi concebido na década de 1960 para atender a uma demanda crescente na Região Metropolitana de São Paulo (RMSP). Este sistema é constituído pelos reservatórios formados pelos barramentos nos rios Jaguari, Jacareí, Cachoeira e Atibainha, da bacia do rio Piracicaba, e pelo reservatório Paiva Castro, criado pelo barramento no rio Juqueri, da Bacia do Alto Tietê [40]. Dos $33 \times 31 \text{ m}^3\text{s}^{-1}$ produzidos pelo sistema, apenas $2\text{m}^3\text{s}^{-1}$ são produzidos na Bacia do Alto Tietê e $31\text{m}^3\text{s}^{-1}$ produzidos na Bacia do rio Piracicaba [43].

A quase totalidade da bacia hidrográfica apresenta clima subtropical Cwa, segundo a classificação de Köppen, com temperaturas médias anuais entre 18°C e 22°C .

A precipitação média anual da bacia é de 1.400 mm, com regime climático caracterizado por duas estações bem distintas: seca no inverno (meses de abril a setembro) e chuvosa no verão (outubro a março) [41].

2.2. FRACTAIS E MULTIFRACTAIS

2.2.1. Fractais

O termo fractal aplica-se a objetos complexos gerados por processos estocásticos ou mecanismos não lineares determinísticos. Os fractais apresentam auto similaridade (os pedaços de objeto assemelham-se ao objeto todo) e tem a dimensão não inteira (fracionária) menor do que a dimensão do espaço euclidiano no qual o fractal se encontra contido.

Exemplos de fractais naturais são: árvores, nuvens, linhas costeiras, redes arteriais, árvore traqueo bronquial, ramificações de músculos cardíacos e neurônios [2, 6, 47, 48].

A Figura 2 mostra um exemplo de um objeto com propriedades fractais.



Figura 2. Exemplo de um objeto fractal [2].

Esses exemplos pertencem à classe dos fractais estocásticos, que possuem a propriedade de auto similaridade em sentido estatístico, dentro dos limites da escala, onde o limite inferior representa à dimensão de partículas do sistema e o limite superior à dimensão linear do sistema. Os objetos geométricos (fractais determinísticos) podem ser construídos utilizando um processo iterativo e possuem propriedade de auto similaridade em todas as escalas.

O processo iterativo consiste em substituir as unidades da estrutura (ex. triângulos, quadrados) pela estrutura básica característica para cada tipo de fractal como mostra a Figura 3 [47]. O algoritmos de construção do fractal *Sierpinski Gasket* mostrado na Figura 3 é dado a seguir: Inicia-se com a construção de um triângulo equilátero. A partir disso, seguiremos os seguintes passos:

- i. Traçar quatro novos triângulos equiláteros utilizando os pontos médios dos segmentos;
- ii. Remover o triângulo central;
- iii. Repetir em cada triângulo os passos ii e iii;
- iv. Repetir o passo 3 sucessivamente.

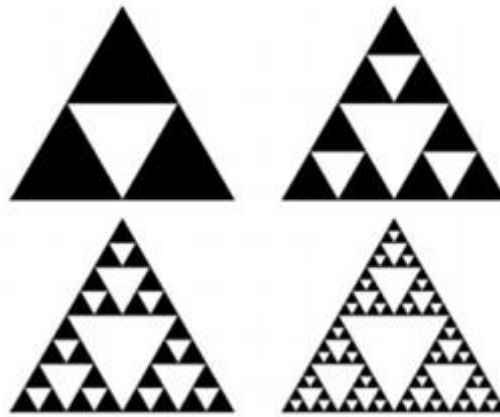


Figura 3. Fractal determinístico *Sierpinski Gasket* [47].

Nos fractais determinísticos a dimensão fractal pode ser determinada usando o procedimento seguinte: se $N(l)$ é o número de unidades da estrutura (ex. triângulos no caso do fractal *Sierpinski Gasket* como mostrado na Figura 3) em escala l a diminuição da escala b vezes gera um novo número de unidades estruturais,

$$N\left(\frac{l}{b}\right) = N(l)b^{d_f} \quad (3.1)$$

e a dimensão fractal d_f pode ser calculada usando a expressão:

$$d_f = \frac{\log \frac{N(\frac{l}{b})}{N(l)}}{\log b} \quad (3.2)$$

Aplicando as fórmulas (3.1) e (3.2) no fractal geométrico Sierpinski Gasket (Figura 3), obtemos a dimensão fractal:

$$d_f = \frac{\log 3}{\log 2} \approx 1,59$$

Em fractais estocásticos a dimensão fractal pode ser obtida pela expressão:

$$V(R) \propto R^{d_f} \quad (3.3)$$

onde $V(R)$ é o volume da região de dimensão linear R e d_f a dimensão fractal, um número não inteiro e menor do que a dimensão euclidiana D do espaço em que o fractal se encontra. Existem vários métodos para se calcular a dimensão fractal, entre eles os mais utilizados são: método da contagem de caixas (*box-counting*), dimensão de informação e dimensão de correlação [47].

Método da contagem de caixas

A dimensão fractal é determinada utilizando-se uma grade retangular de tamanho r . Cobre-se o objeto com uma grade de tamanho r e contam-se o número das caixas $n(r)$ que contenham pelo menos um ponto do objeto: $n(r) \sim r^{-D_0}$. Repete-se o procedimento com caixas de diferentes tamanhos e traça-se um gráfico na escala logarítmica de $n(r)$ em função de r . A inclinação negativa desse gráfico é a dimensão *box-counting*, que pode ser definida, formalmente, através da expressão:

$$D_0 \equiv \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log \frac{1}{n(r)}}{\log r} = - \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log n(r)}{\log r} \quad (3.4)$$

A estimativa da dimensão *box-counting* é a inclinação negativa da reta dada por $\log[n(r)]$ versus $\log r$ [49].

Dimensão de informação

A dimensão de informação está relacionada com a probabilidade de encontrar um ponto da estrutura dentro de uma caixa. Cobre-se o objeto com uma grade de tamanho r e conta-se o número de pontos (pertencentes à estrutura) M_i dentro da i -ésima caixa. A probabilidade de encontrar um ponto escolhido aleatoriamente dentro da i -ésima caixa é $P_i = \frac{M_i}{M}$ onde M é o número total de pontos da estrutura.

A dimensão de informação é definida como:

$$D_1 \equiv \lim_{r \rightarrow 0} \frac{\log \sum_i P_i \log P_i}{\log r} \quad (3.5)$$

A estimativa da dimensão de informação é a inclinação da reta dada por $\log[\sum_i P_i \log P_i]$ versus $\log r$ [49].

Dimensão de correlação

A dimensão de correlação introduzida por Grassberger e Procaccia [50,51], está relacionada com o número de pontos cuja distância entre si é inferior a r .

A dimensão de correlação é definida como:

$$D_2 \equiv \lim_{r \rightarrow 0, N \rightarrow \infty} \frac{\log C(N, r)}{\log r} \quad (3.6)$$

onde:

$$C(N, r) = \frac{1}{N(N-1)} \sum_{i \neq j} \theta(r - \|x_i - x_j\|) \quad (3.7)$$

é a integral de correlação em que $\theta(\cdot)$ representa a função indicadora e N é o número total de pontos da estrutura.

A estimativa de dimensão de correlação é a inclinação da reta dada por $\log C(N, r)$ versus $\log r$.

2.2.2. Multifractais

Em contraste com fractais simples (ou monofractais), os multifractais são caracterizados por uma hierarquia de expoentes [6]. Mais precisamente, multifractais podem ser vistos como um entrelace de simples fractais. A palavra “hierarquia” aqui se refere aos diferentes membros deste entrelace, os quais têm dimensões fractais distintos.

Se essa propriedade é ignorada e o objeto multifractal é tratado como um fractal simples (monofractal), os métodos tradicionais do cálculo de dimensão fractal resultam em um valor intermediário. Para multifractais a dimensão calculada usando o método contagem de caixas (também chamada de dimensão de capacidade) tem valor maior do que a dimensão de informação, que tem valor maior do que a dimensão de correlação.

Assim, para testar se um objeto geométrico deve ser tratado como um multifractal, o primeiro passo é calcular a dimensão de capacidade, a dimensão de informação e a dimensão de correlação, e se essas dimensões forem distintas, deve-se realizar a análise multifractal usando o cálculo do espectro multifractal para descrever as propriedades geométricas do objeto.

2.2.3. Análise multifractal

No caso de um multifractal geométrico, analisa-se o número de partículas dentro de uma região [49,52]. O procedimento do cálculo da dimensão multifractal generalizada consiste em cobrir a estrutura analisada com caixas de aresta de tamanho l , variando posteriormente os valores de l , e registrando os valores de M_l dentro da

i -ésima caixa, sendo M_0 o número total de partículas do sistema e L é a dimensão linear do sistema. A dimensão generalizada D_q para distribuição de massa é definida por:

$$\sum_i \left(\frac{M_i}{M_0} \right)^q \sim \left(\frac{l}{L} \right)^{(q-1)D_q} \quad (3.8)$$

onde, q é uma variável contínua que torna possível enfatizar as propriedades fractais em diferentes escalas. As dimensões generalizadas D_0 , D_1 e D_2 representam a dimensão de capacidade, dimensão de informação e dimensão de correlação, respectivamente. Finalmente, $D_{-\infty}$ e D_∞ representam os limites do espectro de dimensões generalizadas, onde a medida de interesse é a mais diluída e mais densa, respectivamente. Para monofractais, todas as dimensões generalizadas são iguais, dando um único valor de dimensão fractal. O espectro $D(q)$ é constante, enquanto para multifractais $D(q)$ representa uma função monótona decrescente.

Para um tratamento alternativo da multifractalidade usa-se o espectro $f(\alpha)$ [6,52,53], onde:

$$N(\alpha) = L^{-f(\alpha)} \quad (3.9)$$

representa, o número de caixas $N(\alpha)$ para as quais a probabilidade P_i de encontrar uma partícula dentro da i -ésima caixa é regida pela lei de potência

$$P_i = L^{\alpha_i} \quad (3.10)$$

sendo $f(\alpha)$ entendido como a dimensão fractal da união de regiões com singularidade entre α e $\alpha + d\alpha$, α variando entre $[-\infty, \infty]$. A relação entre a função $D(q)$ e o espectro $f(\alpha)$ é feita via transformação de Legendre

$$f(\alpha(q)) = q\alpha(q) - \tau(q) \quad (3.11)$$

em que

$$\alpha(q) = \frac{\partial \tau(q)}{\partial q} \quad (3.12)$$

e

$$\tau(q) \equiv (q - 1)D_q \quad (3.13)$$

No caso de monofractal, a dimensão fractal não depende de q ($D_q \equiv D$) e usando as equações (3.11), (3.12) e (3.13) tem-se $f(\alpha) = D$ e o espectro $f(\alpha)$ consiste em um único ponto, onde $f(\alpha)$ é igual à dimensão fractal do sistema. Estruturas multifractais são caracterizadas por um espectro $f(\alpha)$ não trivial.

2.3. PROCESSOS FRACTAIS

O conceito fractal pode ser estendido para séries temporais que possuem flutuações em múltiplas escalas do tempo. Essas flutuações temporais caracterizam-se pela auto similaridade estatística da mesma maneira que os objetos fractais possuem a auto similaridade nas várias escalas espaciais. Alguns exemplos dos processos fractais são: intervalos entre batimentos cardíacos em humanos [54,55], intervalo entre dois passos de humanos [56], flutuações na respiração [57], variação da pressão arterial [58], contagem das células brancas em sangue [59] e cinética de canais iônicos [60].

A detecção e quantificação da auto similaridade em séries temporais torna-se mais complexa do que para fractais geométricos. A série temporal envolve dois tipos de variáveis: o eixo horizontal representa o tempo e o eixo vertical representa a variável que depende do tempo. No caso do fractal geométrico, que ocupa espaço bidimensional (exemplo, linhas costeiras), os eixos representam variáveis do mesmo tipo.

Para determinar se uma estrutura fractal geométrica possui a propriedade de auto similaridade, extrai-se um pedaço dela, aumenta até o tamanho do objeto original usando o mesmo fator de magnificação para o comprimento e a largura, e comparam-se as propriedades estatísticas do pedaço aumentado como objeto todo. No caso das séries temporais, precisa-se de dois fatores de magnificação, um para cada tipo de variável.

Uma série temporal $y(t)$ possui propriedade de autosimilaridade com o parâmetro α se:

$$y(t) = a^\alpha y\left(\frac{t}{a}\right) \quad (3.14)$$

onde “=” significa a igualdade de propriedades estatísticas. Essa igualdade surge após mudanças de escalas para t e $y(t)$ usando os fatores diferentes: $t \rightarrow t/a$ e $y(t) \rightarrow a^\alpha y(t)$. O expoente α chama-se parâmetro de auto similaridade [61].

2.3.1. Métodos de Análise de Correlações de Longo Alcance em Séries Temporais Fractais

Análise da Função de Autocorrelação

Uma série temporal estacionária é aquela que flutua em torno de uma mesma média ao longo do tempo, isto significa, em particular, que todas as distribuições unidimensionais são invariantes sob translação do tempo.

Para séries temporais estacionárias, $(x_i) i = 1, \dots, N$ com média $\langle x \rangle$ e variância σ^2 a função de autocorrelação é definida como:

$$C(s) = \frac{\langle [x(i) - \langle x \rangle][x(i+s) - \langle x \rangle] \rangle}{\sigma^2} \quad (3.15)$$

Para uma série não correlacionada, $C(s) = 0$ para $s > 0$. Para uma série que possui correlação de curto alcance $C(s)$ tem um decaimento exponencial $C(s) \approx \exp(-s/t_0)$, com uma escala característica t_0 . Para uma série que possui correlação de longo alcance $C(s)$ tem decaimento seguindo uma lei de potência $C(s) \approx \propto s^{-\gamma}$, com o expoente de correlação, $0 < \gamma < 1$. Para séries não estacionárias a média não é bem definida e para grandes escalas s , $C(s)$ flutua ao redor de zero que dificulta a obtenção do expoente de correlação γ [62].

Análise Espectral

O espectro de potências é definido como a transformada de Fourier de função de autocorrelação [63].

$$S(f) = C(0) + 2 \sum_{n=1}^{\infty} C(n) \cos(2\pi fn) \quad (3.16)$$

Para séries temporais que possuem correlação de longo alcance $S(f)$ segue uma lei de potência

$$S(f) \sim f^{-\beta}, \quad (3.17)$$

com $\beta = 1 - \gamma$. O expoente espectral β e o expoente de correlação γ são obtidos através da inclinação da reta $\log S(f)$ versus $\log f$. A análise espectral aplica-se apenas as séries temporais estacionárias.

Análise de Hurst

Este método é baseado no passeio aleatório e foi desenvolvido pelo engenheiro inglês H.E. Hurst quando ele estudou a hidrologia (vazão) do rio Nilo, Egito [64,65].

No primeiro passo da análise de *Hurst* divide-se a série original x_i em $N_s = \text{int}(N/s)$ segmentos de tamanho s e em cada segmento $v = 1, \dots, N_s$ a série original é integrada pela equação:

$$X_{vk} = \sum_{i=1}^k (x_{(v-1)s+i} - \langle x_v \rangle) \quad (3.18)$$

onde $\langle x_v \rangle = \frac{1}{s} \sum_{i=1}^s x_{(v-1)s+i}$ é a média local da série em segmento v .

Em seguida para cada segmento calcula-se a diferença:

$$R_v(s) = \max X_{vk} - \min X_{vk}, \quad k = (v-1)s + 1, \dots, vs \quad (3.19)$$

e o desvio padrão é:

$$S_v(s) = \sqrt{\frac{1}{s} \sum_{i=1}^s (x_{(v-1)s+i} - \langle x_v \rangle)^2} \quad (3.20)$$

A função de flutuação de *Hurst* é dada pela expressão:

$$F_{RS}(s) = \frac{1}{N_s} \sum_{v=1}^{N_s} \frac{R_v(s)}{S_v(s)} \sim s^H \quad \text{para } s > 1 \quad (3.21)$$

O expoente de *Hurst* H é relacionado com o expoente de correlação γ e com o coeficiente β da análise espectral pela equação $2H = 1 + \beta = 2 - \gamma$ [65].

A interpretação do expoente H é a seguinte [6,64].

- i) Para ruído branco (séries não correlacionadas) $H = 0,5$ a função de autocorrelação diminui exponencialmente;
- ii) O valor $0,5 < H < 1$ indica que a série original possui correlações de longo alcance persistentes: os valores grandes (pequenos) tem maior probabilidade de serem seguidos por valores grandes (pequenos), a função de autocorrelação diminui seguindo uma lei de potência $C(n) \approx n^{-\gamma}$, com $\gamma = 2 - 2H$;
- iii) Para $0 < H < 0,5$ a série é anti-persistente, significando que os valores grandes (pequenos) tem maior probabilidade de serem seguidos por valores pequenos (grandes);
- iv) O valor $H = 1$ representa um ruído tipo $1/f$ (o espectro de potências segue uma lei de potência $S(f) \approx f^{-\beta}$, com $\beta = 2H - 1 = 1$);

- v) Para $H > 1$ as correlações existem, contudo não diminuem seguindo uma lei de potência. O caso especial $H = 1,5$ indica um ruído Browniano, que é a integração do ruído branco.

Análise de Flutuação (FA)

Este método é também baseado no passeio aleatório. Seja $x_i = 1, \dots, N$ uma série temporal com média zero. Primeiro a série original é integrada, formando uma nova série $Y(j) = \sum_{i=1}^j x_i$, $j = 1, \dots, N$. Em seguida a série $Y(j)$, é dividida em $N_s = \text{int}(N/s)$ segmentos não sobrepostos de tamanho s a partir do início da série.

A função de flutuação é obtida para cada segmento $v = 1, \dots, N_s$ pela equação:

$$F_{FA}^2(v, s) = [Y((v-1)s+1) - Y(vs)]^2 \quad (3.22)$$

A função de flutuação para o tamanho de segmento s é dada pela expressão:

$$F(s) = \left[\frac{1}{N_s} \sum_{v=1}^{N_s} F_{FA}^2(v, s) \right]^{1/2} \quad (3.23)$$

Nos casos de correlações de longo alcance, $F(s)$ aumenta segundo uma lei de potência, $F(s) \approx s^\alpha$. O expoente α é idêntico ao expoente de *Hurst*, ($\alpha = H$) para dados monofractais e está relacionado com γ e β pela equação $2\alpha = 1 + \beta = 2 - \gamma$ [65].

Detrended Fluctuation Analysis (DFA)

O método *Detrended Fluctuation Analysis (DFA)* foi introduzido por Peng et. al [66] para quantificar correlações em séries temporais não estacionárias (é quando flutuam em torno da média durante algum tempo e depois oscilam para outro nível. Ou quando variam em uma direção por algum tempo e mudam para outra direção no tempo).

Este método foi amplamente utilizado para análises de sequências gênicas de DNA [64], na fisiologia [67], climatologia [68], hidrologia [69], geofísica [70], meteorologia [71] e séries temporais financeiras [72].

A vantagem deste método em relação aos métodos convencionais é que ele também evita falsas detecções de correlações de longo alcance que são artefatos de tendência incorporada no sinal [73].

O algoritmo do *DFA* é dado a seguir:

- i) Inicialmente a série temporal original $x(i), i = 1, \dots, N$ é integrada produzindo:

$$X(k) = \sum_{i=1}^k [x(i) - \langle x \rangle], \quad k = 1, \dots, N \quad (3.24)$$

em que $\langle x \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(i)$ representa a média da série $x(i)$.

- ii) A série integrada $X(k)$ é dividida em $N_n = \text{int}(N/n)$ intervalos (segmentos) não sobrepostos de tamanho n e em cada segmento $s = 1, \dots, N_s$ representa a tendência local $X_{n,s}(k)$ (é feita com ajuste linear ou polinomial) é estimada e subtraída da série $X(k)$.

- iii) A variância sem tendência é calculada como:

$$F_{DFA}^2(n) = \frac{1}{nN_n} \sum_{s=1}^{N_n} \sum_{k=(s-1)n+1}^{sn} [X(k) - X_{n,s}(k)]^2 \quad (3.25)$$

- iv) Este cálculo se repete para diferentes tamanhos dos segmentos, fornecendo a relação entre a função de flutuação $F_{DFA}(n)$ e o tamanho do segmento n . Se a série original $x(i)$ possui correlações de longo alcance, $F_{DFA}(n)$ é uma lei de potência;

$$F_{DFA}(n) \sim n^\alpha \quad (3.26)$$

O expoente de escala α pode ser obtido como o coeficiente angular da reta $\log F_{DFA}(n)$ versus $\log n$. Para séries não correlacionadas $\alpha = 0,5$, para séries persistentes $\alpha > 0,5$ e para séries anti-persistentes $\alpha < 0,5$ [66].

Detrended Cross-Correlation Analysis (DCCA)

O método *Detrended cross-correlation analysis (DCCA)* introduzido recentemente por Podobnik e Stanley [74], representa uma generalização do *Detrended fluctuation analysis (DFA)* e serve para quantificar as correlações entre duas séries temporais simultâneas. Este método foi aplicado para detectar e quantificar as correlações de longo alcance entre duas séries temporais não estacionárias e foi amplamente utilizado em várias áreas como fisiologia [75], engenharia [76], climatologia [77], e finanças [78]. A implementação do algoritmo *DCCA* é semelhante ao *DFA* descrita na seção anterior, à diferença é que em vez da variância $F_{DFA}^2(n)$, calcula-se a covariância sem tendências:

$$F_{DCCA}^2(n) = \frac{1}{nN_n} \sum_{s=1}^{N_n} \sum_{k=(s-1)n+1}^{sn} [X(k) - X_{n,s}(k)][Y(k) - Y_{n,s}(k)] \quad (3.27)$$

em que $X(k) = \sum_{i=1}^k [x(i) - \langle x \rangle]$ e $Y(k) = \sum_{i=1}^k [y(i) - \langle y \rangle]$, $k = 1, \dots, N$ são as séries integradas a partir de duas séries simultâneas $x(i)$ e $y(i)$, $i = 1, \dots, N$, e $X_{n,s}(k)$ e $Y_{n,s}(k)$ representam as tendências locais em segmentos $s = 1, \dots, N_n$.

Este cálculo se repete para diferentes tamanhos dos segmentos, fornecendo a relação entre a função de flutuação $F_{DCCA}(n)$ e o tamanho do segmento n . Se entre duas séries $x(i)$ e $y(i)$ existem correlações de longo alcance, $F_{DCCA}(n)$ é uma lei de potências $F_{DCCA}(n) \sim n^\gamma$. O expoente da escala γ pode ser obtido como o coeficiente angular da reta $\log F_{DCCA}(n)$ versus $\log n$ e tem a interpretação similar ao expoente α do *DFA*. A existência das correlações entre duas séries simultâneas significa que cada série possui a memória dos seus valores anteriores e também a memória dos valores anteriores da outra série [74].

2.4. SÉRIES TEMPORAIS MULTIFRACTAIS

Muitos registros não apresentam um comportamento simples monofractal, que pode ser explicado por um único expoente de escala. Ou seja, podem existir escalas s_x separando regiões com expoentes diferentes. Em casos ainda mais complexos, as diferentes dimensões fractais podem ser observadas para vários subconjuntos fractais da série temporal. Neste caso, uma hierarquia de expoentes de escala é necessária para uma descrição completa das correlações temporais da série, e uma análise multifractal deve ser aplicada [79]. Vários métodos foram desenvolvidos para analisar as propriedades multifractais dos sinais não estacionários, incluindo *Wavelet transform modulus maxima (WTMM)* [80], *Multifractal detrended fluctuation analysis (MF-DFA)* [79] e *Multifractal detrending moving average analysis (MF-DMA)* [81].

Multifractal Detrended Fluctuation Analysis (MF-DFA)

O método *MF-DFA* é mais simples para implementação computacional do que o método *WTMM* [82], e foi amplamente utilizado em análise de processos fisiológicos [83], sinais geofísicos [84], séries temporais hidrológicas [85-89] e dados financeiros [90].

O algoritmo do *MF-DFA* é dado a seguir:

- i) Inicialmente a série temporal original $x(i), i = 1, \dots, N$ é integrada produzindo:

$$X(k) = \sum_{i=1}^k [x(i) - \langle x \rangle], \quad k = 1, \dots, N \quad (3.28)$$

em que $\langle x \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(i)$ representa a média da série $x(i)$.

- ii) A série integrada $X(k)$ é dividida em $N_n = \text{int}(N/n)$ intervalos (segmentos) não sobrepostos de tamanho n e em cada segmento $s = 1, \dots, N_s$ representa a tendência local $X_{n,s}(k)$ (é feita com ajuste linear ou polinomial) é estimada e subtraída da série $X(k)$.

- iii) A variância sem tendência

$$F^2(n, s) = \frac{1}{n} \sum_{k=(s-1)n+1}^{sn} [X(k) - X_{n,s}(k)]^2 \quad (3.29)$$

é calculada para cada segmento, e finalmente um valor médio para todos os segmentos é usado para obter a função de flutuação de ordem q :

$$F_q(n) = \left\{ \frac{1}{N_n} \sum_{s=1}^{N_n} [F^2(n, s)]^{q/2} \right\}^{1/q} \quad (3.30)$$

em que q pode assumir qualquer número real exceto zero ($q \neq 0$). Este cálculo se repete para diferentes tamanhos dos segmentos, fornecendo a relação entre a função de flutuação $F_q(n)$ e o tamanho do segmento n . Se a série original $x(i)$ possui correlações de longo alcance, $F_q(n)$ é uma lei de potência $F_q(n) \sim n^{h(q)}$. O expoente de escala $h(q)$ pode ser obtido como o coeficiente angular da reta $\log F_q(n)$ versus $\log n$.

O valor de $h(q)$ que corresponde ao limite $h(q)$ para $q \rightarrow 0$ não pode ser determinado diretamente usando a equação (3.30) porque o expoente diverge. Em vez disso, um procedimento do cálculo logarítmico da média deve ser empregado,

$$F_0(s) = \exp \left\{ \frac{1}{4N_s} \sum_{s=1}^{2N_s} \ln[F^2(v, s)]^{1/2} \right\} \sim s^{h(0)} \quad (3.31)$$

Para séries estacionárias $h(2)$ é igual o expoente clássico de *Hurst*, então $h(q)$ é chamado o expoente de *Hurst* generalizado [79]. Para valores positivos de q , $h(q)$ descreve o comportamento dos segmentos com grandes flutuações, enquanto para valores negativos de q , $h(q)$ descreve o comportamento dos segmentos com pequenas flutuações. Para séries monofractais $h(q)$ é independente de q , para séries multifractais $h(q)$ é uma função decrescente de q [79]. Os expoentes generalizados $h(q)$ são relacionados aos expoentes *Rényi* $\tau(q)$ definidos em análise multifractal clássica (baseada na função de partição) [6].

$$\tau(q) = q h(q) - 1 \quad (3.32)$$

Para séries monofractais $\tau(q)$ é uma função linear de q ($h(q) = \text{const}$), para séries multifractais $\tau(q)$ é uma função não linear de q [6]. Um processo multifractal também pode ser caracterizado pelo espectro de singularidade $f(\alpha)$ relacionado à $\tau(q)$ via transformação de Legendre

$$\alpha(q) = \frac{d\tau(q)}{dq} \quad (3.33)$$

$$f(\alpha) = q\alpha - \tau(q) \quad (3.34)$$

em que $f(\alpha)$ é a dimensão fractal do subconjunto da série com valores caracterizados pelo expoente local Lipschitz-Holder α [6,79]. O espectro $f(\alpha)$ de uma série monofractal é representado por um único ponto, enquanto para uma série multifractal $f(\alpha)$ é uma função côncava para baixo [6,79].

Dois tipos de multifractalidade podem ser identificados em séries temporais: a) multifractalidade causada pela função densidade de probabilidade dos valores da série; b) multifractalidade causada pelas correlações diferentes em subconjuntos com grandes e com pequenas flutuações [79]. Para determinar qual tipo de multifractalidade está presente na série original, o procedimento *MF-DFA* deve ser aplicado na série

randomizada. No caso da multifractalidade tipo (b) a randomização da série destrói as correlações de longo alcance e $h(q) = 0,5$. No caso da multifractalidade tipo (a) a randomização não afeta a função de probabilidade dos valores da série, resultando em permanência da função original $h(q)$. Se ambos os tipos de multifractalidade são presentes, a série randomizada apresenta uma multifractalidade mais fraca do que a série original [79].

Multifractal Detrended Cross Correlation Analysis (MF-DXA)

Para investigar as correlações entre duas séries temporais simultâneas não estacionárias, vários métodos foram recentemente propostos: *Detrended cross-correlation analysis (DCCA)* [74], *Multifractal detrended cross-correlation analysis (MF-DXA)* [92] e *Multifractal detrending moving average cross-correlation analysis (MF-X-DMA)* [93], entre os quais o método *Multifractal detrended cross-correlation analysis (MF-DXA)* foi o mais utilizado. Este método já foi aplicado em processos hidrológicos [94], sinais geofísicos [95] e dados financeiros [96]. O procedimento do *MF-DXA* é semelhante ao *MF-DFA* descrito na seção anterior, à diferença é que em vez da variância $F^2(n, s)$, calcula-se a covariância sem tendências:

$$F_{xy}(n, s) = \frac{1}{n} \sum_{k=(s-1)n+1}^{sn} |X(k) - X_{n,s}(k)| |Y(k) - Y_{n,s}(k)| \quad (3.35)$$

em que $X(k) = \sum_{i=1}^k [x(i) - \langle x \rangle]$ e $Y(k) = \sum_{i=1}^k [y(i) - \langle y \rangle]$, $k = 1, \dots, N$ são as séries integradas a partir de duas séries simultâneas $x(i)$ e $y(i)$, $i = 1, \dots, N$, e $X_{n,s}(k)$ e $Y_{n,s}(k)$ representam as respectivas tendências locais em segmentos $s = 1, \dots, N_n$ [92].

Calculando o valor médio para todos os segmentos determina-se a função de flutuação de ordem q :

$$F_{xy}(q, n) = \left\{ \frac{1}{N_n} \sum_{s=1}^{N_n} [F_{xy}(n, s)]^{q/2} \right\}^{1/q} \quad (3.36)$$

em que q pode assumir qualquer número real exceto zero. Repetindo este cálculo para diferentes tamanhos dos segmentos, determina-se a relação entre a função de flutuação $F_{xy}(n)$ e o tamanho do segmento n . Em caso de existência de correlações de longo alcance entre as duas séries, $F_{xy}(q, n)$ é uma lei de potência $F_{xy}(q, n) \sim n^{h_{xy}(q)}$. O expoente de escala $h_{xy}(q)$ é calculado como o coeficiente angular da reta $\log F_{xy}(q, n)$ versus $\log n$. No caso de $x = y$ o método *MF-DXA* é idêntico ao *MF-DFA* [79]. Uma vez que os expoentes generalizados $h_{xy}(q)$ são obtidos, os expoentes clássico $\tau_{xy}(q)$ e o espectro de singularidade $f_{xy}(\alpha)$ podem ser calculados usando as fórmulas (3.31), (3.32) e (3.33) [92].

2.5 ANÁLISE DE COMPLEXIDADE DAS SÉRIES TEMPORAIS

Sample Entropy (SampEn)

O método *SampEn* introduzido por [97] é definido 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 onde:

$$x(i) = [x(i), x(i + 1), \dots, x(i + m - 1)], i = 1, \dots, N - m + 1 \quad (3.37)$$

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

$$d_m[x(i), x(j)] = \max_{k=0, m-1} [|x(i + k) - x(j + k)|] \quad (3.38)$$

- iii) Para cada $i = 1, \dots, N - m$; calcula-se:

$$B_i^m(r) = \frac{B_i}{(N - m - 1)} \quad \text{e} \quad A_i^m(r) = \frac{A_i}{(N - m)} \quad (3.39)$$

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

Calcula-se:

$$B^m(r) = \frac{1}{N - m} \left(\sum_{i=1}^{N-m} B_i^m(r) \right) \quad (3.40)$$

e

$$A^m(r) = \frac{1}{N - m} \left(\sum_{i=1}^{N-m} A_i^m(r) \right) \quad (3.41)$$

onde $B^m(r)$ é a probabilidade de dois vetores serem similares para m pontos, $A^m(r)$ é a probabilidade de dois vetores serem similares para $(m + 1)$ pontos.

iv) Por fim, calcula-se o índice *Sample Entropy*:

$$SampEn(m, r, N) = - \ln \left(\frac{A^m(r)}{B^m(r)} \right) \quad (3.42)$$

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

Sample Entropy é uma modificação do método *Approximate Entropy* (*ApEn*), [98]. Ambos os métodos servem para quantificar a complexidade em séries temporais não lineares, que foram amplamente usados em análise de processos fisiológicos [99] e séries climáticas [100]. Uma maior complexidade (menor regularidade) da série temporal gera o valor do *SampEn* mais alto [97].

Cross - Sample Entropy (Cross - SampEn)

Cross - Sample Entropy é uma técnica introduzida recentemente, para avaliar o grau de sincronização entre duas séries temporais simultâneas [97], e foi utilizada em séries temporais fisiológicas [101] e financeiras [102].

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, a sequência é dada a seguir:

i) Constrói-se uma sequência de vetores:

$$x_m(i) = (u(i), u(i+1), \dots, u(i+m-1)), \quad 1 \leq i \leq N-m \quad (3.43)$$

$$y_m(j) = (v(j), v(j+1), \dots, v(j+m-1)), \quad 1 \leq j \leq N-m$$

a partir de u e v , respectivamente.

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

$$B_i^m(r)(v||u) = \frac{\text{n}^\circ \text{ de } 1 \leq j \leq N-m \text{ tal que } d[x_m(i), y_m(j)] \leq r}{N-m} \quad (3.44)$$

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:

$$B^m(r)(v||u) = \frac{\sum_{i=1}^{N-m} B_i^m(r)(v||u)}{N-m} \quad (3.45)$$

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

iv) Analogamente, define-se:

$$A_i^m(r)(v||u) = \frac{\text{n}^\circ \text{ de } 1 \leq j \leq N - m \text{ tal que } d[x_{m+1}(i), y_{m+1}(j)] \leq r}{N - m} \quad (3.46)$$

e

$$A^m(r)(v||u) = \frac{\sum_{i=1}^{N-m} A_i^m(r)(v||u)}{N - m} \quad (3.47)$$

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

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

$$\text{Cross - SampEn}(m, r, N) = -\ln \left\{ \frac{A^m(r)(v||u)}{B^m(r)(v||u)} \right\} \quad (3.48)$$

Portanto, *Cross-SampEn* pode ser usada como uma medida da correlação cruzada entre duas séries temporais simultâneas [97].

Mustiscale Sample Entropy (MSE)

Multiscale sample entropy (MSE) introduzida por Costa *et al.* [103], representa uma generalização do método *Sample entropy (SampEn)* [97]. As medidas tradicionais baseadas em conceito da *entropia*, como *Shannon entropy* [104], *Kolmogorov entropy* [105], *Approximate entropy* [106] e *Sample entropy* [97] aumentam com o grau de aleatoriedade do processo estocástico e não conseguem quantificar a complexidade como “uma riqueza na estrutura temporal do processo” caracterizada pela maior regularidade do que o processo aleatório [103].

Ambos os processos completamente aleatórios (ruído branco) e o processo completamente regular (ex. periódico) possuem uma menor complexidade do que um processo estruturalmente complexo (ex. ruído $1/f$) [103, 107].

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 $x^\tau(j) = \frac{1}{\tau} \sum_{i=(j-1)\tau+1}^{j\tau} x(i)$ e τ é o fator da escala. Este procedimento é representado na Figura 4.

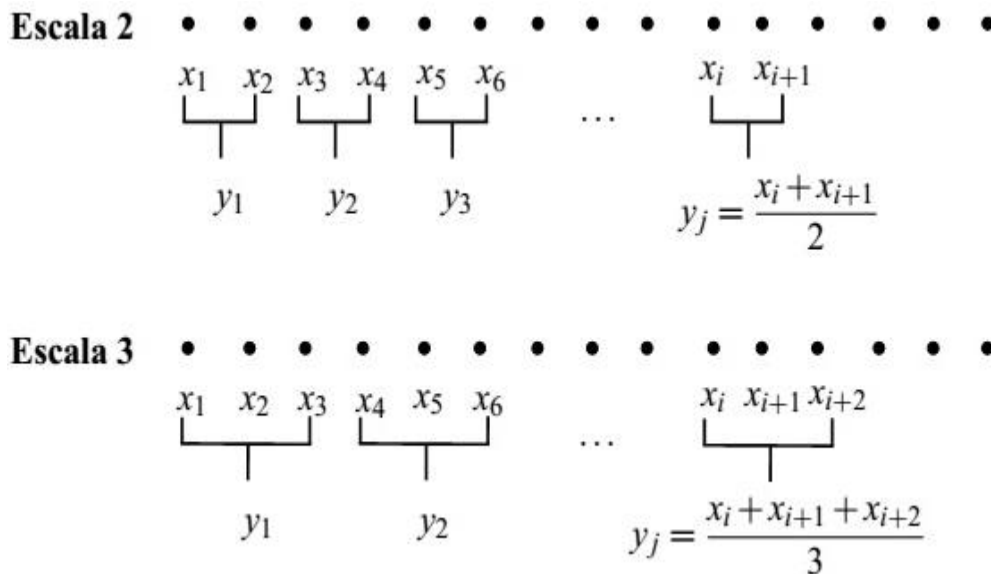


Figura 4. Ilustração do método *MSE*: transformação da série original usando fator de escala $\tau = 2$ e $\tau = 3$. [107].

Para cada série transformada calcula-se o valor de *SampEn* e constrói-se o gráfico *SampEn* versus o fator da escala τ . 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 [103]. Costa *et al* [107] mostraram que um sinal aleatório tem em escalas maiores menores valores de *MSE* do que um sinal correlacionado, como pode ser visto na Figura 5. A análise *MSE* permite uma melhor quantificação da complexidade estrutural de uma série temporal do que os métodos tradicionais baseados em entropia, que analisam a repetição dos padrões na série utilizando uma escala única [103].

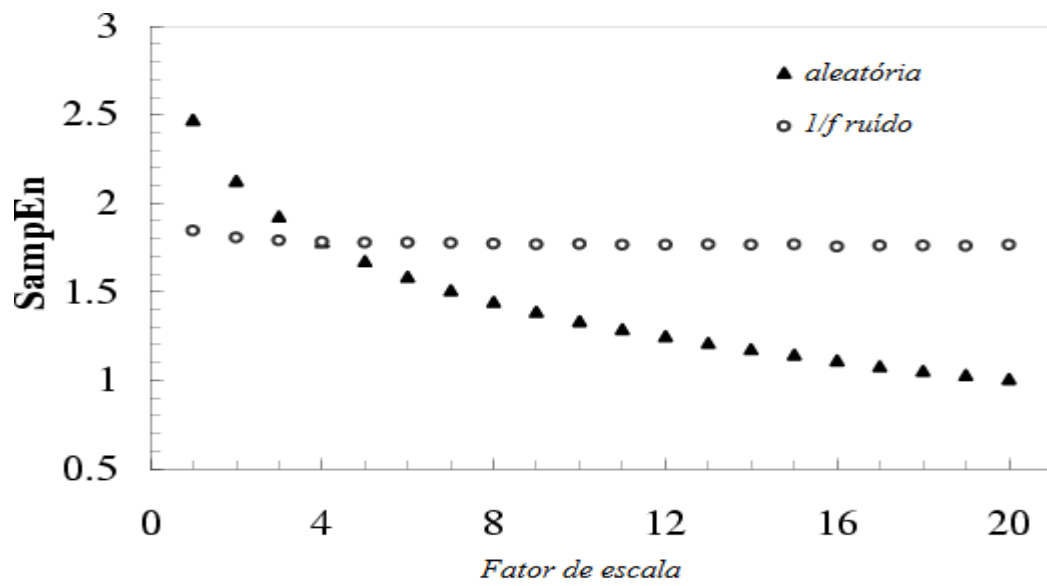


Figura 5. Análises *MSE* de séries simuladas de ruído branco e ruído 1/f. Os parâmetros de *MSE* são: $m = 2$, $r = 0.15$, e $N = 30.000$ [107].

3. MATERIAIS E MÉTODO

3.1. Descrição dos dados

Foram analisadas as séries temporais diárias de vazão e de precipitação obtidas das estações meteorológicas localizadas nas bacias dos rios Atibaia e Jaguari, que são sub-bacias do rio Piracicaba. As estações fluviométricas foram escolhidas por serem mais próximas do reservatório do sistema Cantareira que foi construído para a transferência da água da bacia do rio Piracicaba para Região Metropolitana de São Paulo (RMPS). Este sistema inclui reservatórios na sub-bacia do rio Atibaia (construídos no período de 1968-1974, nos rios Cachoeira e Atibainha) e na sub-bacia do rio Jaguari (construídos no período de 1975-1981, nos rios Jaguari e Jacaré) [28].

Para comparar a dinâmica da vazão com a dinâmica da precipitação foram escolhidas as séries diárias de precipitação das estações mais próximas das estações fluviométricas com dados simultâneos. As estações escolhidas foram: foram 3D-006 e 4D-009 (fluviométricas, Atibaia), 3D-009 e 4D-001 (fluviométricas, Jaguari), D3-002 e E3-017 (pluviométricas, Atibaia) e D3-018 e D4-052, (pluviométricas, Jaguari). Para cada estação foram analisadas duas séries de vazão e de precipitação representando os períodos antes e depois da construção dos reservatórios do sistema Cantareira: de 1961-1967 e de 1975-1981 para o rio Atibaia, de 1967-1975 e de 1985-1993 para o rio Jaguari. As séries temporais de vazão e precipitação foram escolhidas pela existência de dados completos no período de estudo, entre 1930 e 1997, e pela distribuição espacial na bacia.

Foram analisadas as séries temporais de vazão de cada sub-bacia nas estações 3D-006 (Atibaia) e 3D-009 (Jaguari), para avaliar o comportamento dos dados com maior duração durante os períodos de 1930 a 1997 para primeira estação e de 1930 a 1997 para segunda estação.

E finalmente analisamos as séries simultâneas da vazão das duas sub-bacias, nas estações 3D-006 (Atibaia) e 3D-009 (Jaguari) para os períodos antes da construção do primeiro reservatório no rio Atibaia (68-74), antes da construção do segundo reservatório no rio Jaguari (75-81) e depois do início do funcionamento dos dois reservatórios (84-90).

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.dae.sp.gov.br/>. As informações sobre as estações fluviométricas são dadas nas Tabelas 1 e 2 e nas Tabelas 3 e 4 contém as informações sobre as estações pluviométricas.

Tabela 1. Dados das estações fluviométricas da bacia do rio Atibaia.

Município	Prefixo	Nome	Latitude	Longitude	Área (Km²)	Curso d'Água
Itatiba	3D-006	Bairro da Ponte	22°58'59"	46°49'46"	1920,00	Atibaia
Paulínia	4D-009	Acima de Paulínia	22°44'38"	47°07'47"	2738,00	Atibaia

Tabela 2. Dados das estações pluviométricas da bacia do rio Atibaia.

Município	Prefixo	Nome	Altitude	Latitude	Longitude	Bacia
Campinas	D3-002	Salto Grande	690 m	22°56'	46°54'	Atibaia
Vinhedo	E3-017	Vinhedo	700 m	23°02'	46°58'	Atibaia

Tabela 3. Dados das estações fluviométricas da bacia do rio Jaguari.

Município	Prefixo	Nome	Latitude	Longitude	Área (Km²)	Curso d'Água
Morungaba	3D-009	Buenópolis	22°51'02"	46°46'47"	1950,00	Jaguari
Cosmópolis	4D-001	Usina Ester	22°39'26"	47°12'53"	3394,00	Jaguari

Tabela 4. Dados das estações pluviométricas da bacia do rio Jaguari.

Município	Prefixo	Nome	Altitude	Latitude	Longitude	Bacia
Vargem	D3-018	Vargem	940 m	22°54'	46°25'	Jaguari
Cosmópolis	D4-052	Usina Ester	560 m	22°40'	47°13'	Jaguari

3.2. Metodologia

Para avaliar as alterações hidrológicas da bacia do rio Piracicaba, causadas pela construção do sistema Cantareira comparamos através da análise multifractal e da análise de complexidade a dinâmica da vazão e da precipitação em períodos antes e depois da construção dos reservatórios do sistema Cantareira.

Para diminuir a influência da sazonalidade das séries diárias analisaram-se 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 σ_{V_i} , σ_{P_i} , são os valores médios e o desvio padrão dos dados registrados no dia calendário (anual) [19].

Análise multifractal

A multifractalidade das séries temporais da vazão e da precipitação foram analisadas aplicando o método *Multifractal detrended fluctuation analysis (MF-DFA)* descrito no Capítulo 3. Onde comparamos a largura do espectro multifractal das séries temporais de vazão e de precipitação nos períodos antes e depois da construção dos reservatórios, para avaliar se a dinâmica da vazão foi alterada, e se essa alteração é consequência dos fatores naturais ou antrópicos. A aplicação do método *Multifractal cross-correlation analysis (MF-DXA)*, descrito no Capítulo 3, providência as informações sobre a natureza das correlações cruzadas entre as séries de vazão e de precipitação, também comparando períodos antes e depois da construção dos reservatórios do sistema Cantareira.

Análise de complexidade

A influência do sistema Cantareira na dinâmica da vazão também pode ser avaliada analisando a complexidade das séries temporais nos períodos antes e depois da construção dos reservatórios. Aplicamos o método *Sample entropy (SampEn)* descrito no Capítulo 3. Este método desenvolvido para análise de sinais fisiológicos, recentemente foi aplicado em dados hidrológicos e mostrou-se promissor em detectar alterações causadas pelas atividades humanas. A sincronização entre as séries de vazão e de precipitação analisou-se utilizando o método *Cross-sample entropy (Cross-SampEn)*, descrito no Capítulo 3. Mais informações sobre a complexidade destes processos (nos períodos antes e depois da construção dos reservatórios) nas escalas diferentes foram obtidas utilizando o método *Multiscale sample entropy (MSE)*, descrito no Capítulo 3.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As Figuras 6-13 representam os gráficos dos dados originais da vazão e da precipitação das bacias dos rios Atibaia e Jaguari, antes e depois da construção dos reservatórios do sistema Cantareira.

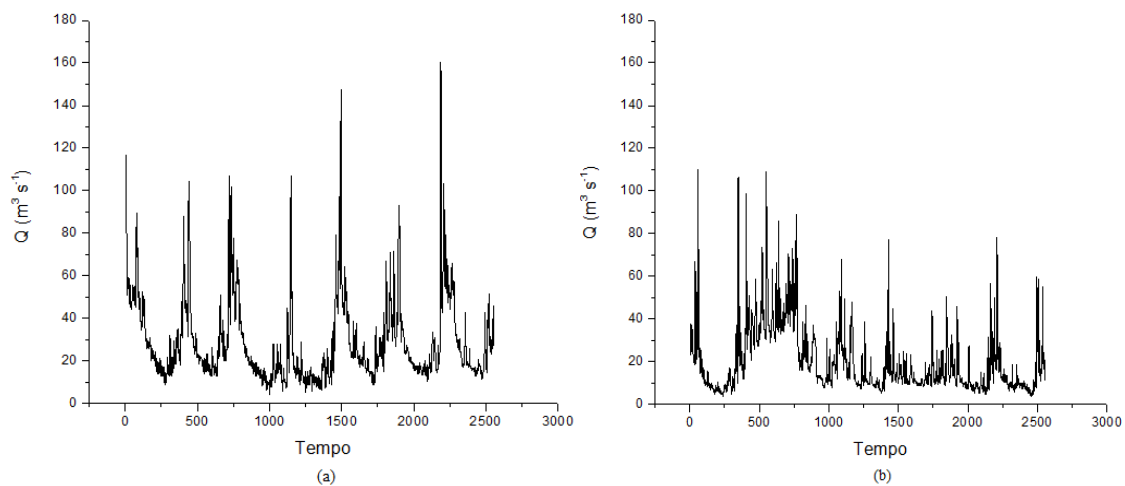


Figura 6. Séries temporais de vazão (Q) do rio Atibaia (estação 3D-006) para os períodos de 1961 a 1967 (a) e de 1975 a 1981 (b).

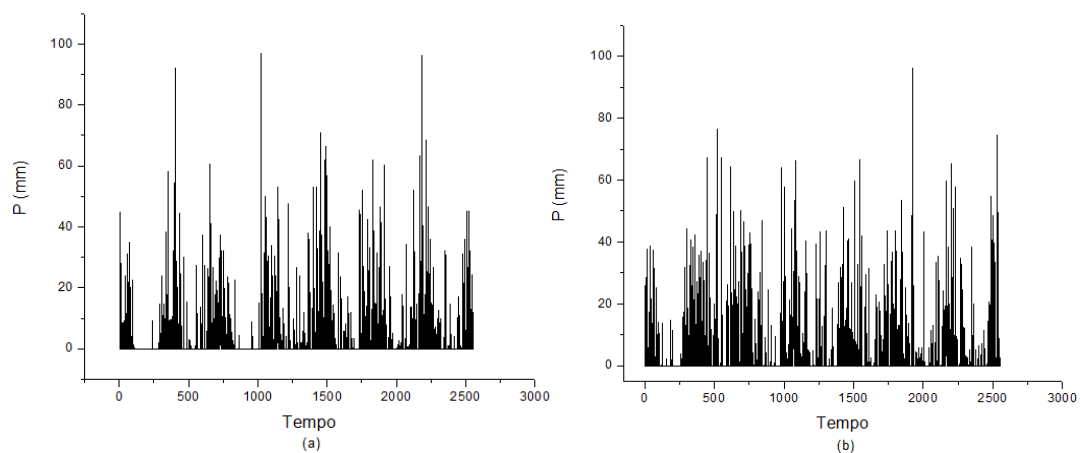


Figura 7. Séries temporais da precipitação (P) do rio Atibaia (estação D3-002) para os períodos de 1961 a 1967 (a) e de 1975 a 1981 (b).

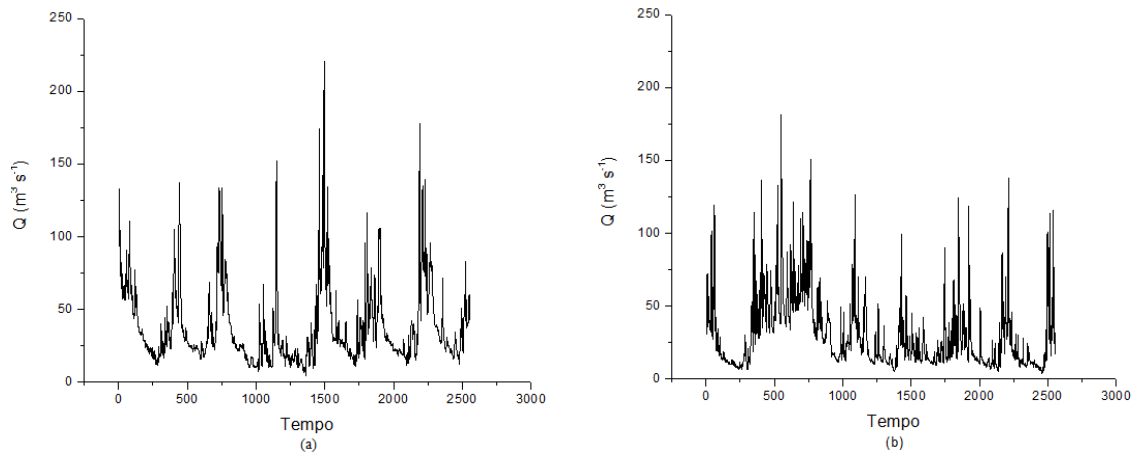


Figura 8. Séries temporais de vazão (Q) do rio Atibaia (estação 4D - 009) para os períodos de 1961 a 1967 (a) e de 1975 a 1981 (b).

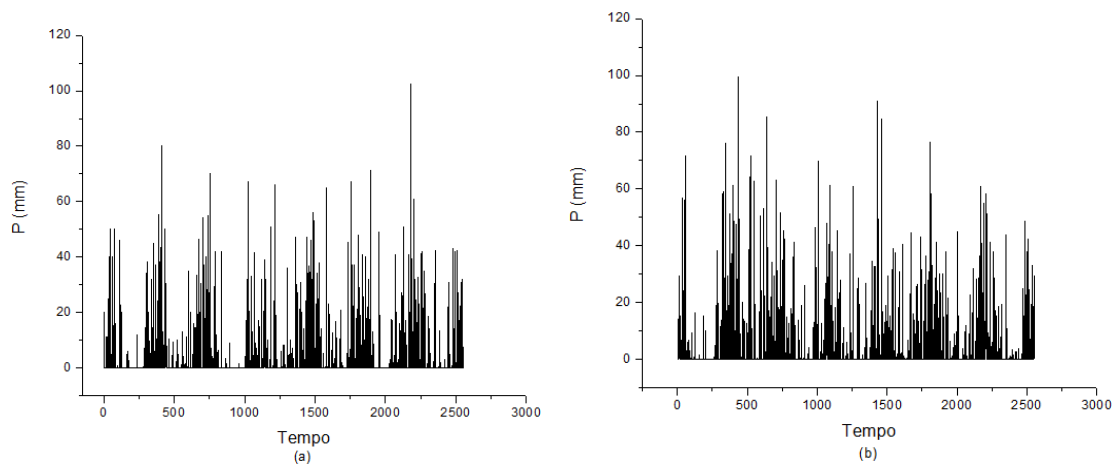


Figura 9. Séries temporais da precipitação (P) do rio Atibaia (estação E3 - 017) para os períodos de 1961 a 1967 (a) e de 1975 a 1981(b).

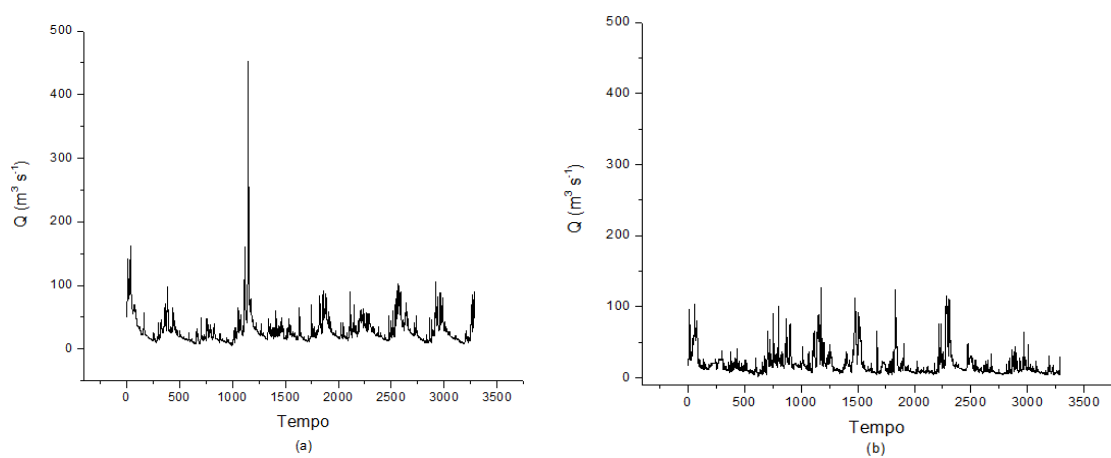


Figura 10. Séries temporais de vazão (Q) do rio Jaguari (estação 3D - 009) para os períodos de 1967 a 1975 (a) e de 1985 a 1993 (b).

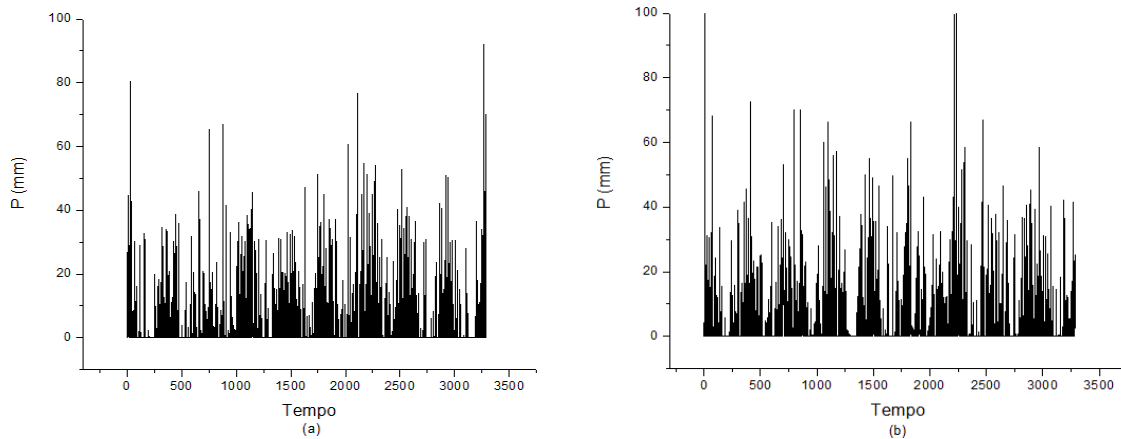


Figura 11. Séries temporais da precipitação (P) do rio Jaguarí (estação D3 - 018) para os períodos de 1967 a 1975 (a) e de 1985 a 1993(b).

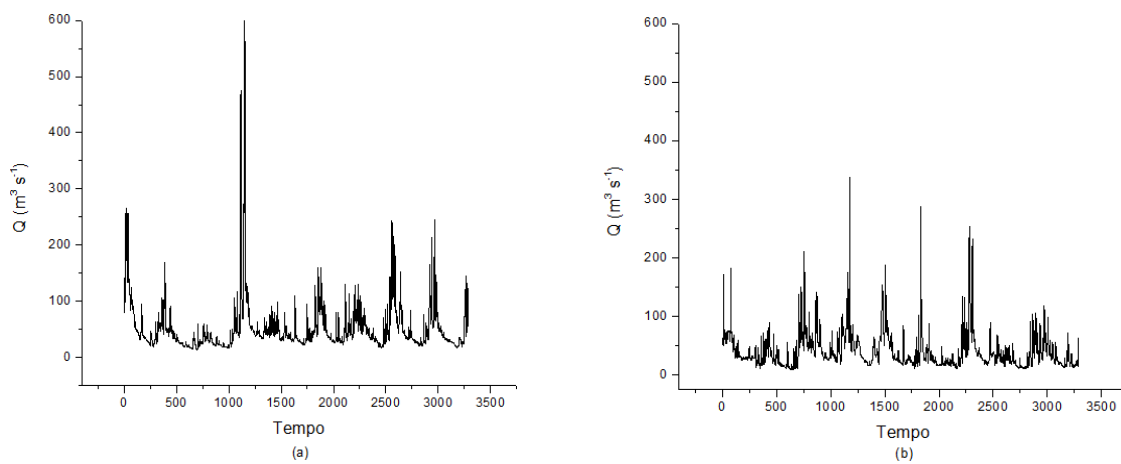


Figura 12. Séries temporais de vazão (Q) do rio Jaguarí (estação 4D - 001) para os períodos de 1967 a 1975 (a) e de 1985 a 1993(b).

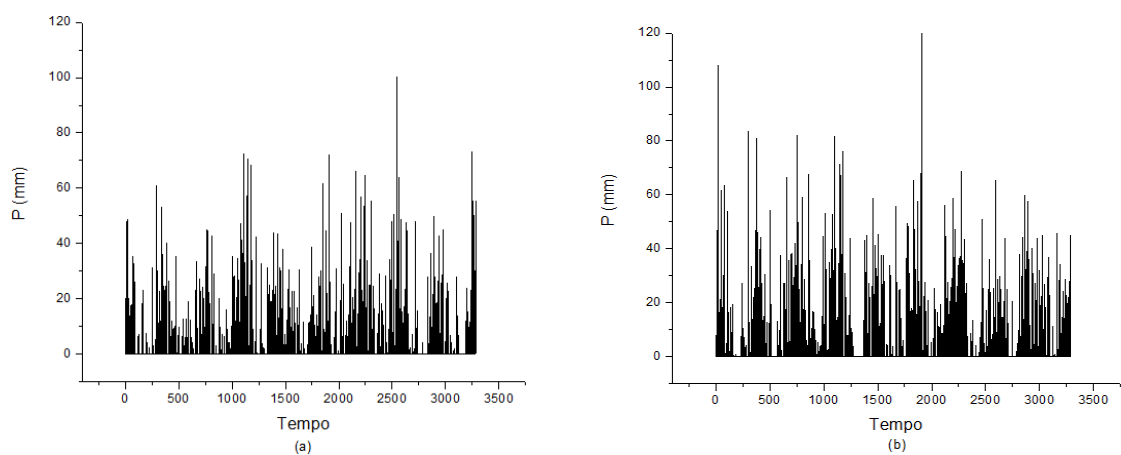


Figura 13. Séries temporais da precipitação (P) do rio Jaguarí (estação D4 - 052) para os períodos de 1967 a 1975 (a) e de 1985 a 1993 (b).

As Figuras 14-21 representam os gráficos das anomalias da vazão e da precipitação das bacias dos rios Atibaia e Jaguari, antes e depois da construção dos reservatórios do sistema Cantareira [19].

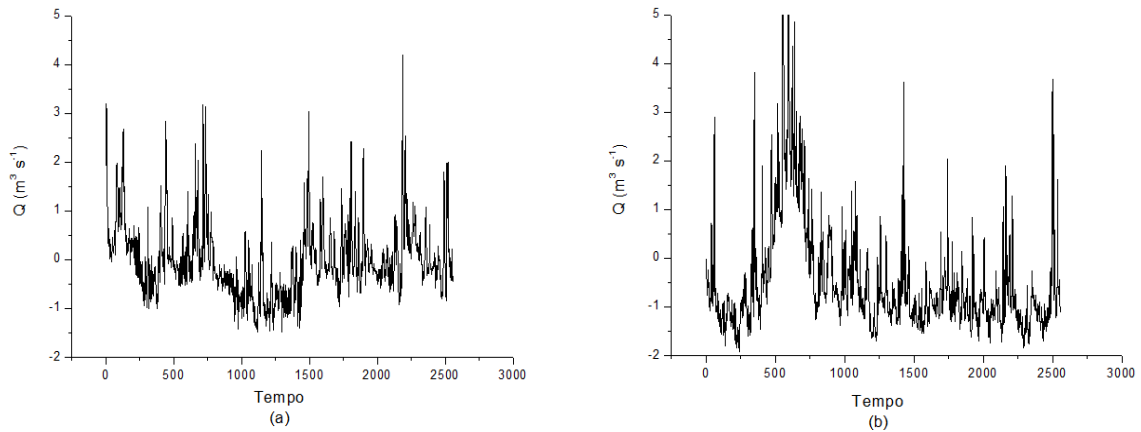


Figura 14. Séries temporais de anomalias de vazão (Q) do rio Atibaia (estação 3D - 006) para os períodos de 1961 a 1967 (a) e de 1975 a 1981 (b).

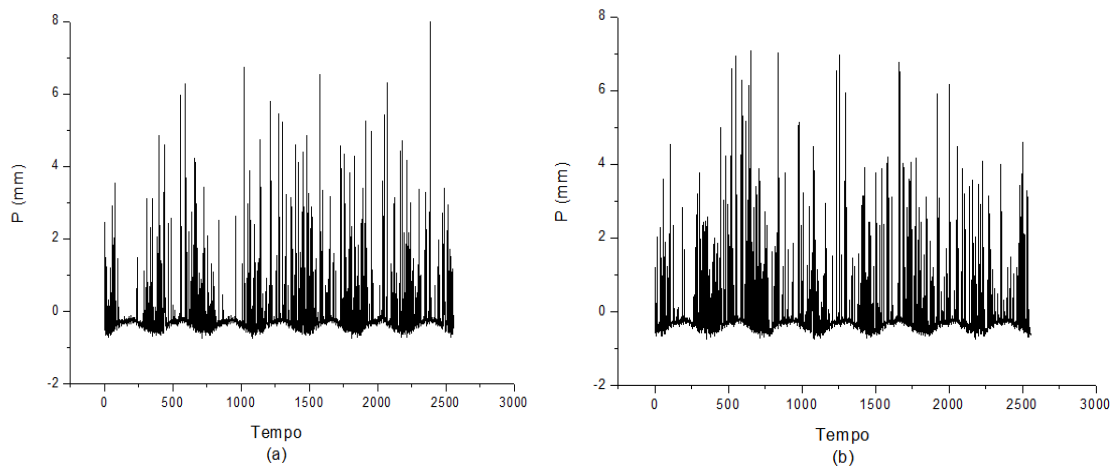


Figura 15. Séries temporais de anomalias da precipitação (P) do rio Atibaia (estação 3D - 002) para os períodos de 1961 a 1967 (a) e de 1975 a 1981 (b).

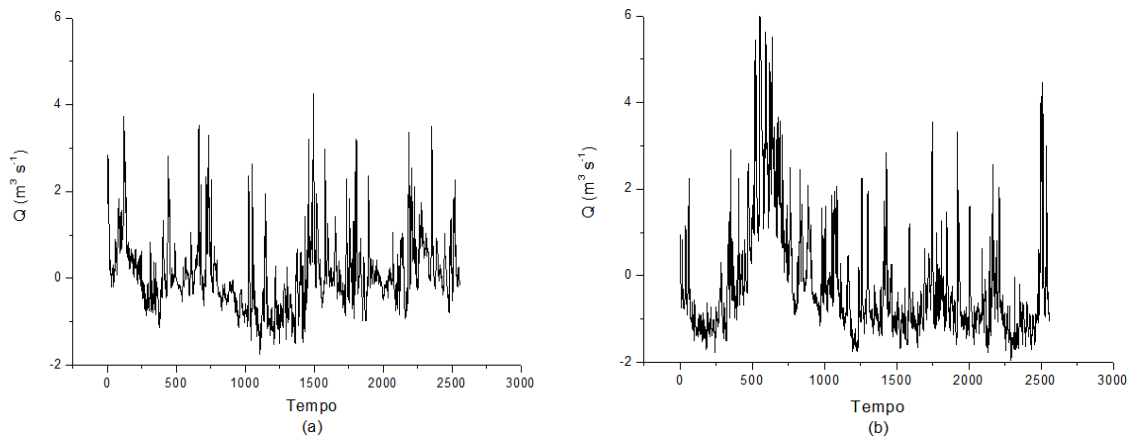


Figura 16. Séries temporais de anomalias de vazão (Q) do rio da bacia Atibaia (estação 4D - 009) para os períodos de 1961 a 1967 (a) e de 1975 a 1981 (b).

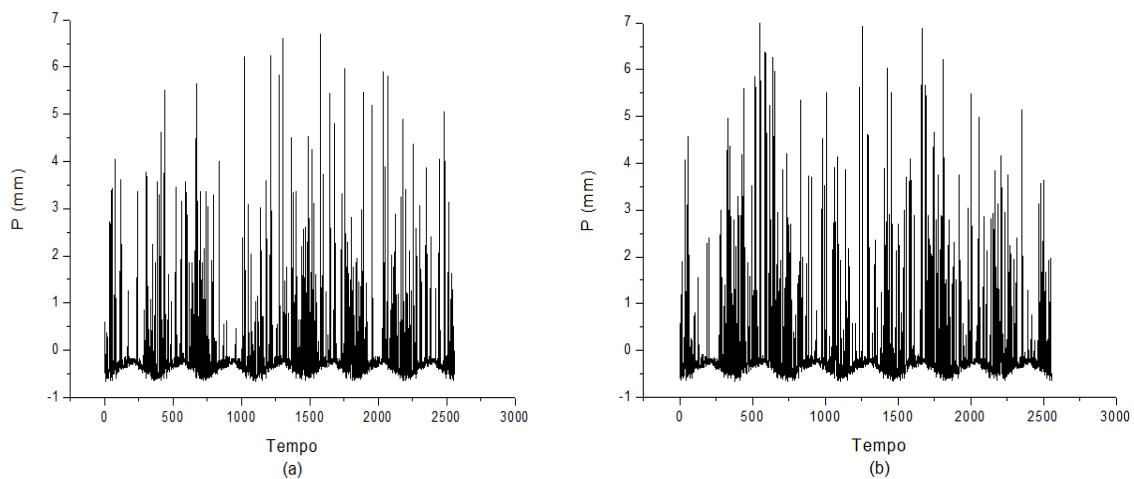


Figura 17. Séries temporais de anomalias da precipitação (P) do rio Atibaia (estação E3 - 017) para os períodos de 1961 a 1967 (a) e de 1975 a 1981 (b).

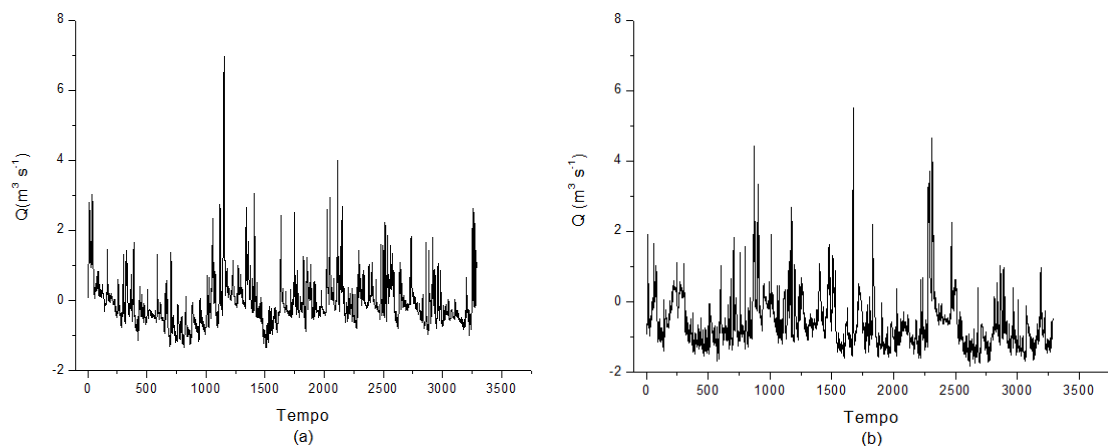


Figura 18. Séries temporais de anomalias da vazão (Q) do rio Jaguari (estação 3D - 009) para os períodos de 1967 a 1975 (a) e de 1985 a 1993 (b).

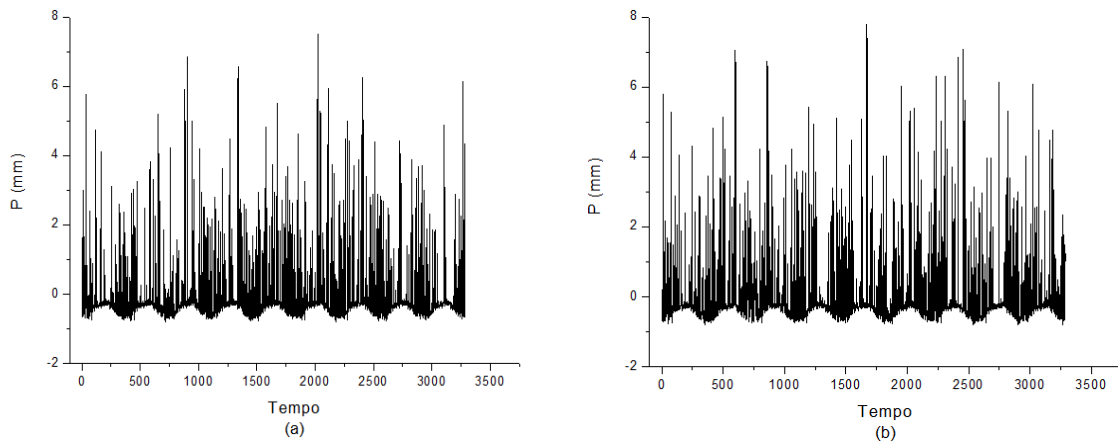


Figura 19. Séries temporais de anomalias da precipitação (P) do rio Jaguarí (estação D3 - 018) para os períodos de 1967 a 1975 (a) e de 1985 a 1993 (b).

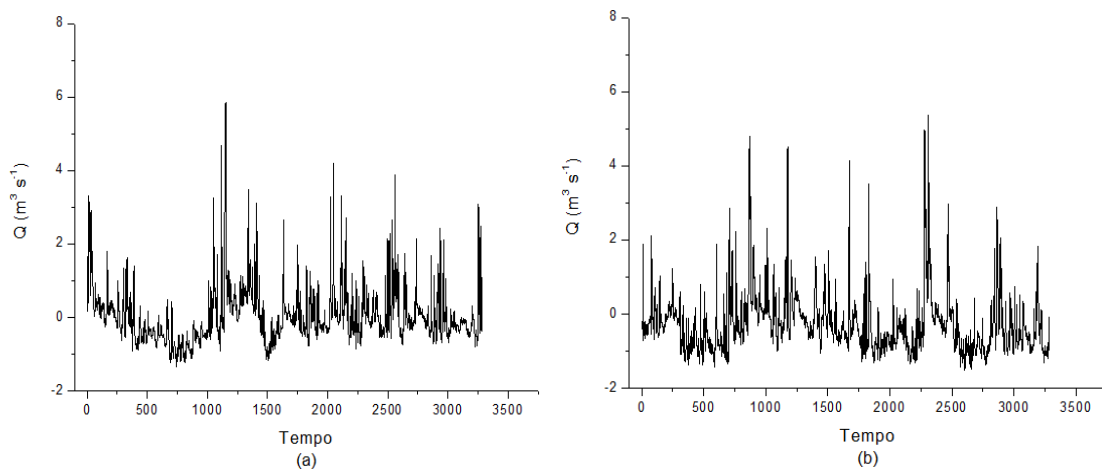


Figura 20. Séries temporais de anomalias da vazão (Q) do rio Jaguarí (estação 4D - 001) para os períodos de 1967 a 1975 (a) e de 1985 a 1993 (b).

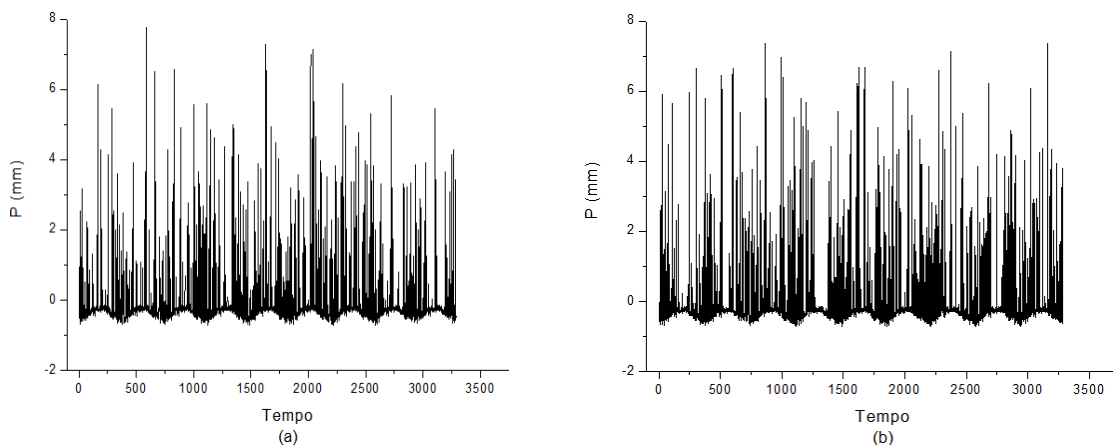


Figura 21. Séries temporais de anomalias da precipitação (P) do rio Jaguarí (estação D4 - 052) para os períodos de 1967 a 1975 (a) e de 1985 a 1993 (b).

A estatística descritiva obtida dos dados das sub-bacias dos rios Atibaia e Jaguari referentes às estações fluviométricas e pluviométricas são apresentadas nas Tabelas de 5 a 8.

Tabela 5. Estatística descritiva dos dados fluviométricos (m^3s^{-1}) 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
4D-009	61 - 67	4.7	220.3	37.8	26.7
	75 - 81	3.7	181.6	30	23.6

Tabela 6. Estatística descritiva dos dados pluviométricos ($mm. dia^{-1}$) da bacia do rio Atibaia.

Estação	Amostra	Mínimo	Máximo	Média	D. Padrão
D3-002	61 - 67	0.00	96.8	3.5	9.3
	75 - 81	0.00	96.2	3.9	9.7
E3-017	61 - 67	0.00	102.5	3.4	9.3
	75 - 81	0.00	99.4	3.9	10.3

Tabela 7. Estatística descritiva dos dados fluviométricos (m^3s^{-1}) da bacia do rio Jaguari.

Estação	Amostra	Mínimo	Máximo	Média	D. Padrão
3D-009	67 - 75	4.9	452	30.5	24.3
	85 - 93	1.9	127.1	19.5	17
4D-001	67 - 75	13.5	624.4	51.4	45.5
	85 - 93	8.3	336.9	40.3	30.9

Tabela 8. Estatística descritiva dos dados pluviométricos ($mm. dia^{-1}$) da bacia do rio Jaguari.

Estação	Amostra	Mínimo	Máximo	Média	D. Padrão
D3-018	67 - 75	0.00	92.1	3.7	8.7
	85 - 93	0.00	110	4.1	9.8
D4-052	67 - 75	0.00	100.2	3.3	8.8
	85 - 93	0.00	135.9	4.1	10.6

Podemos observar que nas estações fluviométricas, os valores médios, mínimos e máximos de vazão diminuíram depois da construção dos reservatórios, enquanto os valores médios e máximos da precipitação aumentaram no mesmo período, para todas as estações pluviométricas. Considerando que a precipitação é o maior fator natural que influi a vazão, estes resultados indicam que a construção do Sistema Cantareira influenciou o regime hidrológico da bacia nos pontos investigados. Estes resultados são semelhantes aos resultados obtidos em estudos anteriores [28].

Análise multifractal

As Figuras 22-45 apresentam os resultados da análise multifractal para as séries temporais diárias das anomalias da vazão e da precipitação das sub-bacias dos rios Atibaia e Jaguari.

As Figuras 22-29 mostram o expoente de *Hurst* generalizado $h(q)$, as Figuras 30-37 mostram o expoente de *Rényi* $\tau(q)$ e as Figuras 38-41 mostram o espectro multifractal $f(\alpha)$ para as anomalias da vazão e da precipitação das sub-bacias dos rios Atibaia e Jaguari para os períodos antes e depois da construção dos reservatórios do sistema Cantareira.

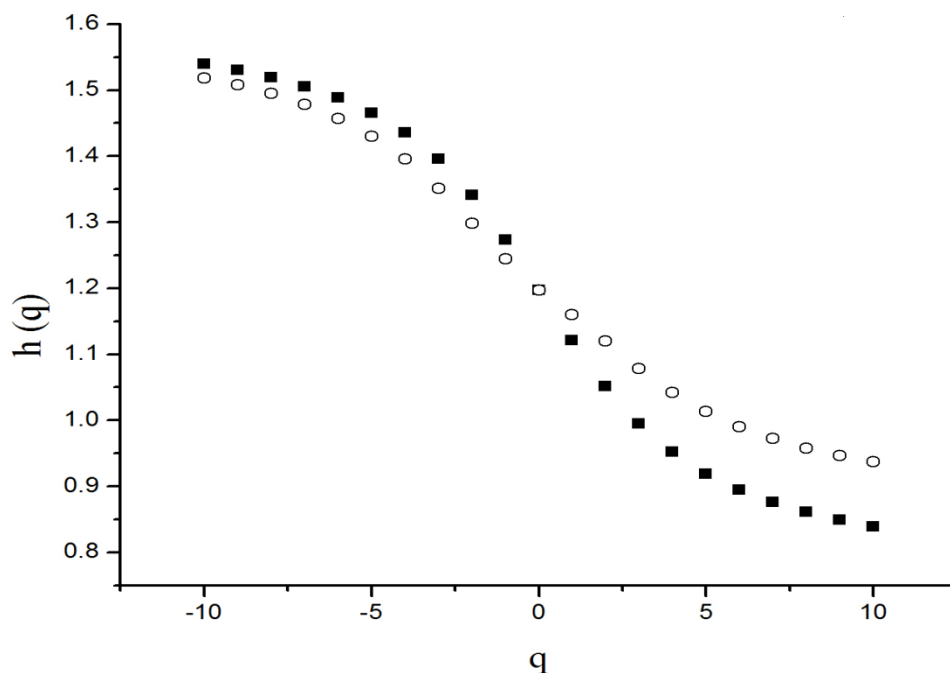


Figura 22. Expoente de *Hurst* generalizado $h(q)$ para vazão do rio Atibaia (estação 3D-006) para os períodos de 1961 a 1967 (\circ) e de 1975 a 1981 (\blacksquare).

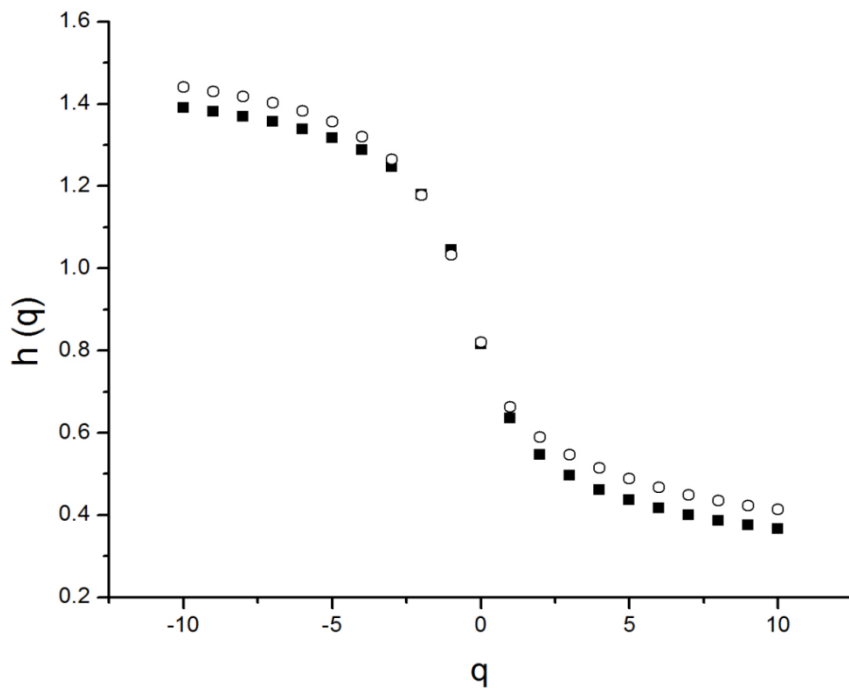


Figura 23. Expoente de *Hurst* generalizado $h(q)$ para precipitação do rio Atibaia (estação D3-002) para os períodos de 1961 a 1967 (◯) e de 1975 a 1981 (◼).

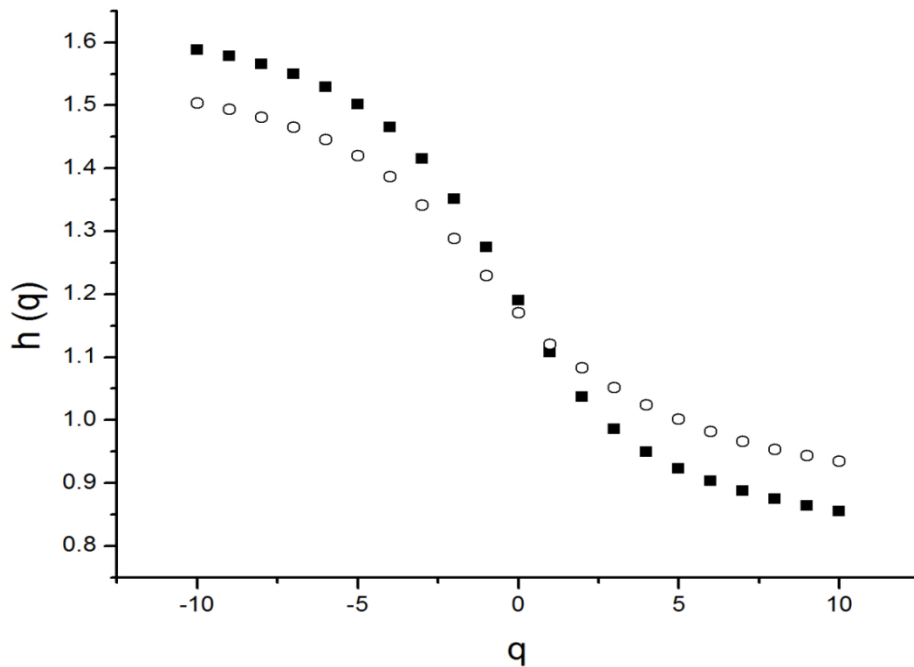


Figura 24. Expoente de *Hurst* generalizado $h(q)$ para vazão do rio Atibaia (estação 4D-009) para os períodos de 1961 a 1967 (◯) e de 1975 a 1981 (◼).

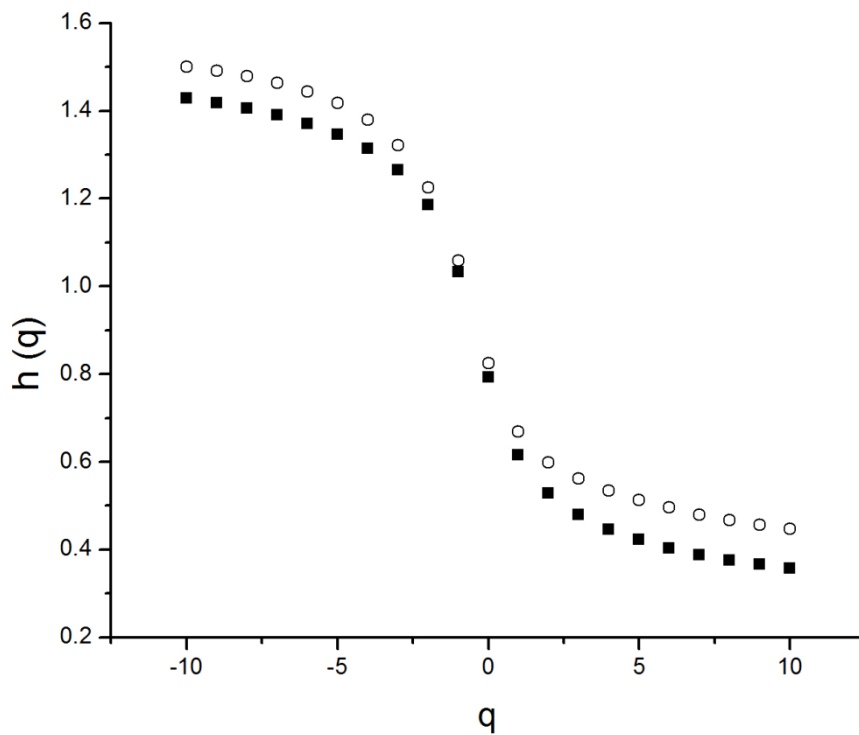


Figura 25. Expoente de *Hurst* generalizado $h(q)$ para precipitação do rio Atibaia (estação E3-017) para os períodos de 1961 a 1967 (\circ) e de 1975 a 1981 (\blacksquare).

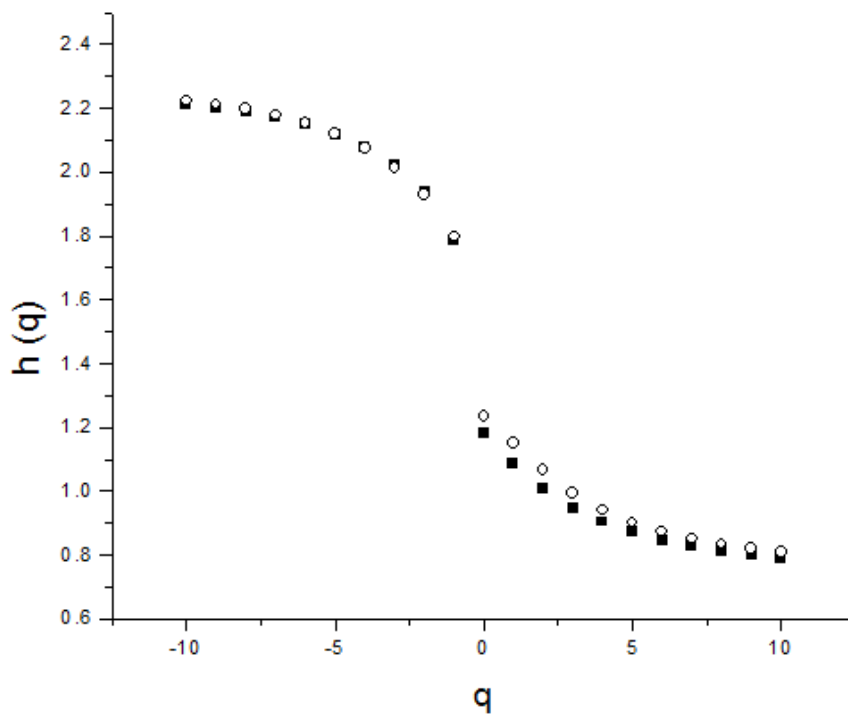


Figura 26. Expoente de *Hurst* generalizado $h(q)$ para vazão do rio Jaguari (estação 3D-009) para os períodos de 1967 a 1975 (\circ) e de 1985 a 1993 (\blacksquare).

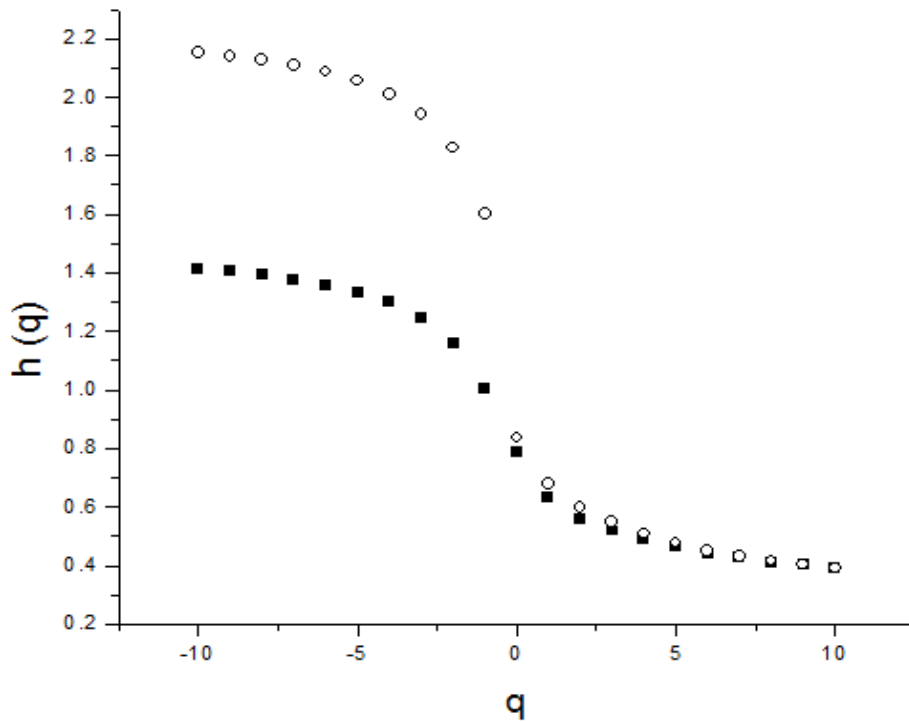


Figura 27. Expoente de *Hurst* generalizado $h(q)$ para precipitação do rio Jaguari (estação D3-018) para os períodos de 1967 a 1975 (\circ) e de 1985 a 1993 (\blacksquare).

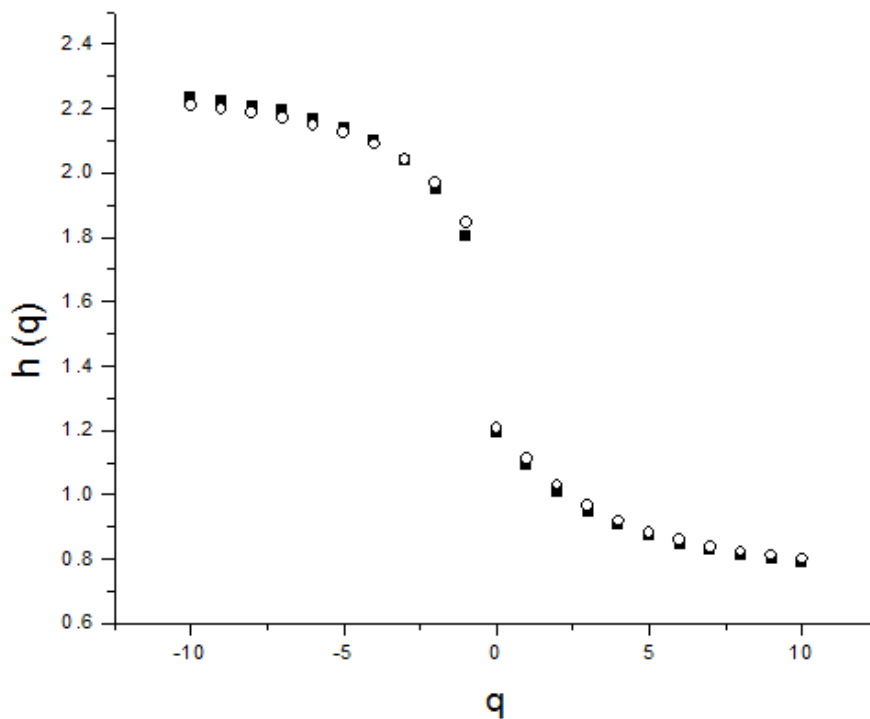


Figura 28. Expoente de *Hurst* generalizado $h(q)$ para vazão do rio Jaguari (estação 4D-001) para os períodos de 1967 a 1975 (\circ) e de 1985 a 1993 (\blacksquare).

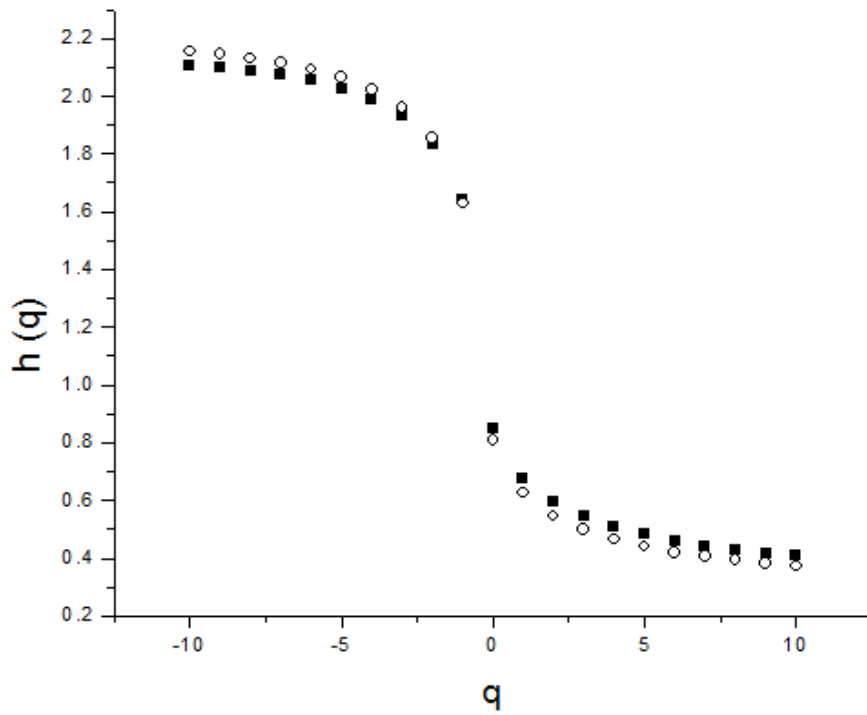


Figura 29. Expoente de *Hurst* generalizado $h(q)$ para precipitação do rio Jaguari (estação D4-052) para os períodos de 1967 a 1975 (\circ) e de 1985 a 1993 (\blacksquare).

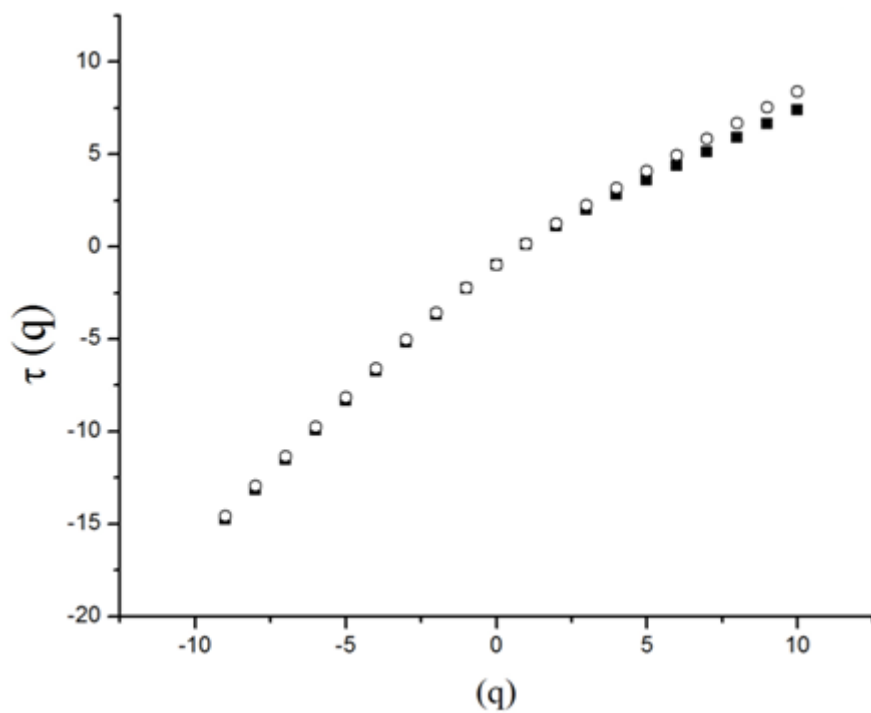


Figura 30. Expoente *Rényi* $\tau(q)$ para vazão do rio Atibaia (estação 3D-006) para os períodos de 1961 a 1967 (\circ) e de 1975 a 1981 (\blacksquare).

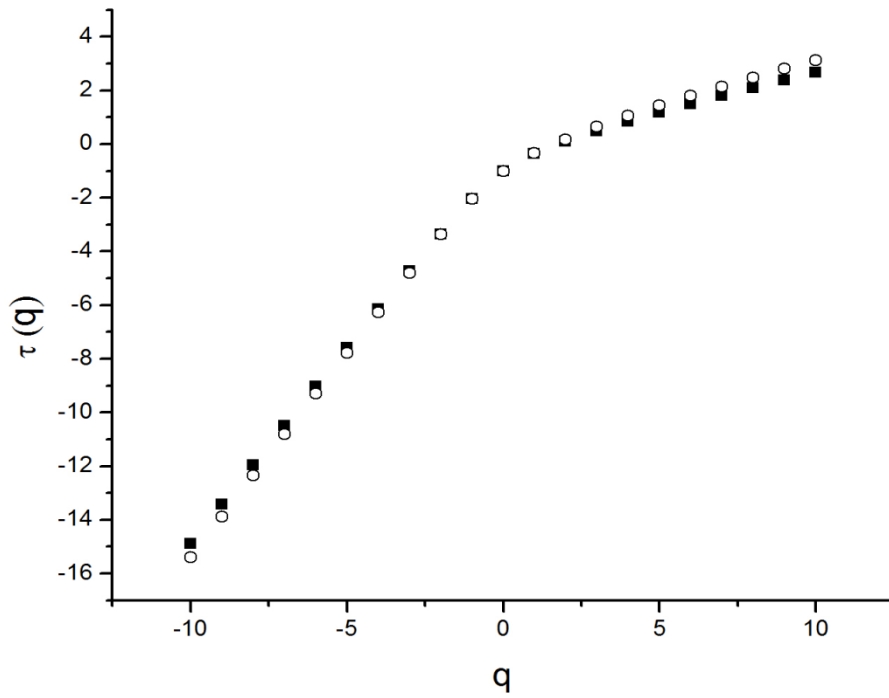


Figura 31. Expoente Rényi $\tau(q)$ para precipitação do rio Atibaia (estação D3-002) para os períodos de 1961 a 1967 (\circ) e de 1975 a 1981 (\blacksquare).

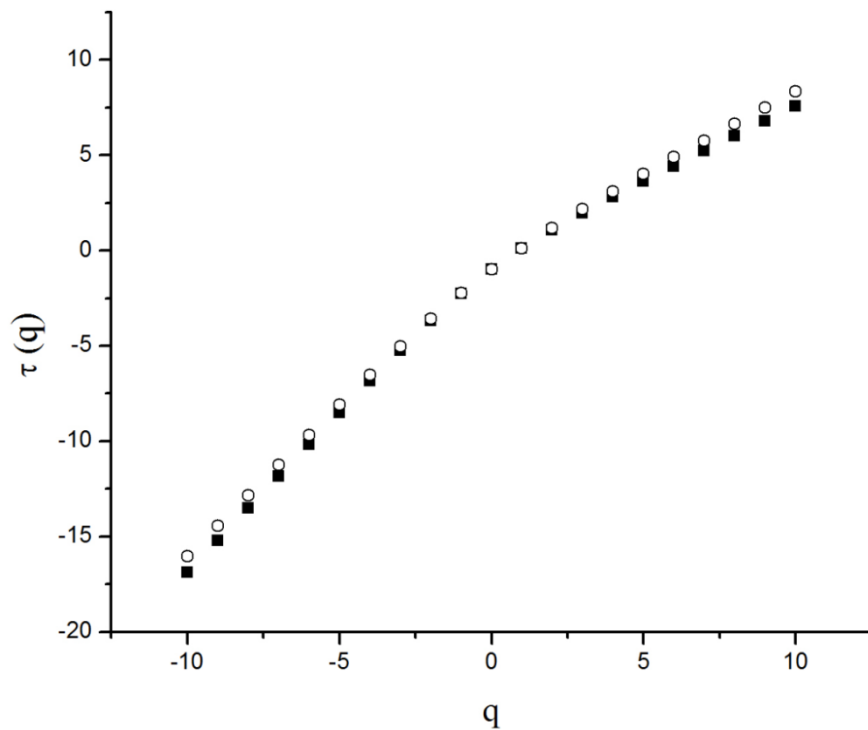


Figura 32. Expoente Rényi $\tau(q)$ para vazão do rio Atibaia (estação 4D - 009) para os períodos de 1961 a 1967 (\circ) e de 1975 a 1981 (\blacksquare).

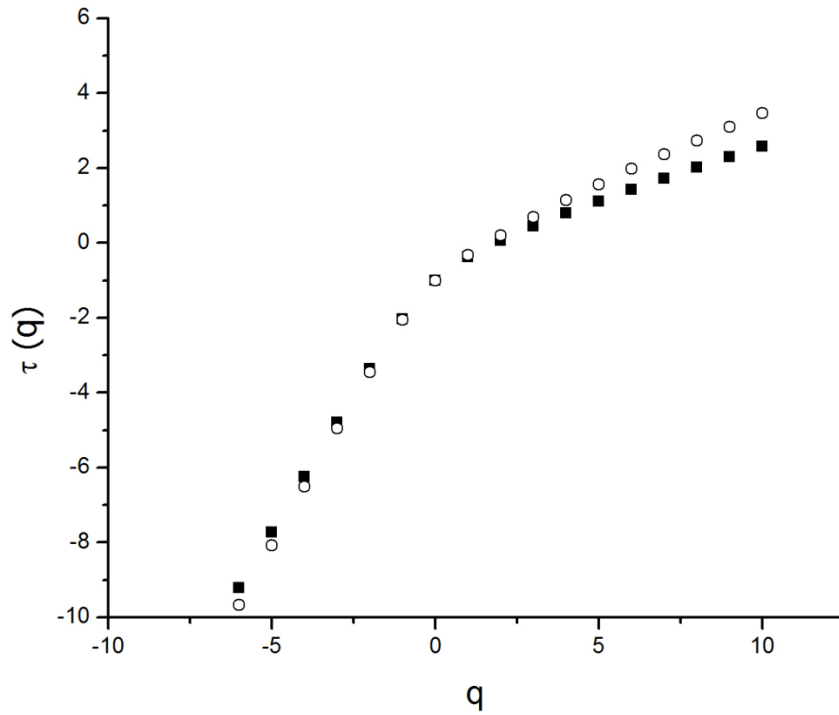


Figura 33. Expoente Rényi $\tau(q)$ para precipitação do rio Atibaia (estação E3-017) para os períodos de 1961 a 1967 (\circ) e de 1975 a 1981 (\blacksquare).

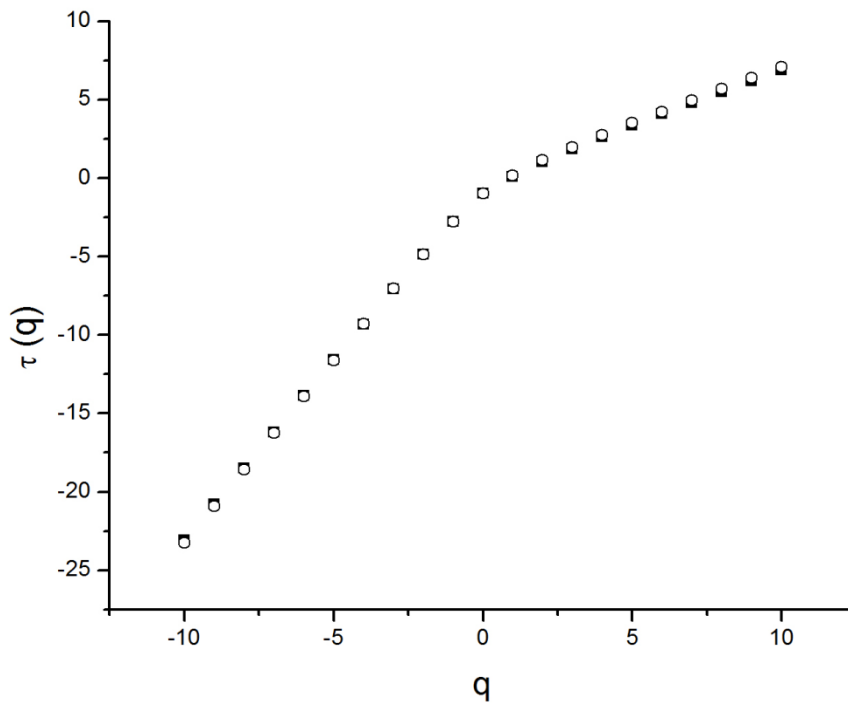


Figura 34. Expoente Rényi $\tau(q)$ para vazão do rio Jaguari (estação 3D - 009) para os períodos de 1967 a 1975 (\circ) e de 1985 a 1993 (\blacksquare).

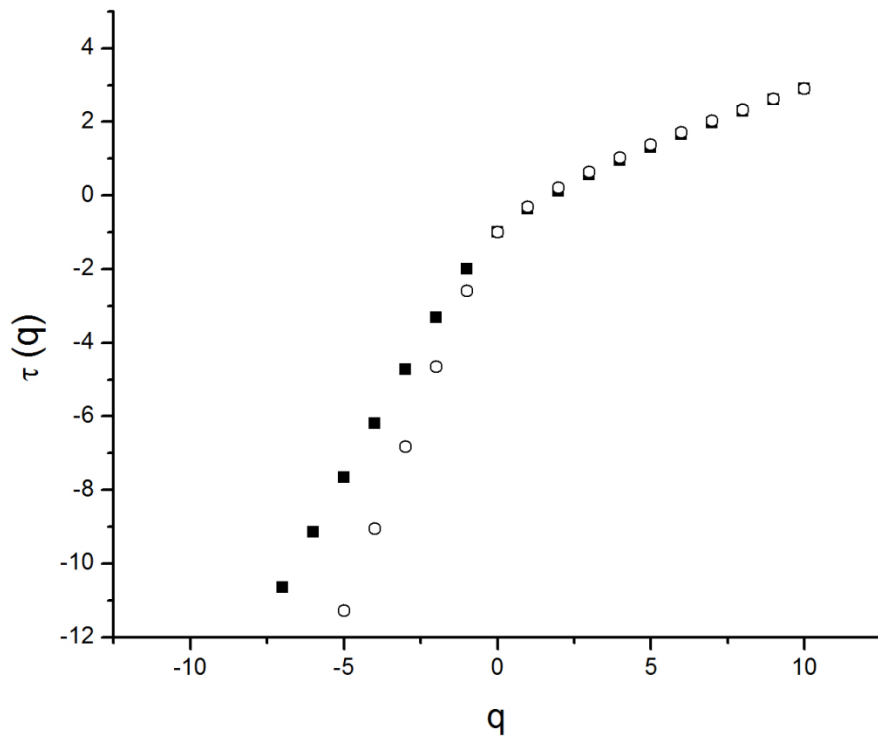


Figura 35. Expoente Rényi $\tau(q)$ para precipitação do rio Jaguari (estação D3-018) para os períodos de 1967 a 1975 (\circ) e de 1985 a 1993 (\blacksquare).

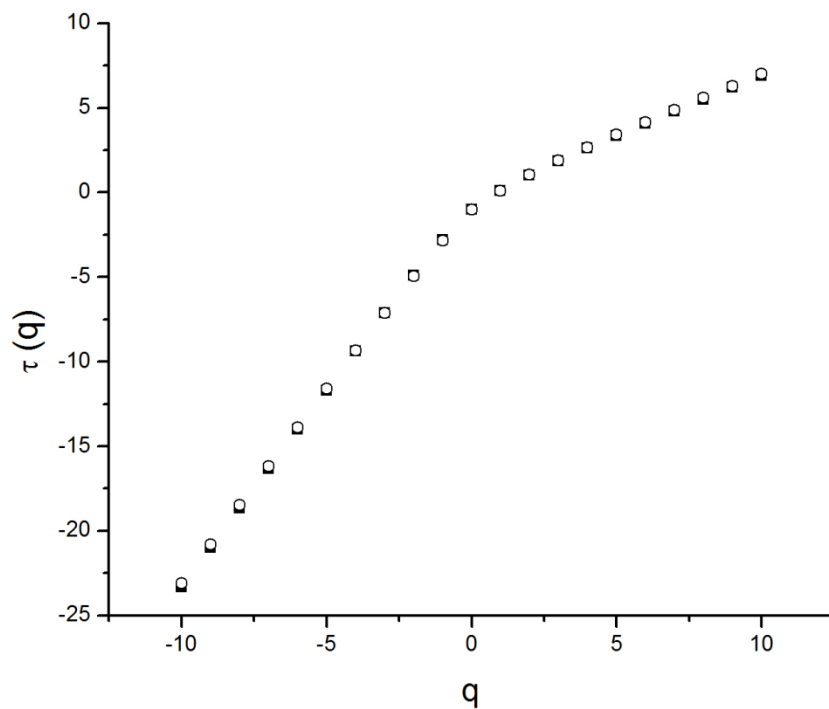


Figura 36. Expoente Rényi $\tau(q)$ para vazão do rio Jaguari (estação 4D - 001) para os períodos de 1967 a 1975 (\circ) e de 1985 a 1993 (\blacksquare).

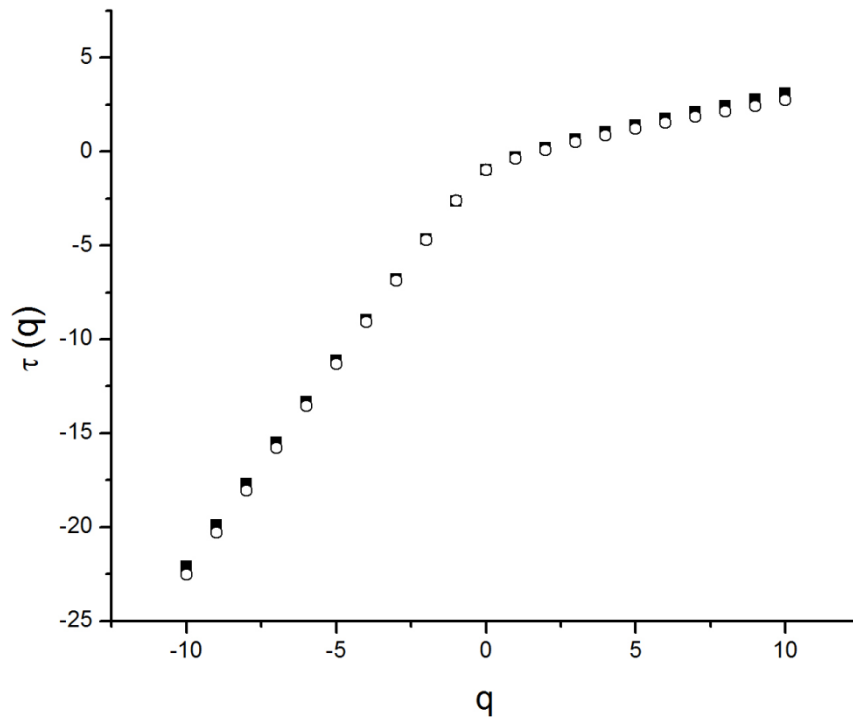


Figura 37. Expoente Rényi $\tau(q)$ para precipitação do rio Jaguarí (estação D4 - 052) para os períodos de 1967 a 1975 (\circ) e de 1985 a 1993 (\blacksquare).

As Figuras 38-41 mostram o espectro multifractal $f(\alpha)$ para as anomalias da vazão e da precipitação das sub-bacias dos rios Atibaia e Jaguarí para os períodos antes e depois da construção dos reservatórios do sistema Cantareira.

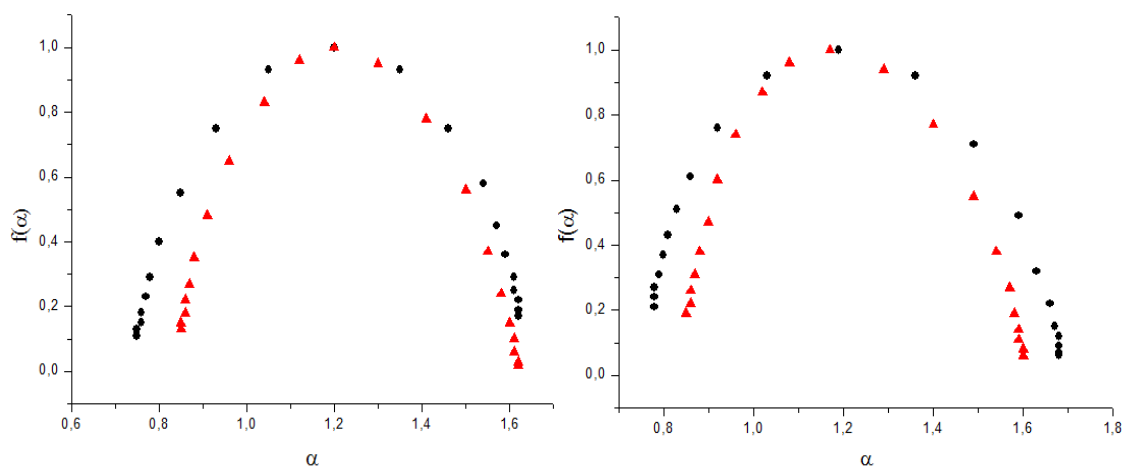


Figura 38. Espectro multifractal $f(\alpha)$ de vazão da sub-bacia do rio Atibaia para as estações fluviométricas 3D-006 e 4D-009 para os períodos de 1961 a 1967 (\bullet) e de 1975 a 1981 (\blacktriangle).

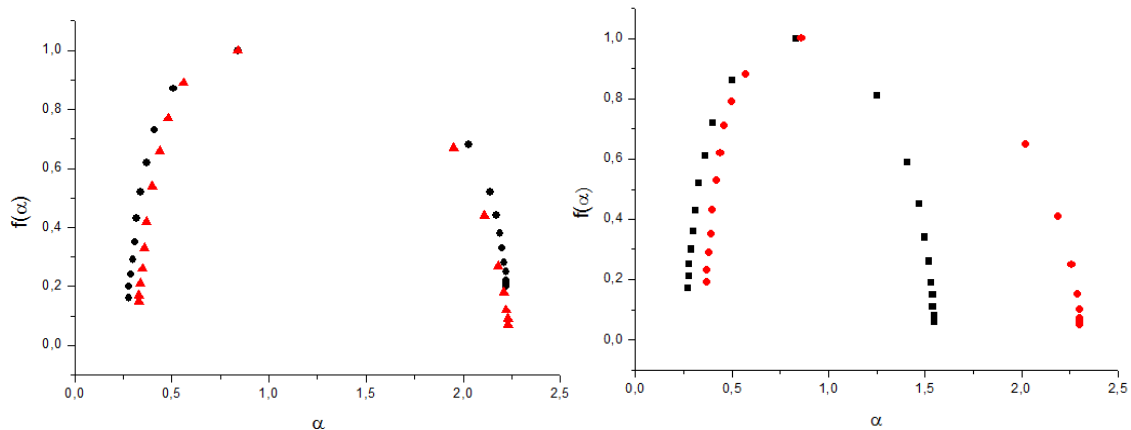


Figura 39. Espectro multifractal $f(\alpha)$ da precipitação da sub-bacia do rio Atibaia para as estações pluviométricas D3-002 e E3-017 para os períodos de 1961 a 1967 (●) e de 1975 a 1981 (▲).

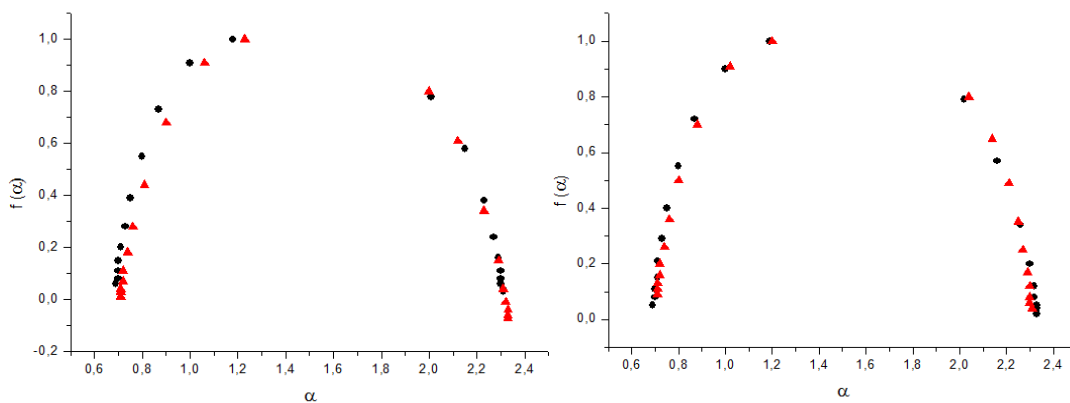


Figura 40. Espectro multifractal $f(\alpha)$ de vazão da sub-bacia rio Jaguarí para as estações 3D-009 e 4D-001 para os períodos de 1967 a 1975 (●) e de 1985 a (▲).

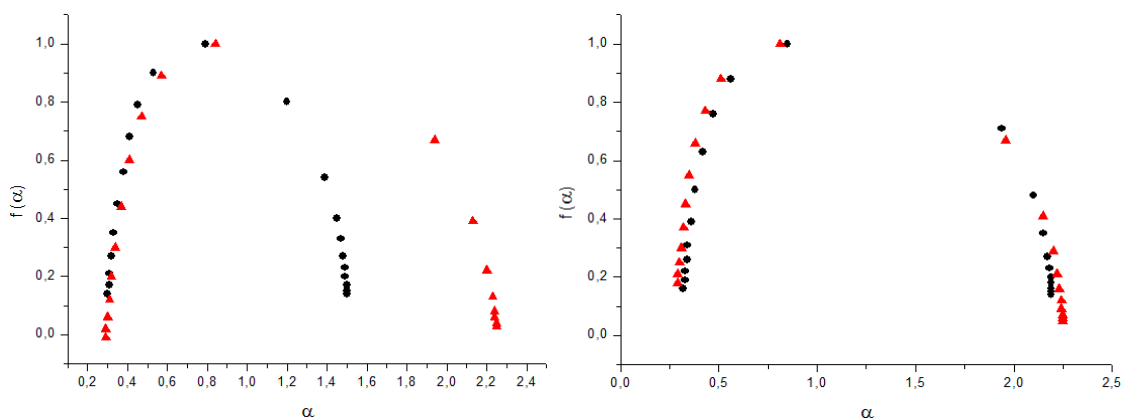


Figura 41. Espectro multifractal $f(\alpha)$ da precipitação da sub-bacia do rio Jaguarí para as estações D3-018 e D4-052 para os períodos de 1967 a 1975 (●) e de 1985 a 1993 (▲).

A amplitude do expoente de *Hurst* generalizado, a convexidade do expoente de *Rényi* e a largura do espectro multifractal podem ser utilizados para avaliar o grau de multifractalidade do processo. Para verificar se a multifractalidade foi causada pela função densidade de probabilidade dos valores da série ou pelas correlações diferentes em subconjuntos com grandes e com pequenas flutuações aplicamos o método *MF-DFA* nas séries temporais randomizadas.

A largura do espectro multifractal $\Delta\alpha = \alpha_{m\acute{a}x} - \alpha_{m\acute{i}n}$ (que é o melhor indicador do grau de multifractalidade de um processo estocástico – maior $\Delta\alpha$ significa multifractalidade maior), para todas as estações e para as séries temporais originais e randomizadas está apresentada na Tabela 9.

As amostras apresentadas na Tabela 9 foram escolhidas baseando-se no período de construção dos reservatórios e nos períodos com dados simultâneos para vazão e precipitação das estações dos rios Atibaia e Jaguari.

Tabela 9. *MF-DFA* ($\Delta\alpha$) das séries temporais de vazão e de precipitação das bacias dos rios Atibaia e Jaguari.

Atibaia				Jaguari			
Estação	Período	$\Delta\alpha1$	$\Delta\alpha2$	Estação	Período	$\Delta\alpha1$	$\Delta\alpha2$
3D-006	61 - 67	0.94	0.46	3D-009	67 - 75	1.14	0.64
	75 - 81	0.83	0.64		85 - 93	1.11	0.45
4D-009	61 - 67	0.98	0.42	4D-001	67 - 75	1.12	0.59
	75 - 81	0.81	0.53		85 - 93	1.01	0.52
D3-002	61 - 67	1.29	0.91	D3-018	67 - 75	1.29	0.73
	75 - 81	1.30	1.05		85 - 93	1.40	0.92
E3-017	61 - 67	1.34	0.93	D4-052	67 - 75	1.31	0.88
	75 - 81	1.33	1.03		85 - 93	1.40	0.88

$\Delta\alpha1$: Séries originais
 $\Delta\alpha2$: Séries randomizadas

A Tabela 10 mostra os resultados do *MF-DFA* para as amostras com duração maior de vazão para as estações 3D-006 (Atibaia) e 3D-009 (Jaguari). Observou-se que a largura do espectro multifractal diminui depois da randomização das séries indicando que as propriedades da função densidade de probabilidade dos valores e das correlações temporais contribuem para a multifractalidade das vazões.

Tabela 10. *MF-DFA* ($\Delta\alpha$) das séries temporais de vazão dos rios Atibaia e Jaguari.

Estações	Período	$\Delta\alpha$ (originais)	$\Delta\alpha$ (randomizadas)
3D-006	30 - 74	0.86	0.37
	53 - 74	0.92	0.45
	75 - 97	0.66	0.48
3D-009	30 - 81	0.97	0.42
	68 - 81	0.95	0.47
	84 - 97	0.94	0.49

Em todos os gráficos e nas Tabelas 9 e 10 observou-se que a multifractalidade da vazão do rio Atibaia diminuiu depois da construção dos reservatórios indicando menor variedade do tamanho das flutuações que apresentam invariância de escala.

Isso pode comprometer a dinâmica natural da vazão do rio e ameaçar vários componentes do ecossistema correspondente. Por outro lado, a multifractalidade das séries temporais de precipitação não foi alterada depois da construção dos reservatórios indicando que a dinâmica da vazão foi afetada pela atividade humana e não pelos fatores naturais. No caso do rio Jaguari, a multifractalidade das séries de precipitação aumentou depois da construção dos reservatórios, enquanto que não houve alteração na multifractalidade das séries de vazão, mostrando que a atividade humana alterou o regime natural entre os principais componentes dos processos hidrológicos. Esta diferença entre os processos hidrológicos das bacias dos rios Atibaia e Jaguari pode ser a consequência de outros fatores antrópicos e naturais como uso do solo e cobertura vegetal.

Um estudo recente sobre a influência da atividade humana no regime hidrológico do *Pearl River*, China não detectou alterações utilizando a análise multifractal da vazão [88]. A comparação da dinâmica das séries da vazão com a dinâmica das séries de precipitação, em diferentes escalas temporais, antes e depois da intervenção humana, pode providenciar informações sobre alterações de regime natural entre os componentes dos sistemas hidrológicos.

Para obter mais informações sobre os processos hidrológicos antes e depois da construção dos reservatórios do sistema Cantareira analisou-se as correlações cruzadas entre os processos hidrológicos das sub-bacias dos rios Atibaia e Jaguari aplicando-se o método *MF-DXA* nas séries temporais simultâneas de vazão e de precipitação, ver Tabela 11. Os resultados apresentados na Tabela 11 mostram que as correlações

cruzadas entre os dois processos possuem propriedades multifractais que no caso do rio Atibaia foram alterados depois da construção do reservatório, indicado pela diminuição da largura do espectro multifractal. Para o rio Jaguari o espectro *MF-DXA* é mais largo (significando multifractalidade mais forte) e não foi alterado com a construção do reservatório. Esta diferença pode ser a consequência de outros fatores antrópicos e naturais como uso do solo e cobertura vegetal.

Tabela 11. *MF-DXA* ($\Delta\alpha$) das séries temporais de vazão e de precipitação das bacias dos rios Atibaia e Jaguari.

Atibaia			Jaguari		
Estação	Período	$\Delta\alpha$	Estação	Período	$\Delta\alpha$
3D-006/D3-002	61 - 67	0.96	3D-009/D3-018	67 - 75	1.13
	75 - 81	0.79		85 - 93	1.11
4D-009/E3-017	61 - 67	0.94	4D-001/D4-052	67 - 75	1.13
	75 - 81	0.79		85 - 93	1.01

A Tabela 12 apresenta a multifractalidade das correlações cruzadas entre as séries temporais simultâneas da vazão dos rios Atibaia e Jaguari, antes da construção do primeiro reservatório no rio Atibaia (68-74), antes da construção do segundo reservatório no rio Jaguari (75-81) e depois do início do funcionamento dos dois reservatórios (84-90).

Tabela 12. *MF-DXA* ($\Delta\alpha$) das séries temporais de vazão dos rios Atibaia e Jaguari.

Estação	Período	Originais	Randomizadas
3D-006/3D-009	68 - 74	1.08	0.50
	75 - 81	0.79	0.54
	84 - 90	1.14	0.77

Observou-se que a multifractalidade das correlações cruzadas entre as vazões das duas sub-bacias diminuiu depois da construção do primeiro reservatório, resultando em uma menor largura do espectro *MF-DXA*. Depois da construção do segundo reservatório a largura do espectro aumentou, aproximando-se do valor do regime natural (antes da construção dos reservatórios), significando que apesar da diminuição da vazão como consequência da retirada da água da bacia as flutuações cruzadas foram preservadas depois da construção do segundo reservatório.

Análise de complexidade

As Tabelas 13 e 14 apresentam os resultados da análise de *SampEn* e *Cross-SampEn* para as séries temporais de anomalias de vazão e da precipitação das sub-bacias dos rios Atibaia e Jaguari.

Tabela 13. *SampEn* e *Cross-SampEn* das séries temporais de vazão e da precipitação da bacia do rio Atibaia.

Estação	Período	SampEn (r=0.15)	CrossSampEn (r=0.15)
3D-006	61 - 67	0.79	0.33 *
	75 - 81	0.52	0.48 **
4D-009	61 - 67	0.72	0.36 §
	75 - 81	0.53	0.41 §§
D3-002	61 - 67	0.46	
	75 - 81	0.49	
E3-017	61 - 67	0.49	
	75 - 81	0.49	

*3D-006/D3-002 (61-67) §4D-009/E3-017 (61-67)
 ** 3D-006/D3-002 (75-81) §§4D-009/E3-017 (75-81)

Tabela 14. *SampEn* e *Cross-SampEn* das séries temporais de vazão e da precipitação da bacia do rio Jaguari.

Estação	Período	SampEn (r=0.15)	CrossSampEn (r=0.15)
3D-009	67 - 75	0.59	0.35 *
	85 - 93	0.76	0.49 **
4D-001	67 - 75	0.56	0.35 §
	85 - 93	0.59	0.39 §§
D3-018	67 - 75	0.50	
	85 - 93	0.53	
D4-052	67 - 75	0.49	
	85 - 93	0.50	

*3D-009/D3-018 (67-75) §4D-001/D4-052 (61-67)
 ** 3D-009/D4-018 (85-93) §§4D-009/D4-052 (75-81)

Observou-se a diminuição da complexidade da dinâmica da vazão do rio Atibaia depois da construção dos reservatórios (menores valores de *SampEn*), no entanto não houve alteração da complexidade da dinâmica da precipitação. No caso do rio Jaguari observou-se um comportamento diferente: a complexidade da vazão aumentou (maior

valores de *SampEn*), enquanto que não houve alteração na complexidade das séries temporais da precipitação. Essa diferença pode ser causada por outros fatores como uso do solo e cobertura vegetal. Em ambos os casos a sincronização entre vazão e precipitação diminuiu (maiores valores de *Cross-SampEn*) depois da construção dos reservatórios. Todas as alterações observadas são mais fortes para as estações com localização geográfica mais próxima dos reservatórios (3D-006 e 3D-009).

A Tabela 15 mostra os resultados de uma análise mais detalhada da complexidade das séries temporais de vazão. Calculamos *SampEn* para amostras da vazão de cada sub-bacia para os períodos antes e depois da construção dos reservatórios e para amostras de tamanho de 10 anos ao longo do período considerado. A construção dos reservatórios alterou a complexidade da vazão: diminuição da complexidade para o rio Atibaia e aumento da complexidade para o rio Jaguari, estes resultados são semelhantes aos resultados apresentados nas Tabelas 13 e 14.

Os valores de *SampEn* para as séries temporais das anomalias para as amostras de 10 anos mostram que durante o período entre a construção dos reservatórios (75-84) a complexidade da vazão do rio Atibaia diminuiu (menor valor do *SampEn*), seguido pelo aumento da complexidade depois do início do funcionamento dos dois reservatórios (85-94), significando que apesar da diminuição da vazão como consequência da retirada da água da bacia, a dinâmica das flutuações temporais permanece. No caso do rio Jaguari, a complexidade da vazão diminuiu depois da construção dos reservatórios.

Tabela 15. *SampEn* das séries temporais das anomalias de vazão dos rios Atibaia e Jaguari.

Atibaia			Jaguari		
Estação	Período	SampEn (r=0.15)	Estação	Período	SampEn (r=0.15)
3D-006	53 - 74	0.73	3D-009	68 - 81	0.58
	75 - 97	0.57		84 - 97	0.79
Estação	35 - 44	0.62	Estação	35 - 44	0.59
	45 - 54	0.65		45 - 54	0.58
3D-006	55 - 64	0.78	3D-009	55 - 64	0.52
	65 - 74	0.68		65 - 74	0.50
	75 - 84	0.40		75 - 84	0.54
	85 - 94	0.81		85 - 94	0.41

A Tabela 16 apresenta os resultados do *Cross SampEn* entre as séries temporais simultâneas de anomalias da vazão dos rios Atibaia e Jaguari, antes da construção do primeiro reservatório no rio Atibaia (68-74), antes da construção do segundo reservatório no rio Jaguari (75-81) e depois do início do funcionamento dos dois reservatórios (84-90).

Tabela 16. *Cross-SampEn* das séries temporais de vazão das sub-bacias dos rios Atibaia e Jaguari.

Estações	Período	CrossSampEn (r=0.15)
3D-006/3D-009	68 - 74	0.39
	75 - 81	0.36
	84 - 90	0.50

Observou-se que depois da construção do segundo reservatório o valor do *Cross-SampEn* aumentou, significando menor sincronização (maior complexidade) entre os regimes hidrológicos das duas sub-bacias

As Figuras 42-49 apresentam a generalização de *Sample entropy* e as Figuras 50-53 apresentam o *Cross-sample entropy* para múltiplas escalas. Para sub-bacia do rio Atibaia observou-se o aumento de complexidade nas séries temporais de precipitação em escalas de até duas semanas (15 dias) enquanto para o mesmo intervalo de escala observou-se a diminuição de complexidade das séries temporais de vazão depois da construção dos reservatórios (Figuras 42-45), significando que a alteração da dinâmica de vazão causada pela atividade humana pode afetar componentes do ecossistema que operam nestas escalas.

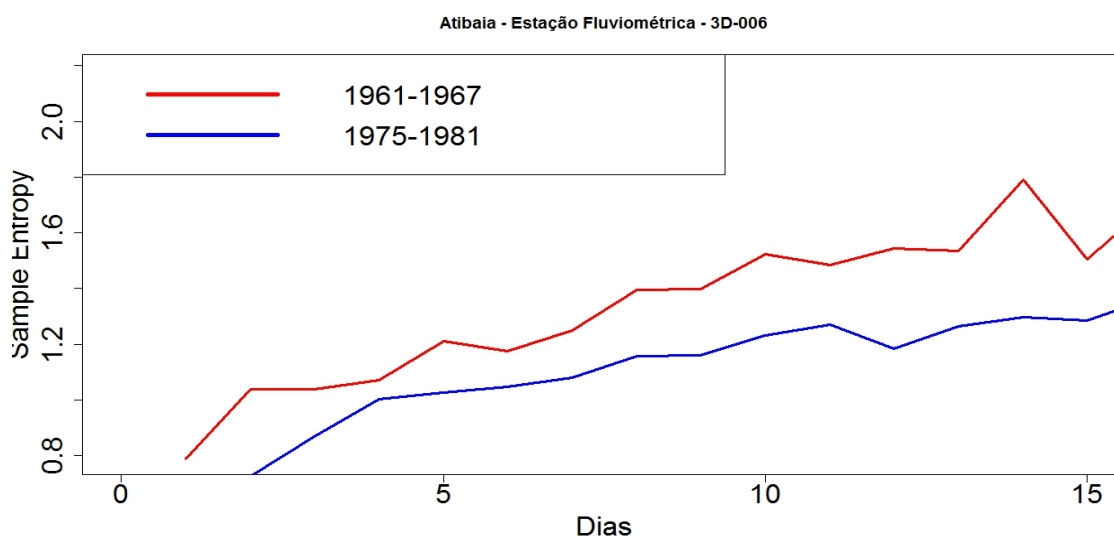


Figura 42. *MSE* das séries temporais de vazão do rio Atibaia (estação 3D - 006) para os períodos de 1961 a 1967 e de 1975 a 1981.

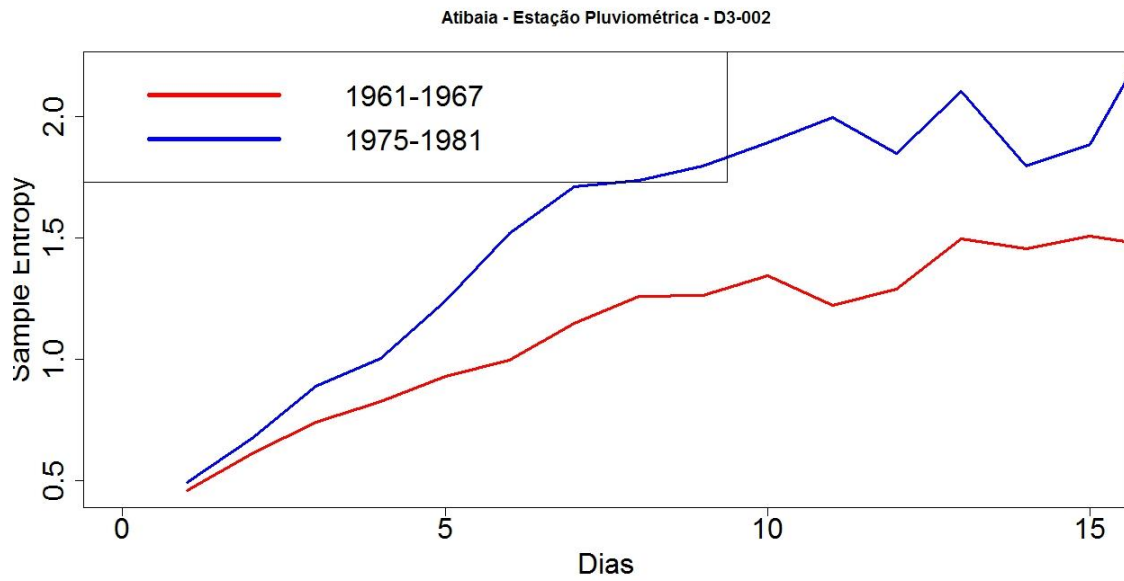


Figura 43. *MSE* das séries temporais da precipitação do rio Atibaia (estação D3 - 002) para os períodos de 1961 a 1967 e de 1975 a 1981.

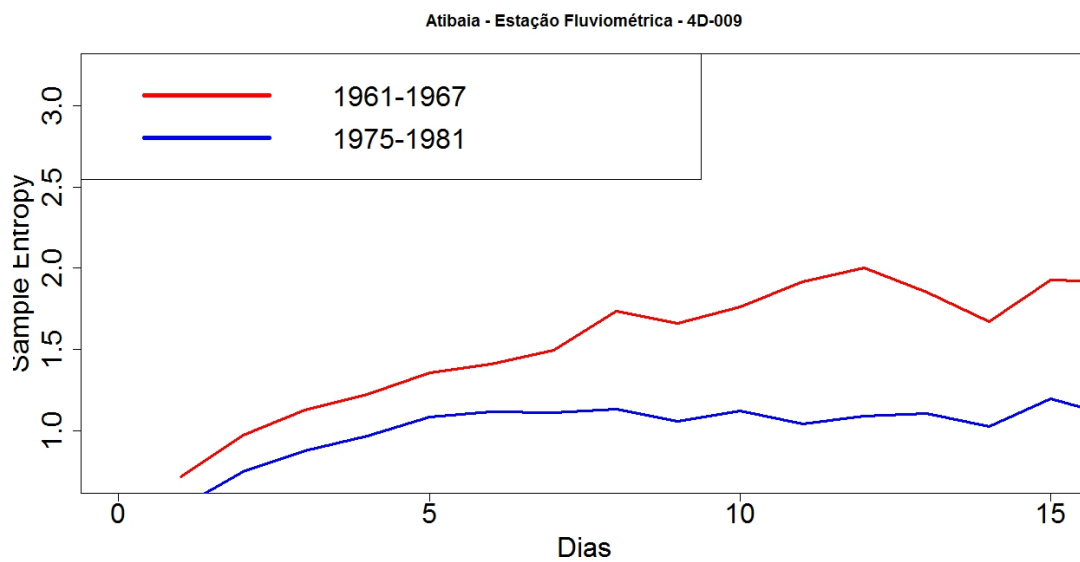


Figura 44. *MSE* das séries temporais de vazão do rio Atibaia (estação 4D-009) para os períodos de 1961 a 1967 e de 1975 a 1981.

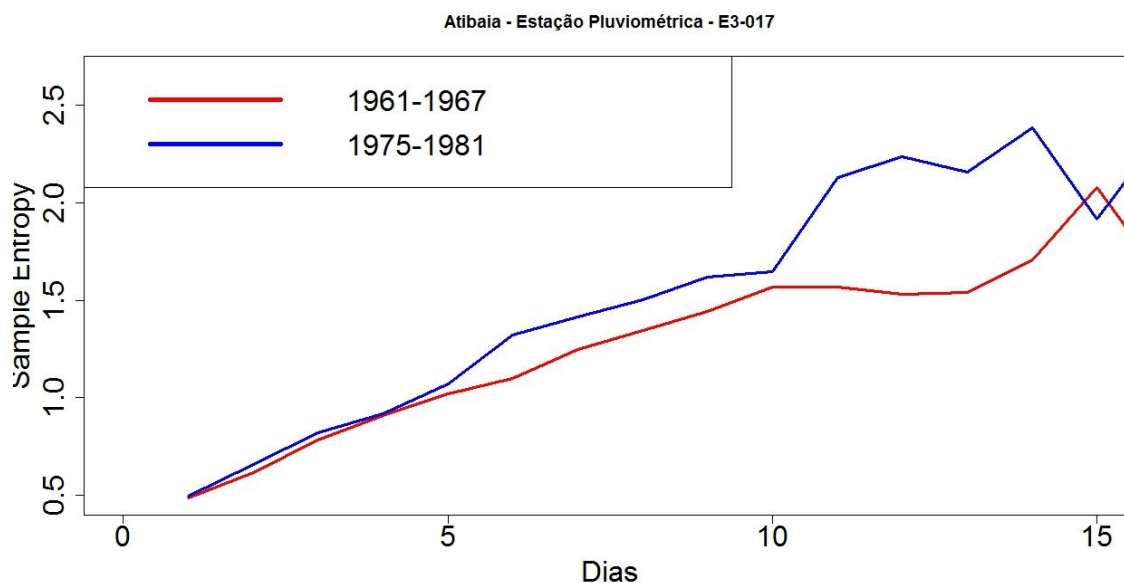


Figura 45. MSE das séries temporais da precipitação da bacia do rio Atibaia (estação E3 - 017) para os períodos de 1961 a 1967 e de 1975 a 1981.

Para a sub-bacia do rio Jaguari, na estação fluviométrica 3D-009, localizada perto do reservatório, observou-se o aumento da complexidade de séries temporais de vazão até as escalas de uma semana (7 dias) seguida pela diminuição da complexidade até as escalas de duas semanas (15 dias), enquanto para séries temporais de precipitação (estação D3-018), a complexidade diminui nas escalas maiores de 11 dias (Figuras 46,47).

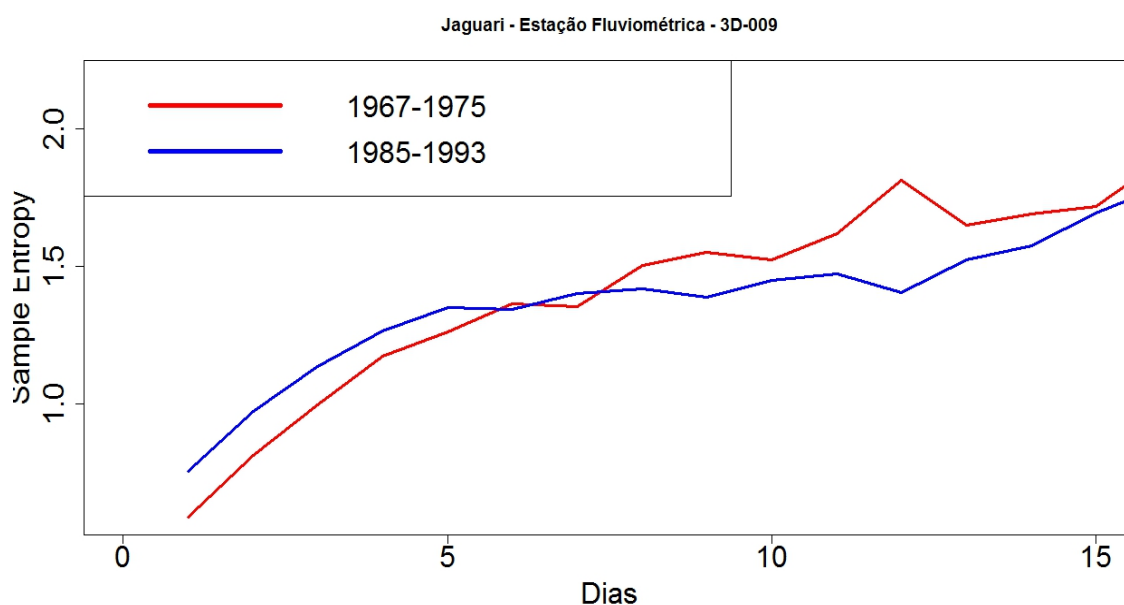


Figura 46. MSE das séries temporais de vazão do rio Jaguari (estação 3D - 009) para os períodos de 1967 a 1975 e de 1985 a 1993.

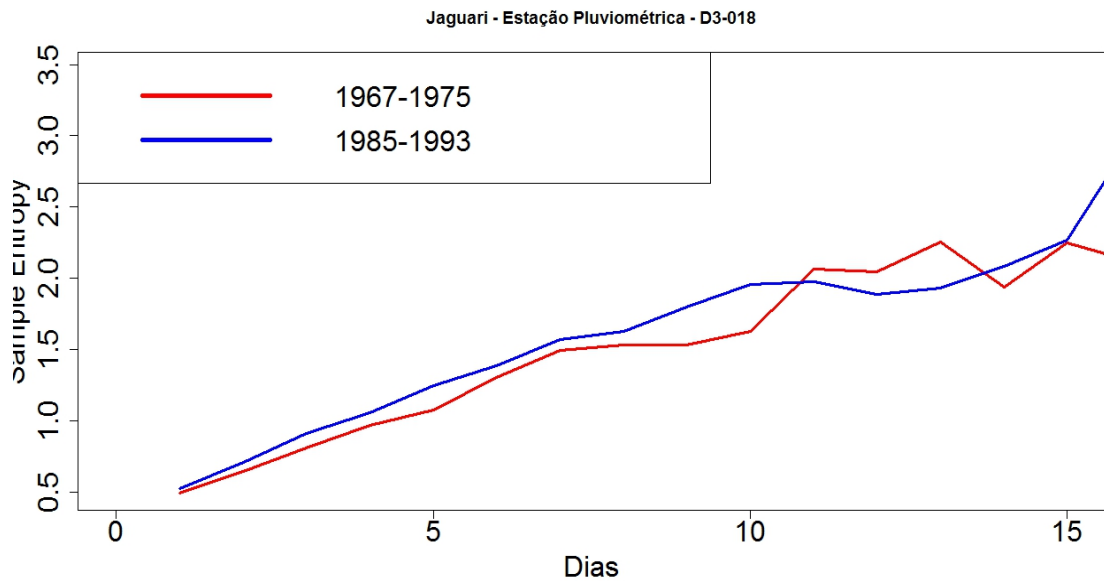


Figura 47. MSE das séries temporais da precipitação do rio Jaguari (estação D3 - 018) para os períodos de 1967 a 1975 e de 1985 a 1993.

Para a estação 4D-001, as séries temporais de vazão apresentam maior complexidade depois da construção dos reservatórios nas escalas de até duas semanas (15 dias), enquanto a complexidade das séries temporais de precipitação (estação D4-052) diminui nas escalas maiores de 4 dias (Figuras 48,49). Estes resultados são semelhantes aos resultados recentes sobre o uso da análise de complexidade para avaliar os impactos das atividades humana das bacias dos rios *Mississippi* [22], *Yangtze* [23,24] e *East River* [25].

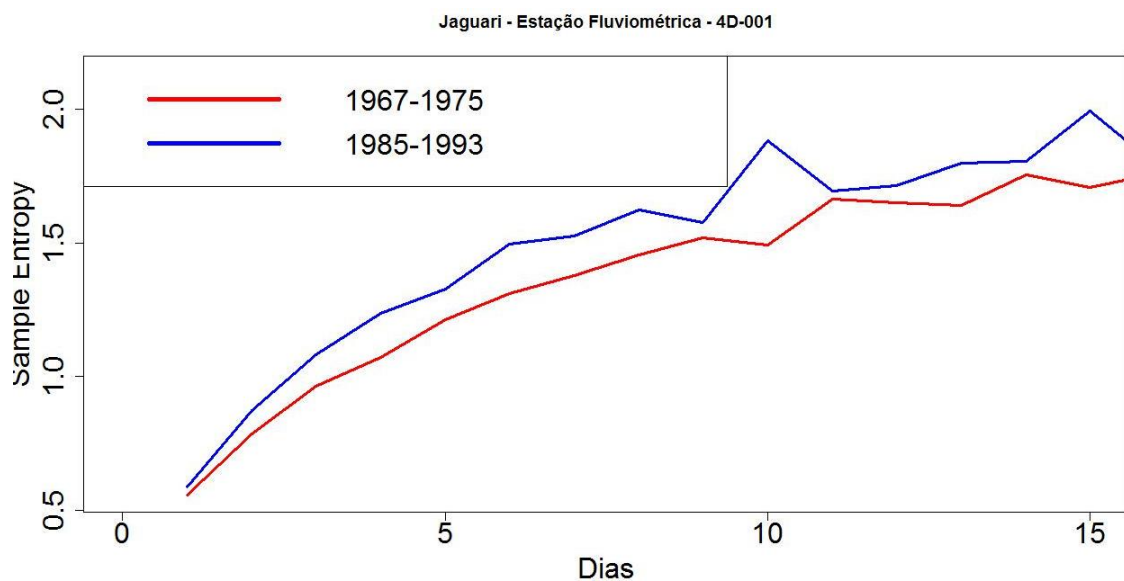


Figura 48. MSE das séries temporais de vazão do rio Jaguari (estação 4D - 001) para os períodos de 1967 a 1975 e de 1985 a 1993.

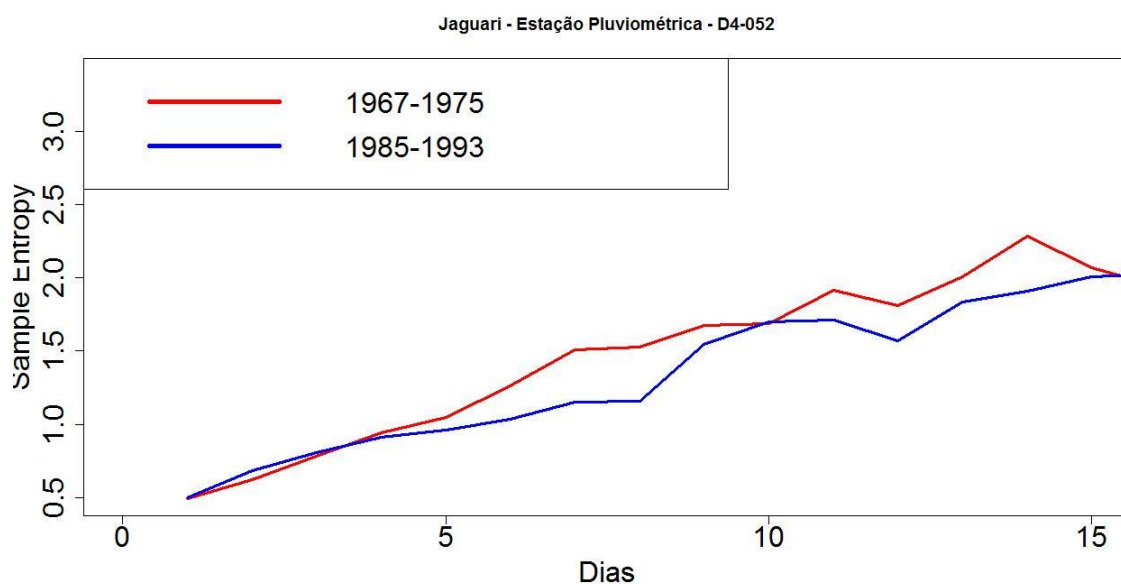


Figura 49. MSE das séries temporais da precipitação do rio Jaguari (estação pluviométrica D4 - 052) para os períodos de 1967 a 1975 e de 1985 a 1993 anos.

As Figuras 50-53 de *Multiscale Cross-sample entropy* mostram as alterações em sincronização entre vazão e precipitação, depois da construção dos reservatórios. Para sub-bacia do rio Atibaia observou-se que depois da construção dos reservatórios a sincronização entre os dois processos diminui nas escalas maiores de uma semana (7 dias) (Figuras 50,51).

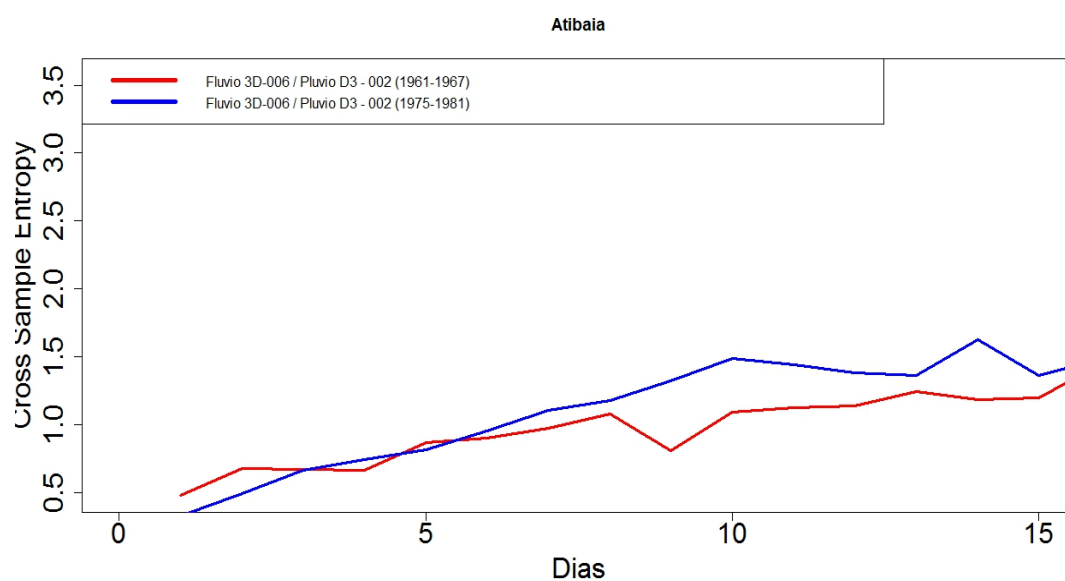


Figura 50. Cross-MSE das séries temporais de vazão (estação 3D-006) e da precipitação (estação D3-002) do rio Atibaia para os períodos de 1961 a 1967 e de 1975 a 1981.

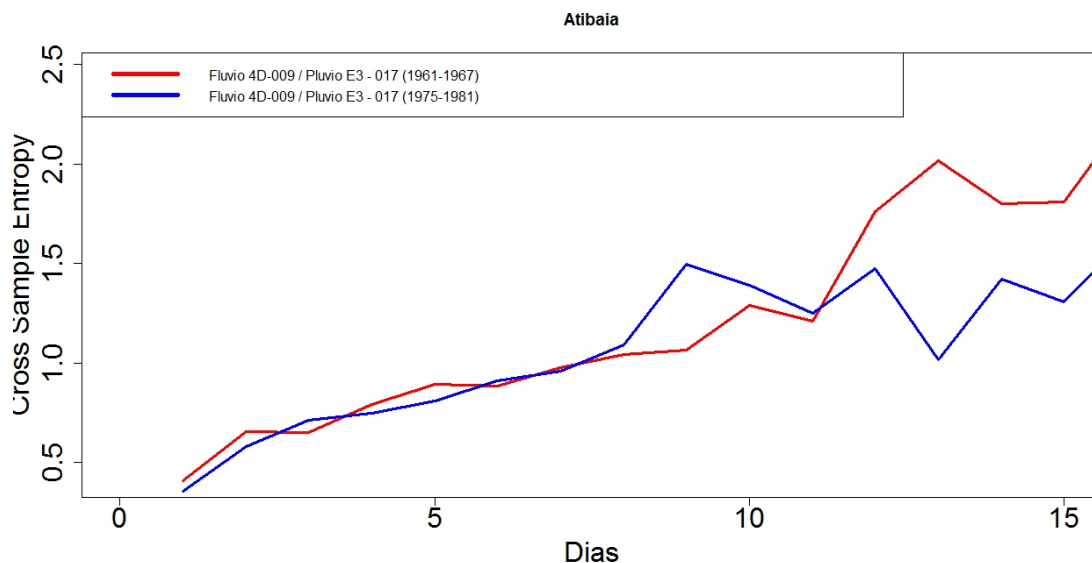


Figura 51. *Cross-MSE* das séries temporais de vazão (estação 4D-009) e da precipitação (estação E3-017) do rio Atibaia para os períodos de 1961 a 1967 e de 1975 a 1981.

Para a sub-bacia do rio Jaguari, nas escalas maiores de 10 dias, a sincronização entre vazão e precipitação aumentou na localização mais próxima dos reservatórios (estações 3D-009, D3-018, Figura 52) e diminuiu na outra localização com distância maior dos reservatórios (estações 4D-001, D4-052, Figura 53).

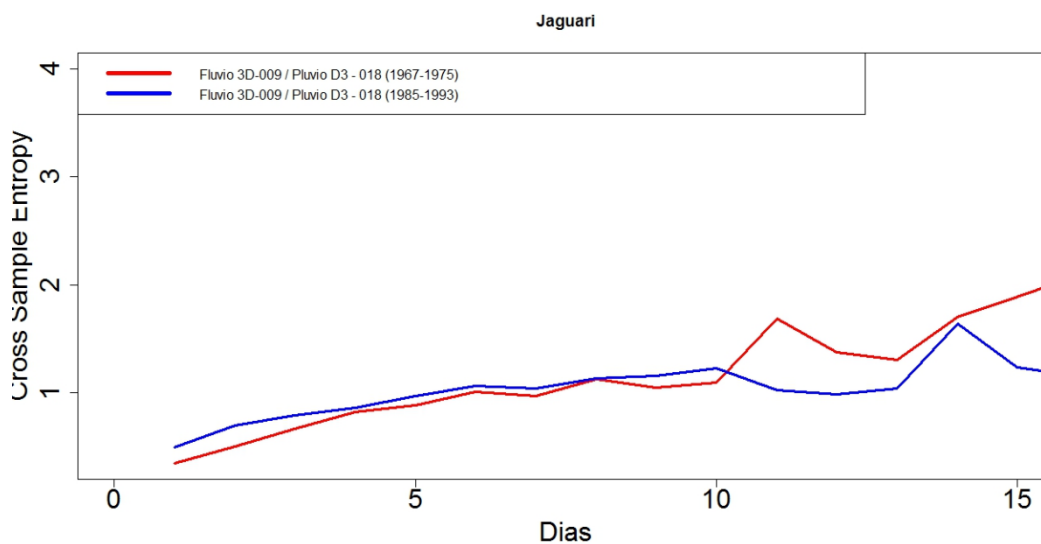


Figura 52. *Cross-MSE* das séries temporais de vazão (estação 3D-009) e da precipitação (estação D3-018) do rio Jaguari para os períodos de 1967 a 1975 e de 1985 a 1993.

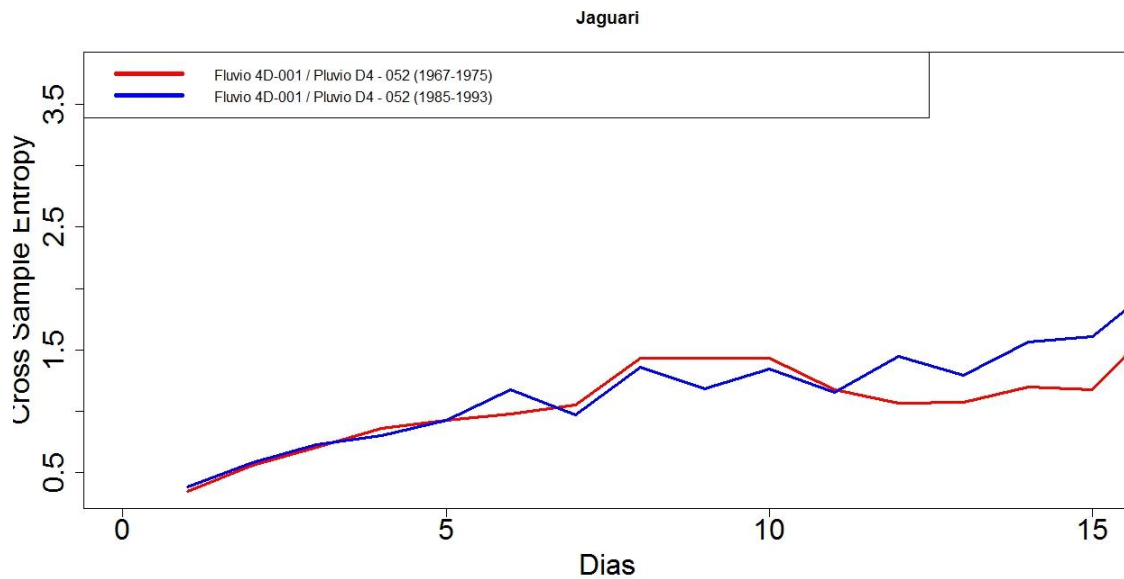


Figura 53. *Cross-MSE* das séries temporais de vazão (estação 4D-001) e da precipitação (estação D4-052) do rio Jaguari para os períodos de 1967 - 1975 e de 1985 - 1993.

As Figuras 54 e 55 apresentam os resultados da análise *Multiscale sample entropy (MSE)* para amostras com duração maior de vazão de cada sub-bacia para os períodos antes e depois da construção dos reservatórios do sistema Cantareira. Observou-se que a construção dos reservatórios alterou a complexidade da vazão nas múltiplas escalas: diminuição da complexidade para o rio Atibaia e aumento da complexidade para o rio Jaguari.

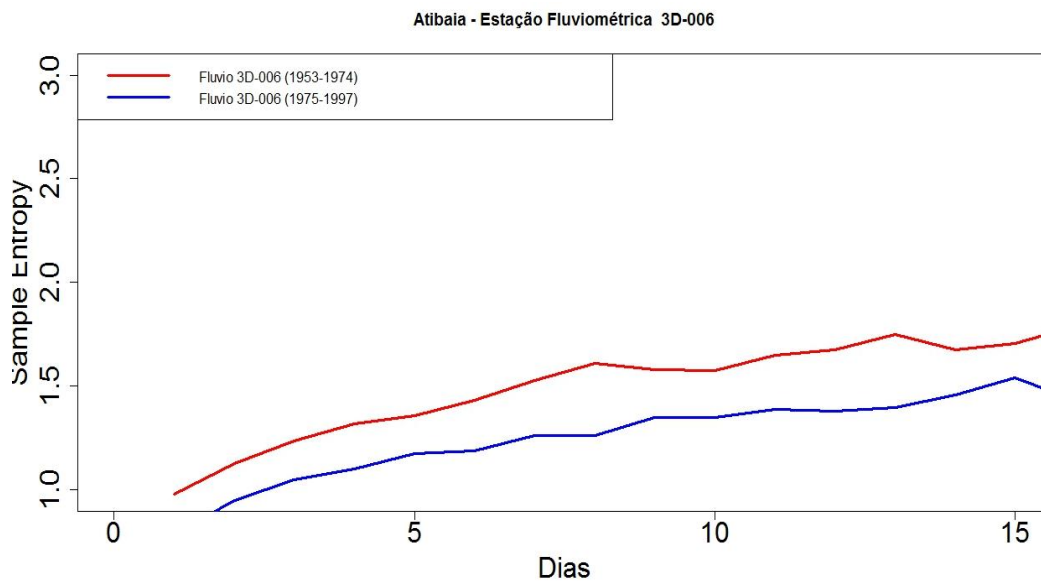


Figura 54. *MSE* das séries temporais de vazão do rio Atibaia (estação 3D - 006) para os períodos de 1953 a 1974 e de 1975 a 1997.

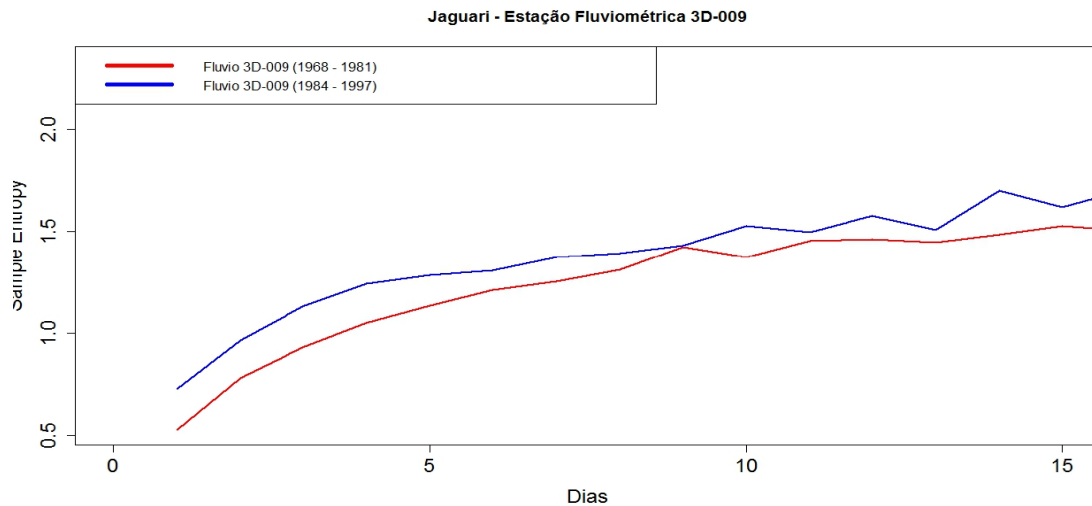


Figura 55. *MSE* das séries temporais de vazão do rio Jaguari (estação 3D - 009) para os períodos de 1968 a 1981 e de 1984 a 1997.

A Figura 56 apresenta *Cross-MSE* entre as séries temporais de vazão dos rios Atibaia e Jaguari para os períodos antes da construção do primeiro reservatório no rio Atibaia (68-74), antes da construção do segundo reservatório no rio Jaguari (75-81) e depois do início do funcionamento dos dois reservatórios (84-90). Observou-se que a sincronização entre a vazão das duas sub-bacias aumentou nas várias escalas depois da construção do primeiro reservatório. Depois da construção do segundo reservatório os valores do *Cross-MSE* aumentaram, significando menor sincronização hidrológica entre as duas sub-bacias.

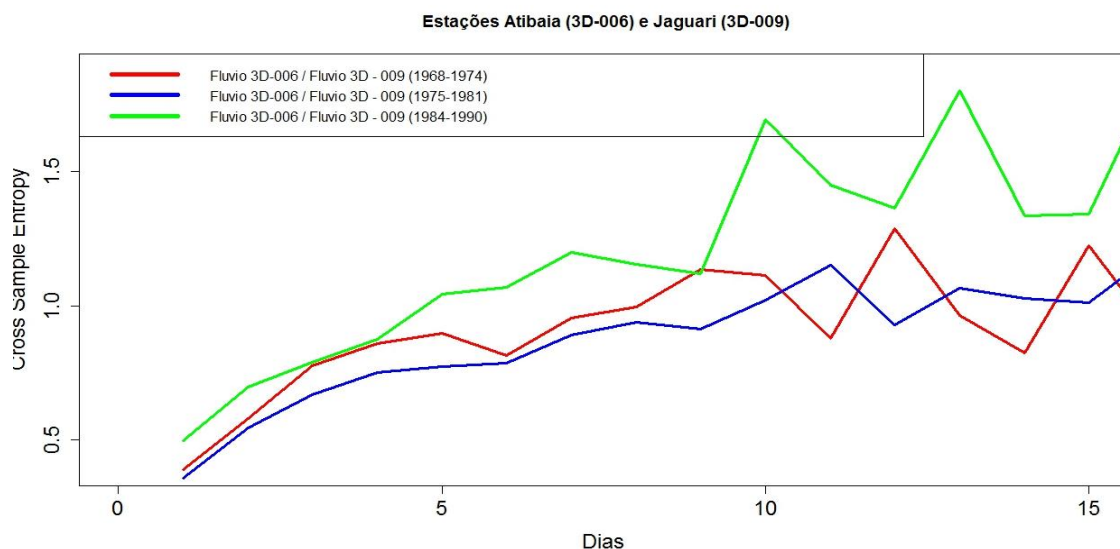


Figura 56. *Cross - MSE* das séries temporais de anomalias de vazão das estações dos rios Atibaia (3D-006) e Jaguari (3D-009) para os períodos de 1968 a 1974 de 1975 a 1981 e de 1984 a 1990.

5. CONCLUSÃO

A conservação dos recursos hídricos é um dos problemas mais importantes para o desenvolvimento sustentável de uma região. Estes recursos são diretamente influenciados pelos fatores naturais e antropogênicos e são caracterizados pelas interações que operam em múltiplas escalas espaciais e temporais. Para estabelecer políticas públicas eficientes para proteção do meio ambiente é necessário desenvolver métodos matemáticos que irão fornecer mais informações sobre as interações entre os componentes dos sistemas hidrológicos em diferentes escalas espaciais e temporais, relevantes para os ecossistemas correspondentes. Tradicionalmente, estes sistemas foram estudados utilizando os métodos clássicos da estatística, recentemente foram utilizados os métodos baseados em conceitos de fractais, multifractais, redes complexas, criticalidade auto organizada, dinâmica não linear e teoria da informação.

A bacia do rio Piracicaba está localizada no sudeste do Estado de São Paulo, uma região com crescimento populacional e agroindustrial maior que a média do país, com fortes evidências de degradação dos recursos hídricos em aspectos quantitativos e qualitativos. As principais causas destas alterações foram o aumento do consumo de água e das cargas de esgotos urbanos e agroindustrial, as mudanças no uso da terra e a transferência de água interbacias. A intervenção antrópica que deixou maior impacto no comportamento das vazões foi à construção de quatro reservatórios do sistema Cantareira, localizados nas cabeceiras dos rios Jaguari, Jacaré, Atibainha e Cachoeira. Estes reservatórios são interligados por túneis e canais e são responsáveis pela reversão interbacias de $31m^3s^{-1}$ para o abastecimento da Região Metropolitana de São Paulo (RMSP).

Nesta tese avaliamos as alterações em processos hidrológicos da bacia do rio Piracicaba causada pela construção dos reservatórios do sistema Cantareira utilizando análise multifractal e análise de complexidade. Para análise multifractal utilizamos os métodos *Multifractal detrended fluctuation analysis (MF-DFA)* e *Multifractal detrended cross-correlation analysis (MF-DXA)* e para análise de complexidade utilizamos os métodos *Sample entropy (SampEn)*, *Cross-sample entropy (Cross-SampEn)* e *Multiscale Sample Entropy (MSE)*.

Os resultados da análise multifractal mostrou que a variabilidade temporal da vazão foi alterada depois da construção dos reservatórios, enquanto que não se observou a alteração correspondente na variabilidade temporal de precipitação. A largura do

espectro multifractal da vazão do rio Atibaia diminuiu depois da construção dos reservatórios indicando menor grau de multifractalidade. A multifractalidade das séries temporais da precipitação nas localizações correspondentes não foi alterada depois da construção dos reservatórios indicando que a dinâmica da vazão foi afetada pela atividade humana e não pelos fatores naturais. No caso do rio Jaguari, a multifractalidade das séries de precipitação aumentou pouco depois da construção dos reservatórios, enquanto que não houve alteração de multifractalidade das séries de vazão, mostrando que a atividade humana alterou o regime natural entre os componentes principais dos processos hidrológicos. A multifractalidade da precipitação mostrou-se maior do que para vazão no caso de ambas sub-bacias.

Os resultados da análise de complexidade mostrou que a construção dos reservatórios alterou a complexidade das séries de vazão: a diminuição da complexidade para o rio Atibaia e aumento da complexidade para o rio Jaguari. Não observamos alteração na complexidade das séries de precipitação correspondentes, o que significa que a alteração da dinâmica da vazão foi causada pela construção dos reservatórios e não pela dinâmica de precipitação. Os valores de *Cross-SampEn* entre as séries de vazão e precipitação mostram que a sincronização entre vazão e precipitação também foi alterada depois da construção dos reservatórios. A análise de *MSE* mostrou que a complexidade da dinâmica da vazão foi alterada em diferentes escalas temporais, que pode ser relevante para vários componentes do ecossistema.

As correlações entre os processos hidrológicos das duas sub-bacias foram analisadas nas múltiplas escalas utilizando os métodos *MF-DXA* e *Cross-MSE*. Os resultados mostram que a sincronização entre a vazão das duas sub-bacias aumentou e a multifractalidade das correlações cruzadas diminuiu depois da construção do primeiro reservatório (Atibaia). Em seguida após a construção do segundo reservatório (Jaguari) a sincronização hidrológica entre as duas sub-bacias diminuiu, e a multifractalidade das correlações cruzadas aumentou.

Com base nestes resultados podemos concluir que a análise multifractal e a análise de complexidade podem ser úteis em estudos de alterações da dinâmica da vazão de rios causadas pelas atividades humanas. Ambos os métodos fornecem informações sobre o comportamento dinâmico 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 hidrológica.

Como sugestão para trabalhos futuros, sugerimos a aplicação destes métodos nos dados das outras estações podendo gerar um mapeamento de alterações hidrológicas da bacia do rio Piracicaba causada pelos vários fatores naturais e antrópicos como uso do solo, cobertura vegetal, construção dos reservatórios, desflorestamento e incêndios florestais. Uma possível aplicação destes métodos é investigar as correlações entre as propriedades multifractais e as de complexidade das séries temporais da vazão e da precipitação com outros fenômenos ambientais como qualidade da água, emissão de gases estufa, e alterações em ciclo natural da fauna e flora.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Bak, P. How nature works. **The science of self-organized criticality**. Springer - Verlag, New York. USA, 1996.
- [2] Mandelbrot, B. **The fractal geometry of nature**. Macmillan, 1983.
- [3] Hoekstra, H.; J. Kroc, P. M. A. Soot (ed.). **Simulating complex systems by cellular automata**, Springer, 2010.
- [4] Barthelemy, M. Barrat.; Vespignani, A. **Dynamical processes on complex networks** Cambridge University Press, New York, USA, 2008.
- [5] http://www.nsf.gov/geo/ere/ereweb/ac-ere/acere_synthesis_rpt_summary.pdf
- [6] Feder, J. **Fractals**. Plenum Press, New York, 1988.
- [7] Benzi, R.; Paladin, G.; Parisi, G.; Vulpiani, A. On the multifractal nature of fully developed turbulence and chaotic systems. **Journal of Physics A: Mathematical and General** 17, 3521-3531, 1984.
- [8] Frish, U.; Parisi, G. Fully developed turbulence and intermittency, in M. Ghil, R. Benzi, G. Parisi (Eds.) **Turbulence and predictability in geophysical fluid dynamics and climate dynamics**, North Holland, Amsterdam, pp. 84-88, 1985.
- [9] Tessier, Y.; Lovejoy, S.; Schertzer, D. Universal multifractals: Theory and observations for rain and clouds. **Journal of Applied Meteorology** 32, 223-250, 1993.
- [10] Olsson, J.; Nemczynowicz, J. Multifractal analysis of daily spatial rainfall distributions. **Journal of Hydrology** 187, 29-43, 1996.
- [11] Lima, M. I. P.; Grasman, J. Multifractal analysis of 15-min and daily rainfall in semi-arid region in Portugal. **Journal of Hydrology** 220, 1-11, 1999.

- [12] Labat, J.; Mangin, A.; Ababou, R. Rainfall- runoff relations for karstic springs: Multifractal analyses. **Journal of Hydrology** 256, 176 - 195, 2002.
- [13] Lima, N. I. P.; Lima, J. L. M. P. Investigating the multifractality of point precipitation in the Madeira archipelago. **Nonlinear Processes in Geophysics** 16, 299 - 311, 2009.
- [14] Pandaey, G.; Lovejoy, S.; Schertzer, D. Multifractal analysis of daily river flow including extremes for basins of five to two million square kilometers, one day to 75 years. **Journal of Hydrology** 208, 62-81, 1998.
- [15] Hirpa, F. A.; Gebermichael, M.; Over, T. M. River flow fluctuation analysis: Effect of watershed area. **Water Resources Research** 46, W12529, 2010.
- [16] Royer, J. F.; Biaou, A.; Chauvin, F.; Schertzer, D.; Lovejoy, S. Multifractal analysis of the evolution of simulated precipitation over France in climate scenario. **C. R. Geosci.** 340, 431 - 440, 2008.
- [17] Douglas, E. M.; Barros, A. P. Probable maximum precipitation estimation using multifractals: Applications in the Eastern United States. **Journal of Hydrometeorology** 4, 1012 - 1024, 2003.
- [18] Sun, X.; Barros, A. P. An evaluation of statistics of rainfall extremes in rain gauge observations, and satellite-based and reanalysis products using universal multifractals. **Journal of Hydrometeorology** 11, 388 - 404, 2010.
- [19] Kantelhardt, J. W.; Koncinski-Bunde, E.; Rybski, D.; Braun, P.; Bunde, A.; Havlin, S. Long-term persistence and multifractality of precipitation and river runoff records. **Journal of Geophysical Research** 111, D011106, 2006.
- [20] Berne, A.; Delrieu, G.; Creutin, J. D.; Obled, C. Temporal and spatial resolution of rainfall measurements required for urban hydrology. **Journal of Hydrology** 299: 166 - 179. 2004.

- [21] Moriasi, D. N.; Starks, P. J. Effects of the resolution of soil dataset and precipitation dataset on SWAT2005 streamflow calibration parameters and simulation accuracy. **Journal of Soil and Water Conservation** 65: 63 - 78, 2010.
- [22] Li, Z.; Zhang, Y.- K. Multi-scale entropy analysis of Mississippi River flow. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment** 22, 507-512, 2008.
- [23] Huang, F.; Xia, Z.; Zhang, N.; Zhang, Y.; Li, J. Flow-complexity analysis of the upper reaches of the Yangtze River, China. **Journal of Hydrologic Engineering** 16, 914-919, 2011.
- [24] Zhang, Q.; Zhou, Y.; Singh, V. P.; Chen, X. The influence of dams and lakes on the Yangtze River streamflow: long-range correlations and complexity analysis. **Hydrological Processes** 26, 436 - 444, 2012.
- [25] 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**, 2012.
- [26] Krusche, A. V.; Carvalho, F. P.; Moraes, J. M.; Camargo, P. B.; Ballester, M. V. R.; Hornink, S.; Martinelli, L. A.; Victoria, L. R. Spatial and temporal water quality variability in the Piracicaba river basin, Brazil. **Journal of the American Water Resources Association**, v. 33, n. 5, p. 1117 - 1123, 1997.
- [27] Martinelli, L. A.; Krusche, A. V.; Victoria, R. L.; Camargo, P. B.; Bernardes, M.; Ferraz, E. S.; Moraes, J. M.; 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.
- [28] 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.

- [29] Tucci, C. E. M. **Hidrologia: Ciência e Aplicação**. Porto Alegre: UFRGS, 943p. 2007.
- [30] Caram, R. O. **Mudanças no uso e cobertura do solo e resposta hidrológica da bacia do rio Piracicaba**, SP. 2010. 141p. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade de São Paulo Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Piracicaba, 2010.
- [31] Lima, W. P. **Princípios de manejo de bacias hidrográficas**. Piracicaba: ESALQ, 143 p, 1976.
- [32] Tonello, K. C. **Análise hidroambiental da bacia hidrográfica da cachoeira das Pombas**, Guanhães, MG. 2005. 69 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2005.
- [33] Tucci, C.E.M.; Clarke, R. T. Impactos das mudanças de cobertura vegetal no escoamento: Revisão. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 2, n. 1, Porto Alegre, p. 135 - 152 1997.
- [34] Pereira. A. R.; Villa Nova. N. A.; Sedyama. G. C. **Evapotranspiração**. Piracicaba: FEALQ, 183 p, 1997.
- [35] Brandão. V. S.; Cecílio. R. A.; Pruski, F. F.; Silva, D. D. **Infiltração de água no solo**. Viçosa: UFV, 120 p, 2006.
- [36] Rawls, W. J.; Ahuja, L. R.; Brakensiek, D. L.; Shirmohammadi, A. **Infiltration and soil water movement**. In: MAIDMENT, D. Handbook of hydrology. New York: McGraw-Hill, p. 1 - 51, 1996.
- [37] Pruski, F. F.; Brandão, V. S.; Silva, D. D. **Escoamento superficial**. Viçosa: UFV, 88 p, 2003.
- [38] Bahia, V. G.; Curi, N.; Carmo, D. N. Fundamentos de erosão do solo. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v.16, n. 176, p. 25-31, 1992.

[39] Tucci, C.E.M. Impactos da variabilidade climática e uso do solo sobre os recursos hídricos: estudo preparado como contribuição da ANA (Agência Nacional de Águas) para a Câmara Temática sobre Recursos Hídricos do Fórum Brasileiro de Mudanças Climáticas. Brasília: ANA, 150 p, 2002.

[40] Irrigart. Engenharia & Consultoria em Recursos Hídricos e Meio Ambiente Ltda. **Relatório da situação dos recursos hídricos das bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí - 2002/2003**. Piracicaba, 2004. Disponível em: <<http://www.comitepcj.sp.gov.br/comitespcj.htm>>. Acesso em: 20 fev. 2008.

[41] Agência Nacional de Águas. **A implementação da cobrança pelo uso de Recursos Hídricos e Agência de Água das Bacias dos Rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí**. Brasília, 112 p, 2007.

[42] Pellegrino, G. Q.; Moraes, J. M.; Guandique, M.E.G.; Ballester, M. V.R.; Victoria, R.L; Martinelli, L. A. Análise espaço-temporal de componentes hidroclimáticos na bacia do rio Piracicaba, SP. **Revista de Agrometeorologia, Santa Maria**, v. 9, n. 1, p. 125 - 135, 2001.

[43] Cooperativa de Serviços e Pesquisas Tecnológicas e Industriais. Relatório da situação dos recursos hídricos das bacias hidrográficas dos rios Piracicaba, Capivari e Jundiaí - 2007: **relatório final**. Piracicaba: CPTI, 2008. 201 p. (Relatório Técnico CPTI - 404/08).

[44] 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. **Geociências**, São Paulo, v. 24, n. 2, p. 181-193, 2005.

[45] Moraes, J. M.; Genovez, A. M.; Mortatti, J, Ballester.; M. V, Krusch.; A.V, Martinelli.; L. A, Victoria.; R. L. Análise de intervenção das séries temporais de vazão dos principais rios da bacia do rio Piracicaba. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, Porto Alegre, v. 2, n. 2, p. 65-79, jul./dez. 1997.

- [46] Mortatti, J.; Bortoletto Júnior.; Milde, M. J.; L. C. E, Probst.; J. L. Hidrologia dos Rios Tietê e Piracicaba: séries temporais de vazão e hidrogramas de cheia. **Revista Ciências & Tecnologia**, Piracicaba, v. 12, n. 23, p. 55-67, 2003.
- [47] Vicsek, T. **Fractal growth phenomena**. 2^a ed. Singapore: World scientific, p. 488, 1993.
- [48] Bassinthewaitght J. B., et. al. **Fractal physiology**. New York: Oxford American Physiological Society, 1994.
- [49] Theiller, J. Estimating fractal dimension. **J. Opt. Soc. Am.** 7, no. 6/June, 1055-1073, 1990.
- [50] Grassberger, P.; Procaccia, I. Characterization of strange attractors, **Physical Review Letters** 50, 346, 1983.
- [51] Grassberger, P.; Procaccia, I. Measuring the strangeness of strange attractors, **Physica D** 9,189 - 208, 1983.
- [52] Tél, T.; Fullop, A.; Vicsek, T. Determination of fractal dimensions for geometrical multifractals. **Physica A Statistical Mechanics and its Applications**, Netherlands, v. 159, p. 155 - 166, 1989.
- [53] Halsey, T. C. et al. Fractal measures and their singularities: The characterization of strange sets. *Physical Review A*, **American Physical Society**, United States, v. 33, n. 2, p. 1141 - 1151, Feb 1986.
- [54] Kobayashi M, Musha T. *1/f* fluctuation of heartbeat period. **IEEE transactions on bio-medical engineering**, United States, v. 29, p. 456 - 457, 1982.
- [55] Peng, C. K. et al. Long-range anticorrelations and non-gaussian behavior of the heartbeat. **Physical Review Letter**, United States, v.70, p.1343 - 1346, 1993.

- [56] Hausdorff, J. M. et al. Is walking a random walk? Evidence for long-range correlations in the stride interval of human gait. **Journal of Applied Physiology**, United States, v. 78, p.349-358, 1995.
- [57] Szeto, H. et al. Fractal properties of fetal breathing dynamics. **The American Journal of Physiology**, United States, v. 263, p. 141-147, 1992.
- [58] March D. J.; Osborn J. L.; Conley A. W. $1/f$ fluctuations in arterial pressure and regulation of renal blood flow in dogs. **The American Journal of Physiology**, United States, v. 258, p. 1394 - 1400, 1990.
- [59] Goldberger A. L.; Kobalter K, Bhargava V. $1/f$ like scaling in normal neutrophil dynamics: implications for hematological monitoring, **IEEE transactions on biomedical engineering**, United States, v. 33, p.874 - 876, 1984.
- [60] Nogueira R. A.; Varanda W. A.; Liebovitch L. S. Hurst analysis in the study of ion channel kinetics. **Braz. J. Med. Biol. Res.** 28, 491 - 496, 1995.
- [61] Peng C-K.; Hausdorff, J. M.; Goldberger, A.L. **Fractal mechanisms in neural control: Human heartbeat and gait dynamics in health and disease**. In: Walleczek J, ed. *Self-Organized Biological Dynamics and Nonlinear Control*. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- [62] Beran, J. **Statistics for Long-memory Processes**. Chapman Hall, New York, 1994.
- [63] Rangarajan, G.; Ding, M. Integrated approach to the assessment of long-range correlations in time series data. **Physical Review E**, v.61, pp. 4991 - 5001, 2000.
- [64] Hurst, H. E. Long-term storage capacity of reservoirs, **Transaction of American Society of Civil Engineers** 116, 770 - 808, 1951.
- [65] Kantelhardt, J. W. **Fractal and multifractal time series**. In: Encyclopedia of Complexity and Systems Science; preprint arXiv: 0804.0747, Springer, 2009.

- [66] Peng, C.- K.; Buldyrev, S. V.; Havlin, S.; Simons, M.; Stanley, H. E.; Goldberger, A. L. Mozaic organization of DNA nucleotides, **Physical Review E** 49, 1685 -1689, 1994.
- [67] Ivanov P. Ch.; Ma Q. D.; Bartsch R P.; Hausdorff J. M.; Nunes Amaral LA.; Schulte-Frohlinde V.; Stanley HE.; Yoneyama M. Levels of complexity in scale-invariant neural signals, **Physical Review E** 79, 041920, 2009.
- [68] Kavasseri, R. G.; Nagarajan, R. Evidence of crossover phenomena in wind speed data, **IEEE Transactions on Circuits and Systems** 151, 2255 - 2262, 2004.
- [69] Matsoukas, A.; Islam, S.; Rodriguez-Iturbe, I. Detrended fluctuation analysis of rainfall and streamfall time series, **Journal of geophysical research** 105, 105 - 129, 2000.
- [70] Varotsos, P. A.; Sarlis, N. V.; Skordas, E. S. Detrended fluctuation analysis of the magnetic and electric field variations that precede rupture, **Chaos** 19, 023114, 2009.
- [71] Kiraly, A.; Janosi, I. M. Detrended fluctuation analysis of daily temperature records: Geographic dependence over Australia, **Meteorology and Atmospheric Physics** 88, 119 - 128, 2005.
- [72] Costa, R. L.; Vasconcelos, G. L. Long-range correlations and nonstationarity in Brazilian stock market. **Physica A**. Netherlands, v.329, p. 231 - 249, 2003.
- [73] Hu, K.; Chen, Z.; Ivanov, P. Ch.; Carpena, P.; Stanley, H. E. Effects of trends on detrended fluctuation analysis, **Physical Review E** 64, 011114, 2001.
- [74] Podobnik, B.; Stanley, H. E. Detrended cross-correlation analysis a new method for analyzing two non-stationary time series. **Physical Review Letters** 100, 084102, 2008.
- [75] Wang, Y.; Zhao, D.-Q. Detrended cross-correlation analysis of electroencephalogram, **Chinese Physica B** 21, 028703, 2012.

- [76] Xu, N.; Snang, P.; Kamae, S. Modeling traffic flow correlations using DFA and DCCA, **Nonlinear Dynamics** 61, 207 - 216, 2010.
- [77] Vassoler, R. T.; Zebende, G. F.. DCCA cross-correlation coefficient apply in time series of air temperature and air relative humidity, **Physica A** 391, 2438 - 2443, 2012.
- [78] Podobnik, B.; Horvatic, D.; Petersen, A. M.; Stanley, H. E. Cross-correlations between volume change and price change, **PNAS** 29, 22079 - 22084, 2009.
- [79] Kantelhardt, J. W.; Zschiegner, S. A.; Koscielny-Bunde.; E., Havlin.; S. Bunde.; A. Stanley, H. E. Multifractal detrended fluctuation analysis of nonstationary time series, **Physica A** 316, 87 - 114. 2002.
- [80] Muzy, J. F.; Bacry.; E. Arneodo, A. Wavelets and multifractal formalism for singular signals: Application to turbulence data. **Physical Review Letters** 67, 3515 - 3518, 1991.
- [81] Gu, G.-F.; Zhou, W.-X.. Detrending moving average algorithm for multifractals. **Physical Review E** 82, 011136, 2010.
- [82] Oswiecimka, P.; Drozd, J. K. S. Wavelet versus detrended fluctuation analysis of multifractal structures, **Phys. Rev. E** 74, 016103, 2006.
- [83] Figliola, A.; Serrano, E.; Rosso, O. A. Multifractal detrended fluctuation analysis of tonic-clonic epileptic seizures. **European Physics Journal Special Topics** 143, 117 -123, 2007.
- [84] Telesca, L.; Lapenna, V. Measuring multifractality in seismic sequences, **Tectonophysics** 423, 115 - 123, 2006.
- [85] Hirpa, F. A.; Gebermichael, M.; Over, T. M. River flow fluctuation analysis: Effect of watershed area. **Water Resources Research** 46, W12529, 2010.

- [86] Kantelhardt, J. W.; Koncinski-Bunde, E.; Rybski, D.; Braun, P.; Bunde, A.; Havlin, S. Long-term persistence and multifractality of precipitation and river runoff records. **Journal of Geophysical Research** 111, D011106, 2006.
- [87] Zhang, Q.; Xu, C.-Y.; Chen, J. D.; Yu, Z. Multifractal detrended fluctuation analysis of streamflow series in Yangtze River basin, China. **Hydrological Processes** 22: 4997 - 5003. 2008.
- [88] Zhang, Q.; Xu, C.-Y.; Liu, C.-L.; Chen, Y. D.; Yu, Z. Multifractal analysis of streamflow records of the East River Basin (Pearl River), China. **Physica A** 388, 927 - 934, 2009.
- [89] Movahed, M. S.; Hermanis, E. Fractal analysis of river flow fluctuations. **Physica A** 387, 915 - 932, 2008.
- [90] Zunino, L.; Tabak, B. M.; Figliola, A.; Perez, D. G.; Garavaglia, M.; Rosso O. A. A multifractal approach for stock market inefficiency. **Physica A** 387, 6558 - 6566, 2008.
- [91] Shimizu, Y., Thurner, S., Ehrenberger, K., Multifractal spectra as a measure of complexity in human posture. **Fractals** 10, 103 - 116. 2002.
- [92] Zhou, W-X. Multifractal detrended cross-correlation analysis for two nonstationary signals, **Physical Review E** 77, 066211, 2008.
- [93] Jiang, Z.-Q.; Zhou, W-X. Multifractal detrending moving average cross-correlation analysis, **Physical Review E** 84. 016106. 2011.
- [94] Hajian, S.; Movahed, M. S. Multifractal Detrended Cross-Correlation Analysis of sunspot numbers and river flow fluctuations, **Physica A** 389, 4942 - 4957. 2010.
- [95] Shadkhoo, S.; Jafari, G.R. Multifractal detrended cross-correlation analysis of temporal and spatial seismic data, **European Physical Journal B** 72, 679 - 683, 2009.

- [96] He, L-Y.; Chen, S.-P. Multifractal Detrended Cross-Correlation Analysis of agricultural futures markets, **Chaos, Solitons & Fractals** 44, 355 - 361, 2011.
- [97] Richman, J. S.; Moorman, J. R. Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy. **Am J Physiol Heart Circ Physiol** , v. 278, p. 2039 - 2049, 2000.
- [98] Pincus, S. M.; Viscarello, R. R. Approximate entropy: a regularity measure for fetal heart rate analysis. **Obstet Gynecol**, v. 79, p. 249 - 255, 1992.
- [99] Tang, X. J. et al. Complexity measurements of electroencephalograph recordings using sample entropy algorithm in patients with temporal lobe epilepsy. **Acta Biophysica Sinica**, v. 20, p. 382 - 392, 2004.
- [100] Shuangcheng, L. et al. Measurement of climate complexity using sample entropy. **Int. J. of Climatology**, v. 26, p. 2131 - 2139, 2006.
- [101] 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** 102, 123 - 135, 2010.
- [102] L.- Z.; Liu, X.-Y.; Qian.; Lu, H.-Y. Cross-sample entropy of foreign exchange time series, **Physica A** 389, 4785 - 4792, 2011.
- [103] Costa, M.; Goldberger, A. L.; Peng, C.-K.. Multiscale entropy analysis for complex physiological time series, **Physical Review letters** 89, 068102, 2002.
- [104] Shannon, C. E. A mathematical theory of communication, **The Bell System Technical Journal** 27, 379 - 423, 1948.
- [105] Grassberger, P.; Procaccia, I. Estimation of the Kolmogorov entropy from a chaotic signals, **Physical Review A** 28, 2591 - 2593, 1983.

[106] Pincus, S. M. Approximate entropy as a measure of system complexity. **PNAS** 88, 2297 - 2301, 1991.

[107] Costa, M.; Goldberger, A. L.; Peng, C.-K. Multiscale entropy analysis of biological signals, **Physical Review E** 71, 021906, 2005.