

Juliana Kátia da Silva

**IMPACTO DA CONSTRUÇÃO DE BARRAGENS NOS
EPISÓDIOS DE SECA NA BACIA DO RIO SÃO
FRANCISCO**

**Recife - PE
OUT/2018**



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

**IMPACTO DA CONSTRUÇÃO DE BARRAGENS NOS
EPISÓDIOS DE SECA NA BACIA DO RIO SÃO
FRANCISCO**

Tese julgada adequada para obtenção do título de doutor em Biometria e Estatística Aplicada, defendida e aprovada por unanimidade em 18/10/2018 pela Comissão Examinadora.

Área de Concentração: Modelagem Estatística e Computacional

**Recife - PE
OUT/2018**

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

IMPACTO DA CONSTRUÇÃO DE BARRAGENS NOS EPISÓDIOS DE
SECA NA BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO

Juliana Kátia da Silva

Tese julgada adequada para obtenção do título de doutor(a) em Biometria e Estatística Aplicada, defendida e aprovada por unanimidade em 18/10/2018 pela Comissão Examinadora.

Orientador:

Prof. Dr. Borko D. Stosic
DEINFO/UFRPE

Banca Examinadora:

Prof.(a) Dr.(a) Tatijana Stosic
DEINFO/UFRPE

Prof.(a) Dr.(a) Silvio Fernando A. Xavier Jr
CCT/UEPB

Prof.(a) Dr.(a) Antônio Samuel Alves Vieira
DEINFO/UFRPE

Prof.(a) Dr.(a) Lucian B. Bejan
DEINFO/UFRPE

Esta tese é dedicada ao meu filho Anthony Gabriel.

Agradecimentos

Primeiramente a Deus por ter me dado sabedoria, paciência e forças para concluir o doutorado. Ainda mais por ter tido que enfrentar uma jornada quántupla (mãe, esposa, dona de casa, professora e estudante) durante esse processo.

A minha mãe, as minhas tias, minha avó, meus irmãos e primos que me incentivaram nessa volta aos estudos e continuaram incentivando para concluir meu doutorado. E pela hospedagem durante meus afastamentos.

Ao meu companheiro, amigo, parceiro e amado Carlos Henrique por compreender minhas ausências e sempre me apoiar e incentivar a concluir esse trabalho e pelos auxílios na parte gráfica, mesmo com suas chatices, principalmente quando via um pequeno “erro” no latex. Além do apoio nos cuidados com nosso filho, pois algumas vezes necessitei isolar-me um pouco para escrever ou analisar meus dados. Obrigada também por ouvir meus lamentos, enxugar minhas lágrimas nos momentos de desespero (graças a Deus, não foram muitos) e por me socorrer quando o computador dava algum problema.

Ao meu amado filho Anthony Gabriel (3 anos), para quem quero dizer que a realização de mais essa etapa tornou-se mais leve devido a sua existência na minha vida. Pois, nos momentos em que o estresse ameaçava me destruir, bastava um sorriso seu para tranquilizar meu coração. Um dia você irá ler isso e saberá o quanto sempre foi muito amado e que as minhas ausências foram necessárias nesse momento para lhe proporcionar um futuro melhor.

Aos colegas do Departamento de Estatística e Ciências Atuariais (DECAT) que aceitaram a ideia do Doutorado Interinstitucional (DINTER), alguns tendo até que se sobrecarregar para suprir nossos afastamentos. Principalmente os que enfrentaram essa jornada do DINTER (Allan, Amanda, Daniel, Eduardo, Esdras, Eucymara e Vanessa). Ao Kleber Oliveira, por sempre incentivar a fazer o doutorado e por ter aceitado ser nosso coordenador local. Em especial, à Vanessa, que mesmo enquanto estava passando por um momento difícil em sua vida, me representou na Biometria e buscou soluções para minha orientação.

Aos colegas da Biometria que me receberam de braços abertos durante os períodos que estive cumprindo estágio obrigatório do DINTER na UFRPE.

Ao secretário da Biometria, Marco Santos, por sempre nos socorrer nos momentos de aperto e tirar nossas dúvidas sobre as questões burocráticas.

Gostaria também de agradecer aos professores do Programa de Pós Graduação em Biometria e Estatística Aplicada que abraçaram a ideia do DINTER em parceria com

a Universidade Federal de Sergipe (UFS), mais especificamente com o DECAT, o que agilizou o meu doutoramento e de outros colegas que também fazem parte do DECAT. Aos coordenadores do programa de pós graduação em Biometria e Estatística Aplicada, professor Paulo Duarte (no início do DINTER) e professor Moacyr Cunha (atual).

Em especial agradeço aos meus orientadores prof. Borko e profa. Tatijana que foram a resposta que pedi a Deus após ter ficado “perdida” sem orientação, pois eles aceitaram me orientar, praticamente me adotaram, e agiram como verdadeiros orientadores, sempre me direcionando para a melhor maneira de realizar o trabalho. Além também, das dicas pessoais sempre muito valiosas da professora Tatijana que incentiva não só os seus orientandos como também os outros alunos.

Agradeço também aos professores Antônio Samuel, Lucian Bejan e Silvio Xavier Júnior que fizeram parte da minha banca de qualificação, juntamente com meus orientadores, professor Borko e professora Tatijana, e que deram contribuições muito valiosas para a melhoria do meu trabalho. Agradeço ainda, por terem aceitado participar também da banca de defesa.

Agradeço a CAPES pela aprovação do projeto DINTER entre as Universidades Federal Rural de Pernambuco (UFRPE) e Federal de Sergipe (UFS) através do qual pude realizar esse doutorado. Além também do apoio financeiro para a compra de materiais necessários para realização da pesquisa e também pelas ajudas de custo.

Resumo

Um dos fenômenos hidrológicos críticos que mais ocorre no Brasil, e principalmente no Nordeste, é a seca. Neste trabalho, analisou-se o impacto da construção de barragens nos episódios de seca na bacia do Rio São Francisco, já que estas além de terem a função de gerar energia elétrica podem ser reguladoras do fluxo da vazão dos rios. Os estudos que já existem sobre impactos de barragens são voltados para informações relacionadas a vazão, precipitação ou temperatura. O foco deste estudo foram as variáveis que caracterizam os episódios de seca (duração, déficit e intensidade) aplicando-se técnicas tradicionais de Estatística, Lacunaridade e *Detrended Fluctuation Analysis – DFA* e, para este último, considerou-se ainda as variáveis associadas a cheia (duração, sùficit e intensidade). Foram coletadas informações de três estações fluviométricas - São Francisco/MG, Juazeiro/BA e Pão de Açúcar/AL - e a princípio comparou-se informações relacionadas a construção do reservatório de Sobradinho, mas foram feitas também algumas comparações com o reservatório de Xingó. Como a estação São Francisco encontra-se a montante da barragem Sobradinho, esperava-se que ela não fosse influenciada pelos reservatórios, o que foi confirmado pelas três técnicas utilizadas, então esta estação serviu como um controle em relação as outras. Observando graficamente as séries temporais da vazão nas outras duas estações percebeu-se que havia alteração no comportamento após o funcionamento da barragem. Isto foi confirmado através da comparação dos valores médios das variáveis relacionadas aos episódios de seca, que apresentaram diferença significativa pelo teste de Mann-Whitney ao nível de 5% de significância. Observou-se ainda, por meio da análise de lacunaridade, que houve uma regularização da vazão das estações Juazeiro e Pão de Açúcar após a construção da barragem de Sobradinho, pois ocorreram valores menores de lacunaridade. A técnica de DFA também foi eficiente na detecção da influência das barragens, pois para o regime natural todas as variáveis relacionadas a seca apresentaram flutuações temporais persistente e após a construção essa persistência aumentou para a duração e diminuiu para o déficit e a intensidade, no caso da estação Pão de Açúcar enquanto que na estação Juazeiro a intensidade diminuiu a persistência após a construção e passou a ser aleatória no caso da duração e do déficit. Quando considerou-se as variáveis associadas a cheia percebeu-se que o comportamento alterou mais ainda após a construção, pois tanto a duração quanto o sùficit passaram da dinâmica persistente para antipersistente na estação Juazeiro enquanto que em Pão de Açúcar estas permaneceram persistentes mas aumentaram a persistência após a construção. Já em relação a intensidade da cheia nas duas estações as séries passaram de aleatórias para persistentes. Portanto, as três técnicas foram eficientes para detectar mudanças no comportamento das variáveis após a construção das barragens.

Palavras-chave: Barragens; Seca Hidrológica; Rio São Francisco; Lacunaridade; DFA.

Abstract

One of the critical hydrological phenomena that occurs most in Brazil, and especially in the Northeast, is drought. In this work, the impact of the construction of dams in the drought episodes in the São Francisco River basin was analyzed, since these besides having the function of generating electric power can regulate the flow of the rivers flow. Studies that already exist on dam impacts are focused on information related to flow, precipitation or temperature. The focus of this study was on the variables that characterize the episodes of drought (duration, deficit and intensity), applying traditional techniques of Statistics, Lacunarity and Detrended Fluctuation Analysis (DFA) and, for the latter, variables associated with flood (duration, deficit and intensity). Information was collected from three fluviometric stations - São Francisco / MG, Juazeiro / BA and Pão de Açúcar / AL - and at first information related to the construction of the Sobradinho reservoir was made, but some comparisons were also made with the Xingó reservoir. As the São Francisco station is located upstream of the Sobradinho dam, it was expected that it would not be influenced by the reservoirs, which was confirmed by the three techniques used, so this station served as a control over the others. By observing graphically the time series of the flow in the other two stations it was noticed that there was change in the behavior after the operation of the dam. This was confirmed by comparing the mean values of the variables related to the drought episodes, which showed significant difference by the Mann-Whitney test at the 5% significance level. It was also observed, through the analysis of lacunarity, that there was a regularization of the flow of the Juazeiro and Pão de Açúcar stations after the construction of the Sobradinho dam, because there were lower values of lacunarity. The DFA technique was also efficient in detecting the influence of dams, since for the natural regime all variables related to drought showed persistent temporal fluctuations and after construction this persistence increased for the duration and decreased for the deficit and the intensity, in the case of the Pão de Açúcar station, while in the Juazeiro station the intensity decreased the persistence after construction and became random in the case of duration and deficit. When considering the variables associated with flooding, it was noticed that the behavior changed even more after construction, since both duration and succitivity changed from persistent to antipersistent dynamics in the Juazeiro station, while in Pão de Açúcar these remained persistent but increased to persistence after construction. In relation to the intensity of the flood in the two seasons, the series went from random to persistent. Therefore, the three techniques were efficient to detect changes in the behavior of the variables after the construction of the dams.

Keywords: Dams; Hydrological Drought; São Francisco River; Lacunarity; DFA.

Lista de ilustrações

Figura 1 – Ciclo da água.	4
Figura 2 – Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco.	6
Figura 3 – Usina Hidrelétrica de Sobradinho	7
Figura 4 – Usina Hidrelétrica de Xingó	8
Figura 5 – Possíveis formas de derivar as características da seca e/ou da cheia. . .	13
Figura 6 – Conjunto de Cantor	16
Figura 7 – Triângulo de Sierpinski	16
Figura 8 – Curva de Koch	16
Figura 9 – Esquema da transformação do fractal em “caixas”	17
Figura 10 – Exemplos de lacunaridades para três mapas 8×8 com mesma dimensão fractal $D = \frac{\log(32)}{\log(8)} = 1,667$	19
Figura 11 – Série temporal da vazão ($m^3.s^{-1}$) na estação São Francisco. A linha tracejada vertical azul representa o início do funcionamento da barragem de Sobradinho.	22
Figura 12 – Histogramas da duração (dias) da seca para os limiares fixos ((a) 70%, (b) 80% e (c) 90%) e variáveis ((d) 70%, (e) 80% e (f) 90%) para estação São Francisco.	25
Figura 13 – Histogramas da intensidade ($m^3.s^{-1}/dia$) da seca para os limiares fixos ((a) 70%, (b) 80% e (c) 90%) e variáveis ((d) 70%, (e) 80% e (f) 90%) para estação São Francisco.	25
Figura 14 – Série temporal da vazão ($m^3.s^{-1}$) na estação Juazeiro. A linha tracejada vertical azul representa o início do funcionamento da barragem de Sobradinho.	26
Figura 15 – Histogramas da duração (dias) da seca para os limiares fixos (70% : (a) - completa, (b) - antes, (c) - depois; 80% : (d) - completa, (e) - antes, (f) - depois e 90% : (g) - completa, (h) - antes, (i) - depois) para estação Juazeiro.	29
Figura 16 – Histogramas da duração (dias) da seca para os limiares variáveis (70% : (a) - completa, (b) - antes, (c) - depois; 80% : (d) - completa, (e) - antes, (f) - depois e 90% : (g) - completa, (h) - antes, (i) - depois) para estação Juazeiro.	29
Figura 17 – Histogramas da intensidade ($m^3.s^{-1}/dia$) da seca para os limiares fixos (70% : (a) - completa, (b) - antes, (c) - depois; 80% : (d) - completa, (e) - antes, (f) - depois e 90% : (g) - completa, (h) - antes, (i) - depois) para estação Juazeiro.	30

Figura 18 – Histogramas da intensidade ($m^3.s^{-1}/dia$) da seca para os limiares variáveis (70% : (a) - completa, (b) - antes, (c) - depois; 80% : (d) - completa, (e) - antes, (f) - depois e 90% : (g) - completa, (h) - antes, (i) - depois) para estação Juazeiro.	30
Figura 19 – Série temporal da vazão ($m^3.s^{-1}$) na estação Pão de Açúcar. As linhas tracejadas representam o início do funcionamento da barragem de Sobradinho (em azul) e da barragem de Xingó (em vermelho).	31
Figura 20 – Histogramas da duração (dias) da seca para os limiares fixos (70% : (a) - completa, (b) - antes, (c) - depois; 80% : (d) - completa, (e) - antes, (f) - depois e 90% : (g) - completa, (h) - antes, (i) - depois) para estação Pão de Açúcar.	34
Figura 21 – Histogramas da duração (dias) da seca para os limiares variáveis (70% : (a) - completa, (b) - antes, (c) - depois; 80% : (d) - completa, (e) - antes, (f) - depois e 90% : (g) - completa, (h) - antes, (i) - depois) para estação Pão de Açúcar.	34
Figura 22 – Histogramas da intensidade ($m^3.s^{-1}/dia$) da seca para os limiares fixos (70% : (a) - completa, (b) - antes, (c) - depois; 80% : (d) - completa, (e) - antes, (f) - depois e 90% : (g) - completa, (h) - antes, (i) - depois) para estação Pão de Açúcar.	35
Figura 23 – Histogramas da intensidade ($m^3.s^{-1}/dia$) da seca para os limiares variáveis (70% : (a) - completa, (b) - antes, (c) - depois; 80% : (d) - completa, (e) - antes, (f) - depois e 90% : (g) - completa, (h) - antes, (i) - depois) para estação Pão de Açúcar.	35
Figura 24 – Lacunaridade empírica da vazão considerando o limiar de 70% fixo para as séries completa (a), antes de Sobradinho (b) e depois de Sobradinho (c), observações da Estação São Francisco - MG.	38
Figura 25 – Lacunaridade empírica da vazão considerando o limiar de 70% fixo para as séries completa (a), antes (b) e depois (c) de Sobradinho, observações da Estação Juazeiro/BA.	39
Figura 26 – Lacunaridade empírica da vazão considerando o limiar de 70% fixo para as séries completa (a), antes (b) e depois (c) de Sobradinho, observações da Estação Pão de Açúcar.	40
Figura 27 – Lacunaridade empírica da vazão considerando o limiar de 70% fixo para a série depois da construção da hidrelétrica de Xingó, observações da Estação Pão de Açúcar.	41
Figura 28 – DFA para duração (a) , déficit (b) e intensidade (c) da seca considerando as séries completas observadas nas Estações São Francisco, Juazeiro e Pão de Açúcar, tendo o limiar fixo de 70%.	43

Figura 29 – DFA para duração (a) , déficit (b) e intensidade (c) da seca considerando as séries antes e depois do funcionamento da Hidrelétrica de Sobradinho observadas na Estação Juazeiro, tendo o limiar fixo de 70%.	44
Figura 30 – DFA para duração (a) , déficit (b) e intensidade (c) da seca considerando as séries antes e depois do funcionamento da Hidrelétrica de Sobradinho observadas na Estação Pão de Açúcar, tendo o limiar fixo de 70%.	45
Figura 31 – DFA para duração (a) , déficit (b) e intensidade (c) da seca considerando as séries antes e depois do funcionamento da Hidrelétrica de Xingó observadas na Estação Pão de Açúcar, tendo o limiar fixo de 70%.	45
Figura 32 – DFA para duração (a) , sùficit (b) e intensidade (c) da cheia considerando as séries completas observadas nas Estações São Francisco, Juazeiro e Pão de Açúcar, tendo o limiar fixo de 70%.	47
Figura 33 – DFA para duração (a) , sùficit (b) e intensidade (c) da cheia considerando as séries antes e depois do funcionamento da Hidrelétrica de Sobradinho observadas na Estação Juazeiro, tendo o limiar fixo de 70%.	48
Figura 34 – DFA para duração (a) , sùficit (b) e intensidade (c) da cheia considerando as séries antes e depois do funcionamento da Hidrelétrica de Sobradinho observadas na Estação Pão de Açúcar, tendo o limiar fixo de 70%.	49
Figura 35 – DFA para duração (a) , sùficit (b) e intensidade (c) da cheia considerando as séries antes e depois do funcionamento da Hidrelétrica de Xingó observadas na Estação Pão de Açúcar, tendo o limiar fixo de 70%.	49

Lista de tabelas

Tabela 1 – Características das Estações Fluviométricas estudadas.	10
Tabela 2 – Medidas Descritivas da duração (dias) e da intensidade ($m^3.s^{-1}/dia$) da seca para estação São Francisco - MG de 1934 à 2016, considerando os limiares de 70%, 80% e 90% fixos e variáveis.	24
Tabela 3 – Medidas Descritivas da duração (dias) e da intensidade ($m^3.s^{-1}/dia$) da seca na estação Juazeiro/BA para as séries completa, antes e depois do funcionamento da Hidrelétrica de Sobradinho, considerando os limiares de 70%, 80% e 90% fixos e variáveis.	28
Tabela 4 – Medidas Descritivas da duração (dias) e da intensidade ($m^3.s^{-1}/dia$) da seca na estação Pão de Açúcar/AL para as séries completa, antes e depois do funcionamento da Hidrelétrica de Sobradinho, considerando os limiares de 70%, 80% e 90% fixos e variáveis.	33
Tabela 5 – Valores de lacunaridade para tamanho de caixa igual a 2 para diferentes séries, considerando o limiar de 70% fixo.	37
Tabela 6 – Valores de α para as séries de duração, déficit e intensidade da seca para cada uma das estações.	42
Tabela 7 – Valores de α para as séries de duração, sùficit e intensidade da cheia para cada uma das estações.	46

Sumário

1	INTRODUÇÃO	1
2	OBJETIVOS	3
2.1	Geral	3
2.2	Específicos	3
3	REVISÃO DE LITERATURA	4
3.1	Ciclo da Água	4
3.2	Bacias hidrográficas do Brasil	5
3.2.1	Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco	5
3.2.1.1	Usinas Hidrelétricas	7
3.3	Eventos hidrológicos críticos	8
3.3.1	Tipos de secas	8
4	MATERIAL E MÉTODOS	10
4.1	Dados	10
4.1.1	Variáveis Associadas aos Episódios de Seca ou Cheia	10
4.2	Método de Nível Limiar (<i>Threshold Level - TL</i>)	11
4.2.1	Obtenção das variáveis duração, déficit (ou sùficit) e intensidade	12
4.3	Análise Estatística	13
4.3.1	Estatística Descritiva	13
4.3.2	Testes Estatísticos	13
4.3.2.1	Teste de Normalidade	14
4.3.2.2	Teste de Mann-Whitney	14
4.4	Fractais	15
4.4.1	Dimensão Fractal	17
4.5	Processos Fractais	17
4.5.1	Correlação de longo alcance em séries temporais	18
4.6	Lacunaridade	19
4.7	<i>Detrended Fluctuation Analysis - DFA</i>	20
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	22
5.1	Análise Estatística	22
5.1.1	Estação São Francisco - MG	22
5.1.2	Estação Juazeiro/BA	26
5.1.3	Estação Pão de Açúcar/ AL	31

5.1.4	Teste de Normalidade	36
5.1.5	Teste de Comparação de duas amostras	36
5.1.5.1	Estação Juazeiro/BA	36
5.1.5.2	Estação Pão de Açúcar	37
5.2	Lacunaridade	37
5.2.1	Estação São Francisco	38
5.2.2	Estação Juazeiro	39
5.2.3	Estação Pão de Açúcar	40
5.3	DFA	42
5.3.1	Séries das variáveis associadas a Seca para as três estações	42
5.3.2	Séries das variáveis associadas a cheia para as três estações, São Francisco, Juazeiro e Pão de Açúcar	46
6	CONCLUSÕES	50
	REFERÊNCIAS	52

1 Introdução

A maior parte do planeta é constituída por água e a distribuição dessas águas ocorre em diversas bacias hidrográficas. No Brasil uma das principais é a Bacia do Rio São Francisco cuja região hidrográfica abrange 521 municípios pertencentes a seis estados: Alagoas, Bahia, Goiás, Minas Gerais, Pernambuco e Sergipe, além do Distrito Federal. Esse Rio é de extrema importância para a população seja pelo fato de retirarem seu sustento ou pelo seu uso para geração de energia elétrica através das Usinas Hidrelétricas (U.H.'s) ¹.

A bacia hidrográfica do Rio São Francisco é de extrema importância, principalmente para região Nordeste do Brasil por ser uma das fontes principais de água doce dessa região. Como a maior parte da bacia encontra-se no Semiárido, com períodos críticos de estiagem, é importante aprofundar os estudos nessa área. Para o controle da vazão e também a produção de energia hidroelétrica tem-se cinco usinas ao longo da bacia, dentre elas estão a de Sobradinho e a de Xingó. Inicialmente considerou-se a de Sobradinho, observando os dados de três estações fluviométricas: São Francisco - MG, localizada a montante (acima) de Sobradinho, Juazeiro - BA, cerca de 40 km de proximidade e Pão de Açúcar - AL, a jusante (abaixo) da hidrelétrica, e depois fez-se também algumas comparações com a U.H de Xingó.

A partir dos dados de vazão diária (m^3/s), obtidos no site da Agência Nacional de Águas (ANA), coletados nas três estações já citadas, foram identificadas as variáveis associadas aos episódios de seca ou não. Porém, apesar de não ser de conhecimento de todos, existem várias definições de seca, que de certo modo podem ser definidas de acordo com quem as observa/"sofre". Existe a seca meteorológica, a agrícola, a hidrológica e a socioeconômica. O foco nesse estudo foi a seca hidrológica que está ligada com a redução dos níveis de água em reservatórios.

Para obter os dados de seca ou cheia considerou-se, de certo modo, o método do indicador padronizado (SI) que atribui valor -1 quando a vazão está abaixo de um limite, representando a seca ou déficit, e 1 para valores acima do limite, representando a cheia. Além disso, utilizou-se também o método de nível limiar (*Threshold Level - TL*) para determinar os limites, que se baseiam nos percentis da curva de duração do fluxo (MCKEE et al., 1993; LLOYD-HUGHES; SAUNDERS, 2002).

Os percentis mais utilizados para séries temporais diárias ou mensais estão entre 70 e 90, sendo o primeiro o que mais prevalece nos estudos, podendo ser fixos ou variáveis (LOON, 2015; RANGE-CROFT et al., 2016). Desta forma, inicialmente fez-se um estudo

¹ <http://www2.ana.gov.br/Paginas/portais/bacias/SaoFrancisco.aspx>. Acessado em: 03 de nov. de 2017.

descritivo e comparativo para os níveis de 70%, 80% e 90% fixos e variáveis.

Normalmente o que se encontra em outros estudos na região do Rio São Francisco são informações referentes a vazão, precipitação ou temperatura. Nesta tese, como já foi mencionado, tratou-se dos casos de seca hidrológica (volumes de água dos reservatórios abaixo de limites estabelecidos) ou cheia (volumes acima de limites estabelecidos) analisando as séries de duração, déficit (ou sùficit) e intensidade da seca ou da cheia e aplicou-se três técnicas: técnicas tradicionais de Estatística, Lacunaridade e *Detrended Fluctuation Analysis (DFA)*.

Esta tese está dividida em 7 capítulos. No primeiro tem-se a Introdução, capítulo este que irá direcionar o leitor sobre o tema e os métodos que foram trabalhados na tese. No capítulo 2 destaca-se os objetivos do trabalho.

No capítulo 3, tem-se a Revisão de Literatura em que são apresentadas algumas definições/idéias para o entendimento do que foi estudado. Como a importância da água, as principais bacias hidrográficas do Brasil, detalhamentos sobre a bacia hidrográfica do Rio São Francisco e as usinas hidrelétricas que estão localizadas no seu curso e também as definições dos tipos de seca.

No capítulo 4, denominado Material e Métodos, tem-se a definição e a forma como as variáveis estudadas foram obtidas, além de também os métodos que foram utilizadas nas análises.

No capítulo 5, denominado Resultados e Discussão, tem-se os principais resultados obtidos nas análises.

No capítulo 6 tem-se as conclusões em que são resumidos os principais resultados e conclusões obtidos. E por último, tem-se as referências que foram utilizadas como base para realização dessa tese.

Para a organização dos dados quanto aos níveis e situações (seca ou cheia) utilizou-se linguagem de programação em C e as análises foram realizadas no software R (R Core Team, 2018) através do ambiente de desenvolvimento integrado Rstudio.

2 Objetivos

2.1 Geral

Aplicar diferentes técnicas para estudar o impacto da construção de barragens e reservatórios nos episódios de seca na bacia do Rio São Francisco aplicando técnicas tradicionais de Estatística e métodos de análise de sistemas complexos.

2.2 Específicos

Especificamente, foram traçados os seguintes objetivos:

- Coletar informações para construção do banco de dados.
- Definir critérios para identificar episódios de seca/cheia e aplicar estes critérios para identificar as séries temporais das variáveis relacionadas aos episódios de seca/cheia.
- Fazer a análise descritiva das variáveis relacionadas aos episódios de seca considerando as séries completas, antes e depois da construção das barragens para os dados coletados nas estações São Francisco, Juazeiro e Pão de Açúcar, considerando diferentes níveis de limiar fixos e variáveis.
- Realizar testes de comparação de médias, e/ou similares, para identificar se há ou não diferença entre os episódios de seca antes e após a construção das barragens.
- Calcular lacunaridade para as três séries: completa, antes e depois da construção das barragens, observadas nas estações São Francisco, Juazeiro e Pão de Açúcar considerando o limiar fixo de 70%.
- Aplicar DFA para duração, déficit e intensidade da seca nas três estações considerando as séries completas, antes e depois da construção das barragens. E o mesmo para as variáveis associadas à cheia (duração, sùficit e intensidade).

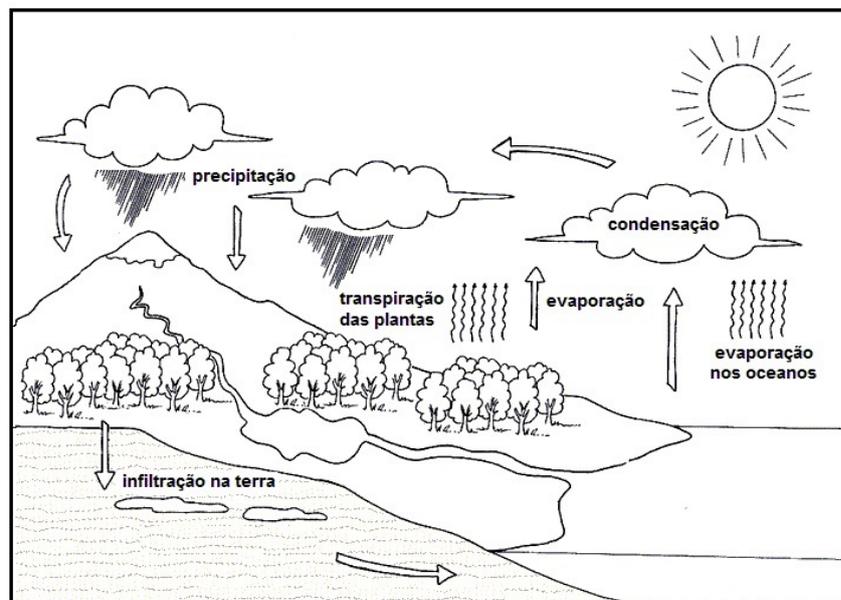
3 Revisão de Literatura

3.1 Ciclo da Água

A maior parte do planeta Terra, cerca de 70%, é constituída de água. Entretanto, apenas cerca de 2,5% desse volume é de água doce e o maior percentual está na forma de água subterrânea. A água está presente no ambiente em suas três formas, sólida (gelo, nos polos), gasosa (nuvens) e líquida (oceanos, rios e lagos) e todas as formas estão relacionadas em um sistema chamado de Ciclo da Água (AYOADE, 2001).

Esse ciclo é composto por constante evaporação e condensação. A água dos rios, lagos e oceanos evapora, pelo auxílio da energia solar, e juntamente com a transpiração dos seres vivos formam as nuvens. Em áreas frias, as nuvens passam pelo processo de condensação e voltam a ser líquidas, caindo na forma de chuva. Em áreas muito frias esse processo pode ser muito rápido, dando origem ao granizo ou até a neve. Além de rios e mares, a água pode infiltrar no solo e se acumular em lençóis subterrâneos. Esses reservatórios muitas vezes são consumidos pela absorção das raízes de plantas, fazendo com que a água retorne à atmosfera (BRASIL., 2018a). Na Figura 1 é possível observar uma ilustração deste ciclo.

Figura 1 – Ciclo da água.



FONTE: < suportegeografico77.blogspot.com.br >

A água é o componente de maior concentração na composição dos organismos vivos e tem, portanto, grande importância em diversas funções orgânicas, como o transporte de

nutrientes (glicose, lipídios, vitaminas e sais minerais), a regulação do equilíbrio térmico, etc. Ela tem ainda o papel de transportar e eliminar pela urina os produtos tóxicos resultantes do metabolismo energético. Além disso, a água tem se tornado bastante vulnerável devido aos usos, sendo cerca de 70% utilizado na agricultura, 22% para o consumo industrial, e 8% para o uso doméstico. As principais fontes de renovação de água são os rios que além de tudo são de extrema importância para o homem, pois todas as grandes civilizações do passado surgiram às margens dos rios.(BRASIL., 2018b).

3.2 Bacias hidrográficas do Brasil

Uma bacia hidrográfica é formada por um rio principal (as vezes dois ou três) e um conjunto de afluentes que deságuam no rio principal. Pode ser definida como uma área em que, devido ao relevo, a água da chuva e de diversas fontes (rios, ribeirões, córregos, etc) escorre para um determinado curso de água (geralmente um rio).

As principais bacias hidrográficas do Brasil são a Bacia Amazônica, a Bacia do Rio Araguaia-Tocantins, a Bacia do Rio Paraíba, a Bacia do Rio São Francisco, a Bacia do Rio Paraná, a Bacia do Rio Paraguai, a Bacia do Rio Paraíba do Sul e a Bacia do Rio Uruguai. O foco nesse estudo foram as Hidrelétricas de Sobradinho e Xingó que estão situadas na Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco (BRASIL., 2009).

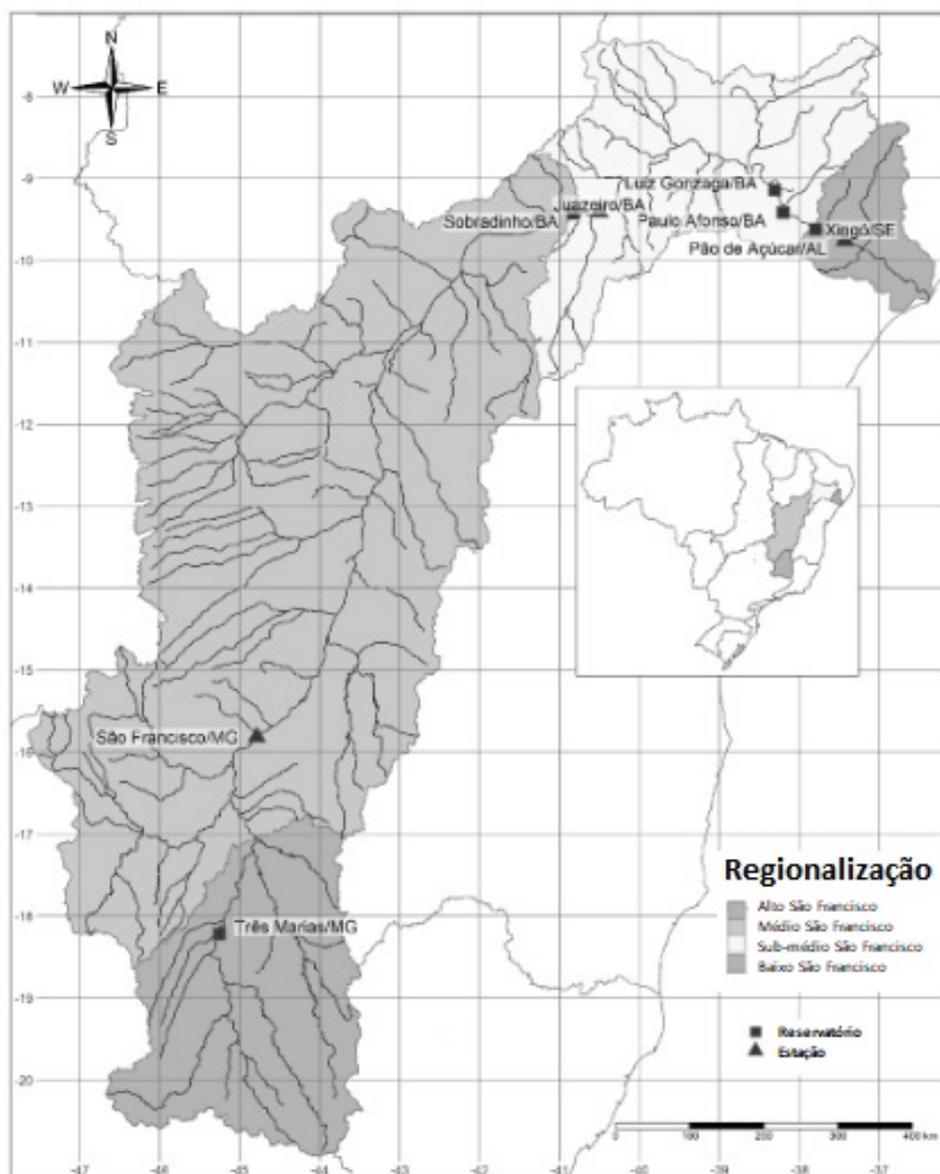
3.2.1 Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco

A bacia hidrográfica do Rio São Francisco é a principal fonte de água doce da região Nordeste do Brasil e além desta região estende-se pelas regiões Sudeste e Centro-Oeste estando presente nos estados da Bahia, Sergipe, Alagoas, Pernambuco, Goiás, Minas Gerais e Distrito Federal com uma área de drenagem de aproximadamente 640.000 Km^2 (SUAPESQUISA, 2018).

O principal e mais importante rio que forma a bacia é o São Francisco (popularmente conhecido como “velho Chico”) que percorre cerca de 2.700 Km, nasce na Serra da Canastra e deságua no Oceano Atlântico. Os principais afluentes são Rio Grande, Rio Corrente, Rio Paracatú, Rio Paraopeba, Rio Abaeté, Rio das Velhas e Rio Jequitaiá.

A bacia hidrográfica do Rio São Francisco é muito importante para a irrigação de terras em seu percurso e também para a navegação, pesca e geração de energia elétrica através de usinas hidrelétricas. A região hidrográfica divide-se em: Alto São Francisco (da nascente até a cidade de Pirapora - MG), médio São Francisco (de Pirapora até Remanso - BA), sub-médio São Francisco (de Remanso até Paulo Afonso - BA) e Baixo São Francisco (de Paulo Afonso até a foz)(BRASIL DAS ÁGUAS, 2018). Na Figura 2 é possível visualizar essas regiões e a extensão da bacia.

Figura 2 – Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco.



FONTE: Agência Nacional de Águas (ANA)

Boa parte do território da bacia está localizada no Semiárido, com períodos críticos de estiagem. Além disso, estão presentes três Biomas: a Caatinga, nas áreas de clima árido e semiárido, como o nordeste da Bahia, Pernambuco e oeste de Alagoas; o Cerrado, entre o sudoeste da Bahia e o norte de Minas Gerais e a Mata Atlântica, predominante nas áreas de maior umidade no solo, localiza-se no Alto São Francisco, principalmente nas cabeceiras. Para a produção de energia hidroelétrica e também o controle da vazão, estão presentes as Usinas Hidrelétricas de Paulo Afonso, a de Três Marias, a de Itaparica, a de Xingó e a de Sobradinho (CBHSF, 2018).

3.2.1.1 Usinas Hidrelétricas

As Usinas Hidrelétricas (UHE's) são as principais fontes de energia no Brasil e de um modo geral têm por finalidade produzir energia elétrica a partir do aproveitamento do potencial hidráulico de um rio. De um modo geral, a correnteza dos rios movimentada uma turbina que por sua vez movimentada um gerador o qual irá gerar a energia elétrica.

A barragem de Sobradinho, por exemplo, foi construída inicialmente com o objetivo de regularizar as cheias, mas devido a situação energética do país acabou sendo incorporada à matriz de geração de energia elétrica (SIGAUD, 1986; LETURCQ, 2018; CHESF, 2016).

A primeira unidade geradora da Usina Hidrelétrica (UHE) de Sobradinho entrou em operação no ano de 1979 e está localizada entre os municípios de Sobradinho e Casa Nova no estado da Bahia a uma latitude de -9,4311 e longitude -40,8422 e é administrada pela Companhia Hidrelétrica do São Francisco - CHESF. O reservatório possui uma área de 4214 km², altura 41 m e potência instalada entre 1000 a 3000 MW (CRUZ, 2008). Na Figura 3 observa-se a Usina de Sobradinho e a sua localização geográfica.

Figura 3 – Usina Hidrelétrica de Sobradinho



FONTE: Companhia Hidrelétrica do São Francisco (CHESF).

A construção da hidrelétrica trouxe alguns impactos como a inundação de mais de 1000 Km² nos municípios de Juazeiro, Santo Sé e Xique-Xique na margem direita do rio; e Casa Nova, Remanso e Pilão Arcado, na margem esquerda (CRUZ, 2008).

Uma Usina Hidrelétrica que também fez parte das análises foi a de Xingó a qual entrou em operação em 1994 e está localizada entre os estados de Alagoas e Sergipe em uma região turística e destina-se tanto ao desenvolvimento de projetos de irrigação quanto ao abastecimento d'água para a cidade de Canindé/SE, e também é administrada pela Companhia Hidrelétrica do São Francisco - CHESF. O reservatório possui uma área de 60 Km², podendo atingir um volume de 3.800 x 10⁶ m³. Na Figura 4 observa-se a Usina de Xingó a sua localização (CHESF, 2016).

Figura 4 – Usina Hidrelétrica de Xingó



FONTE: Companhia Hidrelétrica do São Francisco (CHESF).

3.3 Eventos hidrológicos críticos

Estudos relacionados à água, rios, etc também têm ligação com eventos hidrológicos críticos, que de certa forma, são os extremos de seca e inundações. Esses eventos podem ser de origem natural ou pelo uso inadequado dos recursos naturais.

3.3.1 Tipos de secas

De um modo geral, a seca é um desastre natural que consiste na redução e/ou escasses da demanda de água. Mas, sua definição pode mudar, de certo modo, de acordo com quem as “sofre”. Pode-se dizer que existem pelo menos quatro definições para seca: seca meteorológica, seca agrícola, seca hidrológica e seca socioeconômica (WILHITE; GLANTZ, 1985).

A Seca Meteorológica pode ser definida como falta de água induzida pelo desequilíbrio entre a precipitação e a evaporação, a qual depende de outros elementos como a velocidade do vento, insolação, temperatura e umidade do ar. Essa definição dependente da região. A Seca Agrícola está relacionada com as características das culturas, da vegetação natural, dos sistemas agrícolas em geral. A Seca Hidrológica está relacionada com a redução dos níveis médios de água nos reservatórios e com a absorção de água no solo. E a Seca Socioeconômica está associada ao efeito conjunto dos impactos naturais e sociais que resultam da falta de água, devido ao desequilíbrio entre o fornecimento e a procura dos recursos de água e que vai afetar diretamente as populações (WILHITE; GLANTZ, 1985; SANTOS, 1998).

Nesta tese, considerou-se a seca hidrológica, por estar analisando-se dados referentes a construção da barragem. Existem diversos estudos sobre seca, cada um deles abrangendo um tipo específico ou mais de um tipo. Boa parte desses estudos foram publicados em revista da área meteorológica e as abordagens metodológicas mais utilizadas para identificar e/ou estudar os episódios de seca foram: distribuição de frequências, o método de *Threshold Level - TL* e o do indicador padronizado (*Standardised Indicator - SI*) (DUARTE et al.,

2018; LLOYD-HUGHES; SAUNDERS, 2002; YAHIAOUI et al., 2009; LOON, 2015).

Dentre os estudos sobre o tema, não foram encontradas aplicações na região da Bacia do Rio São Francisco, que é a área em estudo nesse trabalho. As publicações referentes a essa região, como em BARRETO (2016), utilizam abordagens voltadas para vazão e/ou precipitação no Rio e não às variáveis associadas aos episódios de seca (duração, déficit e intensidade) que foi o foco principal desta tese.

4 Material e Métodos

4.1 Dados

Os dados coletados inicialmente foram referentes a vazão diária (m^3/s) do Rio São Francisco com informações obtidas no site da Agência Nacional de Águas (ANA) (<http://hidroweb.ana.gov.br>, acessado em junho de 2017) de três estações, sendo estas: São Francisco - MG, Juazeiro - BA e Pão de Açúcar - AL, distantes cerca de 300 Km a montante, 40 Km a jusante e 500 Km a jusante, respectivamente, da Hidrelétrica de Sobradinho. E a partir desses dados, foram obtidas as variáveis associadas aos episódios de seca ou não.

Para a Estação São Francisco foram obtidas informações do ano 1934 à 2016, na segunda estação de 1928 à 2016 e na terceira de 1931 à 2016, como nas três estações as informações eram diárias, nos casos em que houve informações faltantes sobre a vazão, optou-se pela exclusão dos dados. Na tabela 1 é possível observar as características das estações fluviométricas em estudo.

Tabela 1 – Características das Estações Fluviométricas estudadas.

Características	São Francisco - MG	Juazeiro - BA	Pão de Açúcar - AL
Código da Estação	44200000	48020000	49370000
Latitude	-15,94°	-9,41°	-9,76°
Longitude	-44,88°	-40,5°	-37,45°
Altitude (m)	448	357,74	8,1
Área de drenagem (Km^2)	184000	516000	615000
Período	1934-2016	1928-2016	1931-2016

FONTE: Agência Nacional de Águas (ANA).

4.1.1 Variáveis Associadas aos Episódios de Seca ou Cheia

Para cada uma das estações obteve-se os dados referentes aos períodos de seca ou não, essas informações, de certa forma, foram obtidas a partir do método do indicador padronizado (SI) que, de um modo geral, cria uma nova coluna atribuindo valor -1 quando a vazão está abaixo do limite pré-determinado, representando condições de seca ou déficit, e 1 para valores acima do limite, representando condições de cheia e observa-se nas demais colunas as informações de duração e déficit ou sùficit. Para estabelecer os limites utilizou-se o método de nível de limiar (*Threshold level*) (MCKEE et al., 1993; LLOYD-HUGHES; SAUNDERS, 2002).

Estudou-se, portanto, as características da seca através da frequência de eventos de seca, duração, volume do déficit e intensidade registradas nas três estações considerando diferentes limiares e ainda comparando informações de antes (até 1979) e depois (a partir de 1980) do funcionamento da barragem de Sobradinho e em alguns casos, considerou-se ainda as informações após a construção da Barragem de Xingó (a partir de 1994).

Para a identificação dos limiares e situações (seca ou cheia) utilizou-se programação em C e as análises foram realizadas através do software R, versão 3.4, no ambiente de desenvolvimento integrado Rstudio versão 1.0.143 (R Core Team, 2018).

4.2 Método de Nível Limiar (*Threshold Level - TL*)

O limiar (ou valor crítico) é um valor limite a partir do qual considera-se estar em situação de seca. De um modo geral, o valor do limiar é definido de acordo com a utilização da água, sendo uma escolha um pouco subjetiva, pois um nível definido para a agricultura, por exemplo, pode não ser um bom nível para produção hidroelétrica e vice-versa (SANTOS, 1998).

As séries associadas ao uso de água, como: vazão, precipitação, etc, geralmente são não estacionárias e para definir os limiares é comum utilizar estatísticas da série como: médias, medianas ou percentis. O mais comum é que os limiares sejam baseados nos percentis da curva de duração do fluxo (*Flow duration curve - FDC*) e os mais recomendados para séries temporais diárias ou mensais estão entre o percentil 70 e o percentil 90. O percentil 70, por exemplo, é o valor igual ou excedido por 70% do tempo (SANTOS, 1998; LOON, 2015; RANGE CROFT et al., 2016).

De acordo com Yahiaoui et al. (2009), a FDC traça a frequência acumulada empírica do fluxo corrente como uma função da porcentagem do tempo em que o fluxo é igual ou excede. A curva é construída com os dados ordenados e, para cada valor, a frequência de excesso é calculada usando uma fórmula de posição de plotagem de probabilidade.

Para Yevjevich (1967), ao utilizar o método TL pode-se definir a seca como períodos de duração em que a vazão está abaixo do limiar. Esse limiar poderia ser definido como a demanda de água que em alguns estudos é citada como sendo variável, o que foi simplificado por Yevjevich (1983) quando aplicou uma demanda constante para definir o conceito de seca. Para encontrar os limiares variáveis verifica-se, por exemplo, as informações referentes ao dia 01 de janeiro para todos os anos de estudo e as informações de 15 dias antes e 15 dias depois dessa data e em seguida ordena-se os dados e verifica-se o percentil de interesse (limiar de 70%, por exemplo) e então os dias 01 de janeiro de todos os anos terão o mesmo limiar e o mesmo processo é repetido para todas as datas até que se tenham todos os valores de limiares (YAHIAOUI et al., 2009; SANTOS, 1998; SAWATPRU; KONYAI, 2016).

4.2.1 Obtenção das variáveis duração, déficit (ou sùficit) e intensidade

A duração da seca é definida como o intervalo de tempo entre o início e o fim da seca. De acordo com Santos (1998), para determinação de início e fim da seca existem algumas propostas cujo objetivo é verificar a ocorrência de déficits que podem não ser considerados seca e também a interrupção de uma seca sem que ela tenha realmente acabado. Analogamente, a duração da cheia está associada ao início e o fim da cheia. Ou seja, o tempo medido entre o início (t_0) e o fim (t_f) de cada episódio de seca representa a duração da seca (d_S):

$$d_S = t_f - t_0 + 1 \quad (4.1)$$

e o mesmo se aplica para a duração da cheia (d_C), com a diferença que a cheia está associada as quantidades que estão acima do limiar.

Para determinação do volume do déficit (V_d) considera-se a soma das diferenças entre os limiares de seca (L) e os valores da variável (X):

$$V_d = \sum_{t=t_0}^{t_f} [L(t) - X(t)] \quad (4.2)$$

e para o caso de cheia denomina-se sùficit ou volume do sùficit (V_s).

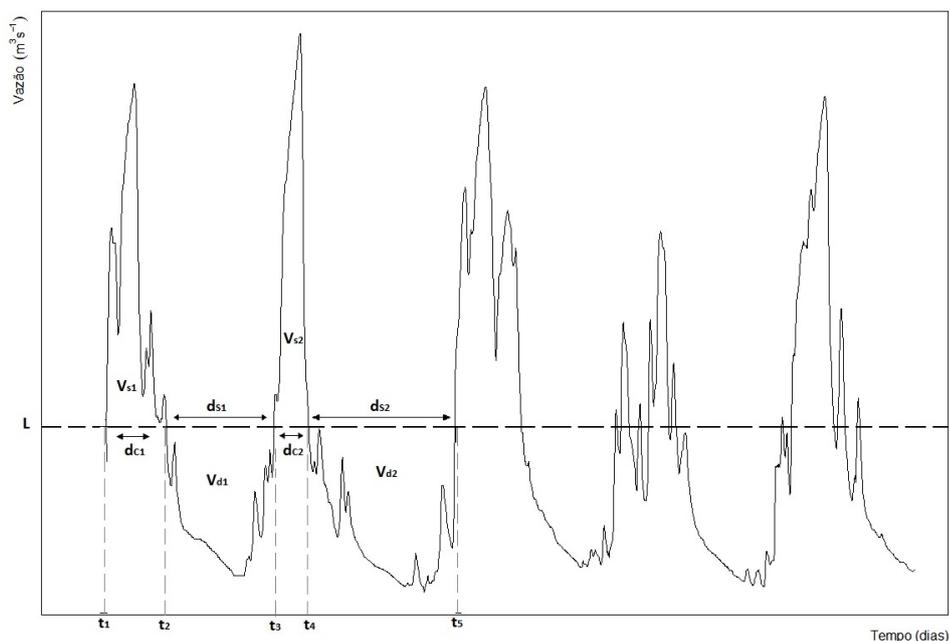
Já a intensidade (I) é representada pela razão entre o déficit (ou sùficit) e a duração:

$$I = V_d/d_S \quad (4.3)$$

e fornece uma característica relativa.

Na Figura 5 tem-se uma ilustração das possíveis formas de derivar as características da seca e/ou da cheia, as áreas abaixo da linha tracejada (limiar - L) caracterizam os episódios de seca em que pode-se obter as principais variáveis associadas a seca, como: início da seca, duração da seca (d_{S1}, d_{S2} , etc), o volume do déficit (V_{d1}, V_{d2} , etc) e a intensidade da seca (razão entre déficit e duração). Conseqüentemente, as quantidades que ficam acima da linha tracejada caracterizam os episódios de cheia em que pode-se obter características semelhantes as de seca.

Figura 5 – Possíveis formas de derivar as características da seca e/ou da cheia.



4.3 Análise Estatística

Após as definições dos limiares a serem utilizados nas comparações fez-se uma análise estatística das variáveis relacionadas aos episódios de seca (utilizou-se apenas a duração e a intensidade da seca) e esta baseou-se na Estatística Descritiva e na realização de testes de comparação para verificar o comportamento dos dados antes e após a construção da hidrelétrica de Sobradinho.

4.3.1 Estatística Descritiva

As análises basearam-se nos cálculos das principais medidas descritivas (média, mediana, desvio-padrão, variância, coeficiente de variação, assimetria, curtose, mínimo e máximo) para duração da seca (dias) e intensidade ($m^3 \cdot s^{-1}/dia$) - razão entre a duração e o déficit - para cada uma das estações (São Francisco - MG, Juazeiro - BA e Pão de Açúcar - AL) considerando os limiares fixos e variáveis.

Definições e ideias detalhadas dos cálculos das principais medidas descritiva são apresentadas por diversos autores (LARSON; FARBER, 2007; MILONE, 2004; MORETTIN; BUSSAB, 2000; SPIEGEL et al., 2016).

4.3.2 Testes Estatísticos

O objetivo dos testes estatísticos ou testes de hipóteses é fornecer ferramentas que permitam validar ou refutar uma hipótese estatística através dos resultados da amostra. De modo geral, baseiam-se em “confrontar” duas hipóteses.

A hipótese estatística é uma afirmação ou conjuntura a respeito da natureza da população ou uma suposição quanto ao valor de um parâmetro populacional. Nos problemas de teste de hipótese duas hipóteses são discutidas: a primeira, a hipótese a ser testada, é chamada de hipótese nula, denotada geralmente por H_0 e a segunda é chamada de hipótese alternativa, denotada por H_1 .

Diz-se então que está se testando H_0 “contra” H_1 ou H_0 “versus” H_1 . O pensamento é que se a hipótese nula é falsa, então a hipótese alternativa é verdadeira e vice-versa (MAGALHÃES; LIMA, 2005; MORETTIN, 2010).

Os testes aplicados aqui foram o de normalidade, mais especificamente o de Shapiro-Wilk (SHAPIRO; WILK, 1965), e o teste de Mann-Whitney (MANN; WHITNEY, 1947) de comparação de medianas para amostras independentes.

4.3.2.1 Teste de Normalidade

Existem vários testes para verificar a normalidade dos dados, entre eles os testes de Kolmogorov-Smirnov (KS), Lilliefors, Jarque-Bera, Shapiro-Wilk, entre outros. Por se tratar de um teste mais robusto, optou-se por aplicar o teste de Shapiro-Wilk.

Este teste foi proposto por Shapiro e Wilk (1965) e, assim como os demais, testa se a distribuição de probabilidade associada a um conjunto de dados pode ser aproximada pela distribuição normal. A Estatística do teste é a seguinte

$$W = \frac{(\sum_{i=1}^n a_i y_{(i)})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (4.4)$$

em que as constantes a_1, a_2, \dots, a_n são calculadas como a solução de

$$(a_1, a_2, \dots, a_n) = \frac{m^T V^{-1}}{(m^T V^{-1} m)^{1/2}}, \quad (4.5)$$

em que $m = (m_1, m_2, \dots, m_n)^T$ é o vetor dos valores esperados das estatísticas de ordem da amostra e V é a matriz de covariâncias dessas estatísticas. O p-valor do teste é então calculado e comparado com o nível de significância estabelecido, que aqui foi adotado de 5%. Então, caso o p-valor seja menor que o nível de significância estabelecido rejeita-se H_0 .

4.3.2.2 Teste de Mann-Whitney

O teste de Mann-Whitney (MANN; WHITNEY, 1947) ou teste U de Mann-Whitney ou ainda teste da soma dos postos de Wilcoxon é um teste não paramétrico, usado como alternativa ao teste t-student, e aplicado para duas amostras independentes e é semelhante ao teste de Wilcoxon para dados pareados.

Para a realização do teste são necessários dois grupos (controle e tratamento), ou duas populações independentes e na construção das hipóteses supõe-se, por exemplo, que

os grupos são equivalentes (H_0) contra o grupo Y apresenta valores menores que o grupo X (H_1), caso que deseja-se testar aqui. Como trata-se de um teste alternativo ao teste t , ele não compara exatamente as médias, mas sim as medianas (Md). Ou seja, aqui especificamente tem-se o interesse de verificar se $H_0 : Md(X) = Md(Y) \times H_1 : Md(Y) < Md(X)$.

A estatística do teste é construída a partir da ordenação dos dados que são numerados de 1 a N (número de total de observações) e são verificados os postos (S_i) associados ao grupo tratamento (Y), ou seja, $T = W_S = \sum_{i=1} S_i$ e a estatística de Mann-Whitney é

$$W_{XY} = W_S - \frac{1}{2}n(n+1), \quad (4.6)$$

em que n é o número de elementos do grupo tratamento (Y). Essa estatística W_{XY} é denominada algumas vezes por U , ou seja, estatística U de Mann-Whitney.

A regra de decisão dependerá das hipóteses que estão sendo testadas. Desta forma, aqui rejeitou-se H_0 se $W_{XY} \leq W_\alpha$, em que W_α é um valor encontrado em uma tabela pré-definida. Entretanto, essa decisão também poderá ser tomada com base no p – valor utilizando-se a mesma regra utilizada para o teste de normalidade.

4.4 Fractais

As formas mais conhecidas como círculos, pontos, retas, quadrados, cubos e esferas são descritas pela geometria euclidiana. Entretanto, na natureza há um predomínio de formas não-uniformes, não-suaves e com muitos padrões irregulares e fragmentados (MANDELBROT et al., 1991).

Para explicar os fenômenos e formas da natureza seria necessário, portanto, uma teoria especial que após alguns estudos foi denominada de geometria fractal. O termo fractal foi introduzido por Mandelbrot (1983) para identificar uma família de formas que apresenta padrões irregulares e fragmentados.

De um modo geral, os fractais são caracterizados por terem detalhes infinitos, comprimento infinito, autossimilaridade, ausência de suavidade ou derivadas e irregularidades em todas as escalas. Sendo a característica principal a autossimilaridade, ou seja, quando um objeto é dividido em partes menores, estas (pelo menos aproximadamente) são cópias de tamanho reduzido da imagem original (MANDELBROT, 1983).

O primeiro fractal foi descoberto por Weierstrass (1861) e tratava-se de uma função contínua que não era diferenciável em nenhum ponto, ou seja, uma curva constituída só por “cantos”. E outros fractais pioneiros foram descobertos por G. Cantor (Figura 6), W. Sierpinski (Figura 7), H. Von Koch (Figura 8) e outros.

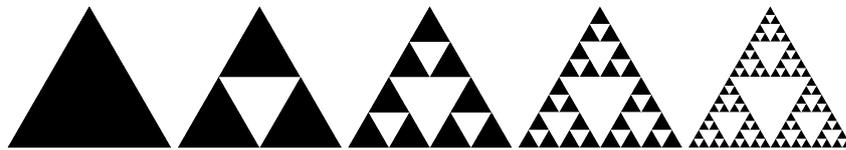
Figura 6 – Conjunto de Cantor



FONTE: Imagem retirada da internet. Disponível em:

< <https://fractalescio.wordpress.com/2014/11/14/conjunto-de-cantor/> >

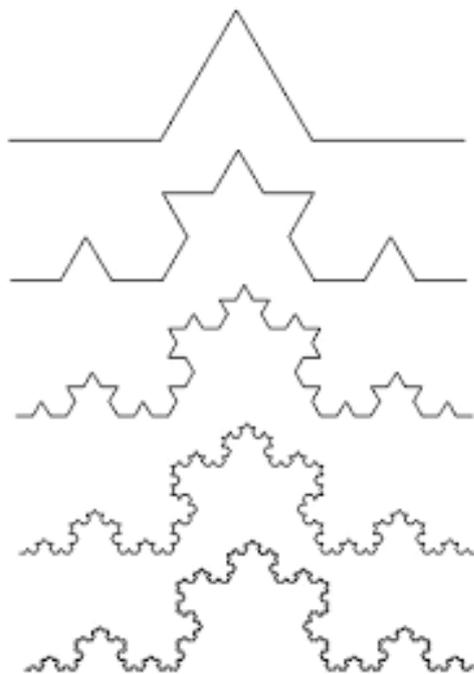
Figura 7 – Triângulo de Sierpinski



FONTE: Imagem retirada da internet. Disponível em:

< http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/6/64/Sierpinsky_triangle%28evolution%29.png >

Figura 8 – Curva de Koch



FONTE: Imagem retirada da internet. Disponível em:

< <https://teoriadacomplexidade.wordpress.com/teoria-fractal/> >

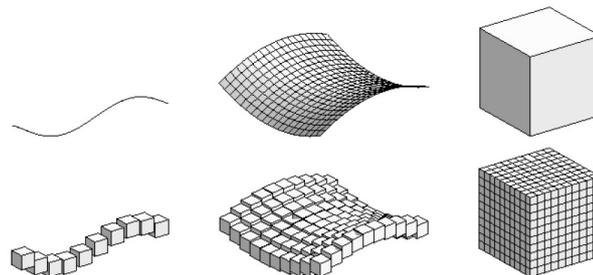
Os fractais podem ser encontrados em diversas áreas como: Biologia, Geologia, Música, Economia, Comunicações, Informática, Robótica, Hidrologia (MANDELBROT, 1983).

4.4.1 Dimensão Fractal

Como os fractais são figuras geométricas que “fogem” das classificações clássicas elas não podem ser medidas apenas por dimensão topológica (relacionada a noção de proximidade entre os pontos de um conjunto). Surge então a dimensão fractal como uma alternativa de medição e esta pode assumir valores fracionários. De um modo geral, pode-se dizer que a dimensão fractal de um conjunto é um valor que diz o quão densamente um conjunto ocupa o espaço métrico em que ele existe (KLEINKE; GEBARA, 2012).

Um dos métodos mais utilizados para calcular a dimensão fractal é a contagem de caixas (“Box-counting” ou “box dimension”) que consiste em cobrir o fractal de quadrados, ou caixas, e calcular o número de quadrados “preenchidos” pelo fractal. Kleinke e Gebara (2012) sugerem o esquema da Figura 9 para explicar como funciona a transformação do fractal em “caixas”.

Figura 9 – Esquema da transformação do fractal em “caixas”



O número de caixas necessárias para cobrir toda a figura é representado por $N(r)$, sendo r a escala, ou seja, número de vezes que o lado da imagem será dividido. E a dimensão fractal será o coeficiente angular do diagrama $\log(N(r))/\log(1/r)$.

4.5 Processos Fractais

Quando se tem situações em que há mais de uma escala do tempo a definição do termo fractal também pode ser estendida, neste caso, tratam-se dos processos fractais. Estes processos geram flutuações irregulares, mas em múltiplas escalas do tempo e do mesmo modo que os objetos fractais, possuem autossimilaridade estatística. Um exemplo de processo fractal é a frequência cardíaca dos indivíduos (PENG et al., 1993; KOBAYASHI; MUSHI, 1982), pode-se identificar, também, a variação da pressão arterial (MARSH et al., 1990), a contagem das células brancas do sangue (GOLDBERGER et al., 1986), flutuações na respiração (SZETO et al., 1992), dentre outros como sendo processos fractais.

Diferentemente do caso dos fractais geométricos, que são representados em um espaço bidimensional, mas os eixos representam variáveis do mesmo tipo, a série temporal também tem representação gráfica bidimensional, porém há um tipo de variável em cada eixo, no horizontal tem-se o tempo e no eixo vertical tem-se a variável que depende do tempo. Desta forma, há uma maior complexidade na detecção e quantificação da autossimilaridade nas séries temporais.

De acordo com NASCIMENTO et al. (2008), essa complexidade ocorre, por exemplo, na hora de detectar a autossimilaridade, pois nos fractais geométricos extrai-se um pedaço, aumenta-se até o tamanho do objeto original usando o mesmo fator de magnificação para comprimento e largura e comparam-se as propriedades do pedaço aumentado com o objeto original, já para as séries temporais, é preciso ter dois fatores de magnificação (um para cada tipo de variável) para poder comparar o subconjunto da série com a completa.

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

$$y(t) = a^\alpha y\left(\frac{t}{a}\right) \quad (4.7)$$

Essa igualdade surge após mudanças de escalas para t e $y(t)$ usando os fatores diferentes: $(t \rightarrow \frac{t}{a})$ e $y(t) \rightarrow a^\alpha y(t)$. O expoente α é o parâmetro de autossimilaridade.

Quando $\alpha > 0$ as flutuações dentro de um subconjunto da série aumentam com o tamanho do intervalo pela lei de potência. Flutuações em intervalos grandes são maiores que as de intervalos pequenos (série não limitada) entretanto, em algumas séries temporais as amplitudes não aumentam arbitrariamente com o aumento do comprimento da série (são limitadas). Isso dificulta a aplicação de (4.7), pois pode haver um mesmo valor de autossimilaridade para uma série que possui autossimilaridade e uma série que não possui.

4.5.1 Correlação de longo alcance em séries temporais

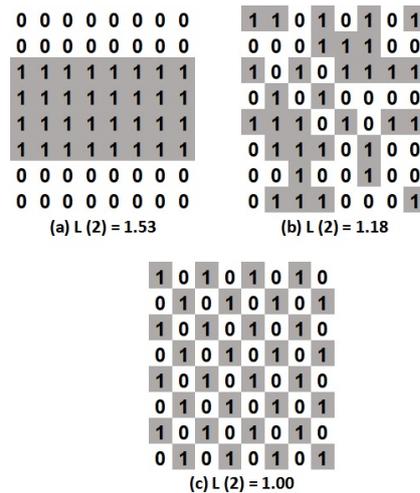
Uma série temporal pode ser não correlacionada ou possuir correlações de curto alcance ou de longo alcance.

Existem vários métodos de estimação de parâmetros para detectar a presença de correlação de longo alcance em uma série temporal. Entre eles estão: a função de autocorrelação (GUERRERO; SMITH, 2005), a variância agregada (TAQQU et al., 1995), o espectro de potência, a análise de Hurst (MANDELROT, 1983), a análise das flutuações sem tendências (*Detrended Fluctuation Analysis - DFA*) (PENG et al., 1994), dentre outros.

4.6 Lacunaridade

Só a dimensão fractal não é suficiente para caracterizar um objeto fractal, pois podem existir objetos com diferentes texturas, mas que apresentem a mesma dimensão fractal, como é mostrado na Figura 10.

Figura 10 – Exemplos de lacunaridades para três mapas 8×8 com mesma dimensão fractal $D = \frac{\log(32)}{\log(8)} = 1,667$.



FONTE: Adaptado de Allain e Cloitre (1991).

Mandelbrot (1983) introduziu, portanto, o conceito de lacunaridade para analisar a distribuição do tamanho de lacunas (“vazio”) dentro de um sistema físico e foi aplicado em estudos de objetos fractais. Pode-se usar lacunaridade para dados quantitativos, dados binários e em dimensões 1D, 2D e 3D (PLOTNICK et al., 1996).

Valores grandes de lacunaridade implicam em grandes tamanhos de lacunas e uma maior heterogeneidade, enquanto que pequenos valores implicam em menores tamanhos de lacunas, o que sugere uma distribuição mais uniforme (MARTÍNEZ et al., 2007).

A análise de lacunaridade mostrou-se eficaz em estudos de séries temporais e dados espaciais e foi utilizada em fisiologia (DOUGHERTY; HENEERY, 2001), ecologia (MALHI; ROMÁN-CUESTA, 2008), porosidade do solo (LUO; LIN, 2009), hidrologia (MARTÍNEZ et al., 2007), processamento de imagem (FLORINDO; BRUNO, 2012), fenômenos agroambientais (LUCENA et al., 2016), dentre outros.

Existem vários métodos que vêm sendo utilizados para calcular a lacunaridade, entre eles o mais utilizado e o mais simples computacionalmente é o método de deslizamento de caixas (“gliding box”) desenvolvido por Allain e Cloitre (1991).

O procedimento para calcular a lacunaridade em dados quantitativos unidimensionais consiste em:

1. Uma caixa de tamanho r é colocada na origem dos dados e o número s de sítios

ocupados (com valores acima do limiar escolhido) é contado.

2. A caixa é movida ao longo de todo o conjunto de observações e sua massa (número de sítios ocupados) é calculada.
3. A distribuição de probabilidade de massa da caixa é dada por: $P(s, r) = \frac{n(s, r)}{N(r)}$. Em que $n(s, r)$ é o número de caixas de tamanho r com massa s e $N(r) = N - r + 1$ é o número total de caixas de tamanho r (N é o número total de observações).
4. A lacunaridade para o tamanho de caixa r é definida por: $L(r) = M_2/(M_1)^2$ em que $M_1 = \sum s \times P(s, r)$ é o primeiro momento e $M_2 = \sum s^2 \times P(s, r)$ é o segundo momento.

A lacunaridade pode diminuir com o tamanho da caixa como uma lei de potência $L(r) = \alpha.r^\beta$ em que $\beta < 0$ pode ser calculado como o coeficiente angular da reta $\text{Log}(L(r)) \times \text{Log}(r)$ (MARTÍNEZ et al., 2007). O expoente de escala de lacunaridade é um índice que quantifica a sensibilidade da lacunaridade às mudanças de escala. Ou seja, grandes valores indicam uma rápida diminuição da lacunaridade à medida que a escala é aumentada. Em contrapartida, a lacunaridade não depende da escala como lei de potência.

4.7 Detrended Fluctuation Analysis - DFA

Peng et al. (1992) introduziram o método *Detrended Fluctuation Analysis* (Análise de Flutuação Sem Tendência) para quantificar as correlações entre séries temporais não estacionárias, ou seja, que flutuam em torno de uma média durante um tempo e posteriormente oscilam em torno de outro nível.

Segundo Matsoukas et al. (2000), o DFA apresenta algumas vantagens em comparação com métodos mais convencionais. Permite, por exemplo, a detecção de correlações de longo alcance embutidas em uma série de tempo aparentemente não estacionária e também evita os resultados incorretos possivelmente causados por não estacionariedade.

Esta técnica vem sendo usada no estudo de flutuações de várias séries da natureza, como temperatura (KOSCIELNY-BUNDE et al., 1996), sequências de DNA altamente heterogêneas (PENG et al., 1994), séries temporais de batimentos cardíacos (PENG et al., 1995), dentre outros.

O procedimento para cálculo do DFA é dado por:

1. Integrar a série temporal original $x(i), i = 1, \dots, N$, resultando em:

$$X(k) = \sum_{i=1}^k [x(i) - \langle x \rangle], k = 1, \dots, N \quad (4.8)$$

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

2. A série integrada $X(k)$ é dividida em $N_n = \text{int}(N/n)$ intervalos (segmentos) não sobrepostos de tamanho n e em cada segmento $s = 1, \dots, N_s$ representa a tendência local $X_{n,s}(k)$ (é feita com ajuste linear - DFA 1 ou polinomial - DFA 2, DFA 3, etc) que é estimada e subtraída da série $X(k)$.
3. Calcula-se a variância sem tendência:

$$F_{DFA}^2 = \frac{1}{nN_n} \sum_{s=1}^{N_n} \sum_{k=(s-1)n+1}^{sn} [X(k) - X_{n,s}(k)]^2 \quad (4.9)$$

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

$$F_{DFA} \sim n^\alpha \quad (4.10)$$

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

Uma dinâmica persistente indica que grandes/pequenos valores da série têm maior probabilidade de continuar grandes/pequenos e na dinâmica anti-persistente indica que grandes valores têm maior probabilidade de ser seguidos por pequenos valores e vice-versa.

5 Resultados e Discussão

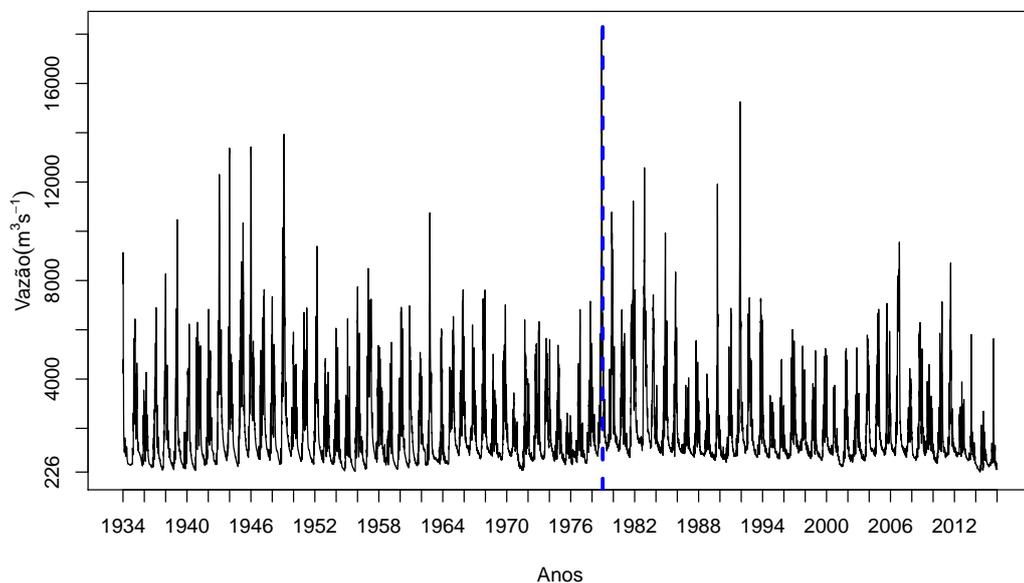
5.1 Análise Estatística

Para verificar as características das variáveis relacionadas aos episódios de seca (duração e intensidade) fez-se inicialmente uma análise descritiva com o cálculo das principais medidas de posição e de dispersão. Em seguida realizou-se testes de normalidade para identificar o tipo de teste (paramétrico ou não-paramétrico) que seria utilizado para comparar as informações de antes e depois da construção das barragens. As análises descritivas foram feitas inicialmente considerando as séries completas para as três estações São Francisco - MG, Juazeiro - BA e Pão de Açúcar - AL e para cada uma das estações comparou-se os limiares fixos e variáveis de 70%, 80% e 90% para a duração (em dias) e intensidade ($m^3 \cdot s^{-1} / \text{dia}$) da seca.

5.1.1 Estação São Francisco - MG

Na Figura 11 tem-se a série de vazão diária na estação São Francisco, através da qual é possível observar que aparentemente as séries apresentam comportamento estável e oscilação semelhante antes e após a construção da barragem, indicando que não haverá influência do reservatório de Sobradinho.

Figura 11 – Série temporal da vazão ($m^3 \cdot s^{-1}$) na estação São Francisco. A linha tracejada vertical azul representa o início do funcionamento da barragem de Sobradinho.



Calculando-se as principais medidas descritivas para a duração (dias) da seca na Estação São Francisco de 1934 à 2016, considerando os limiares de 70%, 80% e 90% fixos e variáveis observou-se que, entre os limiares fixos, a duração média e o desvio-padrão dos dias de seca foram diminuindo até o limiar de 80% e no limiar de 90% houve um sensível aumento. Em relação aos limiares variáveis essas duas estatísticas foram diminuindo com o aumento dos limiares, ou seja, quanto maior o limiar considerado, menor o período de seca.

Além disso, é possível verificar que tanto para os casos fixos quanto para os variáveis há um indício de que a distribuição da duração da seca é assimétrica positiva, pois apresentam valores positivos de assimetria e as médias são maiores que as medianas e ainda verificou-se que as distribuições nos dois casos são mais achatadas que a curva da distribuição normal, ou seja, a distribuição é platicúrtica, devido aos valores de curtose apresentados.

Em relação a intensidade (razão entre déficit e duração) observa-se que ao comparar os limiares fixos a média foi diminuindo a medida que o limiar aumentava e o desvio-padrão diminuiu a medida que se aumentava os limiares. Em relação aos limiares variáveis, tanto a média quanto o desvio-padrão diminuíram a medida que os limiares aumentavam. E ao se tratar das características da distribuição tem-se situação semelhante a duração da seca, ou seja, em ambos os cenários a distribuição é assimétrica positiva.

Todas essas informações são apresentadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Medidas Descritivas da duração (dias) e da intensidade ($m^3.s^{-1}/dia$) da seca para estação São Francisco - MG de 1934 à 2016, considerando os limiares de 70%, 80% e 90% fixos e variáveis.

		Limiares					
		Fixos			Variáveis		
		70%	80%	90%	70%	80%	90%
Duração (dias)	Média	27,57	26,58	30,38	19,23	16,91	14,12
	Mediana	7,00	7,00	7,00	8,00	7,00	6,00
	D. P.	46,48	45,18	47,15	36,87	32,43	27,91
	Variância	2160,28	2041,54	2222,72	1359,32	1051,67	779,00
	C.V. (%)	168,59	169,99	155,18	191,73	191,78	197,66
	Curtose	7,33	7,24	4,94	23,99	20,74	29,57
	Assimetria	2,28	2,29	1,77	4,27	4,11	4,85
	Amplitude	212	199	192	314	213	211
	Mínimo	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Máximo	213,00	200,00	193,00	315,00	214,00	212,00
		Fixos			Variáveis		
		70%	80%	90%	70%	80%	90%
Intensidade ($m^3.s^{-1}/dia$)	Média	105,09	89,49	64,25	202,47	156,47	105,94
	Mediana	63,97	55,23	43,32	122,1	101,99	74,01
	D. P.	114,50	92,89	63,03	210,88	160,00	109,20
	Variância	13110,39	8628,77	3972,37	44470,95	25602,91	11925,04
	C.V. (%)	108,95	103,80	98,10	104,15	102,26	103,08
	Curtose	5,02	4,95	4,06	5,89	6,71	9,96
	Assimetria	1,56	1,58	1,34	1,55	1,62	2,09
	Amplitude	533,19	424,49	257,99	1393,06	1098,65	770,57
	Mínimo	0	0	0	0	0	0
	Máximo	533,19	424,49	257,99	1393,06	1098,65	770,57

De modo a observar melhor a distribuição dos dados construiu-se os histogramas para as duas variáveis em estudo (duração - Figura 12 e intensidade da seca - Figura 13) para cada um dos limiares considerados e, como já havia sido observado numericamente, em todos os cenários tem-se uma assimetria positiva.

Figura 12 – Histogramas da duração (dias) da seca para os limiares fixos ((a) 70%, (b) 80% e (c) 90%) e variáveis ((d) 70%, (e) 80% e (f) 90%) para estação São Francisco.

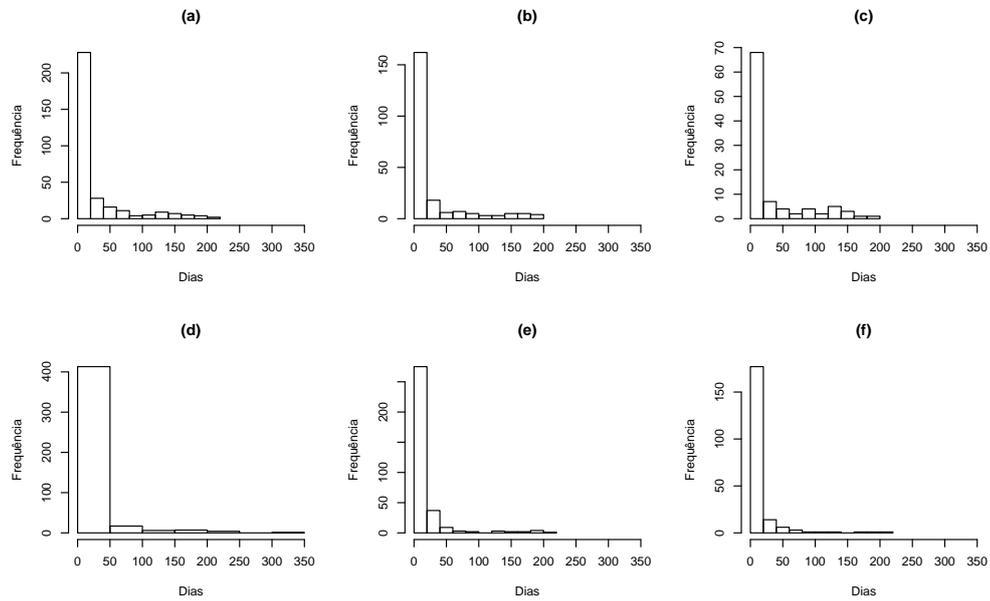
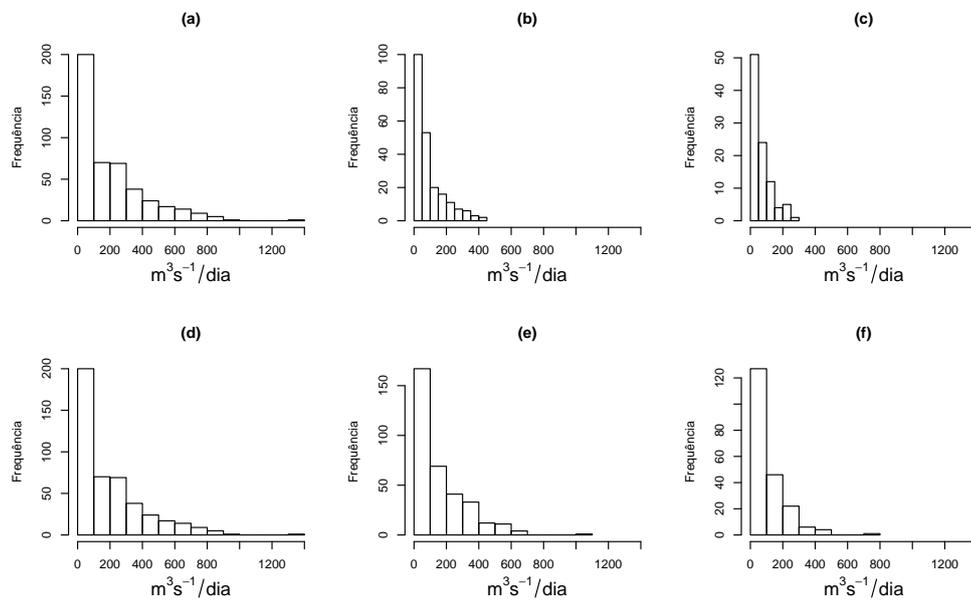


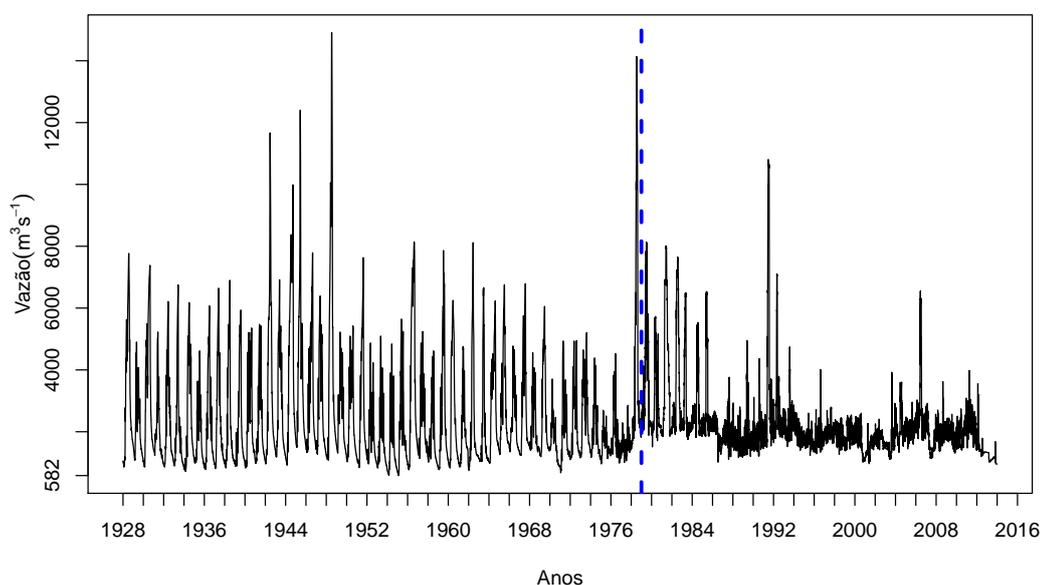
Figura 13 – Histogramas da intensidade ($m^3.s^{-1}/dia$) da seca para os limiares fixos ((a) 70%, (b) 80% e (c) 90%) e variáveis ((d) 70%, (e) 80% e (f) 90%) para estação São Francisco.



5.1.2 Estação Juazeiro/BA

Na Figura 14 tem-se a série de vazão para a estação Juazeiro e é possível perceber que a série tem um comportamento estável e ocorre uma modificação na oscilação após o início do funcionamento da barragem de Sobradinho, provavelmente pela regulação da vazão promovida pelo reservatório.

Figura 14 – Série temporal da vazão ($m^3.s^{-1}$) na estação Juazeiro. A linha tracejada vertical azul representa o início do funcionamento da barragem de Sobradinho.



Ao observar as principais medidas descritivas para a duração da seca na estação Juazeiro/BA considerando as séries: completa (1928 à 2016), antes (1928 à 1978) e depois (1979 à 2016) do funcionamento da hidrelétrica de Sobradinho, para os limiares de 70%, 80% e 90% fixos e variáveis. Verificou-se que para a série completa, comparando os limiares fixos, a duração média dos dias de seca foi aumentando à medida que o limiar aumentava enquanto que o desvio-padrão (D.P.) aumentou no limiar de 80% e diminuiu no de 90%. Em relação aos limiares variáveis o comportamento foi semelhante ao da estação São Francisco, essas mesmas medidas foram diminuindo com o aumento dos limiares, ou seja, quanto maior o limiar considerado, menor foi o número de dias com vazão abaixo do limiar.

Assim como na estação São Francisco, há um indício de que a duração dos dias de seca possui uma distribuição assimétrica positiva e um achatamento maior que o da curva normal.

Fazendo-se uma comparação da duração da seca antes e depois do funcionamento do reservatório é possível verificar que tanto para os limiares fixos quanto para os variáveis a duração média dos dias de seca reduziu bastante após a construção do reservatório, com

uma redução expressiva também do desvio-padrão e da mediana. Ou seja, há um indício que a construção do reservatório regularizou a vazão nessa região.

Observou-se também as principais medidas descritivas da intensidade da seca para as séries completa, antes e depois do funcionamento da hidrelétrica de Sobradinho para os limiares de 70%, 80% e 90% fixos e variáveis. E ao comparar a série completa, tanto para os limiares fixos quanto para os variáveis, a média e o desvio-padrão foram diminuindo a medida que o limiar aumentava.

Além disso, observa-se situação semelhante a duração da seca quando considera-se a distribuição dos dados, porém ao se comparar os limiares fixos com os variáveis observa-se que acontece uma situação um pouco diferente da duração pois, tanto a intensidade média quanto o desvio-padrão da intensidade foram menores para os limiares fixos, exceto para 90%.

Nas comparações de antes e depois do funcionamento da hidrelétrica verificou-se que para todos os limiares, em ambos os cenários, a intensidade média da seca diminuiu após o funcionamento.

Todas essas informações podem ser vistas na Tabela 3.

Tabela 3 – Medidas Descritivas da duração (dias) e da intensidade ($m^3 \cdot s^{-1} / dia$) da seca na estação Juazeiro/BA para as séries completa, antes e depois do funcionamento da Hidrelétrica de Sobradinho, considerando os limiares de 70%, 80% e 90% fixos e variáveis.

Duração (dias)		Limiares								
		Fixos								
		70%			80%			90%		
		Completa	Antes	Depois	Completa	Antes	Depois	Completa	Antes	Depois
Média	22,55	42,79	7,45	27,25	43,81	6,03	36,85	38,33	5,87	
Mediana	3,00	12,50	2,00	4,00	14,50	2,00	12,00	23,00	2,00	
D. P.	47,48	56,53	22,07	47,61	52,98	16,85	44,33	39,04	20,63	
Variância	2254,22	3196,15	486,97	2266,75	2807,38	283,98	1965,19	1524,47	425,75	
C.V. (%)	210,55	132,11	296,24	174,72	120,93	279,44	120,30	101,85	351,45	
Curtose	8,82	3,36	101,41	5,83	2,68	98,51	3,13	3,20	63,19	
Assimetria	2,64	1,34	9,11	2,02	1,04	8,89	1,17	1,04	7,29	
Amplitude	218,00	190,00	294,00	185,00	174,00	215,00	157,00	145,00	195,00	
Mínimo	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
Máximo	219,00	191,00	295,00	186,00	175,00	216,00	158,00	146,00	196,00	
Duração (dias)		Variáveis								
		70%			80%			90%		
		Completa	Antes	Depois	Completa	Antes	Depois	Completa	Antes	Depois
		Média	17,77	29,01	6,98	15,06	25,02	5,76	11,77	18,36
Mediana	4,00	11,00	2,00	4,00	11,00	2,00	4,00	7,00	2,00	
D. P.	37,22	46,54	19,28	31,83	37,02	16,73	26,40	3,11	18,50	
Variância	1385,74	2165,97	371,62	1013,48	1370,54	279,81	697,20	1096,39	342,14	
C.V. (%)	209,45	160,43	276,22	211,35	147,96	290,45	224,30	16,94	339,13	
Curtose	14,55	12,39	101,68	17,22	11,99	107,83	27,26	13,77	87,46	
Assimetria	3,39	2,90	9,10	3,70	2,88	9,30	4,73	3,35	8,66	
Amplitude	222,00	1472,45	248,00	203,00	203,00	223,00	176,00	171,00	198,00	
Mínimo	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
Máximo	223,00	1473,45	249,00	204,00	204,00	224,00	177,00	172,00	199,00	
Intensidade ($m^3 \cdot s^{-1} / dia$)		Fixos								
		70%			80%			90%		
		Completa	Antes	Depois	Completa	Antes	Depois	Completa	Antes	Depois
		Média	115,09	150,20	107,16	109,60	108,20	82,18	88,16	72,54
Mediana	75,38	112,90	84,76	77,08	80,62	55,83	54,95	47,45	45,60	
D. P.	124,95	129,74	93,44	111,95	94,95	80,85	91,88	64,72	68,19	
Variância	15613,09	16833,64	8732,38	12532,69	9015,90	6537,02	8441,96	4188,25	4649,77	
C.V. (%)	108,57	86,38	87,20	102,14	87,75	98,38	104,22	89,22	99,69	
Curtose	5,84	2,94	6,06	5,19	3,02	7,23	12,67	3,49	4,09	
Assimetria	1,72	0,87	1,45	1,46	0,90	1,90	2,52	0,98	1,14	
Amplitude	653,13	536,30	622,44	592,99	385,14	471,56	158,00	266,02	321,54	
Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Máximo	653,13	536,30	622,44	592,99	385,14	471,56	158,00	266,02	321,54	
Intensidade ($m^3 \cdot s^{-1} / dia$)		Variáveis								
		70%			80%			90%		
		Completa	Antes	Depois	Completa	Antes	Depois	Completa	Antes	Depois
		Média	146,00	270,15	106,11	115,79	190,20	77,50	76,73	95,82
Mediana	109,10	166,97	85,06	84,15	112,40	52,13	42,46	62,68	38,41	
D. P.	134,90	304,22	98,86	110,76	219,73	83,02	90,11	102,50	63,60	
Variância	18197,51	92551,75	9773,23	12267,58	48280,77	6891,79	8120,30	10505,89	4045,26	
C.V. (%)	92,40	112,61	93,17	95,66	115,53	107,12	117,44	106,97	100,32	
Curtose	5,94	5,21	6,52	6,10	4,44	7,51	8,62	4,86	3,54	
Assimetria	1,46	1,62	1,60	1,54	1,45	1,94	2,03	1,46	1,08	
Amplitude	933,70	1473,45	659,96	697,41	997,70	518,85	592,99	477,33	252,18	
Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	
Máximo	933,70	1473,45	659,96	697,41	997,70	518,85	592,99	477,33	252,18	

Nas Figuras 15 e 16, confirma-se o que foi observado através das medidas descritivas, que a duração da seca na estação Juazeiro apresenta uma distribuição assimétrica positiva para todos os cenários considerados. E o mesmo é visto nas Figuras 17 e 18 referente a intensidade da seca.

Figura 15 – Histogramas da duração (dias) da seca para os limiares fixos (70% : (a) - completa, (b) - antes, (c) - depois; 80% : (d) - completa, (e) - antes, (f) - depois e 90% : (g) - completa, (h) - antes, (i) - depois) para estação Juazeiro.

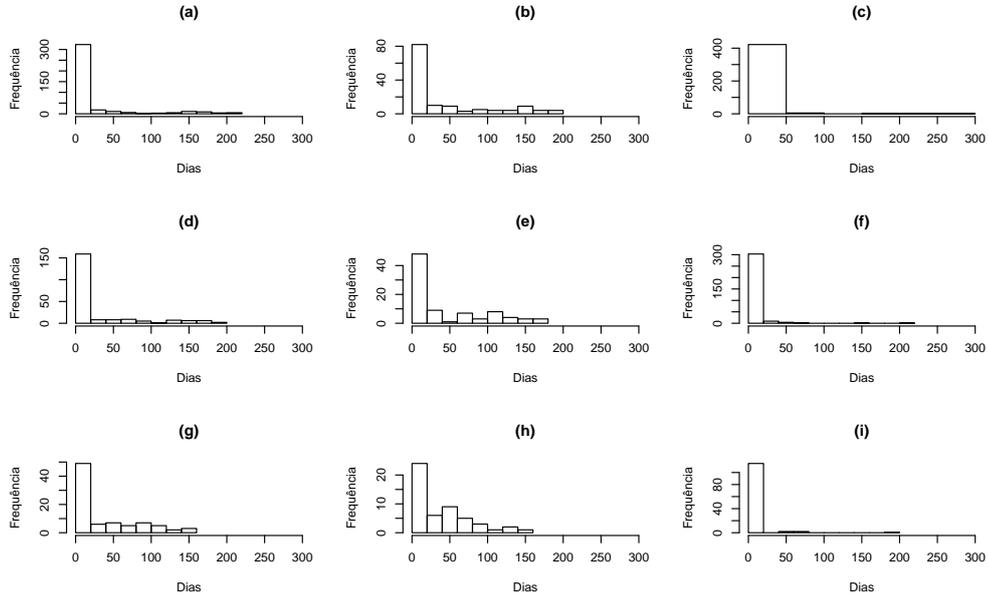


Figura 16 – Histogramas da duração (dias) da seca para os limiares variáveis (70% : (a) - completa, (b) - antes, (c) - depois; 80% : (d) - completa, (e) - antes, (f) - depois e 90% : (g) - completa, (h) - antes, (i) - depois) para estação Juazeiro.

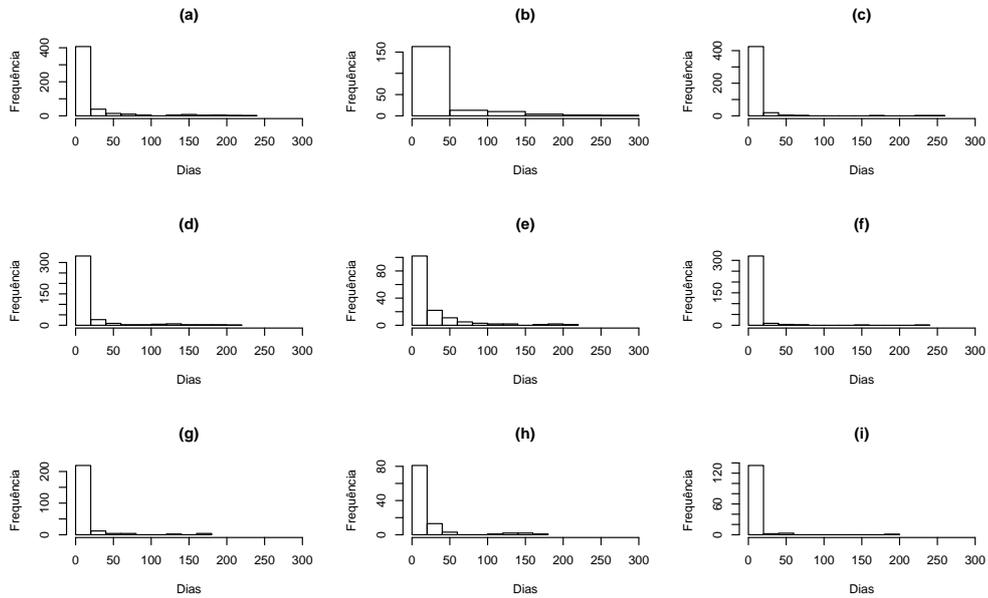


Figura 17 – Histogramas da intensidade ($m^3.s^{-1}/dia$) da seca para os limiares fixos (70% : (a) - completa, (b) - antes, (c) - depois; 80% : (d) - completa, (e) - antes, (f) - depois e 90% : (g) - completa, (h) - antes, (i) - depois) para estação Juazeiro.

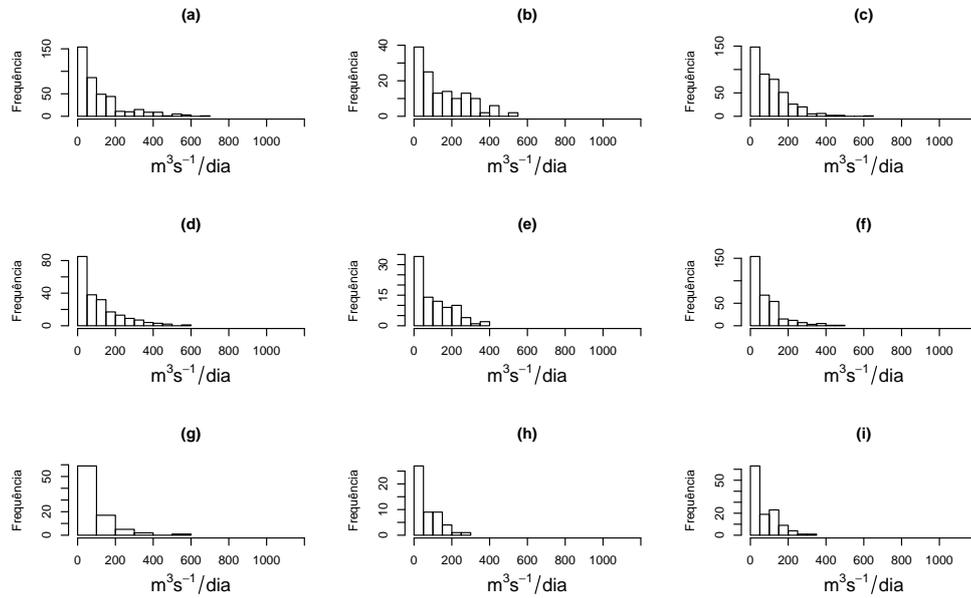
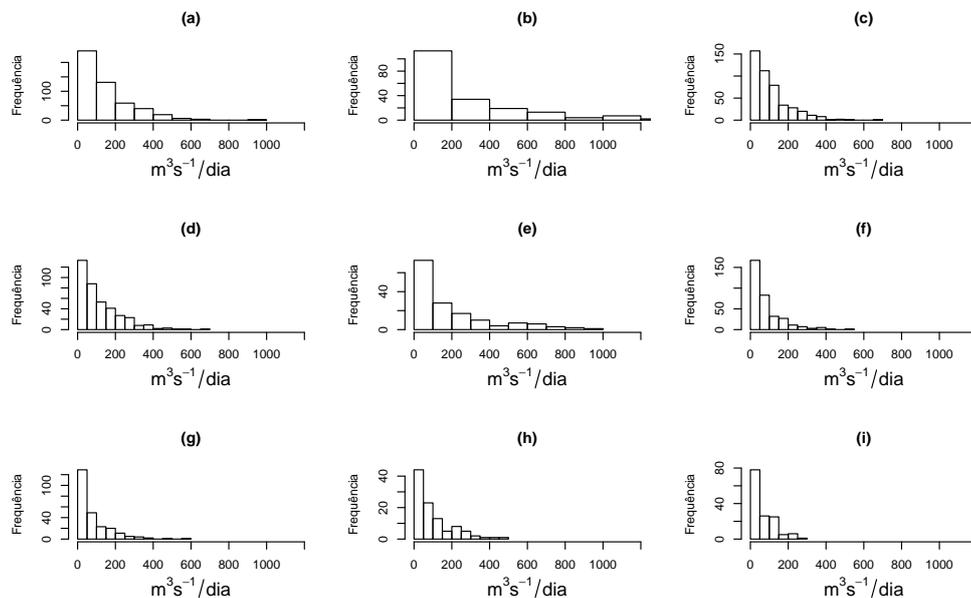


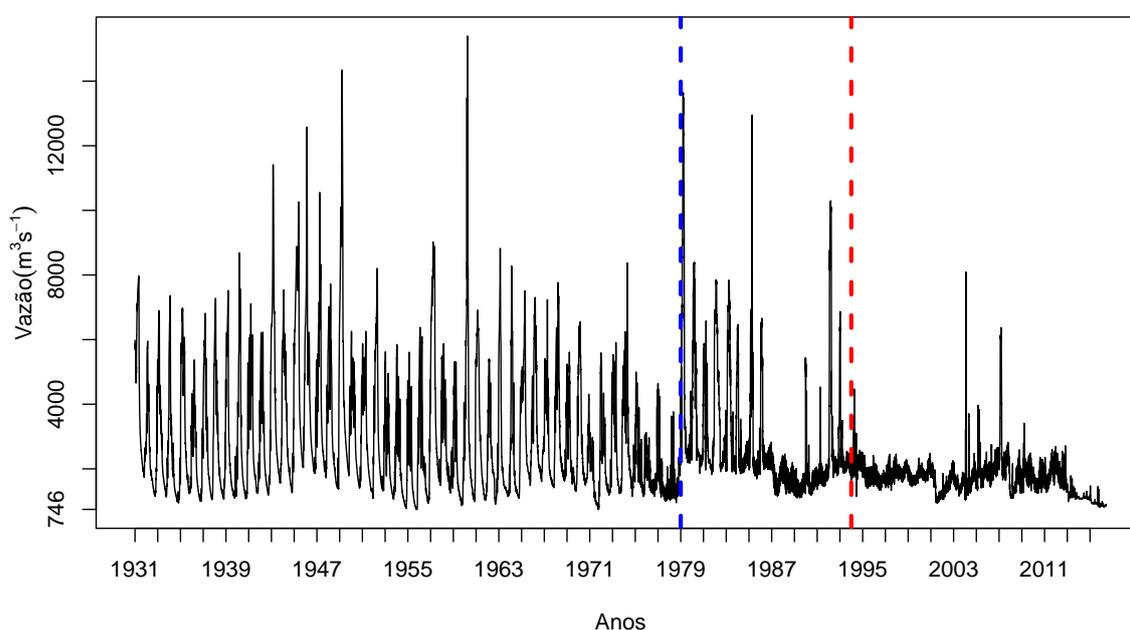
Figura 18 – Histogramas da intensidade ($m^3.s^{-1}/dia$) da seca para os limiares variáveis (70% : (a) - completa, (b) - antes, (c) - depois; 80% : (d) - completa, (e) - antes, (f) - depois e 90% : (g) - completa, (h) - antes, (i) - depois) para estação Juazeiro.



5.1.3 Estação Pão de Açúcar/ AL

Na Figura 19 tem-se a série de vazão para a estação Pão de Açúcar e observa-se que é aparentemente estacionária e com a oscilação mudando após a construção de Sobradinho, similarmente a estação Juazeiro.

Figura 19 – Série temporal da vazão ($m^3.s^{-1}$) na estação Pão de Açúcar. As linhas tracejadas representam o início do funcionamento da barragem de Sobradinho (em azul) e da barragem de Xingó (em vermelho).



Verificando as principais medidas descritivas da duração da seca na estação Pão de Açúcar/AL para as séries completa (1931 à 2016), antes (1931 à 1978) e depois (1979 à 2016) do funcionamento da hidrelétrica de Sobradinho, comparando-se os limiares fixos verificou-se que a duração média dos dias de seca e o desvio-padrão reduziu até o limiar de 80% e depois aumentou no limiar de 90%. Em relação aos limiares variáveis a média foi reduzindo à medida que o limiar aumentava e o desvio-padrão reduziu até o limiar de 80% e depois aumentou no limiar de 90%.

Ao fazer a comparação de antes e após a construção da barragem para estação Pão de Açúcar para os limiares fixos e variáveis tem-se que nos dois cenários, assim como na estação Juazeiro, a duração média da seca reduziu bastante após a construção do reservatório, com uma redução expressiva também do desvio-padrão e da mediana.

Verificando-se as principais medidas descritivas da intensidade da seca na estação Pão de Açúcar para as séries completa, antes e depois do funcionamento de Sobradinho considerando os limiares de 70%, 80% e 90%, fixos e variáveis, observou-se que para a

série completa, tanto para os limiares fixos quanto para os variáveis, a intensidade média e o desvio-padrão foram diminuindo a medida que o limiar aumentava, além disso, a intensidade possui uma distribuição assimétrica positiva e um achatamento maior que o da curva normal em todos os limiares. Comparando os limiares fixos com os variáveis verifica-se que o valor médio foi maior para os limiares variáveis.

Ao comparar as informações de antes e depois do funcionamento da hidrelétrica de Sobradinho verifica-se que a intensidade apresentou comportamento semelhante ao da estação Juazeiro, em que houve redução em todos os limiares após o funcionamento da hidrelétrica.

Todas essas informações podem ser observadas na Tabela 4.

Tabela 4 – Medidas Descritivas da duração (dias) e da intensidade ($m^3 \cdot s^{-1} / dia$) da seca na estação Pão de Açúcar/AL para as séries completa, antes e depois do funcionamento da Hidrelétrica de Sobradinho, considerando os limiares de 70%, 80% e 90% fixos e variáveis.

Duração(dias)	Limiares									
	Fixos									
	70%			80%			90%			
	Completa	Antes	Depois	Completa	Antes	Depois	Completa	Antes	Depois	
Média	12,67	42,08	5,30	11,90	27,02	5,13	13,30	15,61	12,10	
Mediana	2,00	11,50	2,00	2,00	4,00	2,00	2,00	2,00	3,00	
D. P.	31,93	56,65	16,97	29,54	44,09	16,25	30,50	30,82	33,84	
Variância	1019,71	3208,88	287,88	872,38	1944,78	264,10	930,28	949,89	1145,40	
C.V. (%)	252,01	134,62	320,19	248,24	163,18	316,52	229,32	197,44	279,67	
Curtose	19,03	3,19	105,60	20,49	5,20	143,65	22,46	8,50	33,49	
Assimetria	3,91	1,26	9,17	3,98	1,83	10,71	3,92	2,46	5,22	
Amplitude	247,00	193,00	246,00	235,00	165,00	235,00	243,00	140,00	243,00	
Mínimo	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	
Máximo	248,00	194,00	247,00	236,00	166,00	236,00	244,00	141,00	244,00	
Intensidade ($m^3 \cdot s^{-1} / dia$)	Variáveis									
	70%			80%			90%			
	Completa	Antes	Depois	Completa	Antes	Depois	Completa	Antes	Depois	
	Média	14,30	24,11	4,97	8,78	20,09	4,12	7,81	13,05	11,70
	Mediana	2,00	8,00	2,00	2,00	7,00	2,00	2,00	3,00	4,00
	D. P.	33,42	44,20	13,72	22,09	34,85	14,36	22,19	28,55	32,64
	Variância	1116,64	1954,08	188,40	488,23	1214,67	206,11	492,45	814,89	1065,70
	C.V. (%)	233,71	183,33	276,06	251,59	173,47	348,54	284,12	218,77	278,97
	Curtose	19,56	14,67	173,09	36,69	13,89	192,47	34,08	21,60	37,74
	Assimetria	3,89	3,22	11,46	5,32	3,19	12,62	5,31	4,20	5,75
	Amplitude	250,00	301,00	238,00	214,00	191,00	234,00	185,00	170,00	243,00
	Mínimo	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
	Máximo	251,00	302,00	239,00	215,00	192,00	235,00	186,00	171,00	244,00
	Fixos									
	70%			80%			90%			
	Completa	Antes	Depois	Completa	Antes	Depois	Completa	Antes	Depois	
	Média	116,72	168,22	97,52	96,45	114,82	85,57	77,05	85,41	50,62
	Mediana	96,35	124,68	88,80	82,64	102,25	74,11	66,76	77,70	37,40
	D. P.	99,20	159,08	72,50	78,88	93,58	63,74	72,25	72,55	52,16
	Variância	9840,43	25307,29	5256,49	6221,88	8757,37	4062,47	5220,45	5263,10	2720,55
	C.V. (%)	84,99	94,57	74,34	81,78	81,50	74,49	93,77	84,94	103,04
	Curtose	8,21	3,32	6,94	9,64	6,22	4,94	17,14	4,69	10,41
	Assimetria	1,86	0,95	1,35	1,97	1,56	1,19	2,90	1,11	2,56
	Amplitude	655,79	684,49	523,77	592,99	499,43	356,80	589,36	360,26	275,38
	Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	3,63	0,00	0,00
	Máximo	655,79	684,49	523,77	592,99	499,43	356,80	592,99	360,26	275,38

Nas Figuras 20, 21, 22 e 23 confirma-se o que foi observado através das medidas descritivas, que tanto a duração quanto a intensidade da seca na estação Pão de Açúcar apresentam distribuição assimétrica positiva para todos os cenários considerados.

Figura 20 – Histogramas da duração (dias) da seca para os limiares fixos (70% : (a) - completa, (b) - antes, (c) - depois; 80% : (d) - completa, (e) - antes, (f) - depois e 90% : (g) - completa, (h) - antes, (i) - depois) para estação Pão de Açúcar.

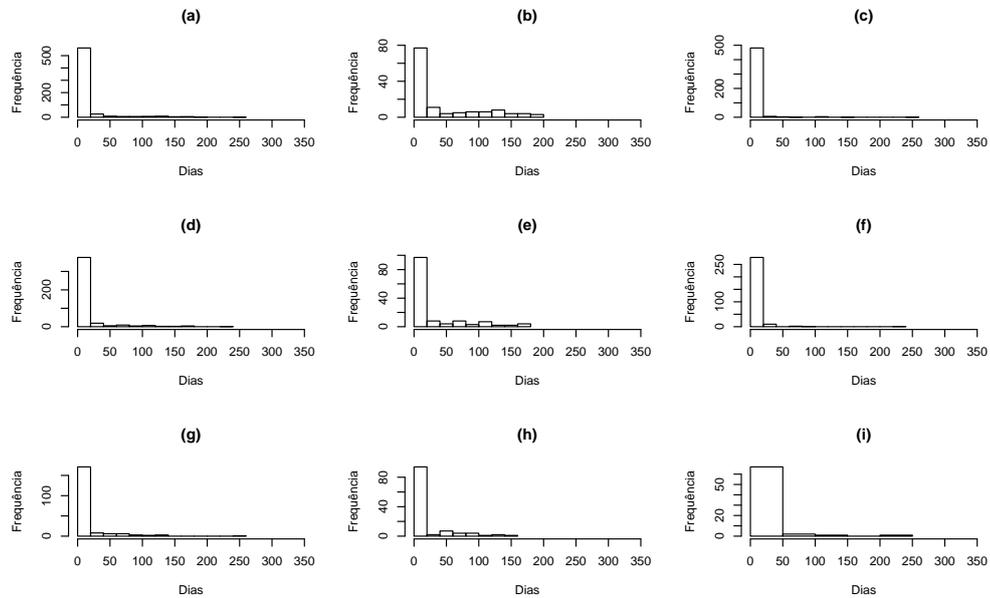


Figura 21 – Histogramas da duração (dias) da seca para os limiares variáveis (70% : (a) - completa, (b) - antes, (c) - depois; 80% : (d) - completa, (e) - antes, (f) - depois e 90% : (g) - completa, (h) - antes, (i) - depois) para estação Pão de Açúcar.

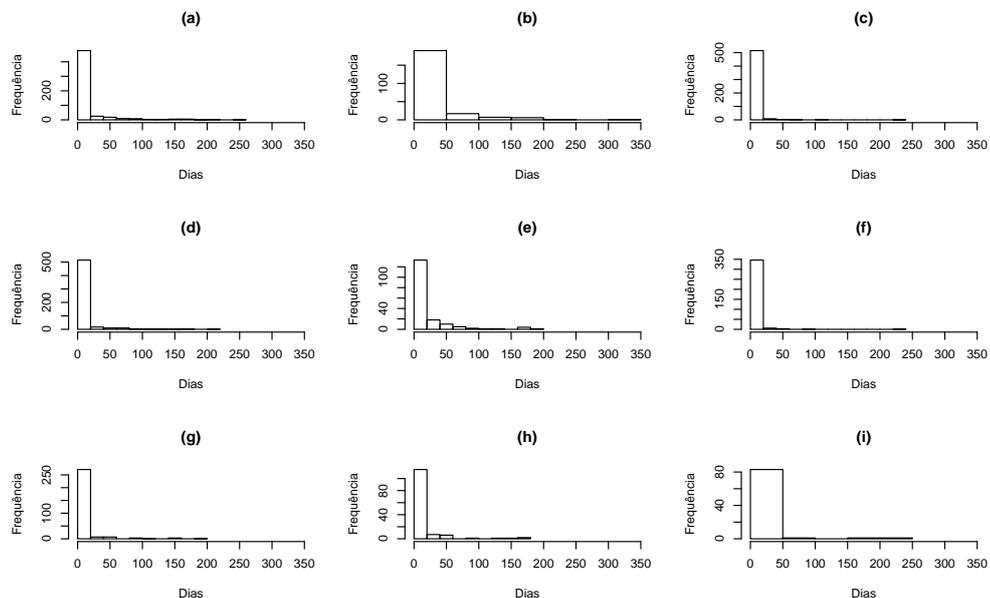


Figura 22 – Histogramas da intensidade ($m^3.s^{-1}/dia$) da seca para os limiares fixos (70% : (a) - completa, (b) - antes, (c) - depois; 80% : (d) - completa, (e) - antes, (f) - depois e 90% : (g) - completa, (h) - antes, (i) - depois) para estação Pão de Açúcar.

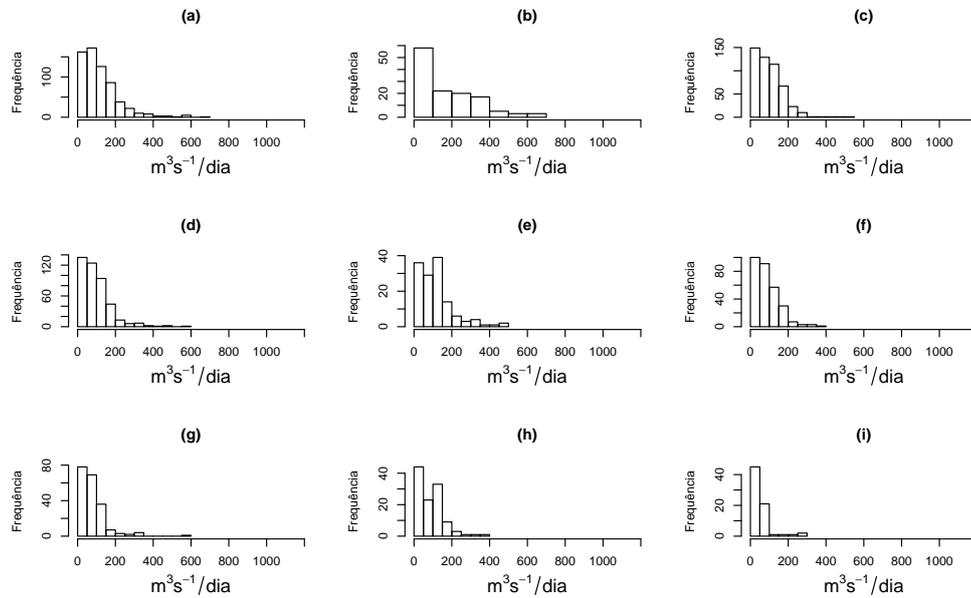
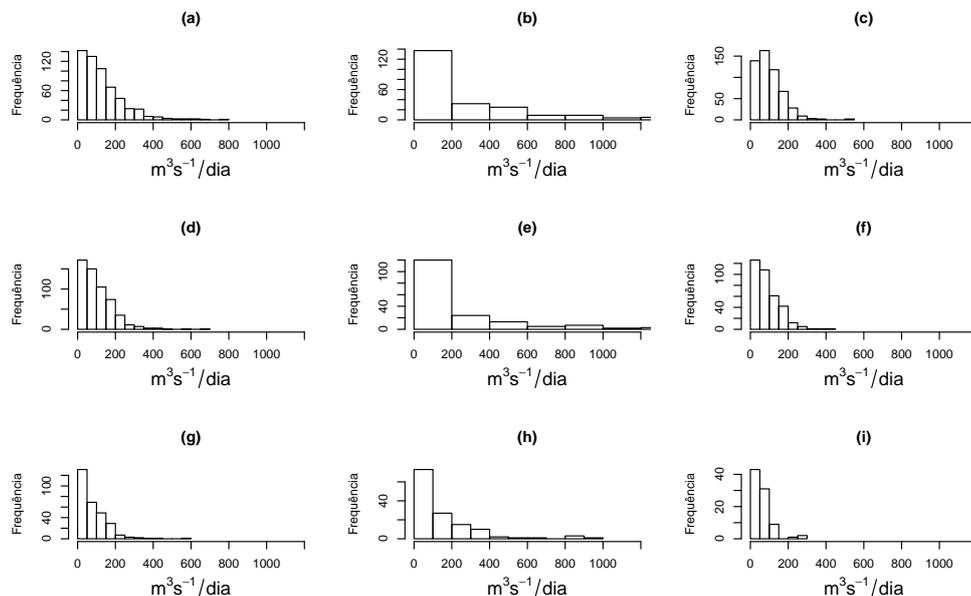


Figura 23 – Histogramas da intensidade ($m^3.s^{-1}/dia$) da seca para os limiares variáveis (70% : (a) - completa, (b) - antes, (c) - depois; 80% : (d) - completa, (e) - antes, (f) - depois e 90% : (g) - completa, (h) - antes, (i) - depois) para estação Pão de Açúcar.



5.1.4 Teste de Normalidade

Observando as medidas descritivas, já apresentadas anteriormente, das estações Juazeiro e Pão de Açúcar tem-se uma ideia de que os episódios de seca diminuíram após a construção da barragem de Sobradinho, mas para confirmar se realmente há diferença entre as observações de antes e depois da construção aplicou-se um teste de comparação e antes deste realizou-se um teste de normalidade para verificar se o teste a ser realizado seria paramétrico ou não-paramétrico.

Apesar de já se suspeitar que os dados não possuíam distribuição normal, para confirmar realizou-se o teste de Shapiro-Wilk tanto para o número de dias de seca quanto para a intensidade considerando as estações e os limiares analisados anteriormente.

Para as duas estações, Juazeiro e Pão de Açúcar, em todos os testes a hipótese nula de normalidade foi rejeitada, pois os p -valores foram bem menores que o nível de significância de 5%, ou seja, pode-se dizer que os dados não seguem uma distribuição normal. Desta forma, realizou-se o teste não-paramétrico Mann-Whitney para comparar o antes e depois da construção da barragem.

5.1.5 Teste de Comparação de duas amostras

Como já mencionado, todas as hipóteses nulas do teste de normalidade foram rejeitadas, portanto, realizou-se o teste de Mann-Whitney para comparar as informações de antes e depois da construção da barragem. Como na análise descritiva, de um modo geral, os valores diminuíram após a construção da barragem testou-se as hipóteses de que não houve diferença entre as medianas (H_0) contra que a mediana diminuiu após a construção (H_1).

5.1.5.1 Estação Juazeiro/BA

Para estação Juazeiro, considerando os limiares fixos, apenas quando se comparou a intensidade no limiar de 90% não se rejeitou a hipótese nula, ou seja, apenas nesse limiar não houve diferença significativa entre as medianas da intensidade antes e após a construção da barragem, considerando o nível de 5% de significância, pois o p -valor apresentado pelo teste foi de 0,1303, os demais testes apresentaram p -valores bem menores que o nível de significância.

Já considerando os limiares variáveis em todos rejeitou-se H_0 , ou seja, tanto a duração mediana dos dias de seca quanto a intensidade mediana diminuíram após a construção da barragem, considerando o nível de significância de 5%.

5.1.5.2 Estação Pão de Açúcar

Para estação Pão de Açúcar, considerando os limiares fixos também no limiar de 90% fixo não se rejeitou uma das hipóteses nula, mas neste caso foi para comparação dos dias de seca, ou seja, para o limiar de 90% fixo não houve diferença entre a duração mediana antes e após a construção da barragem, considerando o nível de 5% de significância, pois o p -valor apresentado pelo teste foi de 0,4159.

Os demais testes, inclusive para os limiares variáveis, apresentaram p -valores bem menores que o nível de significância estabelecido.

5.2 Lacunaridade

Quando considera-se o estudo da lacunaridade são analisadas as séries de vazão e não as variáveis associadas a seca (duração, déficit e intensidade). E apenas para exemplificar melhor, construiu-se a Tabela 5 na qual observa-se os valores da lacunaridade para caixa de tamanho 2 considerando diferentes séries, apenas para o limiar de 70% fixo. Portanto, é possível observar que na estação São Francisco não houve alteração, pois o valor da lacunaridade permaneceu praticamente o mesmo em todas as séries. Nas demais estações, a lacunaridade diminuiu depois do funcionamento dos reservatórios. Isso significa que estas passaram a ser mais homogêneas, ou seja, houve uma regularização da vazão após a construção das barragens.

Tabela 5 – Valores de lacunaridade para tamanho de caixa igual a 2 para diferentes séries, considerando o limiar de 70% fixo.

	Séries	Lacunaridade
São Francisco	Completa	1,41
	Antes de Sobradinho	1,43
	Depois de Sobradinho	1,44
Juazeiro	Completa	1,39
	Antes de Sobradinho	1,45
	Depois de Sobradinho	1,33
Pão de Açúcar	Completa	1,35
	Antes de Sobradinho	1,44
	Depois de Sobradinho	1,26
	Depois de Xingó	1,22

Em seguida, para cada uma das estações, construiu-se gráficos da lacunaridade empírica ($\text{Log}_{10}(L(r)) \times \text{Log}_{10}(r)$) para o limiar fixo de 70% e ajustou-se a reta de regressão para verificar o coeficiente de inclinação (β). Em alguns casos, observou-se a ocorrência de mais de um regime, sendo necessário, portanto, ajustar uma reta para cada um deles.

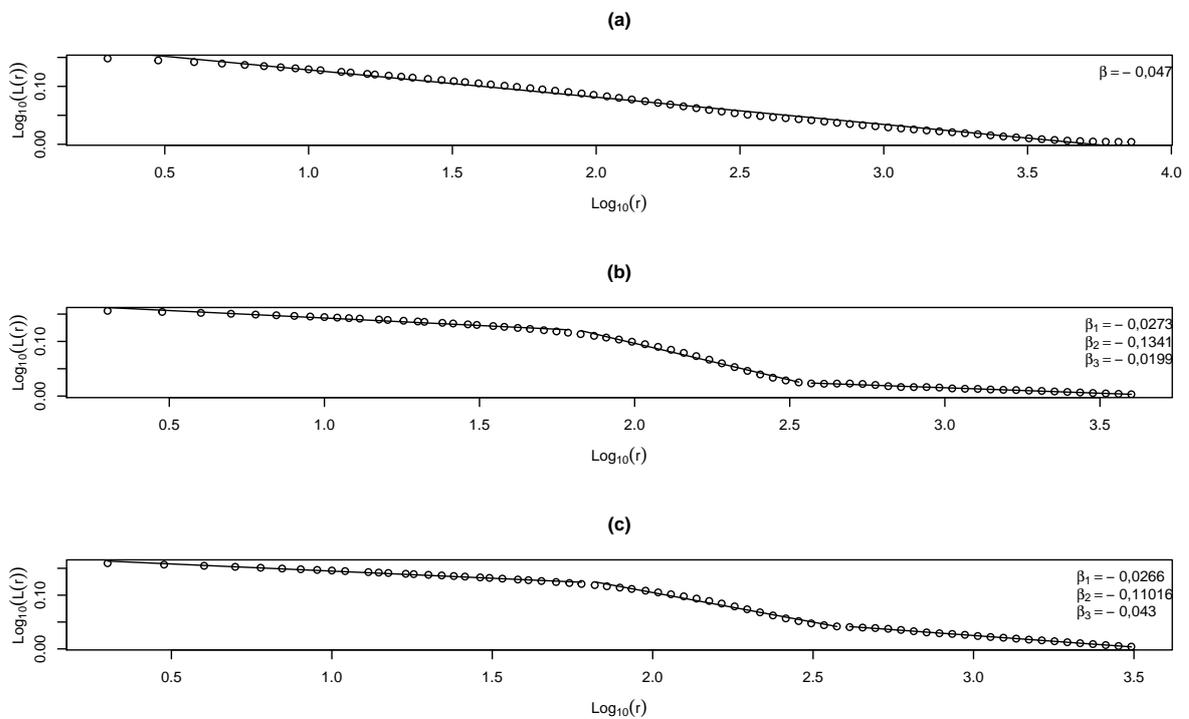
Esses gráficos foram construídos para as três estações (São Francisco, Juazeiro e Pão de Açúcar) considerando as séries: completa, antes e depois do funcionamento da hidrelétrica de Sobradinho e, além dessas, na estação Pão de Açúcar tem-se a série depois de Xingó.

5.2.1 Estação São Francisco

Para a estação de São Francisco é possível verificar que na série completa observou-se apenas um regime (Figura 24 - (a)) enquanto que as séries de antes (Figura 24 - (b)) e depois (Figura 24 - (c)) do funcionamento da hidrelétrica de Sobradinho apresentaram três regimes, sendo necessário, portanto o ajuste de três retas de regressão.

Comparando as três séries é possível observar que os valores de β são muito próximos, ou seja, não há uma variação muito grande entre os ajustes da série completa com as séries de antes e depois do funcionamento de Sobradinho. Já era esperado que os valores não fossem mudar muito, pois a estação São Francisco fica muito distante de Sobradinho, não sofrendo, portanto, influência desse reservatório.

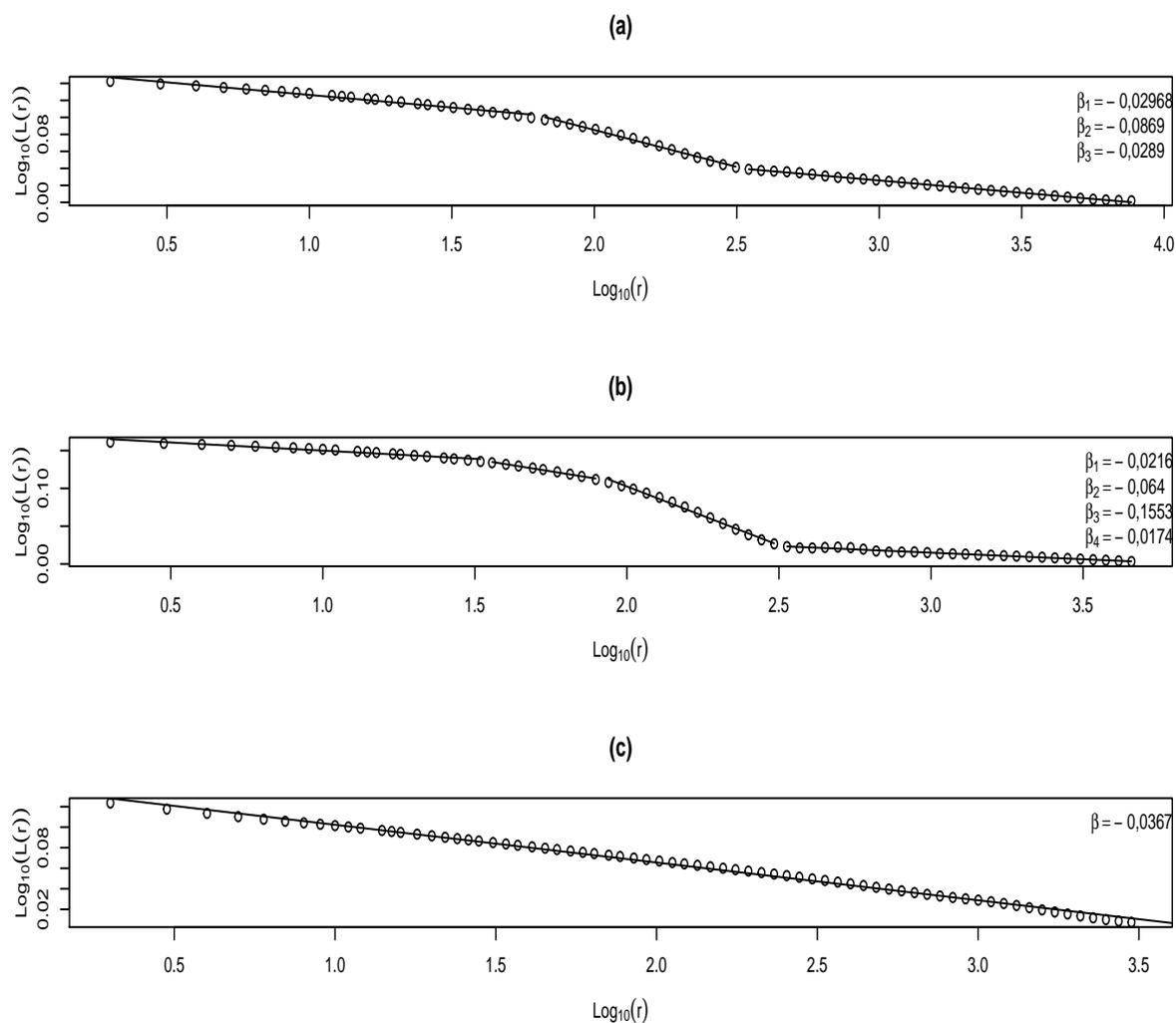
Figura 24 – Lacunaridade empírica da vazão considerando o limiar de 70% fixo para as séries completa (a), antes de Sobradinho (b) e depois de Sobradinho (c), observações da Estação São Francisco - MG.



5.2.2 Estação Juazeiro

Para a estação Juazeiro observou-se que mesmo esta estação sendo mais próxima do reservatório de Sobradinho não sofreu tanta alteração, comparando antes e depois de Sobradinho. Considerando a série completa (Figura 25 - (a)) percebe-se a ocorrência de três regimes, sendo que o primeiro e o último apresentaram praticamente o mesmo valor de inclinação da reta. Para a série de antes (Figura 25 - (b)) de Sobradinho observou-se a presença de quatro regimes de vazão e apenas o terceiro regime apresentou valores mais discrepantes dos demais, tendo uma diminuição, portanto, ficando mais homogêneo. Já ao observar a série de após (Figura 25 - (c)) o funcionamento de Sobradinho verificou-se apenas um regime, tendo um comportamento quase linear, ou seja, uma maior homogeneidade dos dados.

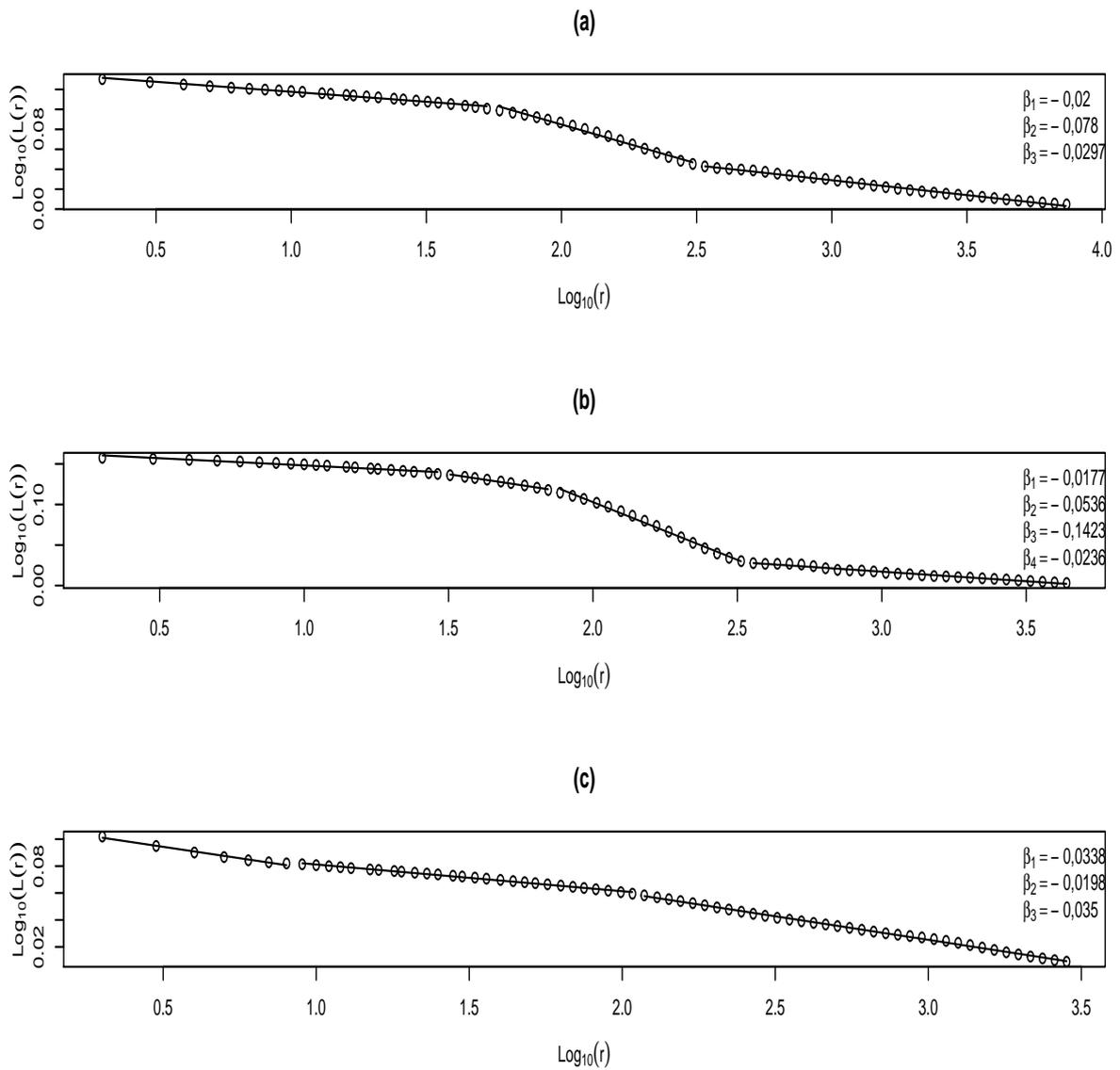
Figura 25 – Lacunaridade empírica da vazão considerando o limiar de 70% fixo para as séries completa (a), antes (b) e depois (c) de Sobradinho, observações da Estação Juazeiro/BA.



5.2.3 Estação Pão de Açúcar

Para a estação Pão de Açúcar verificou-se que a série completa (Figura 26 - (a)) e a série de depois do funcionamento de Sobradinho (Figura 26 - (c)) apresentaram três regimes enquanto que a série de antes (Figura 26 - (b)) apresentou quatro regimes.

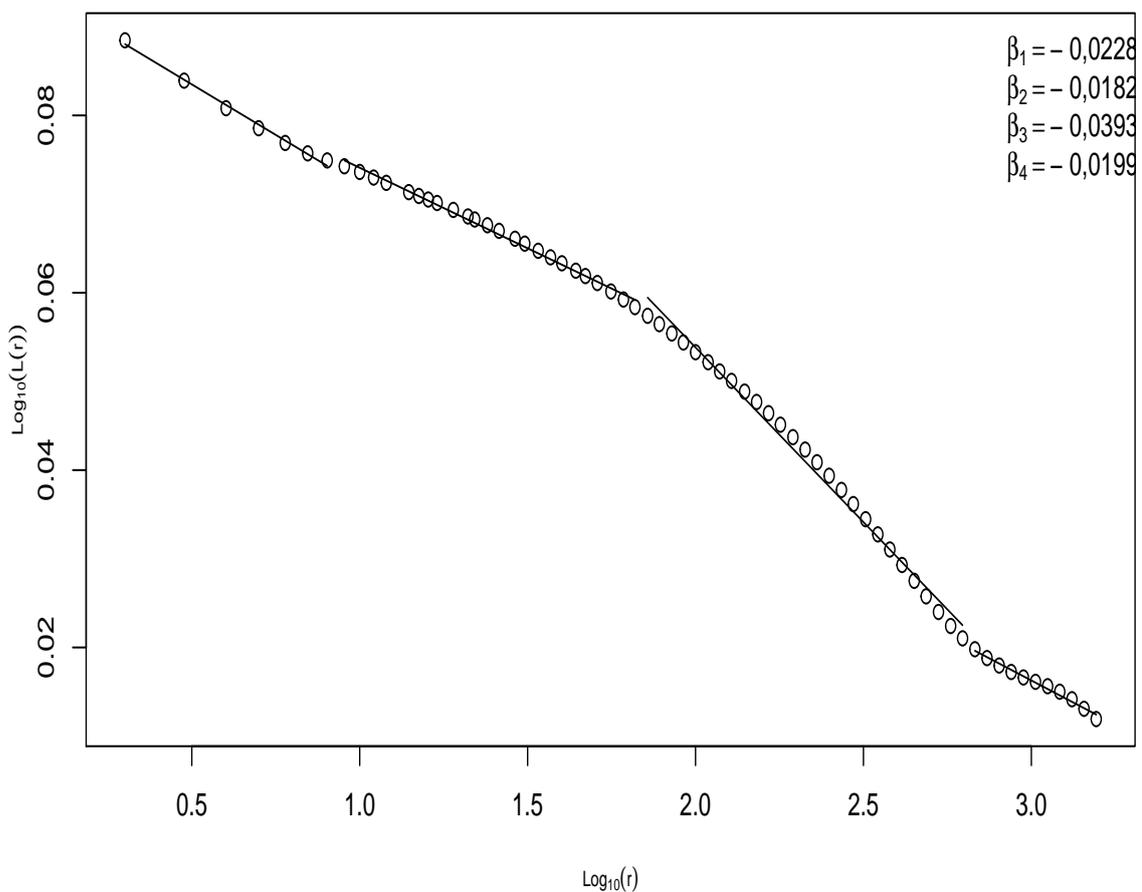
Figura 26 – Lacunaridade empírica da vazão considerando o limiar de 70% fixo para as séries completa (a), antes (b) e depois (c) de Sobradinho, observações da Estação Pão de Açúcar.



Nessa estação considerou-se ainda a série de depois do funcionamento da hidrelétrica de Xingó (Figura 27) que engloba o fluxo dos dois reservatórios, nessa série observou-se a ocorrência de quatro regimes.

Comparando-se, portanto, os dados de antes de Sobradinho, ou seja, sem influência de nenhum reservatório, com os dados de depois de Xingó, é possível perceber que houve uma mudança nos parâmetros. De um modo geral, os valores de β diminuíram após o funcionamento da hidrelétrica de Xingó o que indica que houve uma regulação da vazão após o funcionamento das hidrelétricas.

Figura 27 – Lacunaridade empírica da vazão considerando o limiar de 70% fixo para a série depois da construção da hidrelétrica de Xingó, observações da Estação Pão de Açúcar.



5.3 DFA

A análise através do DFA foi feita nas séries das variáveis associadas a seca (duração, déficit e intensidade) e em seguida nas de cheia (duração, sùficit e intensidade) nas três estações (São Francisco, Juazeiro e Pão de Açúcar), considerando apenas o limiar de 70% fixo.

5.3.1 Séries das variáveis associadas a Seca para as três estações

Observando as séries das variáveis associadas a seca na estação São Francisco considerou-se apenas a série completa e verificou-se que a duração da seca apresentou coeficiente menor que 0,5, ou seja, é uma série anti persistente, já a série de déficit apresentou valores próximos de 0,5 o que indica que é uma série aleatória ou não correlacionada, já a série intensidade apresentou comportamento persistente .

Considerando a estação Juazeiro verificou-se que a duração e o déficit da seca apresentam comportamento persistente para as séries completa e ante de Sobradinho enquanto que a intensidade apresentou dinâmica persistente nas três séries, diminuindo a persistência depois de Sobradinho.

Na estação Pão de Açúcar tanto a duração quanto o déficit e a intensidade da seca apresentaram comportamento persistente para todas as situações analisadas, sendo o maior valor apresentado quando considera-se as informações após o início do funcionamento da hidrelétrica de Xingó.

Comparando o regime natural para todas as estações (São Francisco - completa, Juazeiro e Pão de Açúcar antes de Sobradinho) o coeficiente aumenta com a área de drenagem, indicando uma persistência mais forte para todas as variáveis.

Em relação a construção das barragens, tanto em Juazeiro quanto em Pão de Açúcar a persistência aumentou para duração e diminuiu para o déficit e a intensidade.

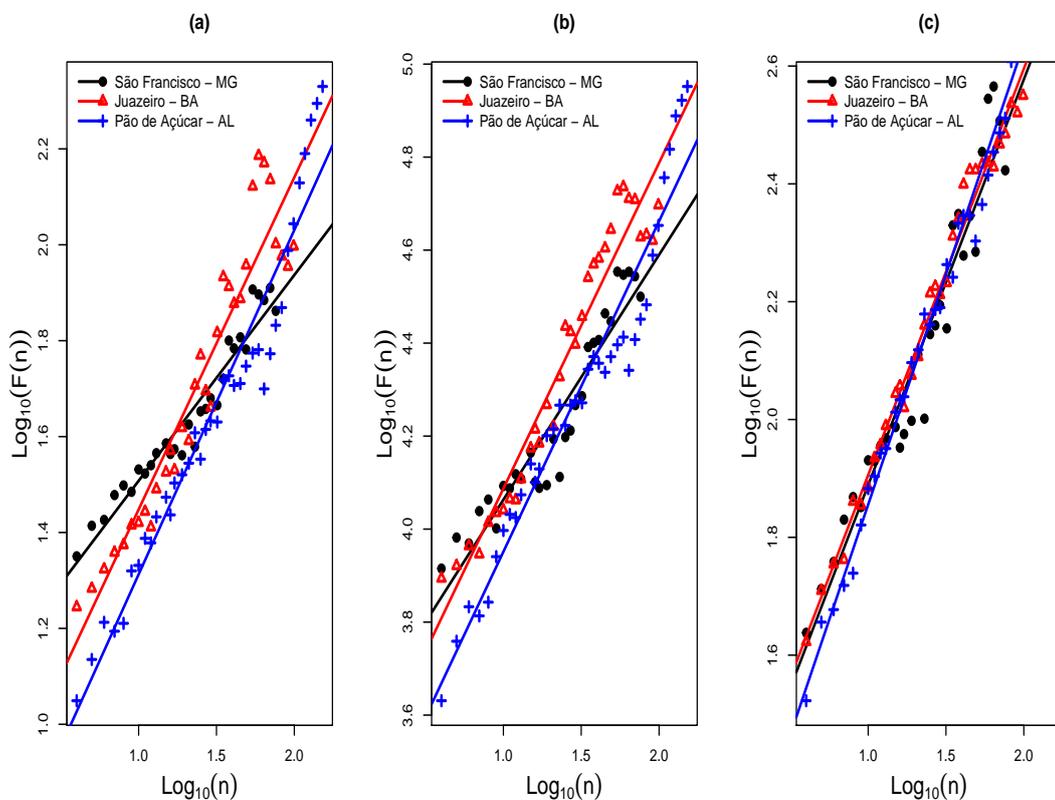
Essas informações podem ser vistas na Tabela 6.

Tabela 6 – Valores de α para as séries de duração, déficit e intensidade da seca para cada uma das estações.

	Séries	Duração	Déficit	Intensidade
São Francisco	Completa	0,4293	0,5266	0,6886
	Completa	0,6849	0,7489	0,6895
Juazeiro	Antes de Sobradinho	0,5239	0,6305	0,753
	Depois de Sobradinho	0,4844	0,4696	0,6704
Pão de Açúcar	Completa	0,5927	0,61298	0,7820
	Antes de Sobradinho	0,5688	0,6931	0,7412
	Depois de Sobradinho	0,5871	0,5649	0,7208
	Depois de Xingó	0,6623	0,6183	0,7173

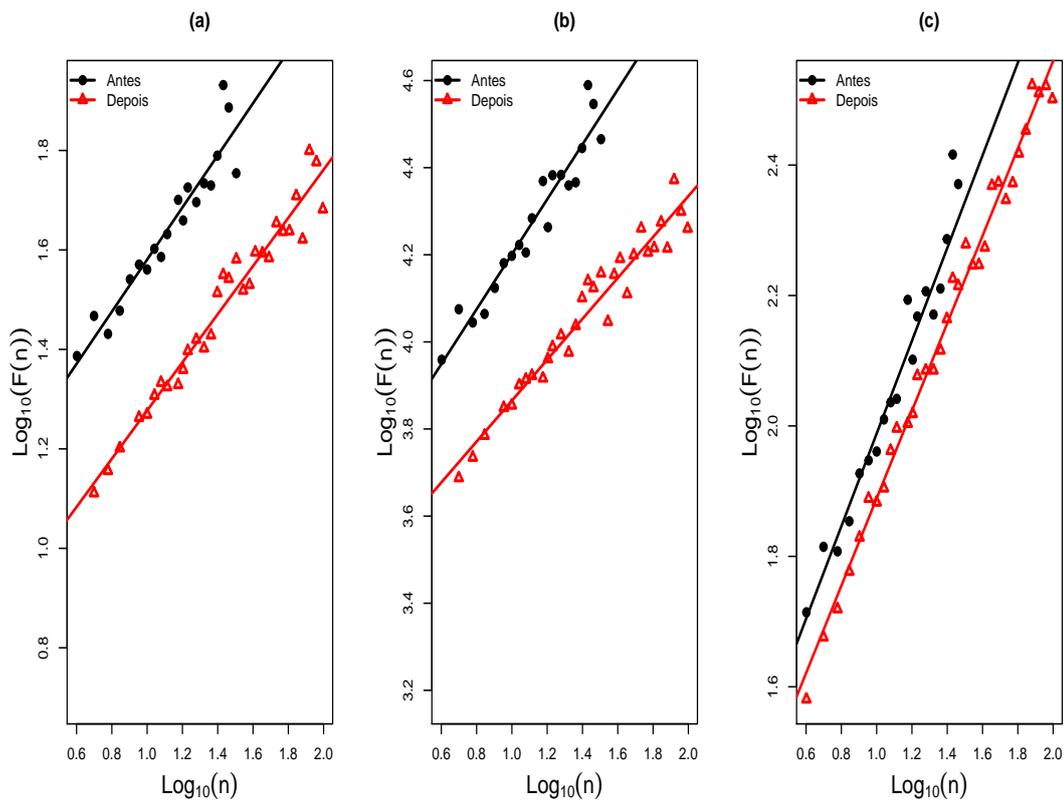
A seguir, tem-se os resultados obtidos pelo DFA para as séries de duração (Figura 28 - (a)), déficit (Figura 28 - (b)) e intensidade (Figura 28 - (c)) da seca comparando-se as três estações, na qual é possível verificar que, em relação a duração, Juazeiro e Pão de Açúcar possuem comportamento semelhante enquanto São Francisco apresentou menor inclinação. Um comportamento semelhante foi observado também no déficit com uma diminuição da inclinação em São Francisco. Já ao observar a intensidade da seca verificou-se que as três estações praticamente apresentaram o mesmo comportamento.

Figura 28 – DFA para duração (a), déficit (b) e intensidade (c) da seca considerando as séries completas observadas nas Estações São Francisco, Juazeiro e Pão de Açúcar, tendo o limiar fixo de 70%.



Ao considerar as séries de antes e depois do funcionamento da Hidrelétrica de Sobradinho observadas na Estação Juazeiro confirma-se o que já havia sido visto na Tabela 6, que tanto a duração (Figura 29 - (a)) quanto o déficit (Figura 29 - (b)) e a intensidade (Figura 29 - (c)) da seca apresentam comportamento persistente, neste caso, pequenas flutuações são seguidas por pequenas flutuações.

Figura 29 – DFA para duração (a), déficit (b) e intensidade (c) da seca considerando as séries antes e depois do funcionamento da Hidrelétrica de Sobradinho observadas na Estação Juazeiro, tendo o limiar fixo de 70%.



O comportamento das séries de duração, déficit e intensidade da seca observadas na Estação Pão de Açúcar tanto antes/depois do funcionamento da Hidrelétrica de Sobradinho (Figura 30) quanto antes/depois do funcionamento de Xingó (Figura 31) apresentaram comportamento persistente.

Figura 30 – DFA para duração (a), déficit (b) e intensidade (c) da seca considerando as séries antes e depois do funcionamento da Hidrelétrica de Sobradinho observadas na Estação Pão de Açúcar, tendo o limiar fixo de 70%.

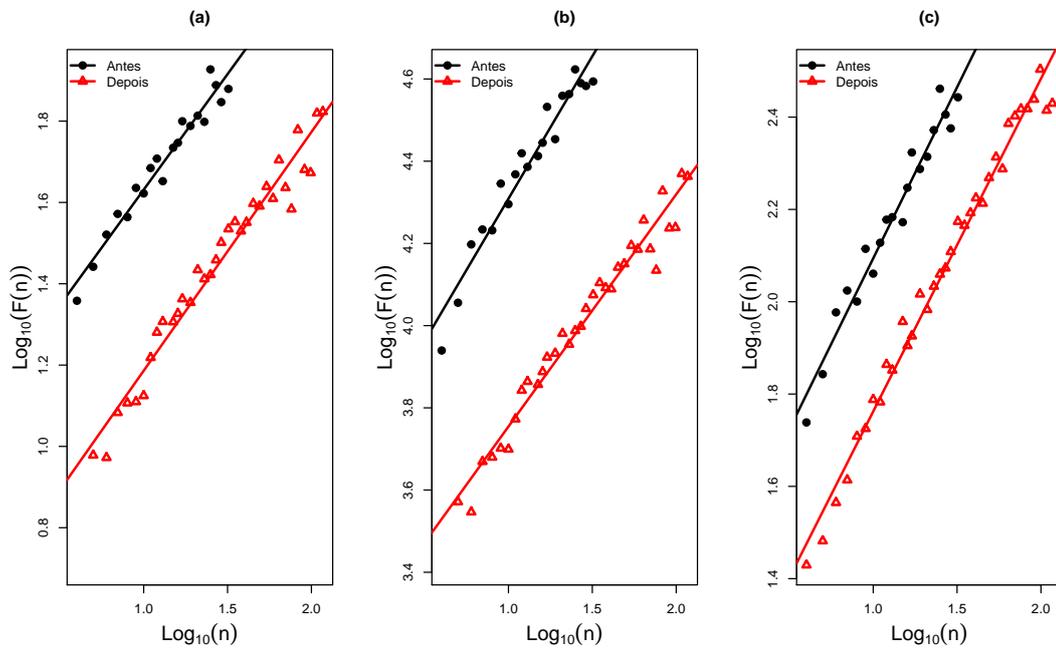
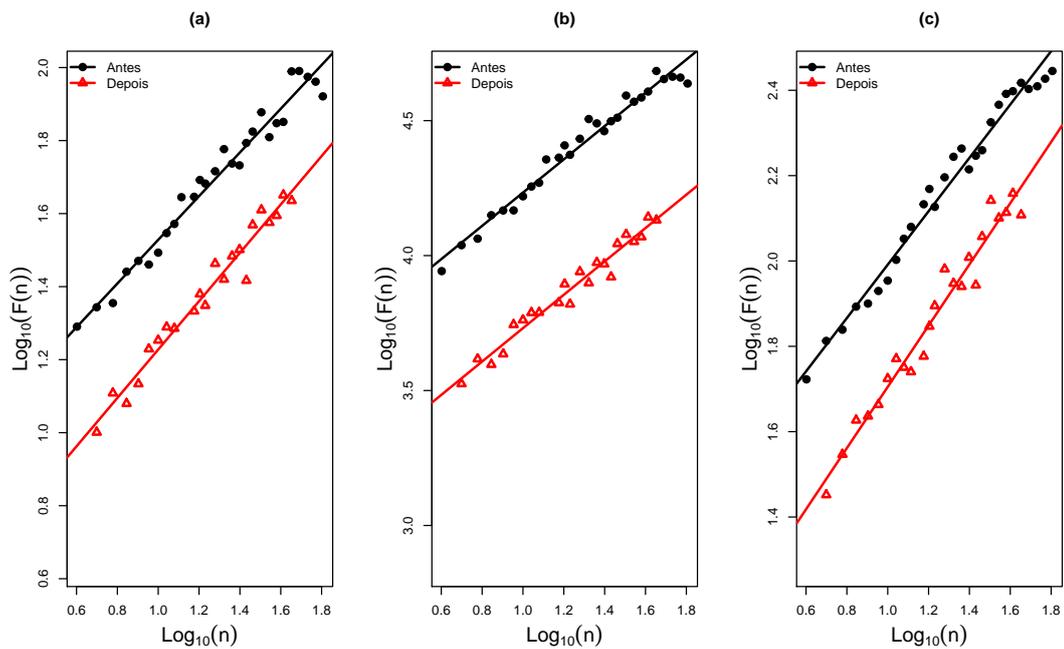


Figura 31 – DFA para duração (a), déficit (b) e intensidade (c) da seca considerando as séries antes e depois do funcionamento da Hidrelétrica de Xingó observadas na Estação Pão de Açúcar, tendo o limiar fixo de 70%.



5.3.2 Séries das variáveis associadas a cheia para as três estações, São Francisco, Juazeiro e Pão de Açúcar

Diferente do que ocorreu com a seca, ao observar as séries das variáveis associadas a cheia é possível perceber comportamentos mais distintos entre as comparações de antes e depois do funcionamento das hidrelétricas, principalmente na estação Juazeiro.

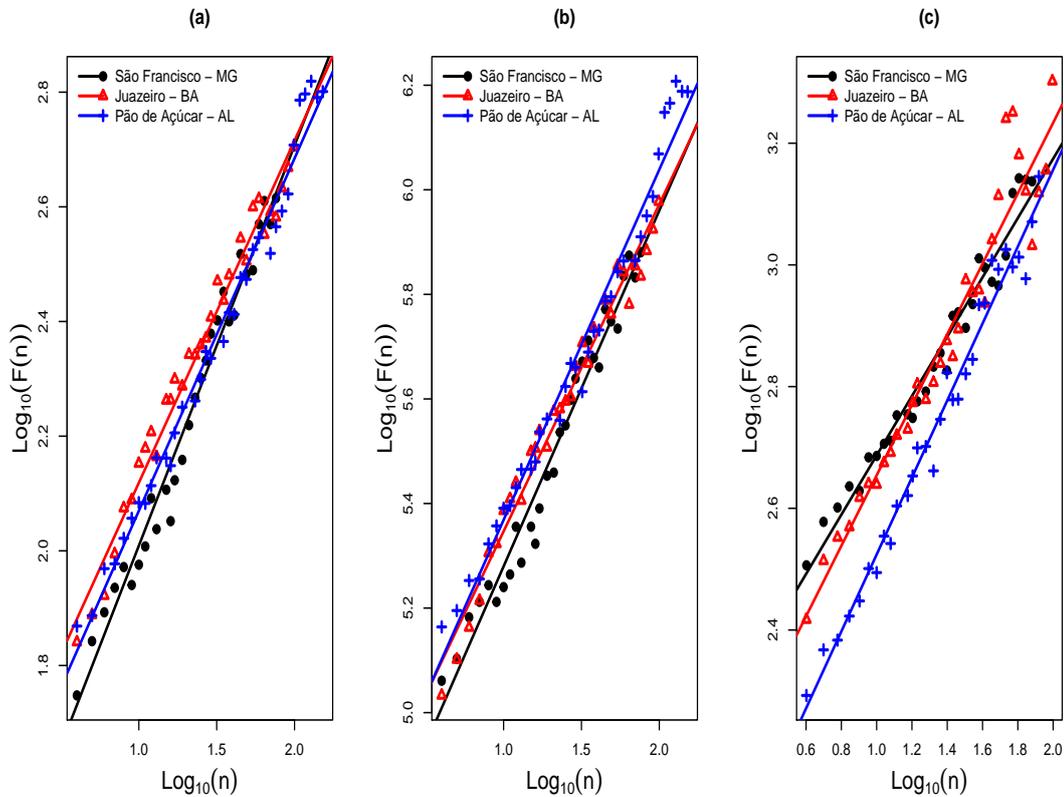
Na Tabela 7, por exemplo, verifica-se que para a estação São Francisco as séries de duração e sùficit são persistentes enquanto que a intensidade é aleatória. Para a estação Juazeiro as séries completa e antes de Sobradinho para duração da cheia apresentam dinâmica persistente enquanto que após o funcionamento de Sobradinho passam a ser antipersistentes e o mesmo comportamento ocorreu para o sùficit, já no caso da intensidade da cheia observa-se que a série “depois” é persistente enquanto que “antes” era aleatória. Já para Pão de Açúcar observa-se que as séries de duração, sùficit e intensidade da cheia são persistentes em todos os casos aumentando a persistência depois de Xingó.

Tabela 7 – Valores de α para as séries de duração, sùficit e intensidade da cheia para cada uma das estações.

	Séries	Duração	Sùficit	Intensidade
São Francisco	Completa	0,6981	0,6906	0,4875
Juazeiro	Completa	0,5997	0,6256	0,5793
	Antes de Sobradinho	0,6343	0,58233	0,4877
	Depois de Sobradinho	0,3223	0,2713	0,6666
Pão de Açúcar	Completa	0,6147	0,670	0,6323
	Antes de Sobradinho	0,6798	0,6999	0,5509
	Depois de Sobradinho	0,6319	0,5836	0,6237
	Depois de Xingó	0,7179	0,6753	0,6648

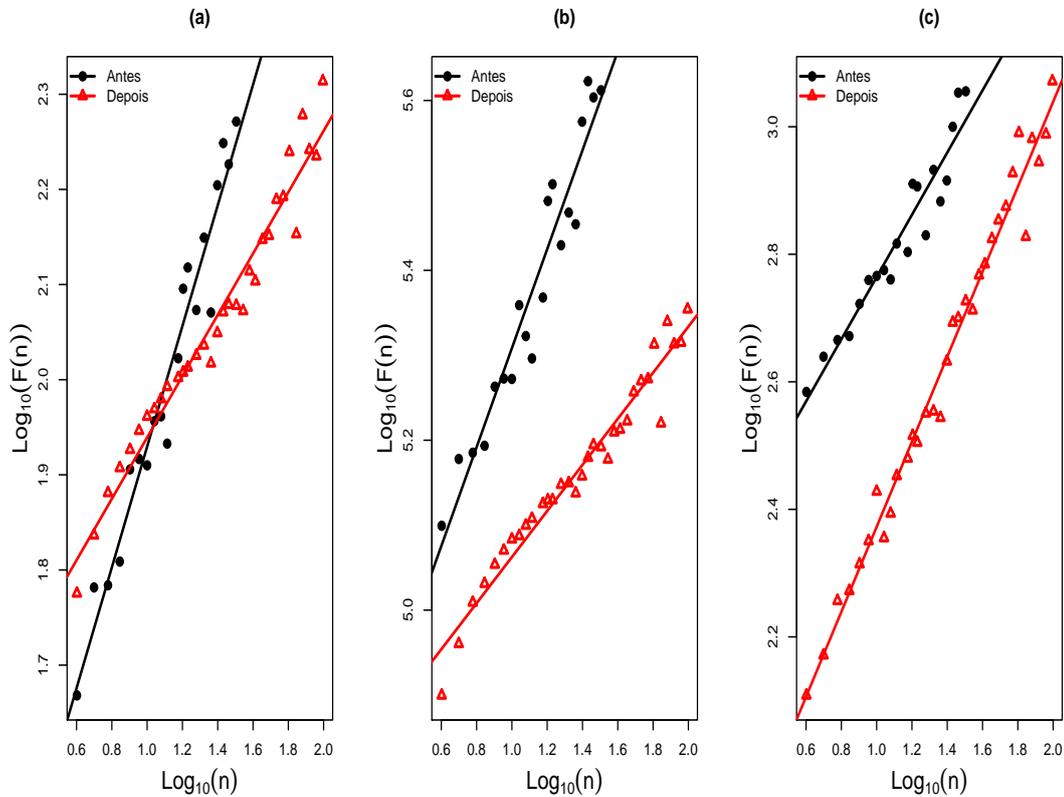
A seguir tem-se uma comparação das séries de duração (Figura 32 - **(a)**), sùficit (Figura 32 - **(b)**) e intensidade (Figura 32 - **(c)**) da cheia para as três estações, na qual é possível verificar que, em relação a duração, as três estações possuem comportamento semelhante. O mesmo foi observado também no sùficit, mas ao observar a intensidade da cheia verificou-se que São Francisco e Juazeiro praticamente apresentaram o mesmo comportamento, só Pão de Açúcar apresentou uma inclinação diferente.

Figura 32 – DFA para duração (a), sùficit (b) e intensidade (c) da cheia considerando as séries completas observadas nas Estações São Francisco, Juazeiro e Pão de Açúcar, tendo o limiar fixo de 70%.



Ao considerar as séries de antes e depois do funcionamento da Hidrelétrica de Sobradinho observadas na Estação Juazeiro confirma-se o que já havia sido visto na Tabela 7, que tanto a duração (Figura 33 - (a)) quanto o sùficit (Figura 33 - (b)) da cheia apresentam comportamento persistente (pequenas flutuações são seguidas por pequenas flutuações) antes de Sobradinho e comportamento antipersistente (grandes flutuações são seguidas por pequenas flutuações) após Sobradinho, enquanto que a intensidade (Figura 33 - (c)) para série de antes teve comportamento antipersistente (com pequenas flutuações seguidas de grandes flutuações) e para série de depois o comportamento é persistente (pequenas flutuações seguidas de pequenas flutuações).

Figura 33 – DFA para duração (a), sùficit (b) e intensidade (c) da cheia considerando as séries antes e depois do funcionamento da Hidrelétrica de Sobradinho observadas na Estação Juazeiro, tendo o limiar fixo de 70%.



No caso da estação Pão de Açúcar tem-se a confirmação através dos gráficos da Figura 34 de que todas as séries possuem comportamento persistente, neste caso, pequenas flutuações são seguidas por pequenas flutuações tanto antes quanto depois do funcionamento da hidrelétrica de Sobradinho e o mesmo acontece para as comparações relacionadas a Xingó (Figura 35).

Figura 34 – DFA para duração (a), sùficit (b) e intensidade (c) da cheia considerando as séries antes e depois do funcionamento da Hidrelétrica de Sobradinho observadas na Estação Pão de Açúcar, tendo o limiar fixo de 70%.

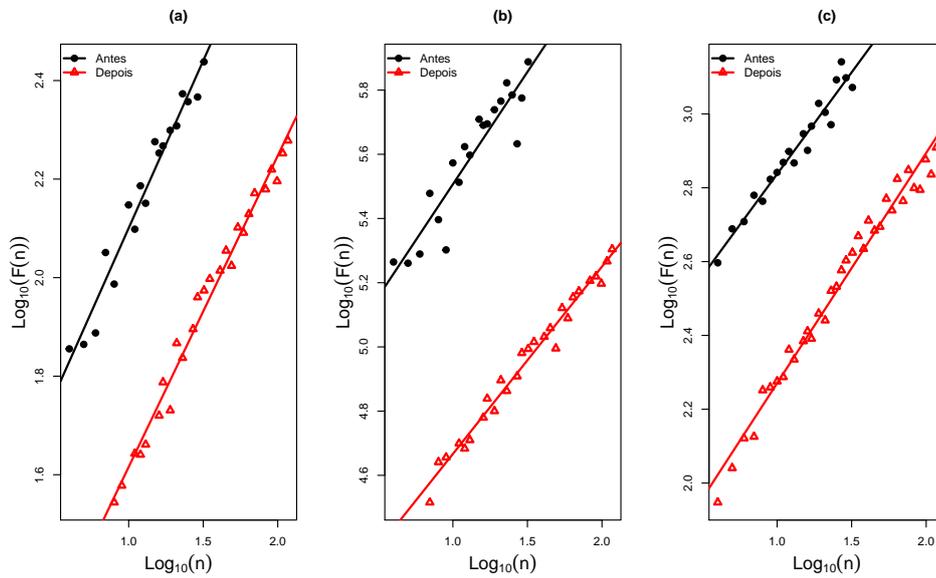
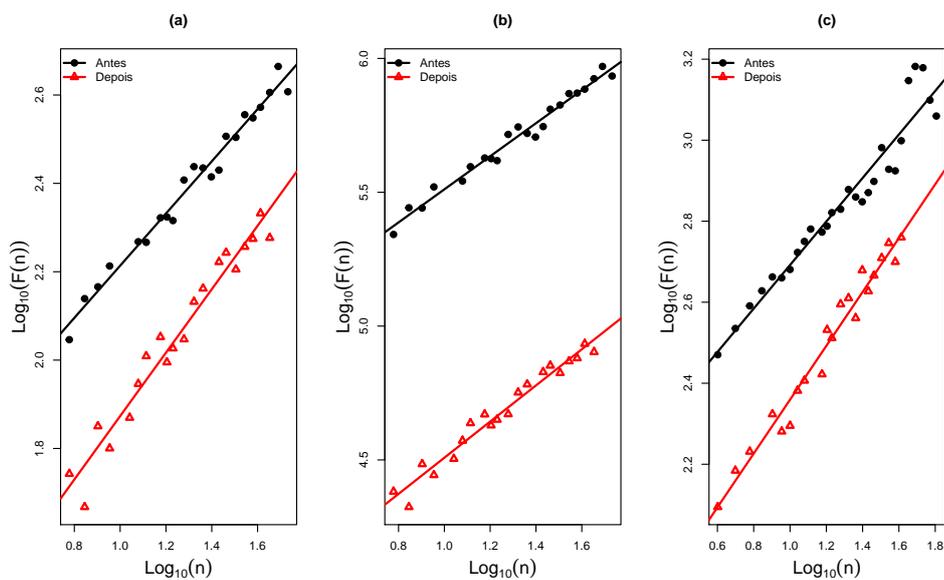


Figura 35 – DFA para duração (a), sùficit (b) e intensidade (c) da cheia considerando as séries antes e depois do funcionamento da Hidrelétrica de Xingó observadas na Estação Pão de Açúcar, tendo o limiar fixo de 70%.



6 Conclusões

Para estudar o impacto da construção das barragens nos episódios de seca da bacia do Rio São Francisco inicialmente definiu-se as variáveis relacionadas aos episódios de seca (duração, déficit e intensidade) com base no método de nível limiar (*Threshold Level*) para as quais aplicou-se técnicas tradicionais de Estatística e análise de sistemas complexos, considerando as estações São Francisco - MG, Juazeiro - BA e Pão de Açúcar - AL.

Observando a série de vazão na estação São Francisco verificou-se que ela apresenta praticamente o mesmo comportamento ao longo de todo o período observado, o que corrobora com o que era esperado, que ela não sofre influência do reservatório. Da mesma forma que ao se observar as estações Juazeiro e Pão de Açúcar percebe-se que há uma alteração no comportamento da série após a construção da barragem.

A Análise estatística mostrou que para as estações Juazeiro e Pão de Açúcar os casos de seca diminuíram após a construção de Sobradinho, o que confirmou-se através do teste de Mann-Whitney: apenas as séries de intensidade da estação Juazeiro e duração da seca na estação Pão de Açúcar, ambas no limiar de 90% fixo, não apresentaram diferença significativa entre as medianas de antes e depois do funcionamento da barragem, para as demais rejeitou-se a hipótese de igualdade, ao nível de 5% de significância.

A análise de lacunaridade mostrou que a estação São Francisco não sofreu influência da barragem e que nas demais estações houve uma regularização da vazão após a construção das barragens indicado pelos menores valores de lacunaridade.

A terceira técnica - DFA - foi utilizada não só para as variáveis associadas a seca como também para as associadas a cheia e, como nas técnicas anteriores, mostrou-se eficiente em detectar a influência das barragens. Para estação Juazeiro as séries de duração e déficit da seca depois de Sobradinho apresentaram comportamento aleatório enquanto que as demais, assim como todas as séries da estação Pão de Açúcar, mostraram-se persistentes. As séries temporais das variáveis relacionadas a cheia também mudaram o comportamento depois da construção das barragens. Na estação Juazeiro, as séries de duração e déficit alteraram da dinâmica persistente para a dinâmica antipersistente enquanto que na estação Pão de Açúcar estas séries foram persistentes aumentando a persistência depois da construção das barragens. A série de intensidade mostrou o mesmo comportamento para as duas estações: antes da construção de Sobradinho (regime natural) essas séries eram aleatórias e tornaram-se persistentes após a construção das barragens.

Assim, percebeu-se que, de um modo geral, a construção das barragens trouxe um impacto positivo, pois conseguiu cumprir o seu propósito que é de regularizar a vazão diminuindo assim os episódios de seca hidrológica ao longo da Bacia do Rio São Francisco.

Os resultados obtidos são de extrema importância para o planejamento e melhor entendimento da construção de barragens. E trabalhos futuros podem incluir o uso de outros métodos de análise de sistemas complexos como métodos baseados na teoria de informação e redes complexas.

Referências

- ALLAIN, C.; CLOITRE, M. Characterizing the lacunarity of random and deterministic fractal sets. *Physical review A*, APS, v. 44, n. 6, p. 3552, 1991.
- AYOADE, J. Introdução à climatologia para os trópicos;. *Rio de Janeiro: Bertrand Brasil*, 2001. Tradução de Maria Juraci Zani dos Santos. 6ª edição.
- BARRETO, I. D. d. C. A influência de reservatórios na vazão do Rio São Francisco. Dissertação (Mestrado em Biometria e Estatística Aplicada), Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2016.
- BRASIL. *Rios e bacias do Brasil formam uma das maiores redes fluviais do mundo*. 2009. Ministério do Meio Ambiente. Acesso em: 10 jun. 2018. Disponível em: <<http://www.brasil.gov.br/editoria/meio-ambiente/2009/10/rios-e-bacias-do-brasil-formam-uma-das-maiores-redes-fluviais-do-mundo>>.
- BRASIL. *Ciclo Hidrológico*. 2018. Ministério do Meio Ambiente. Acesso em: 10 jun. 2018. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/agua/recursos-hidricos/aguas-subterraneas/ciclo-hidrologico>>.
- BRASIL. *Água: um recurso cada vez mais ameaçado*. 2018. Ministério do Meio Ambiente. Acesso em: 27 ago. 2018. Disponível em: <http://www.mma.gov.br/estruturas/secex_consumo/_arquivos/3%20-%20mcs_agua.pdf>.
- BRASIL DAS ÁGUAS. *Região Hidrográfica do São Francisco*. 2018. Acesso em: 25 set. 2018. Disponível em: <<http://brasildasaguas.com.br/educacional/regioes-hidrograficas/regiao-hidrografica-do-sao-francisco/>>.
- CBHSF. *Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco*. 2018. Acesso em: 25 set. 2018. Disponível em: <<http://cbhsaofrancisco.org.br/planoderecursoshidricos/a-bacia/>>.
- CHESF. *Sistema Chesf - Sistema de Geração*. 2016. Acesso em: 25 set. 2018. Disponível em: <<https://www.chesf.gov.br/SistemaChesf/Pages/SistemaGeracao/SistemasGeracao.aspx>>.
- CRUZ, S. I. C. da. Caracterização e utilização de solos dispersivos nos aterros compactados da barragem de sobradinho. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Geotécnica. Núcleo de Geotecnia, Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto., 2008.
- DOUGHERTY, G.; HENEBRY, G. M. Fractal signature and lacunarity in the measurement of the texture of trabecular bone in clinical ct images. *Medical Engineering & Physics*, Elsevier, v. 23, n. 6, p. 369–380, 2001.
- DUARTE, J. G. P.; FARIAS, A. A. d.; SOUSA, F. d. A. S. d.; SOUZA, J. T. A.; RAMOS, M. M. Q. Secas e impactos na agropecuária no município de campina grande - pb. *Revista Brasileira de Meteorologia*, SciELO Brasil, v. 33, n. 2, p. 289–297, 2018.

- FLORINDO, J. B.; BRUNO, O. M. Texture classification based on lacunarity descriptors. In: SPRINGER. *International Conference on Image and Signal Processing*. [S.l.], 2012. p. 513–520.
- GOLDBERGER, A. L.; KOBALTER, K.; BHARGAVA, V. 1/f-like scaling in normal neutrophil dynamics: implications for hematologic monitoring. *IEEE transactions on biomedical engineering*, IEEE, n. 9, p. 874–876, 1986.
- GUERRERO, A.; SMITH, L. A. A maximum likelihood estimator for long-range persistence. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 355, n. 2-4, p. 619–632, 2005.
- KLEINKE, M. U.; GEBARA, M. J. Oficina de fractais - xx simpósio nacional de ensino de física. 2012.
- KOBAYASHI, M.; MUSHI, T. 1/f fluctuation of heartbeat period. *IEEE transactions on Biomedical Engineering*, IEEE, n. 6, p. 456–457, 1982.
- KOSCIELNY-BUNDE, E.; BUNDE, A.; HAVLIN, S.; GOLDREICH, Y. Analysis of daily temperature fluctuations. *Physica A: Statistical Mechanics and its Applications*, Elsevier, v. 231, n. 4, p. 393–396, 1996.
- LARSON, R.; FARBER, B. *Estatística Aplicada*. [S.l.]: Prentice Hall, 2007.
- LETURCQ, G. Territorial and spatial effects of dams. In: _____. *Dams in Brazil: Social and Demographical Impacts*. Cham: Springer International Publishing, 2018. p. 1–43. ISBN 978-3-319-94628-3. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/978-3-319-94628-3_1>.
- LLOYD-HUGHES, B.; SAUNDERS, M. A. A drought climatology for europe. *International journal of climatology*, Wiley Online Library, v. 22, n. 13, p. 1571–1592, 2002.
- LOON, A. F. V. Hydrological drought explained. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, Wiley Online Library, v. 2, n. 4, p. 359–392, 2015.
- LUCENA, L. R. R. d.; STOSIC, T.; FILHO, M. C.; SANTOS, C. R. D. Análise de lacunaridade de fenômenos agroambientais. *Rev. Bras. Biom.*, Lavras, v. 34, n. 2, p. 334–346, 2016.
- LUO, L.; LIN, H. Lacunarity and fractal analyses of soil macropores and preferential transport using micro-x-ray computed tomography. *Vadose Zone Journal*, Soil Science Society, v. 8, n. 1, p. 233–241, 2009.
- MAGALHÃES, M. N.; LIMA, A. C. P. de. Noções de probabilidade e estatística. 6ª Edição, *Edusp*, 2005.
- MALHI, Y.; ROMÁN-CUESTA, R. M. Analysis of lacunarity and scales of spatial homogeneity in ikonos images of amazonian tropical forest canopies. *Remote Sensing of Environment*, Elsevier, v. 112, n. 5, p. 2074–2087, 2008.
- MANDELROT, B.; FIOLEAIS, C.; LIMA, J. L. M. *Objectos Fractais: forma, acaso e dimensão*. [S.l.: s.n.], 1991.
- MANDELROT, B. B. The fractal geometry of nature/revised and enlarged edition. *New York, WH Freeman and Co., 1983, 495 p.*, 1983.

- MANN, H. B.; WHITNEY, D. R. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other. *The annals of mathematical statistics*, JSTOR, p. 50–60, 1947.
- MARSH, D. J.; OSBORN, J. L.; JR, A. W. C. 1/f fluctuations in arterial pressure and regulation of renal blood flow in dogs. *American Journal of Physiology-Renal Physiology*, American Physiological Society Bethesda, MD, v. 258, n. 5, p. F1394–F1400, 1990.
- MARTÍNEZ, M.; LANA, X.; BURGUEÑO, A.; SERRA, C. Lacunarity, predictability and predictive instability of the daily pluviometric regime in the iberian peninsula. *Nonlinear Processes in Geophysics*, Copernicus GmbH, v. 14, n. 2, p. 109–121, 2007.
- MATSOUKAS, C.; ISLAM, S.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. Detrended fluctuation analysis of rainfall and streamflow time series. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, Wiley Online Library, v. 105, n. D23, p. 29165–29172, 2000.
- MCKEE, T. B.; DOESKEN, N. J.; KLEIST, J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. In: AMERICAN METEOROLOGICAL SOCIETY BOSTON, MA. *Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology*. [S.l.], 1993. v. 17, n. 22, p. 179–183.
- MILONE, G. *Estatística: geral e aplicada*. [S.l.]: Pioneira Thomson Learning, 2004.
- MORETTIN, L. G. *Estatística básica: probabilidade e inferência: volume único*. [S.l.]: Pearson Prentice Hall, 2010.
- MORETTIN, P. A.; BUSSAB, W. O. *Estatística Básica*. [S.l.]: Editora Saraiva, 2000.
- NASCIMENTO, R. S. d. et al. Análise de correlação de longo alcance no registro da atividade elétrica cortical no fenômeno da depressão alastrante em ratos. Universidade Federal Rural de Pernambuco, 2008.
- PENG, C.-K.; BULDYREV, S. V.; HAVLIN, S.; SIMONS, M.; STANLEY, H. E.; GOLDBERGER, A. L. Mosaic organization of dna nucleotides. *Physical review E*, APS, v. 49, n. 2, p. 1685, 1994.
- PENG, C. K.; BULDYREV, S. V. et al. Long-range correlations in nucleotide sequences. *Nature*, Nature Publishing Group, v. 356, n. 6365, p. 168, 1992.
- PENG, C.-K.; HAVLIN, S.; STANLEY, H. E.; GOLDBERGER, A. L. Quantification of scaling exponents and crossover phenomena in nonstationary heartbeat time series. *Chaos: An Interdisciplinary Journal of Nonlinear Science*, AIP, v. 5, n. 1, p. 82–87, 1995.
- PENG, C.-K.; MIETUS, J.; HAUSDORFF, J.; HAVLIN, S.; STANLEY, H. E.; GOLDBERGER, A. L. Long-range anticorrelations and non-gaussian behavior of the heartbeat. *Physical review letters*, APS, v. 70, n. 9, p. 1343, 1993.
- PLOTNICK, R. E.; GARDNER, R. H.; HARGROVE, W. W.; PRESTEGAARD, K.; PERLMUTTER, M. Lacunarity analysis: a general technique for the analysis of spatial patterns. *Physical review E*, APS, v. 53, n. 5, p. 5461, 1996.
- R Core Team. *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. Vienna, Austria, 2018. Disponível em: <<https://www.R-project.org/>>.

- RANGECROFT, S.; LOON, A. V.; MAUREIRA, H.; VERBIST, K.; HANNAH, D. Multi-method assessment of reservoir effects on hydrological droughts in an arid region. *Earth Syst. Dyn. Discuss.*, p. 1–32, 2016.
- SANTOS, M. J. J. dos. Caracterização e monitorização de secas. Instituto da Água - Direção de Serviços de Recursos Hídricos, 1998.
- SAWATPRU, K.; KONYAI, S. Hydrological drought frequency analysis of the yom river, thailand. *Engineering and Applied Science Research*, v. 43, n. 2, p. 100–107, 2016.
- SHAPIRO, S. S.; WILK, M. B. An analysis of variance test for normality (complete samples). *Biometrika*, [Oxford University Press, Biometrika Trust], v. 52, n. 3/4, p. 591–611, 1965. ISSN 00063444. Disponível em: <<http://www.jstor.org/stable/2333709>>.
- SIGAUD, L. *Efeitos sociais de grandes projetos hidrelétricos: as barragens de Sobradinho e Machadinho*. [S.l.]: Programa de Pós-Graduação em Antropologia Social, Museu Nacional-UFRJ, 1986.
- SPIEGEL, M. R.; SCHILLER, J. J.; SRINIVASAN, R. A. *Probabilidade e Estatística: Coleção Schaum*. [S.l.]: Bookman Editora, 2016.
- SUAPESQUISA. *Bacia do Rio São Francisco - Informações sobre a bacia hidrográfica do Rio São Francisco, principais rios, biomas, usinas hidrelétricas, localização*. 2018. Acesso em: 17 out. 2017. Disponível em: <http://www.suapesquisa.com/geografia/bacia_rio_sao_francisco.htm>.
- SZETO, H. H.; CHENG, P. Y.; DECENA, J. A.; CHENG, Y.; WU, D.-L.; DWYER, G. Fractal properties in fetal breathing dynamics. *American Journal of Physiology-Regulatory, Integrative and Comparative Physiology*, v. 263, n. 1, p. R141–R147, 1992.
- TALLAKSEN, L. M.; LANEN, H. A. V. *Hydrological drought: processes and estimation methods for streamflow and groundwater*. [S.l.]: Elsevier, 2004. v. 48.
- TAQQU, M. S.; TEVEROVSKY, V.; WILLINGER, W. Estimators for long-range dependence: an empirical study. *Fractals*, World Scientific, v. 3, n. 04, p. 785–798, 1995.
- WEIERSTRASS, K. *Über die geodätischen Linien auf dem dreiachsigen Ellipsoid*. [S.l.]: Königl. Akademie der Wissenschaften zu Berlin, 1861.
- WILHITE, D. A.; GLANTZ, M. H. Understanding: the drought phenomenon: the role of definitions. *Water international*, Taylor & Francis, v. 10, n. 3, p. 111–120, 1985.
- YAHIAOUI, A.; TOUAÏBIA, B.; BOUVIER, C. Frequency analysis of the hydrological drought regime. Case of oued Mina catchment in western of Algeria. *Nature & Technology*, Hassiba Benbouali University of Chlef/Université Hassiba Benbouali de Chlef, n. 1, p. 3, 2009.
- YEVJEVICH, V. M. An objective approach to definitions and investigations of continental hydrologic droughts. *Hydrology papers (Colorado State University); no. 23*, Colorado State University. Libraries, 1967.
- YEVJEVICH, V. M. Methods for determining statistical properties of droughts, in coping with droughts. *Water Resources Publications, Fort Collins, Colo., USA*, 1983.