

**IKARO DANIEL DE CARVALHO BARRETO**

**A INFLUÊNCIA DE RESERVATÓRIOS NA VAZÃO DO  
RIO SÃO FRANCISCO**

Recife

3 de março de 2016

### Ficha Catalográfica

B273i Barreto, Ikaro Daniel de Carvalho.  
A influência de reservatórios na vazão do Rio São Francisco  
/ Ikaro Daniel de Carvalho Barreto. - Recife, 2016.  
62 f. : il.

Orientadora: Tatijana Stosic.  
Dissertação (Mestrado em Biometria e Estatística Aplicada)  
– Universidade Federal Rural de Pernambuco, Departamento  
de Estatística e Informática, Recife, 2016.  
Inclui referências.

1. Reservatório. 2. DFZ. 3. MSE. 4. SWA. 5. Rio São  
Francisco. 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**

**A INFLUÊNCIA DE RESERVATÓRIOS NA VAZÃO DO RIO SÃO FRANCISCO**

IKARO DANIEL DE CARVALHO BARRETO

Dissertação julgada adequada para obtenção do título de Mestre em Biometria e Estatística Aplicada, defendida e aprovada por unanimidade em 03/03/2016 pela comissão examinadora

Orientador:

---

**Prof<sup>ª</sup>. Dr<sup>ª</sup>. Tatijana Stosic**  
Orientador

Banca examinadora:

---

**Prof. Dr. Adauto José Ferreira de Souza**  
Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE

---

**Prof. Dr. Pedro Hugo de Figueiredo**  
Universidade Federal Rural de Pernambuco - UFRPE

*à Nayara e Pedro, minha vida...*

# Agradecimentos

Agradeço a Deus, por tudo. À minha esposa Nayara e filho Pedro, pela paciência, companheirismo e preocupação. Sem vocês, nada disso faz sentido. À minha mãe Teresa, meu pai Antônio, minha sogra Maria e minhas amigas Thayane e Cristiane por cuidarem dos meus tesouros na minha ausência. À minha orientadora Dr.a Tatijana Stosic por me guiar nesta jornada. Ao meu irmão Edmilson pelo companheirismo. Aos meus amigos da UFS: Dayane Guimarães, Thomas Barboza, Diego Gonçalves, Erika Hagenbeck, Fillipe Silva, Elisalvo Alves, Armoni Crus, Luana Aquino, Adonis Reis, Mayara Oliveira, Sandra Santa Rosa, Isis Dias, Jurandir Filho, Maria Rejane, Alberth Amorim, Luana Brito, Adriana Santos, Edmara Neres, Diego Santos, Jackline Franco, Lais Oliveira e Jussielly Cunha. Às professoras Alzira Guimarães, Cristiane Gois, Leila Luiza, Maria do Carmo, Andrea Soares, Silvia Simões e Nathalia Moreira. Aos professores Ricardo Gurgel, José Augusto Barreto Filho (ao projeto VICTIM), Andrea Medeiros e Suzana Russo pelas oportunidades enquanto pesquisador e amizade. Aos professores Daniel Castañeda, Vanessa dos Santos, Samuel Oliveira, Eucymara França, Lázaro Souto, Allan Robert e Rodrigo Silva pelo incentivo em iniciar esta jornada. Aos meus numerosos alunos na UFS que me fizeram amar a docência. Aos amigos do mestrado: Kerolly Nascimento, Nathielly Rego, Camiliane Azevedo, Fabio Sandro, Albaro Paiva, Edyniesky Ferrer, Hérica Santos, Jonas Vasconcelos, Luisa Correia, Edineide Ramalho, Izabelly Costa, Fillipe Alves, Rodrigo Leon, Milton Perseu, Dalton Araujo, Marcela, Manoel Rivelino, Carlos Renato, Antônio Samuel, Leda Valeria, Evelyn Chagas, Diego Vicente, Cícero Carlos, Cintia, Glauce Guerra, Gutenberg Ferreira, Karla Schreiber, Cleo Clayton, Silvio Fernando, David Venâncio, Cristiane Albuquerque, José Wesley, Fernando Henrique, Neilson e Nicolas Nascimento pelo companheirismo. Aos amigos Esdras Santos, Abimael Ouro-Filho e Neusa Sales por me dar os melhores conselhos que amigos poderiam dar e me ajudar nesta jornada. Aos professores Claudio Cristino, Paulo Duarte, Tiago Ferreira e Borko Stosic por propiciarem a base para a execução deste trabalho. Ao CNPq pela bolsa, à Agência Nacional de Águas (ANA), ao Programa de Pós Graduação em Biometria e Estatística Aplicada (PPGBEA) e à Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) pelo apoio no desenvolvimento deste projeto.

*“Gostaria que isso não tivesse acontecido na minha época – disse Frodo.”  
“Eu também – disse Gandalf. – Como todos os que vivem nestes tempos. Mas a decisão  
não é nossa. Tudo o que temos de decidir é o que fazer com o tempo que nos é dado”.*

*(J.R.R. Tolkien  
O Senhor dos Anéis: A Sociedade do Anel.)*

# Resumo

O conhecimento sobre o regime de vazão de bacias hidrográficas permite-nos planejar melhor as políticas públicas de administração dos recursos hídricos. Contudo, a intervenção humana, através de reservatórios, pode alterar o regime hidrológico. Na Região Nordeste do Brasil, o rio São Francisco se destaca pela sua importância energética e social. Este rio possui dois grandes reservatórios: Três Marias e Sobradinho que afetam a vazão do rio a jusante. Para avaliar a influência dos mesmos na vazão do rio a jusante, foram selecionadas três estações: São Francisco/MG, Juazeiro/BA e Pão de Açúcar/AL. Para analisar as alterações do regime hidrológico foram utilizadas as técnicas de Detrended Fluctuation Analysis (DFA), Multi Scale Entropy (MSE) e Sliding Window Analysis (SWA). Os principais resultados foram (1) o regime hidrológico das estações de Juazeiro/BA e Pão de Açúcar/AL (próximas das Grandes Centrais Hidrelétricas/Reservatório - GCH/R) foi alterado depois da construção passando de persistente (nas escalas entre 30 dias e 1,5 anos) para anti-persistente (nas escalas de 10 dias a 1,5 anos); na estação de São Francisco/MG (mais distante da GCH/R) não se detectou alteração nas correlações após a construção; (2) a análise MSE mostrou para as estações de Juazeiro/BA e Pão de Açúcar/AL uma dinâmica mais complexa após a construção do reservatório quando comparado com o período anterior nas séries originais e uma dinâmica menos complexa para anomalias, divergindo da série original e de anomalias da estação de São Francisco/MG que não apresentou diferença de complexidade no regime hidrológico entre os períodos anterior e posterior a construção do reservatório; (3) modificações na entropia em janelas móveis (SWA-*SampEn*) após a construção de Sobradinho/BA para a estação de Juazeiro/BA e de Pão de Açúcar/AL. Estes resultados indicam que o reservatório de Sobradinho/BA, como agente regulador da vazão, influencia a complexidade e correlações de longo alcance da vazão do baixo São Francisco.

**Palavras-chaves:** Reservatório; DFA; MSE; SWA; Rio São Francisco;

# Abstract

Knowledge about watershed stream flow regime allows for better public water resource management. However, human activity through reservoir operation can change the stream flow regime. In the Brazilian Northeast region, the São Francisco river basin has a major social and energetic importance. This basin has two large reservoirs, Três Marias and Sobradinho that can affect downstream flow. We select three stations in São Francisco/MG, Juazeiro/BA and Pão de Açúcar/AL to evaluate influence from the reservoir in the river's downstream flow. We use Detrended Fluctuation Analysis (DFA), Multi Scale Entropy (MSE) and Sliding Window Analysis (SWA) to evaluate changes in dynamics and complexity of river stream flow. Our major results can be summarized as follows: (1) hydrologic regime in the Juazeiro/BA and Pão de Açúcar/AL stations (closer to Large Hydropower/Reservoir - LHP/R) changed after LHP/R construction from persistent (in scales from 30 days to 1,5 years) to anti-persistent (in scales from 10 days to 1,5 years), while the series from São Francisco/MG station (most distant to LHP/R) doesn't present any differences in long range correlations after LHP/R construction; (2) MSE analysis shows that series from Juazeiro/BA and Pão de Açúcar/AL stations have more complex dynamics after LHP/R construction and their anomalies have less complex dynamics after LHP/R construction, differently from the São Francisco/MG station series which didn't show any hydrologic dynamics differences throughout the same periods; (3) changes in Sliding Window *SampEn* (SWA-*SampEn*) after Sobradinho LHP/R construction were detected in the Juazeiro/BA and Pão de Açúcar/AL station series. These results indicate that regulation in stream flow by Sobradinho LHP/R has influenced the complexity and long-range correlations on the lower São Francisco river basin.

**Key-words:** Reservoir; DFA; MSE; SWA; São Francisco River;



# Lista de Figuras

Figura 1 – Representação Geográfica da Bacia do Rio São Francisco – Brasil . . . . .	6
Figura 2 – Localização da área de estudo e estações hidrológicas . . . . .	10
Figura 3 – Série temporal original (a) e anomalias (b) da Vazão ( $m^3/s$ ) na estação em Juazeiro/BA (1929-2009). Faixa vermelha indica período de construção da GCH/R de Sobradinho/BA. . . . .	18
Figura 4 – Histogramas da vazão nos períodos anterior (a), durante (b) e posterior (c) a construção da GCH/R de Sobradinho/BA. . . . .	19
Figura 5 – Série temporal original (a) e anomalias (b) da Vazão ( $m^3/s$ ) na estação em Pão de Açúcar/AL (1931-2007). Faixa verde indica período de construção da GCH/R de Xingó/SE. . . . .	20
Figura 6 – Histogramas da vazão nos períodos anterior (a), durante (b) e posterior (c) a construção da GCH de Xingó/AL. . . . .	21
Figura 7 – Série temporal original (a) e anomalias (b) da Vazão ( $m^3/s$ ) na estação em São Francisco/MG (1934-2015). Faixa azul indica período de construção da GCH/R de Três Marias/MG. . . . .	22
Figura 8 – Histogramas da vazão nos períodos anterior (a), durante (b) e posterior (c) a construção da GCH/R de Três Marias/MG . . . . .	23
Figura 9 – Gráfico da DFA-2 para os períodos: total (a), anterior (b) e posterior (c) à construção das GCH/Rs nas estações fluviométricas para as séries originais. Linhas verticais indicam mudança de comportamento. . . . .	24
Figura 10 – Gráfico da DFA-2 para os períodos: total (a), anterior (b) e posterior (c) à construção das GCH/Rs nas estações fluviométricas para as séries de anomalias. Linhas verticais indicam mudança de comportamento. . . . .	27
Figura 11 – Multi-Scale Entropy para a série original (a) e anomalias (b) da Vazão ( $m^3/s$ ) na estação em Juazeiro/BA (1929-2009) . . . . .	29
Figura 12 – Multi-Scale Entropy para a série original (a) e anomalias (b) da Vazão ( $m^3/s$ ) na estação em Pão de Açúcar/AL (1929-2007) . . . . .	30
Figura 13 – Multi-Scale Entropy para a série original (a) e anomalias (b) da Vazão ( $m^3/s$ ) na estação em São Francisco/MG (1934-2015) . . . . .	31
Figura 14 – Análise MSE para vazão nas estações de Juazeiro/BA, Pão de Açúcar/AL e São Francisco/MG nos períodos: total (a), anterior (b) e posterior (c) a construção das GCH/Rs para séries originais. . . . .	32

Figura 15 – Análise MSE para vazão nas estações de Juazeiro/BA, Pão de Açúcar/AL e São Francisco/MG nos períodos: total (a), anterior (b) e posterior (c) a construção das GCH/Rs para séries de anomalias. . . .	34
Figura 16 – Sliding Window Analysis: Amplitude Interquartil (AIQ) para as séries de Vazão ( $m^3/s$ ) nas estações. Construção da GCH/R de Sobradinho na faixa verde; Construção da GCH de Xingó na faixa vermelha. . . .	35
Figura 17 – Sliding Window Analysis: Curtose para as séries de Vazão ( $m^3/s$ ) nas estações. Construção da GCH/R de Sobradinho na faixa verde; Construção da GCH de Xingó na faixa vermelha. . . . .	36
Figura 18 – Sliding Window Analysis: Desvio Padrão (DP) para as séries de Vazão ( $m^3/s$ ) nas estações. Construção da GCH/R de Sobradinho na faixa verde; Construção da GCH de Xingó na faixa vermelha. . . . .	36
Figura 19 – Sliding Window Analysis: Assimetria para as séries de Vazão ( $m^3/s$ ) nas estações. Construção da GCH/R de Sobradinho na faixa verde; Construção da GCH de Xingó na faixa vermelha. . . . .	37
Figura 20 – Sliding Window Analysis: <i>SampEn</i> para as séries de Vazão ( $m^3/s$ ) nas estações. Construção da GCH/R de Sobradinho na faixa verde; Construção da GCH de Xingó na faixa vermelha. . . . .	38

## Lista de tabelas

Tabela 1 – Descrição das Estações Fluviométricas no Rio São Francisco. . . . .	9
Tabela 2 – Análise Descritiva da Vazão ( $m^3/s$ ) do Rio São Francisco: Juazeiro/BA (Estação 48020000), 1929-2009. . . . .	19
Tabela 3 – Análise Descritiva da Vazão ( $m^3/s$ ) do Rio São Francisco: Pão de Açúcar/AL (Estação 49370000), 1931-2007. . . . .	21
Tabela 4 – Análise Descritiva da Vazão ( $m^3/s$ ) do Rio São Francisco: São Francisco/MG (Estação 44200000), 1934-2015. . . . .	23
Tabela 5 – Expoentes DFA para as estações de Juazeiro/BA, Pão de Açúcar/AL e São Francisco/MG nos períodos: total, anterior e posterior a construção das GCH/Rs para as séries originais. . . . .	25
Tabela 6 – Expoentes DFA para as estações de Juazeiro/BA, Pão de Açúcar/AL e São Francisco/MG nos períodos: total, anterior, durante e posterior a construção das GCH/Rs para as séries de anomalias. . . . .	26

# Sumário

<b>1</b>	<b>Introdução</b>	<b>1</b>
<b>2</b>	<b>Revisão de Literatura</b>	<b>3</b>
2.1	Regime hidrológico e Clima	3
2.2	Reservatórios e hidrelétricas	4
2.3	Rio São Francisco	5
<b>3</b>	<b>Objetivos</b>	<b>8</b>
3.1	Objetivo Geral	8
3.2	Objetivos Específicos	8
<b>4</b>	<b>Materiais e Métodos</b>	<b>9</b>
4.1	Dados	9
4.2	Detrended Fluctuation Analysis (Análise de Flutuação sem Tendência – DFA)	11
4.3	Entropia	12
4.4	Sample Entropy (Entropia Amostral – <i>SampEn</i> )	14
4.5	Multi Scale Entropy (Entropia em Múltiplas Escalas – MSE)	15
4.6	Sliding Window Analysis (Análise em Janelas Móveis – SWA)	16
4.7	Software	17
<b>5</b>	<b>Resultados</b>	<b>18</b>
5.1	Estatística Descritiva	18
5.2	Detrended Fluctuation Analysis – DFA	23
5.3	Multiscale Entropy – MSE	28
5.4	Sliding Window Analysis – SWA	34
<b>6</b>	<b>Conclusão</b>	<b>39</b>
<b>7</b>	<b>Trabalhos Futuros</b>	<b>41</b>
	<b>Referências Bibliográficas</b>	<b>42</b>

# 1 Introdução

O conhecimento sobre o regime de vazão de bacias hidrográficas permite-nos planejar melhor as políticas públicas de administração de recursos hídricos, tais como: irrigação, produção de energia hidrelétrica, abastecimento, proteção contra enchentes e secas além de conservação dos ecossistemas nas regiões ribeirinhas e de várzea.

Dentre os muitos usos dos recursos hídricos, se destaca a produção de energia hidrelétrica, por ser considerada limpa e renovável. Porém, a discordância quanto a esta afirmação reside quando esta é acompanhada de reservatórios para controle de vazão, ou seja, o uso de grandes centrais hidrelétricas de acumulação.

Hoje a maioria dos rios de grande porte ao redor do planeta é regulada por meio de reservatórios (com ou sem hidrelétrica) que causam grandes impactos no ecossistema, geomorfologia e biodiversidade dos rios além de intensificar o processo de sedimentação a montante<sup>1</sup> e erosão a jusante<sup>2</sup>.

No Brasil e no Nordeste, se destaca a bacia do rio São Francisco por sua importância econômica, social, ambiental e energética, sendo este detentor de dois reservatórios de grande porte (Três Marias/MG e Sobradinho/BA) e doze grandes centrais hidrelétricas.

Neste trabalho avaliamos a influência de hidrelétricas e reservatórios no regime hidrológico da bacia do rio São Francisco, no período total, anterior e posterior à construção das hidrelétricas e reservatórios de Três Marias/MG e Sobradinho/BA nas estações a jusante de São Francisco/MG e Juazeiro/BA, respectivamente, bem como na hidrelétrica de Xingó/SE na estação a jusante de Pão de Açúcar/AL.

Para tal, utilizaremos as técnicas: Detrended Fluctuation Analysis – DFA (Análise de Flutuação sem Tendência), capaz de identificar estrutura de correlação de longo alcance; Multi-Scale Entropy - MSE (Entropia em Múltiplas Escalas) capaz de avaliar variações na complexidade da vazão em diversas escalas de tempo; Sliding Window Analysis – SWA (Análises em Janelas Móveis), capaz de identificar mudanças de comportamento de diversas medidas dinamicamente e será comparada com as ocorrências de El Niño – Oscilação do Sul (ENSO) de alta intensidade.

Este trabalho apresenta no capítulo 2 uma revisão sobre regime hidrológico e clima, hidrelétricas e reservatórios e caracterização do rio São Francisco. No capítulo 4 são apresentadas as técnicas de DFA, MSE e SWA, onde já foram aplicadas principalmente para dados hidrológicos. No capítulo 5 são apresentados e discutidos os resultados obtidos

---

<sup>1</sup> Rio acima

<sup>2</sup> Rio abaixo

a cerca dos dados de vazão para as técnicas utilizadas. No capítulo 6 apresentamos a conclusão sobre os principais resultados encontrados e sugestões para futuros trabalhos.

## 2 Revisão de Literatura

### 2.1 Regime hidrológico e Clima

Bacias hidrográficas são sistemas dinâmicos por natureza estando assim em constante estado de mudança. Algumas mudanças são tão extremas que alteram essa dinâmica (ou regime hidrológico) (MCCUEN, 2002) tornando-as não estacionárias<sup>1</sup> (ZHANG et al., 2014a; ZHANG et al., 2014b). O regime hidrológico é mais comumente caracterizado pela precipitação e pela vazão. Precipitação e vazão não são sincronizados (PAN et al., 2012) e a complexidade da precipitação não depende da escala de tempo ao contrário da vazão (SALAS; POVEDA, 2015).

Vazão é uma importante variável hidrológica, pois é influenciada por uma combinação de fatores tais como precipitação, temperatura dentre outros em grandes bacias e pode ser utilizado como um indicador hidrológico de mudança climática (ZHAO et al., 2015).

A vazão de rios é caracterizada pelo padrão sazonal; sincronização de eventos extremos; duração, frequência e fácil predição de enchentes, secas e vazões intermediárias; variabilidade anual, sazonal e diária bem caracterizada (OLDEN; POFF, 2003) correlações de longo alcance, dinâmica multifractal (LIVINA et al., 2003; MOVAHED; HERMANIS, 2008) e complexidade devido a fatores controladores tais como geomorfologia e características do solo (PAN et al., 2012).

Através da erosão e da sedimentação a bacia hidrográfica pode criar, destruir e alterar a sua própria morfologia (NESTLER et al., 2012; VRIELING, 2006). Este processo é determinado por propriedades físicas do substrato (sedimento ou rocha) e predominantemente pelo clima ou uso da terra (WIEL et al., 2011).

É notória a influência dos fenômenos El Niño-Southern Oscillation – ENSO (El Niño – Oscilação do Sul) e South Atlantic Dipole – SAD (Dipolo do Atlântico Sul) na precipitação e indiretamente na vazão dos rios na América do Sul (HASTENRATH; GREISCHAR, 1993; POVEDA; MESA, 1997; CAVALCANTI, 2015) afetando a agricultura da região (CIRINO et al., 2015).

O ENSO é caracterizado por diferenças de temperatura na superfície do oceano pacífico onde a fase baixa (ou quente) de ENSO coincide com baixos níveis de precipitação

<sup>1</sup> Segundo Box et al. (2015): “Um processo estocástico é dito ser estritamente estacionário se suas propriedades não são afetadas por uma mudança de tempo, ou seja, se a distribuição de probabilidade conjunta associada a  $m$  observações  $z_{t_1}, z_{t_2}, \dots, z_{t_m}$  feita em qualquer conjunto de tempo  $t_1, t_2, \dots, t_m$  é a mesma associada com  $m$  observações  $z_{t_1+k}, z_{t_2+k}, \dots, z_{t_m+k}$  feita no conjunto de tempo  $t_1 + k, t_2 + k, \dots, t_m + k$ ”.

e secas na região Nordeste Brasileira (HASTENRATH; GREISCHAR, 1993; LIMA; LALL, 2010) bem como os períodos de fase alta (ou fria) de ENSO com anomalias positivas, podendo apresentar diferenças de sincronismo e amplitude de região para região<sup>2</sup> (POVEDA; MESA, 1997).

Quanto a SAD, Bombardi et al. (2014) argumenta que está associado à temperatura da água no Oceano Atlântico que influencia toda a região abrangida pelo rio São Francisco. Ele argumenta que em períodos de dipolo positivo a região apresenta aumento na precipitação bem como os negativos apresentam diminuição da precipitação. Contudo, para este estudo apenas será considerado o ENSO, pois a precipitação do Nordeste é fortemente influenciada por esse fenômeno em sua fase baixa, também chamado por La Niña (CAVALCANTI, 2015).

A mudança climática por meio de grandes eventos de precipitação e aumento de temperatura (CHEN et al., 2007; MASSEI; FOURNIER, 2012) associadas a variabilidade natural (ZIEGLER et al., 2003) e atividade humana através da construção de reservatórios (ZHANG et al., 2012; LEE; YOU, 2013), hidrelétricas (SPERLING, 2012) e uso excessivo da terra (ZHANG et al., 2014a; MASSEI; FOURNIER, 2012; MIHAILOVIĆ et al., 2014; RICHTER et al., 1996) podem afetar o regime hidrológico de bacias diminuindo sua complexidade (SEN, 2009). Em particular, no presente estudo avaliamos a influência de reservatórios e hidrelétricas na vazão do rio São Francisco.

## 2.2 Reservatórios e hidrelétricas

Hidrelétricas capturam a energia cinética da água que cai a partir de rios ou cachoeiras para gerar eletricidade. As turbinas e geradores convertem a energia cinética retirada da água em energia mecânica e depois em eletricidade (GHOSH; PRELAS, 2011).

As hidrelétricas são classificadas quanto ao método de construção e ao tamanho. Quanto à construção são: “a fio d’água” ou de desvio (sem reservatório), de acumulação (com reservatório regularizado) ou de armazenamento bombeado (dois reservatórios). Quanto ao tamanho são classificadas como Micro central hidrelétrica (*MCH*, < 100KW), Pequena central hidrelétrica (*PCH*, 100KW e 30MW) e Grande central hidrelétrica (*GCH*, > 30MW) (BRASIL. ANEEL., 2015).

Em particular, as GCHs dividem as opiniões dos pesquisadores. Ansar et al. (2014) argumenta que em muitos países GCHs de acumulação ou reservatório (GCH/R) são muito caras e levam muito tempo para ficarem prontas e funcionais tendo assim um baixo

<sup>2</sup> Os últimos períodos de El Niño forte foram: 1939 a 1941, 1972 a 1973, 1982 a 1983, 1990 a 1993 e 1997 a 1998. Os últimos períodos de La Niña forte ocorreram em: 1938 a 1939, 1949 a 1951, 1954 a 1956, 1973 a 1976, 1988 a 1989 e 2007 a 2008. Fonte: (CPTEC, 2015).



custo benefício em curto e médio prazo. Argumenta ainda que países em desenvolvimento deveriam optar por fontes alternativas mais rápidas. Porém, Ornas (2007), baseado em projetos ao redor do mundo, apresenta uma revisão de como hidrelétricas podem e devem ser sustentáveis nos âmbitos social, econômico e ambiental.

Pao e Fu (2013) afirma que é preciso haver um limite para o uso de energia hidrelétrica (maior parte proveniente de GCHs) pois esta pode frear o crescimento econômico, em particular, no Brasil. Soito e Freitas (2011) acreditam que o Brasil ainda possui um potencial hidrelétrico ainda não explorado na bacia Amazônica, devido principalmente a manutenção de reservatórios e múltiplos usos da água, legislação própria, oportunidades técnicas e econômicas no setor e política externa adequada.

Em particular, as GCH/Rs ou barragens são utilizados para controle da vazão de rios a fim de prevenção de enchentes (ou secas) (ZHOU et al., 2015) e o custo de sua instalação é inferior ao custo com calamidades provocadas pelas enchentes (ou secas) (LEE; YOU, 2013), além de geração de energia, geração de empregos e diminuição (indireta) da utilização de combustíveis fósseis (SPERLING, 2012), bem como uso da água represada em época de seca (YUN; SINGH, 2008).

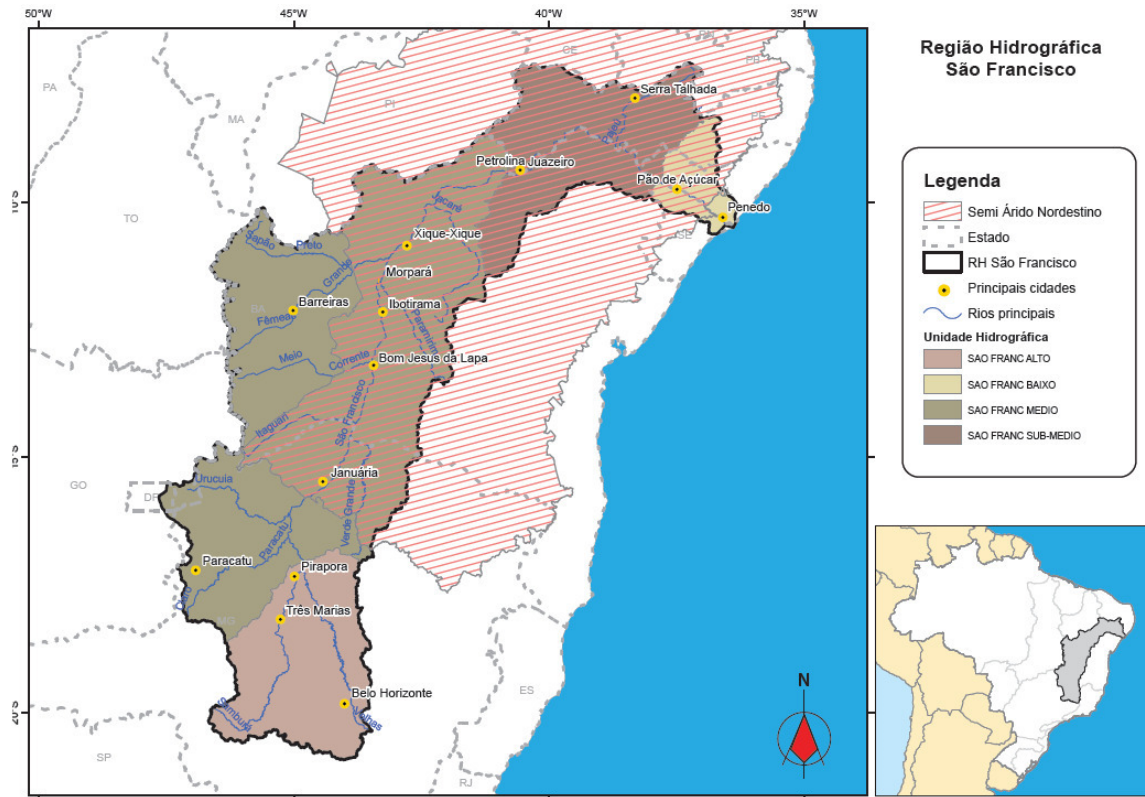
Pórem, Souza (2008) argumenta que a sua instalação e manutenção gera altos impactos ambientais, dentre eles: pior qualidade da água, realocação de moradores, alterações ecológicas, emissão de gases de efeito estufa e modificação do regime hidrológico (SPERLING, 2012). Neste sentido, Lee e You (2013) argumentam que os reservatórios provocam modificações na sedimentação das bacias o que pode influenciar na sustentabilidade e segurança dos mesmos devido a transbordo.

## 2.3 Rio São Francisco

A bacia do rio São Francisco está contida completamente em solo brasileiro, sendo a maior bacia do país nestas condições. Está localizado na região Nordeste do país e possui uma área de drenagem de aproximadamente  $630.000 \text{ km}^2$ . O rio flui do norte do estado de Minas Gerais até a sua foz entre os estados de Alagoas e Sergipe desaguando no Oceano Atlântico percorrendo a distância de  $2860 \text{ km}$ , ao longo de diversas regiões climáticas (MANETA et al., 2009).

O rio esta dividido em quatro regiões fisiográficas (dada a extensão e diversidade de ambientes) representada na Figura 1: Alto São Francisco (da nascente a Pirapora/MG, representando 19% da área); Médio São Francisco (Pirapora/MG a Remanso/BA, representando 55% da área); Submédio São Francisco (Remanso/BA a Paulo Afonso/BA, representando 24% da área) e Baixo São Francisco (Paulo Afonso/BA a Foz entre Brejo Grande/SE e Piaçabuçu/AL, representando 7% da área) (PEREIRA et al., 2007).

Figura 1: Representação Geográfica da Bacia do Rio São Francisco – Brasil



Fonte: (ANA, 2015b)

Segundo Medeiros et al. (2012) o clima da região é diversificado tal que o alto e o médio São Francisco possuem um clima tropical úmido, o submédio um clima semi-árido e o baixo possui um clima quente e úmido.

A precipitação média anual da Bacia é maior na região da cabeceira, diminuindo sentido foz, até as proximidades do limiar entre submédio e baixo São Francisco, voltando a crescer até a foz em decorrência da proximidade com o litoral (PEREIRA et al., 2007). A vegetação é caracterizada por cerrado no Médio e Alto São Francisco, caatinga no Médio e Submédio e mata atlântica no Baixo São Francisco (ANA, 2015b).

Entre os usos dos recursos hídricos do rio São Francisco, uma das atividades que se destacam é a irrigação, cuja vazão retirada é de  $213,7 \text{ m}^3/\text{s}$ , representando 77% da demanda total da região com área total irrigada é de 626 mil hectares (ANA, 2015). Embora existam evidências de que a atividade humana com agricultura afete a saúde e sustentabilidade de bacias principalmente nas regiões mais baixas (ATAPATTU; KODITUWAKKU, 2009), o rio São Francisco não é afetado por esta atividade (MANETA et al., 2009).

A região semiárida brasileira ocupa 57% da área da bacia do rio São Francisco e situações de escassez de água são comuns na região. O Submédio e o Baixo São Francisco apresentam maior frequência de eventos críticos de seca (ANA, 2015b).

Contudo, o maior potencial do rio se dá através da energia hidrelétrica, que possui uma capacidade instalada de 10.708 MW, dentre os quais são provenientes de 28 PCHs e 12 GCHs (ANA, 2015). A operação adequada das GCHs permite acumular água no período chuvoso para atender as demandas hídricas no período seco além de reduzir os riscos de enchentes a montante (GURJÃO et al., 2012).

O fornecimento de eletricidade da região Nordeste vem predominante da Companhia Hidrelétrica do São Francisco (CHESF) que possui uma capacidade instalada de 10.615 MW com as hidrelétricas de Luiz Gonzaga, complexo Paulo Afonso composto pelas hidrelétricas de Apolônio Sales, Paulo Afonso I, II, III e IV, bem como Piloto, Sobradinho e Xingó totalizando um potencial energético de aproximadamente 10.369,5 MW de capacidade instalada (CHESF, 2015; ANA, 2015a; ANDRADE et al., 2012).

Além destas ainda há no rio São Francisco, a hidrelétrica de Três Marias com 396 MW de capacidade instalada operada pela Companhia de Energética de Minas Gerais – CEMIG (CHESF, 2015; ANA, 2015a). Segundo Andrade et al. (2012) a CHESF (Companhia Hidrelétrica do São Francisco) não possui uma política adequada para prevenção contra enchentes e secas devido a eventos climáticos extremos e por consequência uma política de segurança energética adequada.

## 3 Objetivos

### 3.1 Objetivo Geral

Avaliar a influência de Hidrelétricas e Reservatórios no regime hidrológico do rio São Francisco.

### 3.2 Objetivos Específicos

Comparar as propriedades de invariância de escala da vazão nos períodos anterior e posterior à construção das GCH/R de Sobradinho/BA, Três Marias/MG e Xingó/AL, utilizando o método Detrended fluctuation analysis (DFA).

Comparar a complexidade dinâmica da vazão nos períodos anterior e posterior à construção das GCH/R de Sobradinho/BA, Três Marias/MG e Xingó/AL, utilizando o método Multiscale entropy (MSE).

Analisar as estatísticas descritivas e a dinâmica da complexidade da vazão em janelas móveis (SWA) para detectar as alterações hidrológicas relacionadas com construção de reservatórios e hidroelétricas.

## 4 Materiais e Métodos

### 4.1 Dados

Vazões diárias ( $m^3/s$ ) foram obtidas de três estações ao longo do rio São Francisco junto a Agência Nacional de Águas (ANA): São Francisco/MG (médio São Francisco), Juazeiro/BA (sub-médio São Francisco) e Pão de Açúcar/AL (baixo São Francisco), com informações técnicas descritas na Tabela 1 abaixo:

Tabela 1: Descrição das Estações Fluviométricas no Rio São Francisco.

	São Francisco/MG	Juazeiro/BA	Pão de Açúcar/AL
Estação	44200000	48020000	49370000
Latitude	-15,9494	-9,4064	-9,7514
Longitude	-44,8678	-40,5036	-37,4464
Altitude	448	357,74	8,1
Área de Drenagem ( $km^2$ )	0,184	0,516	0,615
Período	1934-2015	1929-2009	1931-2007
Localização na Bacia	Médio	Sub-Médio	Baixo
GCH/R	Três Marias	Sobradinho	Xingó
Anterior a construção	1934-1956	1929-1972	1931-1971
Durante a construção	1957-1962	1973-1979	1972-1994
Posterior a construção	1963-2015	1980-2009	1995-2007
Latitude	-18,2042	-9,4324	-9,6206
Longitude	-45,2628	-40,8282	-37,7298
Distância para GCH ( $km$ )			
Segmento de rio	344	40,6	44,2
Geodésica	182,92	36,11	33,51
Potência instalada ( $MW$ )	396	1.050	3.162
Área na cota ( $km^2$ )	1.090	4.214	60
Área de drenagem ( $km^2$ )	50.600	498.968	-
Volume total ( $hm^3$ )	19.528	34.116	380
Volume útil ( $hm^3$ )	15.278	28.669	41
Vazão regularizada ( $m^3/s$ )	681	2.060	Fio d'água

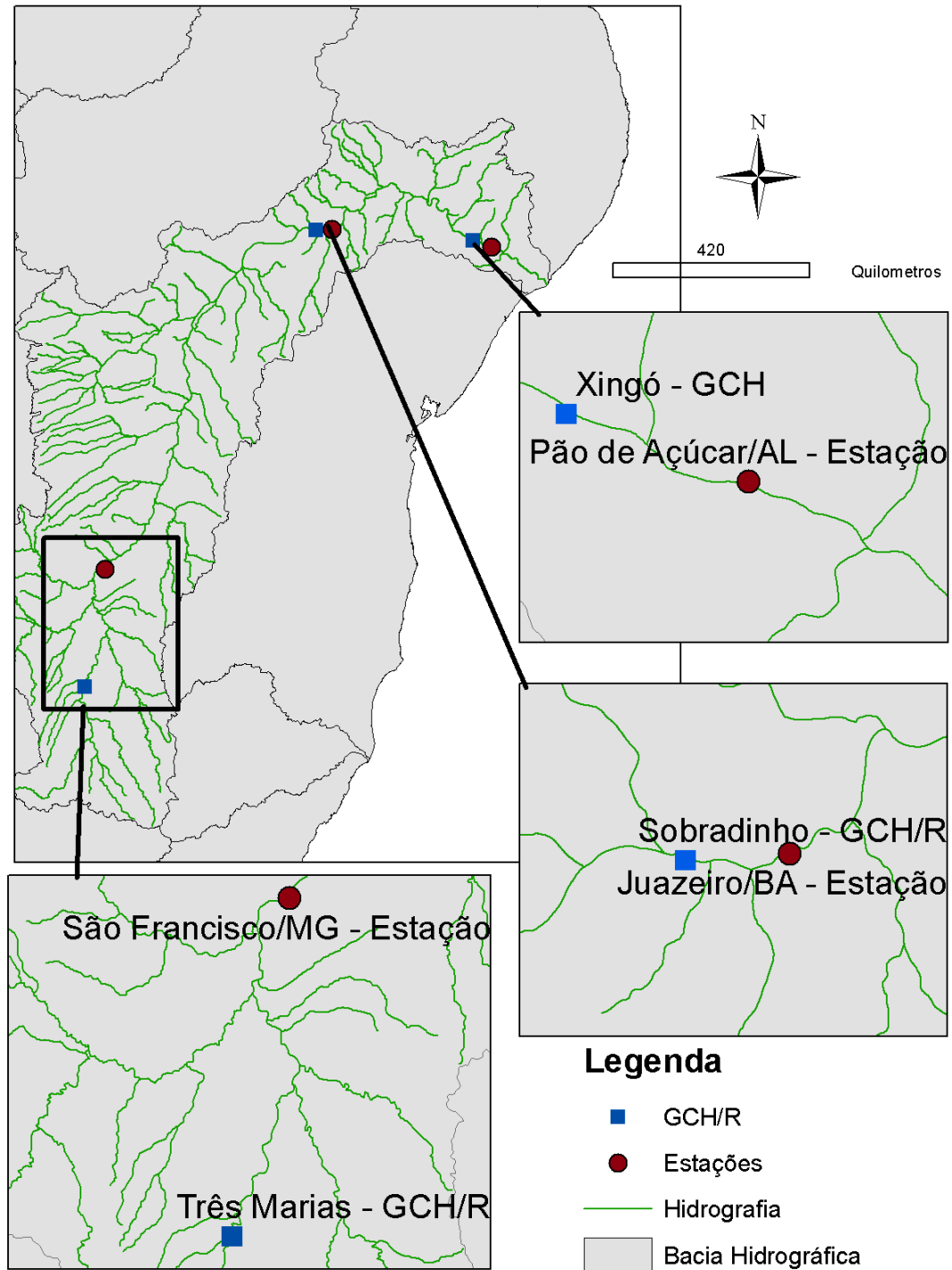
Fonte:(CEMIG, 2015; ANA, 2015a; CHESF, 2015; INC., 2015; HIJMANS, 2015)

A localização da bacia do rio São Francisco bem como as GCH e estações hidrológicas esta representada na Figura 2.

Para todas as análises deste estudo, consideraremos os períodos analisados (total, anterior, durante e posterior) tal como descrito na Tabela 1. Para algumas análises, o período durante a construção das GCH/Rs foi desconsiderado devido a pouca quantidade

de dados levando a incertezas sobre os resultados. A distância entre as estações e as GCHs foi medida através da menor geodésica e segmento de rio.

Figura 2: Localização da área de estudo e estações hidrológicas



Elaborado pelo Autor

A escolha das estações seguiu três critérios: (1) disponibilidade de dados para avaliação dos períodos relativo a construção da hidrelétrica relacionada, (2) melhor dis-

posição ao longo do rio de maneira a ter a maior parte das regiões representadas e (3) menor distância possível entre estação e hidrelétrica. Para Sobradinho/BA e Xingó/SE, a distância a estação pode ser considerada adequada. Para Três Marias/MG, embora esteja a uma distância grande (344 km) esta possibilitará a influência da distância.

Segundo Kantelhardt et al. (2006) para diminuir a influência da sazonalidade das séries diárias, pode-se propor uma transformação que retire a tendência anual através da equação 4.1.1:

$$\tilde{X}_{ij} = (X_{ij} - \bar{X}_i) / \sigma_i \quad (4.1.1)$$

Onde  $X_{ij}$  é a  $i$ -ésima observação diária no  $j$ -ésimo ano;  $i$  é o indicativo do dia independente do ano;  $j$  é o indicativo do ano;  $\bar{X}_i$  é a média amostral do  $i$ -ésimo dia ao longo dos anos;  $\sigma_i$  é o desvio padrão amostral do  $i$ -ésimo dia ao longo dos anos. Para todas as análises, chamaremos a nova série de “Anomalias” e estas serão também submetidas as análises.

## 4.2 Detrended Fluctuation Analysis (Análise de Flutuação sem Tendência – DFA)

Valores absolutos e anomalias da vazão de rios tendem a apresentar-se em blocos e são caracterizados pela memória de longo alcance. Desenvolvida por Peng et al. (1994) DFA permite-nos avaliar propriedades de correlação de séries temporais, em particular, vazão. Livina et al. (2003) argumenta que para avaliar a presença de correlação de longo alcance, DFA é mais adequada pois remove tendências polinomiais da série. Kantelhardt et al. (2002) afirma que a mesma evita detectar correlações espúrias devido a propriedades não estacionárias da série.

Esta técnica tem sido aplicada em fisiologia (GOLDBERGER et al., 2002; KIRCHNER et al., 2014), geofísica (CURRENTI et al., 2005; ZHENG et al., 2012), climatologia (KIRÁLY; JÁNOSI, 2005; TELESCA; PIERINI; SCIAN, 2012) e finanças (ALVAREZ-RAMIREZ et al., 2008; YAMASAKI et al., 2005). DFA também foi utilizada em análise de vazão e precipitação (KOSCIELNY-BUNDE et al., 2006; JOELSON et al., 2016; LABAT et al., 2011; LIVINA et al., 2003). Zhang et al. (2012) utilizou a técnica para avaliar influência de reservatórios no Rio Yangtzé (China) e não detectou diferenças nos regimes. Abaixo segue o algoritmo da Detrended Fluctuation Analysis donde, seja  $X_t$  uma sequência (ou série temporal) tal que  $X_t = X_{t=1}, X_{t=2}, \dots, X_{t=N}$ , com  $t = 1, 2, \dots, N$  indicador do tempo.

Se existir correlação serial de longo alcance na série original, a função de flutuação  $F(n)$  segue uma lei de potência  $F(n) \sim n^\alpha$ . O expoente  $\alpha$  é obtido pelo coeficiente

1. Gerar a série integrada  $X(k) = \sum_{i=1}^k [x(i) - x]$ ,  $k = 1, \dots, N$  donde  $x = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x(i)$  é a média aritmética.
2. Divida série  $X(k)$  em  $N_n = \text{int}(N/n)$  segmentos não sobrepostos de tamanho  $n$ .
3. Em cada segmento  $s = 1, \dots, N_n$  a tendência local  $X_{n,s}(k)$  (linear ou polinomial de ordem superior definidos como DFA-1, DFA-2 e DFA-3) são estimadas e subtraídas de  $X(k)$ .
4. A variância sem tendência é calculada através de  $F^2(n) = \frac{1}{nN_n} \sum_{s=1}^{N_n} \sum_{k=(s-1)n+1}^{sn} [X(k) - X_{n,s}(k)]^2$ .
5. Repita o procedimento para todos os tamanhos de segmento  $n$ .

angular da reta entre  $\log(F(n))$  e  $\log(n)$ . Para  $\alpha = 0,5$  a série não apresenta correlação serial,  $\alpha > 0,5$  indica uma correlação de longo alcance onde tendências de crescimento ou decrescimento são predominantes,  $\alpha < 0,5$  indica uma correlação de longo alcance anti-persistente donde a série toma valores em tendências opostas com mais frequência. Para  $\alpha > 1$  a série ainda vai apresentar correlação de longo alcance todavia a função de flutuação começa a não seguir uma lei de potência. O expoente de Hurst é obtido como  $H = \alpha - 1$  e descreve as correlações dos incrementos da série. Para  $\alpha = 1,5$  a correlação é similar a um ruído Browniano. Por fim, o expoente  $\alpha$  serve para avaliar a rugosidade de séries temporais, quanto maior o expoente mais suave é a série temporal (PENG et al., 1994; SU et al., 2013).

### 4.3 Entropia

Segundo Singh (1997) recursos ambientais e hídricos são sistemas complexos. Esses sistemas são no geral estocásticos ou parte estocástico e parte determinístico. A componente estocástica desses sistemas é atribuída a estrutura, a dinâmica e/ou condições iniciais ou limites. Pode-se definir entropia como sendo a quantidade de aleatoriedade, complexidade ou informação de um sistema. Em termos probabilísticos ou estatísticos, podemos definir ainda como o grau de incerteza dos eventos definidos sobre um espaço de probabilidade. Quanto maior a entropia, mais complexo, caótico, aleatório ou incerto é o fenômeno (SINGH, 1997). Para Golan (2008), entropia é a informação esperada de um sistema. Reflete o que podemos aprender com as observações, em média e depende da forma como medimos informação. Mais tecnicamente, é uma medida de incerteza de uma variável aleatória. Singh e Cui (2015) afirmam que séries hidrológicas embora sejam comumente modeladas por modelos lineares, tais modelos não sejam adequados devido a estrutura de correlação e a sazonalidade destas séries. Esses sistemas estocásticos complexos precisam ser descritos e a teoria de entropia permite esta descrição. Assim podemos definir entropia, tal que, dada uma variável aleatória discreta  $X : \Omega \rightarrow \Theta$  com espaço de eventos ou alfabeto



finito definida no espaço de probabilidade  $(\Omega, F, P)$ , a entropia é definida pela equação 4.3.1 (GRAY, 2011):

$$H_P(X) = -\mathbf{E}[\log_2 P(X = x_i)] = - \sum_{x_i \in \Theta} P(X = x_i) \log_2 P(X = x_i) \quad (4.3.1)$$

Onde  $\mathbf{E}$  representa o operador esperança. Para uma série temporal amostrada de um processo estocástico, ou seja, uma sequência de variáveis aleatórias indexadas pelo tempo,  $X_i = X_1, X_2, \dots, X_n$  com suporte em  $\Theta_i = \Theta_1, \Theta_2, \dots, \Theta_n$ , a entropia conjunta é definida por 4.3.2 (COSTA; GOLDBERGER; PENG, 2005):

$$\begin{aligned} H_n &= H(X_1, X_2, \dots, X_n) \\ &= - \sum_{X_1 \in \Theta_1} \dots \sum_{X_n \in \Theta_n} P(X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_n = x_n) \\ &\quad \log_2 P(X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_n = x_n) \end{aligned} \quad (4.3.2)$$

Onde  $P(X_1 = x_1, X_2 = x_2, \dots, X_n = x_n)$  é a distribuição de probabilidade conjunta para  $X_1, X_2, \dots, X_n$ . Aplicando a regra da cadeia equação 4.3.2, a entropia conjunta pode ser escrita como uma soma de entropias condicionais, cada uma sendo uma quantidade não negativa (4.3.3):

$$H_n = \sum_{i=1}^n H(X_i | X_{i-1}, \dots, X_1) \quad (4.3.3)$$

Assim, podemos concluir que a entropia conjunta cresce como uma função de  $n$ . A taxa com que a entropia conjunta cresce dado  $n$ , denotada por taxa entrópica ou taxa de entropia  $h$ , é definida por:

$$h = \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{H_n}{n} \quad (4.3.4)$$

Considere agora um sistema dinâmico  $\mathcal{D}$ -dimensional. Suponha que o espaço de fase é particionado em hipercubos de conteúdo  $\epsilon^{\mathcal{D}}$  e o estado do sistema é medido em intervalos de tempo  $\delta$ . Seja  $p(k_1, k_2, \dots, k_n)$  a probabilidade conjunta de que o estado do sistema é o hipercubo  $k_1$  no momento  $t = \delta$ ,  $k_2$  no momento  $t = 2\delta$ , e o hipercubo no  $k_n$  no momento  $t = n\delta$ . A entropia de Kolmogorov-Sinai (KS) é dada por:

$$\begin{aligned} H_{KS} &= \lim_{\delta \rightarrow 0} \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n\delta} \sum_{k_1, \dots, k_n} p(k_1, k_2, \dots, k_n) \text{Log}_2(p(k_1, k_2, \dots, k_n)) \\ &= \lim_{\delta \rightarrow 0} \lim_{\epsilon \rightarrow 0} \lim_{n \rightarrow \infty} \frac{1}{n\delta} H_n \end{aligned} \quad (4.3.5)$$

Para um processo estacionário (Costa et al, 2005), pode se mostrar que:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} \frac{H_n}{n} = \lim_{n \rightarrow \infty} H(X_n | X_{n-1}, \dots, X_1) \quad (4.3.6)$$

Pela regra da cadeia, é simples perceber que

$$H_{KS} = \lim_{\delta \rightarrow 0} \lim_{\delta \rightarrow 0} \lim_{n \rightarrow \infty} (H_{n+1} - H_n) \quad (4.3.7)$$

O estado do sistema num certo instante  $t_i$  é parcialmente determinado pela sua memória,  $t_1, t_2, \dots, t_{i-1}$ . No entanto, cada novo estado traz nova quantidade de informação. A entropia  $KS$  mede a taxa média de criação de informação, em outras palavras, a diminuição da incerteza de um estado conhecendo o estado atual do sistema e sua memória. Contudo, a entropia de Kolmogorov-Sinai tem pouca utilidade prática já que não se dispõe de séries temporais de tamanho infinito.

Entre as aproximações propostas para a entropia de Kolmogorov-Sinai para o caso finito podemos destacar a de Richman e Moorman (2000) com a entropia amostral ou Sample Entropy (*SampEn*), que utilizaremos neste trabalho.

## 4.4 Sample Entropy (Entropia Amostral – *SampEn*)

Proposta por Richman e Moorman (2000) como uma modificação da entropia aproximada proposta por Pincus (1991), a *SampEn* possui a vantagem de ser mais consistente dado o tamanho da série e não ser viesada. O método também é computacionalmente menos intensivo.

Séries hidrológicas (vazão) devem apresentar baixa entropia devido à regularidade (ou sazonalidade) do regime hidrológico (OLDEN; POFF, 2003). Lee e You (2013) argumentam que a complexidade de sistemas fluviais está ligada a estrutura interna e a capacidade de se ajustar as mudanças hidrológicas. Pan et al. (2012) argumenta que a vazão de rios possui maior complexidade do que a precipitação e que a bacia hidrográfica funciona como um filtro o que confere maior complexidade a vazão. O processo hidrológico deve ficar mais imprevisível e perder sua estrutura e correlação devido a interferência humana, bem como aumentar a complexidade (LEE; YOU, 2013).

O algoritmo da Sample Entropia está descrito abaixo donde  $X_t$  é uma sequência (ou série temporal) tal que  $X_t = X_{t=1}, X_{t=2}, \dots, X_{t=N}$ , com  $t = 1, 2, \dots, N$  indicador do tempo.

Podemos assim definir  $SampEn(m, r) = \lim_{N \rightarrow \infty} -\ln [B^{m+1}(r) / B^m(r)]$ , que pode ser estimado por  $SampEn(m, r, N) = -\ln [B^{m+1}(r) / B^m(r)]$  e pode ser descrita como

1. Forme um conjunto de vetores  $X_1^m, X_2^m, \dots, X_{(N-m+1)}^m$  definidos por  $X_i^m = (x_i, x_{i+1}, \dots, x_{i+m-1})$  com  $i = 1, 2, \dots, N-m+1$  e  $m$  sendo a dimensão de incorporação.
2. Calcule a distância de Chebyshev (diferença máxima absoluta) entre  $X_i^m$  e  $X_j^m$ , tal que  $i \neq j$
3. Para um dado grupo  $X_i^m$ , conte o número de  $j$  ( $1 \leq j \leq N-m+1, j \neq i$ ) denotado por  $B_i$ , tal que  $d[X_i^m, X_j^m] < r$ , sendo  $r$  (raio) o nível de tolerância para afirmar similaridade entre as sequências. Então para  $i$  ( $1 \leq i \leq N-m, j \neq i$ ),  $B_i^m(r) = B_i / (N-m-1)$ . Assim, defina  $B^m(r) = \sum_i B_i^m(r) / (N-m)$
4. Execute os passos de 1 a 3 com dimensão de incorporação igual a  $m+1$ .

o logaritmo da probabilidade condicional de que duas sequências similares para  $m$  pontos permaneçam similares para  $m+1$  pontos (RICHMAN; MOORMAN, 2000).

A *SampEn* foi utilizada recentemente em análise de processos fisiológicos (LAKE et al., 2002; RAMDANI et al., 2009), sinais geofísicos (BALASIS et al., 2009; MIN; GUANG; SARKAR, 2014) dados climáticos (SHUANGCHENG et al., 2006) processos hidrológicos (HUANG et al., 2011) e séries financeiras (REDDY; SEBASTIN, 2006).

Porém, para utilização destes métodos, é necessária a escolha adequada dos parâmetros  $m$  e  $r$ . Várias propostas de escolha para o tamanho raio de tolerância  $r$  foram apresentadas (LU et al., 2008; LIU et al., 2010). Contudo, devido à quantidade de dados, este trabalho optará pelo valor de  $0,2\sigma$  sendo  $\sigma$  o desvio padrão da série temporal, pois este exige apenas 200 observações para obter resultados consistentes, conforme Mayer et al. (2014).

Costa, Goldberger e Peng (2005) argumenta que um aumento na entropia não necessariamente implica num aumento de complexidade, pois, um sistema completamente regular ou um sistema completamente desordenado não possuem estruturas complexas e possuem entropias diferentes. Assim, *SampEn* apenas observa os fenômenos em uma frequência ou escala, o que nos leva a uma visão incompleta da dinâmica intrínseca da vazão de rios (ZHANG et al., 2012). Para contornar este problema, uma entropia em múltiplas escalas pode ser aplicada.

## 4.5 Multi Scale Entropy (Entropia em Múltiplas Escalas – MSE)

A Entropia em Múltiplas Escalas, proposta por Costa, Goldberger e Peng (2005), visa avaliar complexidade (ou regularidade) em múltiplas escalas (ou frequências). Esta técnica se caracteriza por poder comparar a complexidade de séries temporais onde séries mais complexas apresentam maior entropia para maioria das escalas.

O algoritmo desta técnica esta apresentada abaixo donde  $X_t$  uma sequência (ou série temporal) tal que  $X_t = X_{t=1}, X_{t=2}, \dots, X_{t=N}$ , com  $t = 1, 2, \dots, N$  indicador do tempo.

Fixe a dimensão de incorporação  $m$  e o raio de tolerância  $r$  em  $0, 2\sigma$  para a série original.

1. Construa série  $Y_t^{(\tau)} = \frac{1}{\tau} \sum_{i=(j-1)\tau+1}^{j\tau} x_i$ , composta das médias aritméticas dos  $j$  blocos de tamanho  $\tau$  (fator de escala), com  $j = 1, 2, \dots, N/\tau$  e  $\tau$  de 1 a 30 com  $N$  suficientemente grande.
2. Calcule a *SampEn* para cada série  $Y_t^{(\tau)}$ , com os valores de  $m$  e  $r$  previamente fixados.
3. Construa a curva para  $\tau$  e *SampEn* ( $Y_t^{(\tau)}$ ).

Alguns tipos de séries possuem comportamento característico de MSE, donde um ruído tem um comportamento decrescente a medida que a escala cresce, um ruído  $1/f$  (rosa) um comportamento constante ao longo das escalas (COSTA; GOLDBERGER; PENG, 2005; ZHOU et al., 2012). Apresenta problemas de convergência em escalas superiores devido ao número de observações (WU et al., 2013).

Esta técnica foi utilizada para análise de dados em climatologia (BALZTER et al., 2015; FU et al., 2014), hidrologia (CHOU, 2012; CHOU, 2014; LI; ZHANG, 2008; ZHANG et al., 2012; ZHOU et al., 2012; ARAÚJO et al., 2015), fisiologia (COSTA et al., 2003; CATARINO et al., 2011), geofísica (GUZMAN-VARGAS; RAMÍREZ-ROJAS; ANGULO-BROWN, 2008) e finanças (MARTINA et al., 2011).

Em particular para vazão, os rios Mississipi nos EUA (LI; ZHANG, 2008), Yangtzé (ZHANG et al., 2012) e Leste (ZHOU et al., 2012) na China foram avaliados por esta técnica e todos encontraram diferenças de complexidade para vazão devido a interferência humana por uso excessivo da terra, cobertura e conservação do solo, reservatórios (ou lago) para consumo humano e controle de vazão e hidrelétricas.

## 4.6 Sliding Window Analysis (Análise em Janelas Móveis – SWA)

Aplicação de técnicas dependentes do tempo ou em janelas móveis foi utilizada para ondaletas em sistemas dinâmicos (GAMERO; PLASTINO; TORRES, 1997), entropia de Tsallis aplicados a sinais (CAPURRO et al., 1998), análise de Hurst em séries financeiras (CARBONE; CASTELLI; STANLEY, 2004) e em medidas descritivas para avaliar traumatismo craniano (TONG et al., 2002). Mais recentemente as aplicações são em avaliação de danos em estruturas (REN; SUN, 2008). Esta técnica se caracteriza por avaliar uma medida (ou estatística) ao longo do tempo em blocos de séries temporais suficientemente grandes a fim de manter consistência dos resultados.

O algoritmo da Sliding Window Analysis esta descrito abaixo donde  $X_t$  uma sequência (ou série temporal) tal que  $X_t = X_{t=1}, X_{t=2}, \dots, X_{t=N}$ , com  $t = 1, 2, \dots, N$  indicador do tempo.

1. Defina uma subsequência  $Z_s^k = \{X_s, X_{(s+1)}, \dots, X_{(s+k-1)}\}$  com  $s = 1, 2, \dots, N - k + 1$  e  $k$  o tamanho da janela (window).
2. Para cada sequência  $Z_s^k$  estime uma estatística de interesse (média, mediana, desvio padrão, assimetria, curtose, entropias etc).
3. Construa a curva  $s$  e  $Z_s^k$ .

Para dados hidrológicos, esta análise foi aplicada em escoamento (CHOU, 2014; TONG et al., 2005), precipitação (CHOU, 2014) e vazão (LIU et al., 2016). Esta técnica se caracteriza por possuir maior sensibilidade quando o tamanho de janela  $k$  é pequeno (LIU et al., 2016), porém dependendo da estatística mensurada isso pode levar a uma maior incerteza no resultado. Para entropias, valores discrepantes numa série temporal tendem a inserir mais informação no sistema elevando a entropia (LIU et al., 2016).

Segundo Box et al. (2015) séries temporais estritamente estacionárias tendem a conservar características probabilísticas independente do instante de tempo, ou seja, para análise em janelas móveis as medidas calculadas devem ser as mesmas ao longo do tempo se a série for estacionária. Em particular, a *SampEn* deverá ter comportamento próximo ao estacionário com poucas flutuações, desde que o tamanho da janela seja suficientemente grande e a série apresente a mesma informação ou complexidade ao longo do tempo.

## 4.7 Software

Todos os resultados foram calculados no software R Core Team 2015 utilizando os pacotes *ggplot2* (WICKHAM, 2009) para construção dos gráficos, *nonlinearTseries* (GARCIA, 2014) para calcular *SampEn* e DFA, *zoo* (ZEILEIS; GROTHENDIECK, 2005) para janelas móveis e *moments* (KOMSTA; NOVOMESTKY, 2015) para calcular assimetria e curtose.

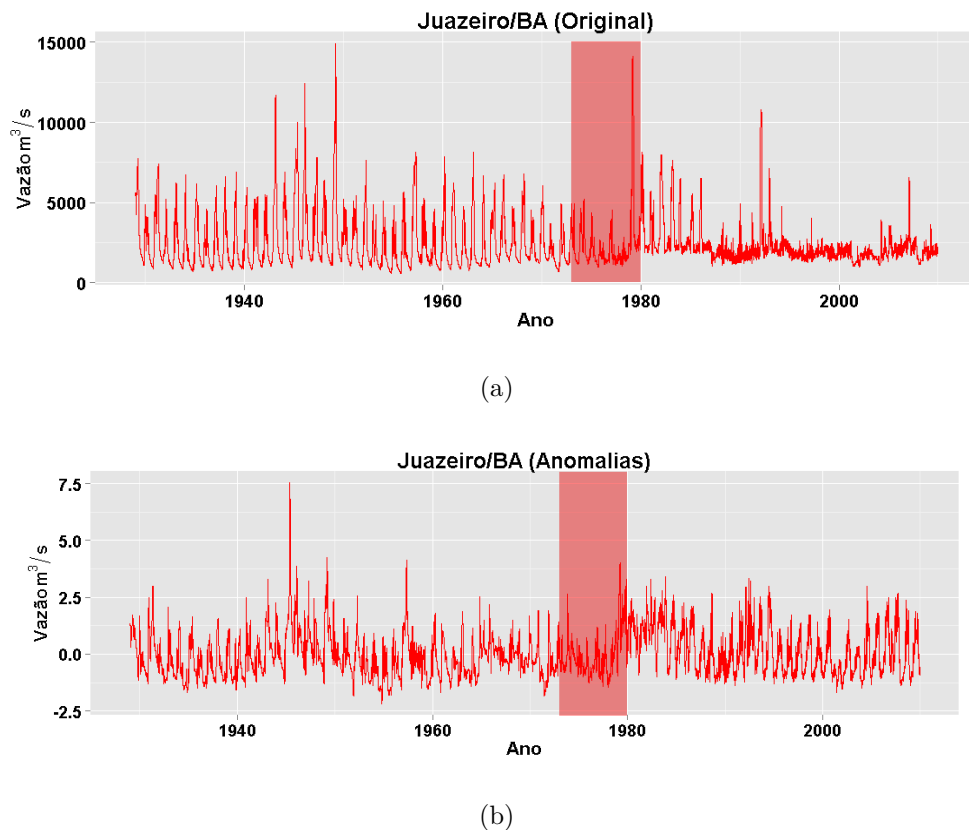
## 5 Resultados

### 5.1 Estatística Descritiva

Nesta seção apresentaremos os resultados descritivos para dados diários de vazão para as séries temporais de vazão das estações aqui estudadas nos diferentes períodos relativo a construção das GCH/Rs.

A série temporal de vazão da estação de Juazeiro/BA, aparentemente apresenta comportamento estável ao redor de um nível, porém este nível muda ao longo do tempo (Figura 3(a)) além de uma modificação na oscilação (ou modulação de frequência) da série após o término da construção da GCH/R na série original. Isto se deve essencialmente a regulação da vazão promovida pelo reservatório de Sobradinho (GURJÃO et al., 2012). A série de anomalias definida pela equação 4.1.1 apresenta um comportamento relativamente estacionário (Figura 3(b)).

Figura 3: Série temporal original (a) e anomalias (b) da Vazão ( $m^3/s$ ) na estação em Juazeiro/BA (1929-2009). Faixa vermelha indica período de construção da GCH/R de Sobradinho/BA.



Nesta estação, a média global durante o período estudado foi de  $2472 \text{ m}^3/\text{s}$ . Porém, a mediana da vazão foi de  $1928 \text{ m}^3/\text{s}$ , indicando que há valores discrepantes associados à grandes volumes de vazão, comprovada pela assimetria positiva de 2,31. A amplitude interquartil de  $1267 \text{ m}^3/\text{s}$  foi inferior ao desvio padrão de  $1659 \text{ m}^3/\text{s}$  (Tabela 2).

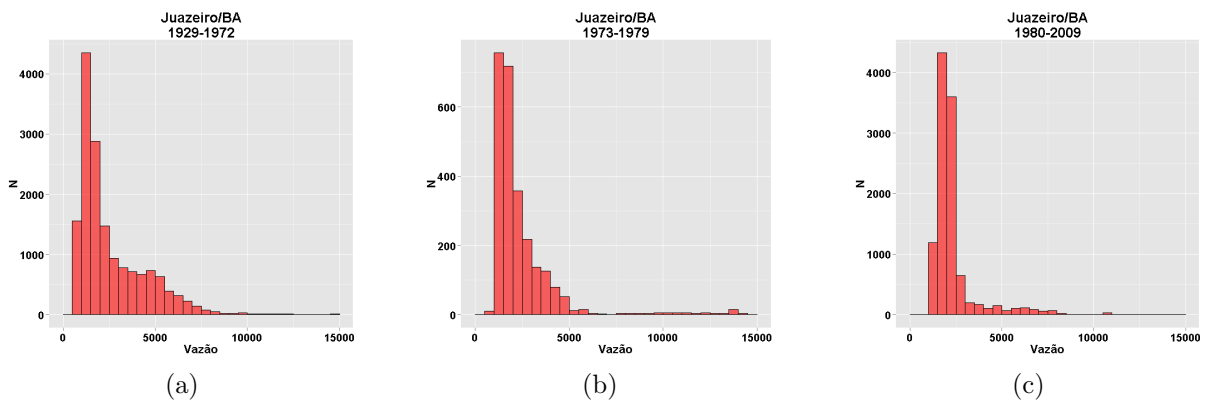
Tabela 2: Análise Descritiva da Vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) do Rio São Francisco: Juazeiro/BA (Estação 48020000), 1929-2009.

Período	29-72	73-79	80-09	29/set
Média ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	2602,51	2383,95	2303,7	2472,95
Mediana ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	1821,17	1746,59	1994,65	1928,83
DP ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	1853,09	1813,69	1254,35	1659,1
AIQ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	2284,47	1233,11	587,09	1267,11
Assimetria	1,68	3,87	3,26	2,31
Curtose	3,82	18,34	12,45	7,38
N	16060	2555	10950	29565

DP – Desvio Padrão; AIQ – Amplitude Interquartil;

A distribuição é leptocúrtica, onde a maior parte das observações se dá ao redor da média. As Figuras 4(a), 4(b) e 4(c) demonstram como as observações mais distantes da média estão cada vez menos frequentes indicando aumento de curtose e aumento na assimetria. Resultados similares podem ser encontrados na bacia do Rio Amarelo-China (LIU et al., 2016).

Figura 4: Histogramas da vazão nos períodos anterior (a), durante (b) e posterior (c) a construção da GCH/R de Sobradinho/BA.

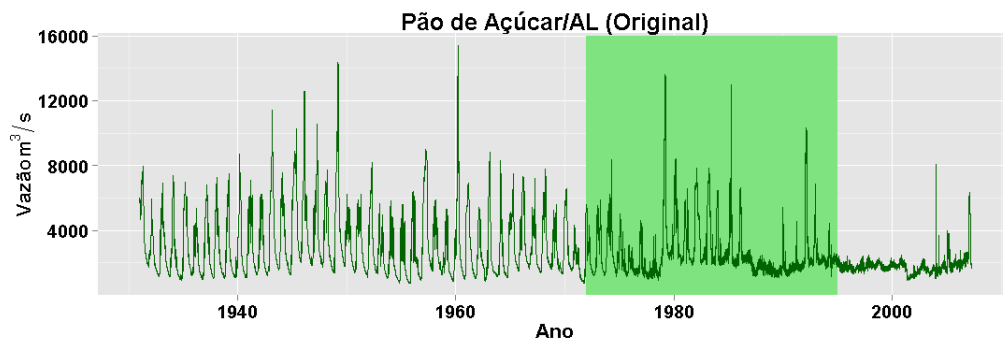


Quando comparamos o período anterior a construção da GCH/R de Sobradinho, entre 1929 e 1972, contra os períodos durante e depois, a partir de 1973 e 1980, respectivamente, percebemos uma diminuição da vazão média, um aumento da vazão mediana, uma diminuição do desvio padrão e mais fortemente uma diminuição da amplitude interquartil caindo de  $2284 \text{ m}^3/\text{s}$  para apenas  $587 \text{ m}^3/\text{s}$ .

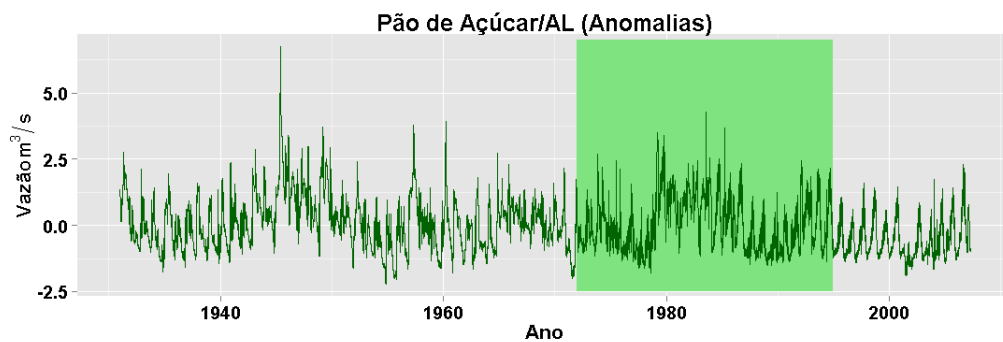
A Assimetria cresceu, indicando maior ocorrência de eventos do lado direito da média, associados a enchentes e a curtose também cresceu indicando uma maior concentração ao redor da média. Assim, podemos afirmar que a vazão está apresentando um maior controle ao redor da média, porém, eventos hidrológicos de maior magnitude ainda ocorrem. Esta maior concentração é decorrente do controle da vazão promovida pela GCH/R de Sobradinho (GURJÃO et al., 2012; UVO, 1998).

A série temporal de vazão da estação de Pão de Açúcar/AL, aparentemente apresenta comportamento estável ao redor de um nível, porém este muda ao longo do tempo (Figura 5(a)) além de uma modificação na oscilação (ou modulação de frequência) da série após o término da construção das GCH/R na série original. Isto se deve essencialmente a regulação da vazão promovida pelo reservatório de Sobradinho (GURJÃO et al., 2012). A série de anomalias apresenta um comportamento relativamente estacionário (Figura 5(b)).

Figura 5: Série temporal original (a) e anomalias (b) da Vazão ( $m^3/s$ ) na estação em Pão de Açúcar/AL (1931-2007). Faixa verde indica período de construção da GCH/R de Xingó/SE.



(a)



(b)

Nesta estação, a média para todo o período foi de  $2803 m^3/s$ , uma mediana de  $2083 m^3/s$ , também indicando assimetria positiva de 1,89. O desvio padrão ( $1835 m^3/s$ )



foi superior à amplitude interquartil ( $1713 \text{ m}^3/\text{s}$ ). A distribuição pode ser considerada leptocúrtica dado que a curtose foi de 4,21 que é superior ao limiar de 3 (Tabela 3). Resultados similares podem ser encontrados na bacia do Rio Amarelo (China) (LIU et al., 2016).

Tabela 3: Análise Descritiva da Vazão ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) do Rio São Francisco: Pão de Açúcar/AL (Estação 49370000), 1931-2007.

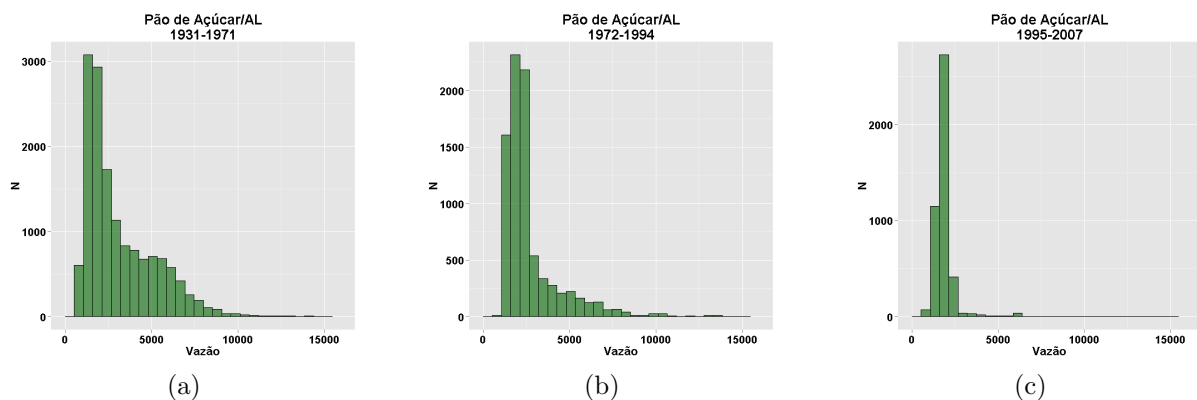
Período	31-71	72-94	95-07	31/jul
Média ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	3150,31	2698,19	1844,92	2803,22
Mediana ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	2385,71	2183,87	1783,7	2083,69
DP ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	2037,74	1691,43	608,14	1835,34
AIQ ( $\text{m}^3/\text{s}$ )	2755,53	1095,66	403,57	1713,9
Assimetria	1,32	2,58	4,71	1,89
Curtose	1,83	8,39	31,81	4,21
N	14965	8395	4500	27860

DP – Desvio Padrão; AIQ – Amplitude Interquartil;

Ao compararmos o período anterior da construção da hidrelétrica de Xingó/SE, entre 1931 e 1971, com os períodos durante e depois, em 1972 e 1995, respectivamente, percebemos uma diminuição da média ( $3150 \text{ m}^3/\text{s}$  a  $1844 \text{ m}^3/\text{s}$ ) e da mediana ( $2385 \text{ m}^3/\text{s}$  a  $1783 \text{ m}^3/\text{s}$ ), porém, esta relação se manteve com assimetria positiva (1,32 a 4,71) intensificada no período posterior.

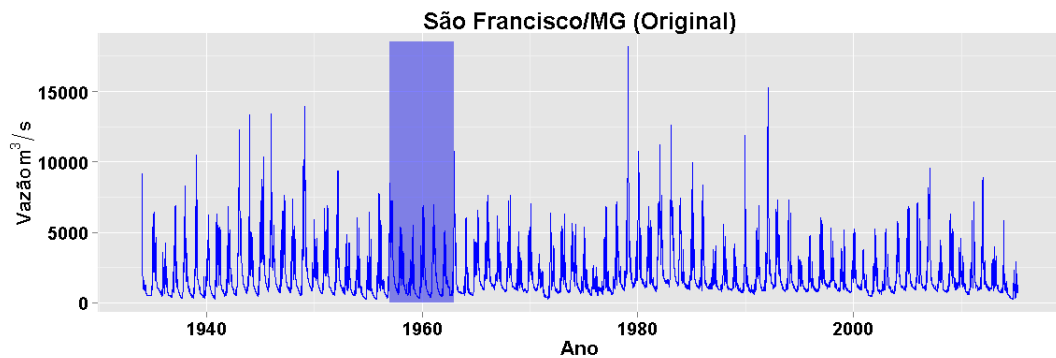
O desvio padrão teve uma queda de  $2037 \text{ m}^3/\text{s}$  para apenas  $608 \text{ m}^3/\text{s}$ , bem como a amplitude interquartil que caiu de  $2755 \text{ m}^3/\text{s}$  para apenas  $403 \text{ m}^3/\text{s}$  indicando uma transição de uma distribuição outrora platicúrtica (1,83) para leptocúrtica (31,81). Esta mudança pode ser mais bem avaliada nas Figuras 6(a), 6(b) e 6(c). Esta transição indica que eventos distantes da média ocorriam com mais frequência dada à ausência de controle da vazão promovido pela hidrelétrica no período posterior a construção da mesma.

Figura 6: Histogramas da vazão nos períodos anterior (a), durante (b) e posterior (c) a construção da GCH de Xingó/AL.

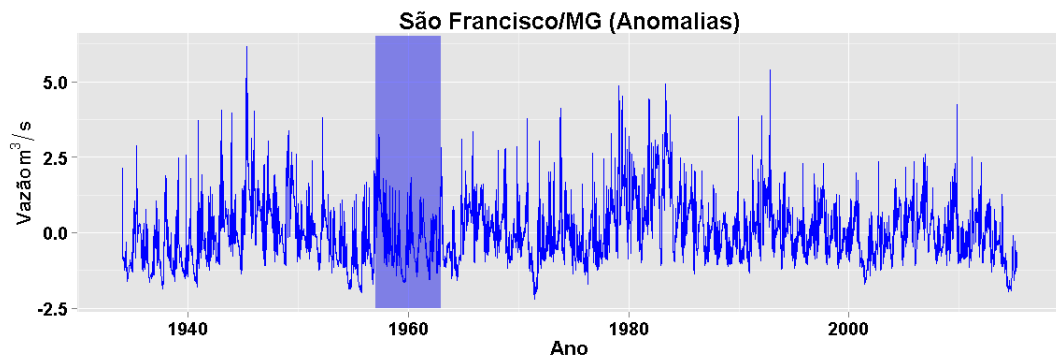


A série temporal de vazão da estação de São Francisco/MG, aparentemente apresenta comportamento estável similar as demais estações nos períodos anteriores a construção de suas respectivas GCHRs (Figura 7(a)). A série de anomalias apresenta um comportamento aparentemente estacionário (Figura 7(b)).

Figura 7: Série temporal original (a) e anomalias (b) da Vazão ( $m^3/s$ ) na estação em São Francisco/MG (1934-2015). Faixa azul indica período de construção da GCH/R de Três Marias/MG.



(a)



(b)

Na estação de São Francisco/MG, a média para todo o período foi de  $1949 m^3/s$  e mediana de  $1272 m^3/s$  indicando também uma distribuição assimétrica positiva (2,58). O desvio padrão foi de  $1750 m^3/s$  e a amplitude interquartil foi de  $1399 m^3/s$  indicando uma distribuição leptocúrtica, com curtose de 9,43 (Tabela 4). Resultados similares podem ser encontrados na bacia do Rio Amarelo-China (LIU et al., 2016).

Comparando-se o período anterior construção da GCH/R de Três Marias, entre 1934 a 1956, com os períodos durante e posterior, em 1957 e 1963, respectivamente, podemos observar pouca variação na média ( $2002 m^3/s$  a  $1930 m^3/s$ ) e na mediana ( $1202 m^3/s$  a  $1297 m^3/s$ ) ainda indicando uma distribuição assimétrica positiva (2,27 a 2,86) se intensificando no período posterior.

Tabela 4: Análise Descritiva da Vazão ( $m^3/s$ ) do Rio São Francisco: São Francisco/MG (Estação 44200000), 1934-2015.

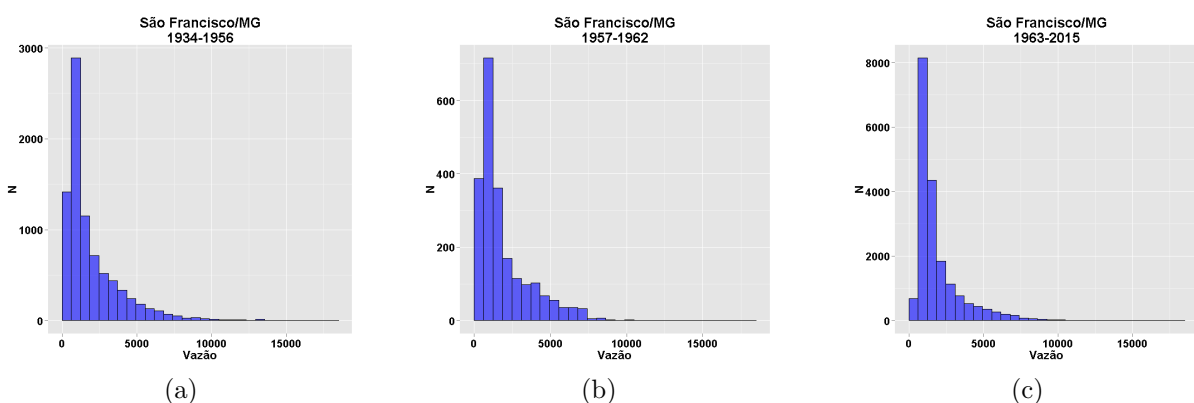
Período	34-56	57-62	63-15	34-15
Média ( $m^3/s$ )	2002,08	1917,57	1930,33	1949,68
Mediana ( $m^3/s$ )	1202,1	1223,4	1297,8	1272,46
DP ( $m^3/s$ )	1941,59	1703,69	1664,85	1750,57
AIQ ( $m^3/s$ )	1856,6	1805,1	1216,82	1399,4
Assimetria	2,27	1,62	2,86	2,58
Curtose	6,61	2,21	12,09	9,43
N	8395	2190	19100	29685

DP – Desvio Padrão; AIQ – Amplitude Interquartil;

O desvio padrão diminui discretamente passando de 1941  $m^3/s$  para 1664  $m^3/s$ , porém a amplitude teve um forte decréscimo passando de 1856  $m^3/s$  para 1216  $m^3/s$ , indicando uma distribuição leptocúrtica (6,06 a 12,09). Porém, no período durante a construção observa-se um cenário de maior amplitude interquartil (1805  $m^3/s$ ) do que o desvio padrão (1703  $m^3/s$ ) indicando uma distribuição platicúrtica (2,21).

Assim, podemos observar que nesta estação ainda ocorre eventos hidrológicos de maior magnitude, porém com o aumento da curtose, a distribuição da vazão se tornou mais concentrada ao redor da média, como pode ser observado nas Figuras 8(a), 8(b) e 8(c), indicando uma menor incidência de picos, pois a influência da GCH/R de Três Marias não é mais percebida.

Figura 8: Histogramas da vazão nos períodos anterior (a), durante (b) e posterior (c) a construção da GCH/R de Três Marias/MG



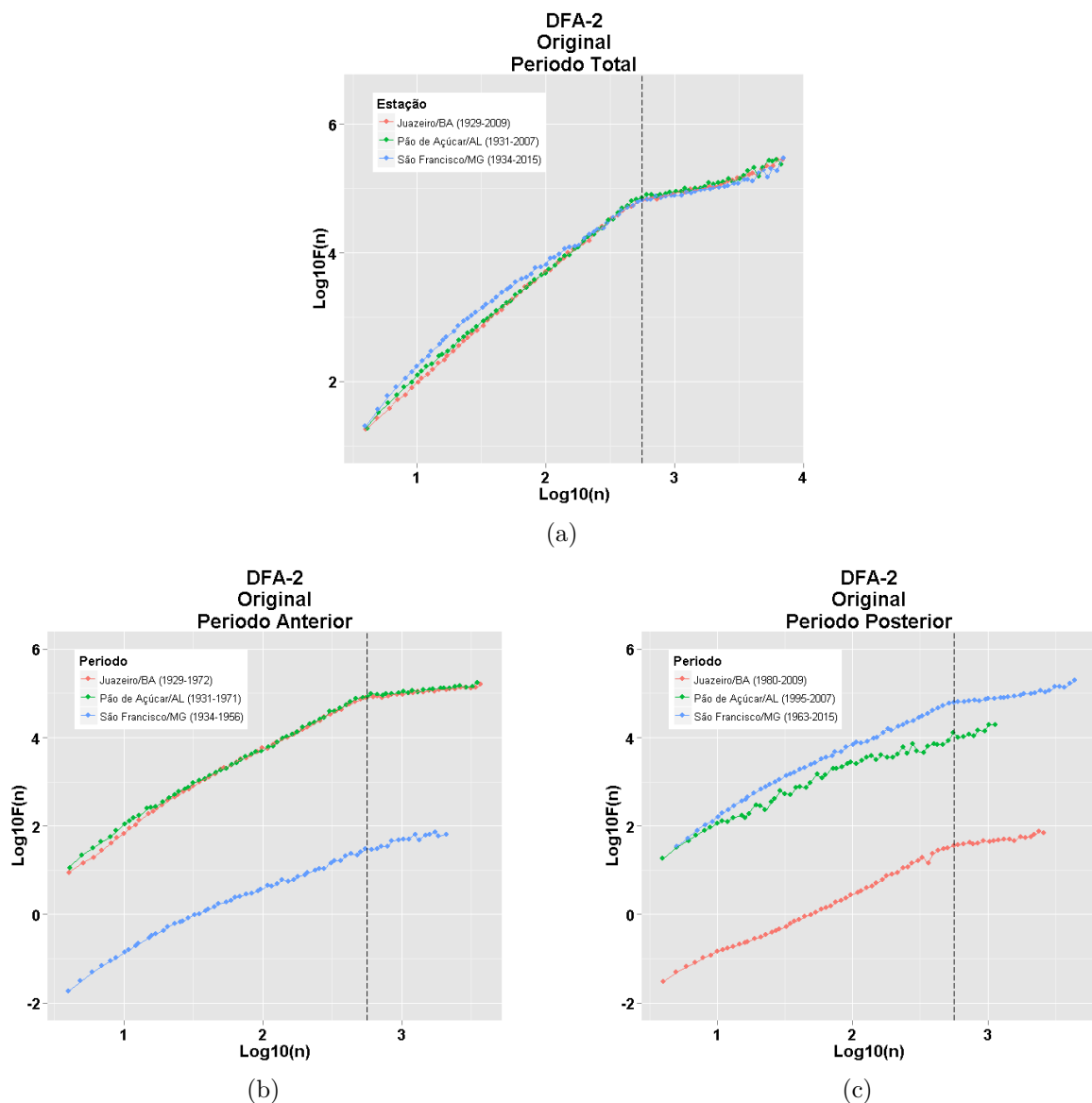
## 5.2 Detrended Fluctuation Analysis – DFA

Nesta seção apresentaremos os resultados da DFA que nos permite avaliar as propriedades de escala e memória das séries temporais, comparando as estações nos

diferentes períodos relativos às construções das GCH/R's. Os primeiros testes com a DFA demonstraram resultados mais consistentes para DFA-2 do que DFA-1 e nenhuma melhora significativa pode ser observada em DFA-3 relativo a DFA-2. Assim, para todos os resultados desta seção foi utilizado DFA-2.

Os resultados obtidos pelo Detrended Fluctuation Analysis para as séries originais nas estações Juazeiro/BA, Pão de Açúcar/AL e São Francisco/MG podem ser observadas na Figura 9((a), (b) e (c)) e os expoentes  $\alpha$  na Tabela 5. Podemos observar que em todas as estações para todo o período (Figura 9((a)) ocorre uma mudança de inclinação a partir de  $n \approx 10^{2,75}$ , equivalente a uma escala de  $n \approx 558$  dias ou 1 ano e meio.

Figura 9: Gráfico da DFA-2 para os períodos: total (a), anterior (b) e posterior (c) à construção das GCH/Rs nas estações fluviométricas para as séries originais. Linhas verticais indicam mudança de comportamento.



No período anterior a construção da GCH/R ocorre uma mudança de regime também a partir da escala de  $n=1,5$  anos para as séries das estações de Juazeiro/BA e Pão de Açúcar/AL. Ocorre uma diminuição do expoente de 1,805 para 0,335 na série da estação de Juazeiro/BA, de 1,731 para 0,312 na série da estação de Pão de Açúcar/AL, indicando uma transição de um regime não estacionário (com expoente de Hurst  $H = \alpha - 1$ : 0,805 e 0,731, indicando que os incrementos são persistentes) para um anti-persistente. Nossos resultados são similares aos encontrados por Labat et al. (2011) encontrou uma mudança de regime em  $n = 1$  ano. Para as bacias de Aliou e Baget, França, também ocorre uma transição entre persistência e anti-persistência.

Para série da estação de São Francisco/MG, não pode ser detectado mudança de regime e o expoente foi de 1,249, característico de regime não estacionário com incrementos anti-persistentes ( $H = 0,249$ ) (Tabela 5). Resultados similares foram encontrados por Zhang et al. (2012) para a estação de Cuntang (a montante das demais estações) na bacia do rio Yangtzé, donde o expoente para o período anterior a construção da barragem de Gezhouba foi de 1,19.

Tabela 5: Expoentes DFA para as estações de Juazeiro/BA, Pão de Açúcar/AL e São Francisco/MG nos períodos: total, anterior e posterior a construção das GCH/Rs para as séries originais.

	$\alpha$	
	$\text{Log}_{10}(n) < 2,75$	$\text{Log}_{10}(n) > 2,75$
Juazeiro/BA		
1929-1972	1,805	0,335
1980-2009	1,402	0,409
1929-2009	1,677	0,552
Pão de Açúcar/AL		
1931-1971	1,731	0,312
1995-2007	1,155	
1931-2007	1,633	0,535
São Francisco/MG		
1934-1956	1,249	
1963-2015	1,507	0,498
1934-2015	1,533	0,482

No período posterior a construção das GCH/Rs, a mudança de regime ocorre também em um escala de  $n = 1,5$  anos para as séries das estações de Juazeiro/BA e São Francisco/MG, com diminuição dos expoentes de 1,402 para 0,409 e 1,507 para 0,498, respectivamente, passando de um ruído Browniano (integração de um ruído branco) para um próximo do aleatório, similar aos resultados para a estação de Longchuan, também na bacia do rio Pérola, China (ZHANG et al., 2009).

Já para a série de Pão de Açúcar/AL, uma mudança de regime não pode ser

detectada e o expoente foi de 1,155, próximo a um ruído  $1/f$ . Resultados similares foram detectados por Zhang et al. (2012) para série da estação de Datong (a jusante das demais estações) para o período posterior a construção da barragem de Gezhouba com um expoente de 1,31.

Em todo o período, as séries mostram o mesmo comportamento. O expoente calculado para escalas de até 1,5 anos é de 1,677, 1,633 e 1,533 para as estações de Juazeiro/BA, Pão de Açúcar/AL e São Francisco/MG respectivamente indicando um comportamento de um ruído browniano (LABAT et al., 2011). Para as escalas superiores a 1,5 anos, o expoente calculado foi de 0,552, 0,535 e 0,482, valores muito próximos do que se considera um ruído branco (LABAT et al., 2011) (Tabela 5).

Os resultados obtidos pela Detrended Fluctuation Analysis para as séries de anomalias nas estações Juazeiro/BA, Pão de Açúcar/AL e São Francisco/MG podem ser observadas na Figura 10((a), (b) e (c)) e os expoentes  $\alpha$  na Tabela 6. Podemos observar que na série da estação de São Francisco/MG para todo o período (Figura 10(a)) ocorrem duas mudanças de inclinação sendo estas em escalas de  $n = 10^{1,5}$  ( $\approx 30$  dias) e  $n = 10^{2,75}$  ( $\approx 1$  ano e meio). Nos três períodos pode-se observar um expoente de 1,198, indicando persistência em escalas até  $n = 30$  dias, 0,456 entre  $n = 30$  dias e 1,5 anos, indicando um processo aleatório e 0,038 em escalas acima de  $n = 1,5$  anos indicando anti-persistência (Tabela 6).

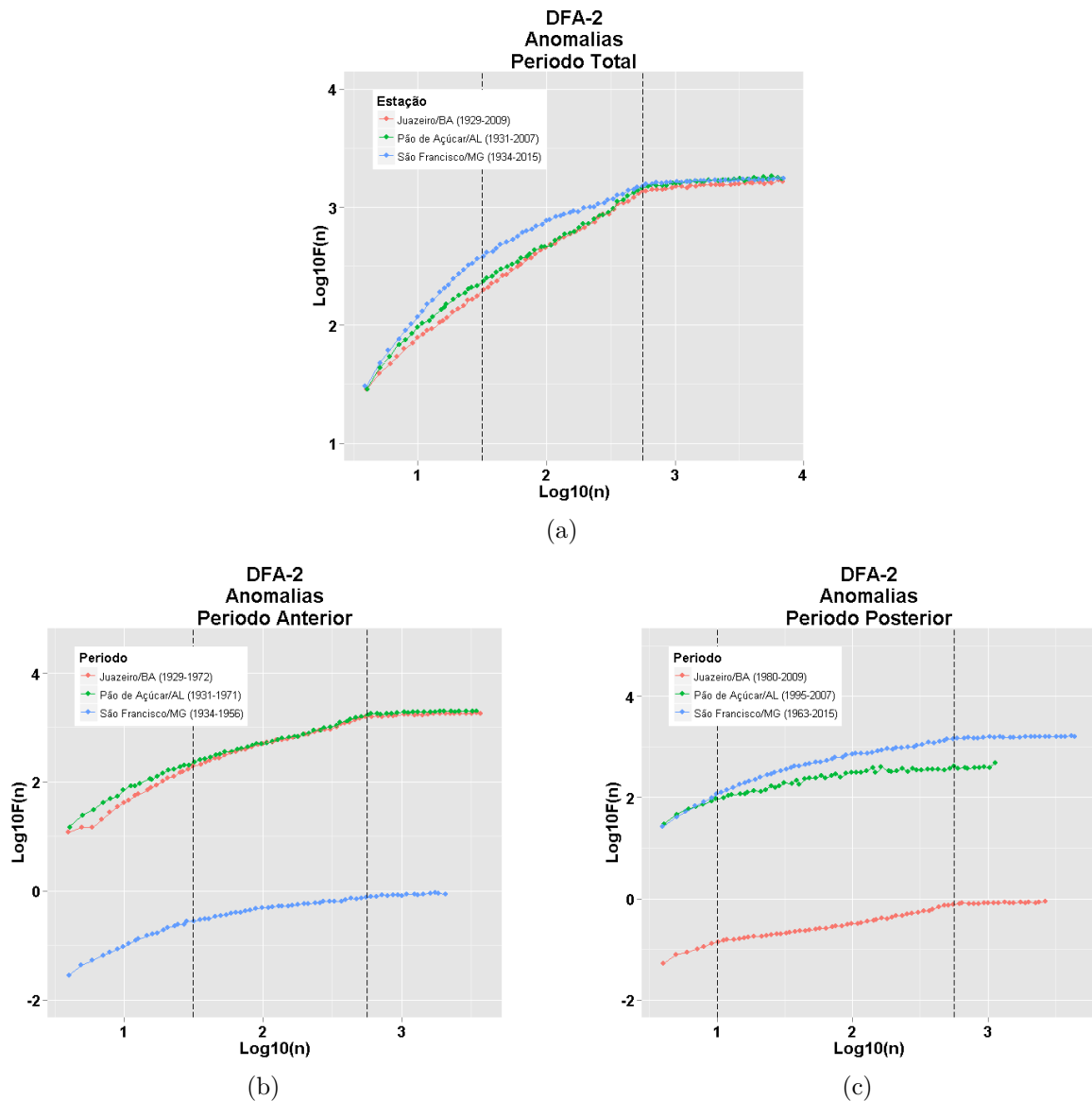
Tabela 6: Expoentes DFA para as estações de Juazeiro/BA, Pão de Açúcar/AL e São Francisco/MG nos períodos: total, anterior, durante e posterior a construção das GCH/Rs para as séries de anomalias.

	$\alpha$			
	$\text{Log}_{10}(n) < 1$	$\text{Log}_{10}(n) < 1,5$	$1,5 < \text{Log}_{10}(n) < 2,75$	$\text{Log}_{10}(n) > 2,75$
Juazeiro/BA				
1929-1972		1,432	0,687	0,079
1980-2009	1,011		0,411	0,048
1929-2009		0,743		0,07
Pão de Açúcar/AL				
1931-1971		1,268	0,659	0,071
1995-2007	1,198		0,346	0,089
1931-2007		0,697		0,072
São Francisco/MG				
1934-1956		1,069	0,322	0,114
1963-2015	1,584		0,569	0,047
1934-2015		1,198	0,456	0,038

As séries das estações de Juazeiro/BA e Pão de Açúcar/AL apresentam apenas a mudança em  $n = 10^{2,75}$  ( $\approx 1$  ano e meio). Esta mudança se dá numa transição de persistente (0,743 e 0,697, respectivamente) para anti-persistente (0,070 e 0,072, respectivamente).

O período anterior a construção das GCH/Rs apresentaram mudanças de regime também em escalas de  $n = 10^{1,5}$  ( $\approx 30$  dias) para todas as estações e  $n = 10^{2,75}$  ( $\approx 1$  ano e meio). Para as escalas inferiores a 30 dias, a série de Juazeiro/BA apresenta expoente próximo de 1,5 indicando um ruído Browniano. A série da estação de Pão de Açúcar/AL apresenta um processo não estacionário com incrementos anti-persistentes ( $H = 0,268$ ) e a série da estação de São Francisco/MG um regime próximo a um ruído  $1/f$  (1,069).

Figura 10: Gráfico da DFA-2 para os períodos: total (a), anterior (b) e posterior (c) à construção das GCH/Rs nas estações fluviométricas para as séries de anomalias. Linhas verticais indicam mudança de comportamento.



Entre escalas de  $n = 30$  dias e 1,5 anos, as séries das estações Juazeiro/BA e Pão de Açúcar/AL se mantêm persistentes (0,687 e 0,659), enquanto que a série da estação

de São Francisco/MG passa a ser anti-persistente (0,322). Nas escalas acima de  $n = 1,5$  anos, as séries das três estações apresentam comportamento anti-persistente (0,079, 0,071 e 0,114).

Para o período posterior as construções das GCH/Rs, podemos observar nas séries das três estações mudanças de regime: escala inferior a  $n = 10^1$ , outrora  $10^{1,5}$ , entre  $n = 10^1$  e  $10^{2,75}$  e superior a  $n = 10^{2,75}$ . As séries se demonstram persistentes (próximo a um ruído  $1/f$ ) nas escalas inferiores a  $n = 30$  dias, com expoentes de 1,011 para Juazeiro/BA, 1,198 para Pão de Açúcar/AL e próximo a um ruído Browniano (com expoente de 1,584) para São Francisco/MG.

Para escalas entre  $n = 30$  dias e 1,5 anos, as séries de Juazeiro/BA e Pão de Açúcar/AL são anti-persistentes (0,411 e 0,346) enquanto que a série de São Francisco/MG apresenta ainda comportamento próximo do aleatório (0,569). Para escalas superiores a  $n = 1,5$  anos, as séries das estações são anti-persistentes com expoentes 0,048, 0,089 e 0,047 para Juazeiro/BA, Pão de Açúcar/AL e São Francisco/MG respectivamente.

Os resultados são similares para as séries das estações de Juazeiro/BA e Pão de Açúcar/AL devido a proximidade com as GCH/Rs. As alterações na série da estação de São Francisco/MG foram diferentes das demais pois esta encontra-se a uma maior distância da GCH/R de Três Marias e a influência da operação do reservatório foi absorvida por outros fatores que podem afetar o regime hidrológico (uso do solo, condições climáticas, cobertura vegetal, etc).

### 5.3 Multiscale Entropy – MSE

Nesta seção apresentamos os resultados de Multi-Scale Entropy, aplicadas a *SampEn* que nos permite ver o quão complexa são as séries nos diferentes momentos e se há diferenças entre estas. Os resultados serão divididos em duas partes: comparando-se as estações e os períodos relativos à construção.

Para todos os resultados utilizando Sample Entropy (Multi-Scale Entropy ou Sliding Window Sample Entropy) foi fixado uma dimensão de incorporação  $m = 2$  e um raio de tolerância  $r = 0.2\sigma$ , pois segundo Mayer et al. (2014) são as escolhas mais comuns e consistentes na literatura, além de que para esta configuração apenas 200 pontos seriam necessários para obter resultados com boa consistência.

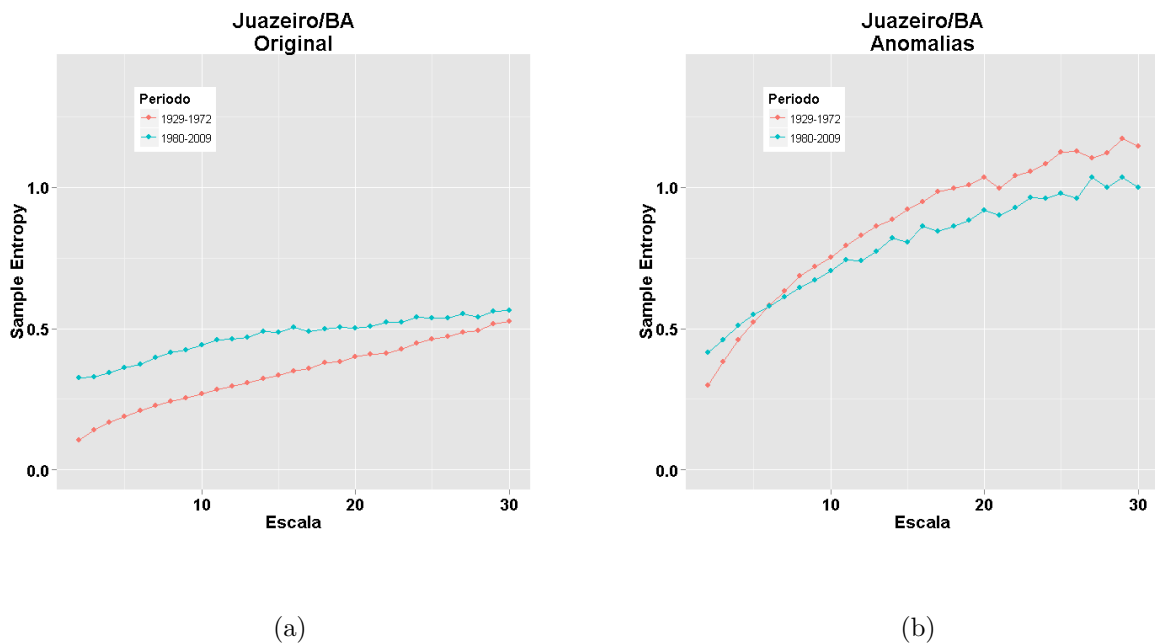
Para o MSE serão utilizadas escalas até 30 dias, pois esta também é a configuração mais comum em estudos que avaliam vazão de rios (CHOU, 2014; ZHANG et al., 2012; ZHOU et al., 2012). Como o fator de escala máximo é de 30 dias e para  $m = 2$  e  $r = 0.2\sigma$  são necessários 200 pontos, então todas as séries temporais aqui analisadas devem ter pelo menos 6000 pontos para escalas até 30 dias. Contudo, a estação de Pão de Açúcar no



período posterior a construção de Xingó/SE possui apenas 4500 pontos, assim analisaremos com cuidado seus resultados.

Os resultados para Multi Scale Entropy para as séries de anomalias e originais para estação de Juazeiro/BA estão na Figura 11. Para a série original (Figura 11(a)) o período posterior a construção da GCH/R apresenta maior complexidade para todas as escalas porém com menor diferença em escalas superiores a 20 dias (COSTA; GOLDBERGER; PENG, 2005). Para a série de anomalias (Figura 11(b)), para escalas inferiores a 6 o período posterior apresenta uma dinâmica mais complexa. Para escalas superiores a 8 dias, a série do período anterior é mais complexa. Um resultado similar foi encontrado para o rio Atibaia para períodos anterior e posterior a construção do sistema Cantareira (ARAÚJO et al., 2015).

Figura 11: Multi-Scale Entropy para a série original (a) e anomalias (b) da Vazão ( $m^3/s$ ) na estação em Juazeiro/BA (1929-2009)

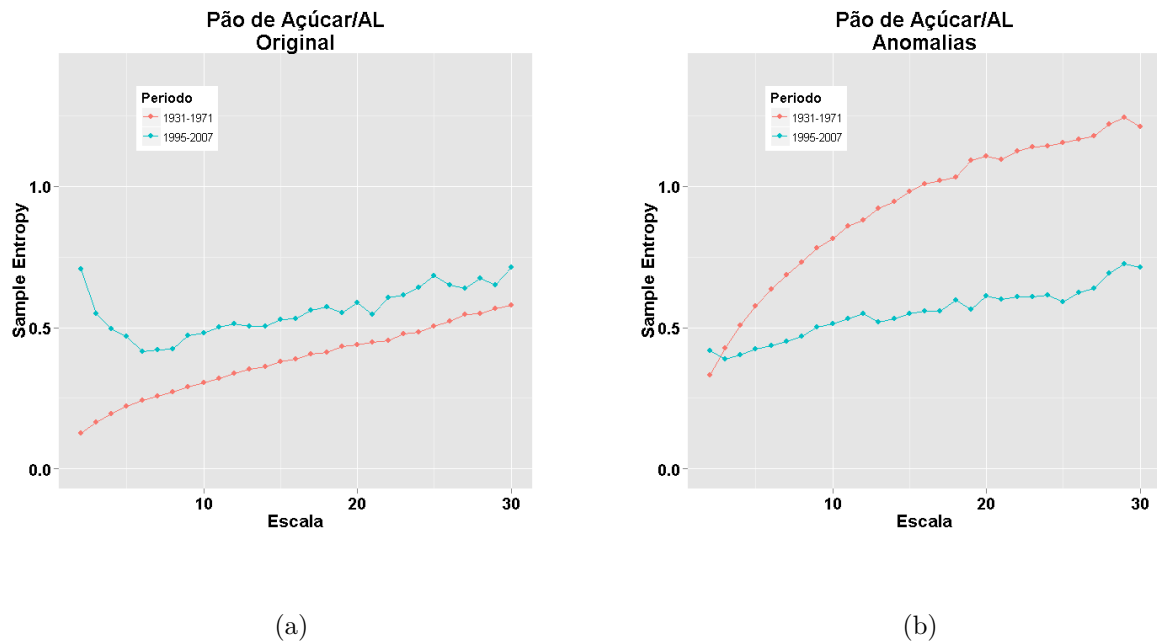


Os resultados para Multi Scale Entropy para a estação de Pão de Açúcar/AL para a série de anomalias e original estão na Figura 12. Para os dados originais (Figura 12(a)) a série do período posterior a construção da GCH de Xingó/SE é mais complexa do que o anterior em todas as escalas, porém este apresenta um decrescimento de complexidade até a escala de 6 e depois volta a crescer. Comportamento similar pode ser observado em Zhu et al. (2011) para o sistema dinâmico não linear dado pela equação de Lorentz.

Para anomalias (Figura 12(b)) a série do período anterior a construção da GCH de Xingó/SE é mais complexa do que o posterior para quase todas as escalas, similar a série de Juazeiro/BA. As duas estações se encontram perto da GCH/Rs e apresentam alteração

da dinâmica da vazão e de anomalias (relacionada com a construção das mesmas) donde a complexidade cresce para dados originais e decresce para anomalias.

Figura 12: Multi-Scale Entropy para a série original (a) e anomalias (b) da Vazão ( $m^3/s$ ) na estação em Pão de Açúcar/AL (1929-2007)



A série de anomalias representa a série sem sazonalidade que é a fonte da baixa entropia (alta previsibilidade). Quando esta é atenuada, a entropia tende a ser maior. Como o período anterior a construção da GCH é mais sazonal do que o posterior, conforme visto nas Figuras 3(a) e 3(b), a série original no período anterior a construção da GCH/R é menos complexa que no posterior. Quando observamos a série de anomalias, a fonte de baixa entropia é atenuada e a situação se inverte, donde o período anterior a construção de Sobradinho/BA é mais complexo do que o período posterior.

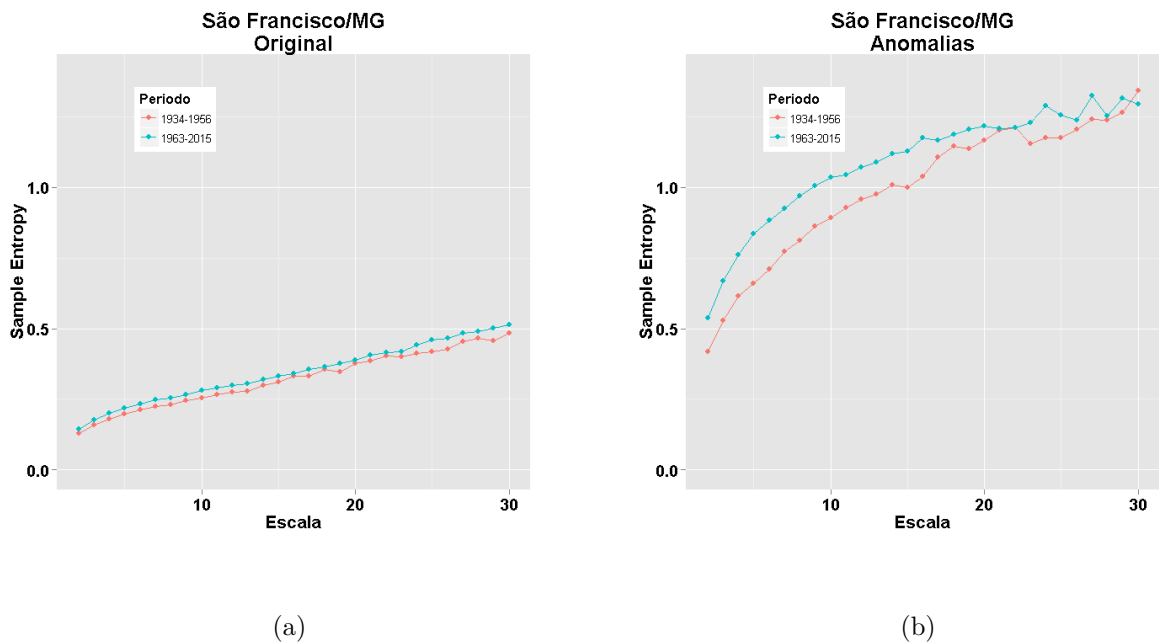
Outra explicação pode ser obtida através do estudo de Zhou, Zhang e Singh (2014) que argumenta que as hidrelétricas proporcionam um efeito filtro a vazão deixando-a com menos flutuações provenientes da sazonalidade. Isso poderia também levar a essa diferenciação entre os períodos.

Os resultados para Multi Scale Entropy para a série de anomalias e original na estação de São Francisco/MG estão na Figura 13. Para a série original (Figura 13(a)) o período posterior e anterior a construção da GCH apresentam a mesma complexidade caracterizada por um crescimento da complexidade com as escalas. Para a série de anomalias (Figura 13(b)) o período posterior é mais complexo em escalas entre 5 e 15 dias, nada podendo ser dito nas demais escalas.

Este resultado é diferente do que foi obtido para as estações de Juazeiro/BA e Pão

de Açúcar/AL e pode estar relacionado com a distância entre a estação e GCH/R, dado que São Francisco se encontra a 344 *km* e a influência da operação do reservatório de Três Marias foi mitigado ao longo do trecho do rio. A alteração da complexidade do regime hidrológico causada pela construção da barragem e o efeito “buffering” nas distâncias maiores a estação e o reservatório foi identificado no estudo de Zhang et al. (2012).

Figura 13: Multi-Scale Entropy para a série original (a) e anomalias (b) da Vazão ( $m^3/s$ ) na estação em São Francisco/MG (1934-2015)



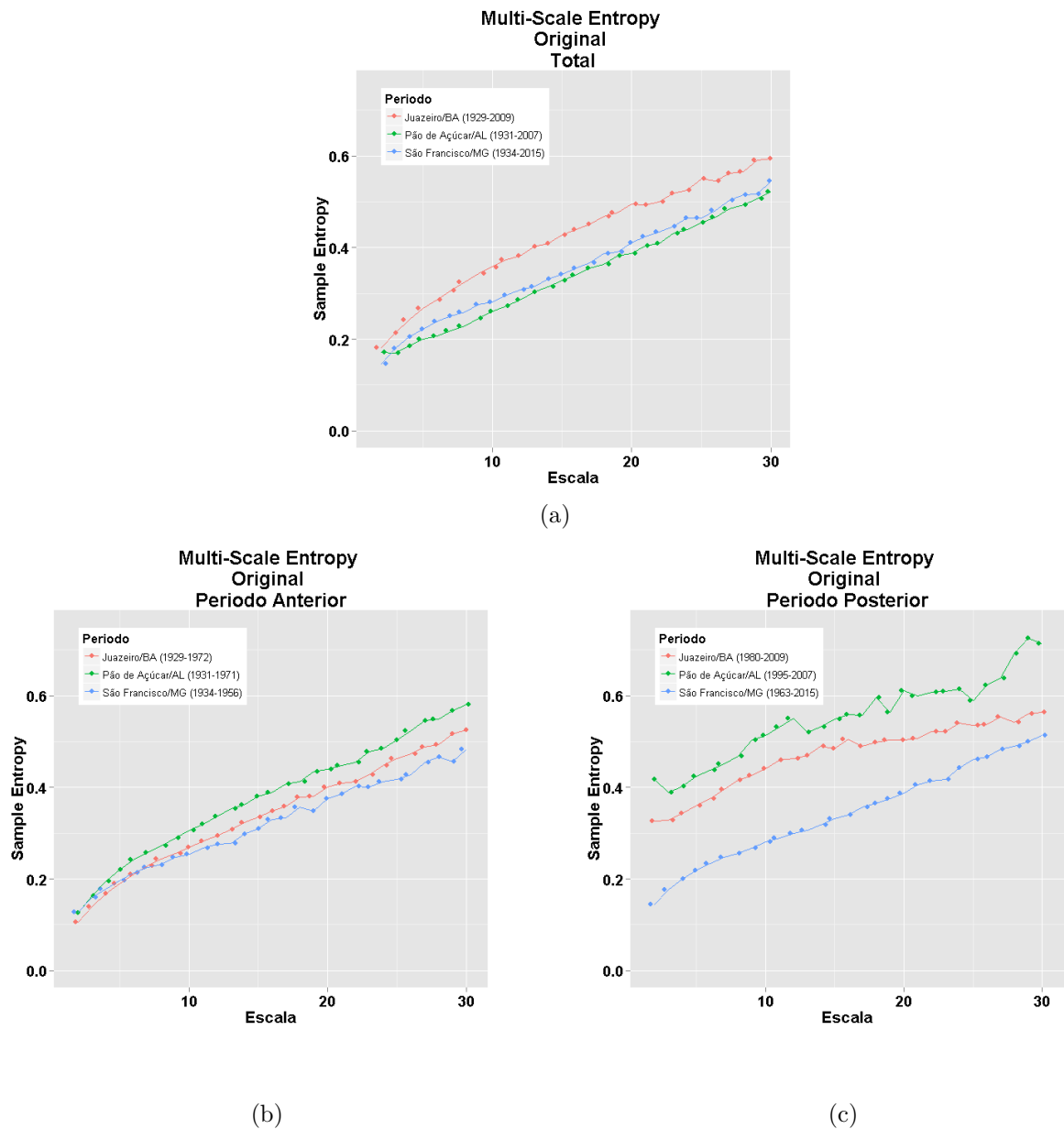
Os resultados para Multi Scale Entropy (MSE), comparando-se as séries das três estações para o período total, anterior e posterior à construção das GCH/Rs para as séries originais pode ser observado na Figura 14. Podemos observar que as séries originais de todas as estações na maioria dos períodos estudados tem aumento de complexidade à medida que a escala aumenta, em conformidade com os resultados encontrados por Li e Zhang (2008) para o rio Mississippi, justificado pela memória de longo alcance das séries hidrológicas, em concordância com os resultados da análise DFA.

Para o período total, a série da estação de Juazeiro/BA mostrou uma dinâmica de vazão mais complexa que as séries das estações de Pão de Açúcar/AL e São Francisco/MG, para as escalas de 2 a 30 dias (Figura 14(a)). Para o período anterior a construção da GCH/R, podemos observar que há diferenças de complexidade entre as séries das estações a partir das escalas superiores a 7 dias, donde a série da estação de Pão de Açúcar/AL apresenta uma complexidade pouco maior (Figura 14(b)).

Zhou et al. (2012) identificou que a série da estação de Longchuan, localizada a montante na bacia do Rio Leste, China, tinha pouco maior complexidade para o período anterior a construção do reservatório de Xingfengjiang do que as demais estações a jusante,

divergindo dos nossos resultados, dado que a estação de Pão de Açúcar/AL é a mais jusante das três estações. Isso se deve a diferentes condições climáticas dos Rios Leste e São Francisco.

Figura 14: Análise MSE para vazão nas estações de Juazeiro/BA, Pão de Açúcar/AL e São Francisco/MG nos períodos: total (a), anterior (b) e posterior (c) a construção das GCH/Rs para séries originais.



Para o período posterior as construções das GCH/Rs, podemos observar que as três séries se diferenciam em complexidade para todas as escalas (1 a 30 dias), na ordem crescente: São Francisco/MG, Juazeiro/BA e Pão de Açúcar/AL (Figura 14(c)). As séries das estações Juazeiro/BA e Pão de Açúcar/AL, contudo, apresentam um crescimento da

complexidade muito lento se assemelhando a um ruído  $1/f$ , o que indica uma perda de complexidade no período posterior a construção das GCH/Rs comparando com os demais períodos.

Importante destacar que a série da estação de São Francisco/MG apresenta menor complexidade no período posterior e está a uma distância muito maior da GCH/R associada (Três Marias) do que as demais estações, indicando que a distância entre estação e GCH/R pode ser fator influente para a complexidade do regime hidrológico. Resultado similar (utilizando análise multifractal) foi encontrado por Zhou et al. (2012), onde séries provenientes de estações mais distantes dos reservatórios apresentam uma dinâmica menos complexas do que as mais próximas no período posterior a construção.

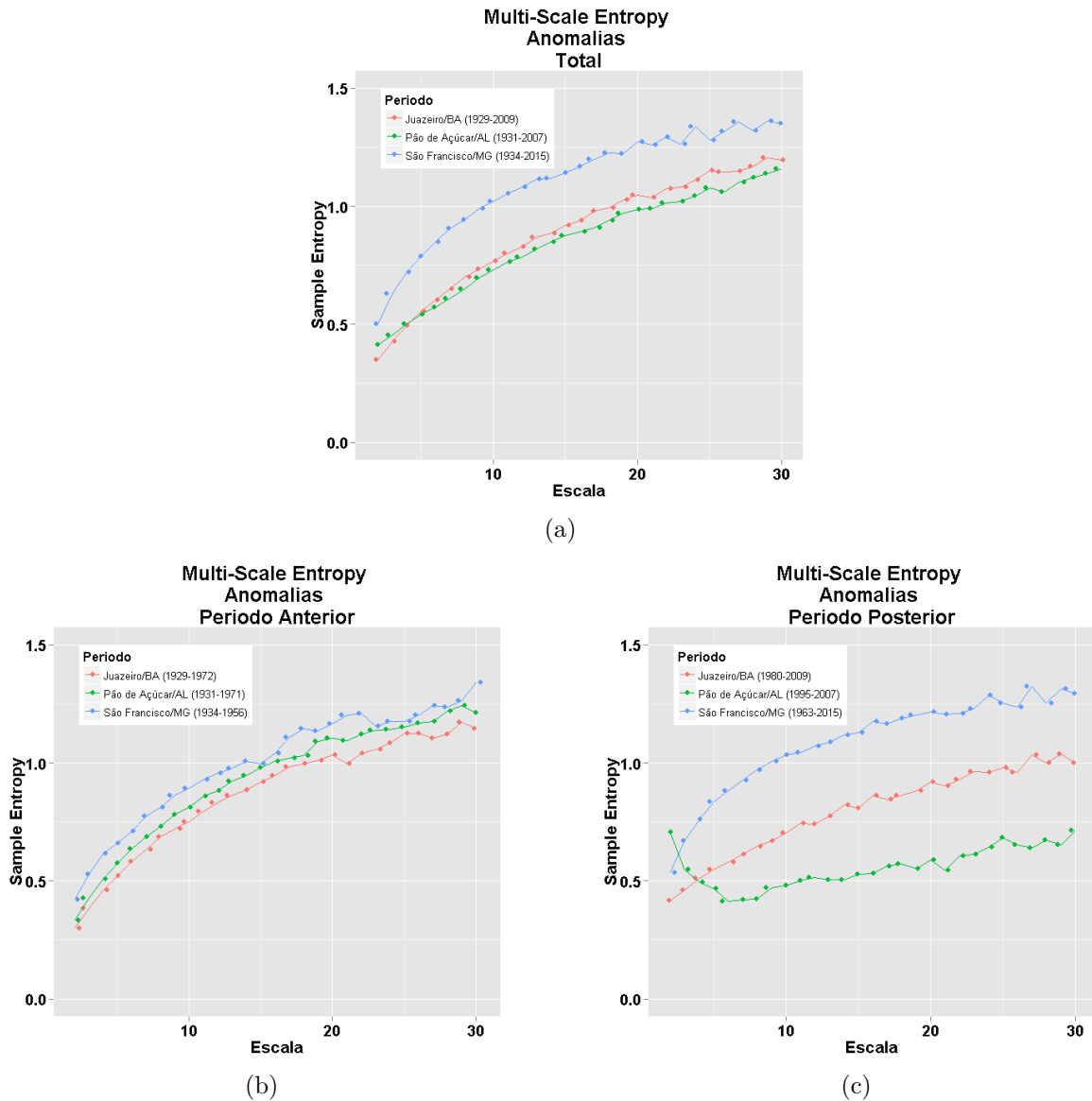
Os resultados para a Multi Scale Entropy (MSE), nas três estações para o período total, anterior e posterior a construção das GCH/Rs para as séries de anomalias pode ser observado na Figura 15. Para o período total, podemos observar que a complexidade da série de anomalias de São Francisco/MG apresenta maior complexidade do que as demais em todas as escalas. Já a série da estação de Pão de Açúcar/AL tem maior complexidade do que Juazeiro/BA para pequenas escalas, até 3 dias, invertendo-se a partir de 6 dias (Figura 15(a)).

No período anterior a construção das GCH/Rs, podemos perceber que as séries apresentam pequena diferença de complexidade em ordem crescente: Juazeiro/BA, Pão de Açúcar/AL e São Francisco/MG (Figura 15(b)). Zhou et al (2012) identificou que as estações mais a montante possuíam maior complexidade do que as estações rio a jusante, tal como nossos resultados.

Para o período posterior, as séries de anomalias das estações de São Francisco/MG e Juazeiro/BA tem aumento de complexidade dada escala sendo a primeira mais complexa do que a segunda. Contudo, a série de anomalias da estação de Pão de Açúcar/AL apresenta um processo de diminuição e posterior estabilização da complexidade, indicando um comportamento similar a um ruído do tipo  $1/f$ .

Os gráficos MSE são similares (aumento da complexidade da série original e a diminuição da complexidade da série de anomalias) para as séries das estações de Juazeiro/BA e Pão de Açúcar/AL devido a proximidade com as GCH/Rs. A estação de São Francisco/MG apresentou resultados diferentes das demais devido a uma maior distância da GCH/R de Três Marias devido a fatores ecológicos atenuantes, concordando com os resultados observados na DFA.

Figura 15: Análise MSE para vazão nas estações de Juazeiro/BA, Pão de Açúcar/AL e São Francisco/MG nos períodos: total (a), anterior (b) e posterior (c) a construção das GCH/Rs para séries de anomalias.



## 5.4 Sliding Window Analysis – SWA

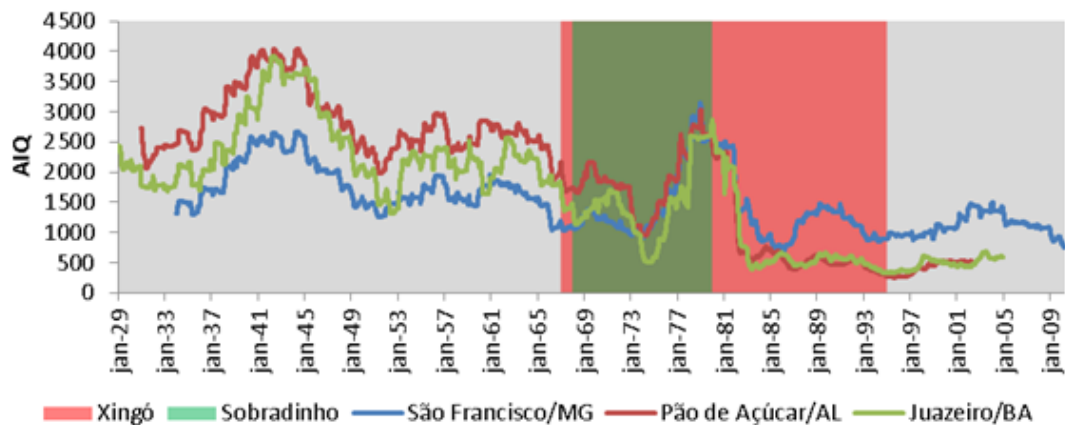
A Sliding Window Analysis permite-nos observar a mudança de estatísticas ao longo do tempo visando observar se suas características probabilísticas se mantêm inalteradas e, havendo alteração, a partir de quando e até quando. Nesta seção utilizaremos as estatísticas: desvio padrão, amplitude interquartil, assimetria, curtose e *SampEn*.

Para todos os resultados desta seção foi utilizado um tamanho de janela de 1825 dias, equivalente a 5 anos, por uma questão de consistência e menor sensibilidade a magnitude das observações, pois segundo Liu et al. (2016) para pequenos tamanhos de

janela experimenta-se uma maior sensibilidade as estatísticas. Para a *SampEn*, os valores de  $m$  e  $r$  foram mantidos fixos para todas as janelas. Pontos no gráfico indicam a medida de 5 anos à frente e os resultados foram comparados aos períodos intensos de ENSO.

As estatísticas descritivas: amplitude interquartil, desvio padrão, assimetria e curtose foram aplicadas apenas para a série original, dado que não haveria interpretação para a série de anomalias. Para *SampEn* foi utilizada as séries originais e anomalias, pois esta pode levar a uma melhor compreensão da mudança observada. Os resultados de Sliding Window Analysis (SWA) da amplitude interquartil estão apresentados na Figura 16.

Figura 16: Sliding Window Analysis: Amplitude Interquartil (AIQ) para as séries de Vazão ( $m^3/s$ ) nas estações. Construção da GCH/R de Sobradinho na faixa verde; Construção da GCH de Xingó na faixa vermelha.

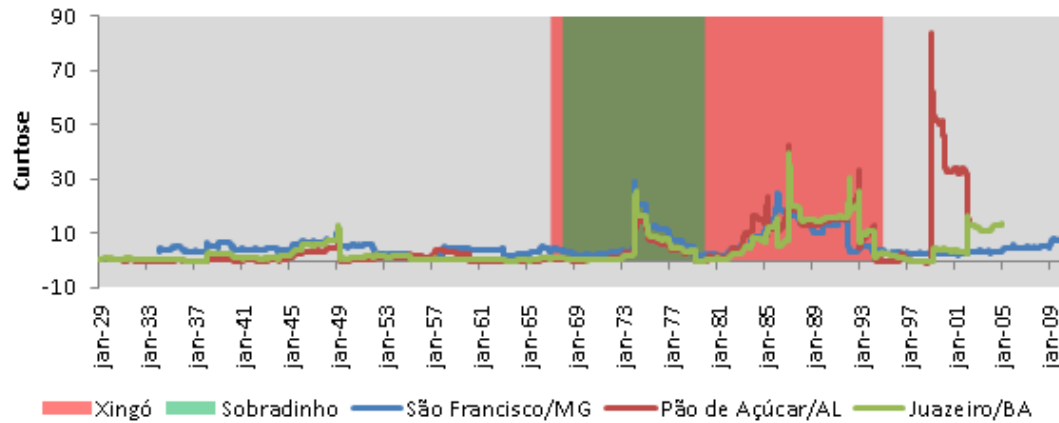


As séries das três estações apresentam pico entre 1941 e 1945, com a janela móvel isso se estende até 1949, associado a um La Niña (1949 e 1951), um decréscimo sendo este mais forte momentaneamente entre 1945 e 1953 que se estende a 1958, associado ao término da construção de Três Marias e um El Niño (1957 a 1959).

Comportamento estável pode ser observado até meados de 1978, que se estende a 1983 (término da construção de Sobradinho) onde ocorre uma nova fase de crescimento com pico em 1984 que se estende até 1989 e novo decaimento a níveis muito inferiores aos anteriormente registrados. Podemos destacar que este decaimento é maior para as séries das estações de Pão de Açúcar/AL e Juazeiro/BA, decorrente do controle da vazão por Sobradinho (GURJÃO et al., 2012).

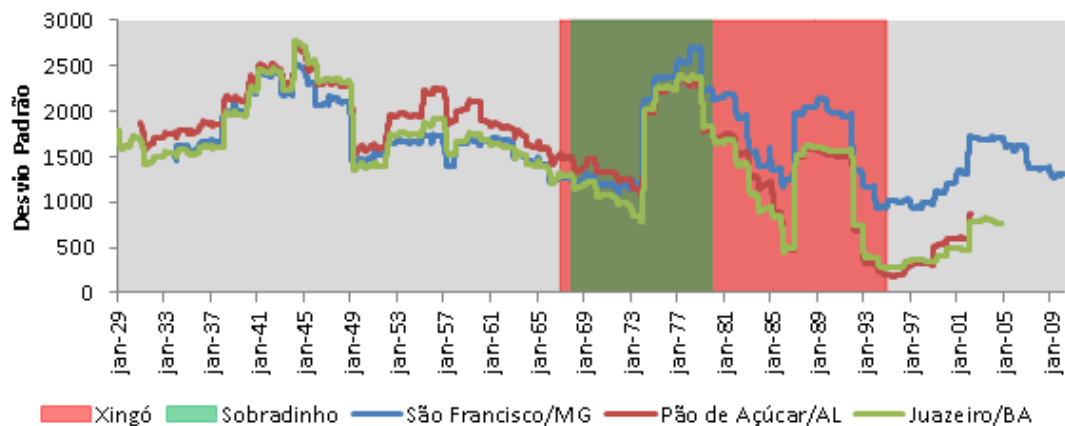
Na Figura 17, podemos observar a curtose em janela móvel para as séries de vazão. A curtose mede o grau de concentração das observações ao redor da média. Um aumento da curtose indica uma maior concentração de observações ao redor da média. Os comportamentos são muito similares, apresentando maior curtose no período posterior a 1974 para as séries das três estações. Podemos destacar um pico para série da estação de Pão de Açúcar/AL em 1999, associado a El Niño (1990 a 1993 e 1997 a 1998).

Figura 17: Sliding Window Analysis: Curtose para as séries de Vazão ( $m^3/s$ ) nas estações. Construção da GCH/R de Sobradinho na faixa verde; Construção da GCH de Xingó na faixa vermelha.



Os resultados em janela móvel do desvio padrão são apresentados na Figura 18. Podemos observar que nas séries das três estações há um pico em 1945 que se estende a 1950, associado a um La Niña (1949 a 1951), há um decréscimo sendo este mais forte momentaneamente entre 1957 e 1975 que se estende a 1980, associado ao término da construção de Sobradinho onde ocorre uma nova fase de crescimento com pico em 1978 que se estende a 1983, associado a El Niño (1982 a 1983) e novo decaimento a níveis muito inferiores aos anteriormente registrados até meados de 1987 quando volta a crescer até 1991 que se estende a 1996, associado a El Niño (1990 a 1993). As séries das estações de Pão de Açúcar/AL e Juazeiro/BA observam maior influência do El Niño no período de 1993 a 2001 do que São Francisco/MG.

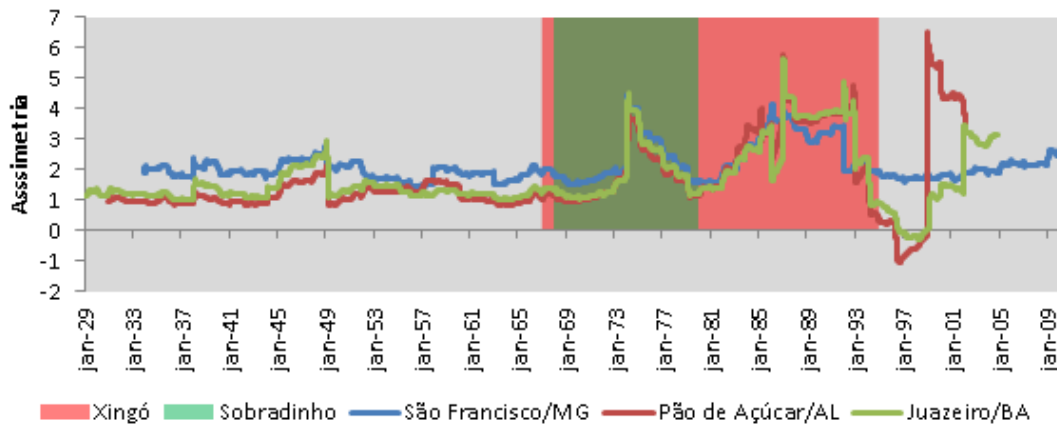
Figura 18: Sliding Window Analysis: Desvio Padrão (DP) para as séries de Vazão ( $m^3/s$ ) nas estações. Construção da GCH/R de Sobradinho na faixa verde; Construção da GCH de Xingó na faixa vermelha.





A assimetria em janelas móveis pode ser observada na Figura 19. A assimetria cresce a partir de 1973 (se estendendo a 1978) para as séries das três estações, podendo-se associar este crescimento com o término da construção de sobradinho para as séries das estações a jusantes.

Figura 19: Sliding Window Analysis: Assimetria para as séries de Vazão ( $m^3/s$ ) nas estações. Construção da GCH/R de Sobradinho na faixa verde; Construção da GCH de Xingó na faixa vermelha.



A partir de 1981, a assimetria volta a crescer com pico em 1987 e 1992 estendendo-se a 1997 podendo estes ser associados a El Niño em 1990 a 1993 e 1997 a 1998. Após 1994, a assimetria fica estável na série da estação de São Francisco/MG, porém para as séries das demais estações a assimetria oscila entre um período negativo (associado a secas) e positivo (associado a enchentes). Apenas um período de La Niña ocorreu desde então entre 2007 e 2008.

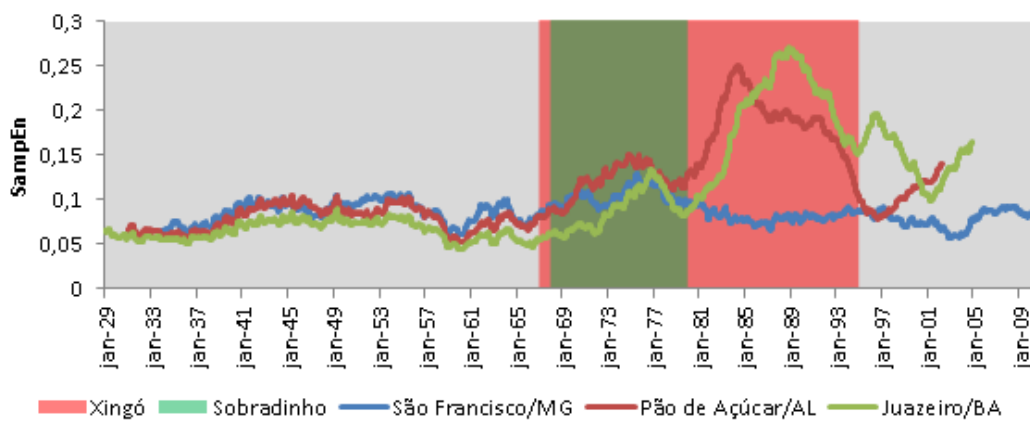
A *SampEn* em janela móvel pode ser observada na Figura 20. Liu et al. (2016) argumenta que a ocorrência de eventos extremos em janelas móveis aumentam a entropia. Podemos observar para as séries originais (Figura 20(a)) a partir de 1979 a entropia das séries de Juazeiro/BA e Pão de Açúcar/AL aumenta coincidentemente com o término da construção de Sobradinho em 1979 e se mantem a níveis maiores que a entropia da série da estação de São Francisco/MG para todo o período posterior a construção das GCH/Rs.

A partir de 1979, quando ocorre este aumento da entropia para a série original da estação de Pão de Açúcar/AL, ocorre um La Niña entre 1988 e 1989, indicando a influência tardia deste fenômeno no crescimento desta, atestando a influência do reservatório de Sobradinho nas séries desta estação. Entre 1978 e 1989 a entropia em Juazeiro só cresce não sofrendo influência de nenhum evento climático. De 1989 a 1994, ocorre La Niña (1988 a 1989) e El Niño (1990 e 1993). Contudo, a entropia continua a crescer até 1994.

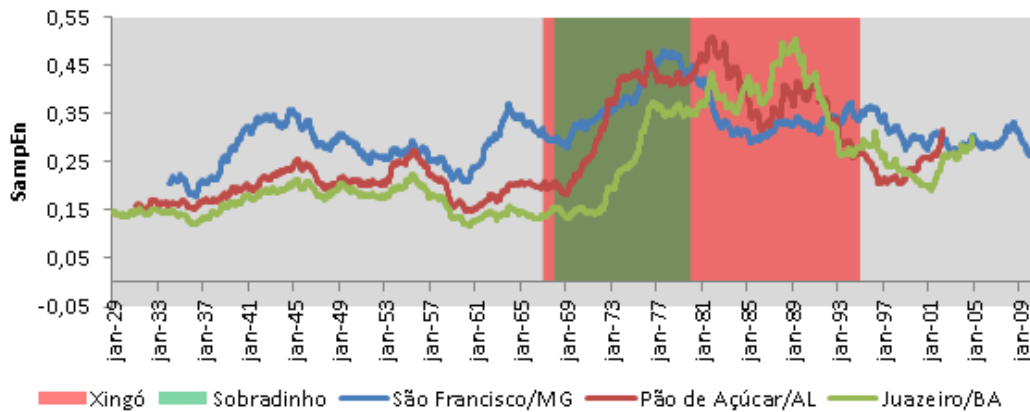
Para as séries de anomalias (Figura 20(b)) um comportamento similar à série

original pode ser observado, porém em menor magnitude. Há um aumento brusco na entropia para estação de Juazeiro/BA a partir de 1970 e para a estação de Pão de Açúcar/AL a partir de 1967. Pode-se observar que a série da estação de São Francisco apresenta maior entropia do que as demais estações no período anterior a construção das GCH/R e a magnitude desta não muda no período posterior a construção diferentemente das demais.

Figura 20: Sliding Window Analysis:  $SampEn$  para as séries de Vazão ( $m^3/s$ ) nas estações. Construção da GCH/R de Sobradinho na faixa verde; Construção da GCH de Xingó na faixa vermelha.



(a)



(b)

## 6 Conclusão

Nesta dissertação investigamos os impactos de reservatórios e hidrelétricas na vazão do Rio São Francisco em três estações nas regiões do Alto, Sub-Médio e Baixo São Francisco utilizando estações a jusante das GCH/R de Três Marias/MG, Sobradinho/BA e Xingó/SE por meio das técnicas de Detrended Fluctuation Analysis – DFA, Multi-Scale Entropy – MSE e Sliding Window Analysis – SWA.

As estações de Juazeiro/BA e Pão de Açúcar/AL apresentam diminuição das estatísticas de tendência central e dispersão, aumento da assimetria e da curtose quando se compara os períodos anterior e posterior a construção da GCH/R de Sobradinho e da hidrelétrica de Xingó. A estação de São Francisco/MG apresenta resultados similares, porém, mais discretos.

As séries originais e anomalias apresentam memória de longo alcance e comportamento não linear. Os resultados de DFA para anomalias mostraram-se mais esclarecedores em relação a influência dos reservatórios. O regime hidrológico das estações Juazeiro/BA e Pão de Açúcar/AL (estações próximas a GCH/R de Sobradinho e a GCH de Xingó) demonstrou-se alterado após a construção das GCH/Rs: de persistente (nas escalas entre 30 dias e 1,5 anos) para anti-persistente (nas escalas entre 10 dias e 1,5 anos). A série de anomalias da estação de São Francisco/MG (estação distante da GCH/R de Três Marias) não mostrou alteração nas correlações depois da construção das GCH/Rs.

Na avaliação da complexidade nas séries das estações através de Multi-Scale Entropy, o período posterior a construção das GCH/Rs apresentou-se com uma dinâmica mais complexa do que o anterior nas séries originais para as estações de Juazeiro/BA e Pão de Açúcar/AL. Para as séries de anomalias, as séries anteriores apresentaram dinâmica mais complexa em maiores escalas do que as anteriores. A estação de São Francisco/MG não apresentou diferenças de complexidade no regime hidrológico entre os períodos, nem para séries originais ou anomalias. Isto indica uma mudança no regime hidrológico que tem implicações no ecossistema do Rio a jusante.

Na análise em janelas móveis, as séries analisadas diferiram quanto a amplitude interquartil e desvio padrão, com decaimento mais lento para São Francisco/MG; quanto a assimetria, com aumento mais expressivo para Pão de Açúcar/AL e Juazeiro/BA. Diferenças muito discretas e pontuais foram observadas para a curtose. Podemos associar as oscilações das medidas descritivas em janelas móveis como desvio padrão e amplitude interquartil ao clima e ao reservatório, bem como a influência apenas do clima para assimetria e curtose.

Sliding Window Analysis demonstrou um aumento da entropia para as séries originais e anomalias nas estações de Juazeiro/BA e Pão de Açúcar/AL após o término da construção da GCH/R de Sobradinho em 1979. Estes resultados confirmam que a intervenção humana altera a complexidade da vazão dada a proximidade da estação com a GCH/R, sendo mais destacadas as alterações na entropia, medidas de dispersão e assimetria.

## 7 Trabalhos Futuros

Para trabalhos futuros pretende-se avaliar a influência dos reservatórios na vazão destas estações utilizando MF-DFA (Multi-Fractal Detrended Fluctuation Analysis) e a avaliar a sincronização com eventos climáticos como precipitação, temperatura, o índice Niño 3.4 (associado a ENSO) e TSAI (Tropical South Atlantic Index, associado ao Dipolo do Atlântico Sul) através de Cross Sample Entropy.

## Referências Bibliográficas

- ALVAREZ-RAMIREZ, J. et al. Time-varying hurst exponent for us stock markets. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, Elsevier, v. 387, n. 24, p. 6159–6169, 2008.
- ANA. **Agência Nacional de Água**. 2015. Disponível em: <<https://www.ana.gov.br>>.
- ANA. **Conjuntura dos recursos hídricos no Brasil: regiões hidrográficas brasileiras**. Edição especial. [S.l.: s.n.], 2015.
- ANDRADE, E. M. et al. The vulnerability of hydroelectric generation in the northeast of brazil: The environmental and business risks for chesf. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 16, n. 8, p. 5760–5769, 2012.
- ANSAR, A. et al. Should we build more large dams? the actual costs of hydropower megaproject development. **Energy Policy**, Elsevier, v. 69, p. 43–56, 2014.
- ARAÚJO, L. S. et al. Avaliação da influência do sistema cantareira na bacia do rio piracicaba através da análise de complexidade. **Rev. Bras. Biom**, v. 33, n. 3, p. 403–413, 2015.
- ATAPATTU, S. S.; KODITUWAKKU, D. C. Agriculture in south asia and its implications on downstream health and sustainability: A review. **Agricultural Water Management**, Elsevier, v. 96, n. 3, p. 361–373, 2009.
- BALASIS, G. et al. Investigating dynamical complexity in the magnetosphere using various entropy measures. **Journal of Geophysical Research: Space Physics**, Wiley Online Library, v. 114, n. A9, 2009.
- BALZTER, H. et al. Multi-scale entropy analysis as a method for time-series analysis of climate data. **Climate**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 3, n. 1, p. 227–240, 2015.
- BOMBARDI, R. J. et al. Precipitation over eastern south america and the south atlantic sea surface temperature during neutral enso periods. **Climate dynamics**, Springer, v. 42, n. 5-6, p. 1553–1568, 2014.
- BOX, G. E. et al. **Time series analysis: forecasting and control**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2015.
- BRASIL. ANEEL. **RESOLUÇÃO NORMATIVA N° 673, DE 4 DE AGOSTO DE 2015, Estabelece os requisitos e procedimentos para a obtenção de outorga de autorização para exploração de aproveitamento de potencial hidráulico com características de Pequena Central Hidrelétrica – PCH**. 2015. <[http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/12363/12363\\_10.PDF](http://www.maxwell.vrac.puc-rio.br/12363/12363_10.PDF)>.
- CAPURRO, A. et al. Tsallis entropy and cortical dynamics: the analysis of eeg signals. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, Elsevier, v. 257, n. 1, p. 149–155, 1998.

- CARBONE, A.; CASTELLI, G.; STANLEY, H. Time-dependent hurst exponent in financial time series. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, Elsevier, v. 344, n. 1, p. 267–271, 2004.
- CATARINO, A. et al. Atypical eeg complexity in autism spectrum conditions: a multiscale entropy analysis. **Clinical neurophysiology**, Elsevier, v. 122, n. 12, p. 2375–2383, 2011.
- CAVALCANTI, I. F. de A. The influence of extratropical atlantic ocean region on wet and dry years in north-northeastern brazil. **Frontiers in Environmental Science**, Frontiers, v. 3, p. 34, 2015.
- CEMIG. **Companhia Energética de Minas Gerais**. 2015. Disponível em: <<https://www.cemig.com.br>>.
- CHEN, H. et al. Historical temporal trends of hydro-climatic variables and runoff response to climate variability and their relevance in water resource management in the hanjiang basin. **Journal of hydrology**, Elsevier, v. 344, n. 3, p. 171–184, 2007.
- CHESF. **Companhia Hidrelétrica do Rio São Francisco**. 2015. Disponível em: <<https://www.chesf.gov.br>>.
- CHOU, C.-M. Applying multiscale entropy to the complexity analysis of rainfall-runoff relationships. **Entropy**, Molecular Diversity Preservation International, v. 14, n. 5, p. 945–957, 2012.
- CHOU, C.-M. Complexity analysis of rainfall and runoff time series based on sample entropy in different temporal scales. **Stochastic environmental research and risk assessment**, Springer, v. 28, n. 6, p. 1401–1408, 2014.
- CIRINO, P. H. et al. Assessing the impacts of enso-related weather effects on the brazilian agriculture. **Procedia Economics and Finance**, Elsevier, v. 24, p. 146–155, 2015.
- COSTA, M.; GOLDBERGER, A. L.; PENG, C.-K. Multiscale entropy analysis of biological signals. **Physical review E**, APS, v. 71, n. 2, p. 021906, 2005.
- COSTA, M. et al. Multiscale entropy analysis of human gait dynamics. **Physica A: Statistical Mechanics and its applications**, Elsevier, v. 330, n. 1, p. 53–60, 2003.
- CPTEC. **Centro de Previsão de Tempo e Estudos Climáticos**. 2015. Disponível em: <<http://www.cptec.inpe.br/>>.
- CURRENTI, G. et al. Fluctuation analysis of the hourly time variability of volcano-magnetic signals recorded at mt. etna volcano, sicily (italy). **Chaos, Solitons & Fractals**, Elsevier, v. 23, n. 5, p. 1921–1929, 2005.
- FU, Z. et al. Multi-scale entropy analysis of vertical wind variation series in atmospheric boundary-layer. **Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation**, Elsevier, v. 19, n. 1, p. 83–91, 2014.
- GAMERO, L.; PLASTINO, A.; TORRES, M. Wavelet analysis and nonlinear dynamics in a nonextensive setting. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, Elsevier, v. 246, n. 3, p. 487–509, 1997.

GARCIA, C. A. **nonlinearTseries: R package for nonlinear time series analysis**. [S.l.], 2014. R package version 0.2.1. Disponível em: <<http://CRAN.R-project.org/package=nonlinearTseries>>.

GHOSH, T.; PRELAS, M. **Energy resources and systems: volume 2: renewable resources**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2011. v. 2.

GOLAN, A. **Information and entropy econometrics: a review and synthesis**. [S.l.]: Now Publishers Inc, 2008.

GOLDBERGER, A. L. et al. Fractal dynamics in physiology: alterations with disease and aging. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, National Acad Sciences, v. 99, n. suppl 1, p. 2466–2472, 2002.

GRAY, R. M. **Entropy and Information Theory**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2011.

GURJÃO, C. D. de S. et al. Influência do enos (el niño-oscilação sul) no regime hidrológico do rio são francisco: uma análise em regiões com fortes pressões antrópicas (influence of enso (el niño-southern oscillation) in the hydrological regime são francisco river: an analysis...). **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 5, n. 4, p. 774–790, 2012.

GUZMAN-VARGAS, L.; RAMÍREZ-ROJAS, A.; ANGULO-BROWN, F. Multiscale entropy analysis of electroseismic time series. **Natural Hazards and Earth System Science**, Copernicus GmbH, v. 8, n. 4, p. 855–860, 2008.

HASTENRATH, S.; GREISCHAR, L. Further work on the prediction of northeast brazil rainfall anomalies. **Journal of Climate**, v. 6, n. 4, p. 743–758, 1993.

HIJMANS, R. J. **geosphere: Spherical Trigonometry**. [S.l.], 2015. R package version 1.5-1. Disponível em: <<http://CRAN.R-project.org/package=geosphere>>.

HUANG, F. et al. Flow-complexity analysis of the upper reaches of the yangtze river, china. **Journal of Hydrologic Engineering**, American Society of Civil Engineers, v. 16, n. 11, p. 914–919, 2011.

INC., G. **Google Earth version 7.1.5.1557**. [S.l.], 2015.

JOELSON, M. et al. On fractal nature of groundwater level fluctuations due to rainfall process. **Chaos, Solitons & Fractals**, Elsevier, v. 82, p. 103–115, 2016.

KANTELHARDT, J. W. et al. Long-term persistence and multifractality of precipitation and river runoff records. **Journal of Geophysical Research: Atmospheres**, Wiley Online Library, v. 111, n. D1, 2006.

KANTELHARDT, J. W. et al. Multifractal detrended fluctuation analysis of nonstationary time series. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, Elsevier, v. 316, n. 1, p. 87–114, 2002.

KIRÁLY, A.; JÁNOSI, I. M. Detrended fluctuation analysis of daily temperature records: Geographic dependence over australia. **Meteorology and Atmospheric Physics**, Springer, v. 88, n. 3-4, p. 119–128, 2005.



KIRCHNER, M. et al. Detrended fluctuation analysis and adaptive fractal analysis of stride time data in parkinson's disease: stitching together short gait trials. **PloS one**, Public Library of Science, v. 9, n. 1, p. e85787, 2014.

KOMSTA, L.; NOVOMESTKY, F. **moments: Moments, cumulants, skewness, kurtosis and related tests**. [S.l.], 2015. R package version 0.14. Disponível em: <<http://CRAN.R-project.org/package=moments>>.

KOSCIELNY-BUNDE, E. et al. Long-term persistence and multifractality of river runoff records: Detrended fluctuation studies. **Journal of Hydrology**, Elsevier, v. 322, n. 1, p. 120–137, 2006.

LABAT, D. et al. Scaling behavior of the fluctuations in stream flow at the outlet of karstic watersheds, france. **Journal of Hydrology**, Elsevier, v. 410, n. 3, p. 162–168, 2011.

LAKE, D. E. et al. Sample entropy analysis of neonatal heart rate variability. **American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology**, Am Physiological Soc, v. 283, n. 3, p. R789–R797, 2002.

LEE, B.-S.; YOU, G. J.-Y. An assessment of long-term overtopping risk and optimal termination time of dam under climate change. **Journal of environmental management**, Elsevier, v. 121, p. 57–71, 2013.

LI, Z.; ZHANG, Y.-K. Multi-scale entropy analysis of mississippi river flow. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, Springer, v. 22, n. 4, p. 507–512, 2008.

LIMA, C. H.; LALL, U. Climate informed monthly streamflow forecasts for the brazilian hydropower network using a periodic ridge regression model. **Journal of hydrology**, Elsevier, v. 380, n. 3, p. 438–449, 2010.

LIU, C. et al. Comparison of different threshold values  $r$  for approximate entropy: application to investigate the heart rate variability between heart failure and healthy control groups. **Physiological Measurement**, IOP Publishing, v. 32, n. 2, p. 167, 2010.

LIU, D. et al. Entropy of hydrological systems under small samples: Uncertainty and variability. **Journal of Hydrology**, Elsevier, v. 532, p. 163–176, 2016.

LIVINA, V. et al. A stochastic model of river discharge fluctuations. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, Elsevier, v. 330, n. 1, p. 283–290, 2003.

LU, S. et al. Automatic selection of the threshold value for approximate entropy. **Biomedical Engineering, IEEE Transactions on**, IEEE, v. 55, n. 8, p. 1966–1972, 2008.

MANETA, M. P. et al. Water demand and flows in the sao francisco river basin (brazil) with increased irrigation. **Agricultural Water Management**, Elsevier, v. 96, n. 8, p. 1191–1200, 2009.

MARTINA, E. et al. Multiscale entropy analysis of crude oil price dynamics. **Energy Economics**, Elsevier, v. 33, n. 5, p. 936–947, 2011.

MASSEI, N.; FOURNIER, M. Assessing the expression of large-scale climatic fluctuations in the hydrological variability of daily seine river flow (france) between 1950 and 2008 using hilbert–huang transform. **Journal of Hydrology**, Elsevier, v. 448, p. 119–128, 2012.

MAYER, C. C. et al. Selection of entropy-measure parameters for knowledge discovery in heart rate variability data. **BMC bioinformatics**, BioMed Central Ltd, v. 15, n. Suppl 6, p. S2, 2014.

MCCUEN, R. H. **Modeling hydrologic change: statistical methods**. [S.l.]: CRC press, 2002.

MEDEIROS, P. et al. Aporte fluvial e dispersão de matéria particulada em suspensão na zona costeira do rio são francisco (se/al). **Geochimica Brasiliensis**, v. 21, n. 2, 2012.

MIHAILOVIĆ, D. et al. Complexity analysis of the turbulent environmental fluid flow time series. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, Elsevier, v. 395, p. 96–104, 2014.

MIN, L.; GUANG, M.; SARKAR, N. Complexity analysis of 2010 baja california earthquake based on entropy measurements. In: ASCE. **Vulnerability, Uncertainty, and Risk@ sQuantification, Mitigation, and Management**. [S.l.], 2014. p. 1815–1822.

MOVAHED, M. S.; HERMANIS, E. Fractal analysis of river flow fluctuations. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, Elsevier, v. 387, n. 4, p. 915–932, 2008.

NESTLER, J. et al. The river machine: a template for fish movement and habitat, fluvial geomorphology, fluid dynamics and biogeochemical cycling. **River research and applications**, Wiley Online Library, v. 28, n. 4, p. 490–503, 2012.

OLDEN, J. D.; POFF, N. Redundancy and the choice of hydrologic indices for characterizing streamflow regimes. **River Research and Applications**, Wiley Online Library, v. 19, n. 2, p. 101–121, 2003.

ORNAS, A. Hjort-af. **Turning hydropower social: where global sustainability conventions matter**. [S.l.]: Springer Science & Business Media, 2007.

PAN, F. et al. Scale effects on information theory-based measures applied to streamflow patterns in two rural watersheds. **Journal of hydrology**, Elsevier, v. 414, p. 99–107, 2012.

PAO, H.-T.; FU, H.-C. The causal relationship between energy resources and economic growth in brazil. **Energy Policy**, Elsevier, v. 61, p. 793–801, 2013.

PENG, C.-K. et al. Mosaic organization of dna nucleotides. **Physical Review E**, APS, v. 49, n. 2, p. 1685, 1994.

PEREIRA, S. B. et al. Estudo do comportamento hidrológico do rio são francisco e seus principais afluentes. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 11, n. 6, p. 615–622, 2007.

- PINCUS, S. M. Approximate entropy as a measure of system complexity. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, National Acad Sciences, v. 88, n. 6, p. 2297–2301, 1991.
- POVEDA, G.; MESA, O. J. Feedbacks between hydrological processes in tropical south america and large-scale ocean-atmospheric phenomena. **Journal of climate**, v. 10, n. 10, p. 2690–2702, 1997.
- RAMDANI, S. et al. On the use of sample entropy to analyze human postural sway data. **Medical engineering & physics**, Elsevier, v. 31, n. 8, p. 1023–1031, 2009.
- REDDY, Y.; SEBASTIN, A. Parameters for estimation of entropy to study price manipulation in stock market. In: **10th Capital Markets Conference, Indian Institute of Capital Markets Paper**. [S.l.: s.n.], 2006.
- REN, W.-X.; SUN, Z.-S. Structural damage identification by using wavelet entropy. **Engineering Structures**, Elsevier, v. 30, n. 10, p. 2840–2849, 2008.
- RICHMAN, J. S.; MOORMAN, J. R. Physiological time-series analysis using approximate entropy and sample entropy. **American Journal of Physiology-Heart and Circulatory Physiology**, Am Physiological Soc, v. 278, n. 6, p. H2039–H2049, 2000.
- RICHTER, B. D. et al. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. **Conservation biology**, Wiley Online Library, v. 10, n. 4, p. 1163–1174, 1996.
- SALAS, H. D.; POVEDA, G. Scaling of entropy and multi-scaling of the time generalized q-entropy in rainfall and streamflows. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, Elsevier, v. 423, p. 11–26, 2015.
- SEN, A. K. Complexity analysis of riverflow time series. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, Springer, v. 23, n. 3, p. 361–366, 2009.
- SHUANGCHENG, L. et al. Measurement of climate complexity using sample entropy. **International journal of climatology**, Wiley Online Library, v. 26, n. 15, p. 2131–2139, 2006.
- SINGH, V. The use of entropy in hydrology and water resources. **Hydrological processes**, Bristol, v. 11, n. 6, p. 587–626, 1997.
- SINGH, V. P.; CUI, H. Entropy theory for streamflow forecasting. **Environmental Processes**, Springer, v. 2, n. 3, p. 449–460, 2015.
- SOITO, J. L. da S.; FREITAS, M. A. V. Amazon and the expansion of hydropower in brazil: Vulnerability, impacts and possibilities for adaptation to global climate change. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 15, n. 6, p. 3165–3177, 2011.
- SOUZA, A. C. C. de. Assessment and statistics of brazilian hydroelectric power plants: dam areas versus installed and firm power. **Renewable and sustainable energy reviews**, Elsevier, v. 12, n. 7, p. 1843–1863, 2008.

- SPERLING, E. von. Hydropower in brazil: overview of positive and negative environmental aspects. **Energy Procedia**, Elsevier, v. 18, p. 110–118, 2012.
- SU, H. et al. Multifractal scaling behavior analysis for existing dams. **Expert Systems with Applications**, Elsevier, v. 40, n. 12, p. 4922–4933, 2013.
- TELESCA, L.; PIERINI, J. O.; SCIAN, B. Investigating the temporal variation of the scaling behavior in rainfall data measured in central argentina by means of detrended fluctuation analysis. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, Elsevier, v. 391, n. 4, p. 1553–1562, 2012.
- TONG, C. et al. Study on runoff series complexity based on approximate entropy. **Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry**, v. 33, n. 6, p. 121–126, 2005.
- TONG, S. et al. Nonextensive entropy measure of eeg following brain injury from cardiac arrest. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, Elsevier, v. 305, n. 3, p. 619–628, 2002.
- UVO, C. R. Trends in streamflow and rainfall in tropical south america: Amazonia, eastern brazil, and northwestern peru. **Journal of Geophysical Research**, v. 103, n. D2, p. 1775–1783, 1998.
- VRIELING, A. Satellite remote sensing for water erosion assessment: A review. **Catena**, Elsevier, v. 65, n. 1, p. 2–18, 2006.
- WICKHAM, H. **ggplot2: elegant graphics for data analysis**. Springer New York, 2009. ISBN 978-0-387-98140-6. Disponível em: <<http://had.co.nz/ggplot2/book>>.
- WIEL, M. J. V. D. et al. Modelling the response of river systems to environmental change: progress, problems and prospects for palaeo-environmental reconstructions. **Earth-Science Reviews**, Elsevier, v. 104, n. 1, p. 167–185, 2011.
- WU, S.-D. et al. Time series analysis using composite multiscale entropy. **Entropy**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 15, n. 3, p. 1069–1084, 2013.
- YAMASAKI, K. et al. Scaling and memory in volatility return intervals in financial markets. **Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America**, National Acad Sciences, v. 102, n. 26, p. 9424–9428, 2005.
- YUN, R.; SINGH, V. P. Multiple duration limited water level and dynamic limited water level for flood control, with implications on water supply. **Journal of hydrology**, Elsevier, v. 354, n. 1, p. 160–170, 2008.
- ZEILEIS, A.; GROTHENDIECK, G. zoo: S3 infrastructure for regular and irregular time series. **Journal of Statistical Software**, v. 14, n. 6, p. 1–27, 2005. Disponível em: <<http://www.jstatsoft.org/v14/i06/>>.
- ZHANG, Q. et al. Flood frequency analysis with consideration of hydrological alterations: Changing properties, causes and implications. **Journal of hydrology**, Elsevier, v. 519, p. 803–813, 2014.

ZHANG, Q. et al. Stationarity of annual flood peaks during 1951–2010 in the pearl river basin, china. **Journal of Hydrology**, Elsevier, v. 519, p. 3263–3274, 2014.

ZHANG, Q. et al. Multifractal analysis of streamflow records of the east river basin (pearl river), china. **Physica A: Statistical Mechanics and its Applications**, Elsevier, v. 388, n. 6, p. 927–934, 2009.

ZHANG, Q. et al. The influence of dam and lakes on the yangtze river streamflow: long-range correlation and complexity analyses. **Hydrological Processes**, Wiley Online Library, v. 26, n. 3, p. 436–444, 2012.

ZHAO, J. et al. Analysis of temporal and spatial trends of hydro-climatic variables in the wei river basin. **Environmental research**, Elsevier, v. 139, p. 55–64, 2015.

ZHENG, Z. et al. Scaling of seismic memory with earthquake size. **Physical Review E**, APS, v. 86, n. 1, p. 011107, 2012.

ZHOU, J. et al. Integrated optimization of hydroelectric energy in the upper and middle yangtze river. **Renewable and Sustainable Energy Reviews**, Elsevier, v. 45, p. 481–512, 2015.

ZHOU, Y. et al. Hydrological effects of water reservoirs on hydrological processes in the east river (china) basin: complexity evaluations based on the multi-scale entropy analysis. **Hydrological Processes**, Wiley Online Library, v. 26, n. 21, p. 3253–3262, 2012.

ZHOU, Y.; ZHANG, Q.; SINGH, V. P. Fractal-based evaluation of the effect of water reservoirs on hydrological processes: the dams in the yangtze river as a case study. **Stochastic environmental research and risk assessment**, Springer, v. 28, n. 2, p. 263–279, 2014.

ZHU, L. et al. Multi-scale cross entropy analysis for inclined oil–water two-phase countercurrent flow patterns. **Chemical engineering science**, Elsevier, v. 66, n. 23, p. 6099–6108, 2011.

ZIEGLER, A. D. et al. Detection of intensification in global-and continental-scale hydrological cycles: Temporal scale of evaluation. **Journal of Climate**, v. 16, n. 3, p. 535–547, 2003.