

Maíra de Oliveira Santos

**Alterações hidrológicas na bacia do Rio São Francisco originadas
pela construção de barragens**

Recife, PE

Novembro de 2018



Universidade Federal Rural de Pernambuco
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Programa de Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada

Maíra de Oliveira Santos

**Alterações hidrológicas na bacia do Rio São Francisco originadas pela
construção de barragens**

Recife, PE
Novembro de 2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
Sistema Integrado de Bibliotecas da UFRPE
Biblioteca Central, Recife-PE, Brasil

S237a Santos, Máira de Oliveira
Alterações hidrológicas na bacia do Rio São Francisco originadas
pela construção de barragens/ Máira de Oliveira Santos. – 2018.
116 f.: il.

Orientadora: Tatijana Stošić.
Tese (Doutorado) – Universidade Federal Rural de Pernambuco,
Programa de Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada,
Recife, BR-PE, 2018.

Inclui referências e apêndice(s).

1. Hidrologia 2. Indicadores 3. Usinas hidrelétricas 4. Range of
variability approach I. Stošić, Tatijana, orient. II. Título

CDD 574.018

Maíra de Oliveira Santos

**Alterações hidrológicas na bacia do Rio São Francisco originadas pela
construção de barragens**

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

Área de Concentração: Biometria e Estatística Aplicada.

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

Recife, PE

Novembro de 2018

Universidade Federal Rural de Pernambuco
Pró-Reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação
Programa de Pós-Graduação em Biometria e Estatística Aplicada

**Alterações hidrológicas na bacia do Rio São Francisco originadas pela
construção de barragens**

Maíra de Oliveira Santos

Tese julgada adequada para obtenção do título
de Doutora em Biometria e Estatística
Aplicada, defendida e aprovada em
27/11/2018 pela Banca Examinadora.

Orientadora:

Prof^ª. Dr^a. Tatijana Stošić
UFRPE - Departamento de Estatística e Informática

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Sílvio Fernando Alves Xavier Júnior
UEPB - Departamento de Estatística

Prof. Dr. Antonio Samuel Alves da Silva
UFRPE - Departamento de Estatística e Informática

Prof. Dr. Lucian Bogdan Bejan
UFRPE - Departamento de Estatística e Informática

Prof. Dr. Moacyr Cunha Filho
UFRPE - Departamento de Estatística e Informática

AGRADECIMENTOS

Agradeço essencialmente a Deus que nunca me permitiu estar só, que me ajudou a vencer cada pedra que aparecia no caminho, amadurecendo quem eu hoje sou através da prática caridosa da misericórdia para com o próximo.

À minha família, em especial aos meus pais Armando e Jacira pelo incentivo à educação desde o berço, e ao meu marido Cristiano pelo apoio, incentivo e paciência diante dos momentos de estresse.

À minha orientadora, Prof^ª. Dr^ª. Tatijana Stošic pela confiança na minha capacidade de realização, pelo incentivo constante, pela paciência comigo, pelos conselhos, pelas conversas e pela orientação fundamental para o desenvolvimento desta pesquisa. É um orgulho ser orientada por uma docente que se preocupa não só em orientar alunos para se tornarem mestres e doutores, mas se preocupa também com as pessoas, seu futuro, sua carreira, sua saúde e seus sentimentos, dando suporte sempre que necessário e em vários aspectos da vida.

Aos membros da banca que me ajudaram trazendo novos pontos de vista, ao departamento, e a todos os professores e funcionários que em seu trabalho cotidiano contribuem para que os alunos alcancem seus objetivos e realizem os seus sonhos.

Aos amigos mestrandos e doutorandos que conheci no PPGBEA, pelo suporte nos momentos difíceis e por compartilharem os momentos alegres. É um orgulho perceber que, ao contrário de outros programas de pós-graduação, entre os alunos do PPGBEA predomina a cooperação e não a competição.

RESUMO

O Rio São Francisco contém, ao longo do seu percurso, cinco usinas hidrelétricas, entre elas as Usinas Hidrelétricas de Três Marias-MG, de Sobradinho-BA, e de Xingó-AL. As hidrelétricas são uma das fontes de energia mais baratas, e por isso é a mais usada, porém a construção de hidrelétricas pode causar vários impactos ao meio ambiente. Avaliar se houve alteração da vazão fornece base para ajudar na gestão ambiental e nos projetos de recuperação e restauração do ecossistema, a fim de torná-lo o mais próximo possível do estado anterior. Para estudar a variabilidade das características hidrológicas da vazão a jusante das represas utilizou-se o método de Indicadores de Alteração Hidrológica - IHA, juntamente com o Range of Variability Approach - RVA. O método IHA gera 33 indicadores hidrológicos de relevância ecológica, os quais são avaliados utilizando o RVA. Nos municípios de São Francisco, Juazeiro e Pão de Açúcar foram analisadas as alterações hidrológicas decorrentes das construções dos reservatórios de Três Marias, Sobradinho e Xingó, respectivamente. Adicionalmente, foram analisadas as alterações hidrológicas no município de Pão de Açúcar provenientes da construção de Sobradinho. A alteração hidrológica no município de Juazeiro, originada pela construção de Sobradinho, foi superior às demais séries analisadas, devido aos indicadores da vazão média mensal de junho e do número de reversões, que apresentaram fortes alterações hidrológicas. A análise da construção de Sobradinho, no município de Pão de Açúcar apresentou a segunda maior alteração hidrológica, devido aos indicadores da vazão média mensal de fevereiro e da taxa de crescimento, os quais apresentaram fortes alterações hidrológicas. As análises com as maiores quantidades de indicadores alterados foram da construção de Xingó em Pão de Açúcar, e da construção de Sobradinho em Juazeiro. Por outro lado, a análise da construção de Xingó em Pão de Açúcar apresentou a menor alteração hidrológica (42,2%). A análise da barragem de Três Marias apresentou a menor quantidade de indicadores fortemente alterados. Os limites RVA encontrados fornecem base para ajudar na gestão ambiental e nos projetos de recuperação e restauração do ecossistema.

Palavras chave: Indicadores de Alteração Hidrológica, Range of Variability Approach, Sobradinho, Três Marias, Xingó.

ABSTRACT

The São Francisco River has five hydroelectric plants along its route, including the Três Marias-MG hydroelectric plants, Sobradinho-BA hydroelectric plants, and Xingó hydroelectric plants-AL. Hydroelectric plants are one of the cheapest energy sources and the most widely used, but its construction causes several impacts to the environment. It is important to assess the impact and provide the basis to assist in environmental management and ecosystem restoration projects in order to make it as close as possible to the previous state. In this work, the Indicators of Hydrologic Alteration - IHA method and the Range of Variability Approach - RVA method are used to study the variability of hydrological characteristics on the observed daily flow below the dams. The IHA method generates 33 hydrological indicators of ecological relevance, which are evaluated using the RVA. We analyzed hydrological changes in flow data from São Francisco-MG, Juazeiro-BA e Pão de Açúcar-AL caused by the Três Marias, Sobradinho and Xingó reservoirs constructions. Also we analyzed hydrological changes in flow data from Pão de Açúcar-AL caused by the Sobradinho reservoir construction. The hydrological alteration caused by the construction of Sobradinho in Juazeiro was superior to the other series analyzed, due to changes of the June monthly average flow indicator and the number of reversals, which presented strong hydrological alterations. The impact of the Sobradinho reservoir construction in Pão de Açúcar presented the second highest hydrological alteration, due to the February average flow indicator and the rise rate indicator, both presented strong hydrological changes. The analysis of the Xingó reservoir in Pão de Açúcar, and the analysis of the Sobradinho reservoir in Juazeiro, presented the highest number of heavily altered indicators. On the other hand, the analysis of the Xingó reservoir in Pão de Açúcar presented the lowest hydrological alteration (42.2%). The analysis of the Três Marias reservoir in San Francisco presented the lowest number of heavily altered indicators. The fit RVA limits form the basis for assisting in environmental management and ecosystem restoration and restoration projects.

Keywords: Indicators of Hydrologic Alteration, Range of Variability Approach, Sobradinho, Três Marias, Xingó.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Rio São Francisco. Fonte: www.ecodebate.com.br	23
Figura 2. Precipitação anual e limites de variação aceitos para análise no município de São Francisco (MG) no período de 1939 a 2014.....	33
Figura 3. Série temporal da vazão diária no município de São Francisco (MG) no período de 1939 a 2014, com períodos correspondentes da seca e cheia climatológica excluídos.....	33
Figura 4. Alteração hidrológica no município de São Francisco originadas pela construção da barragem de Três Marias.	36
Figura 5. Distribuição sazonal das vazões medianas mensais antes e depois da construção do reservatório de Três Marias, bem como seus respectivos limites do RVA.	36
Figura 6. Série temporal da vazão mensal de junho do Rio São Francisco a jusante de da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.	37
Figura 7. Série temporal da vazão mensal de julho do Rio São Francisco a jusante de da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.	37
Figura 8. Série temporal da vazão mensal de setembro do Rio São Francisco a jusante de da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.	38
Figura 9. Precipitação anual e limites de variação aceitos para análise no município de Juazeiro (BA) no período de 1930 a 2009.....	40
Figura 10. Série temporal da vazão diária no município de Juazeiro (BA), com períodos correspondentes da seca e cheia climatológica excluídos.	40
Figura 11. Fatores de alteração hidrológica no município de Juazeiro originadas pela construção da barragem de Sobradinho.....	43
Figura 12. Distribuição mensal das vazões no município de Juazeiro antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.	43
Figura 13. Série temporal do número de reversões da vazão do Rio São Francisco no município de Juazeiro antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.....	45
Figura 14. Precipitação anual e limites de variação aceitos dos anos para análise no município de Pão de Açúcar (AL) no período de 1936 a 1993.	46
Figura 15. Série temporal da vazão diária no município de Pão de Açúcar (AL) no período de 1936 a 1993, com períodos correspondentes da seca e cheia climatológica excluídos.....	46
Figura 16. Fatores de alteração hidrológica no município de Pão de Açúcar -AL decorrentes da construção da barragem de Sobradinho.	49

Figura 17. Distribuição mensal das vazões no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.	50
Figura 18. Série temporal da taxa de crescimento da vazão do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.	52
Figura 19. Precipitação anual e limites de variação aceitos dos anos para análise no município de Pão de Açúcar (AL) no período de 1973 a 2016.	53
Figura 20. Série temporal da vazão diária no município de Pão de Açúcar (AL) no período de 1973 a 2016, com períodos correspondentes da seca e cheia climatológica excluídos.....	53
Figura 21. Fatores de alteração hidrológica para todos os indicadores, no Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar originadas pela construção da barragem de Xingó.....	56
Figura 22. Distribuição mensal das vazões no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.	56
Figura 23. Série temporal da vazão mensal de janeiro do Rio São Francisco a jusante da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.	73
Figura 24. Série temporal da vazão mensal de fevereiro do Rio São Francisco a jusante da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.	73
Figura 25. Série temporal da vazão mensal de março do Rio São Francisco a jusante da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.	73
Figura 26. Série temporal da vazão mensal de abril do Rio São Francisco a jusante da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.	74
Figura 27. Série temporal da vazão mensal de maio do Rio São Francisco a jusante da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.	74
Figura 28. Série temporal da vazão mensal de agosto do Rio São Francisco a jusante da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.	74
Figura 29. Série temporal da vazão mensal de outubro do Rio São Francisco a jusante da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.	75
Figura 30. Série temporal da vazão mensal de novembro do Rio São Francisco a jusante da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.	75
Figura 31. Série temporal da vazão mensal de dezembro do Rio São Francisco a jusante da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.	75
Figura 32. Série temporal da vazão mínima diária, a cada ano, do Rio São Francisco a jusante da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.....	76
Figura 33. Série temporal da vazão mínima de 3 dias, a cada ano, do Rio São Francisco a jusante da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.	76

Figura 34. Série temporal da vazão mínima de 7 dias, a cada ano, do Rio São Francisco a jusante da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.	76
Figura 35. Série temporal da vazão mínima de 30 dias, a cada ano, do Rio São Francisco a jusante da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.	77
Figura 36. Série temporal da vazão mínima de 90 dias, a cada ano, do Rio São Francisco a jusante da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.	77
Figura 37. Série temporal da vazão máxima diária, a cada ano, do Rio São Francisco a jusante de da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.	77
Figura 38. Série temporal da vazão máxima de 3 dias, a cada ano, do Rio São Francisco a jusante de da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.	78
Figura 39. Série temporal da vazão máxima de 7 dias, a cada ano, do Rio São Francisco a jusante de da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.	78
Figura 40. Série temporal da vazão máxima de 30 dias, a cada ano, do Rio São Francisco a jusante de da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.	78
Figura 41. Série temporal da vazão máxima de 90 dias, a cada ano, do Rio São Francisco a jusante de da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.	79
Figura 42. Série temporal do número de pulsos de baixa do Rio São Francisco a jusante da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.	79
Figura 43. Série temporal da duração dos pulsos de baixa do Rio São Francisco a jusante da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.	79
Figura 44. Série temporal do número de pulsos de alta do Rio São Francisco a jusante da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.	80
Figura 45. Série temporal da duração dos pulsos de alta do Rio São Francisco a jusante da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.	80
Figura 46. Série temporal da taxa de crescimento da vazão do Rio São Francisco a jusante da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.	80
Figura 47. Série temporal da taxa de decréscimo da vazão do Rio São Francisco a jusante da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.	81
Figura 48. Série temporal do número de reversões da vazão do Rio São Francisco a jusante da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.	81
Figura 49. Série temporal da vazão mensal de janeiro do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.	82
Figura 50. Série temporal da vazão mensal de fevereiro do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.	82

Figura 51. Série temporal da vazão mensal de março do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.	82
Figura 52. Série temporal da vazão mensal de abril do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.	83
Figura 53. Série temporal da vazão mensal de maio do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.	83
Figura 54. Série temporal da vazão mensal de junho do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.	83
Figura 55. Série temporal da vazão mensal de julho do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.	84
Figura 56. Série temporal da vazão mensal de agosto do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.	84
Figura 57. Série temporal da vazão mensal de setembro do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.	84
Figura 58. Série temporal da vazão mensal de outubro do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.	85
Figura 59. Série temporal da vazão mensal de novembro do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.	85
Figura 60. Série temporal da vazão mensal de dezembro do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.	85
Figura 61. Série temporal da vazão mínima anual diária, a cada ano, do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.	86
Figura 62. Série temporal da vazão mínima anual de 3 dias, a cada ano, do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.	86
Figura 63. Série temporal da vazão mínima anual de 7 dias, a cada ano, do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.	86
Figura 64. Série temporal da vazão mínima anual de 30 dias, a cada ano, do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.	87
Figura 65. Série temporal da vazão mínima anual de 90 dias, a cada ano, do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.	87
Figura 66. Série temporal da vazão máxima anual diária, a cada ano, do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.	87
Figura 67. Série temporal da vazão máxima anual de 3 dias, a cada ano, do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.	88

Figura 68. Série temporal da vazão máxima anual de 7 dias, a cada ano, do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.	88
Figura 69. Série temporal da vazão máxima anual de 30 dias, a cada ano, do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.	88
Figura 70. Série temporal da vazão máxima anual de 90 dias, a cada ano, do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.	89
Figura 71. Série temporal do número de pulsos de baixa do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.	89
Figura 72. Série temporal da duração dos pulsos de baixa do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.	89
Figura 73. Série temporal da frequência dos pulsos de alta do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.	90
Figura 74. Série temporal da duração dos pulsos de alta do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.	90
Figura 75. Série temporal da taxa de crescimento da vazão do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.	90
Figura 76. Série temporal da taxa de decrescimento da vazão do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.	91
Figura 77. Série temporal da vazão mensal de outubro do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.	92
Figura 78. Série temporal da vazão mensal de novembro do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.	92
Figura 79. Série temporal da vazão mensal de dezembro do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.	92
Figura 80. Série temporal da vazão mensal de janeiro do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.	93
Figura 81. Série temporal da vazão mensal de fevereiro do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.	93
Figura 82. Série temporal da vazão mensal de março do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.	93
Figura 83. Série temporal da vazão mensal de abril do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.	94
Figura 84. Série temporal da vazão mensal de maio do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.	94

Figura 85. Série temporal da vazão mensal de junho do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.....	94
Figura 86. Série temporal da vazão mensal de julho do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.....	95
Figura 87. Série temporal da vazão mensal de agosto do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.....	95
Figura 88. Série temporal da vazão mensal de setembro do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.....	95
Figura 89. Série temporal da vazão mínima anual diária do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.....	96
Figura 90. Série temporal da vazão mínima anual de 3 dias do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.....	96
Figura 91. Série temporal da vazão mínima anual de 7 dias do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.....	96
Figura 92. Série temporal da vazão mínima anual de 30 dias do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.....	97
Figura 93. Série temporal da vazão mínima anual de 90 dias do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.....	97
Figura 94. Série temporal da vazão máxima anual diária do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.....	97
Figura 95. Série temporal da vazão máxima anual de 3 dias do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.....	98
Figura 96. Série temporal da vazão máxima anual de 7 dias do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.....	98
Figura 97. Série temporal da vazão máxima anual de 30 dias do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.....	98
Figura 98. Série temporal da vazão máxima anual de 90 dias do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.....	99
Figura 99. Série temporal do número de pulsos de baixa do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.....	99
Figura 100. Série temporal da duração dos pulsos de baixa do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.....	99
Figura 101. Série temporal do número de pulsos de alta do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.....	100

Figura 102. Série temporal da duração dos pulsos de alta do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.	100
Figura 103. Série temporal da taxa de queda da vazão do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.	101
Figura 104. Série temporal do número de reversões da vazão do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho. ...	101
Figura 105. Série temporal da vazão mensal de outubro do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.	102
Figura 106. Série temporal da vazão mensal de novembro do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.	102
Figura 107. Série temporal da vazão mensal de dezembro do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.	102
Figura 108. Série temporal da vazão mensal de janeiro do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.	103
Figura 109. Série temporal da vazão mensal de fevereiro do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.	103
Figura 110. Série temporal da vazão mensal de março do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.	103
Figura 111. Série temporal da vazão mensal de abril do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.	104
Figura 112. Série temporal da vazão mensal de maio do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.	104
Figura 113. Série temporal da vazão mensal de junho do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.	104
Figura 114. Série temporal da vazão mensal de julho do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.	105
Figura 115. Série temporal da vazão mensal de agosto do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.	105
Figura 116. Série temporal da vazão mensal de setembro do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.	105
Figura 117. Série temporal da vazão mínima anual diária do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.	106
Figura 118. Série temporal da vazão mínima anual de 3 dias do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.	106

Figura 119. Série temporal da vazão mínima anual de 7 dias do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.	106
Figura 120. Série temporal da vazão mínima anual de 30 dias do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.	107
Figura 121. Série temporal da vazão mínima anual de 90 dias do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.	107
Figura 122. Série temporal da vazão máxima anual diária do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.....	107
Figura 123. Série temporal da vazão máxima anual de 3 dias do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.	108
Figura 124. Série temporal da vazão máxima anual de 7 dias do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.	108
Figura 125. Série temporal da vazão máxima anual de 30 dias do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.	108
Figura 126. Série temporal da vazão máxima anual de 90 dias do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.	109
Figura 127. Série temporal do número de pulsos de baixa do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.....	109
Figura 128. Série temporal da duração dos pulsos de baixa do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.....	109
Figura 129. Série temporal do número de pulsos de alta do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.	110
Figura 130. Série temporal da duração dos pulsos de alta do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.....	110
Figura 131. Série temporal da taxa de crescimento da vazão do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.	110
Figura 132. Série temporal da taxa de queda da vazão do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.	111
Figura 133. Série temporal do número de reversões da vazão do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.	111

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Parâmetros hidrológicos (IHA) e as suas influências no ecossistema (Richter et al., 1998).....	26
Tabela 2. Valores da mediana, mínimo, máximo, limites RVA e Fator de Alteração Hidrológica (HA) dos 33 indicadores do IHA da vazão do Rio São Francisco, no município de São Francisco, relacionados à construção da barragem de Três Marias.	35
Tabela 3. Estatística descritiva, limites RVA e Fator de Alteração Hidrológico (HA) dos 33 indicadores do IHA da vazão do Rio São Francisco no Município de Juazeiro Antes e Após a Construção da Barragem de Sobradinho.	42
Tabela 4. Valores da mediana, mínimo, máximo, limites RVA e Fator de Alteração Hidrológica (HA) dos 33 indicadores do IHA da vazão do Rio São Francisco, no Município de Pão de Açúcar, relacionados à construção da barragem de Sobradinho.....	48
Tabela 5. Valores da mediana, mínimo, máximo, limites RVA e Fator de Alteração Hidrológica (HA) dos 33 indicadores do IHA da vazão do Rio São Francisco, no município de Pão de Açúcar, relacionados à construção da barragem de Xingó.....	55
Tabela 6. Fatores de Alteração Hidrológica e grau de alteração hidrológica por local, fator de impacto e período.	60
Tabela 7. Grau geral de alteração hidrológica aprimorado (IODHA) geral e por grupo.	63

SUMÁRIO

1. Introdução.....	13
2. Revisão de Literatura	17
2.1 Ecossistemas Ribeirinhos	17
2.2 Bacia Hidrográfica e Processos Hidrológicos.....	18
2.3 Hidrelétricas	19
2.4 Rio São Francisco.....	20
3. Material e Métodos.....	23
3.1 Descrição dos Dados	23
3.2 Precipitação.....	24
3.3 Indicadores de Alteração Hidrológica (IHA)	24
3.4 Range of Variability Approach (RVA).....	30
3.5 Grau Geral de Alteração Hidrológica.....	31
4. Resultados e Discussão	33
4.1 Alterações hidrológicas à jusante da barragem de Três Marias após a sua construção	33
4.2 Alterações hidrológicas à jusante da barragem de Sobradinho após a sua construção.....	40
4.3 Alterações hidrológicas à jusante da barragem de Xingó originadas pela construção da barragem de Sobradinho	46
4.4 Alterações hidrológicas à jusante da barragem de Xingó originadas pela sua construção ..	53
4.5 Avaliação integrada dos indicadores de alteração hidrológica nos municípios de São Francisco, Juazeiro e Pão de Açúcar.....	59
5. Conclusões.....	64
6. Referências.....	65
APÊNDICES	72
APÊNDICE A - Séries temporais dos indicadores de alteração hidrológica da seção 4.1.....	73
APÊNDICE B - Séries temporais dos indicadores de alteração hidrológica da seção 4.2.....	82
APÊNDICE C - Séries temporais dos indicadores de alteração hidrológica da seção 4.3.....	92
APÊNDICE D - Séries temporais dos indicadores de alteração hidrológica da seção 4.4.....	102

1. INTRODUÇÃO

Todos os milhares de espécies de seres vivos, na fauna e na flora, dependem de um ecossistema equilibrado para conseguirem viver e se desenvolver. Para as plantas, animais e pessoas que vivem ao longo do curso de um rio, a quantidade, as variações e regularidade das águas são muito importantes. Grande parte da água usada pela humanidade vem dos rios. Essa água é usada na agricultura, pecuária, consumo, cozimento, lavagem, produção de alimentos, entre outros. Já para os animais e plantas que dependem dos rios, além da qualidade da água, qualquer outra alteração, como volume, vazão e velocidade, pode representar, direta ou indiretamente, um grande perigo para suas vidas (ACREMAN e DUNBAR, 2004).

Os rios também são uma importante fonte de energia elétrica obtidas a partir do aproveitamento do seu potencial hidráulico (capacidade de produção de energia elétrica), calculado com base no desnível e na vazão de água. Com esse propósito, são utilizadas as hidrelétricas, que são uma das fontes de energia mais baratas entre as disponíveis e, por isso, é a mais usada. Suas barragens ajudam no controle de inundações, na retenção de sedimentos e na irrigação. Porém, a construção de hidrelétricas causa vários impactos ao meio ambiente, como o alagamento de áreas vizinhas, deslocamento de pessoas, aumento do nível dos rios, podendo, inclusive, mudar o curso do rio represado, alteração nos lençóis freáticos, aumento da umidade, entre outros. Por esse motivo, antes da construção de uma usina hidrelétrica é necessário que se faça um estudo da viabilidade desse projeto, com o envolvimento de diversos profissionais, os quais utilizam em seus estudos modelos matemáticos ou físicos (ROSENBERG et al., 1997).

O exemplo recente da construção da hidrelétrica de Belo Monte (rio Xingu) mostra os vários pontos a serem discutidos a respeito da execução de um projeto deste tipo. De um lado está a política energética do país e do outro, o futuro da ocupação amazônica (BERMANN, 2012). Um grupo de 40 cientistas (SANTOS e HERNANDEZ, 2009) elaboraram uma análise apontando vários impactos da construção da usina, indicando que muitos deles são irreversíveis ou não podem ser compensados através de políticas governamentais.

Um dos mais importantes rios do Brasil é o Rio São Francisco. Sua nascente se localiza no estado de Minas Gerais, de onde ele segue atravessando o estado da Bahia, constituindo, em seguida, a divisa entre os estados da Bahia e Pernambuco e, por fim, representando a divisa entre os estados de Alagoas e Sergipe e seguindo para desaguar no oceano Atlântico.

O Rio São Francisco contém, ao longo do seu percurso, cinco usinas hidrelétricas. Uma delas é a Usina Hidrelétrica de Sobradinho que foi inaugurada em 1973 e está localizada no estado da Bahia, próxima às cidades de Juazeiro (BA) e Petrolina (PE). Além da função de gerar energia elétrica, a Hidrelétrica de Sobradinho também funciona como fonte de regularização dos recursos hídricos da região. O reservatório de Sobradinho é o terceiro maior lago artificial do mundo, e segundo do Brasil, tem aproximadamente 280 km de comprimento e largura que varia entre 5 e 50 km, uma superfície de espelho d'água de 4.214 km² e sua capacidade de armazenamento é de 34,1 bilhões de m³ em sua cota máxima de 392,50 m (CORREIA e DIAS, 2003).

No alto Rio São Francisco, na parte central do estado de Minas Gerais, município de Três Marias, está a Usina Hidrelétrica de Três Marias, inaugurada em 1962. Sua barragem tem a função de produzir energia hidrelétrica, controlar enchentes e também ajudar na irrigação. Entre as barragens de Três Marias e Sobradinho o rio corre livremente por cerca de 1050 km.

De acordo com a Companhia Hidrelétrica do São Francisco (CHESF), a Usina Hidrelétrica de Xingó foi inaugurada em 1994 e está localizada entre os estados de Alagoas e Sergipe, a 12 km do município de Piranhas/AL e a 6 km do município de Canindé do São Francisco/SE. Por pertencer a uma região de cânion, o reservatório de Xingó constitui-se numa fonte de turismo para a região, além de colaborar com projetos de irrigação e fornecer abastecimento d'água para a cidade de Canindé/SE.

Como qualquer superfície hídrica, as barragens ficam expostas à irradiação solar e à evaporação (FEARNSIDE, 2001). Embora essas águas acabem por se precipitar em forma de chuva, tal mudança implica um impacto considerável no balanço hídrico do planeta. Algumas das alterações no comportamento natural e na qualidade hídrica dos rios represados são diminuição do fluxo de água, aumento da taxa de sedimentação, aumento do tempo de residência da água, estratificação térmica e diminuição das concentrações de oxigênio dissolvido, dentre outros (PIMENTA et al., 2012).

O escoamento, por sua vez, pode levar à poluição, alterando características físicas da água, como, por exemplo, turbidez, viscosidade, condutividade, tensão superficial, pressão e densidade, bem como características físico-químicas da água (pH, acidez, alcalinidade, oxigênio dissolvido, grau de toxicidade e nutrientes, por exemplo). Além disso, também podem ser alteradas as características biológicas da água, tais como densidade dos organismos e sua diversidade, mudança na biomassa, alterações no balanço de microorganismos de

capacidade fotossintética e presença de microorganismos patogênicos. Todas essas alterações comprometem os múltiplos usos a que a água se destina (SANTOS et al., 2014).

Para avaliar as implicações ecológicas da construção dos reservatórios e estabelecer os padrões de operação (liberação de água) do reservatório, é necessário quantificar as alterações hidrológicas que são ecologicamente relevantes. Vários indicadores (170 aproximadamente) foram propostos (GAO et al., 2009), dentre estes, os mais utilizados estão os Indicadores de Alteração Hidrológica (IHA). São 33 índices hidrológicos desenvolvidos por Richter et al. (1996), que caracterizam variabilidade hidrológica inter e intra anual de acordo com cinco características de vazão: magnitude de vazões mensais, magnitude e duração de vazões extremas anuais, tempo anual das vazões extremas, frequência e duração de pulsos altos e baixos, e taxa e frequência de alteração de fluxo.

Assim, com o objetivo de avaliar o grau de alteração da vazão, identificar as características do ecossistema que foram afetadas e estabelecer limites de variação da vazão que sejam seguros para o ecossistema, neste trabalho, foi usado o método de Indicadores de Alteração Hidrológica (IHA) e do Range of Variability Approach (RVA) para estudar a variabilidade da vazão em três municípios, São Francisco (MG), Juazeiro (BA) e Pão de Açúcar (AL), e relacionados a 3 barragens, Três Marias, Sobradinho e Xingó.

O reservatório de Três Marias fica na parte mais superior do Rio São Francisco e foi o primeiro a ser construído, em 1962. Em seguida foi construído o reservatório de Sobradinho, em 1973, na parte média do Rio São Francisco. Em 1994 foi construído o reservatório de Xingó, na parte baixa do Rio São Francisco. No município de São Francisco foram analisadas as alterações hidrológicas decorrentes da construção do reservatório de Três Marias, assim, foram usados os períodos 1939-1961 (antes da barragem) e 1962-2014 (após a barragem). No município de Juazeiro foram analisadas as alterações decorrentes da construção do reservatório de Sobradinho, assim foram usados os períodos 1962-1972 (antes da barragem) e 1973-2009 (após a barragem). No município de Pão de Açúcar foram avaliadas as alterações hidrológicas provenientes da construção da barragem de Sobradinho, deste modo, foram utilizados os períodos 1936-1972 (antes da barragem de Sobradinho) e 1973-1993 (após a barragem de Sobradinho). No município de Pão de Açúcar também foram analisadas as alterações hidrológicas decorrentes da construção da barragem de Xingó, assim, foram usados os períodos 1973-1993 (antes da barragem) e 1994-2016 (após a barragem).

A tese encontra-se dividida em cinco capítulos. Este primeiro capítulo corresponde à introdução, o segundo capítulo aborda os conceitos de ecossistemas ribeirinhos, bacia

hidrográfica, processos hidrológicos, hidrelétricas e o Rio São Francisco. As descrições dos dados e dos métodos IHA e RVA são feitas no capítulo 3. No quarto e quinto capítulos são apresentados resultados, discussões e conclusões sobre as barragens estudadas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Ecossistemas Ribeirinhos

As margens ou leitos dos rios são os espaços localizados entre o meio terrestre e o aquático e por isso dão origem a zonas de transição entre esses dois meios. Essas zonas de transição também são chamadas zonas ribeirinhas, mata ciliar ou bosque. Vários ecossistemas possuem um ambiente ribeirinho, onde se apresentam das formas mais variadas e complexas. Essa forma é definida pelas interações entre vários elementos: clima, geologia, condições edáficas, topografia, hidrologia e vegetação limítrofe. Assim, a vegetação ciliar é um reflexo das características do meio ambiental no qual está inserida (ALENCAR-SILVA e MAILLARD, 2011). As zonas ribeirinhas tanto influenciam o curso de água quanto são influenciadas por ele, permitindo que, nelas, animais e plantas formem uma comunidade diferente das que os rodeiam.

As zonas ribeirinhas possuem vários sedimentos vegetais, os quais são fonte de nutrientes orgânicos para os ecossistemas no perímetro de todo o curso de água (RUGENSKI; MINSHALL; HAUER, 2017). As águas pluviais que escorrem para os rios transportam partículas de solo e materiais orgânicos bem como nutrientes minerais, os quais atravessam a faixa ribeirinha (zona de transição) ficando em parte retidos nelas antes de entrarem nos cursos de água (MITSCH e GOSSELINK, 2000). A vegetação na margem dos rios, além de evitar a erosão das águas pluviais, funciona como barreira natural que impede o escoamento de fertilizantes e herbicidas para os corpos d'água (CALLISTO et al., 2005). As características hidrológicas, por sua vez, influenciam o meio ribeirinho determinando suas características, que são influenciadas também direta ou indiretamente pelo clima, forma de relevo e características do solo (MOREIRA e DUARTE, 2002).

As zonas ribeirinhas são frequentadas por várias espécies de animais terrestres, os quais passam boa parte do tempo nelas devido à necessidade diária de água e também pela qualidade da vegetação (mais densa, diversificada e abundante). Além disso, os animais terrestres também se utilizam das galerias formadas pelas árvores ribeirinhas como proteção para suas deslocamentos migratórias (MOREIRA e DUARTE, 2002). Algumas espécies de animais terrestres podem depender da presença de galerias lenhosas ribeirinhas bem conservadas e estruturadas para sobreviver, visto que galerias desempenham um importante

papel ao fornecer alimento e abrigo a essas espécies e às de vida aquática, seja durante todo o seu ciclo de vida ou parte dele (FABIÃO e FABIÃO, 2007).

2.2 Bacia Hidrográfica e Processos Hidrológicos

O conceito de Bacia Hidrográfica é definido como o conjunto de terras drenadas por um rio e seus afluentes, formada por divisores de água situados nas regiões mais altas do relevo, de onde escoam as águas das chuvas, o que pode acontecer superficialmente formando os riachos e rios, ou infiltrando no solo para formação de nascentes e de lençóis freáticos. As cabeceiras ou olhos d'água brotam em terrenos íngremes das serras e montanhas e descem para partes mais baixas do terreno, formando os primeiros rios, os quais continuam seus trajetos recebendo água de outros rios, formando rios maiores até desembocarem no oceano (BARRELLA et al., 2001). Os processos hidrológicos representam todas as formas com que a água circula no ambiente. Assim, são processos hidrológicos a precipitação, a interceptação, a evaporação, a transpiração, a infiltração e o escoamento superficial (GUIMARÃES, 2000).

Os rios são ecossistemas abertos, no qual são observadas interações entre a atmosfera, a água e a terra. Os principais processos hidrológicos de movimento da água associado ao escoamento nos períodos chuvosos e de estiagem são divididos em componentes de entrada e de saída. Entre os componentes de entrada podem ser citados: vazão de entrada, escoamento lateral, precipitação, infiltração e os rios efluentes. Já entre os componentes de saída, temos como exemplos: vazão escoada, evaporação, evapotranspiração e o fluxo nos rios influentes. Os movimentos da água acontecem nas dimensões espacial (vertical, longitudinal e lateral) e temporal. Nesse último devem ser observadas mudanças naturais ou causadas por intervenção humana, com impacto nas características físicas, químicas, biológicas e geomorfológicas (BROWN e PASTERNAK, 2008; HU et al., 2008). Aspectos geomorfológicos dos solos e ações antrópicas, como poluição e desmatamento na mata ciliar, são fortes influenciadores na qualidade e quantidade da água (RENSCHLER et al., 2007).

Os sistemas hidrológicos também podem ser alterados por fatores naturais (variações climáticas) e por atividades humanas como, por exemplo, construção de reservatórios e barragens, expressivas mudanças de uso de solo e construção de sistemas de irrigação (SERPA et al., 2015; MAGILLIGAN e NISLOW, 2005; ROSENBERG et al., 2000). Entre as alterações hidrológicas que provocam degradação nos rios e ecossistemas das bacias, se destacam: as perdas de conectividade jusante-montante do rio, alteração do pulso de

inundação e das relações rio-planície de inundação, alteração do regime hidrológico e alteração do regime natural da qualidade da água (ROSENBERG et al., 2000).

2.3 Hidrelétricas

Considerando o aumento da demanda por energia elétrica pela população, são necessários novos investimentos no setor. A energia hidráulica é uma das alternativas mais usadas para geração de energia elétrica devido à grande disponibilidade de recursos hídricos no Brasil, tornando o país o terceiro maior potencial hidráulico do mundo. Porém devido a impactos ambientais e sociais gerados pela construção de hidrelétricas, o abastecimento de energia tende a depender de fontes mais caras e poluentes, as quais também geram inúmeros impactos ambientais (ABBUD e TANCREDI, 2010). Vale destacar também que os cinco maiores produtores de energia hidráulica, em termos absolutos, são Canadá, China, Brasil, Estados Unidos e Rússia (QUEIROZ et al., 2013).

A produção de energia hidráulica ocorre através da força do movimento das águas. Os principais fatores que influenciam a geração de energia elétrica são a vazão do rio, a quantidade disponível de água em diversos períodos do ano, a topografia, as alterações antrópicas, ou naturais, como as quedas de água naturais ou criadas artificialmente (ANEEL, 2008). Uma usina hidrelétrica é composta por barragem, casa de força, vertedouro e sistema de captação e adução de água, os quais funcionam conjuntamente. Para construção da barragem, é preciso interromper o curso normal do rio e desviá-lo para o local de formação do reservatório para estocagem da água e formação de grandes quedas. As quedas d'água produzem a força necessária para movimentar as turbinas, acionando, assim, o gerador elétrico (QUEIROZ et al., 2013). Com o objetivo de desenvolver políticas de implantação de grandes projetos hidrelétricos, na década de 60 desenvolveu-se a Eletrobrás (Centrais elétricas Brasileiras SA), responsável por projetos hidrelétricos como Sobradinho, Balbina, Itaipu Binacional e Itaparica (SANTOS, 2003).

Um dos principais impactos negativos provenientes do processo de geração de energia por meio hidráulico é a influência direta no meio ambiente devido à construção das represas. Grandes áreas de matas são inundadas para a construção da barragem, o que interfere no fluxo do rio, leva à destruição de espécies vegetais e prejudica espécies animais, além de interferir na ocupação humana. Quando ocorre a inundação, as plantas de cobertura do solo passam para estado de decomposição o que, além de alterar a biodiversidade local, causa liberação de

gás metano, que é um dos gases responsáveis pelo efeito estufa e pela rarefação da camada de ozônio (QUEIROZ et al., 2013). Por outro lado, a construção de reservatórios permite o ajuste da vazão do rio para níveis adequados, tanto em períodos chuvosos quanto em períodos de seca, bem como permite também um volume adequado de captação de chuvas (ANEEL, 2005).

Existem também as hidrelétricas que não utilizam reservatório ou que utilizam um reservatório de pequenas dimensões, que são chamadas de hidrelétricas a fio d'água. Esse tipo de hidrelétrica gera energia a partir da velocidade das águas do próprio rio, desse modo, a energia armazenada em forma de água é muito menor, reduzindo a capacidade de geração de energia durante todo o ano. Porém, por não haver um grande reservatório, em épocas de seca a capacidade energética é reduzida ou até desativada (QUEIROZ et al., 2013).

Do ponto de vista da vazão do rio, a construção de reservatórios causa alterações hidrológicas que prejudicam não só a fauna e a flora da área inundada para a formação do reservatório, mas também dos trechos a montante e a jusante da usina. Causa também alteração no ciclo de reprodução dos peixes e ausência de períodos de seca, o que prejudica a manutenção da fertilidade do ecossistema, pois a seca fornece sedimentos e matéria orgânica. É importante ressaltar também que as características do fluxo de um rio governam a biodiversidade e determinam as características do meio ambiente, por isso qualquer alteração de um regime de fluxo fluvial teria um efeito sério sobre o ecossistema circundante e, portanto, os regimes de águas fluviais deveriam ser mantidos em correspondência com suas condições originais (TANG et al., 2012).

2.4 Rio São Francisco

A nascente do Rio São Francisco se localiza na Serra da Canastra, no estado de Minas Gerais e, a partir dela, o rio corre primeiramente no sentido norte e depois no sentido oeste (Figura 1). A bacia de drenagem do rio engloba áreas dos estados de Minas Gerais, Bahia, Pernambuco, Alagoas, Sergipe e Distrito Federal e, além disso, a bacia atravessa três Biomas: Cerrado, Caatinga e Mata Atlântica. Abrangendo uma área de 631 mil km², a bacia cobre 7,4% do território brasileiro (CODEVASF, 2003; KNOPPERS et al. 2006). O São Francisco é o maior rio totalmente brasileiro, com cerca de 2.756 km (GUIMARÃES et al., 2011). Sua água é usada para geração de eletricidade, irrigação, abastecimento urbano e industrial, navegação e pesca. Dentre os seus afluentes, os mais importantes são Urucuia, Velhas e

Paracatu, este último é responsável por um quarto de toda vazão escoada pelo rio (SATO e GODINHO, 2004).

O Rio São Francisco proporciona para suas áreas ribeirinhas uma grande prosperidade com o uso da agricultura irrigada (JESUS e GOMES, 2012), como é o caso das cidades de Petrolina (PE) e Juazeiro (BA), que são os maiores conglomerados urbanos ribeirinhos, com quase 200 mil habitantes cada. A região composta por essas duas cidades é atualmente a maior produtora de frutas tropicais do país e também é uma das poucas regiões do mundo onde se obtêm duas safras de uvas por ano, o que faz a região ter um grande destaque na produção de vinhos (ARAÚJO e SILVA, 2013; LACERDA e LACERDA, 2004).

O Rio São Francisco possui cinco usinas hidrelétricas, as quais, em conjunto têm capacidade de gerar quase 10,7 mil GW, representando 12% do total do País, porém, inundaram mais de 6 mil km² de terras, a maioria férteis (GODINHO e GODINHO 2003). A construção de barragens tem sido o fator que mais tem provocado a desterritorialização e a reterritorialização compulsória de populações no Brasil (OLIVEIRA e ZHOURI, 2005). As mudanças derivadas da construção da barragem de Xingó, por exemplo, levaram à inundação e extinção do povoado Cabeço, em Brejo Grande/SE (ARAÚJO et al., 2016).

Do ponto de vista socioeconômico, o Rio São Francisco foi uma das principais fontes de pescados no Brasil, portanto, a pesca era uma das mais importantes fontes de recursos para a população ribeirinha, para a qual, os peixes também eram a principal fonte de proteína animal. Outras fontes de recursos também giravam em torno do rio, tais como hotéis, restaurantes, clubes de pesca, peixarias e lojas (GODINHO e GODINHO, 2003). A pesca e a agricultura de vazante, foram prejudicadas pelos planos de desenvolvimento implementados no vale do rio, referentes a construção de hidrelétricas (ARAÚJO e SÁ, 2008). Na região do baixo São Francisco, a construção da barragem de Xingó gerou impacto na produção de pescado, bem como na produção de arroz (ARAÚJO et al., 2016).

Segundo Holanda et al. (2009), a construção dos complexos de Sobradinho e Xingó modificou características da água do rio desestimulando a reprodução dos peixes e contribuindo para a diminuição e até mesmo a extinção de várias espécies de peixes, prejudicando a população ribeirinha do Baixo São Francisco. A ictiofauna nativa da bacia do Rio São Francisco é composta por 32 famílias, 110 gêneros e 241 espécies. Além dessas, foram incluídas 35 espécies invasoras e 28 espécies introduzidas na bacia, via piscicultura ou aquarismo, totalizando 304 espécies (BARBOSA et al., 2017).

No Baixo São Francisco, devido aos impactos socioambientais gerados pela crescente diminuição do pescado, as comunidades ribeirinhas enfrentaram dificuldades, gerando risco social para as comunidades de pescadores, o que gera incertezas sobre a continuidade da atividade da pesca e outras que a esta se relaciona (JESUS e GOMES, 2012). Uma conhecida forma de restaurar o habitat é a manutenção de regimes hidrológicos semelhantes aos naturais (SWALES, 1994). Para manutenção dessas áreas, no caso da construção de hidrelétricas, deve ser criada uma unidade de conservação a fim de minimizar o impacto ambiental e ajudar na preservação dos ecossistemas remanescentes (MARCHIORI et al., 2014).

O equilíbrio morfológico que existia à montante da região do Baixo São Francisco também tem sido alterado devido à modificação do regime fluvial e da carga de sólidos em suspensão decorrente das construções dos reservatórios da região. Como consequência, o regime de escoamento, numa tentativa de se adaptar ao novo regime da vazão, apresentou redução da declividade e do deslocamento do talvegue para junto da margem, o que aumentou a probabilidade de ocorrência de erosão (CASADO et al., 2002).

A principal fonte de matéria orgânica para alimentação dos peixes é atribuída à vegetação da margem, principalmente gramíneas, pois, de acordo com Gomes (2002), quando o nível de água começa a subir, essa vegetação é recoberta entrando em processo de decomposição, liberando nutrientes que influenciam a disponibilidade de alimentação para os peixes, daí a importância da manutenção do padrão de secas e cheias.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição dos Dados

Um dos modos de avaliar o impacto que as usinas hidrelétricas causam ao meio ambiente é estudando as características do rio a jusante das barragens, antes e após a construção da mesma (ROSENBERG et al., 2000). Neste trabalho foram usados os dados de vazão diária registrados em três municípios: no município de Juazeiro, localizado aproximadamente 40 km a jusante do reservatório Sobradinho, no município de São Francisco, a aproximadamente 252 km abaixo de Três Marias e 845 km acima de Sobradinho, e no município de Pão de Açúcar 42 km a jusante da hidrelétrica de Xingó. Os dados foram obtidos no banco de dados da Agência Nacional de Águas (ANA), disponível na página <http://hidroweb.ana.gov.br/>.

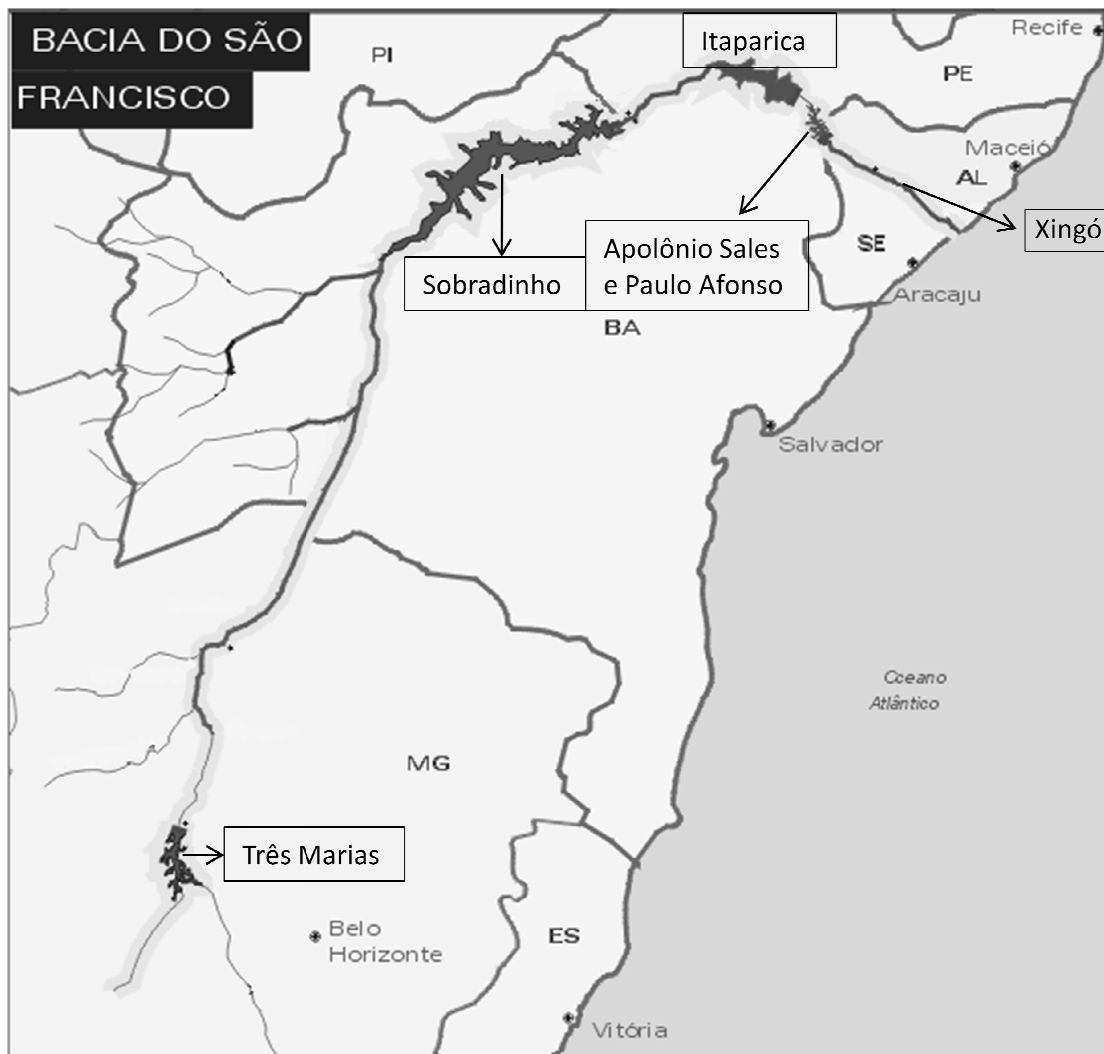


Figura 1. Rio São Francisco. Fonte: www.ecodebate.com.br

Esses dados correspondem a três séries históricas de vazões diárias. A primeira, coletada no período de 01/01/1930 até 31/12/2009, na Estação Hidrológica de código 48020000, que fica no município de Juazeiro, no estado da Bahia. A segunda, coletada no período de 01/01/1939 até 31/12/2014, na Estação Hidrológica de código 44200000, que fica no município de São Francisco, no estado de Minas Gerais. A terceira, coletada no período de 01/01/1936 até 31/12/2016, na Estação Hidrológica de código 49370000, que fica no município de Pão de Açúcar, no estado de Alagoas. Os dados de precipitação, também obtidos na ANA, correspondem a três séries históricas anuais coletadas nos mesmos períodos das séries de vazões, nos municípios de Juazeiro (BA), de código 940016, São Francisco (MG), de código 1544012 e Pão de Açúcar (AL), de código 937018.

3.2 Precipitação

A fim de encontrar um resultado não influenciado pelas condições climáticas extremas, foram retirados da análise da vazão os anos de secas e cheias, evitando que esses anos fossem erroneamente entendidos como uma alteração hidrológica causada pela construção da barragem, quando na verdade seriam alterações climatológicas. Yoo (2006) recomenda que sejam calculadas a média anual e o desvio padrão das precipitações e, em seguida, seja aplicada a seguinte regra de decisão: anos com precipitação superior à média somada de 75% do desvio padrão devem ser considerados anos chuvosos e por isso devem ser retirados da análise; e anos com precipitação inferior à média subtraída de 75% do desvio padrão devem ser considerados anos de seca e por isso devem ser retirados da análise.

3.3 Indicadores de Alteração Hidrológica (IHA)

Os estudos anteriores sobre alterações das características do regime hidrológico da bacia São Francisco causadas pelos fatores climáticos e pela atividade humana incluem os estudos de qualidade da água (SILVA et al., 2010), regime de vazões (MARTINS et al., 2011), variação do nível do reservatório (CORREIA e DIAS, 2003), impacto de evaporação líquida no escoamento (PEREIRA et al., 2008), influência do Enos (El Niño-Oscilação Sul) no regime hidrológico (GURJÃO, et al., 2012) e concentração de sedimentos (MEDEIROS et al., 2011). Recentemente, magnitude, duração e frequência das vazões extremas (subconjunto de indicadores IHA) foram estudadas na bacia do Rio São Francisco e foram comparados os

indicadores nos períodos antes da construção do primeiro reservatório (Três Marias, 1960) e depois da construção do último reservatório (Xingó, 1986). De acordo com os resultados obtidos, os indicadores analisados foram alterados como consequência da atividade humana, com maior grau de alteração no médio e baixo São Francisco que foram mais afetadas pela construção dos reservatórios (SANTOS et al., 2012).

O método de Indicadores de Alteração Hidrológica (IHA), desenvolvido por Richter et al. (1996), tem como objetivo avaliar a variação de uma série de dados hidrológicos, que devem ser coletados desde antes e até após a atividade humana geradora do suposto impacto a ser estudado. Assim, nesse trabalho foram calculados e comparados os indicadores IHA para os períodos antes e depois da construção dos reservatórios de Três Marias, Sobradinho e Xingó para avaliar o grau da alteração hidrológica. A partir desses dados, o método IHA gera 33 indicadores hidrológicos de relevância ecológica, que são divididos em cinco grupos: magnitude, duração, tempo, frequência e taxa de mudança. Assim, o método consegue uma abordagem integrada que considera as dimensões hidrológicas e ecológicas, e pode ser utilizado tanto para estudar características biológicas quanto as influências da ação humana, tais como operações de reservatórios, águas subterrâneas, bombeamento e desvios agrícolas. Quando comparado a outros métodos o IHA mostrou superioridade, como mostrado por Olden e Poff (2003).

O IHA foi amplamente utilizado para avaliar alterações no regime hidrológico dos rios, alterações essas provenientes de barragens (MAGILLIGAN e NISLOW, 2005; COSTIGAN e DANIELS, 2012; YANG et al., 2008), reservatórios (ZHANG et al., 2014), uso de solo (PYRON e NEUMANN, 2008) e fatores climáticos (KIM et al., 2011; DYER et al., 2014). Vale ressaltar também a utilização do método IHA nos estudos: médio e alto East River (Dongjiang), sul da China (CHEN et al., 2010), Rio Wabash, EUA (PYRON e NEUMANN, 2008), Rio Zhuoshui, Taiwan (SHIAU e WU, 2004), alto Rio Yangtze na China (GAO et al., 2012), as grandes barragens nos rios americanos (GRAF, 2006), barragem de masinga no Rio Tana, no Quênia (MAINGI e MARSH, 2002) e alto Rio Paraná (ROCHA, 2010).

Para caracterizar a variação hidrológica, os 33 indicadores hidrológicos ecologicamente relevantes gerados pelo método IHA são divididos em cinco grupos descritos na Tabela 1 e com forma de cálculo especificada em seguida. A média, desvio padrão, amplitude desses parâmetros são calculados com as vazões diárias anteriores ao evento perturbador estudado. Para gerar os 33 indicadores de alteração hidrológica foi usado o IHA

software. Este software está disponível gratuitamente no endereço eletrônico: www.conservationgateway.org.

Tabela 1. Parâmetros hidrológicos (IHA) e as suas influências no ecossistema (Richter et al., 1998).

Grupos	Parâmetros Hidrológicos	Influências no Ecossistema
Grupo 1: Magnitude das vazões mensais.	✓ Vazão mediana mensal	<ul style="list-style-type: none"> • Disponibilidade de habitat para organismos aquáticos; • Disponibilidade de umidade do solo para plantas; • Disponibilidade de água para animais terrestres; • Disponibilidade de alimentos / proteção para mamíferos carnívoros; • Confiabilidade do abastecimento de água para animais terrestres; • Acesso por predadores a locais de construção de ninhos; • Influências na temperatura da água, níveis de oxigênio e fotossíntese na coluna de água.
	✓ Vazão mínima diária	<ul style="list-style-type: none"> • Equilíbrio entre organismos competitivos que se desenvolvem em ambientes fortemente perturbados pela ação humana e são tolerantes ao estresse;
	✓ Vazão máxima diária	
	✓ Vazão mínima de 3 dias	<ul style="list-style-type: none"> • Criação de locais para a colonização de plantas;
	✓ Vazão máxima de 3 dias	<ul style="list-style-type: none"> • Estruturação de ecossistemas aquáticos por fatores abióticos vs. bióticos;
	✓ Vazão mínima de 7 dias	
Grupo 2: Magnitude e duração de vazões anuais extremas.	✓ Vazão máxima de 7 dias	<ul style="list-style-type: none"> • Estruturação da morfologia do canal do rio e das condições físicas de habitat;
	✓ Vazão mínima de 30 dias	<ul style="list-style-type: none"> • Desgaste da umidade do solo em plantas;
	✓ Vazão máxima de 30 dias	<ul style="list-style-type: none"> • Desidratação em animais;
	✓ Vazão mínima de 90 dias	<ul style="list-style-type: none"> • Duração do nível de oxigênio inadequado;
	✓ Vazão máxima de 90 dias	<ul style="list-style-type: none"> • Volume de trocas de nutrientes entre rios e planícies de inundação;
	✓ Número de dias com vazão nula	<ul style="list-style-type: none"> • Duração das condições estressantes, como baixo oxigênio e produtos químicos concentrados em ambientes aquáticos;
	✓ Quociente entre a vazão mínima de sete dias e vazão média anual (escoamento de base)	<ul style="list-style-type: none"> • Distribuição de comunidades vegetais em lagos, lagoas, várzeas; • Duração de fluxos elevados para a eliminação de resíduos, arejamento dos leitos de desova em canais de sedimentos.
Grupo 3: Época das vazões anuais extremas.	✓ Dia Juliano da vazão máxima diária anual	<ul style="list-style-type: none"> • Compatibilidade com ciclos de vida de organismos; • Influências no grau de estresse / mortalidade associado a inundações ou secas;
	✓ Dia Juliano da vazão mínima diária anual	<ul style="list-style-type: none"> • Acesso a habitats especiais durante reprodução ou para evitar a predação;

		<ul style="list-style-type: none"> • Indicação de desova para peixes migratórios; • Evolução de estratégias de história de vida e de mecanismos comportamentais dos seres vivos. • Frequência e magnitude do estresse de umidade do solo para as plantas; • Frequência e duração do estresse causado pelo nível inadequado de oxigênio;
Grupo 4:	✓ Número de eventos de cheia em cada ano	<ul style="list-style-type: none"> • Disponibilidade de habitats de várzea para os organismos aquáticos; • Troca de nutrientes e matéria orgânica entre o rio e a planície de inundação; • Disponibilidade mineral do solo; • Acesso de aves aquáticas a locais para alimentação, repouso e reprodução; • Influências no transporte de sedimentos, texturas do canal de sedimentos e duração da perturbação do substrato (altos pulsos).
Frequência e duração dos pulsos de vazões altas e baixas.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Número de eventos de seca em cada ano ✓ A duração média dos eventos de cheia em cada ano ✓ A duração média dos eventos de seca em cada ano 	
Grupo 5:	✓ Médias de todas as diferenças positivas entre os valores diários consecutivos	<ul style="list-style-type: none"> • Estresse de seca nas plantas (níveis de queda); • Aprisionamento de organismos em ilhas e planícies de inundação (níveis crescentes); • Estresse de dessecação em organismos de baixa mobilidade na beira do rio.
Taxa e frequência de mudanças de condições de água.	<ul style="list-style-type: none"> ✓ Médias de todas as diferenças negativas entre os valores diários consecutivos ✓ Número de reversões 	

• Forma de Cálculo: Grupo 1

Esse grupo gera 12 indicadores correspondentes às vazões médias mensais. Seja $r_{d,i,j}$ a vazão do dia d , do mês i do ano j , seja Md a mediana e seja m a quantidade de dias do mês i , então a vazão mediana do mês i do ano j é dada pela expressão (3.1).

$$r_{i,j} = Md(v_{1,i,j}, v_{2,i,j}, \dots, v_{m,i,j}) \quad (3.1)$$

• Forma de Cálculo: Grupo 2

São gerados 12 indicadores que descrevem a magnitude e duração anuais dos fluxos extremos, como enchentes ou secas. Os 12 indicadores são índices de número de dias com vazão nula e valores de vazão máxima e mínima (em janelas sobrepostas de 1 dia, 3 dias, 7

dias, 30 dias e 90 dias) além do coeficiente que mede o escoamento de base (vazão mínima 7 dias dividida pela média anual).

O cálculo das vazões mínimas e máximas utilizando sequências sobrepostas diferentes da série histórica é feito utilizando médias móveis simples, que consiste em calcular a média aritmética de k observações, sendo que a cada período a observação mais antiga é substituída pela mais recente, calculando-se uma média nova. No caso dos indicadores IHA, k será a quantidade de dias proposta (3, 7, 30 e 90).

Assim, seja $r_{d,j}$ a vazão do dia d do ano j e k o comprimento da sequência, a primeira média móvel com comprimento k , no ano j , é calculada pela expressão (3.2). A expressão (3.3) representa a forma geral para cálculo da t -ésima média móvel, $MM_{t,j}$, de cada sequência para um determinado comprimento de série (k) e um determinado ano j .

$$MM_{1,j} = \frac{r_{1,j} + r_{2,j} + \dots + r_{k,j}}{k} = \frac{1}{k} \sum_{d=1}^k r_{d,j} \quad (3.2)$$

$$MM_{t,j} = \frac{1}{k} \sum_{d=t}^{k-1+t} r_{d,j} \text{ , com } t=1, 2, \dots, 365-(k-1) \quad (3.3)$$

Calculadas as médias móveis de cada sequência de tamanho k no ano j , o indicador "vazão mínima de k dias" no ano j será a menor média móvel calculada com sequências de k dias no ano j . Da mesma forma, o indicador "vazão máxima de k dias" no ano j será a maior média móvel calculada com sequências de k dias no ano j .

O indicador do Escoamento de Base em determinado ano j é calculado através do quociente entre o indicador da vazão mínima de sete dias no ano j e a vazão média do ano j .

• Forma de Cálculo: Grupo 3

O dia da vazão máxima diária do ano j será o dia em que ocorreu a vazão determinada como a maior durante o ano. Seja $r_{d,j}$ a vazão do dia d no ano j , então a vazão máxima no ano j será dada pela expressão (3.4). Do mesmo modo, a vazão mínima no ano j será dada pela expressão (3.5).

$$r(\text{máx})_j = \text{máx}_j(r_{1,j}, r_{2,j}, \dots, r_{365,j}) \quad (3.4)$$

$$r(\text{mín})_j = \text{mín}_j(r_{1,j}, r_{2,j}, \dots, r_{365,j}) \quad (3.5)$$

• **Forma de Cálculo: Grupo 4**

São consideradas cheias ou (impulsos de alta) períodos, dentro de um ano, em que os fluxos diários estão acima do percentual de 75% do período de pré-impacto (antes da alteração do regime do rio). É considerada seca (ou impulsos de baixa) quando os fluxos diários estão abaixo do percentual de 25% do período de pré-impacto (Richter et al., 1998).

Assim, um impulso de alta é definido pela equação (3.6), em que $r_{(pós)}$ é a vazão diária do período pós-impacto e $r_{(pré)}$ é a vazão diária do período pré-impacto, d varia de 1 a 365, j varia do primeiro ao último ano de cada período (pré-impacto ou pós-impacto) e P_{75} é o percentil 75 da distribuição da vazão diária pré-impacto. Por outro lado, um impulso de baixa é definido pela equação (3.7), em que P_{25} é o percentil 25 da distribuição da vazão diária pré-impacto.

$$r_{(pós)d,j} > P_{75}(r_{(pré)d,j}) \quad (3.6)$$

$$r_{(pós)d,j} < P_{25}(r_{(pré)d,j}) \quad (3.7)$$

• **Forma de Cálculo: Grupo 5**

A taxa de crescimento é dada pela média de todas as diferenças positivas entre os valores diários consecutivos. A taxa de queda é dada pela média de todas as diferenças negativas entre valores diários consecutivos (Richter et al., 1998). Seja $r_{d,j}$ a vazão do dia d do ano j , uma diferença positiva acontece se verdadeira a expressão (3.8). Por outro lado, uma diferença negativa acontece se verdadeira a expressão (3.9).

$$r_{d,j} > r_{d-1,j} \quad (3.8)$$

$$r_{d,j} < r_{d-1,j} \quad (3.9)$$

Então, se a diferença entre as vazões de dois dias consecutivos é positiva, o valor da diferença positiva (DP) é dado pela expressão (3.10). Por outro lado, se a diferença entre as vazões de dois dias consecutivos é negativa, o valor da diferença negativa (DN) é dado pela expressão (3.11).

$$\text{Se } v_{d,j} - v_{d-1,j} > 0, \text{ então } v_{d,j} - v_{d-1,j} = DP_k \quad (3.10)$$

$$\text{Se } v_{d,j} - v_{d-1,j} < 0, \text{ então } v_{d,j} - v_{d-1,j} = DN_k \quad (3.11)$$

Assim, seja p a quantidade de diferenças positivas encontradas no ano j , então a taxa de crescimento do ano j , TA_j , será dada pela expressão (3.12). Seja n a quantidade de

diferenças negativas encontradas no ano j , então a taxa de queda do ano j , TQ_j , será dada pela expressão (3.13).

$$TA_j = \frac{\sum_{k=1}^p DP_k}{p} \quad (3.12)$$

$$TQ_j = \frac{\sum_{k=1}^n DN_k}{n} \quad (3.13)$$

As reversões são calculadas dividindo-se o registro hidrológico em períodos de "subida" e "descida", que correspondem a períodos em que as mudanças diárias nos fluxos são positivas ou negativas, respectivamente (Richter et al., 1998). Ou seja, a reversão, é considerada como uma mudança de sinal na taxa de mudança, como dado pela expressão (3.14) e pela expressão (3.15), em que $r_{d,j}$ corresponde à vazão do dia d do ano j . O número de reversões do ano j corresponde a quantidade de vezes em que as expressões (3.14) e (3.15) são verdadeiras.

$$r_{d,j} - r_{d-1,j} > 0 \quad \text{e} \quad r_{d+1,j} - r_{d,j} < 0 \quad (3.14)$$

$$r_{d,j} - r_{d-1,j} < 0 \quad \text{e} \quad r_{d+1,j} - r_{d,j} > 0 \quad (3.15)$$

3.4 Range of Variability Approach (RVA)

O Range of Variability Approach (RVA) foi proposto por Richter et al. (1997) como uma maneira de utilizar os parâmetros hidrológicos do IHA para gestão ecológica do rio por meio do controle da vazão. O método é utilizado para conservação da biodiversidade aquática nativa e para proteção das funções dos ecossistemas naturais. O RVA também pode ser usado no planejamento da reestruturação do rio (YANG et al., 2008).

O RVA foi utilizado para estudar alterações provenientes da construção de barragens no Rio Illinois, Estados Unidos (KOEL e SPARKS, 2002), no Rio Adige, Itália (ZOLEZZI et al., 2009), na China, no East River (CHEN et al. 2010), no Chou-Shui River, em Taiwan (SHIAU e WU, 2004), no Yellow River, na China (YANG et al., 2008), no Rio Paraná (ROCHA, 2010), entre outros.

Usando como base o regime hidrológico natural (pré-impacto), o RVA utiliza os 33 indicadores de alteração hidrológica (IHA) para avaliar as alterações na vazão considerando um regime de variação admissível (RICHTER et al., 1997). O método RVA utiliza os dados pré-impacto para definir tais limites de variação admissíveis e em seguida utiliza esses limites para avaliar os indicadores pós-impacto e identificar quais deles sofreram alterações e a sua influência no ecossistema. Para definição dos intervalos de variação admissível para a vazão

pós-impacto são utilizados a média somada ao desvio padrão e a média subtraída do desvio padrão para uma análise paramétrica, ou a mediana e os valores dos percentis 33 e 67 para uma análise não paramétrica. Outros limites podem ser escolhidos para vazões ecológicas conhecidas ou vazões extremas, dependendo das características de cada sistema, podendo ser diferente nos vários parâmetros do IHA (RICHTER et al., 1997; RICHTER et al., 1998).

O fator de alteração hidrológica é definido pela equação (3.16), em que, frequência esperada é a frequência com que os valores anuais se situam dentro dos intervalos de variação admissíveis do RVA correspondente aos valores pré-barragem; frequência observada é a frequência com que os valores anuais do período pós-barragem estão dentro da faixa do RVA estabelecido (RICHTER et al., 1998).

$$HA = (Frequência Observada - Frequência esperada) / Frequência esperada \quad (3.16)$$

Se a frequência observada for igual à esperada, então não haverá alteração hidrológica e o grau de alteração hidrológica terá valor zero. Quando a frequência dos valores anuais de pós-impacto é maior que a frequência esperada no período pré-impacto, o HA será positivo. Por outro lado, quando a frequência dos valores anuais de pós-impacto é menor que a frequência esperada no período pré-impacto, o HA será negativo (RICHTER et al., 1998). Essa medida deve ser calculada para cada faixa de RVA definida.

3.5 Grau Geral de Alteração Hidrológica

Os 33 indicadores da metodologia dos Indicadores de Alteração hidrológica propõem uma visão detalhada de várias alterações possíveis para o comportamento da vazão, porém, há a necessidade também de um indicador que generalize todas as alterações, fornecendo uma visão geral das alterações encontradas. Alguns indicadores podem apresentar baixa alteração no comportamento da vazão, enquanto outros podem apresentar alto grau de alteração. De acordo com Xue et al. (2017), um grau geral de alteração hidrológica (Overall degree of hydrological alteration - ODHA) para todos os 33 indicadores pode ser calculado de acordo com a Equação (3.17), em que D_a é a alteração hidrológica do indicador a entre os 33.

$$ODHA = \sqrt{\frac{\sum_{a=1}^{33} D_a^2}{33}} \quad (3.17)$$

A equação (3.17) também pode ser aplicada para calcular o grau geral de alteração hidrológica dentro de cada grupo dos indicadores. Porém, indicadores com alterações hidrológicas altas poderiam ser subestimados quando a maioria dos indicadores apresentam moderado (ou baixo) grau de alteração, deste modo Xue et al. (2017) propuseram o IODHA (Improved overall degree of hydrological alteration), que representa um aprimoramento do grau geral de alteração hidrológica para os 33 indicadores, fornecido pela equação (3.18), em que D_{qmax} e D_{qw} são os valores máximo e médio entre os valores absolutos das alterações hidrológicas do grupo q dos indicadores.

$$IODHA = \frac{\sum_{q=1}^5 \sqrt{\frac{D_{qmax}^2 + D_{qw}^2}{2}}}{5} \quad (3.18)$$

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Alterações hidrológicas à jusante da barragem de Três Marias após a sua construção

Na Figura 2 observa-se a variação anual da precipitação e os anos que foram retirados da análise por apresentarem precipitação fora dos limites estabelecidos para análise. No comportamento da vazão diária (Figura 3), os trechos onde a série é descontinuada representam os anos que foram retirados da análise devido à precipitação.

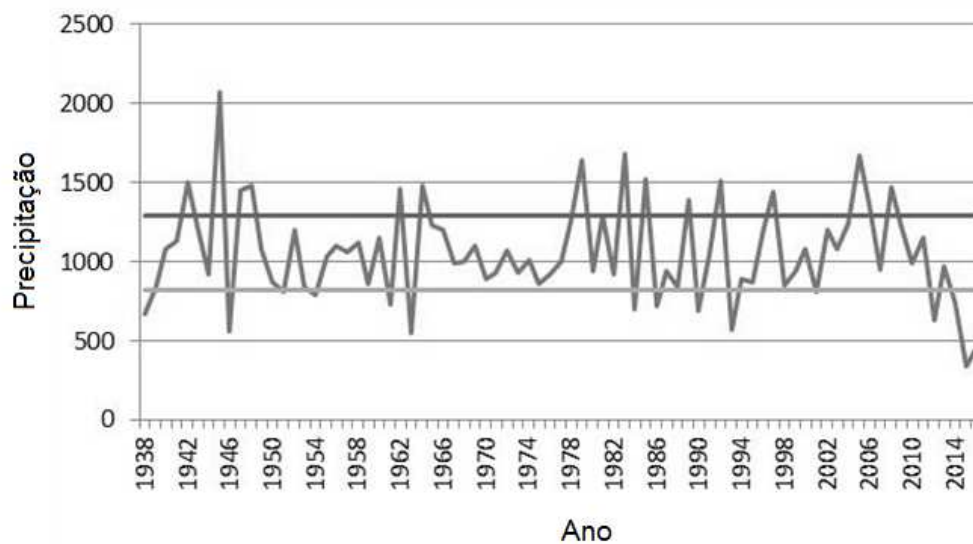


Figura 2. Precipitação anual e limites de variação aceitos para análise no município de São Francisco (MG) no período de 1939 a 2014.

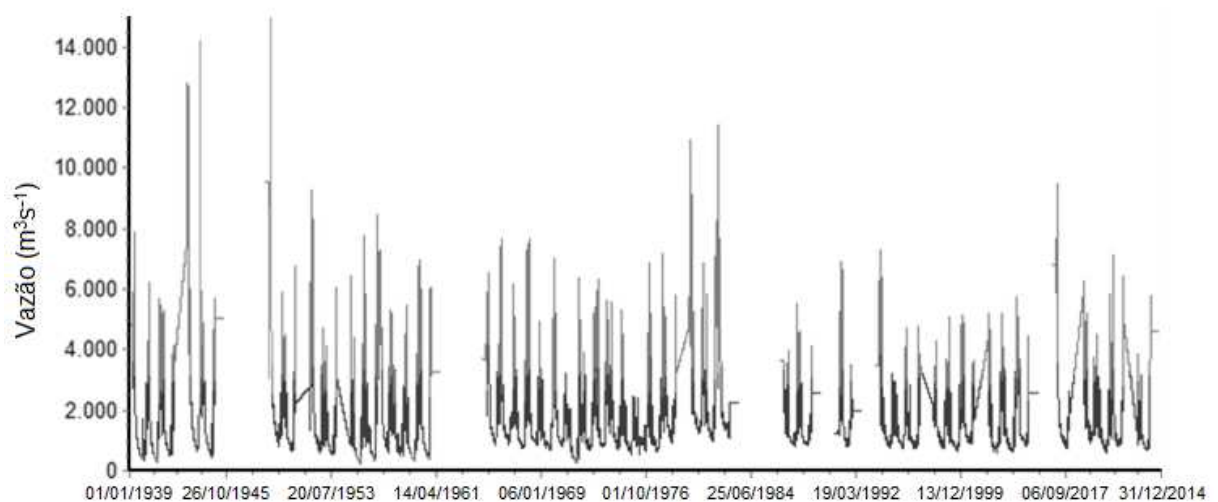


Figura 3. Série temporal da vazão diária no município de São Francisco (MG) no período de 1939 a 2014, com períodos correspondentes da seca e cheia climatológica excluídos.

Na Tabela 2 observa-se o comportamento da vazão antes e após a construção da barragem de Três Marias, por meio dos valores da mediana, mínimo e máximo da vazão. Também se observam os limites do RVA (percentis 33 e 67) e o fator de alteração hidrológica (HA) dos parâmetros do IHA. Os coeficientes de alteração hidrológica também são exibidos na Figura 4.

Tabela 2. Valores da mediana, mínimo, máximo, limites RVA e Fator de Alteração Hidrológica (HA) dos 33 indicadores do IHA da vazão do Rio São Francisco, no município de São Francisco, relacionados à construção da barragem de Três Marias.

Grupos IHA	Período Pré – impacto:			Período Pós – impacto:			Limites RVA		Alteração Hidrológica (%)
	1939 – 1961			1962 – 2014			RVA Inf	RVA Sup	
	Med.	Mín.	Máx.	Med.	Mín.	Máx.			
<u>Grupo 1</u>									
Janeiro	2432	1145	10780	2741	1090	7229	2255	3835	14,60%
Fevereiro	3610	1090	12330	2369	1071	8472	2605	4195	-33,65%
Março	2759	1133	7674	2327	1048	6102	2395	4068	-3,49%
Abril	2034	1060	5254	2108	732	4623	1723	2411	-39,68%
Maio	1195	698	5023	1253	527	4621	1107	1718	14,60%
Junho	1016	569,5	5320	1121	436	4624	857,6	1241	50,79%
Julho	809	429	5680	1005	378	4626	690,6	1038	44,76%
Agosto	663	351	6045	972	379	4622	571,4	856,2	-33,65%
Setembro	615,5	269	6405	920,5	308	4625	507	759,4	-57,78%
Outubro	842	387	9520	1060	451	6821	594,4	974,4	8,57%
Novembro	1493	579	9522	1625	688	6822	1160	1771	14,60%
Dezembro	2844	981,3	9521	2449	1226	6820	2170	3638	14,60%
<u>Grupo 2</u>									
Mínimo 1 dia	486	237	870	770	278	1226	339	531	-89,44%
Mínimo 3 dias	490,7	236	877,3	769	285,7	1232	340,3	534,8	-89,44%
Mínimo 7 dias	492,7	238,4	882,4	788	291,4	1242	358,1	549,5	-87,94%
Mínimo 30 dias	527	273,2	937,7	834,1	318	1408	454	675,3	-81,90%
Mínimo 90 dias	667,2	350,7	2197	943,3	359,7	2179	584	882,2	-21,59%
Máximo 1 dia	6576	4740	14950	5630	2267	11440	5985	7823	-3,49%
Máximo 3 dias	6565	4559	14900	5549	2268	11310	5758	7766	-3,49%
Máximo 7 dias	6021	4219	14670	5140	2184	10760	5211	7506	14,60%
Máximo 30 dias	5058	2983	11800	4300	1883	9250	3893	6135	32,70%
Máximo 90 dias	3505	2049	9522	3346	1468	7247	3196	5082	26,67%
Número de vazão nula	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00%
Escoamento de base	0,227	0,1056	0,387	0,3889	0,1305	0,5627	0,1711	0,2621	-87,94%
<u>Grupo 3</u>									
Dia da vazão mínima	274	232	308	274	127	337	268,4	282	-5,00%
Dia da vazão máxima	5	5	364	16	3	366	39,6	352	32,70%
<u>Grupo 4</u>									
Número de baixo pulso	2	0	4	2	0	13	2	3	-61,30%
Duração de baixo pulso (dias)	13,5	2	137	4	2	94,5	6,635	30,63	-57,78%
Número de alto pulso	3	1	7	3	0	6	2	4	-12,31%
Duração de alto pulso (dias)	11,5	3	217,5	8	3	288	9,3	21	-47,22%
<u>Grupo 5</u>									
Taxa de crescimento	97	1,362	219,5	50,5	4,409	155,5	77,8	144,6	-63,81%
Taxa de queda	-24	-118	-5,959	-40,5	-98	-3,801	-28,2	-14,6	-81,90%
Número de reversões	41	14	70	73	12	119	23,2	48,2	-75,87%

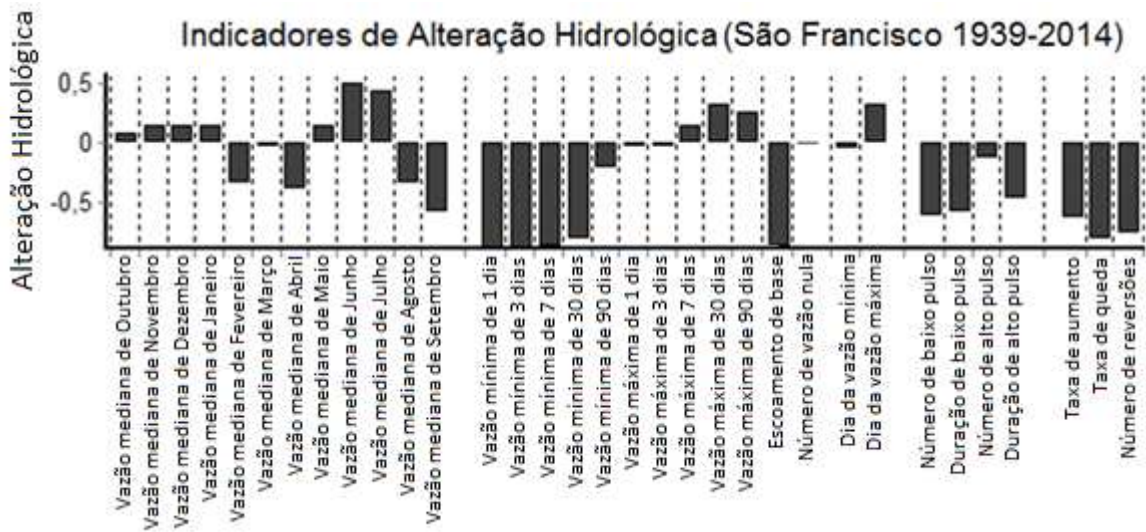


Figura 4. Alteração hidrológica no município de São Francisco originadas pela construção da barragem de Três Marias.

Grupo 1

No grupo 1 dos indicadores (Tabela 2), o valor da vazão máxima no período após a construção da barragem é sempre menor que no período antes da construção. Nos meses de abril a novembro (Figura 5) as medianas das vazões mensais possuem valores superiores após a construção da barragem. Já para os demais meses o cenário parece se inverter, exceto pelo mês de janeiro cuja mediana da vazão antes da construção da barragem se apresenta atipicamente menor do que o esperado para a época de vazão alta.

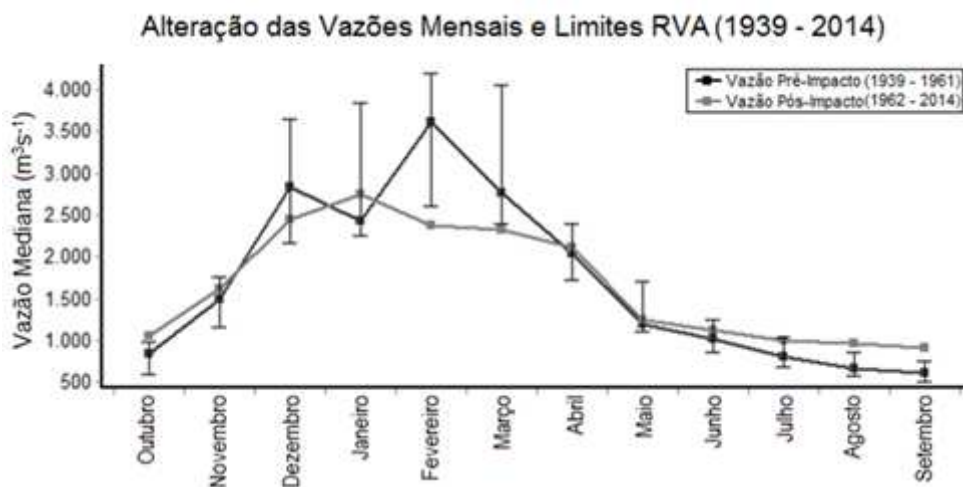


Figura 5. Distribuição sazonal das vazões medianas mensais antes e depois da construção do reservatório de Três Marias, bem como seus respectivos limites do RVA.

Os limites do RVA também são exibidos na Figura 5, onde se observa que nos meses de fevereiro, março, agosto, setembro e outubro as medianas das vazões após a construção da barragem estão fora dos limites do RVA, o que indica uma mudança no comportamento da vazão mediana. Apesar disso, os coeficientes de alteração hidrológica (Figura 4 e Tabela 2) dos meses de junho, julho e setembro apresentam alterações hidrológicas acima de 40%. Porém, nos meses de junho e julho essa alteração é positiva, ou seja, há mais pontos dentro dos limites do RVA após a construção da barragem do que o habitual antes da barragem, indicando que a vazão se tornou menos dispersa (Figuras 6 e 7). Já no mês de setembro, com alteração hidrológica negativa, a vazão apresenta vários pontos fora do limite do RVA no período após a construção da barragem (Figura 8), indicando uma mudança relativa ao modo como a vazão se comporta. As figuras dos demais indicadores do grupo 1 constam no Apêndice A. m^3s^{-1}

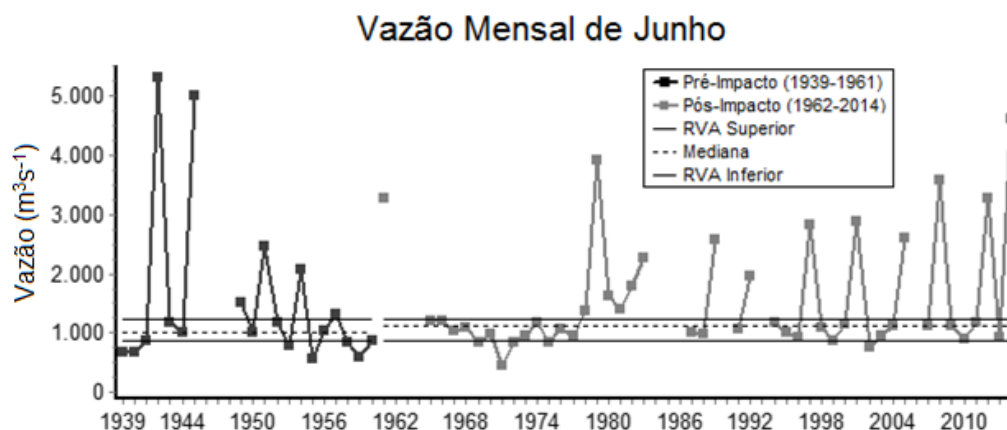


Figura 6. Série temporal da vazão mensal de junho do Rio São Francisco a jusante de da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.

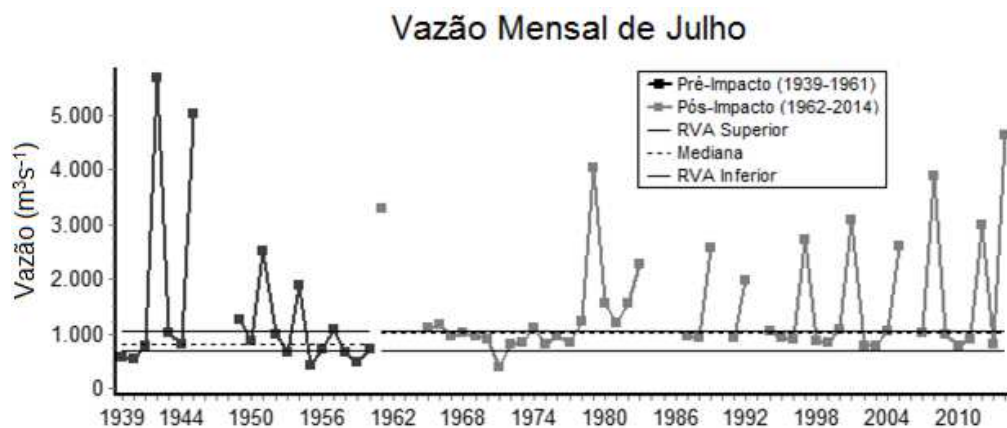


Figura 7. Série temporal da vazão mensal de julho do Rio São Francisco a jusante de da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.

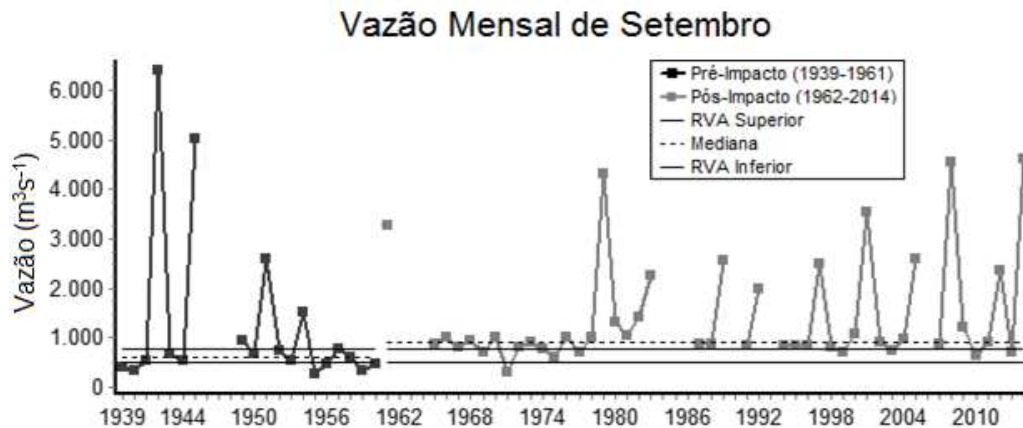


Figura 8. Série temporal da vazão mensal de setembro do Rio São Francisco a jusante da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.

Grupo 2

Nos indicadores de vazão mínima do grupo 2, o valor da mediana (Tabela 2) no período após a construção da barragem é sempre maior que antes. Os fatores de alteração hidrológica (Figura 4 e Tabela 2) indicam grande alteração hidrológica, com valores acima de 80%, para todos os indicadores de mínima, exceto o indicador vazão mínima de 90 dias.

Nos indicadores de vazão máxima do Grupo 2 os valores de mediana, mínimo e máximo são sempre inferiores após a construção da barragem (Tabela 2). Observa-se também que, no geral, a vazão mínima anual aumentou enquanto que a vazão máxima diminuiu, confirmando o resultado referente às vazões mensais obtido no Grupo 1 dos indicadores de alteração hidrológica. As figuras dos indicadores do grupo 2 constam no Apêndice A.

Grupo 3

A mediana das datas do calendário Juliano das vazões mínimas anuais (Tabela 2) se encontrava no dia 274 no período anterior à construção da barragem de Três Marias e permanece o mesmo no período após a construção. Esse indicador apresentou baixo fator de alteração hidrológica. Resultado semelhante foi obtido por Hu et al. (2008), que encontraram estabilidade na mediana das datas das vazões mínimas anuais do Rio Huaihe, na China. Para o dia da vazão máxima, estas medianas se apresentam no dia 5 no período anterior à construção e no dia 16 no período posterior, indicando uma pequena diferença de 11 dias. Seu coeficiente de alteração hidrológica também possui um valor baixo.

Grupo 4

O valor máximo da quantidade de pulsos de baixa após a construção da barragem de Três Marias mais que triplicou (Tabela 2). Já a duração desses pulsos de baixa apresentou valores de mediana diminuídos de 13,5 para 4 dias e valores de máximo diminuídos de 137 para 94,5. Os indicadores da quantidade e da duração dos pulsos de baixa (Tabela 2 e Figura 4) apresentaram alteração hidrológica de 61% e 58% respectivamente.

Em relação a quantidade de pulsos de alta, observa-se (Tabela 2 e Figura 4) um pequeno coeficiente de alteração hidrológica. Já a duração desses pulsos de alta sofreu alteração na mediana (de 11,5 dias antes da construção da barragem para 8 dias após a construção), além de uma alteração hidrológica de 47% para este indicador (Tabela 2 e Figura 4). As figuras dos indicadores do grupo 4 constam no Apêndice A.

Grupo 5

A taxa de crescimento apresentou diminuição na mediana e da amplitude (Tabela 2) quando comparamos o período anterior e posterior à construção da barragem de Três Marias, podendo-se dizer que a vazão está aumentando com menor intensidade após a construção da barragem. O coeficiente de alteração hidrológica deste indicador foi de -64% (Tabela 2 e Figura 4). A mediana da taxa de queda aumentou quase 70% após a construção da barragem de Três Marias (Tabela 2), ou seja, a vazão tem diminuído com maior intensidade. O fator de alteração hidrológica (HA) deste indicador foi superior a 80% (Tabela 2 e Figura 4).

No geral, observa-se que a vazão passou a aumentar com menor intensidade e a cair com maior intensidade quando comparados ao período anterior à construção da barragem. Além disso, as taxas de crescimento e de queda estão mais próximas após a construção da barragem (50 e -40, respectivamente) do que antes (97 e -24, respectivamente). Quanto ao número de reversões (Tabela 2), a mediana sofreu um grande aumento de 78% e o máximo aumentou 70%, com alteração hidrológica de -76%. As figuras dos indicadores do grupo 5 constam no Apêndice A. m^3s^{-1}

4.2 Alterações hidrológicas à jusante da barragem de Sobradinho após a sua construção

Na Figura 9 observa-se a variação anual da precipitação e os anos que foram retirados da análise por apresentarem precipitação fora dos limites estabelecidos para análise. No comportamento da vazão diária (Figura 10), os trechos onde a série é descontinuada representam os anos que foram retirados da análise devido à precipitação.

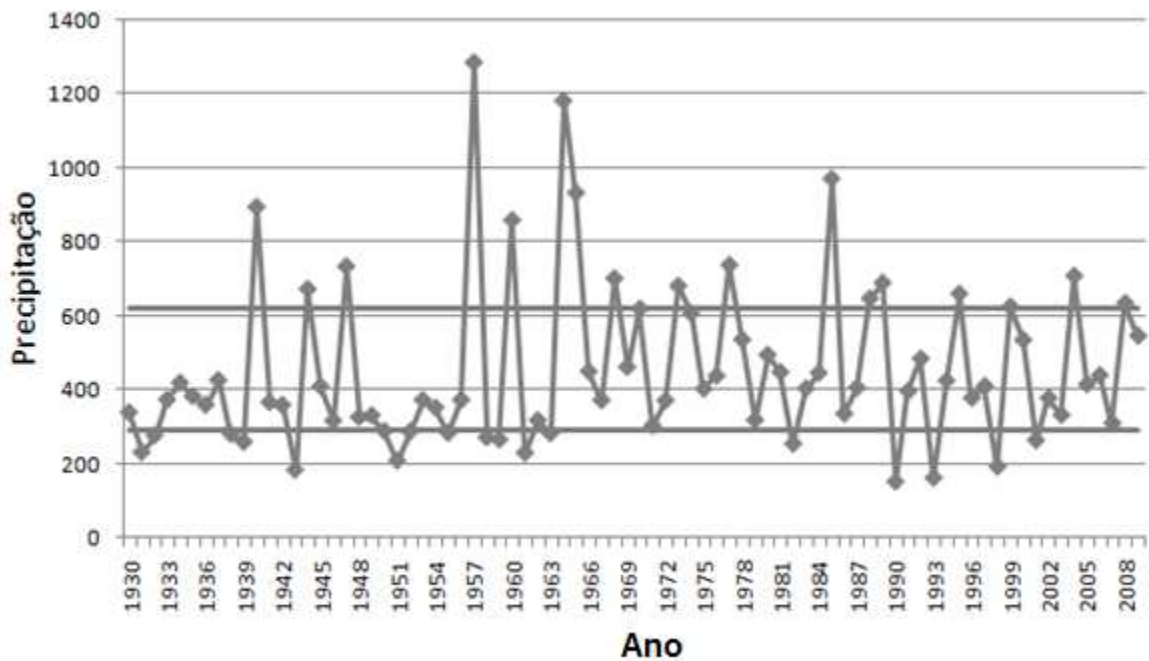


Figura 9. Precipitação anual e limites de variação aceitos para análise no município de Juazeiro (BA) no período de 1930 a 2009.

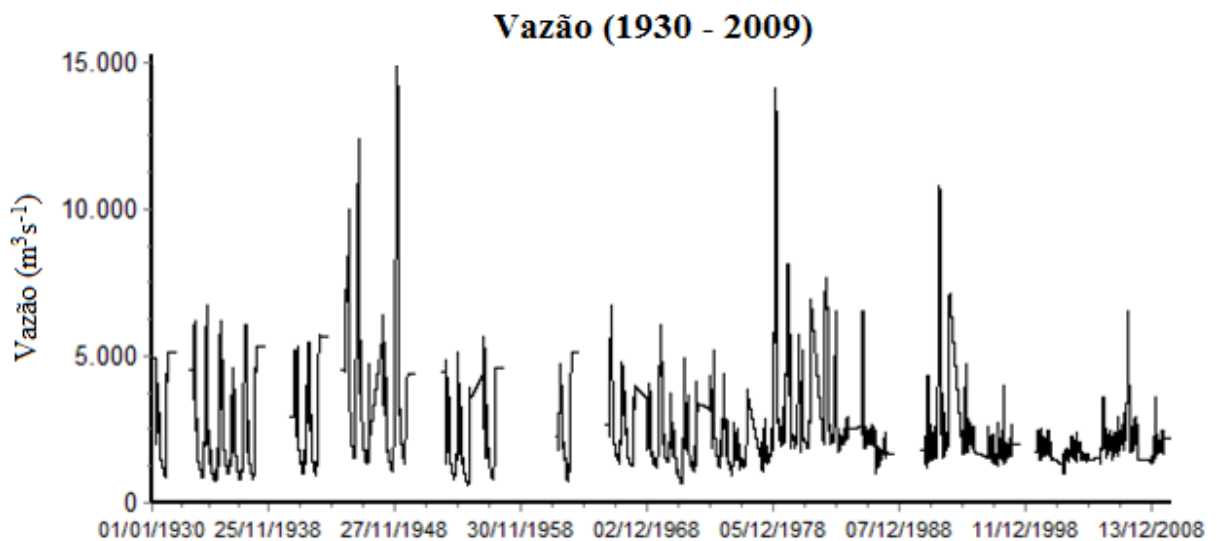


Figura 10. Série temporal da vazão diária no município de Juazeiro (BA), com períodos correspondentes da seca e cheia climatológica excluídos.

Na Tabela 3 observa-se comportamento da vazão antes e após a construção da barragem de Sobradinho, por meio dos valores da mediana, mínimo e máximo da vazão. Também se observam os limites do RVA (percentis 33 e 67) e o fator de alteração hidrológica (HA) dos parâmetros do IHA. Os coeficientes de alteração hidrológica também são exibidos na Figura 11.

Tabela 3. Estatística descritiva, limites RVA e Fator de Alteração Hidrológica (HA) dos 33 indicadores do IHA da vazão do Rio São Francisco no Município de Juazeiro Antes e Após a Construção da Barragem de Sobradinho.

Grupos IHA	Período Pré – impacto:			Período Pós – impacto:			Limites RVA		Fator de Alteração Hidrológica (%)
	1930-1972			1973-2009			RVA Inf	RVA Sup	
	Med.	Mín.	Máx.	Med.	Mín.	Máx.			
<u>Grupo 1</u>									
Janeiro	4432	1793	7517	2140	1154	6875	3692	4951	-75,84%
Fevereiro	4416	1752	11130	2175	1066	9862	3596	5138	-91,95%
Março	4234	1793	13700	1984	1348	13610	3385	4802	-91,95%
Abril	3309	1477	6927	2279	1440	10140	2514	4470	-43,64%
Mai	2073	1213	8901	2039	1198	5159	1841	3539	69,09%
Junho	1596	1037	5662	1957	1336	4726	1480	2766	133,50%
Julho	1491	928	5660	1984	1319	4293	1296	2171	69,09%
Agosto	1386	878	5661	1983	1188	3866	1132	1785	4,68%
Setembro	1242	716	5659	1948	1027	3465	1005	1532	-43,64%
Outubro	1309	634	4902	2039	1218	3242	1076	2029	25,48%
Novembro	2175	817	5103	1957	1337	3664	1685	2751	85,19%
Dezembro	3509	1501	5575	2089	1319	6320	2776	4476	-59,74%
<u>Grupo 2</u>									
Mínimo 1 dia	899	593	1520	1444	957	2221	798,2	1115	-59,74%
Mínimo 3 dias	898	591	1533	1456	959	2279	806,3	1118	-67,79%
Mínimo 7 dias	912	592	1543	1555	971	2348	826,7	1166	-59,74%
Mínimo 30 dias	1004	621	1614	1648	1034	2464	894,6	1245	-75,84%
Mínimo 90 dias	1383	845	2711	1790	1179	3254	1131	1675	20,78%
Máximo 1 dia	5097	3706	14911	3621	1671	14140	4828	5853	-83,90%
Máximo 3 dias	5095	3678	14910	3535	1634	14100	4809	5848	-83,90%
Máximo 7 dias	5096	3611	14840	3310	1627	14020	4756	5818	-83,90%
Máximo 30 dias	5094	3063	13570	2626	1593	13330	4562	5612	-91,95%
Máximo 90 dias	4576	2540	10570	2425	1529	10090	4269	4919	-83,90%
Número de vazão nula	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00%
Escoamento de base	0,3413	0,1785	0,5383	0,6997	0,3629	0,9599	0,311	0,3628	-100,00%
<u>Grupo 3</u>									
Dia da vazão mínima	274	255	321	35	2	362	268,7	277,8	-67,79%
Dia da vazão máxima	34	8	366	333	14	366	45,8	300,1	44,94%
<u>Grupo 4</u>									
Número de baixo pulso	1	0	3	1	0	22	1	2	-70,48%
Duração de baixo pulso (dias)	69	3	171	3	1	146	21,6	107	-60,63%
Número de alto pulso	1	0	3	0	0	4	1	1,44	-64,57%
Duração de alto pulso (dias)	37	5	292	27,25	4	201	22,16	74,57	-50,79%
<u>Grupo 5</u>									
Taxa de crescimento	56	2,19	93	61	0,20	113	46,68	64	-26,19%
Taxa de queda	-26	-77	-1,13	-28,5	-107,5	-0,04	-32,16	-22,78	-83,90%
Número de reversões	18	6	44	113	6	195	13	22	-100,00%

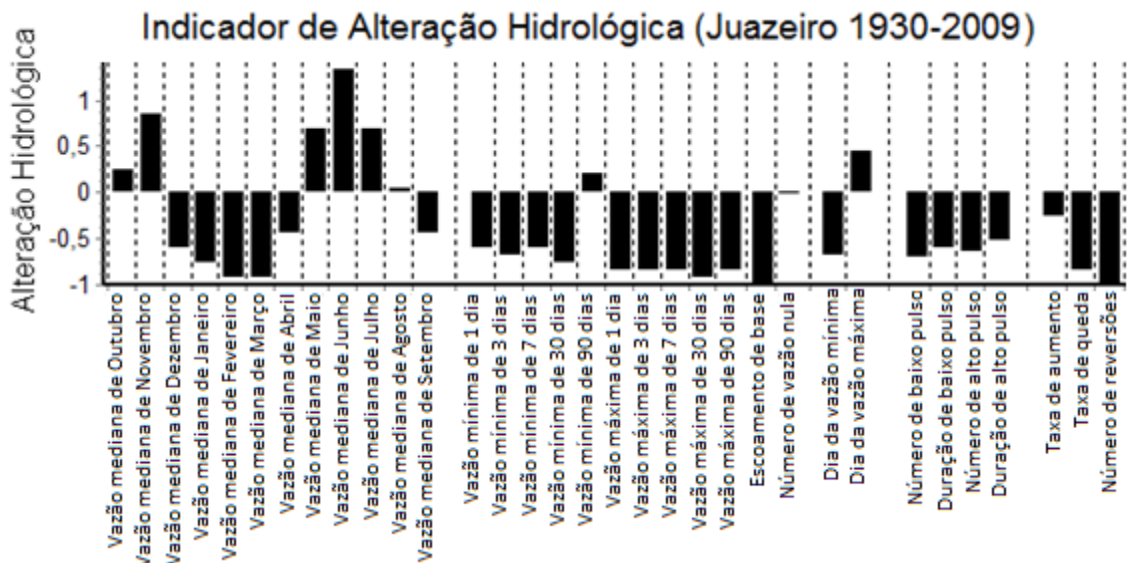


Figura 11. Fatores de alteração hidrológica no município de Juazeiro originadas pela construção da barragem de Sobradinho.

Grupo 1

A mediana da vazão mensal (Figura 12) perde quase que completamente sua variabilidade sazonal após a construção da barragem de Sobradinho. Antes da construção da barragem a vazão mediana mensal (Tabela 3) variou de 1242 a 4432 m^3s^{-1} (amplitude de 3190 m^3s^{-1}), enquanto que no período após a barragem, variou de 1948 a 2279 m^3s^{-1} (amplitude de 331 m^3s^{-1}). Outro ponto relevante é que entre os meses de junho a outubro os valores de vazão mediana se apresentam superiores após a construção da barragem (Tabela 3 e Figura 12), enquanto que para os demais meses o cenário se inverte. Zolezzi et al. (2009) também encontraram uma atenuação da variabilidade sazonal da vazão ao estudar o Rio Adige, na Itália.

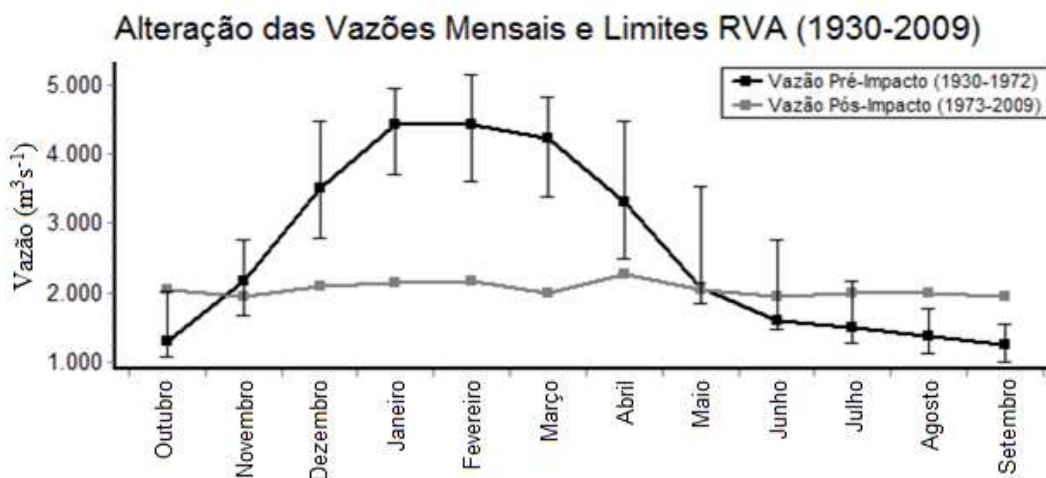


Figura 12. Distribuição mensal das vazões no município de Juazeiro antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.

Além disso, apenas nos meses de novembro, maio, junho e julho (Figura 12) as medianas das vazões após a construção da barragem estão dentro dos limites do RVA, o que indica uma mudança no comportamento da vazão mediana nos demais meses. Os coeficientes de alteração hidrológica (Figura 11 e Tabela 3) dos meses de abril, setembro e dezembro apresentam alterações hidrológicas entre -43% e -60%. Nos meses de janeiro, fevereiro, março, maio, junho, julho e novembro, observam-se alterações hidrológicas ainda mais fortes, acima de 69%, sendo positivas nos meses de maio, junho, julho e novembro e negativa nos demais meses. As figuras dos indicadores do grupo 1 constam no Apêndice B.

Grupo 2

Os valores da mediana, mínimo e máximo dos indicadores de vazão mínima (Tabela 3) no período após a construção da barragem são sempre maiores do que no período antes da construção. Os indicadores da vazão mínima anual de 1 dia e vazão mínima anual de 7 dias apresentaram alteração hidrológica moderada e negativa (Figura 11 e Tabela 3), e os indicadores da vazão mínima anual de 3 dias e de 30 dias apresentaram fortes alterações hidrológicas negativas.

Nos indicadores de vazão máxima os valores da mediana, mínima e máxima são sempre inferiores após a construção da barragem (Tabela 3). Esses indicadores também apresentaram fortes alterações hidrológicas negativas, a partir de -84% (Figura 11 e Tabela 3). No geral, a mediana da vazão mínima anual aumentou enquanto que a da vazão máxima diminuiu, confirmando o resultado referente às vazões mensais obtido no Grupo 1 dos indicadores de alteração hidrológica. As figuras dos indicadores do grupo 2 constam no Apêndice B.

Grupo 3

A mediana dos dias das vazões mínimas anuais (Tabela 3) correspondia ao dia 274 no período anterior à construção da barragem de Sobradinho, passando para o dia 35 no período após a construção. Para o dia da vazão máxima, as medianas são o dia 34 no período anterior à construção e no dia 333 no período posterior. Além disso, o indicador da data da vazão mínimas apresentou forte alteração hidrológica negativa.

Grupo 4

O valor máximo da quantidade de pulsos de baixa após a construção da barragem de Sobradinho mais que setuplicou (Tabela 3), além disso, esse indicador apresentou forte alteração hidrológica negativa. A duração desses pulsos de baixa apresentou grande diferença na mediana, que passou de 69 para 3, apresentando alteração hidrológica de -61%.

Em relação aos pulsos de alta (Tabela 3), a quantidade desses pulsos sofreu redução da sua mediana de 1 pulso de alta ao ano para 0, apresentando alteração hidrológica de -65%. A mediana da duração desses pulsos de alta sofreu queda, com alteração hidrológica moderada e negativa. As figuras dos indicadores do grupo 4 constam no Apêndice B. Resultado semelhante foi obtido por Hu et. al. (2008), que encontraram um indicador de alteração hidrológica alto para a quantidade de pulsos de baixa no Rio Huaihe, na China.

Grupo 5

O valor mínimo e máximo da taxa de queda (Tabela 3) sofreram alterações após a construção da barragem de Sobradinho, aumentando a amplitude. Além disso, a taxa de queda apresentou, também, forte alteração hidrológica negativa. Quando ao número de reversões (Tabela 3), a mediana mais que sextuplicou, enquanto que o mínimo se manteve estável e o máximo mais que quadruplicou. Na Figura 13 observa-se o comportamento desse indicador, o qual não apresentou pontos dentro dos limites do RVA após a construção da barragem de Sobradinho, bem como o grande aumento das quantidades de reversões anuais. A alteração hidrológica para esse indicador foi de -100%. As demais figuras dos indicadores do grupo 5 constam no Apêndice B.

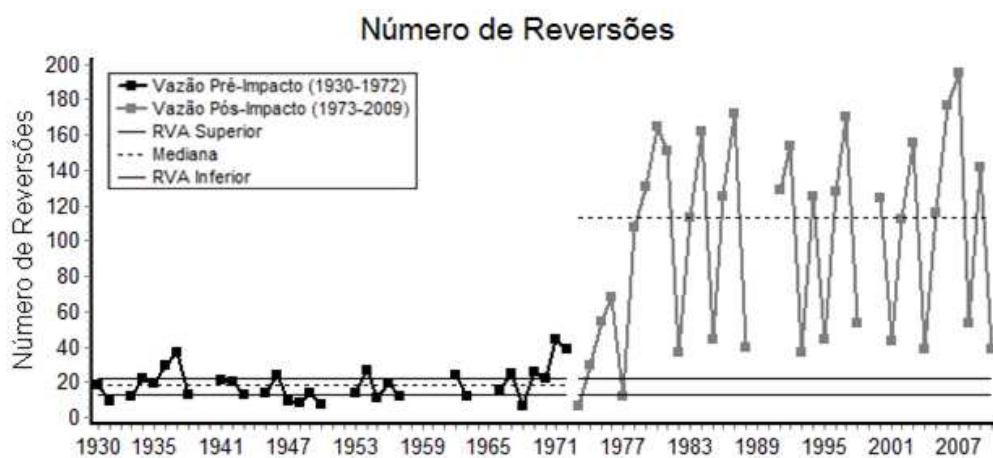


Figura 13. Série temporal do número de reversões da vazão do Rio São Francisco no município de Juazeiro antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.

4.3 Alterações hidrológicas à jusante da barragem de Xingó originadas pela construção da barragem de Sobradinho

Na Figura 14 observa-se a variação anual da precipitação e os anos que foram retirados da análise por apresentarem precipitação fora dos limites estabelecidos para análise. Na série do comportamento da vazão diária (Figura 15), os trechos onde a série é descontinuada representam os anos que foram retirados da análise por apresentarem precipitação fora dos limites aceitos devido à sua precipitação.

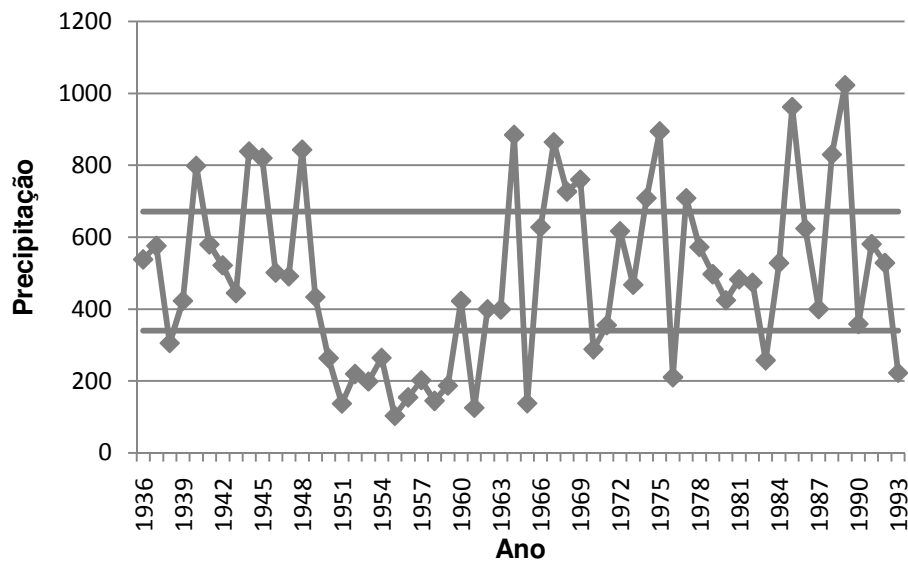


Figura 14. Precipitação anual e limites de variação aceitos dos anos para análise no município de Pão de Açúcar (AL) no período de 1936 a 1993.

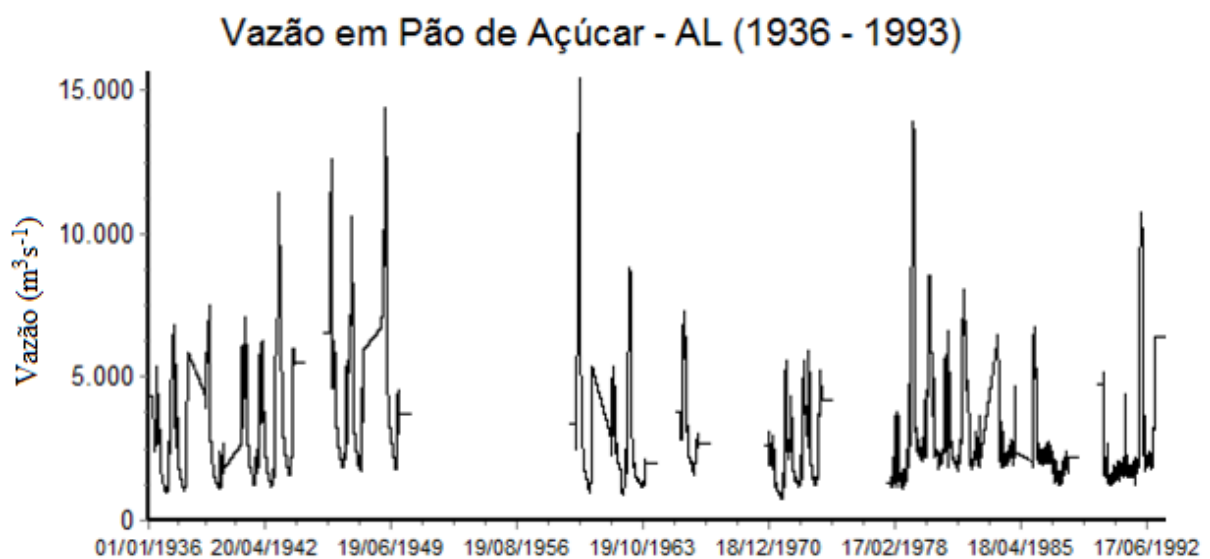


Figura 15. Série temporal da vazão diária no município de Pão de Açúcar (AL) no período de 1936 a 1993, com períodos correspondentes da seca e cheia climatológica excluídos.

Na Tabela 4 observa-se o comportamento da vazão antes e após a construção da barragem de Sobradinho, através dos valores da mediana, mínimo e máximo da vazão. Também se observam os limites do RVA (percentis 33 e 67) e o fator de alteração hidrológica dos parâmetros do IHA. Os coeficientes de alteração hidrológica também são exibidos na Figura 16.

Tabela 4. Valores da mediana, mínimo, máximo, limites RVA e Fator de Alteração Hidrológica (HA) dos 33 indicadores do IHA da vazão do Rio São Francisco, no Município de Pão de Açúcar, relacionados à construção da barragem de Sobradinho.

Grupos IHA	Período Pré – impacto:			Período Pós – impacto:			Limites RVA		Fator de Alteração Hidrológica (%)
	1936-1972			1973-1993			RVA Inf	RVA Sup	
	Med.	Mín.	Máx.	Med.	Mín.	Máx.			
Grupo 1									
Janeiro	5132	1816	7723	4171	1416	6784	3625	5604	-9,80%
Fevereiro	5704	1886	11070	3802	1529	9335	4874	6045	-100,00%
Março	5307	1956	13130	2845	1609	13430	3999	5845	-72,94%
Abril	4022	1977	7964	3200	1631	11260	3259	5409	-24,84%
Maió	2974	1549	6252	2592	1442	6414	2655	3738	-39,87%
Junho	2170	1208	6316	2234	1453	6413	1957	2985	20,26%
Julho	2065	999	6379	2197	1437	6415	1736	2630	50,33%
Agosto	1968	918	6444	2200	1330	6414	1444	2323	65,36%
Setembro	1745	859,5	6508	2145	1334	6413	1272	2132	5,23%
Outubro	1890	859	6572	2091	1301	5332	1330	2674	95,42%
Novembro	2533	1153	6636	2416	1301	5687	2025	3353	50,33%
Dezembro	3774	1704	6700	2619	1301	6041	2911	4469	-54,90%
Grupo 2									
Mínimo 1 dia	1146	746	1977	1588	1081	1896	1046	1569	20,26%
Mínimo 3 dias	1163	769	1983	1719	1236	2131	1046	1574	5,23%
Mínimo 7 dias	1182	797	2000	1853	1275	2133	1052	1580	5,23%
Mínimo 30 dias	1275	858,1	2112	1937	1297	2156	1134	1684	-24,84%
Mínimo 90 dias	1585	920,1	3283	2070	1300	3249	1392	2240	80,39%
Máximo 1 dia	6231	2128	15400	5912	2411	13900	5396	7324	-32,35%
Máximo 3 dias	6222	2057	14330	5851	2363	13880	5391	7300	-24,84%
Máximo 7 dias	6202	1997	14250	5681	2234	13850	5371	7277	-24,84%
Máximo 30 dias	5853	1982	13000	5048	2234	13330	5239	6902	-39,87%
Máximo 90 dias	5419	1979	10510	4629	2052	10290	4423	6170	-39,87%
Número de vazão nula	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00%
Escoamento de base	0,3509	0,2264	0,6397	0,6023	0,3389	0,9148	0,3289	0,4206	-54,90%
Grupo 3									
Dia da vazão mínima	278	259	315	278	2	361	273,7	280,2	-69,93%
Dia da vazão máxima	52	5	366	48	2	366	72,92	337,1	5,23%
Grupo 4									
Número de baixo pulso	1	0	5	6	0	31	1	2	-66,18%
Duração de baixo pulso (dias)	32	2	173	1,5	1	23,5	12,79	77,68	-66,18%
Número de alto pulso	1	0	3	1	0	6	1	1	-32,35%
Duração de alto pulso (dias)	42	10	500	14	1	283	30,99	74,72	-80,67%
Grupo 5									
Taxa de crescimento	47	2,093	91,5	75	11,62	160	37,46	56,54	-100,00%
Taxa de queda	-25	-45,5	-4,087	-72	-176	-0,8748	-29,16	-18	-86,47%
Número de reversões	26	6	85	117	15	185	14,76	30,16	-84,97%

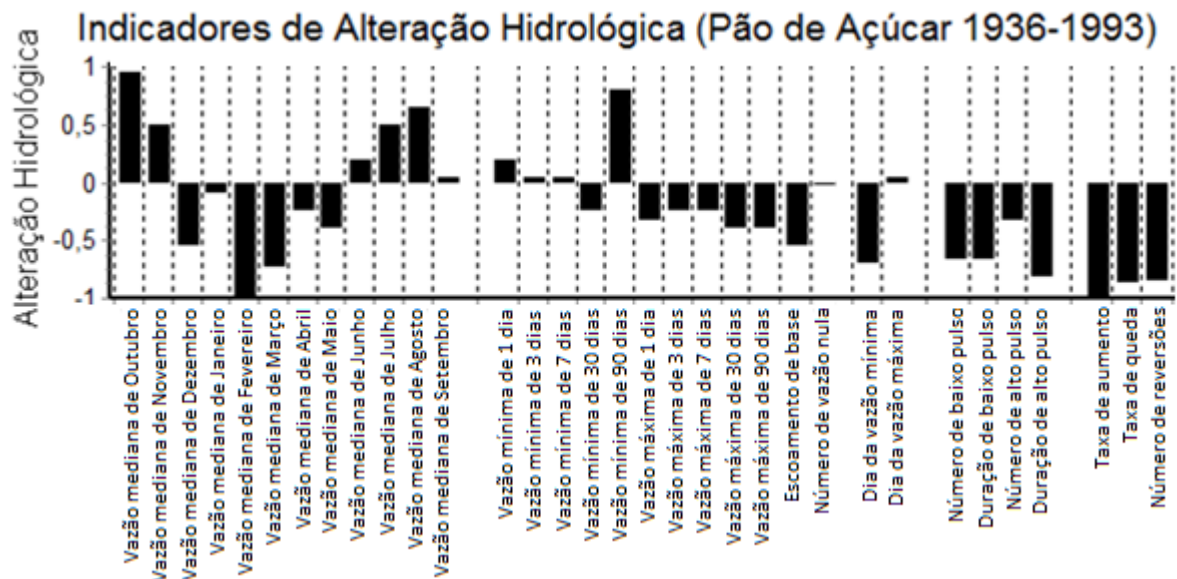


Figura 16. Fatores de alteração hidrológica no município de Pão de Açúcar -AL decorrentes da construção da barragem de Sobradinho.

Grupo 1

Entre os meses de junho a outubro os valores de vazão mediana se apresentam superiores após a construção da barragem (Tabela 4 e Figura 17), enquanto que para os demais meses o cenário se inverte. Resultados semelhantes foram encontrados por Martins et al. (2011) no estudo dos impactos da construção da usina hidrelétrica de Sobradinho no regime de vazões no Baixo São Francisco, que encontrou que a construção de sobradinho causou uma redução percentual média de 6 a 12% nas cotas maiores e uma elevação de 20 a 32% nas cotas menores. Zolezzi et al. (2009) também encontraram uma atenuação da variabilidade sazonal da vazão ao estudar o Rio Adige, na Itália. Antes da construção da barragem a vazão mediana mensal variou de 1745 a 5704 m^3s^{-1} (amplitude de 3959 m^3s^{-1}), enquanto que no período após a barragem variou de 2091 a 4171 m^3s^{-1} (amplitude de 2080 m^3s^{-1}).

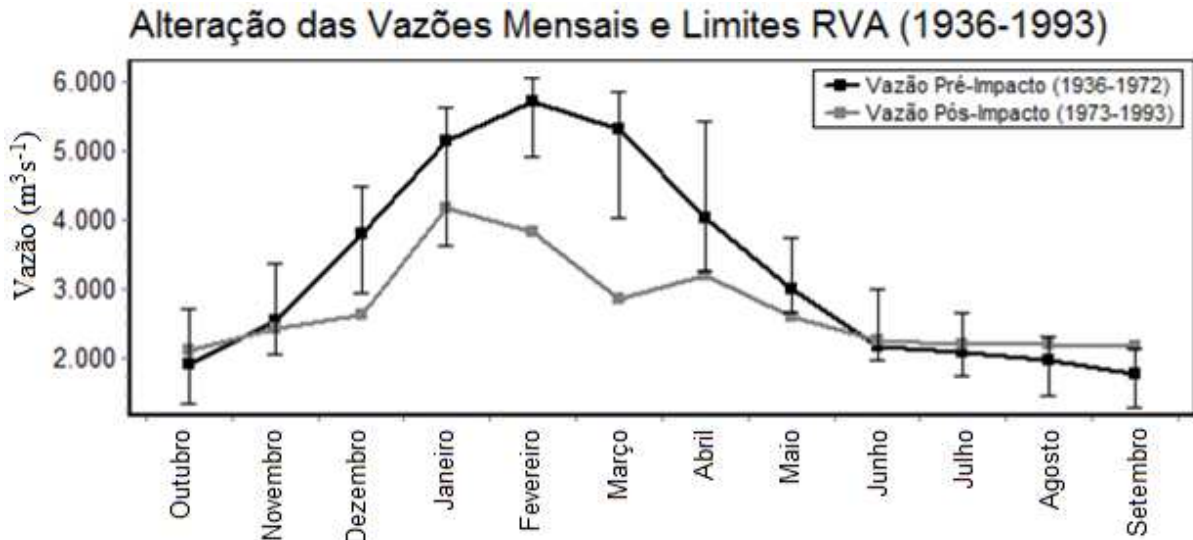


Figura 17. Distribuição mensal das vazões no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.

Nos meses de setembro, dezembro e de fevereiro a maio (Figura 17) as medianas das vazões após a construção da barragem estão fora dos limites do RVA, o que indica uma mudança no comportamento da vazão mediana. Os meses de maio, julho, agosto, novembro e dezembro apresentam alterações hidrológicas moderadas (Figura 16 e Tabela 4), sendo positivas nos meses de julho, agosto e novembro, e negativas em maio e dezembro. Já nos meses de fevereiro, março e outubro, observam-se alterações hidrológicas fortes, sendo positiva apenas no mês de outubro. As figuras dos indicadores do grupo 1 constam no Apêndice C.

Grupo 2

Nos indicadores de vazão mínima o valor da mediana (Tabela 4) no período após a construção da barragem é sempre maior que no período antes da construção. O indicador da vazão mínima anual de 90 dias (Figura 16 e Tabela 4) apresentou forte alteração hidrológica positiva. Nos indicadores de vazão máxima os valores da mediana são sempre inferiores após a construção da barragem (Tabela 4). Os indicadores de vazão máxima anual de 30 dias e de 90 dias apresentaram alteração hidrológica negativa moderada. No geral, a mediana da vazão mínima anual aumentou enquanto que a da vazão máxima diminuiu, confirmando o resultado referente às vazões mensais obtido no Grupo 1 dos indicadores de alteração hidrológica. As figuras dos indicadores do grupo 2 constam no Apêndice C.

Grupo 3

A mediana das datas das vazões mínimas anuais (Tabela 4) se encontra no dia 278 no período anterior à construção da barragem de Sobradinho, permanecendo a mesma após a construção. Apesar disso, a alteração hidrológica encontrada para esse indicador foi de -70%, indicando que há uma grande quantidade de anos após a construção da barragem em que o dia da vazão mínima não esteve dentro dos limites do RVA. Resultado semelhante foi obtido por Hu et al. (2008), que encontraram estabilidade na mediana das datas das vazões mínimas anuais do Rio Huaihe, na China. Para o dia da vazão máxima, estas medianas se encontram no dia 52 no período anterior à construção e no dia 48 no período posterior, indicando uma pequena diferença entre os dias de vazão máxima.

Grupo 4

O valor da mediana da quantidade de pulsos de baixa (Tabela 4) variou de 1 para 6 após a construção da barragem, além disso, esse indicador apresentou forte alteração hidrológica negativa. A duração desses pulsos de baixa também apresentou grande diferença, inclusive na mediana, que passou de 32 para 1,5, também com forte alteração hidrológica negativa.

Em relação aos pulsos de alta (Tabela 4), a quantidade desses pulsos se manteve estável após a construção da barragem quando comparada ao período anterior à construção. A mediana da duração dos pulsos de alta caiu de 42 para 14 após a construção da barragem, além disso o indicador apresentou forte alteração hidrológica negativa. Esses resultados também se assemelham aos obtidos por Santos et al. (2012) que encontraram a diminuição da duração dos eventos de cheia no baixo São Francisco. As figuras dos indicadores do grupo 4 constam no Apêndice C.

Grupo 5

Os valores da mediana, do mínimo e do máximo dos três indicadores desse grupo (taxa de crescimento, taxa de queda e número de reversões) apresentaram fortes alterações hidrológicas negativas (Tabela 4). Esses indicadores também apresentaram fortes alterações hidrológicas negativas, com destaque para o indicador da taxa de crescimento, que apresentou alteração hidrológica de -100%. Na Figura 18 observa-se o comportamento desse indicador, para o qual nenhum ponto está dentro dos limites do RVA após a construção da barragem de

Sobradinho, bem como o grande aumento das taxas de crescimento anuais. As demais figuras dos indicadores do grupo 5 constam no Apêndice C.

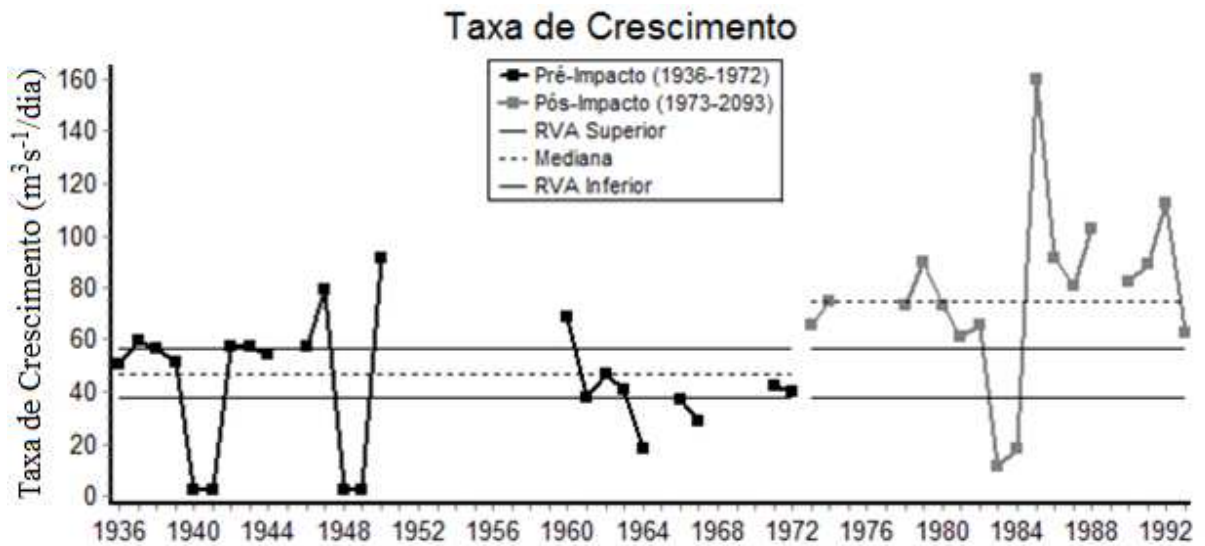


Figura 18. Série temporal da taxa de crescimento da vazão do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.

4.4 Alterações hidrológicas à jusante da barragem de Xingó originadas pela sua construção

Na Figura 19 observa-se a variação anual da precipitação e os anos que foram retirados da análise por apresentarem precipitação fora dos limites estabelecidos para análise. Na série do comportamento da vazão diária (Figura 20), os trechos onde a série é descontinuada representam os anos que foram retirados da análise por apresentarem precipitação fora dos limites aceitos devido à sua precipitação.

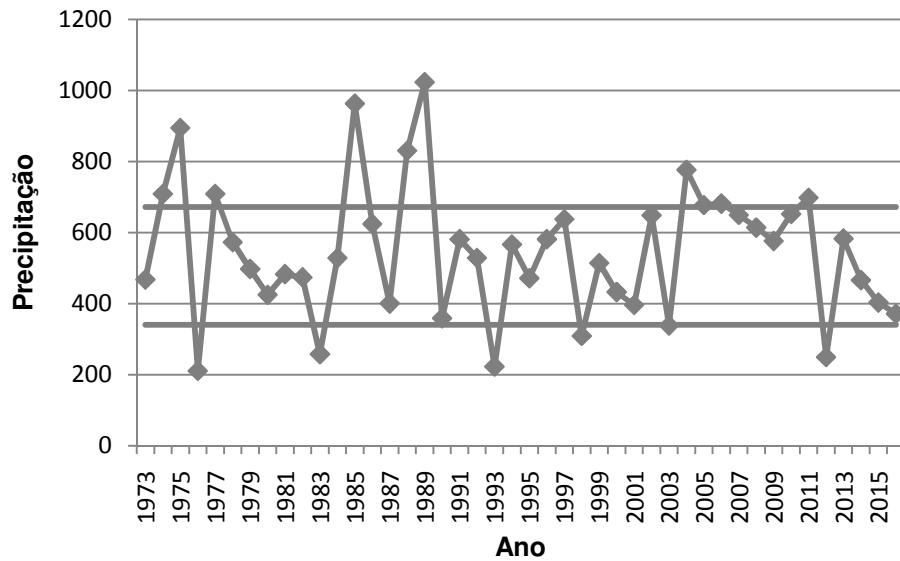


Figura 19. Precipitação anual e limites de variação aceitos dos anos para análise no município de Pão de Açúcar (AL) no período de 1973 a 2016.

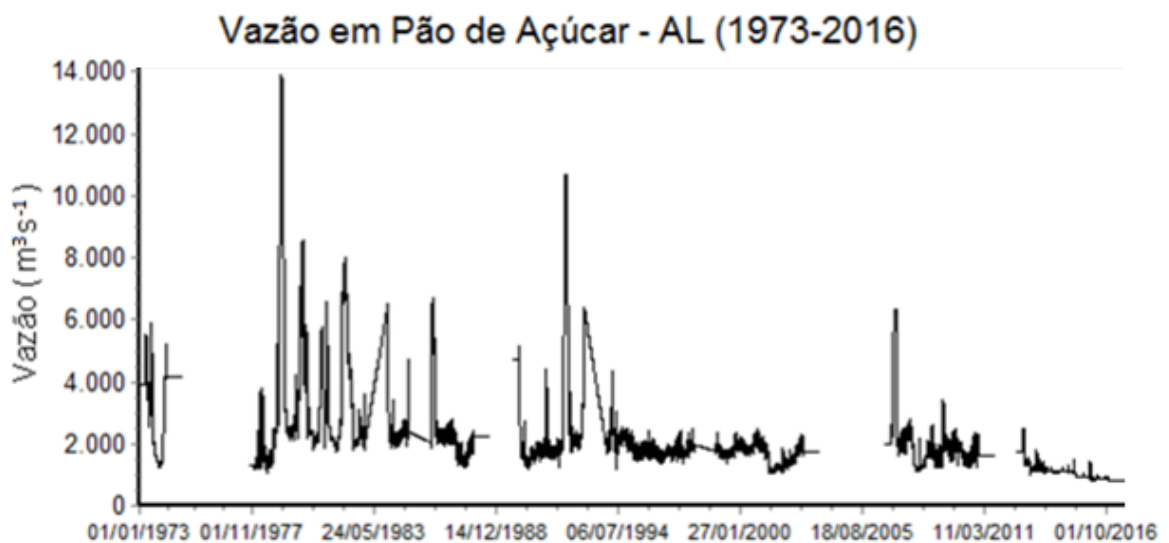


Figura 20. Série temporal da vazão diária no município de Pão de Açúcar (AL) no período de 1973 a 2016, com períodos correspondentes da seca e cheia climatológica excluídos.

Na Tabela 5 observa-se o comportamento da vazão antes e após a construção da barragem de Xingó, através dos valores da mediana, mínimo e máximo da vazão. Também se observam os limites do RVA (percentis 33 e 67) e o fator de alteração hidrológica (HA) dos parâmetros do IHA. Os coeficientes de alteração hidrológica também são exibidos na Figura 21.

Tabela 5. Valores da mediana, mínimo, máximo, limites RVA e Fator de Alteração Hidrológica (HA) dos 33 indicadores do IHA da vazão do Rio São Francisco, no município de Pão de Açúcar, relacionados à construção da barragem de Xingó.

Grupos IHA	Período Pré – impacto:			Período Pós – impacto:			Limites RVA		Fator de Alteração Hidrológica - HA (%)
	1973-1993			1994-2016			RVA Inf	RVA Sup	
	Mediana	Mínimo	Máximo	Mediana	Mínimo	Máximo			
<u>Grupo 1</u>									
Janeiro	4171	1416	6784	1699	819	2526	2382	4966	-87,86%
Fevereiro	3802	1529	9335	1738	819	6037	2327	5895	-100,00%
Março	2845	1609	13430	1727	819	5145	2299	5024	-100,00%
Abril	3200	1631	11260	1653	819	2962	2472	4493	-87,86%
Maió	2592	1442	4745	1644	819	2526	2249	3185	-87,86%
Junho	2234	1453	4373	1560	819	2092	2161	2522	-100,00%
Julho	2197	1437	4263	1605	819	2353	1982	2315	-87,86%
Agosto	2200	1330	4623	1666	819	2304	1986	2311	-87,86%
Setembro	2145	1334	4978	1731	819	2411	1948	2429	-75,71%
Outubro	2116	1301	5332	1834	889	2881	1972	2505	-39,29%
Novembro	2476	1301	5687	1849	885,5	2514	2202	2618	-51,43%
Dezembro	2619	1301	6041	1824	814	2260	2211	3639	-87,86%
<u>Grupo 2</u>									
Mínimo 1 dia	1588	1081	1896	1247	809	1635	1324	1803	-2,86%
Mínimo 3 dias	1719	1236	2131	1285	810,7	1762	1469	1899	-27,14%
Mínimo 7 dias	1853	1275	2133	1388	811	1815	1539	1969	-27,14%
Mínimo 30 dias	1937	1297	2156	1464	814,5	1826	1683	2055	-39,29%
Mínimo 90 dias	2070	1300	3249	1547	817,4	2021	1919	2192	-75,71%
Máximo 1 dia	5912	2411	13900	2434	905	6359	5118	6598	-87,86%
Máximo 3 dias	5851	2363	13880	2276	899	6354	4833	6455	-87,86%
Máximo 7 dias	5681	2234	13850	2162	897,1	6336	4754	6413	-87,86%
Máximo 30 dias	5048	2234	13330	2006	890	6185	4651	6299	-87,86%
Máximo 90 dias	4629	2052	10290	1897	858,5	4331	4098	5929	-87,86%
Número de vazão nula	0	0	0	0	0	0	0	0	0,00
Escoamento de base	0,6023	0,3389	0,9148	0,87	0,635	0,9786	0,489	0,6963	-39,29%
<u>Grupo 3</u>									
Dia da vazão mínima	278	2	361	254,5	27	366	219	283,1	-87,86%
Dia da vazão máxima	48	2	366	327	9	351	72,94	278,6	-39,29%
<u>Grupo 4</u>									
Número de baixo pulso	7	0	33	10	0	24	4	12,12	-25,63%
Duração de baixo pulso (dias)	1,5	1	77,5	3	0	861,5	1	3,78	-38,18%
Número de alto pulso	1	0	5	0	0	1	1	2	-81,11%
Duração de alto pulso (dias)	38	1	225	0	0	47	11,96	99,3	-83,00%
<u>Grupo 5</u>									
Taxa de crescimento	75	11,62	160	54	5	117	65,82	89,06	-63,57%
Taxa de queda	-68	-176	-0,8748	-52,5	-147	-0,5314	-94,13	-51,1	9,29%
Número de reversões	117	15	185	141	34	176	56,22	146,3	-15,00%

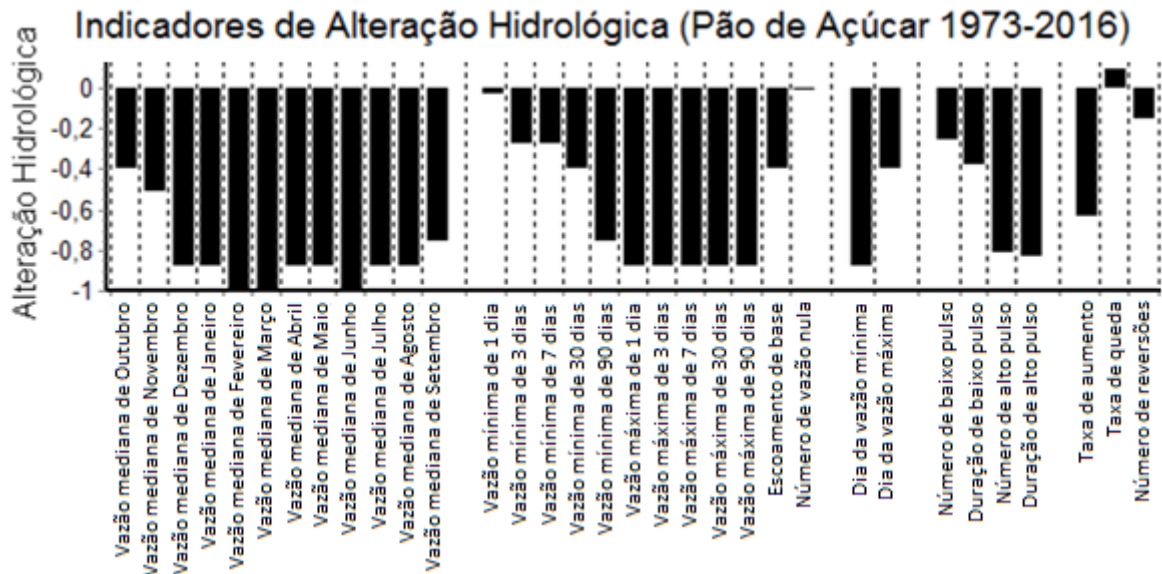


Figura 21. Fatores de alteração hidrológica para todos os indicadores, no Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar originadas pela construção da barragem de Xingó.

Grupo 1

Em todos os meses, os valores de mediana, mínimo e máximo (Tabela 5 e Figura 22) são inferiores após a construção da barragem. Antes da construção da barragem a vazão mediana mensal variou de 2116 a 4171 m^3s^{-1} (amplitude de 2055 m^3s^{-1}), enquanto que no período após a barragem variou de 1560 a 1849 m^3s^{-1} (amplitude de 289 m^3s^{-1}).

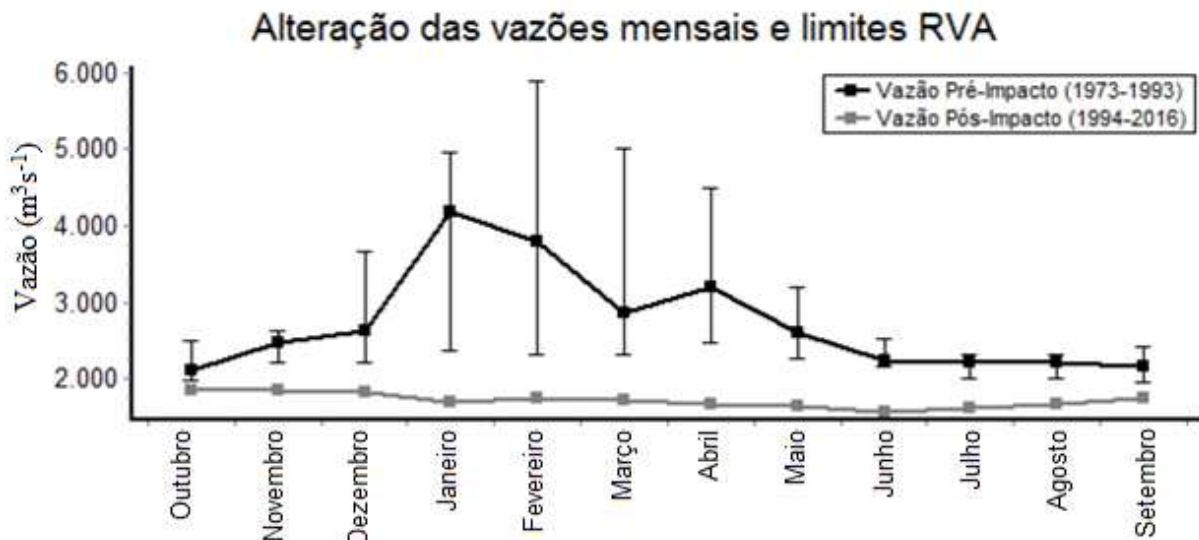


Figura 22. Distribuição mensal das vazões no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.

Em todos os meses (Figura 22) as medianas das vazões após a construção da barragem estão fora dos limites do RVA, o que indica uma mudança no comportamento da vazão

mediana. Com exceção dos meses de outubro e novembro, todos os meses (Figura 21 e Tabela 5) apresentam fortes alterações hidrológicas negativas (acima de 75%). Vale destacar os meses de fevereiro, março e junho, os quais apresentaram alterações hidrológicas de -100%, indicando que nenhum ano apresentou média das vazões mensais dentro dos limites do RVA para esses meses. Os meses de outubro e novembro, apresentam alteração hidrológica negativa e moderada. As figuras dos indicadores do Grupo 1 constam no Apêndice D.

Grupo 2

Todos os indicadores de vazão mínima e de vazão máxima (Tabela 5) possuem valor da mediana, do mínimo e do máximo após a construção da barragem sempre inferior ao período antes da construção. Yang et al. (2008) também encontraram diminuição das flutuações das vazões mínimas e máximas em janelas de 1, 3, 7, 30 e 90 dias ao avaliar os impactos hidrológicos da construção da barragem de Sanmenxia, no Rio Amarelo, na China.

Entre os indicadores de mínima, vale destacar a forte alteração hidrológica negativa do indicador da vazão mínima anual de 90 dias (Figura 21 e Tabela 5) e a alteração moderada e negativa do indicador da vazão mínima anual de 30 dias. Os indicadores de vazão máxima anual apresentaram, todos, forte alteração hidrológica negativa. As figuras dos indicadores do Grupo 2 constam no Apêndice D.

Grupo 3

A mediana (Tabela 5) das datas das vazões mínimas anuais se encontra no dia 278 no período anterior à construção da barragem de Sobradinho, mudando para 254,5 após a construção, indicando uma variação de 24 dias. A alteração hidrológica encontrada para esse indicador foi de -88%. Para o dia da vazão máxima, a mediana se encontra no dia 48 no período anterior à construção e no dia 327 no período posterior, com alteração hidrológica moderada.

Grupo 4

O valor da mediana da quantidade de pulsos de baixa (Tabela 5) variou de 7, antes da construção da barragem de Xingó para 10 após a construção da barragem. A mediana da duração desses pulsos de baixa duplicou, apresentando alteração hidrológica moderada e negativa. Em relação aos pulsos de alta, a mediana da quantidade desses pulsos (Tabela 5) diminuiu de 1, antes da construção da barragem, para 0 após a construção da barragem,

apresentando também, forte alteração hidrológica negativa. A mediana da duração dos pulsos de alta caiu de 38 para 0 após a construção da barragem, implicando numa forte alteração hidrológica negativa. Esses resultados também se assemelham aos obtidos por Santos et al. (2012) que encontraram a diminuição da duração dos eventos de cheia no baixo São Francisco. As figuras dos indicadores do Grupo 4 constam no Apêndice D.

Grupo 5

O valor da mediana da taxa de crescimento (Tabela 5) diminuiu de 75 para 54, apresentando também um fator de alteração hidrológica moderado e negativo. O indicador da taxa de queda apresentou uma pequena alteração na mediana, que variou de -68 para -52,5. O número de reversões apresentou também uma pequena variação na sua mediana, que aumentou de 117 antes da construção da barragem para 141 após a construção. As figuras dos indicadores do Grupo 5 constam no Apêndice D.

4.5 Avaliação integrada dos indicadores de alteração hidrológica nos municípios de São Francisco, Juazeiro e Pão de Açúcar

Na Tabela 6 observam-se os fatores de alteração hidrológica de cada uma das quatro análises apresentadas nesse estudo, permitindo uma avaliação conjunta das alterações ocorridas nos três municípios estudados ao longo do Rio São Francisco decorrentes da construção das três barragens consideradas. No grupo 1 dos indicadores de alteração hidrológica, ao avaliar a construção da barragem de Sobradinho em Juazeiro, a forte alteração hidrológica negativa da vazão média mensal de janeiro também se apresenta forte ao avaliar a construção de Xingó em Pão de Açúcar. Observam-se fortes alterações hidrológicas negativas nos indicadores das vazões médias mensais de fevereiro e março em todas as análises, exceto ao avaliar a construção de Três Marias em São Francisco. Chen et al. (2010) também encontraram forte alteração hidrológica para os indicadores da vazão média mensal de fevereiro, março e julho ao analisar as alterações ecológicas no East River (Dongjiang), na China. Yang et al. (2008) também encontraram forte alteração hidrológica na vazão média do mês de março ao avaliar os impactos hidrológicos da construção da barragem de Sanmenxia, no Rio Amarelo, na China. Os indicadores das vazões médias mensais de abril e setembro apresentaram fortes alterações hidrológicas negativas em Pão de Açúcar ao avaliar a construção da barragem de Xingó, bem como apresentou moderada alteração hidrológica negativa ao avaliar a construção de Sobradinho em Juazeiro, e Três Marias em São Francisco. Também foram encontradas fortes alterações hidrológicas negativas para os indicadores da vazão média mensal de janeiro e de março a setembro ao analisar as alterações ecológicas no Rio Jaguari (SILVA, 2014). Os indicadores das vazões médias mensais de maio, junho e julho apresentaram fortes alterações hidrológicas positivas ao se analisar a construção de Sobradinho em Juazeiro, passando a ser alterações fortes e negativas ao analisar a construção de Xingó em Pão de Açúcar. O indicador da vazão média mensal de novembro apresentou forte alteração hidrológica positiva ao se analisar a construção de Sobradinho em Juazeiro. Já o indicador da vazão média mensal de dezembro apresentou forte alteração hidrológica negativa ao se avaliar a construção de Xingó em Pão de Açúcar.

Tabela 6. Fatores de Alteração Hidrológica e grau de alteração hidrológica por local, fator de impacto e período.

	Local: São Francisco	Juazeiro	Pão de Açúcar	Pão de Açúcar
Impacto:	Três Marias 1962	Sobradinho 1973	Sobradinho 1973	Xingó 1994
Período:	1939-1961 1962-2014	1930-1972 1973-2009	1936-1972 1973-1993	1973-1993 1994-2016
<u>Grupo 1</u>				
Janeiro	14,60%	-75,84%	-9,80%	-87,86%
Fevereiro	-33,65%	-91,95%	-100,00%	-100,00%
Março	-3,49%	-91,95%	-72,94%	-100,00%
Abril	-39,68%	-43,64%	-24,84%	-87,86%
Mai	14,60%	69,09%	-39,87%	-87,86%
Junho	50,79%	133,50%	20,26%	-100,00%
Julho	44,76%	69,09%	50,33%	-87,86%
Agosto	-33,65%	4,68%	65,36%	-87,86%
Setembro	-57,78%	-43,64%	5,23%	-75,71%
Outubro	8,57%	25,48%	95,42%	-39,29%
Novembro	14,60%	85,19%	50,33%	-51,43%
Dezembro	14,60%	-59,74%	-54,90%	-87,86%
<u>Grupo 2</u>				
Mínimo 1 dia	-89,44%	-59,74%	20,26%	-2,86%
Mínimo 3 dias	-89,44%	-67,79%	5,23%	-27,14%
Mínimo 7 dias	-87,94%	-59,74%	5,23%	-27,14%
Mínimo 30 dias	-81,90%	-75,84%	-24,84%	-39,29%
Mínimo 90 dias	-21,59%	20,78%	80,39%	-75,71%
Máximo 1 dia	-3,49%	-83,90%	-32,35%	-87,86%
Máximo 3 dias	-3,49%	-83,90%	-24,84%	-87,86%
Máximo 7 dias	14,60%	-83,90%	-24,84%	-87,86%
Máximo 30 dias	32,70%	-91,95%	-39,87%	-87,86%
Máximo 90 dias	26,67%	-83,90%	-39,87%	-87,86%
Número de vazão nula	0,00%	0,00%	0,00%	0,00
Escoamento de base	-87,94%	-100,00%	-54,90%	-39,29%
<u>Grupo 3</u>				
Dia da vazão mínima	-5,00%	-67,79%	-69,93%	-87,86%
Dia da vazão máxima	32,70%	44,94%	5,23%	-39,29%
<u>Grupo 4</u>				
Número de baixo pulso	-61,30%	-70,48%	-66,18%	-25,63%
Duração de baixo pulso (dias)	-57,78%	-60,63%	-66,18%	-38,18%
Número de alto pulso	-12,31%	-64,57%	-32,35%	-81,11%
Duração de alto pulso (dias)	-47,22%	-50,79%	-80,67%	-83,00%
<u>Grupo 5</u>				
Taxa de crescimento	-63,81%	-26,19%	-100,00%	-63,57%
Taxa de queda	-81,90%	-83,90%	-86,47%	9,29%
Número de reversões	-75,87%	-100,00%	-84,97%	-15,00%

Foram encontradas fortes alterações hidrológicas em São Francisco, relacionadas à construção de Três Marias, para os indicadores das vazões mínimas em janelas de 1 dia, de 3 dias, de 7 dias e 30 dias. Os indicadores da vazão mínima mensal de 3 dias e de 30 dias permaneceram fortes ao analisar a construção de Sobradinho em Juazeiro. Koel e Sparks (2002) obtiveram resultados semelhantes, com alterações hidrológicas negativas e altas para os indicadores de vazão mínima (de 1 a 30 dias) no estudo de barragens no Rio Illinois, nos Estados Unidos. Também foram encontradas fortes alterações hidrológicas negativas em todos os indicadores de vazão mínima no Rio Jaguari (SILVA, 2014).

Ao analisar as alterações hidrológicas de Sobradinho em Juazeiro, foram encontradas fortes alterações hidrológicas negativas em todos os indicadores de vazão máxima, bem como ao analisar as alterações de Xingó no município de Pão de Açúcar. Chen et al. (2010) encontraram forte alteração hidrológica para os indicadores da vazão máxima de 1 e 3 dias, bem como alterações moderadas para os indicadores de vazão máxima de 7 e 30 dias, ao analisar as alterações ecológicas no East River (Dongjiang), na China. Por outro lado, ao analisar as alterações hidrológicas nos indicadores de vazão máxima no município de São Francisco, originadas pela construção de Três Marias, foram encontradas alterações hidrológicas baixas. Resultados semelhantes também foram obtidos por Rocha (2010), que encontrou pouca alteração hidrológica nos indicadores de vazão máxima do alto Rio Paraná, no Brasil. Shiau e Wu (2004) encontraram resultados semelhantes ao estudar o Rio Chou-Shui, em Taiwan, observando que as alterações hidrológicas nos indicadores de vazão máxima do grupo 2 se apresentaram baixas.

Observa-se também que, exceto na análise da construção da barragem de Xingó, em Pão de Açúcar, nas demais análises, a vazão mínima anual aumentou enquanto que a vazão máxima diminuiu. Outros resultados semelhantes foram obtidos por Maingi e Marsh (2002), que encontraram aumento estatisticamente significativo dos fluxos mínimos e redução nos fluxos máximos do Rio Tana (Quênia). Martins et al. (2011), no estudo dos impactos da construção da usina hidrelétrica de Sobradinho no regime de vazões no Baixo São Francisco, encontraram redução de 9% na vazão máxima e aumento de 27% na vazão mínima. Yang et al. (2008) também encontraram diminuição das flutuações mensais da vazão bem como uma menor dispersão ao avaliar os impactos hidrológicos da construção da barragem de Sanmenxia, no Rio Amarelo, na China. Na análise da construção da barragem de Xingó, em Pão de Açúcar, os indicadores de vazão mínima também diminuiram.

O indicador da data da vazão mínima apresentou forte alteração hidrológica na análise das alterações hidrológicas em Juazeiro relativas à construção de Sobradinho. Essa alteração permaneceu forte em Pão de Açúcar ao analisar as alterações relativas à construção de Sobradinho, bem como ao analisar as alterações originadas pela construção de Xingó, também em Pão de Açúcar. Chen et al. (2010) também encontraram forte alteração hidrológica para o indicador do dia da vazão mínima ao analisar as alterações ecológicas no East River (Dongjiang), China.

Foram encontradas alterações hidrológicas altas e negativas no indicador da quantidade dos pulsos de baixa ao analisar as alterações hidrológicas em Juazeiro originadas pela construção da barragem de Sobradinho. Essas alterações permaneceram fortes no município de Pão de Açúcar ao analisar a construção da barragem de Sobradinho. Resultado semelhante foi obtido por Hu et al. (2008), que encontraram forte alteração hidrológica na quantidade de pulsos de baixa no Rio Huaihe, na China. Yang et al. (2008) também encontraram forte alteração hidrológica na contagem dos pulsos de baixa ao avaliar os impactos hidrológicos da construção da barragem de Sanmenxia, no Rio Amarelo, na China. Também foram encontradas fortes alterações hidrológicas negativas na quantidade de pulsos de baixa no Rio Atibaia e no Rio Jaguari (SILVA, 2014).

O indicador da duração dos pulsos de alta apresentou alterações hidrológicas moderadas e negativas nas análises das alterações decorrentes da barragem de Três Marias em São Francisco e das alterações decorrentes da barragem e Sobradinho em Juazeiro. Além disso, esse indicador apresentou fortes alterações hidrológicas negativas decorrentes da construção da barragem de Sobradinho em Pão de Açúcar, bem como da construção da barragem de Xingó em Pão de Açúcar. Também Koel e Sparks (2002) obtiveram resultados semelhantes, com alterações hidrológicas negativas para os indicadores de quantidade e duração dos pulsos de alta no estudo de barragens no Rio Illinois, nos Estados Unidos. Yang et al. (2008) também encontraram forte alteração hidrológica na duração dos pulsos de alta ao avaliar os impactos hidrológicos da construção da barragem de Sanmenxia, no Rio Amarelo, na China.

A taxa de queda e o número de reversões apresentaram fortes alterações hidrológicas negativas no município de São Francisco ao analisar as alterações decorrentes da construção da barragem de Três Marias. Esses mesmos indicadores continuaram apresentando fortes alterações ao analisar a construção de Sobradinho, em Juazeiro, e também ao analisar a construção de Sobradinho, em Pão de Açúcar. Yang et al. (2008) também encontraram forte

alteração hidrológica na taxa de queda ao avaliar os impactos hidrológicos da construção da barragem de Sanmenxia, no Rio Amarelo, na China. Também foi encontrada forte alteração hidrológica negativa na taxa de queda no Rio Atibaia (SILVA, 2014). Koel e Sparks (2002) obtiveram resultados semelhantes, com fortes alterações hidrológicas negativas na taxa de crescimento, de queda e no número de reversões ao estudar as barragens no Rio Illinois, nos Estados Unidos.

Vale destacar a alteração de -100% encontrada no indicador do número de reversões ao avaliar as alterações hidrológicas em Juazeiro, relativas à construção de Sobradinho. Resultados semelhantes foram encontrados por Alrajoula et al. (2016) no estudo da barragem Er Roseires, no Rio Nilo Azul, no Sudão, o qual apresentou uma alteração hidrológica de -100% no número de reversões. Esses resultados são semelhantes aos encontrados por Wang et al. (2016), com alteração hidrológica de -100% no número de reversões ao analisar as alterações hidrológicas relativas à construção do Rio Yangtze, na China.

Na Tabela 7 observa-se o grau geral de alteração hidrológica aprimorado por análise e por grupo de indicadores. O grau geral de alteração hidrológica no município de Juazeiro, originado pela construção de Sobradinho, foi o maior entre as cinco análises, em grande parte devido aos indicadores da vazão média mensal de junho e do número de reversões, que apresentaram alterações hidrológicas de 133% e -100%, mas também devido à forte alteração hidrológica geral do grupo 1. A análise da construção de Sobradinho, no município de Pão de Açúcar apresentou o segundo maior grau geral de alteração hidrológica, devido aos indicadores da vazão média mensal de fevereiro e da taxa de crescimento, os quais apresentaram alteração hidrológica de -100%. Além disso, três grupos apresentaram fortes alterações hidrológicas: grupo 1, grupo 4 e grupo 5.

Tabela 7. Grau geral de alteração hidrológica aprimorado (IODHA) geral e por grupo.

Local:	São Francisco	Juazeiro	Pão de Açúcar	Pão de Açúcar
Impacto:	Três Marias	Sobradinho	Sobradinho	Xingó
Período:	1962	1973	1973	1994
	1939-1961	1930-1972	1936-1972	1973-1993
	1962-2014	1973-2009	1973-1993	1994-2016
Grupo 1	12,0	84,3	76,3	45,8
Grupo 2	89,4	63,9	14,8	19,3
Grupo 3	23,4	57,5	49,6	68,1
Grupo 4	59,6	65,7	66,2	32,5
Grupo 5	73,4	62,1	93,5	45,4
IODHA	51,6	66,7	60,1	42,2

5. CONCLUSÕES

O grau geral de alteração hidrológica no município de Juazeiro, originado pela construção de Sobradinho, foi o maior entre as quatro análises, em grande parte devido aos indicadores da vazão média mensal de junho e do número de reversões, que apresentaram alterações hidrológicas de 133% e -100%, mas também devido às fortes alterações hidrológicas gerais do grupo 1. Essa análise também foi a com maior quantidade de indicadores fortemente alterados (vinte) e com a maior quantidade de alterações fortes e positivas (quatro), bem como foi a análise com o indicador que apresentou a maior alteração hidrológica entre todas as análises: alteração de 133% na vazão média de junho.

A análise da construção de Sobradinho, no município de Pão de Açúcar, apresentou o segundo maior grau geral de alteração hidrológica, com forte alteração geral nos grupos 1, 4 e 5, sendo influenciada pelos indicadores da vazão média mensal de fevereiro e da taxa de crescimento, que apresentaram alterações hidrológicas de -100% cada.

A segunda análise com a maior quantidade de indicadores fortemente alterados foi a análise da construção de Xingó e Pão de Açúcar, em que foram encontrados 19 indicadores com fortes alterações hidrológicas, todas negativas. Por outro lado, essa foi também a análise com menor grau geral de alteração hidrológica (42,2%). A menor quantidade de indicadores fortemente alterados foi encontrada na análise das alterações após a construção de Três Marias no município de São Francisco, com oito indicadores fortemente alterados.

Diante das alterações hidrológicas encontradas, os limites RVA fornecem base para ajudar na gestão ambiental e nos projetos de recuperação e restauração do ecossistema, a fim de torná-lo o mais próximo possível do estado anterior. Além disso, os resultados descritos nesse trabalho proporcionaram um passo em direção a um maior entendimento das alterações hidrológicas causadas pela atividade humana nas construções de barragens, que afetam todo o ecossistema e as atividades a ele associadas.

Muito ainda pode ser investigado em relação às alterações hidrológicas ocasionadas pela construção de barragens na bacia do Rio São Francisco. Existem ainda outras barragens a serem estudadas através da metodologia do IHA e RVA, bem como outras metodologias podem ser utilizadas para efeitos de comparação dos resultados.

6. REFERÊNCIAS

ABBUD, O. A.; TANCREDI, M. Transformações recentes da matriz brasileira de geração de energia elétrica – causas e impactos principais. Texto para Discussão nº 69. **Núcleo de Estudos e Pesquisas do Senado**. Brasília, DF. 2010.

ACREMAN M. C.; DUNBAR, M. J. Defining Environmental River Flow Requirements – a Review. **Hydrology and Earth System Sciences**, v. 8, p. 861-876, 2004.

ALRAJOUOLA, M. T; ZAYED, I. S.; HAMDY, M. R. Hydrological, socio-economic and reservoir alterations of Er Roseires Dam in Sudan. **Science of the Total Environment**, 566–567 p. 938–948, 2016.

ALENCAR-SILVA, T.; MAILLARD, P. Determinação da estrutura biofísica da vegetação ribeirinha através de técnica de segmentação, análise de textura de imagem e modelagem estatística. **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, Curitiba-PR, Brasil, 30 de abril a 05 de maio de 2011, INPE p.7828-7835.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**, 2ª Ed. Capítulo 4: Energia Hidráulica, 2005.

ANEEL – AGÊNCIA NACIONAL DE ENERGIA ELÉTRICA (Brasil). **Atlas de Energia Elétrica do Brasil**, 3ª Ed. Parte II: Fontes Renováveis, Capítulo 3: Energia Hidráulica, 2008.

ARAÚJO, G. J. F.; SILVA, M. M. Crescimento econômico no semiárido brasileiro: o caso do polo frutícola Petrolina/Juazeiro. **Revista Caminhos de Geografia**, v. 14, n. 46, 2013.

ARAÚJO, J. S.; SÁ, M. F. P. Sustentabilidade da piscicultura no baixo São Francisco alagoano: condicionantes socioeconômicos. **Ambiente & Sociedade**, v. XI, n. 2, p. 405-424, 2008.

ARAÚJO, S. S.; AGUIAR NETTO, A. O.; GOMES, L. J. A percepção ambiental, identidade e pertencimento dos moradores do povoado Cabeço, em Brejo Grande/SE, frente às inundações na foz do Rio São Francisco. **Desenvolv. Meio Ambiente**, v. 36, p. 239-253, 2016.

BARBOSA, J. M.; SOARES, E. C.; CINTRA, I. H. A.; HERMANN, M.; ARAÚJO, A. R. R. Perfil da ictiofauna da bacia do Rio São Francisco. **Acta Fish. Aquat. Res.** 5 (1): 70-90, 2017.

BARRELLA, W.; PETRERE Jr, M.; SMITH, W. S.; MONTAG, L. F. A. As relações entre as matas ciliares, os rios e os peixes. In: RODRIGUES, R. R.; LEITÃO FILHO; H. F. **Matas ciliares: conservação e recuperação**. 2ª ed., Editora da Universidade de São Paulo, 2001.

BERMANN, C. O projeto da Usina Hidrelétrica Belo Monte: a autocracia energética como paradigma. **Novos Cadernos NAEA**, v.15, n.1, p. 5-23, 2012.

BROWN, R. A.; PASTERNAK, G. B. Engineered channel controls limiting spawning habitat rehabilitation success on regulated gravel-bed rivers. **Geomorphology**, v. 97, p. 631–654, 2008.

CALLISTO, M.; GONÇALVES, JR., J. F.; MORENO, P. Invertebrados aquáticos como bioindicadores. In: **Navegando o Rio das Velhas das Minas aos Gerais**. Belo Horizonte: UFMG. v. 1, p. 1-12, 2005.

CASADO, A. P. B.; HOLANDA, F. S. R.; ARAÚJO FILHO, F. A. G.; YAGUIU, P. Evolução do processo erosivo na margem direita do Rio São Francisco (perímetro irrigado cotinguiba/pindoba - se). **R. Bras. Ci. Solo**, v. 26, p. 231-239, 2002.

CHEN, Y. D.; YANG, T.; XU, C.; ZHANG, Q.; CHEN, X.; HAO, Z. Hydrologic alteration along the Middle and Upper East River (Dongjiang) basin, South China: a visually enhanced mining on the results of RVA method. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 24, p. 9–18, 2010.

CHESF **Descrição do Aproveitamento de Xingó**. Disponível em: <<https://www.chesf.gov.br/SistemaChesf/Pages/SistemaGeracao/Xingo.aspx>>. Acesso em 23/05/2018.

CODEVASF - Companhia de Desenvolvimento do São Francisco e Vale da Paraíba. **Projeto básico de proteção da margem direita do Rio São Francisco no perímetro de irrigação Cotinguiba/Pindoba**, 4ª SR – Sergipe. Brasília, DF, CODEVASF, 2003.

CONSERVATION GATEWAY. **IHA Software Download**. Disponível em: <<https://www.conservationgateway.org/ConservationPractices/Freshwater/EnvironmentalFlows/MethodsandTools/IndicatorsofHydrologicAlteration/Pages/IHA-Software-Download.aspx>>. Acesso em 6 de maio de 2015.

CORREIA, M. F.; DIAS, M. A. F. S. Variação do Nível do Reservatório de Sobradinho e seu Impacto Sobre o Clima da Região. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 8 n.1, p. 157–168, 2003.

COSTIGAN, K. H.; DANIELS, M. D. Damming the prairie: human alteration of Great Plains river regimes. **Journal of Hydrology**, v. 444, p. 90-99, 2012.

DYER, F.; ELSAWAH, S.; CROKE, B.; GRIFFITHS, R.; HARRISON, E.; LUCENA-MOYA, P.; JAKEMAN, A. The effects of climate change on ecologically-relevant flow regime and water quality attributes. **Stochastic Environmental Research and Risk Assessment**, v. 28(1), p. 67-82, 2014.

FABIÃO, A.; FABIÃO, A. Os ecossistemas ribeirinhos, pp. 91-108. In: SILVA, S., J. [Coord. Ed.] **Do castanheiro ao teixo. As outras espécies florestais**, pp. 217. Coleção Árvores e Florestas de Portugal (9 vols), Jornal Público/FLAD/LPN, Lisboa, v. 5, 2007.

FEARNSIDE, P.M. Environmental impacts of Brazil's Tucuruí Dam: Unlearned lessons for hydroelectric development in Amazonia. **Environmental Management**, v. 27(3), p.377-396, 2001.

GAO, B.; YANG, D.; ZHAO, T.; YANG, H. Changes in the eco-flow metrics of the Upper Yangtze River from 1961 to 2008. **Journal of Hydrology**, 448–449, p. 30–38, 2012.

GAO, Y.; VOGEL, R. M.; KROLL, C. N.; POFF, N. L.; OLDEN, J. D. Development of representative indicators of hydrologic alteration. **Journal of Hydrology**, 374, 136-147, 2009.

GODINHO, A. L.; GODINHO, H. P. Breve visão do São Francisco, p. 15-24. In: GODINHO, H. P.; GODINHO, A. L. (Eds). **Águas, peixes e pescadores do São Francisco das Minas Gerais**. Belo Horizonte: Editora PUC Minas, p. 468, 2003.

GOMES, J. H. C. **Ecologia trófica de espécies de peixes nos reservatório de Três Marias (MG)**. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2002.

GRAF, W. L. Downstream hydrologic and geomorphic effects of large dams on American rivers. **Geomorphology**, v. 79, p. 336–360, 2006.

GUIMARÃES, D. P.; LANDAU, E. C.; BARROS, C. A. Uso do Google Earth para a estimativa da extensão do Rio São Francisco. In: **Anais XV Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto - SBSR**, p. 1185. Curitiba: Inpe. 2011.

GUIMARÃES, J. L. B. **Relação entre a ocupação do solo e o comportamento hidrológico da bacia hidrográfica do Rio Pequeno-São José dos Pinhais-PR**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 197f., 2000.

GURJÃO, C. D. S.; CORREIA, M. F.; CHAVES FILHO, J. B.; ARAGÃO, M. R. da S. Influência do Enos (El Niño-Oscilação Sul) no Regime Hidrológico do Rio São Francisco: uma Análise em Regiões com Fortes Pressões Antrópicas. **Revista Brasileira de Geografia Física**, v. 04, p. 774-790, 2012.

HOLANDA, F. S. R.; ISMERIM, S. S.; ROCHA, I. P. DA; JESUS, A. S. DE; ARAÚJO FILHO, R. N. DE; MÉLLO JÚNIOR, A. V. DE. Environmental Perception of the São Francisco Riverine Population in Regards to Flood Impact. **Journal of Human Ecology**, v. 28, p.37-46, 2009.

HU, W.; WANG, G.; DENG, W.; LI, S. The influence of dams on ecohydrological conditions in the Huaihe River basin, China. **Ecological Engineering**, v. 33, p. 233–241, 2008.

JESUS, N. B. DE; GOMES, L. J. Conflitos socioambientais no extrativismo da aroeira (*schinus terebinthifolius raddi*), baixo São Francisco – Sergipe/alagoas. **Ambiente & Sociedade**, v. XV, n. 3, p. 55-73, 2012.

KIM, B. S.; KIM, B. K.; KWON, H. H. Assessment of the impact of climate change on the flow regime of the Han River basin using indicators of hydrologic alteration. **Hydrol. Process.** v. 25, p. 691–704, 2011.

KNOPPERS, B.; MEDEIROS, P. R. P.; SOUZA, W. F. L.; JENNERJAHN, T. **The São Francisco Estuary, Brazil.** *Handb Environ Chem* 5 (part H):51–70, 2006.

KOEL, T. M.; SPARKS, R. E. Historical Patterns of River Stage and Fish Communities as Criteria for Operations of Dams on the Illinois River. **River Res. Applic.** V. 18, p. 3-19, 2002.

LACERDA, M. A. D.; LACERDA, R. D. O Cluster da fruticultura no Polo Petrolina/Juazeiro. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, v. 4, n. 1, 1º Semestre 2004.

MAINGI, J. K.; MARSH, S. E. Quantifying hydrologic impacts following dam construction along the Tana River, Kenya. **Journal of Arid Environments**, v. 50, p. 53-79, 2002.

MAGILLIGAN, F. J.; NISLOW, K. H. Changes in hydrologic regime by dams. **Geomorphology**, v. 71(1), p. 61-78, 2005.

MARCHIORI, J. N. C.; CANTO-DOROW, T. S.; BÜNEKER, H. M.; ESSI, L.; BREIER, T. B.; PONTES, R. C. Campos e Florestas no Curso Médio do Rio Toropi, Rio Grande do Sul (Brasil). Retrato de um Admirável Patrimônio Ameaçado. **Baldunia**, n. 45, p. 01-16, 2014.

MARTINS, D. M. F.; CHAGAS, R. M.; MELO NETO, J. O.; MELLO JÚNIOR, A. V. Impactos da construção da usina hidrelétrica de Sobradinho no regime de vazões no Baixo São Francisco. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.15, n.9, p.1054–1061, 2011.

MEDEIROS, P. R. P.; KNOPPERS, B.; SOUZA, W. F. L.; OLIVEIRA, E. Aporte de Material em Suspensão no Baixo Rio São Francisco (SE/AL), em Diferentes Condições Hidrológicas. **Braz. J. Aquat. Sci. Technol.**, v. 15(1), p. 42-53, 2011.

MITSCH, W. J.; GOSELINK, J. G. **Wetlands**, 3rd ed. John Wiley, New York, 2000.

MOREIRA, I.; DUARTE, T. Comunidades Vegetais Aquáticas e Ribeirinhas. In MOREIRA, I.; FERREIRA, M. T.; CORTES, R.; PINTO, P.; ALMEIDA, P. R. (Eds) **Ecosistemas Aquáticos e Ribeirinhos: Ecologia, Gestão e Conservação**, Instituto da Água, Lisboa p. 3.3–3.30, 2002.

OLDEN, J. D.; POFF, N. L. Redundancy and the Choice of Hydrologic Indices for Characterizing Stream flow Regimes. **River Res. Applic.** v.19, p. 101–121, 2003.

OLIVEIRA, R.; ZHOURI, A. Paisagens industriais e desterritorialização de populações locais: conflitos socioambientais em projetos hidrelétricos. In: ZHOURI, A.;

LASCHEFSKI, K.; PEREIRA, D. B. **A insustentável leveza da política ambiental: desenvolvimento e conflitos socioambientais**. Belo Horizonte: Autêntica, p. 49-64, 2005.

PEREIRA, S. B.; PRUSKI, F. F.; SILVA, D. D.; RAMOS, M. M. Evaporação líquida no lago de Sobradinho e impactos no escoamento devido à construção do reservatório. **Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 13, n. 3, p. 346–352, 2008.

PIMENTA, A. M.; ALBERTONI, E. F.; PALMA-SILVA, C. Characterization of water quality in a small hydropower plant reservoir in southern Brazil. **Lakes & Reservoirs: Research and Management**, v. 17, p. 243–251, 2012.

PYRON, M.; NEUMANN, K. Hydrologic Alterations in the Wabash River Watershed, USA. **River Res. Applic.**, v. 24, p. 1175-1184, 2008.

QUEIROZ, R.; GRASSI, P.; LAZZARE, K.; KOPPE, E.; TARTAS, B. R.; KEMERICH, P. D. C. Geração de energia elétrica através da energia hidráulica e seus impactos ambientais. **REGET**, v. 13, n. 13, p. 2774- 2784, 2013.

RENSCHLER, C. S.; DOYLE, M. W.; THOMS, M. Geomorphology and ecosystems: Challenges and keys for success in bridging disciplines. **Geomorphology**, v. 89. p. 1-8, 2007.

RICHTER, B. D.; BAUMGARTNER, J. V.; POWELL, J.; BRAUN, D. P. A method for assessing hydrologic alteration within ecosystems. **Conservation Biology**, v. 10, p. 1163-1174, 1996.

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

RICHTER, B. D.; BAUMGARTNER, J. V.; BRAUN, D. P.; POWELL, J. A spatial assessment of hydrologic alteration within a river network. **Regulated Rivers: Research & Management**, v. 14, n. 4, p. 329–340, 1998.

ROCHA, P. C. Indicadores de Alteração Hidrológica no Alto Rio Paraná: Intervenções Humanas e Implicações na Dinâmica do Ambiente Fluvial. **Sociedade & Natureza, Uberlândia**, v. 22 (1), p. 191-211, 2010.

ROSENBERG, D. M.; BERKES, F.; BODALY, R. A.; HECKY, R. E.; KELLY, C. A.; RUDD, J. W. M. Large-scale impacts of hydroelectric development. **Environmental Reviews**, v. 5, n. 1, p. 27-54, 1997.

ROSENBERG, D. M.; MCCULLY, P.; PRINGLE, C. M. Global scale environmental effects of hydrological alterations: Introduction. **BioScience**, v.50, n. 9, p. 746, 2000.

RUGENSKI, A. T.; MINSHALL, G. W.; HAUER, F. R. Chapter 28 - Riparian Processes and Interactions. In: LAMBERTI, G. A.; HAUER, F. R. (Eds) **Methods in Stream Ecology**. Third Edition, Academic Press, pages 83-111, 2017.

SANTOS, H. de A.; POMPEU, P. dos S.; KENJI, D. O. L. Changes in the flood regime of São Francisco River (Brazil) from 1940 to 2006. **Reg. Environ Change**, v. 12, p. 123–132, 2012.

SANTOS, K. C. F.; MITSCHHEIN, T. A.; PEREIRA, S. F. P.; NOGUEIRA, D. P.; SILVA, C. S. Impacto ambiental da construção da UHE Belo Monte sobre a qualidade da água do Rio Xingú. **XIII International Conference on Engineering and Technology Education**. Guimarães, PORTUGAL. p. 407-411. Março 16 - 19, 2014.

SANTOS, S. C. A geração hídrica de eletricidade no sul do Brasil e seus impactos sociais. **Etnográfica**, v. VII (1), p. 87-103, 2003.

SANTOS, S. M. S. B. M.; HERNANDEZ, F. M. (Orgs.). **Painel de Especialistas: análise crítica do Estudo de Impacto Ambiental do Aproveitamento Hidrelétrico de Belo Monte**. Belém, Pará, 230 pp, 2009.

SATO, Y.; GODINHO, H. P. Migratory fishes of the São Francisco River. In: CAROLSFELD, J.; HARVEY, B.; ROSS, C.; BAER, A. (eds) **Migratory fishes of South America: biology, fisheries, and conservation status**. World Fisheries Trust/World Bank/International Development Research Centre, Washington, DC, pp 195–232, 2004.

SERPA, D.; NUNES, J. P.; SANTOS, J.; SAMPAIO, E.; JACINTO, R.; VEIGA, S.; LIMA, J. C.; MOREIRA, M.; CORTE-REAL, J.; KEIZER, J. J.; ABRANTES, N. Impacts of climate and land use changes on the hydrological and erosion processes of two contrasting Mediterranean catchments. **Science of the Total Environment**, v. 538, p. 64–77, 2015.

SHIAU, J. T.; WU, F. C. Assessment of Hydrologic Alterations Caused By Chi-Chi Diversion Weir in Chou-Shui Creek, Taiwan: Opportunities for Restoring Natural Flow Conditions. **River Res. Applic.**, v. 20, p. 401-412, 2004.

SILVA, D. F.; GALVÍNCIO, J. D.; ALMEIDA, H. R. R. C. Variabilidade da qualidade de Água na bacia hidrográfica do Rio São Francisco e atividades antrópicas relacionadas. **Qualit@s Revista Eletrônica**, v. 9, n. 3, 2010.

SILVA, A. V. L. **Avaliação das alterações hidrológicas da bacia hidrográfica do Rio Piracicaba causadas pela construção do Sistema Cantareira**. Tese (Doutorado em Biometria e Estatística Aplicada) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2014.

SWALES, S. Habitat restoration methods – a synthesis, p. 133-137. In: I. G. COWX (ed.). **Rehabilitation of freshwater fisheries**. Oxford: Fishing News Books, p.485, 1994.

TANG, J.; YIN, X.; YU, C.; YANG, Z. Suitable Environmental Flow Release Criteria for Both Human and Riverine Ecosystems: Accounting for the Uncertainty of Flows. **Mathematical Problems in Engineering**, v. 2012, 2012.

WANG, Y.; RHOADS, B. L.; WANG, D. Assessment of the flow regime alterations in the middle reach of the Yangtze River associated with dam construction: potential ecological implications. **Hydrol. Process.** v. 30 p. 3949–3966, 2016.

XUE L.; ZHANG, H.; YANG, C.; ZHANG, L.; SUN, C. Quantitative Assessment of Hydrological Alteration Caused by Irrigation Projects in the Tarim River basin, China. **Scientific Reports**, v. 7, n. 1, p. 4291, 2017.

YANG, T.; ZHANG, Q.; CHEN, Y. D.; TAO, X.; XU, C.; CHEN, X. A spatial assessment of hydrologic alteration caused by dam construction in the middle and lower Yellow River, China. **Hydrol. Process**, v. 22, p. 3829–3843, 2008.

YOO, C. Long term analysis of wet and dry years in Seoul, Korea. **Journal of Hydrology**, v. 318, p. 24–36, 2006.

ZHANG, Q.; XIAO, M.; LIU, C. L.; SINGH, V. P. Reservoir-induced hydrological alterations and environmental flow variation in the East River, the Pearl River basin, China. **Stochastic environmental research and risk assessment**, v. 28(8), p. 2119-2131, 2014.

ZOLEZZI, G.; BELLIN, A.; BRUNO, M. C.; MAIOLINI, B.; SIVIGLIA, A. Assessing hydrological alterations at multiple temporal scales: Adige River, Italy. **Water Resources Research**, v. 45, W12421, 2009.

APÊNDICES

APÊNDICE A - Séries temporais dos indicadores de alteração hidrológica da seção 4.1

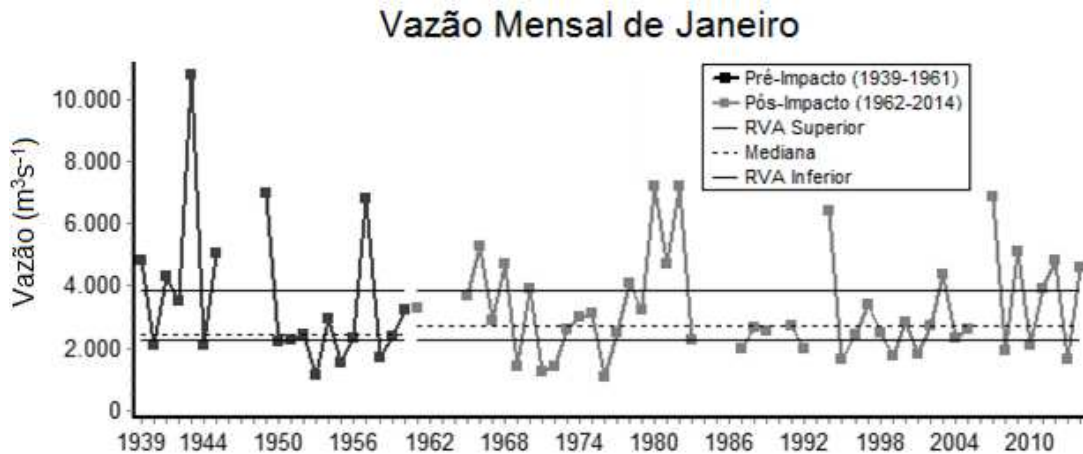


Figura 23. Série temporal da vazão mensal de janeiro do Rio São Francisco a jusante da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.

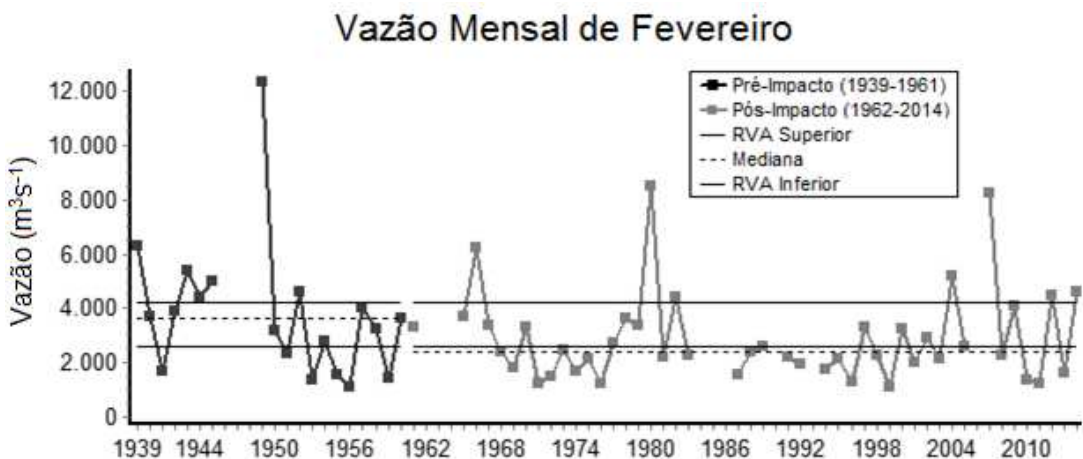


Figura 24. Série temporal da vazão mensal de fevereiro do Rio São Francisco a jusante da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.

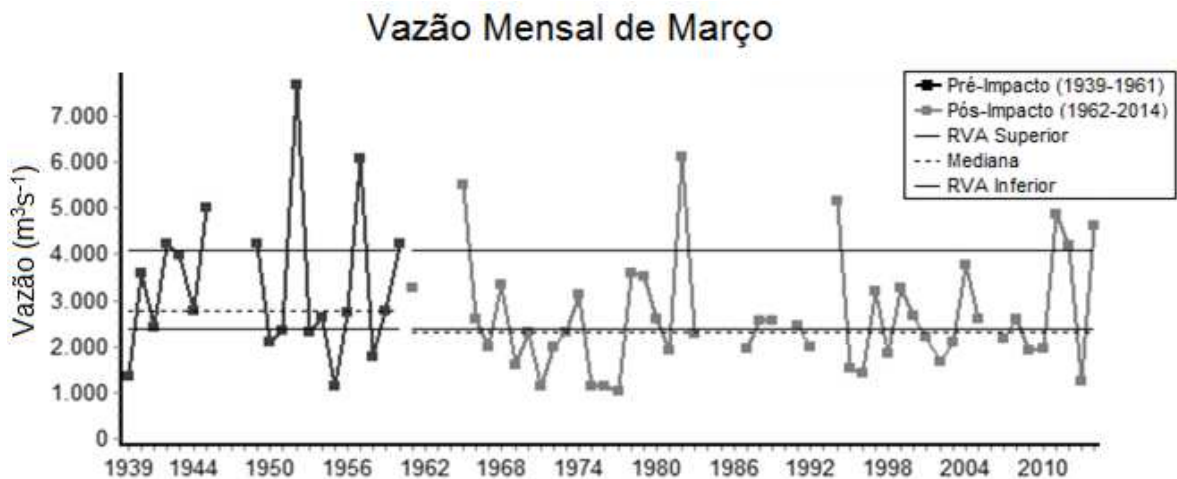


Figura 25. Série temporal da vazão mensal de março do Rio São Francisco a jusante da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.

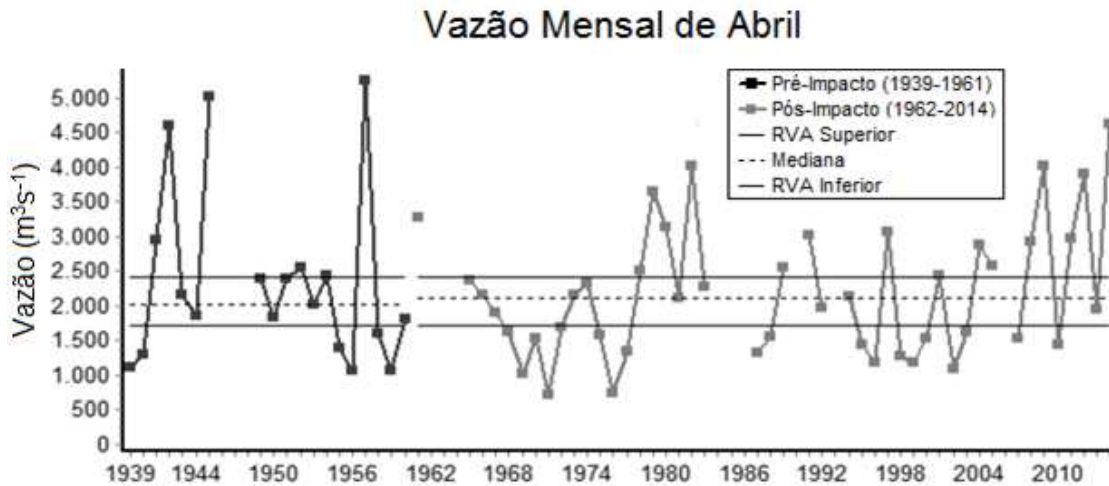


Figura 26. Série temporal da vazão mensal de abril do Rio São Francisco a jusante da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.

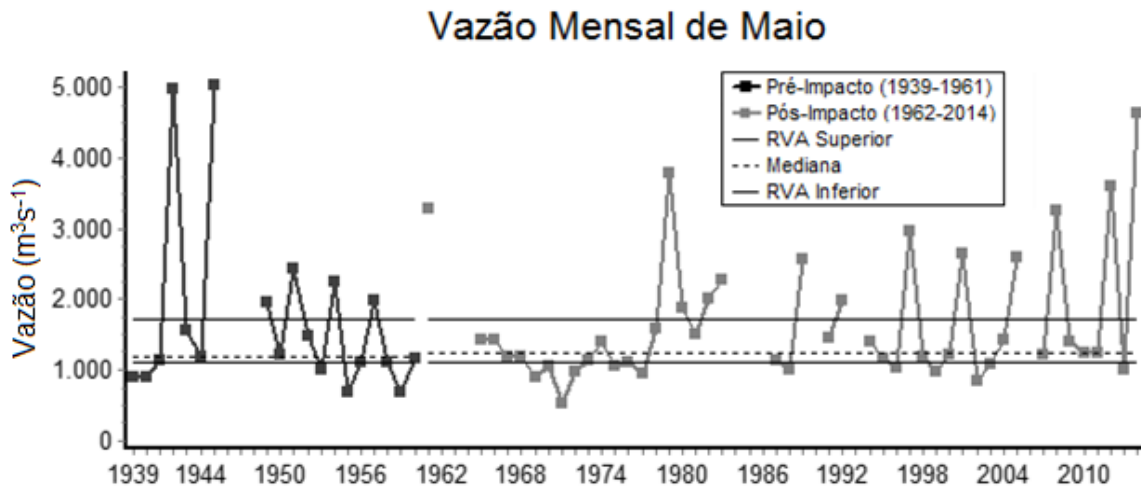


Figura 27. Série temporal da vazão mensal de maio do Rio São Francisco a jusante da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.

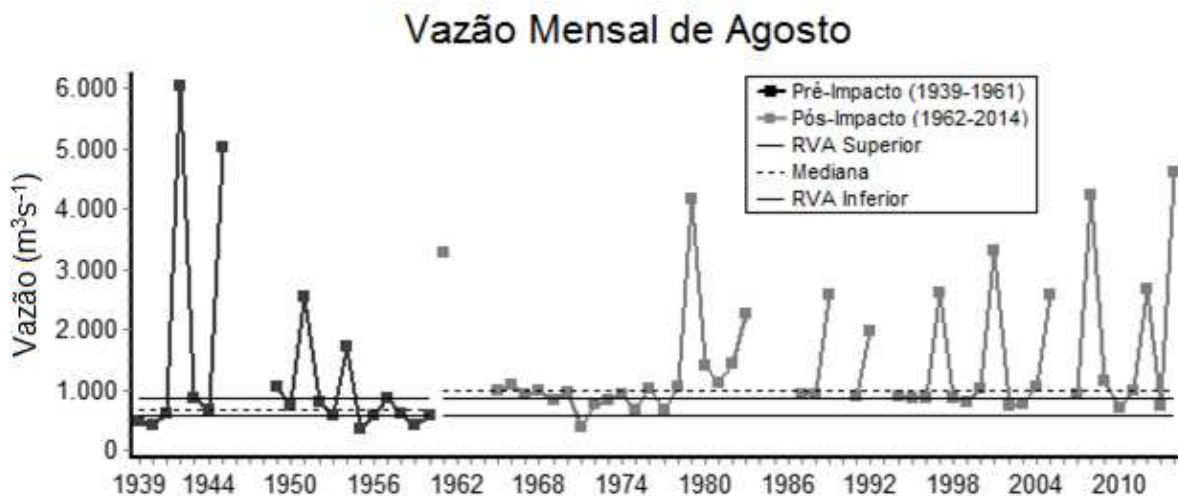


Figura 28. Série temporal da vazão mensal de agosto do Rio São Francisco a jusante da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.

Vazão Mensal de Outubro

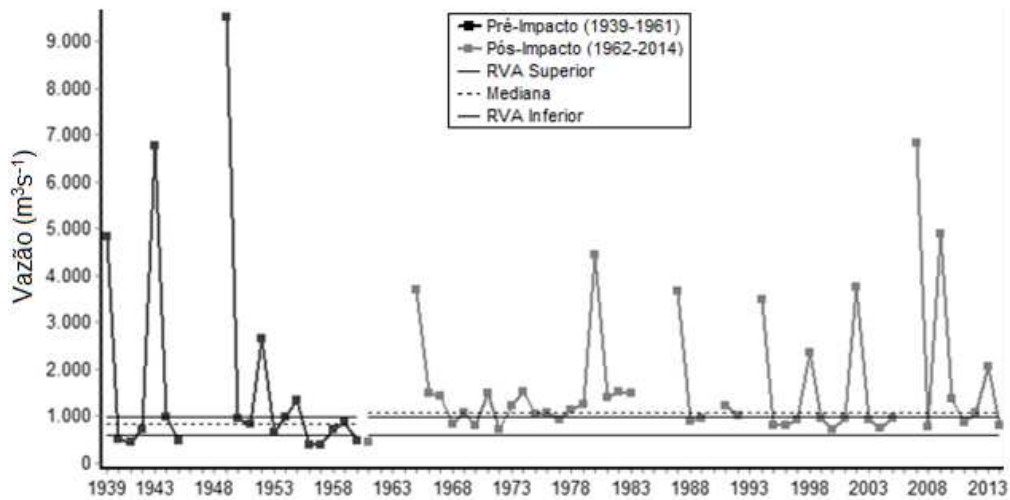


Figura 29. Série temporal da vazão mensal de outubro do Rio São Francisco a jusante da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.

Vazão Mensal de Novembro

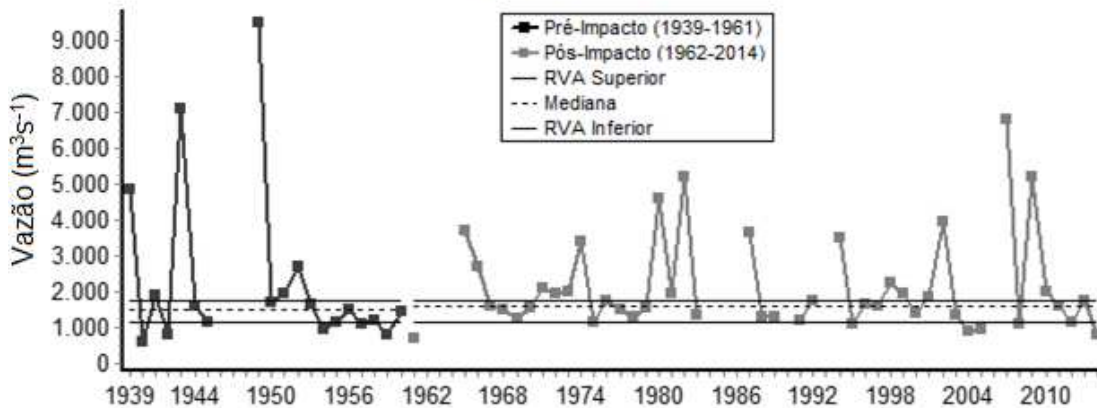


Figura 30. Série temporal da vazão mensal de novembro do Rio São Francisco a jusante da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.

Vazão Mensal de Dezembro

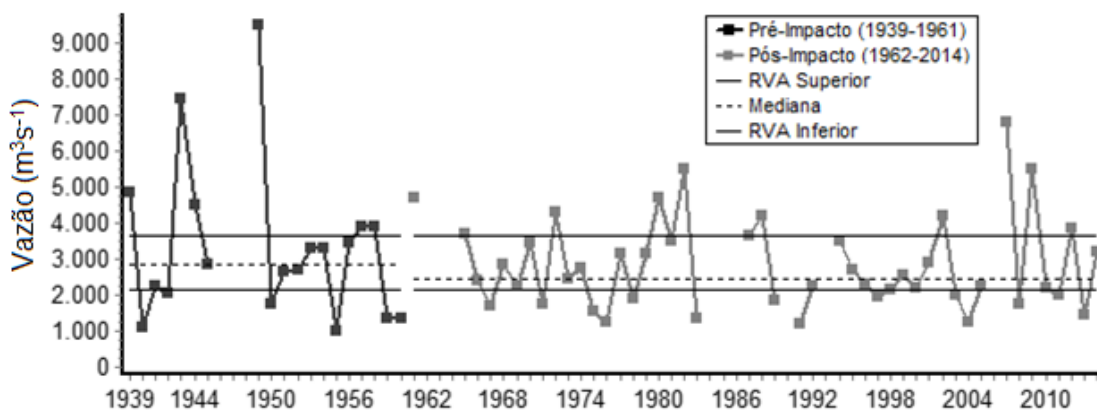


Figura 31. Série temporal da vazão mensal de dezembro do Rio São Francisco a jusante da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.

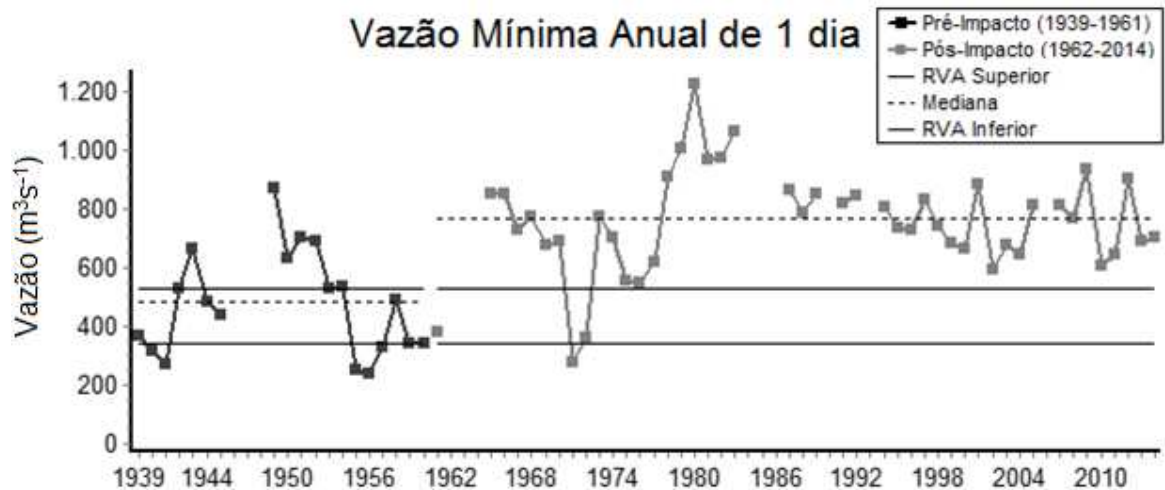


Figura 32. Série temporal da vazão mínima diária, a cada ano, do Rio São Francisco a jusante da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.

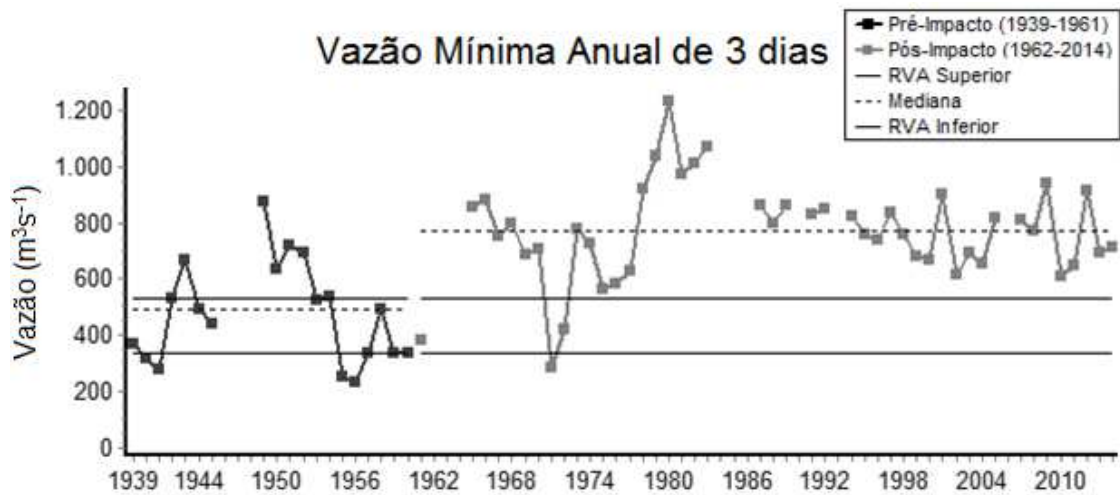


Figura 33. Série temporal da vazão mínima de 3 dias, a cada ano, do Rio São Francisco a jusante da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.



Figura 34. Série temporal da vazão mínima de 7 dias, a cada ano, do Rio São Francisco a jusante da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.



Figura 35. Série temporal da vazão mínima de 30 dias, a cada ano, do Rio São Francisco a jusante da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.

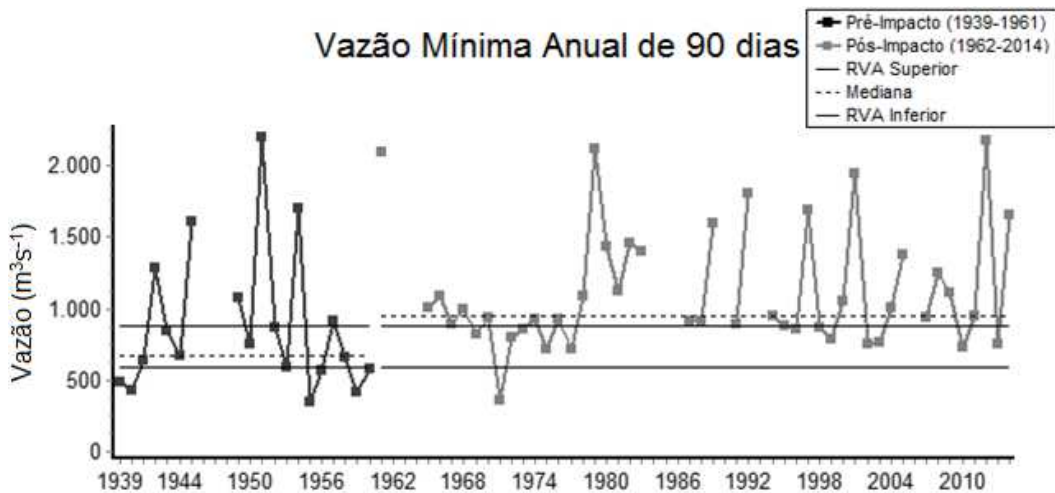


Figura 36. Série temporal da vazão mínima de 90 dias, a cada ano, do Rio São Francisco a jusante da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.

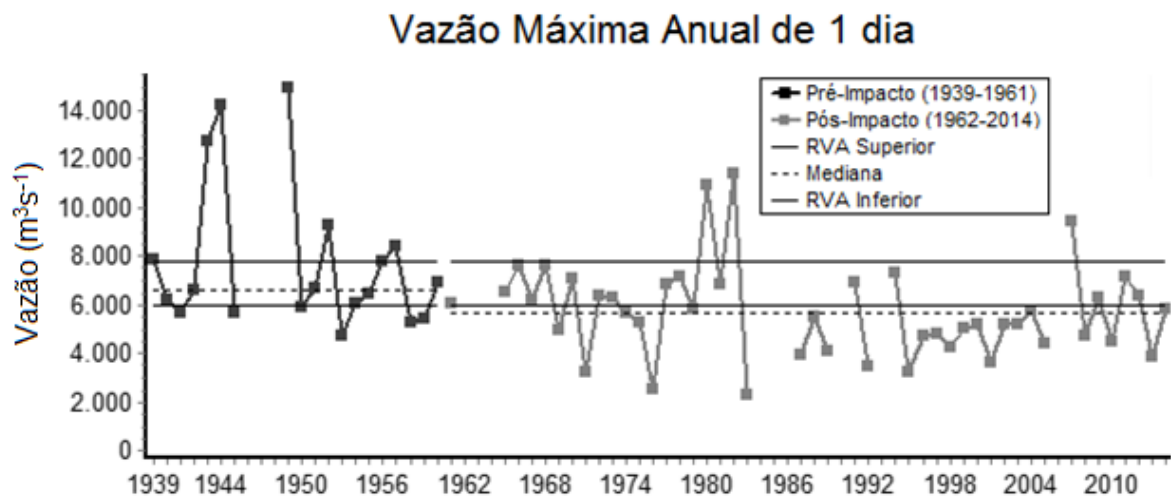


Figura 37. Série temporal da vazão máxima diária, a cada ano, do Rio São Francisco a jusante de da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.

Vazão Máxima Anual de 3 dias

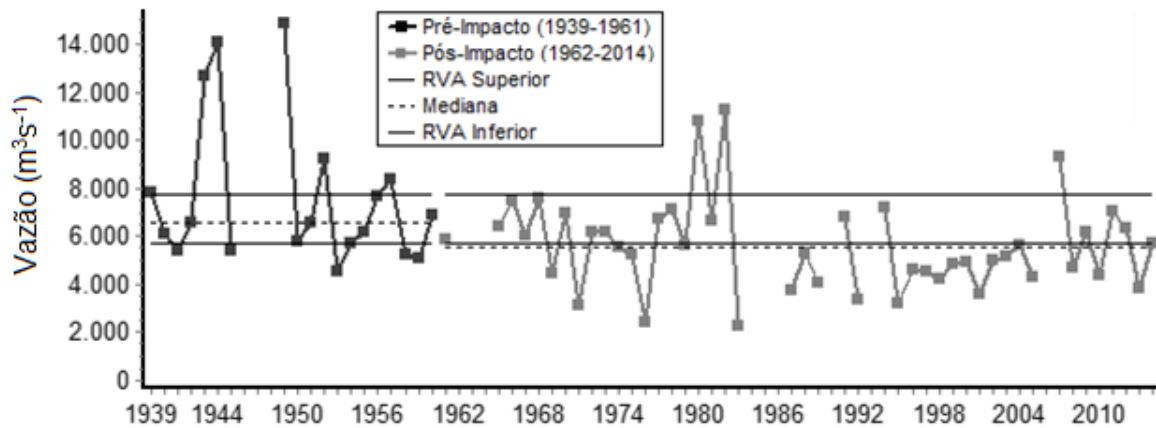


Figura 38. Série temporal da vazão máxima de 3 dias, a cada ano, do Rio São Francisco a jusante de da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.

Vazão Máxima Anual de 7 dias

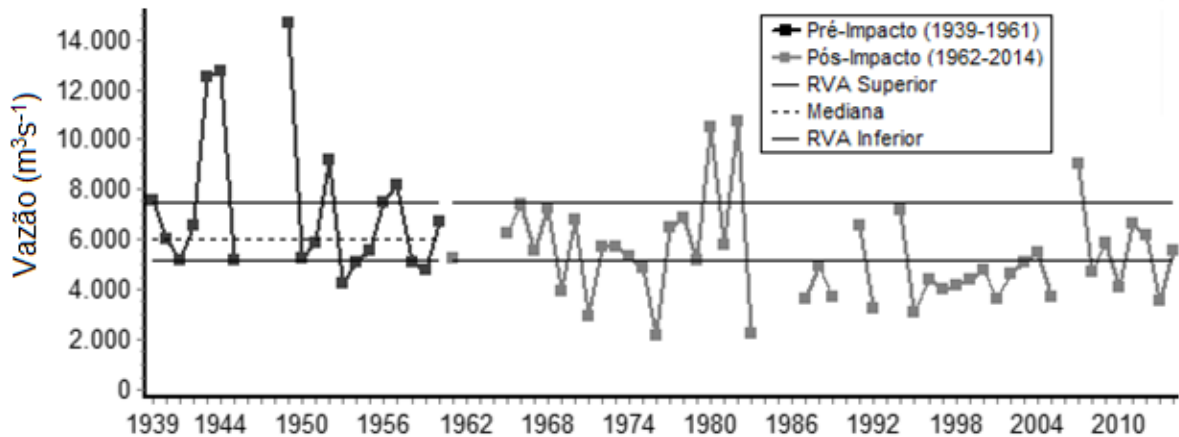


Figura 39. Série temporal da vazão máxima de 7 dias, a cada ano, do Rio São Francisco a jusante de da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.

Vazão Máxima Anual de 30 dias

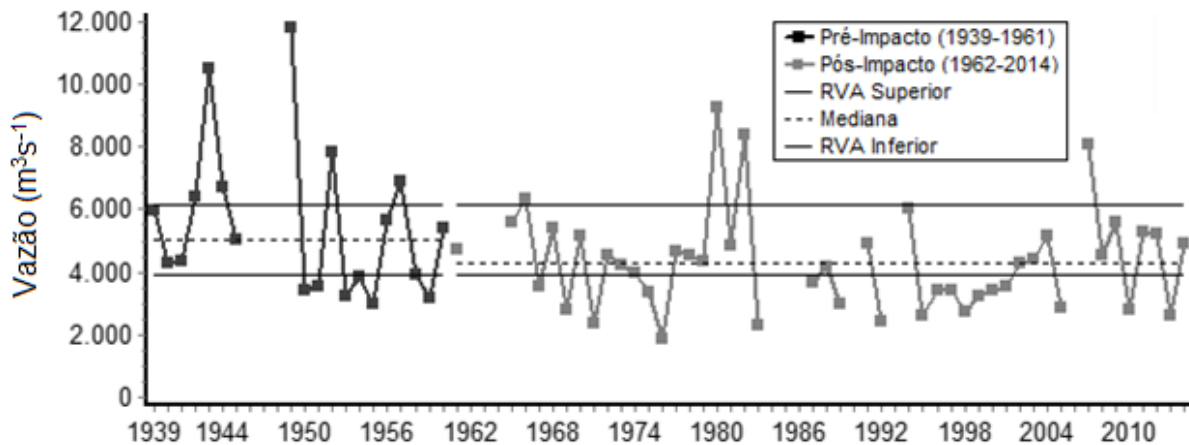


Figura 40. Série temporal da vazão máxima de 30 dias, a cada ano, do Rio São Francisco a jusante de da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.

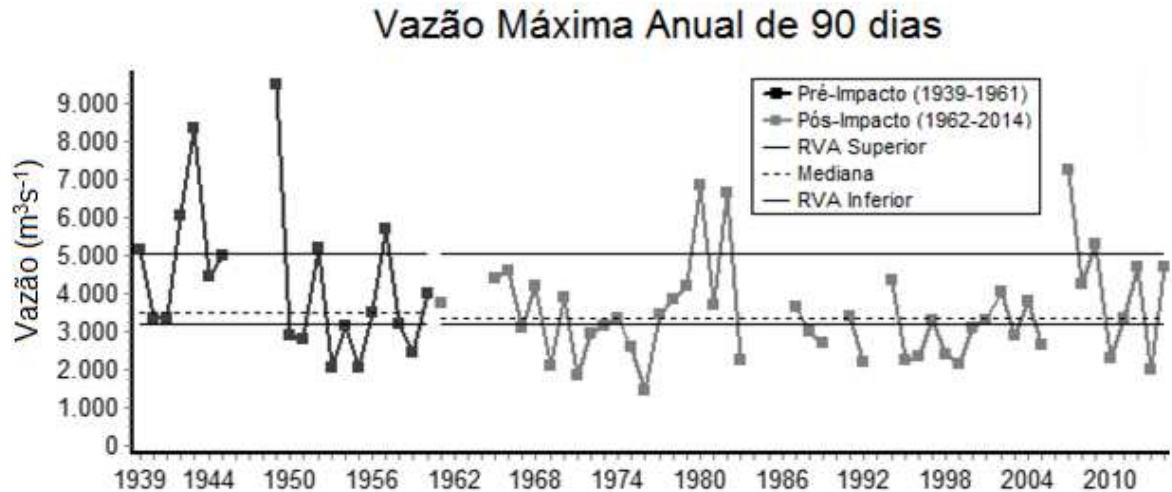


Figura 41. Série temporal da vazão máxima de 90 dias, a cada ano, do Rio São Francisco a jusante de da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.

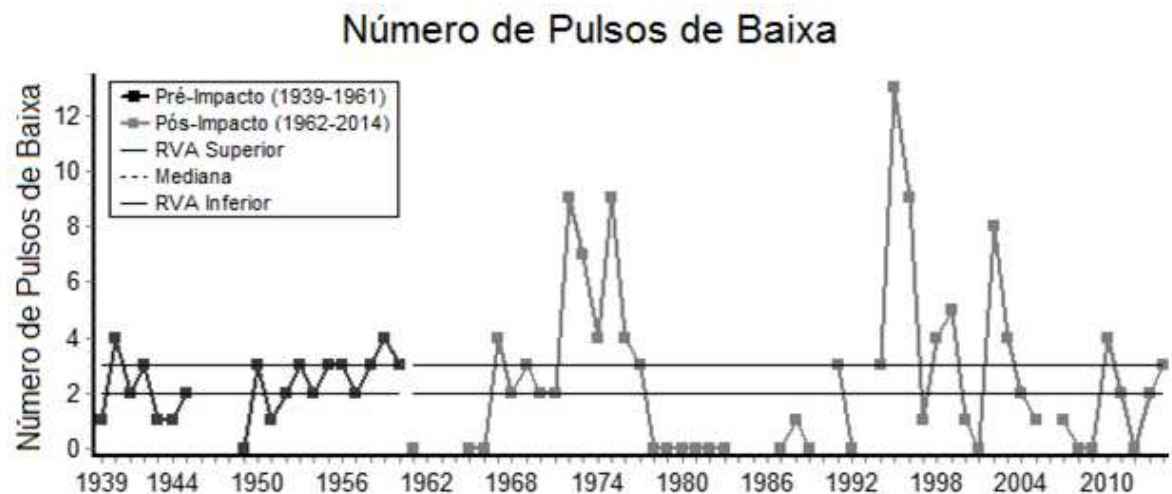


Figura 42. Série temporal do número de pulsos de baixa do Rio São Francisco a jusante da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.

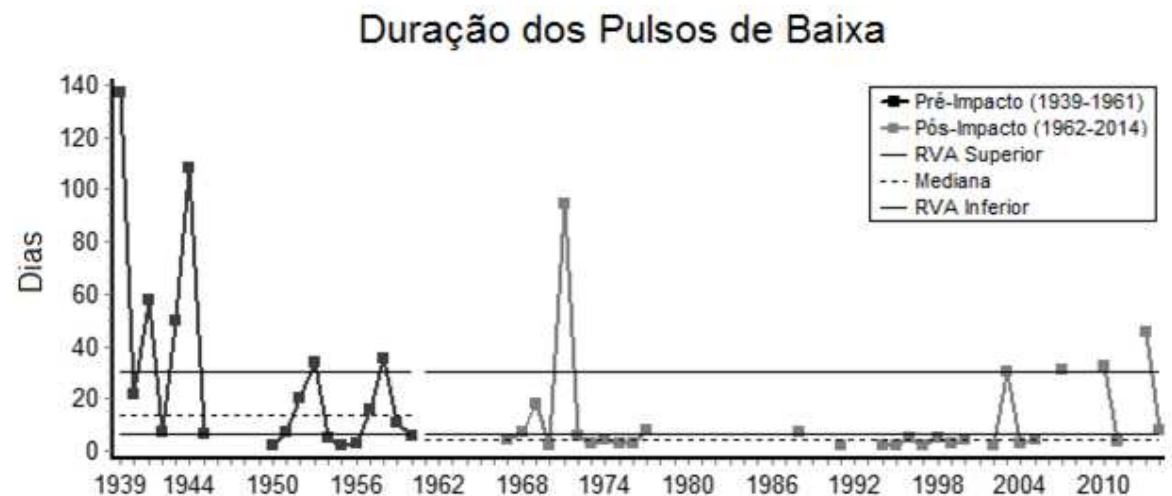


Figura 43. Série temporal da duração dos pulsos de baixa do Rio São Francisco a jusante da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.

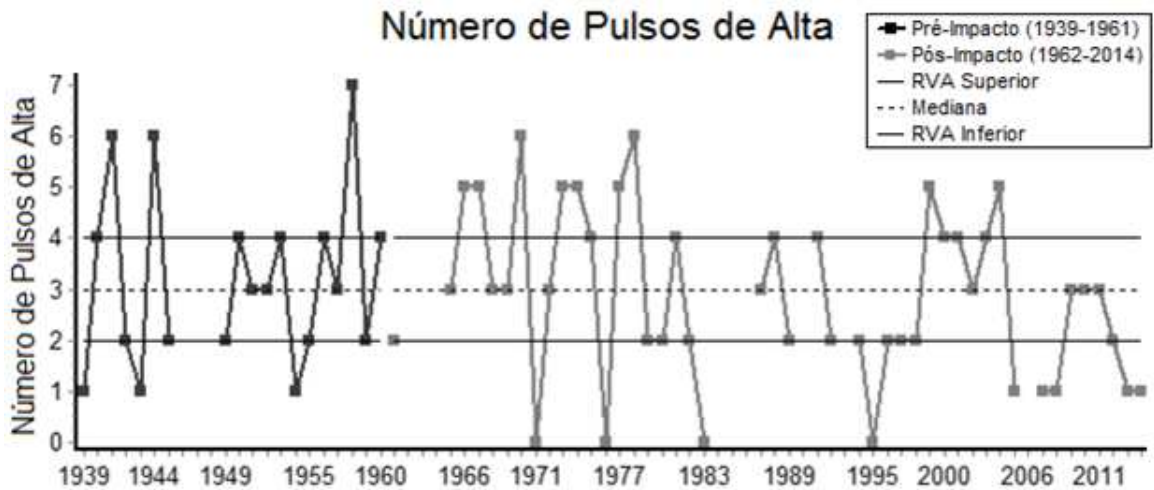


Figura 44. Série temporal do número de pulsos de alta do Rio São Francisco a jusante da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.

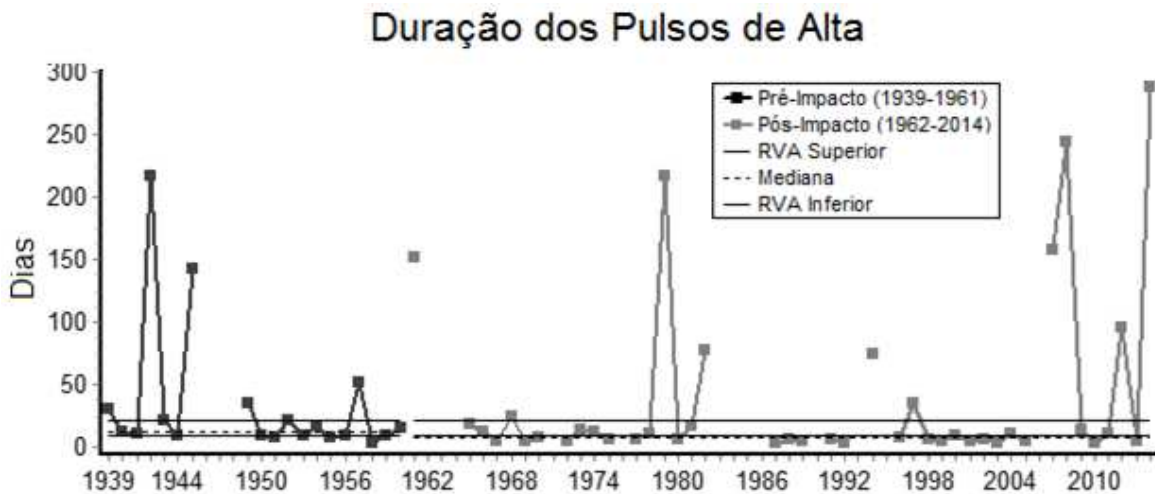


Figura 45. Série temporal da duração dos pulsos de alta do Rio São Francisco a jusante da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.

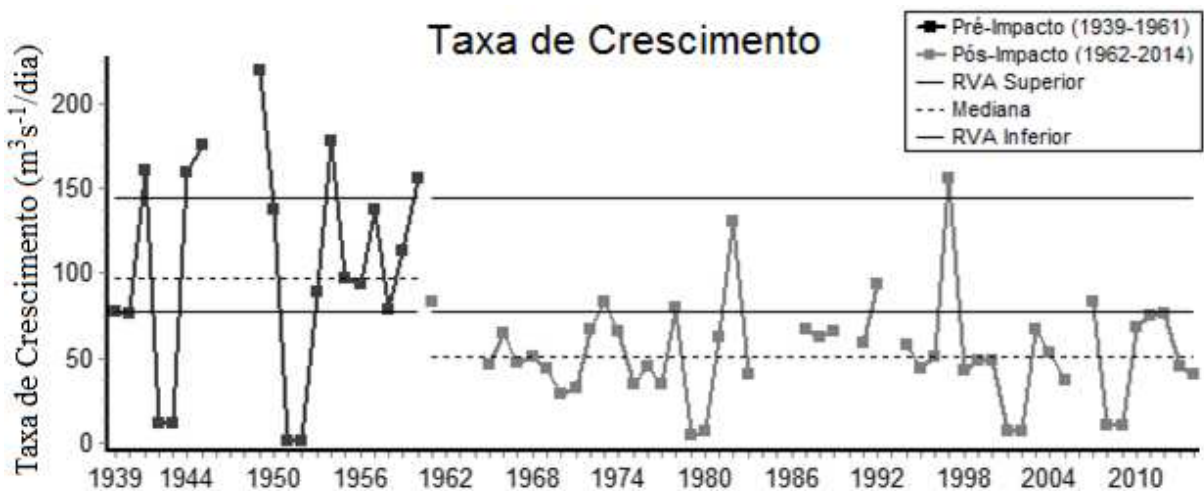


Figura 46. Série temporal da taxa de crescimento da vazão do Rio São Francisco a jusante da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.

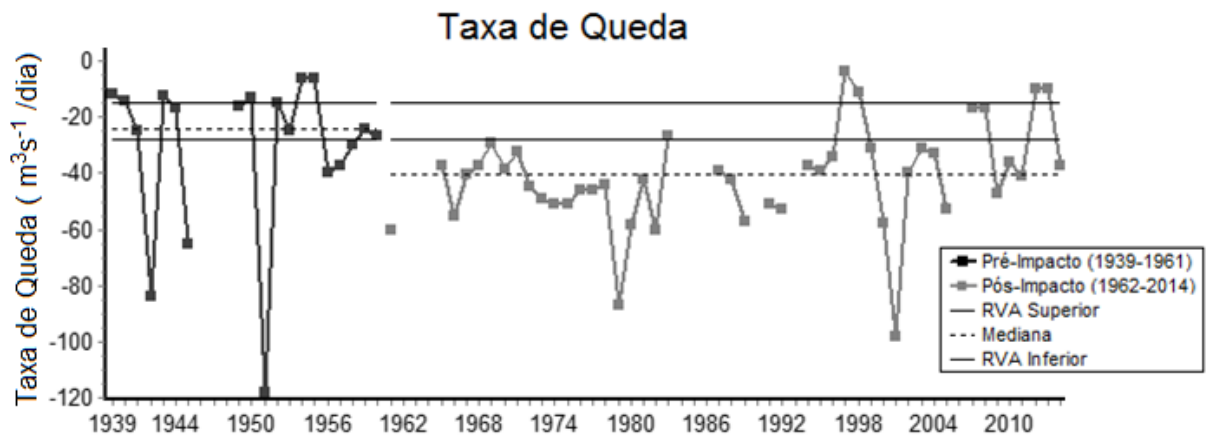


Figura 47. Série temporal da taxa de decréscimo da vazão do Rio São Francisco a jusante da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.

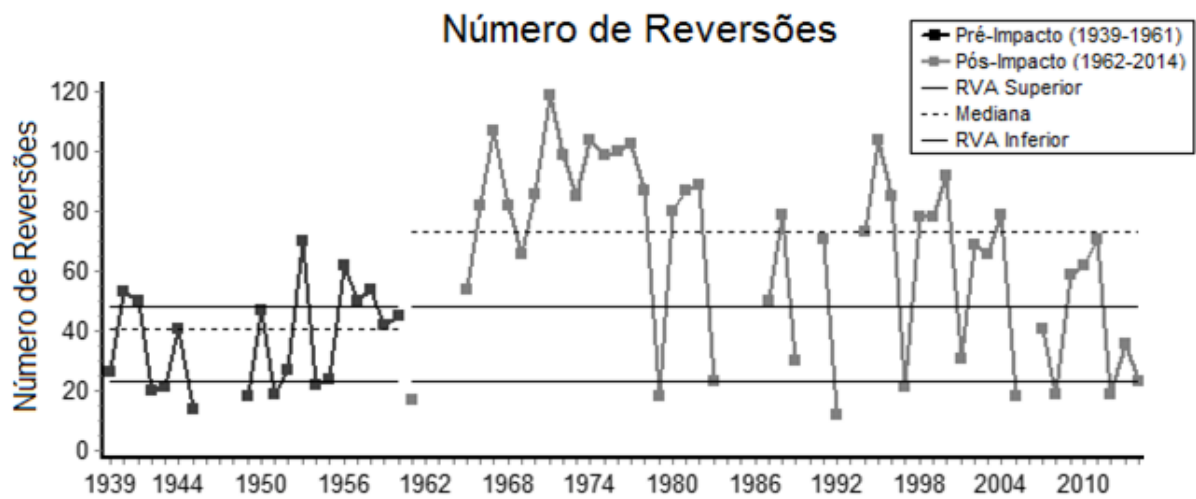


Figura 48. Série temporal do número de reversões da vazão do Rio São Francisco a jusante da barragem de Três Marias antes e depois da construção do reservatório.

APÊNDICE B - Séries temporais dos indicadores de alteração hidrológica da seção 4.2

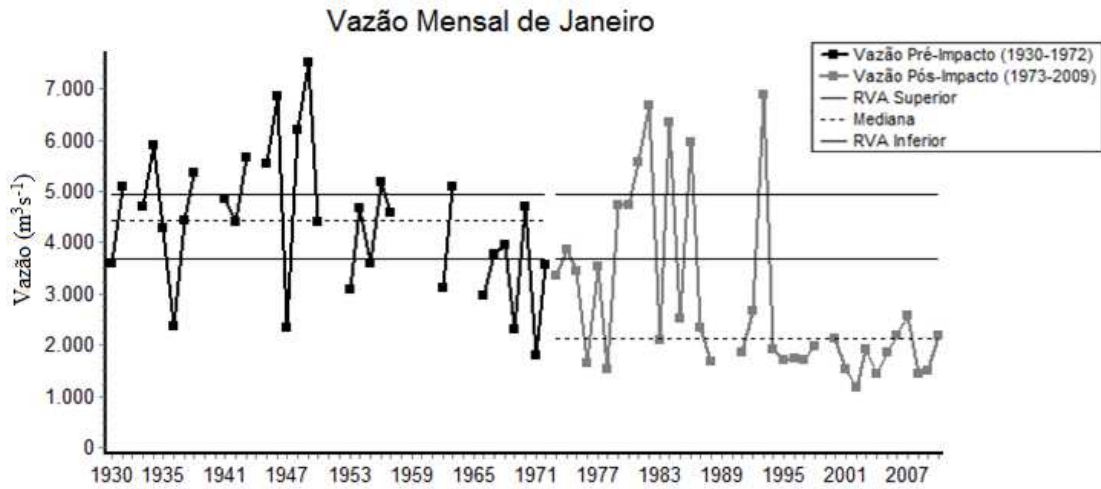


Figura 49. Série temporal da vazão mensal de janeiro do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.

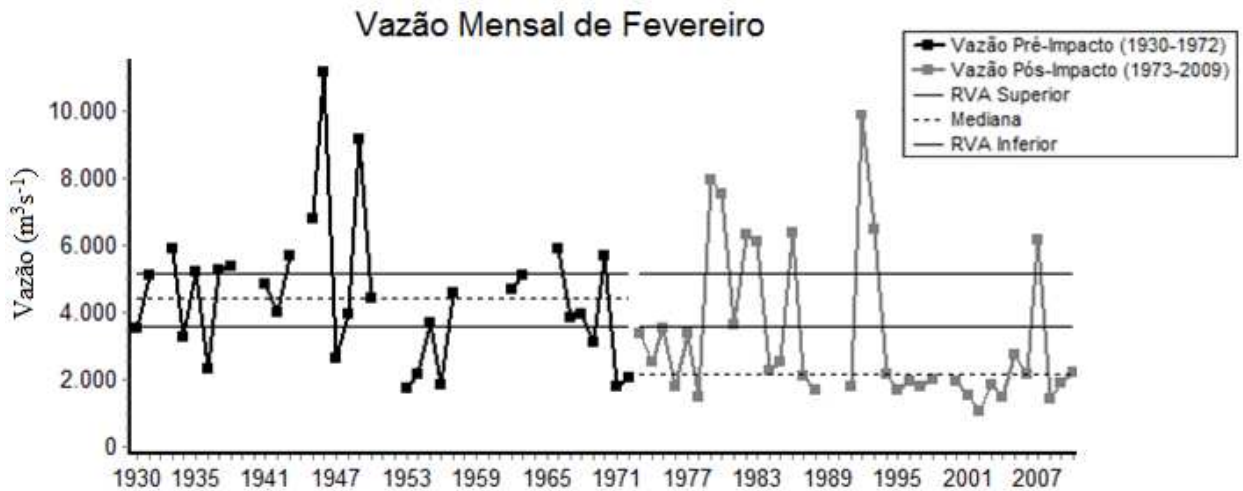


Figura 50. Série temporal da vazão mensal de fevereiro do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.

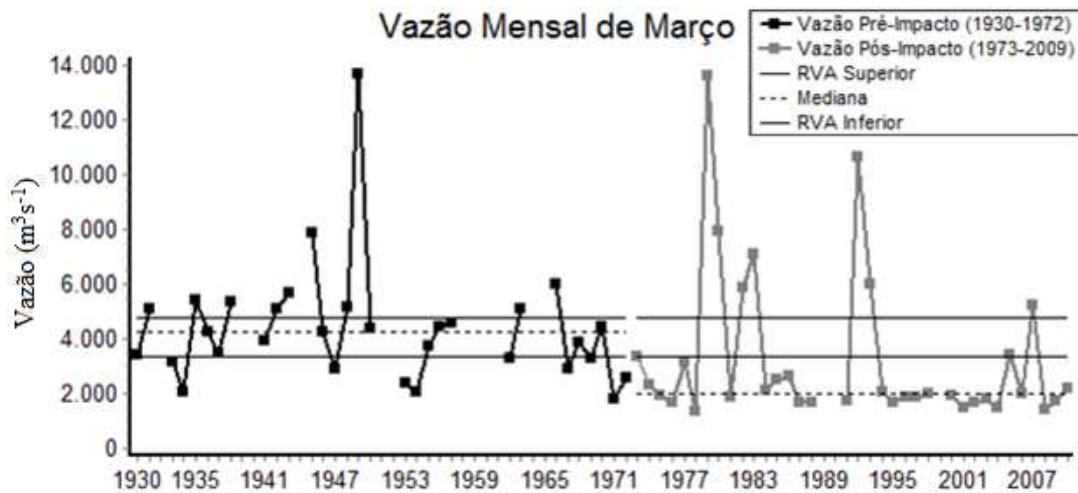


Figura 51. Série temporal da vazão mensal de março do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.

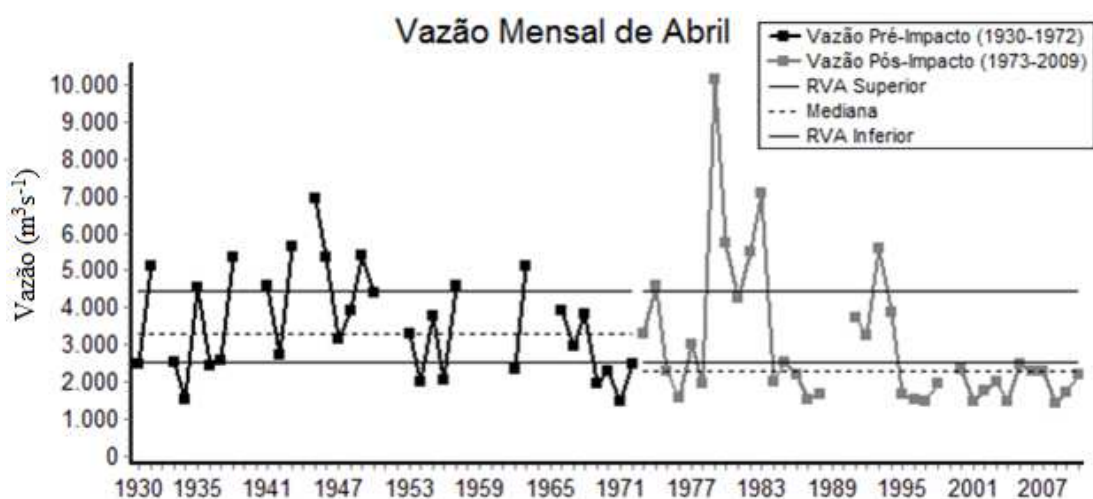


Figura 52. Série temporal da vazão mensal de abril do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.

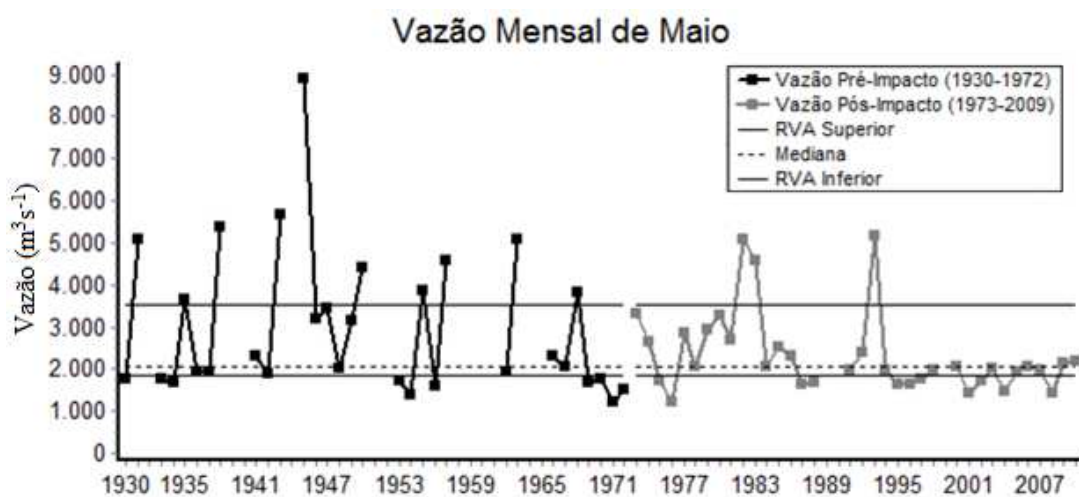


Figura 53. Série temporal da vazão mensal de maio do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.

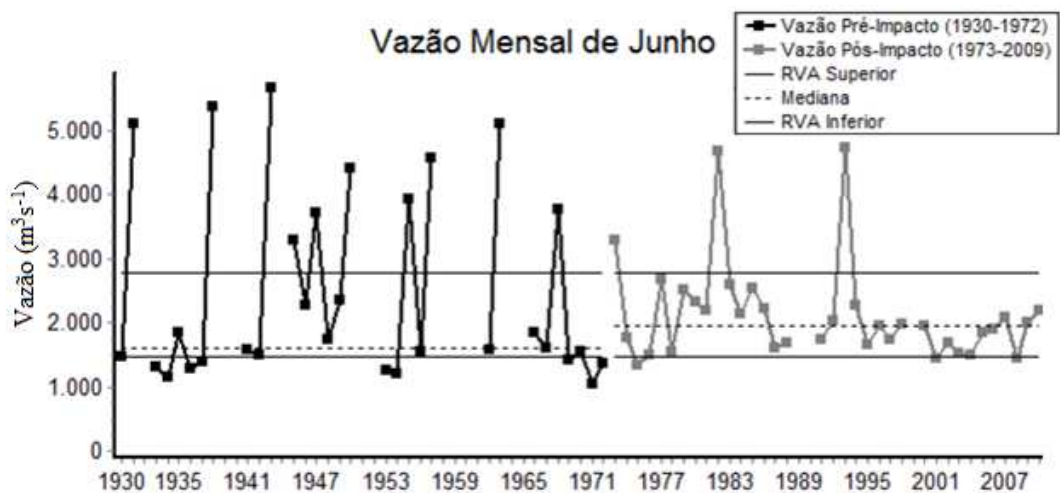


Figura 54. Série temporal da vazão mensal de junho do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.

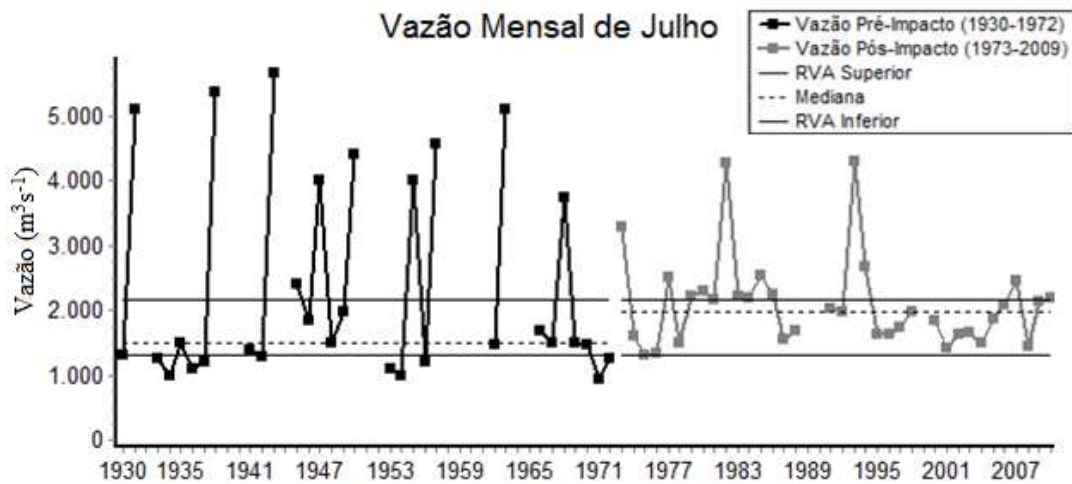


Figura 55. Série temporal da vazão mensal de julho do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.

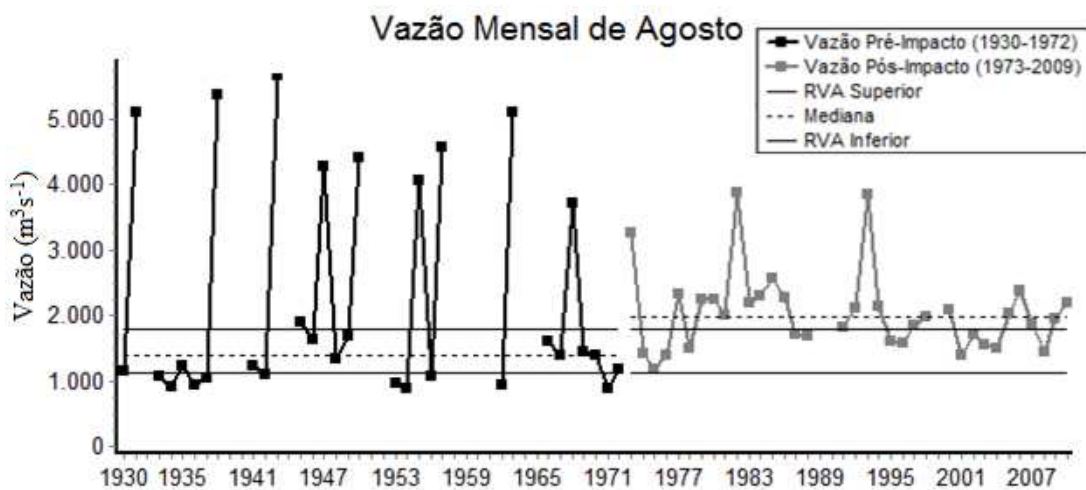


Figura 56. Série temporal da vazão mensal de agosto do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.

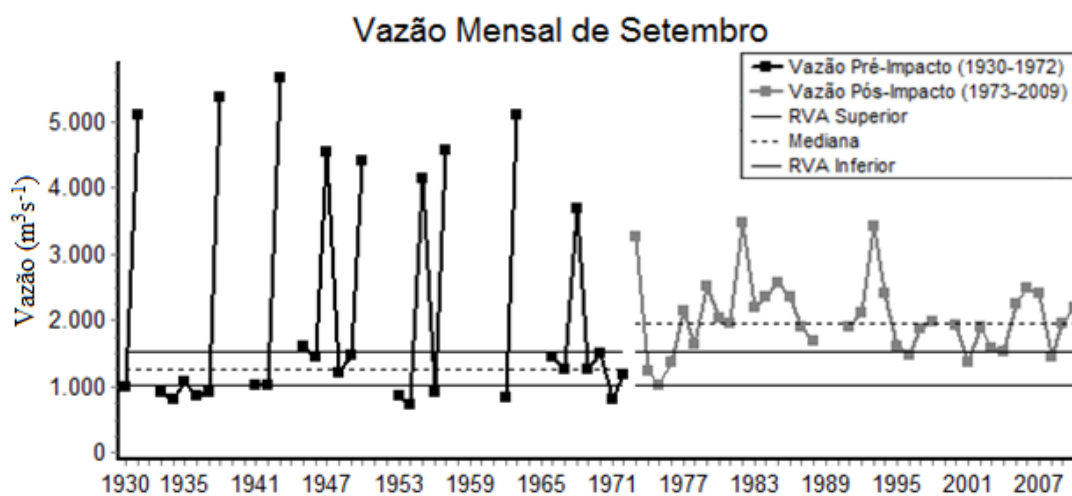


Figura 57. Série temporal da vazão mensal de setembro do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.

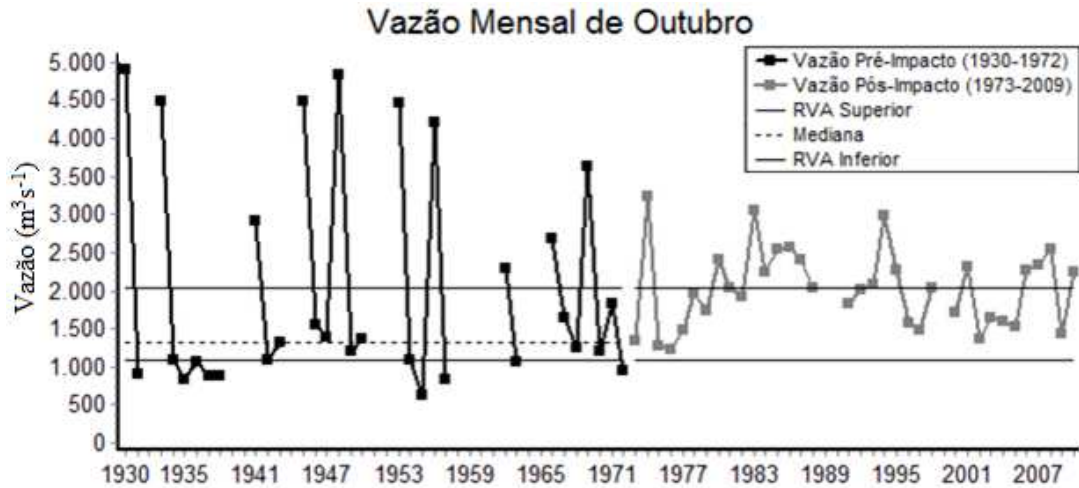


Figura 58. Série temporal da vazão mensal de outubro do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.

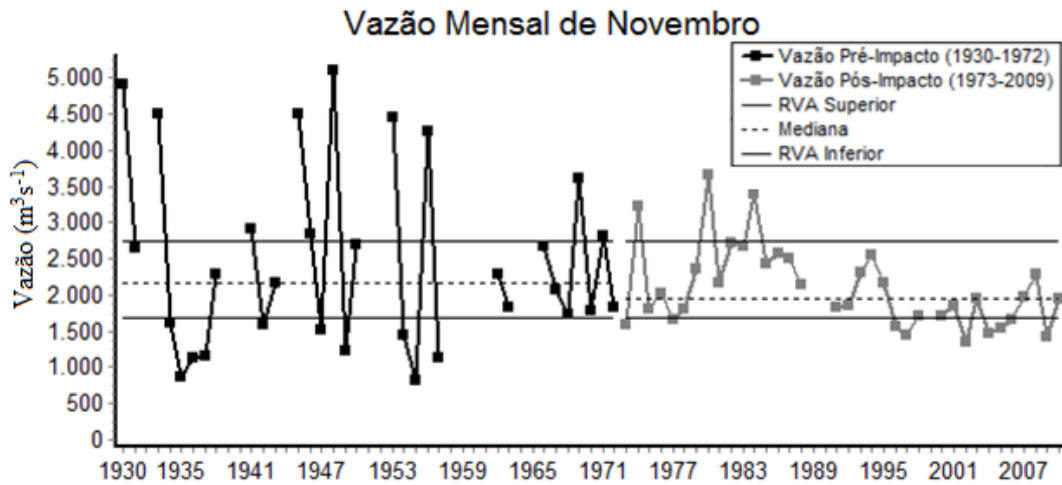


Figura 59. Série temporal da vazão mensal de novembro do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.



Figura 60. Série temporal da vazão mensal de dezembro do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.



Figura 61. Série temporal da vazão mínima anual diária, a cada ano, do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.



Figura 62. Série temporal da vazão mínima anual de 3 dias, a cada ano, do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.

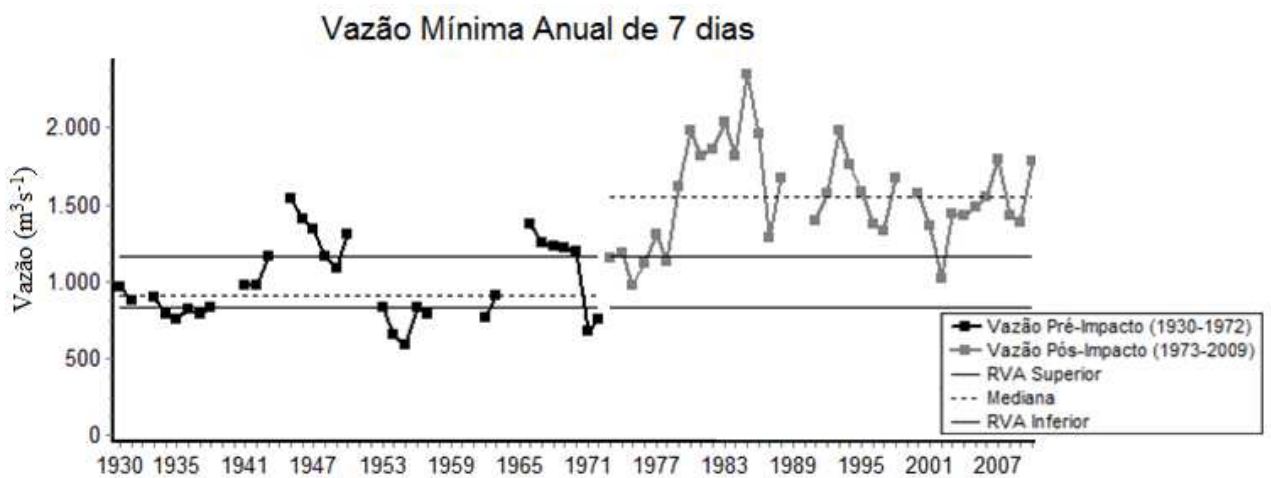


Figura 63. Série temporal da vazão mínima anual de 7 dias, a cada ano, do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.



Figura 64. Série temporal da vazão mínima anual de 30 dias, a cada ano, do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.

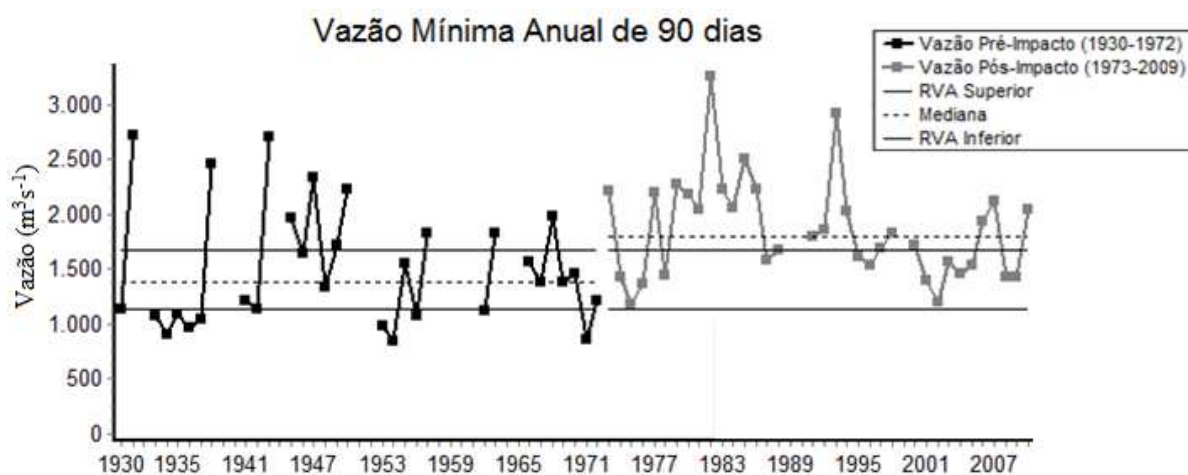


Figura 65. Série temporal da vazão mínima anual de 90 dias, a cada ano, do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.

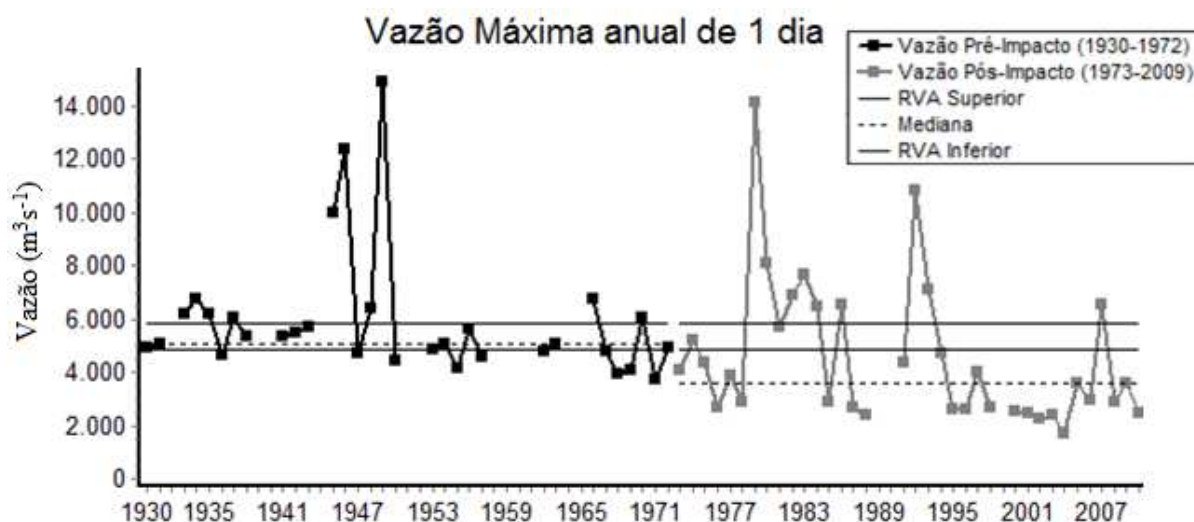


Figura 66. Série temporal da vazão máxima anual diária, a cada ano, do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.



Figura 67. Série temporal da vazão máxima anual de 3 dias, a cada ano, do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.

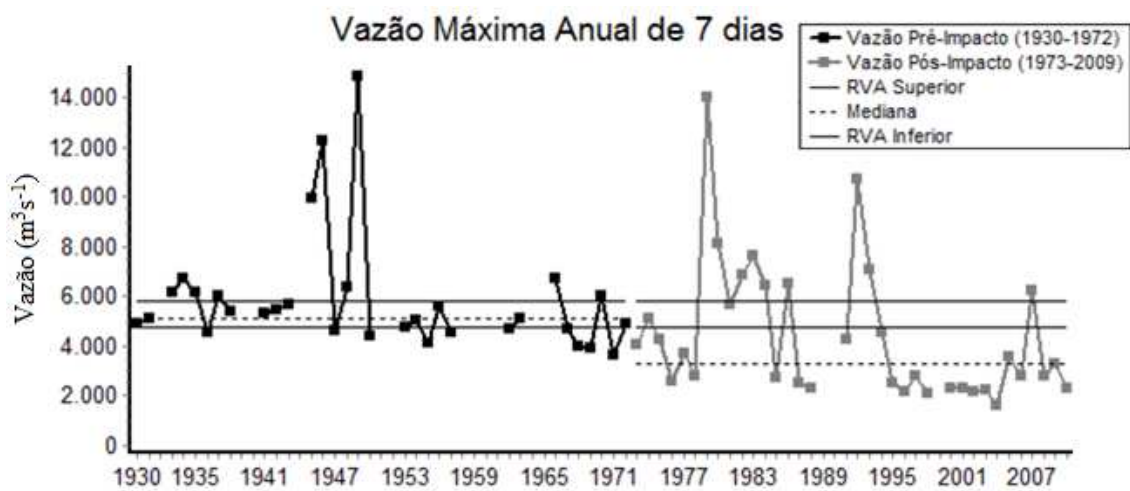


Figura 68. Série temporal da vazão máxima anual de 7 dias, a cada ano, do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.



Figura 69. Série temporal da vazão máxima anual de 30 dias, a cada ano, do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.



Figura 70. Série temporal da vazão máxima anual de 90 dias, a cada ano, do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.

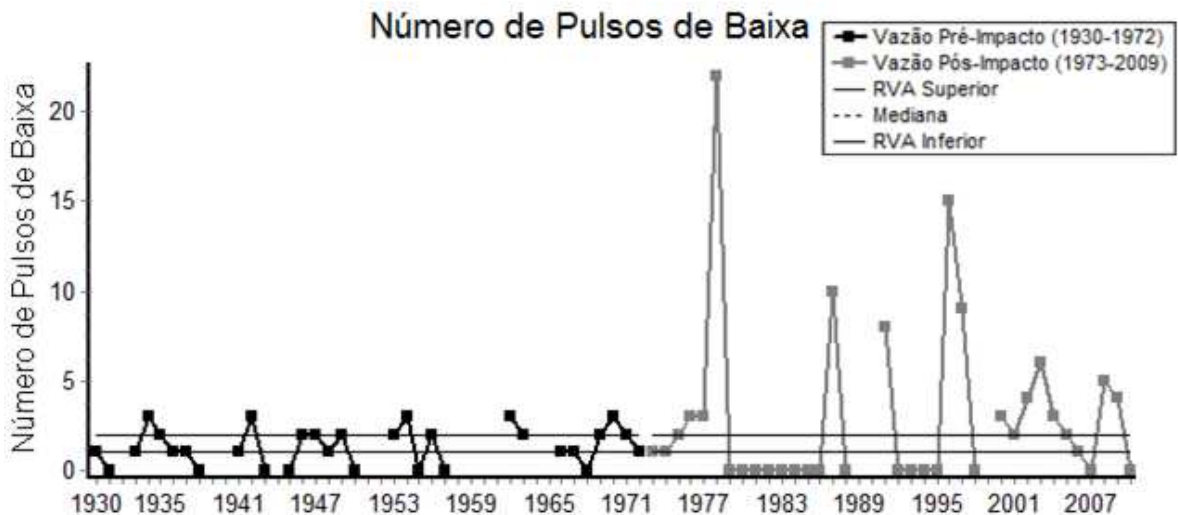


Figura 71. Série temporal do número de pulsos de baixa do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.

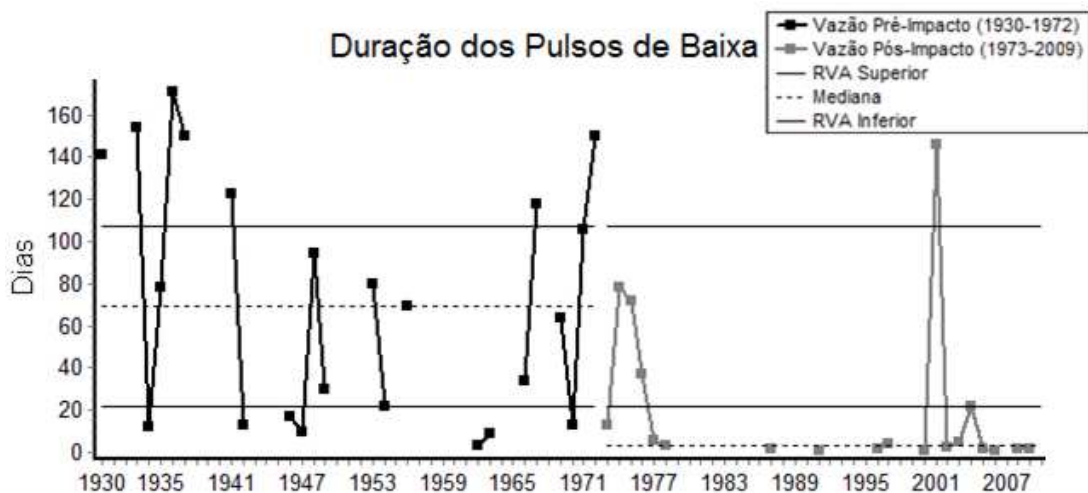


Figura 72. Série temporal da duração dos pulsos de baixa do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.

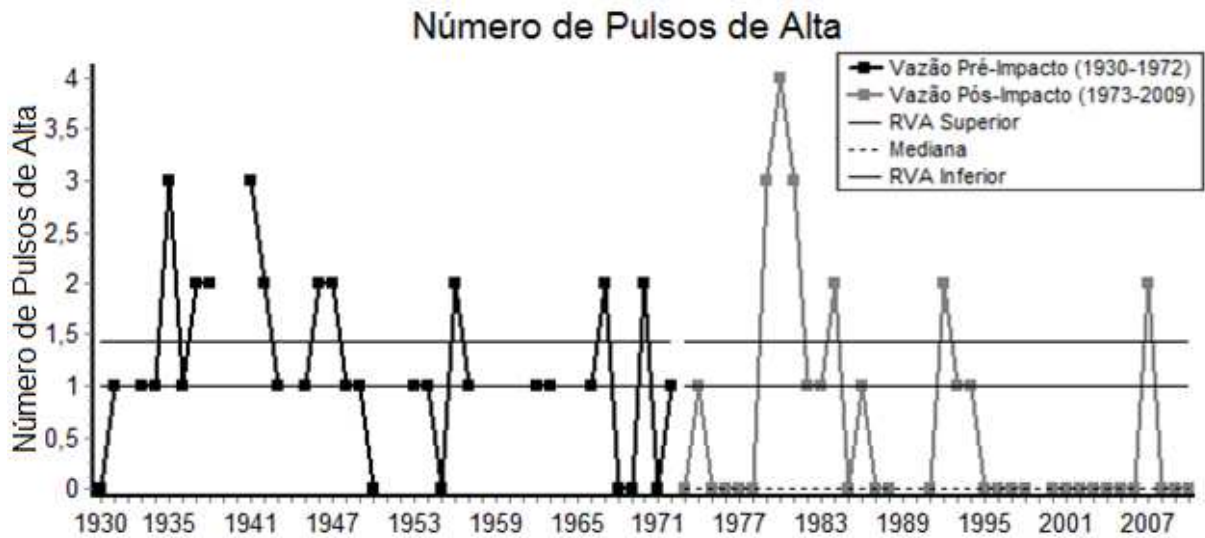


Figura 73. Série temporal da frequência dos pulsos de alta do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.

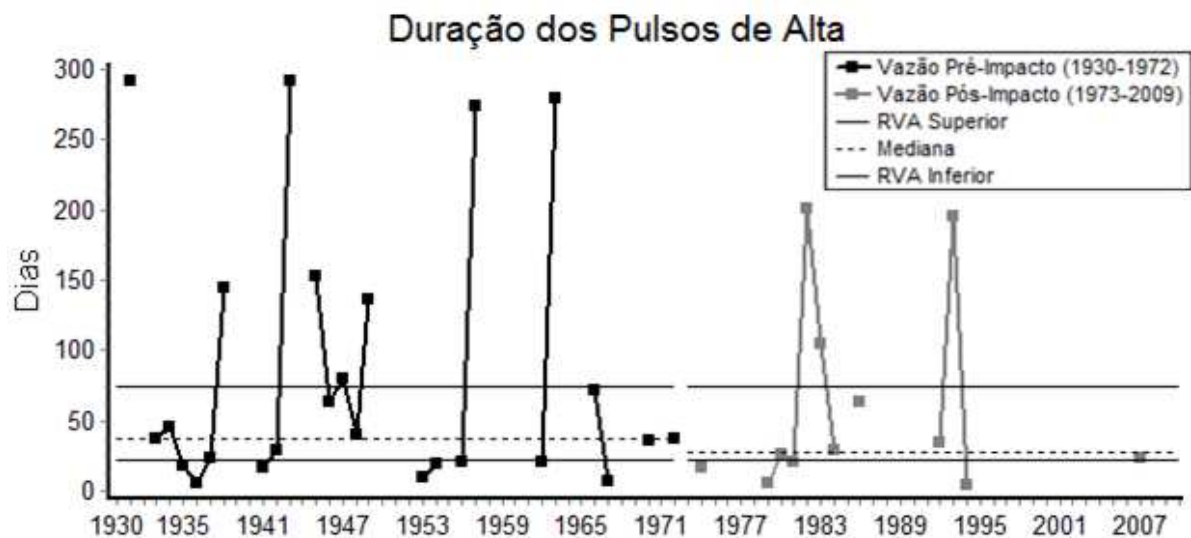


Figura 74. Série temporal da duração dos pulsos de alta do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.

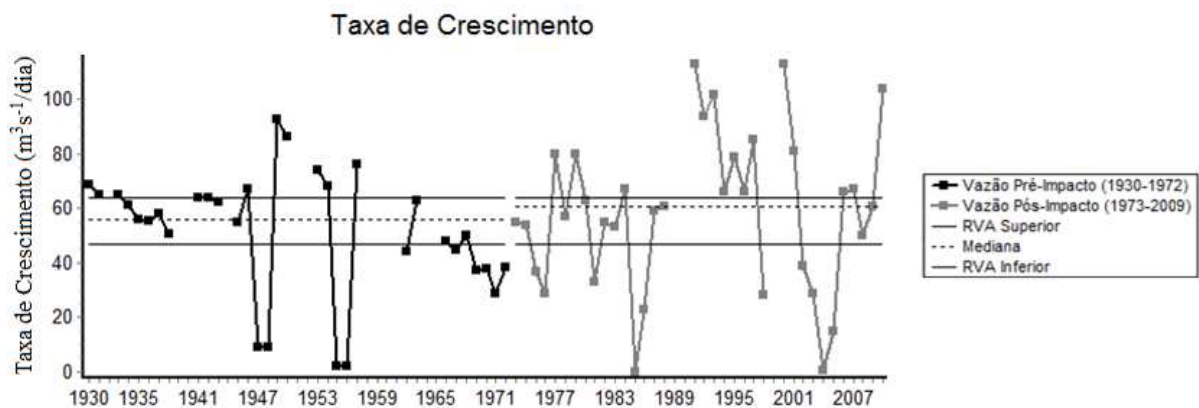


Figura 75. Série temporal da taxa de crescimento da vazão do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.

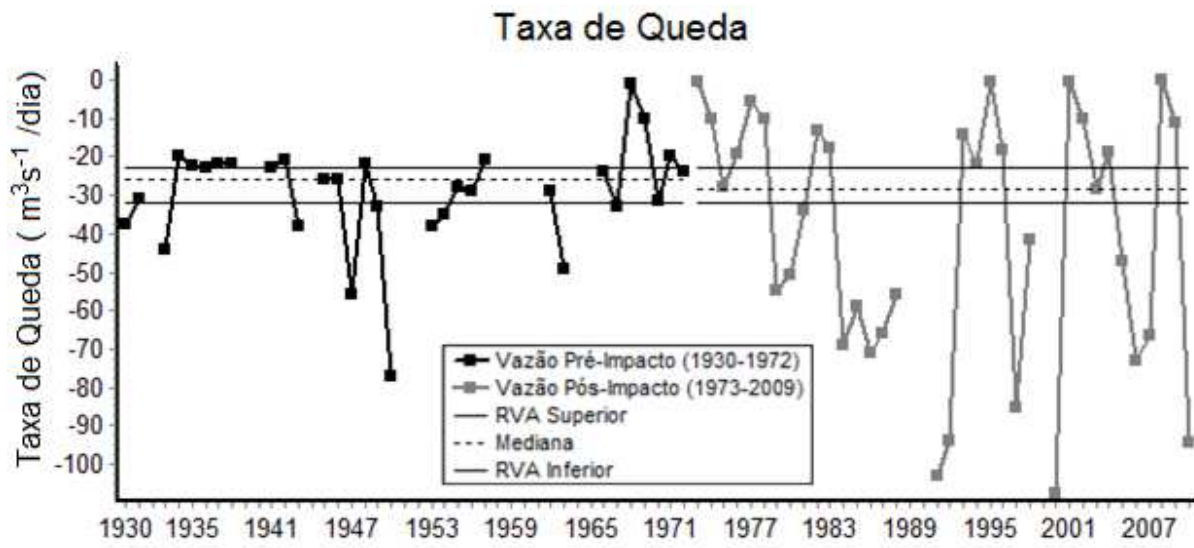


Figura 76. Série temporal da taxa de decréscimo da vazão do Rio São Francisco a jusante da barragem de Sobradinho antes e depois da construção do reservatório.

APÊNDICE C - Séries temporais dos indicadores de alteração hidrológica da seção 4.3

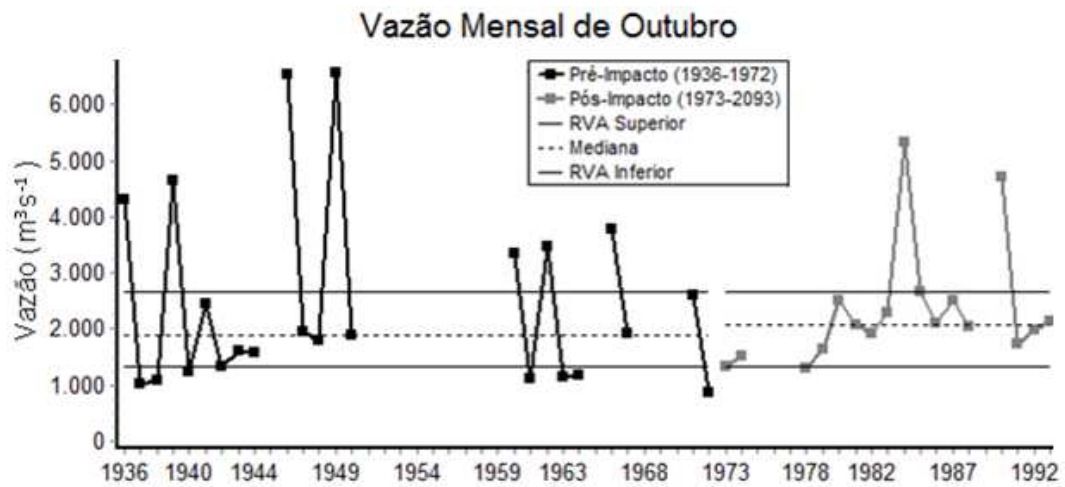


Figura 77. Série temporal da vazão mensal de outubro do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.



Figura 78. Série temporal da vazão mensal de novembro do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.



Figura 79. Série temporal da vazão mensal de dezembro do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.

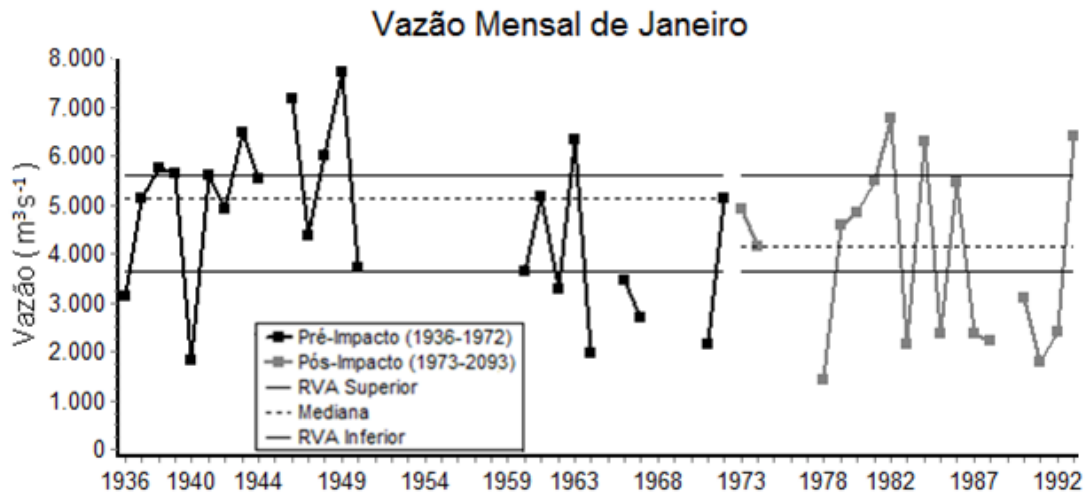


Figura 80. Série temporal da vazão mensal de janeiro do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.

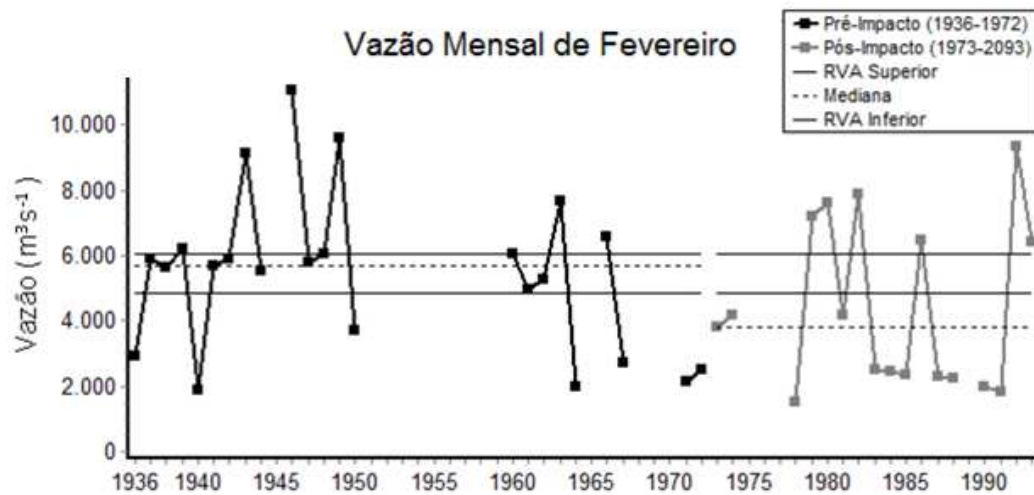


Figura 81. Série temporal da vazão mensal de fevereiro do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.



Figura 82. Série temporal da vazão mensal de março do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.



Figura 83. Série temporal da vazão mensal de abril do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.

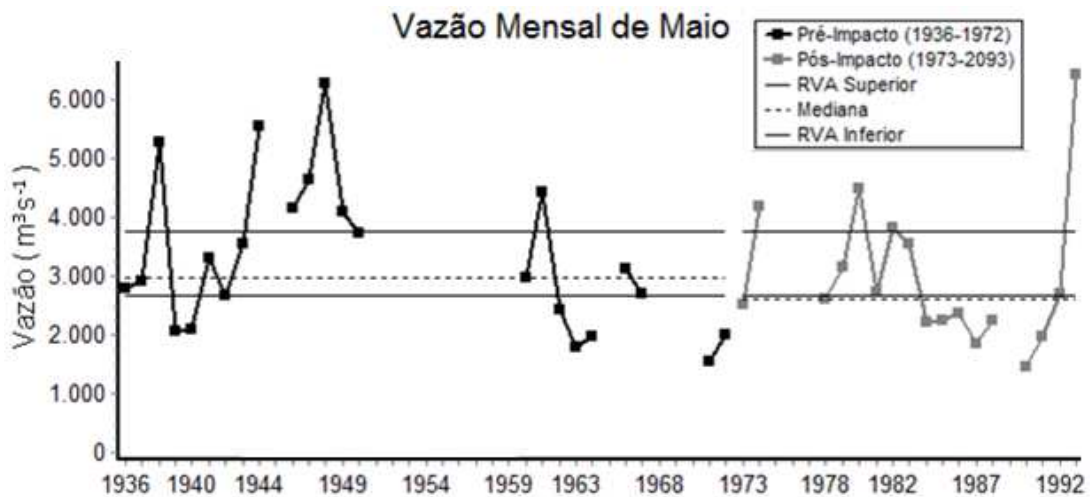


Figura 84. Série temporal da vazão mensal de maio do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.

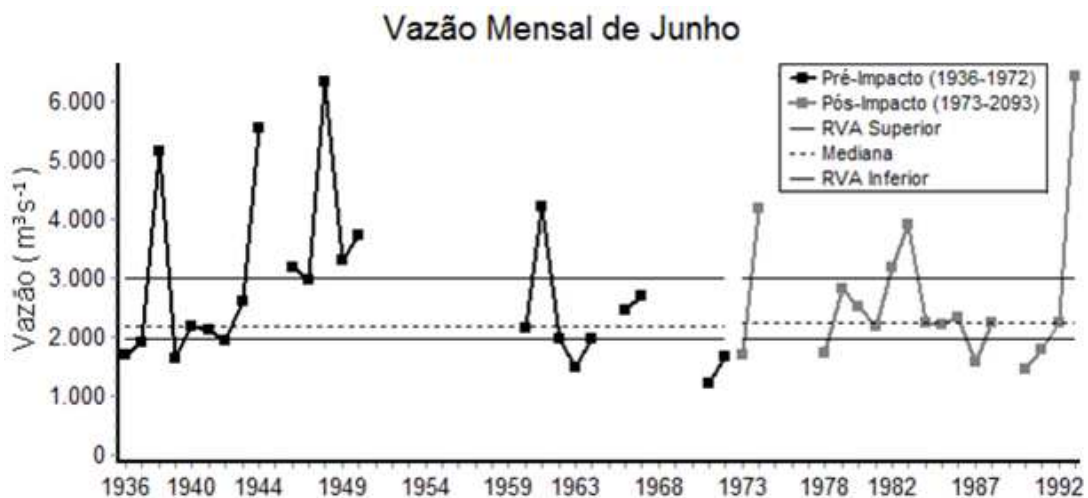


Figura 85. Série temporal da vazão mensal de junho do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.

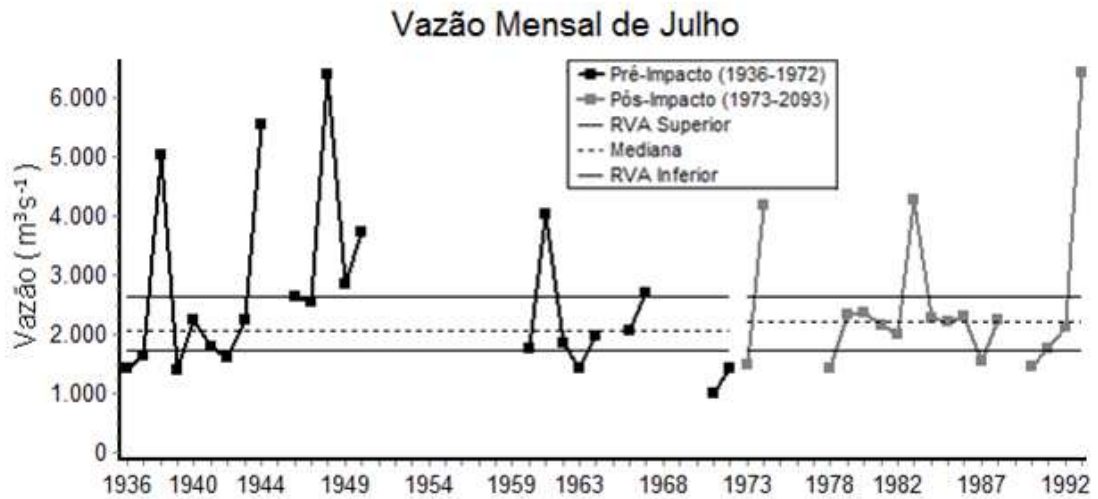


Figura 86. Série temporal da vazão mensal de julho do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.



Figura 87. Série temporal da vazão mensal de agosto do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.



Figura 88. Série temporal da vazão mensal de setembro do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.

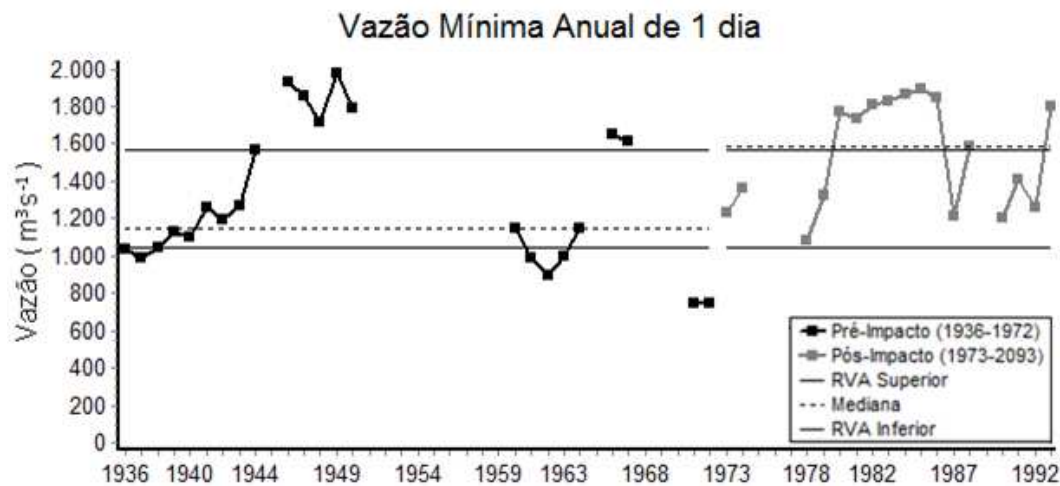


Figura 89. Série temporal da vazão mínima anual diária do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.

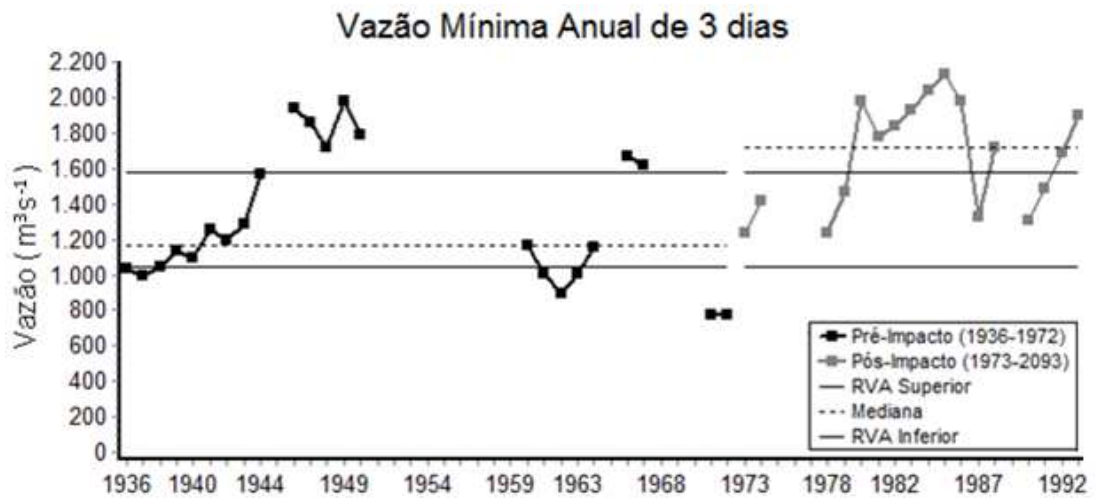


Figura 90. Série temporal da vazão mínima anual de 3 dias do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.

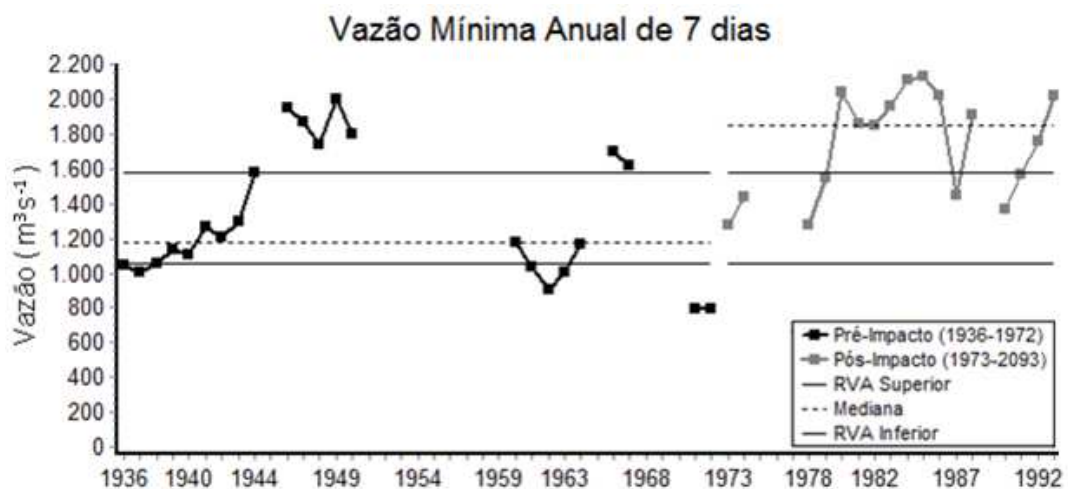


Figura 91. Série temporal da vazão mínima anual de 7 dias do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.

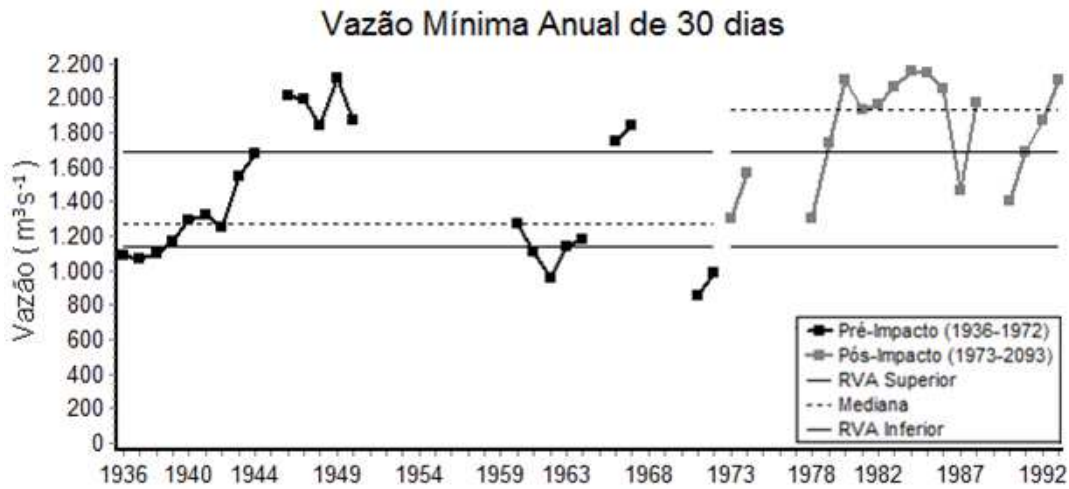


Figura 92. Série temporal da vazão mínima anual de 30 dias do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.

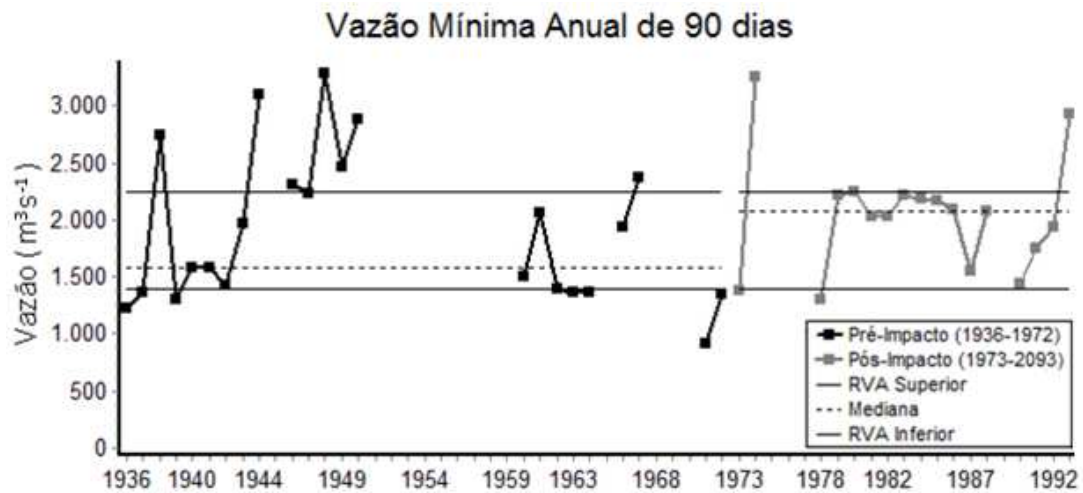


Figura 93. Série temporal da vazão mínima anual de 90 dias do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.

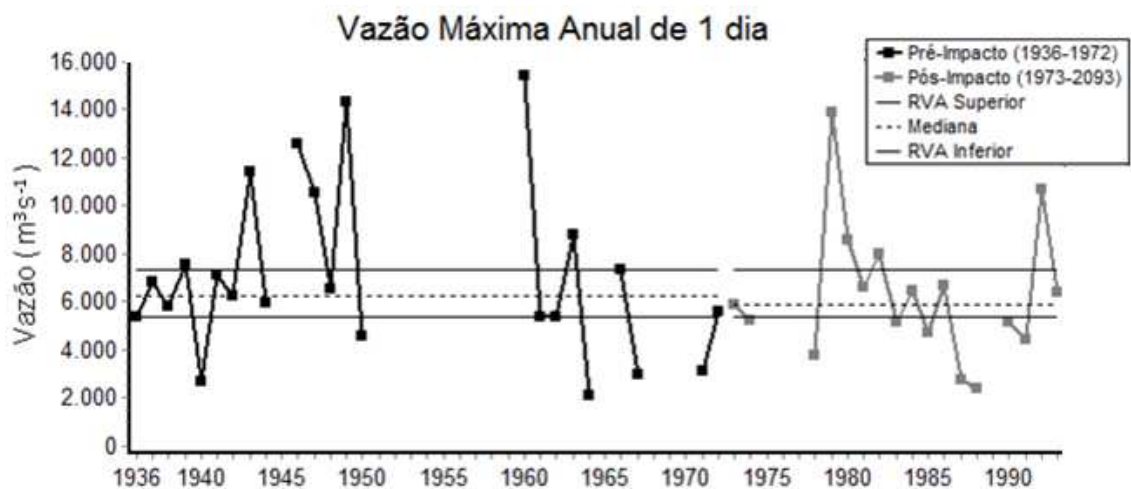


Figura 94. Série temporal da vazão máxima anual diária do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.

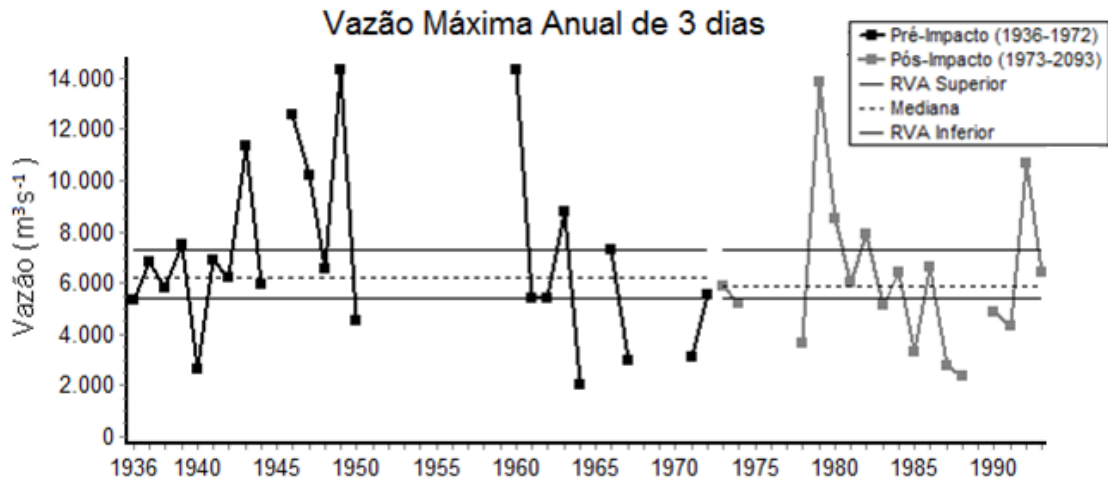


Figura 95. Série temporal da vazão máxima anual de 3 dias do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.

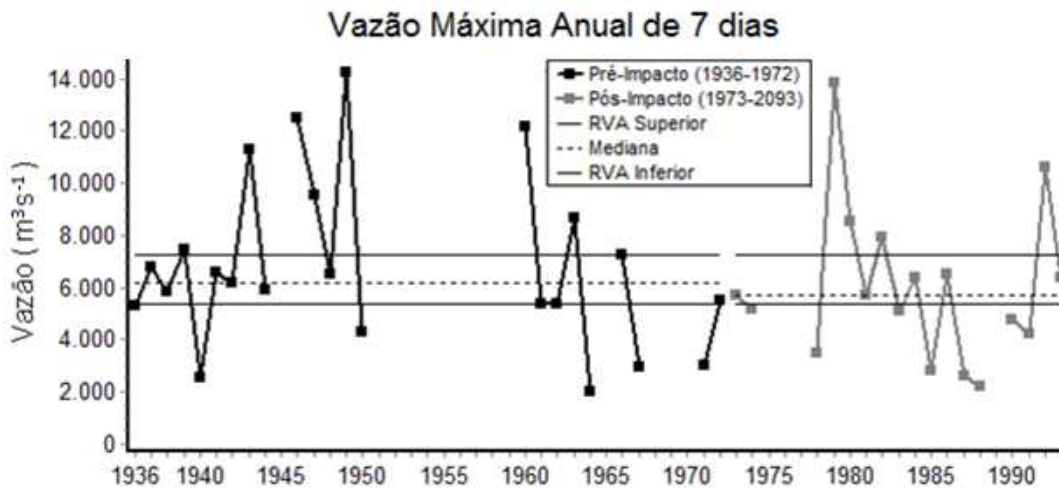


Figura 96. Série temporal da vazão máxima anual de 7 dias do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.

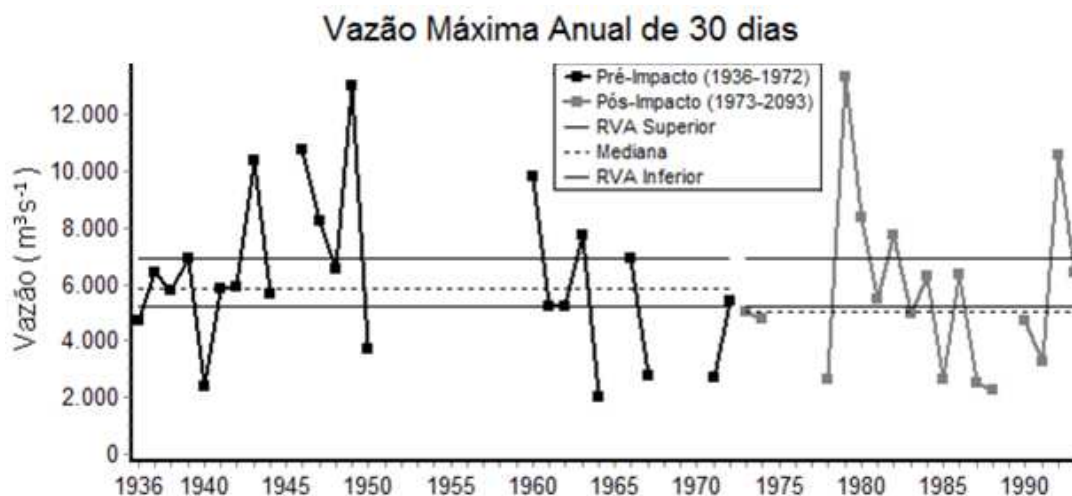


Figura 97. Série temporal da vazão máxima anual de 30 dias do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.

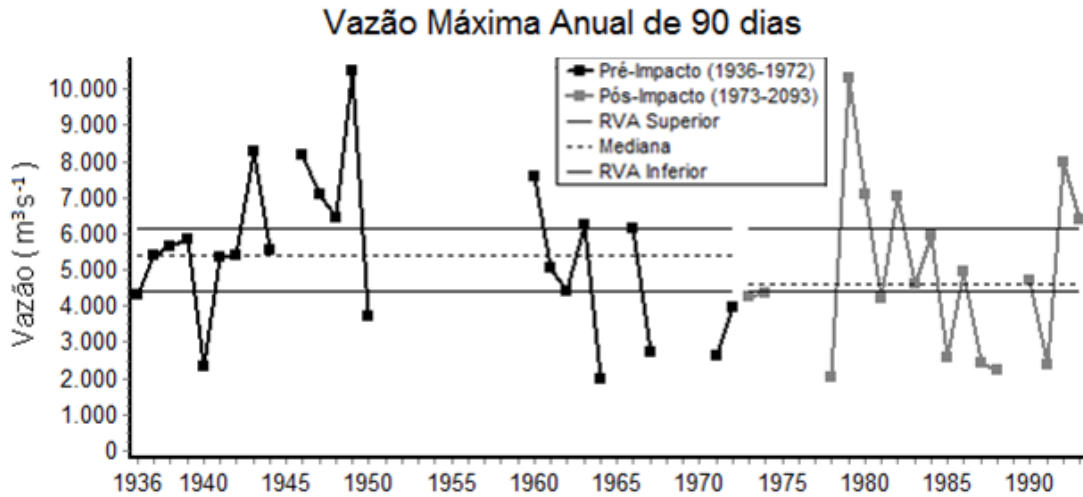


Figura 98. Série temporal da vazão máxima anual de 90 dias do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.

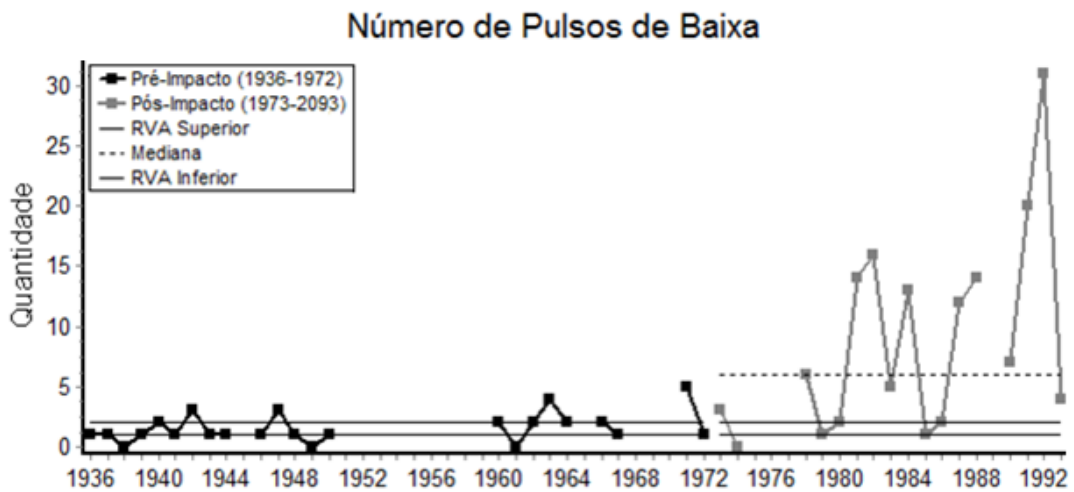


Figura 99. Série temporal do número de pulsos de baixa do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.

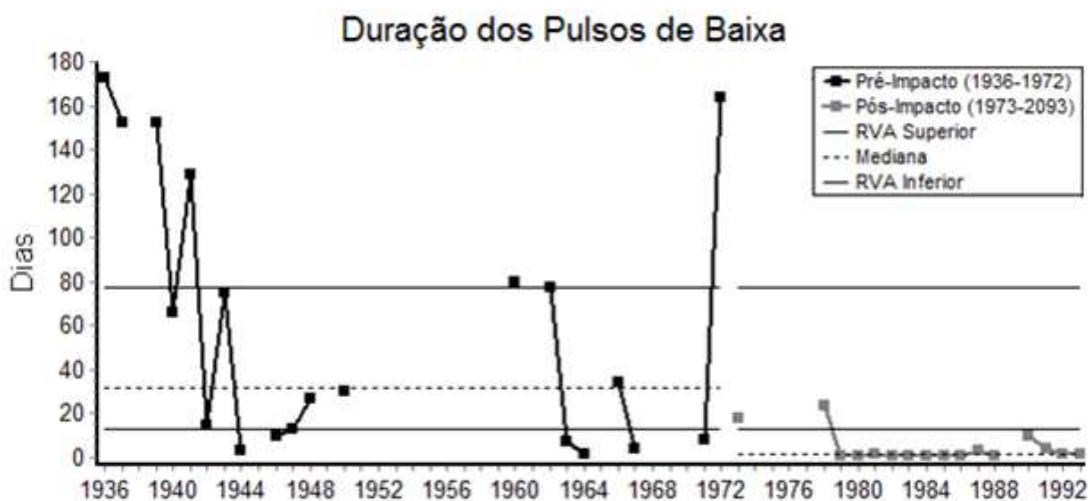


Figura 100. Série temporal da duração dos pulsos de baixa do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.

Número de Pulsos de Alta

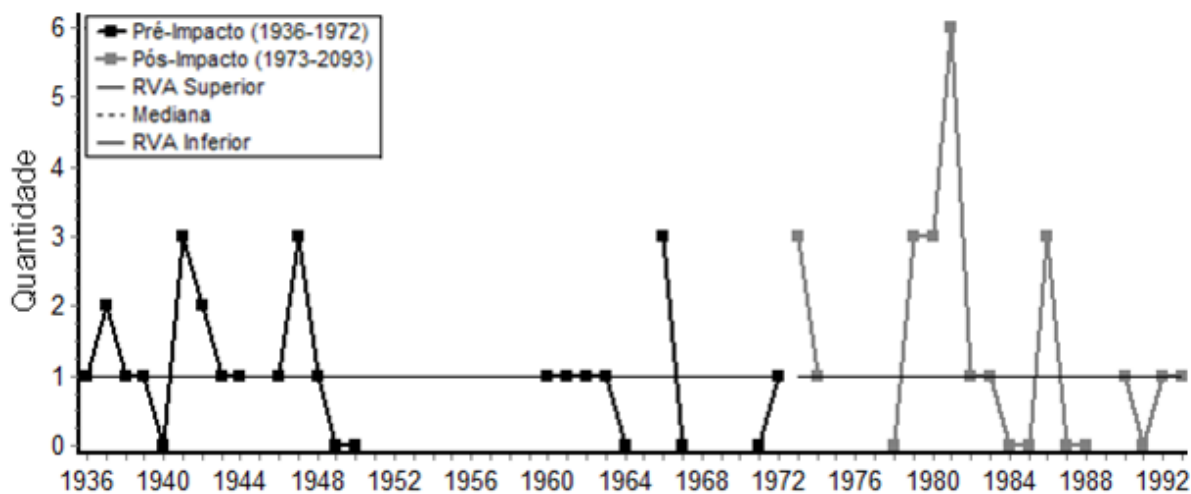


Figura 101. Série temporal do número de pulsos de alta do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.

Duração dos Pulsos de Alta

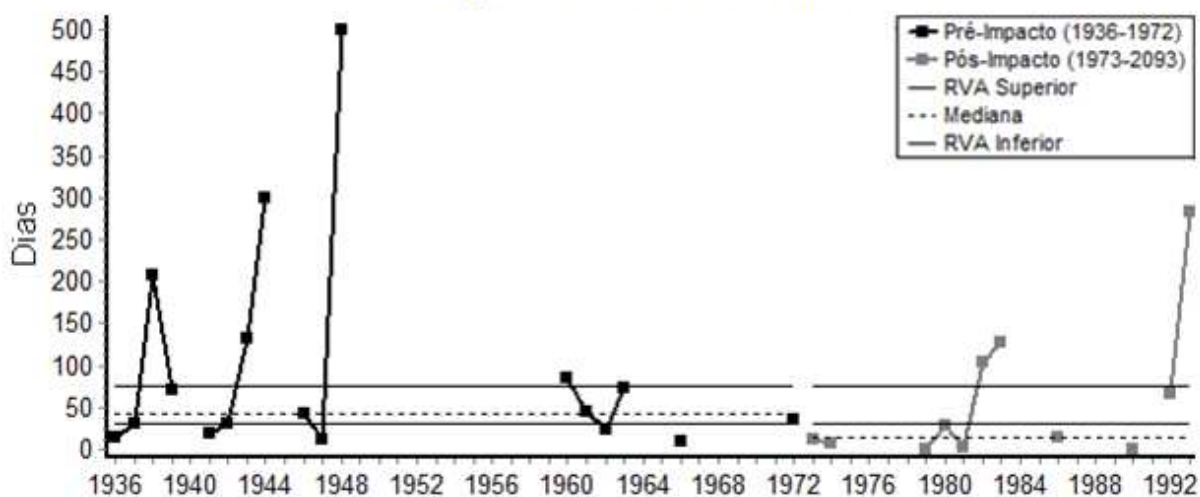


Figura 102. Série temporal da duração dos pulsos de alta do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.

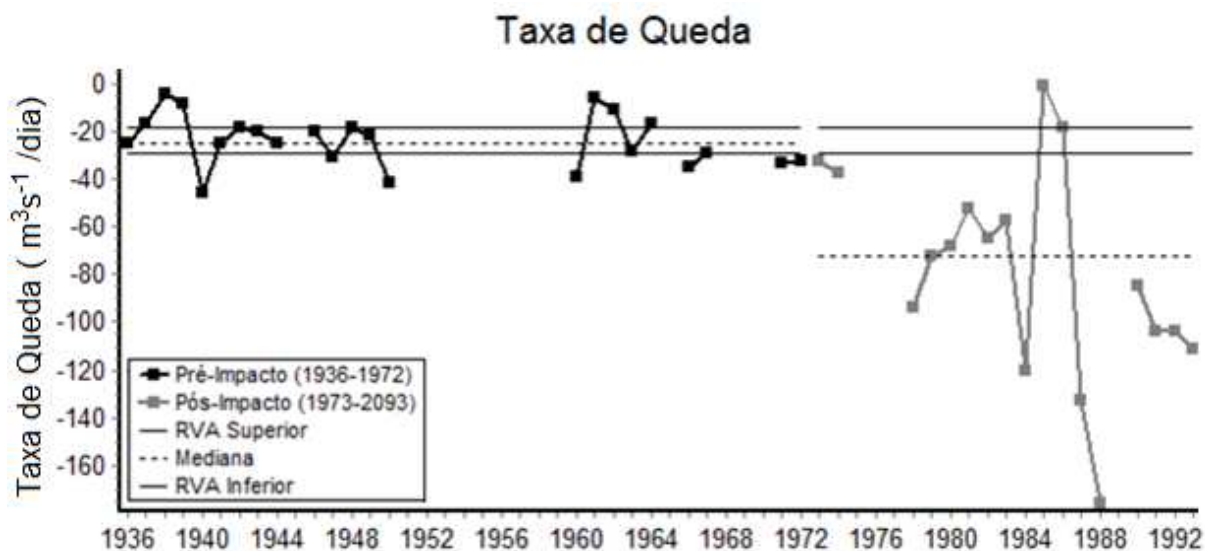


Figura 103. Série temporal da taxa de queda da vazão do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.

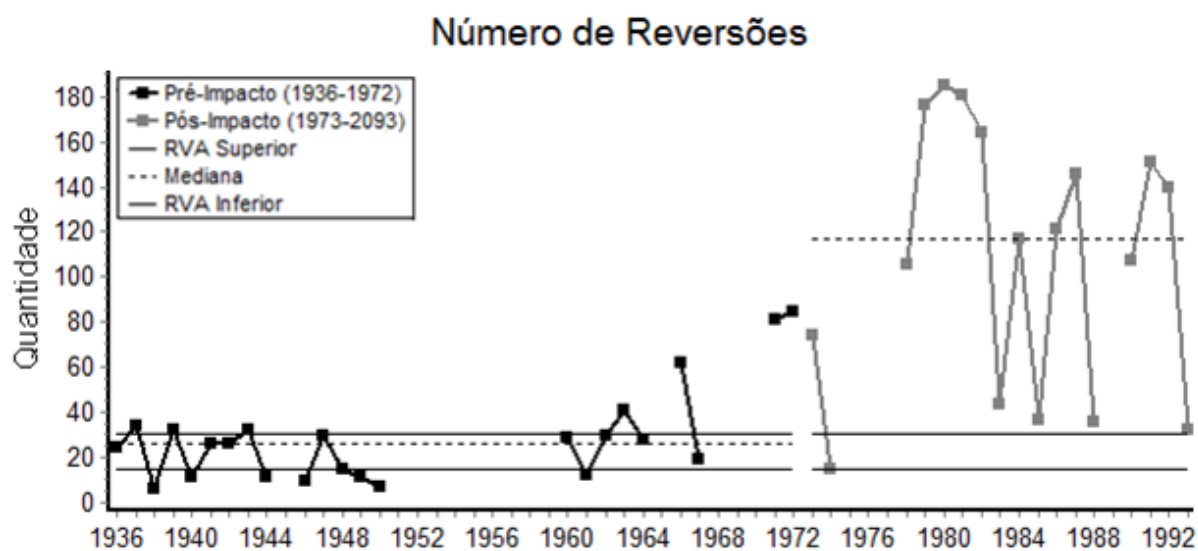


Figura 104. Série temporal do número de reversões da vazão do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Sobradinho.

APÊNDICE D - Séries temporais dos indicadores de alteração hidrológica da seção 4.4

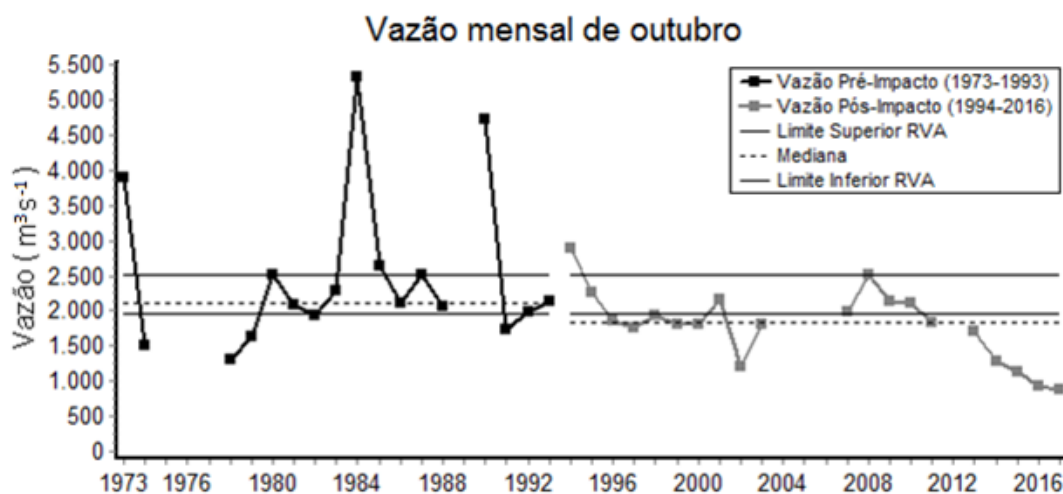


Figura 105. Série temporal da vazão mensal de outubro do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.

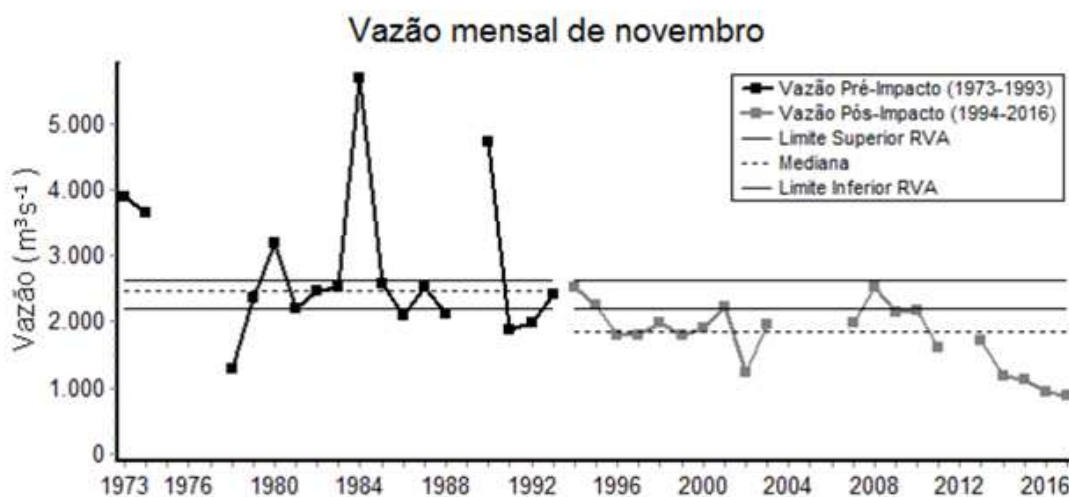


Figura 106. Série temporal da vazão mensal de novembro do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.



Figura 107. Série temporal da vazão mensal de dezembro do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.

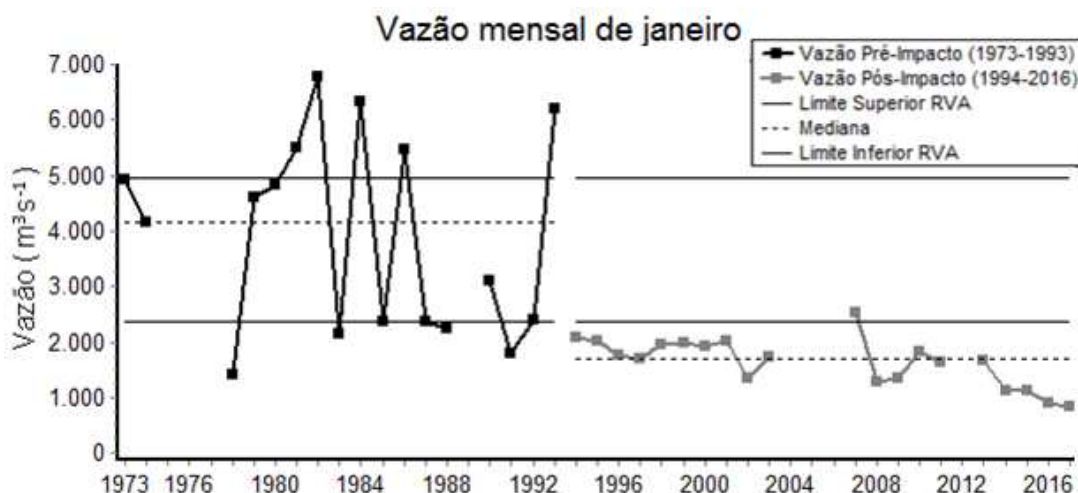


Figura 108. Série temporal da vazão mensal de janeiro do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.

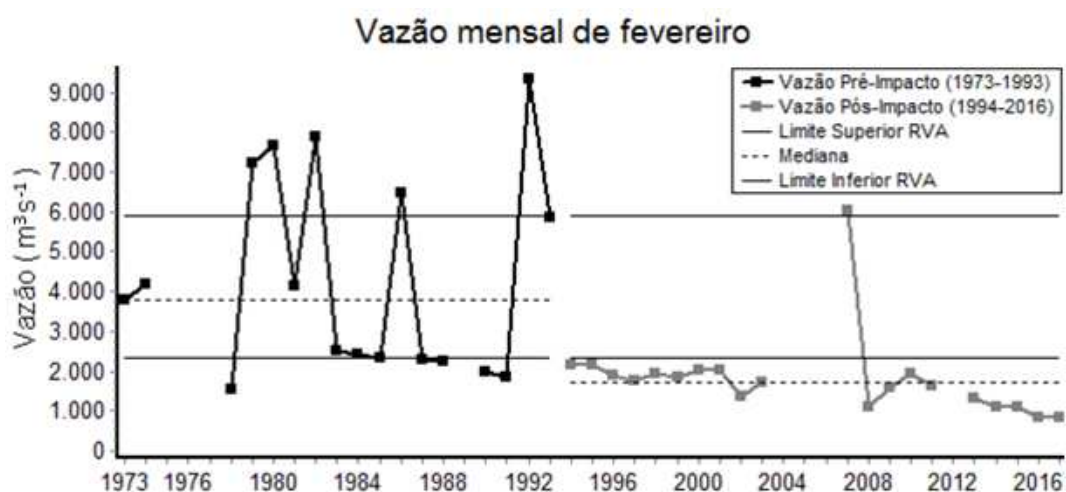


Figura 109. Série temporal da vazão mensal de fevereiro do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.

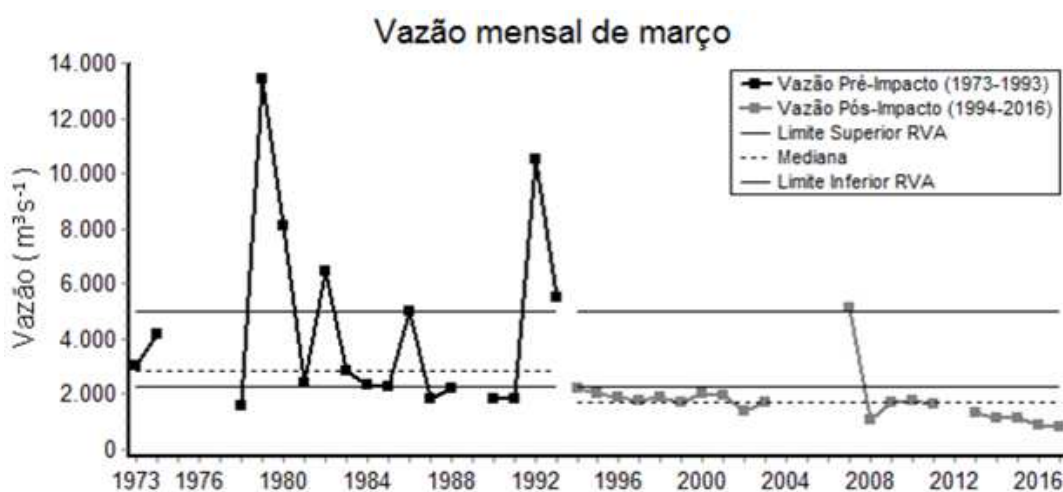


Figura 110. Série temporal da vazão mensal de março do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.

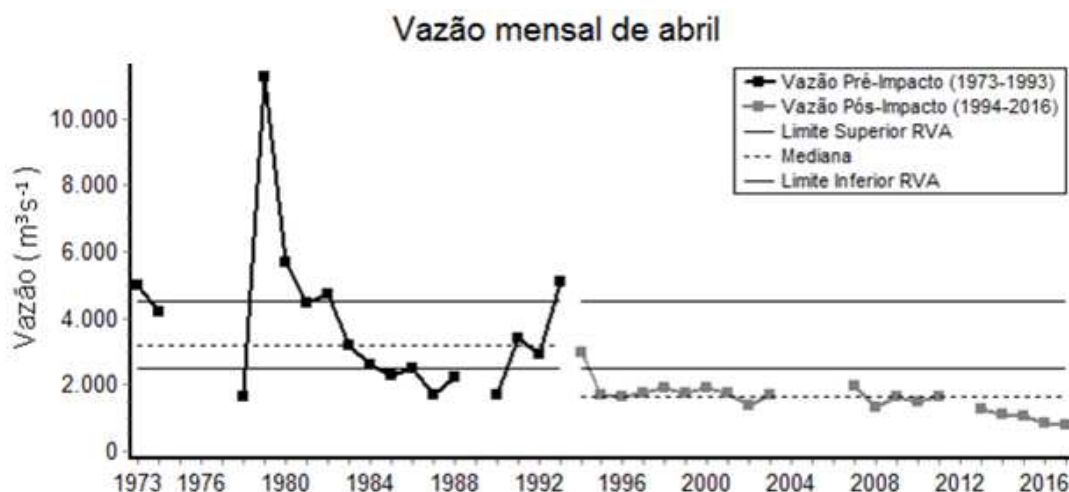


Figura 111. Série temporal da vazão mensal de abril do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.

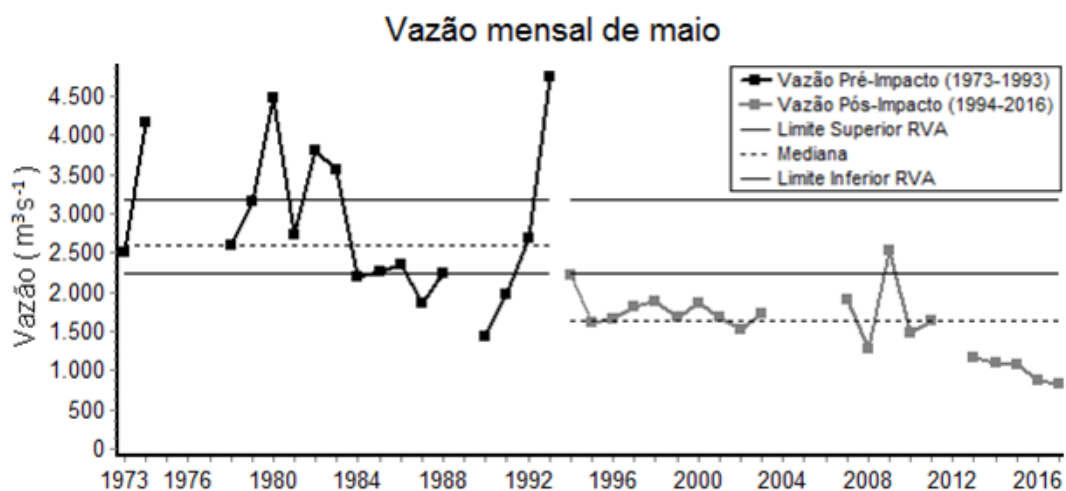


Figura 112. Série temporal da vazão mensal de maio do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.

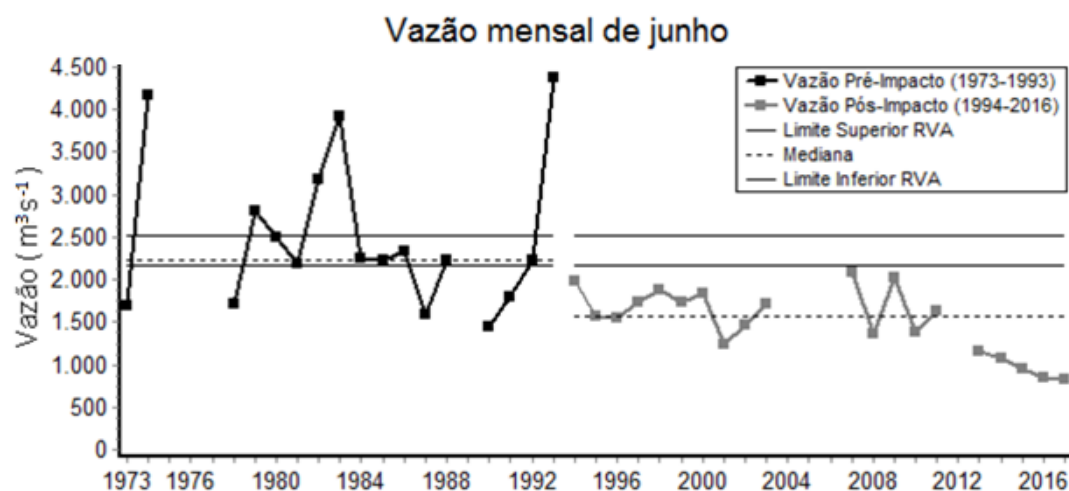


Figura 113. Série temporal da vazão mensal de junho do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.

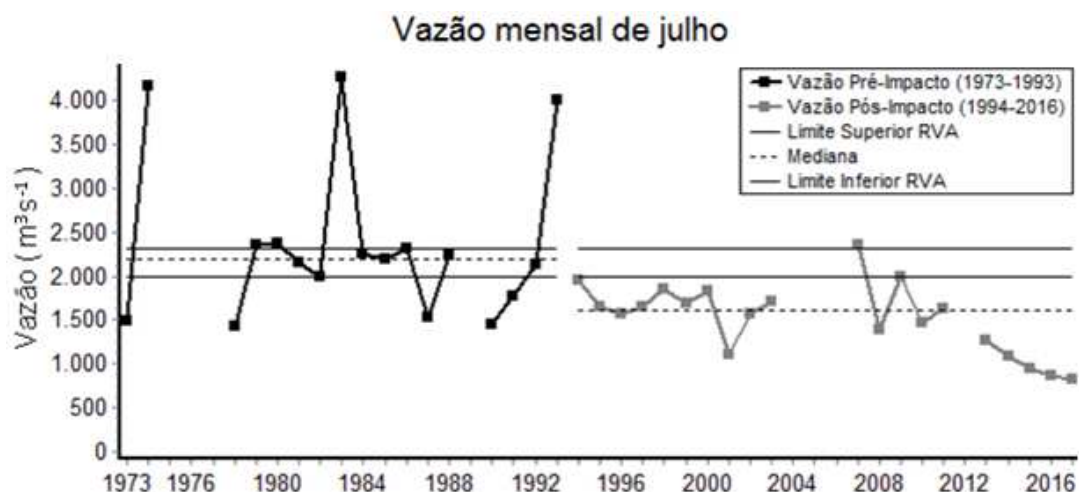


Figura 114. Série temporal da vazão mensal de julho do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.

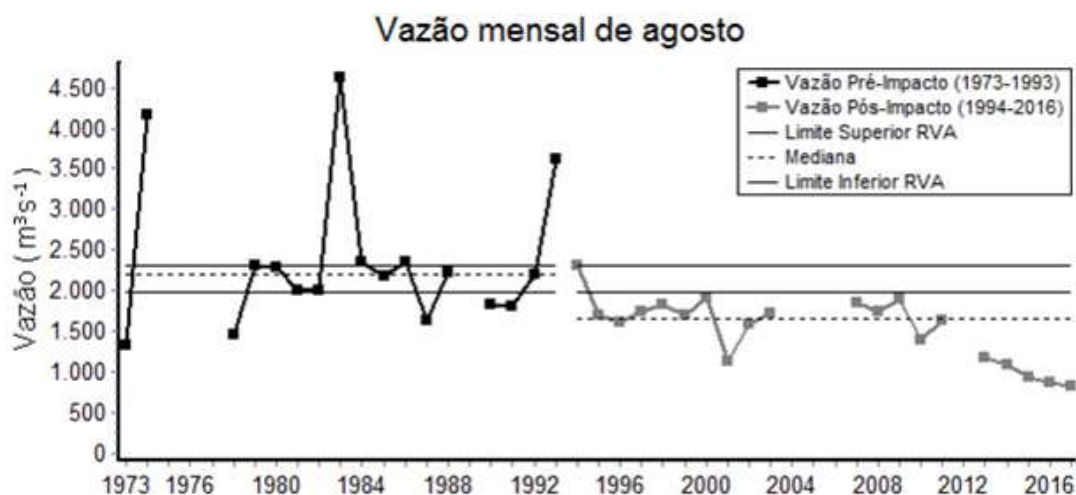


Figura 115. Série temporal da vazão mensal de agosto do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.

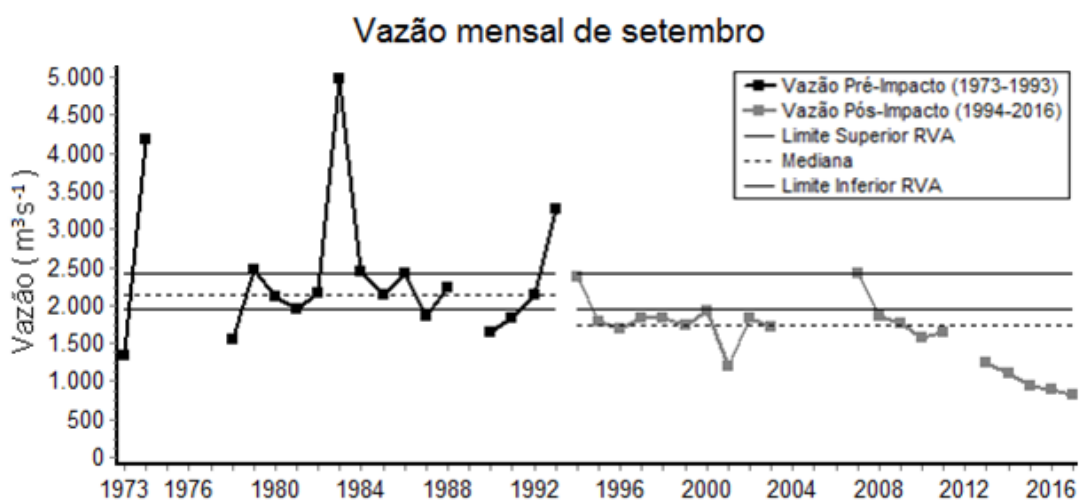


Figura 116. Série temporal da vazão mensal de setembro do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.

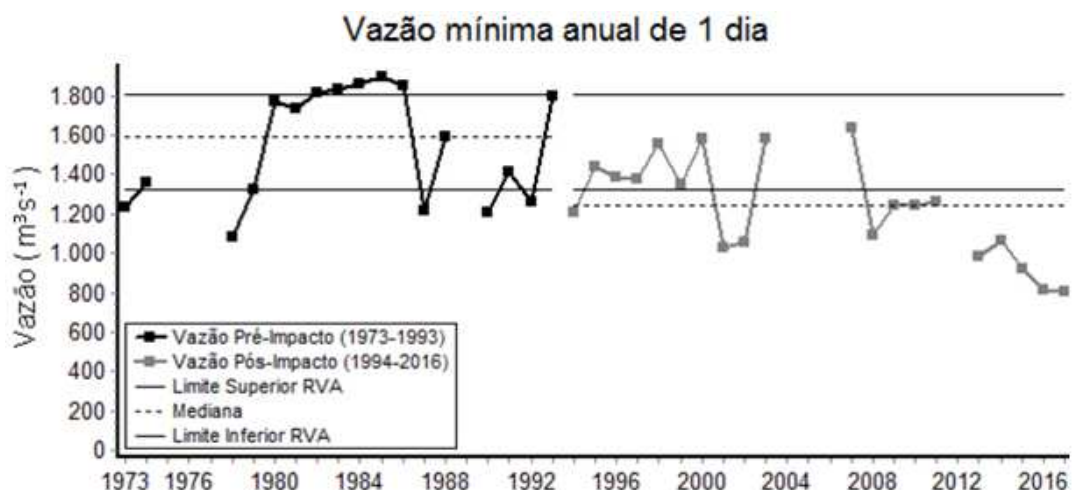


Figura 117. Série temporal da vazão mínima anual diária do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.

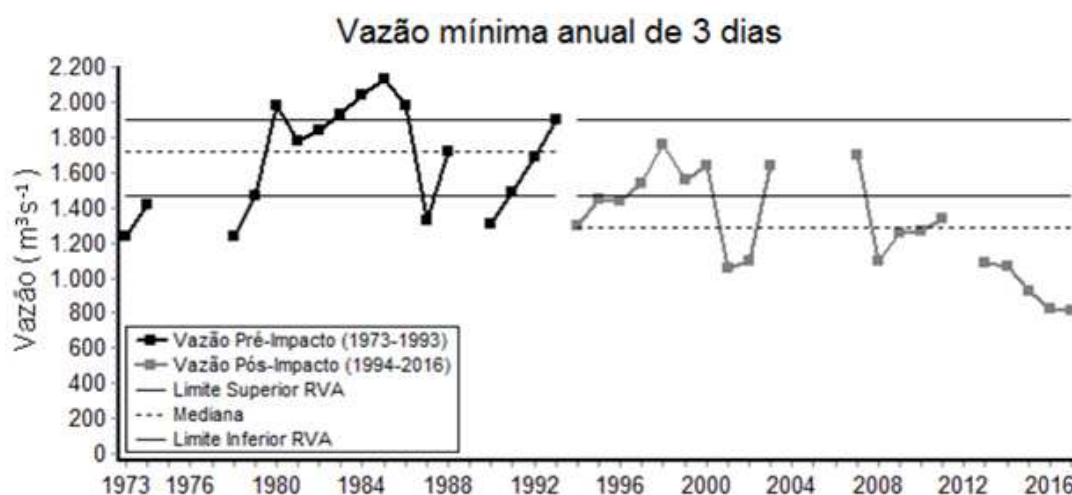


Figura 118. Série temporal da vazão mínima anual de 3 dias do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.

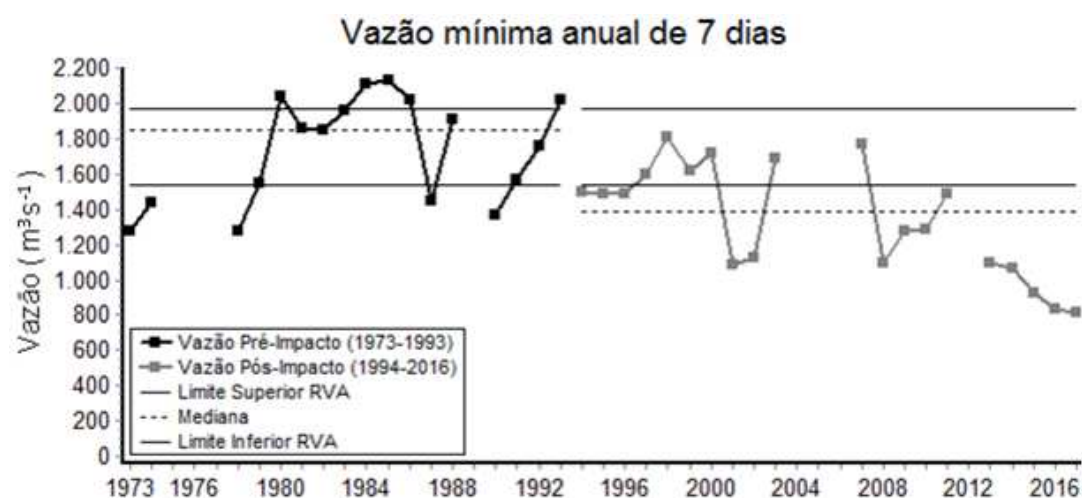


Figura 119. Série temporal da vazão mínima anual de 7 dias do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.

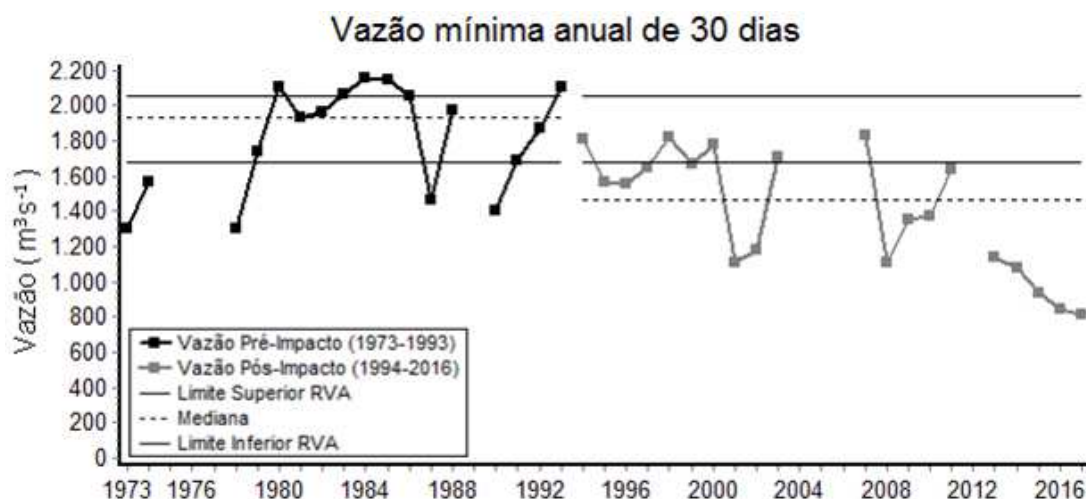


Figura 120. Série temporal da vazão mínima anual de 30 dias do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.

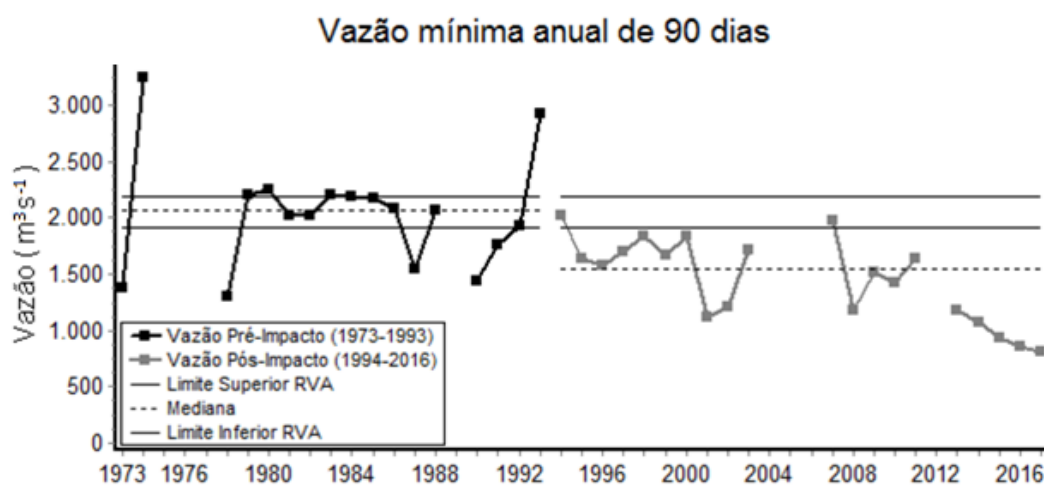


Figura 121. Série temporal da vazão mínima anual de 90 dias do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.

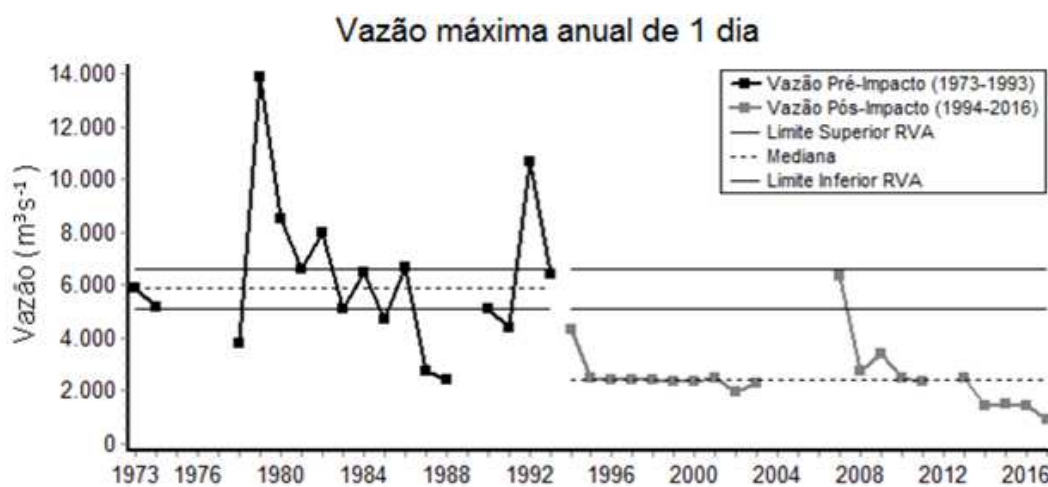


Figura 122. Série temporal da vazão máxima anual diária do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.

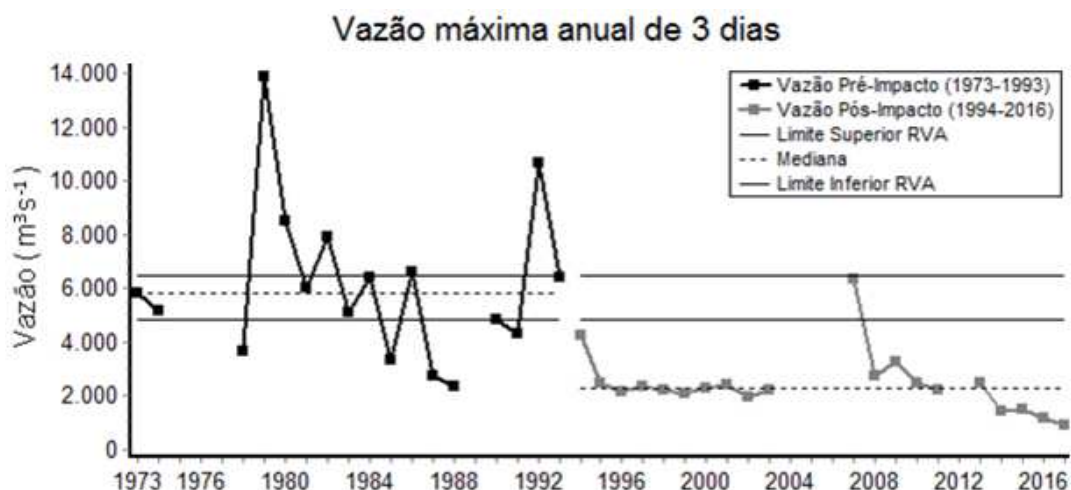


Figura 123. Série temporal da vazão máxima anual de 3 dias do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.

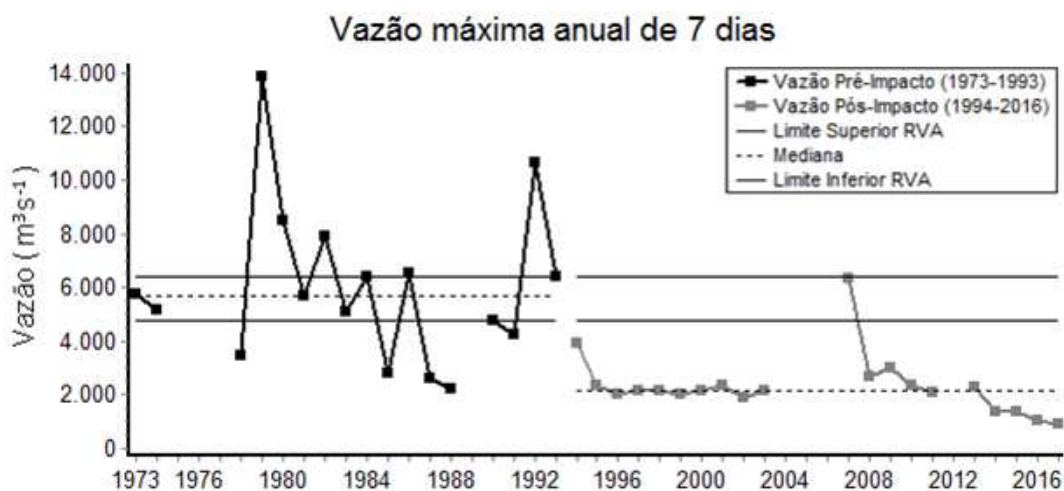


Figura 124. Série temporal da vazão máxima anual de 7 dias do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.

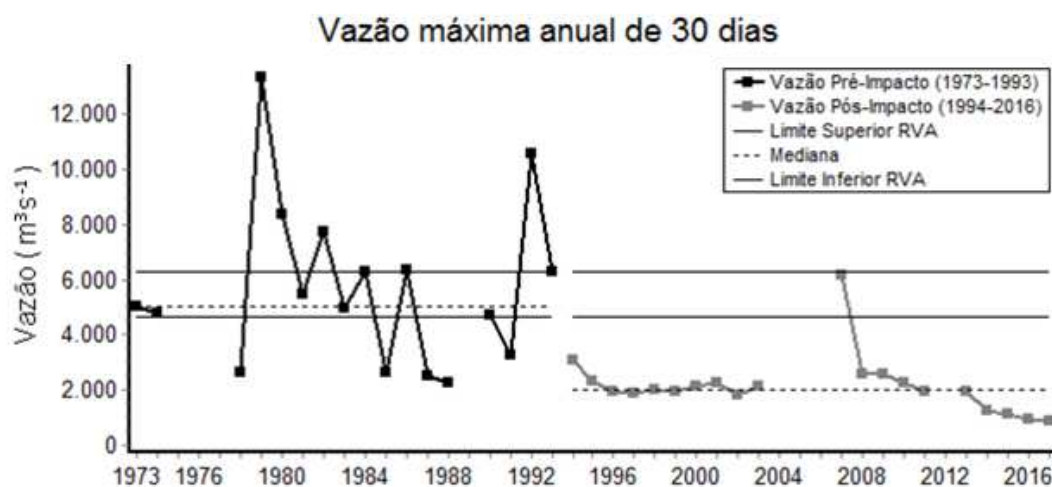


Figura 125. Série temporal da vazão máxima anual de 30 dias do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.

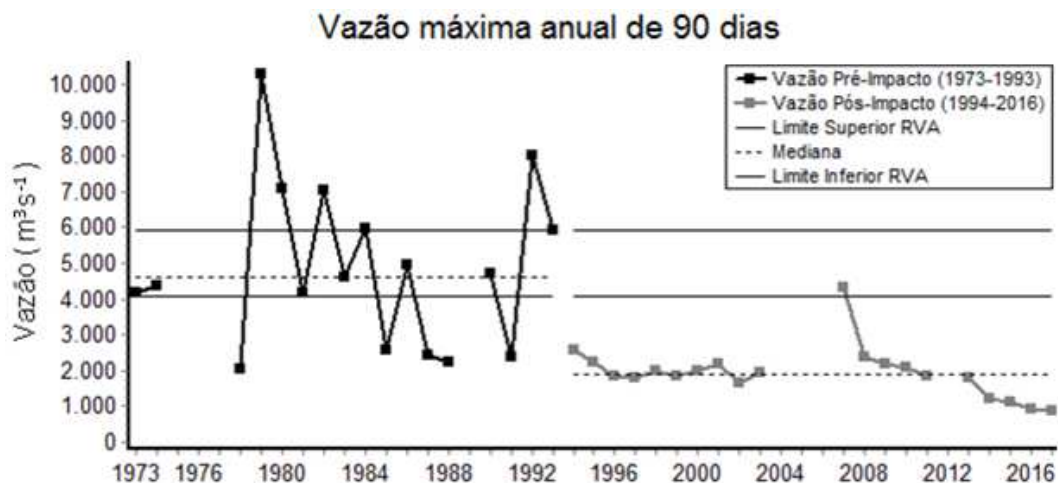


Figura 126. Série temporal da vazão máxima anual de 90 dias do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.

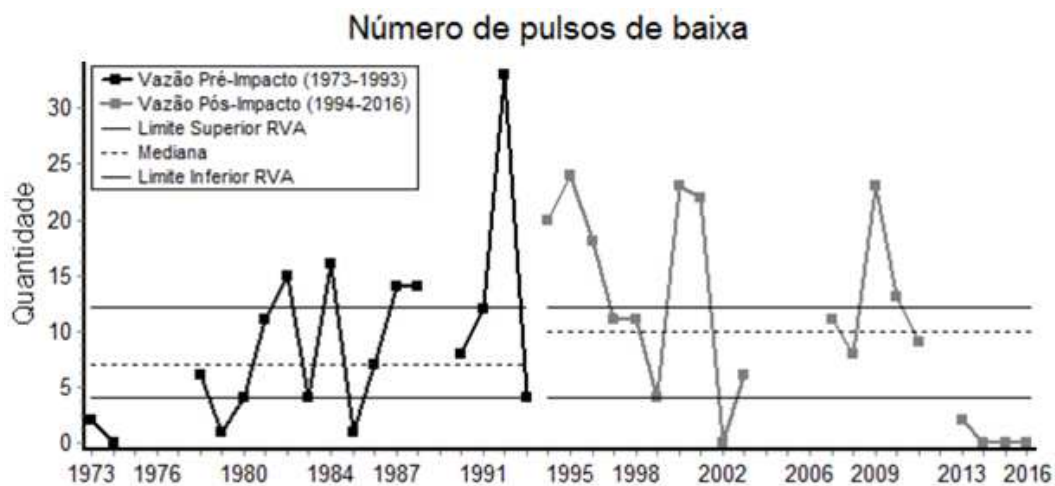


Figura 127. Série temporal do número de pulsos de baixa do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.

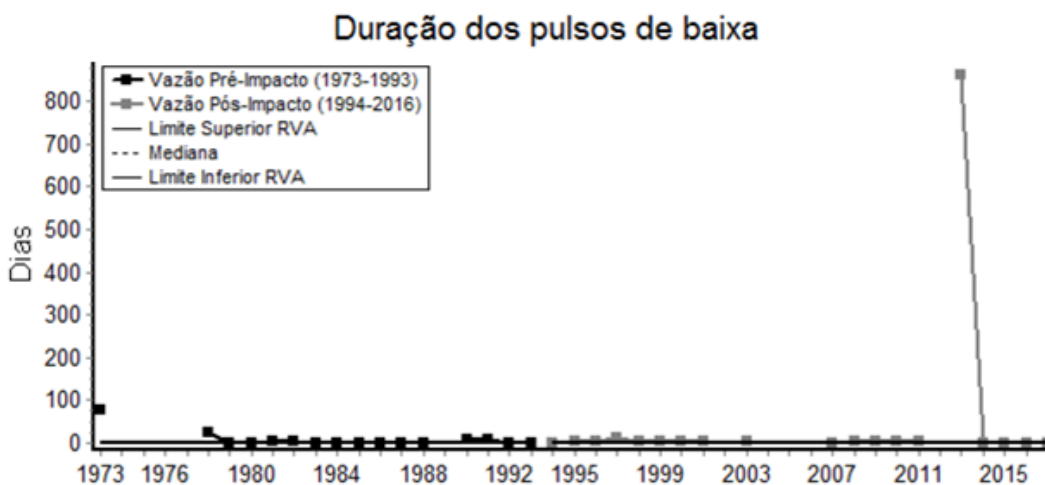


Figura 128. Série temporal da duração dos pulsos de baixa do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.

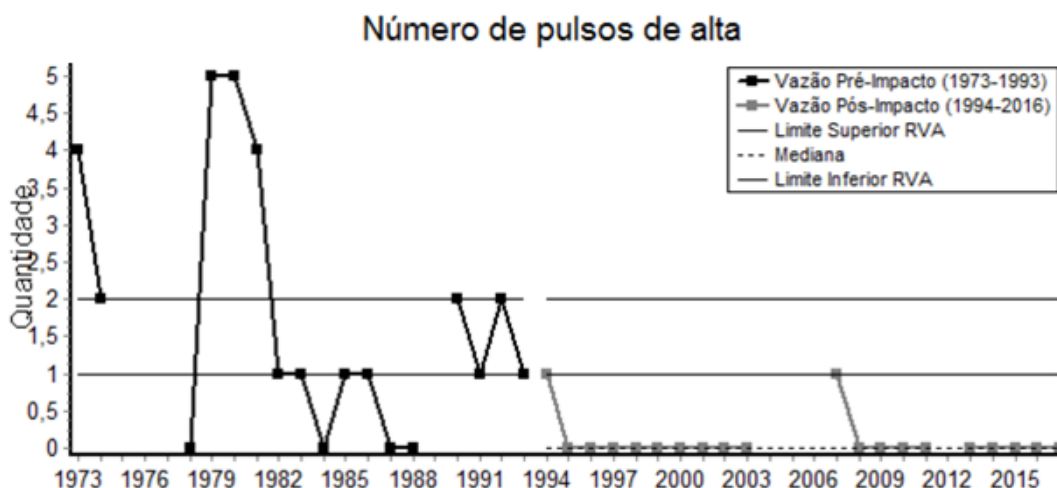


Figura 129. Série temporal do número de pulsos de alta do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.

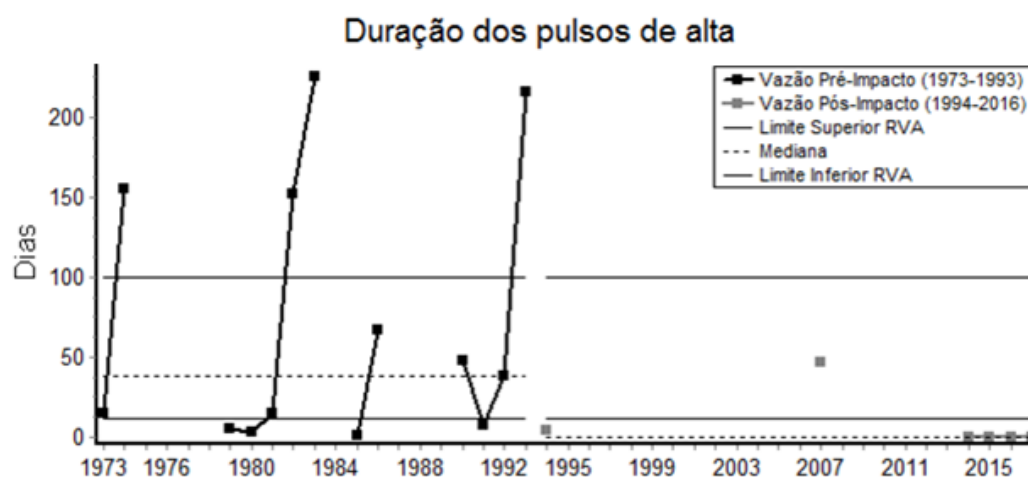


Figura 130. Série temporal da duração dos pulsos de alta do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.

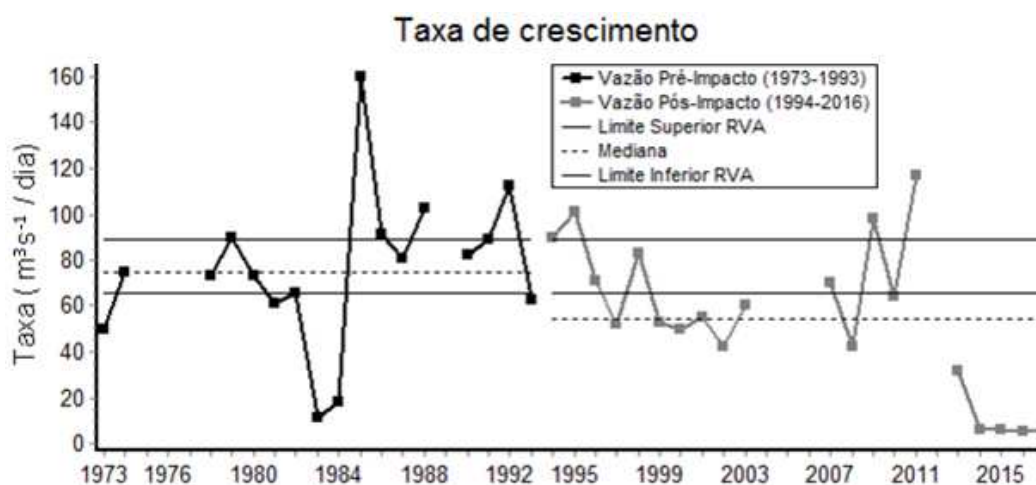


Figura 131. Série temporal da taxa de crescimento da vazão do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.

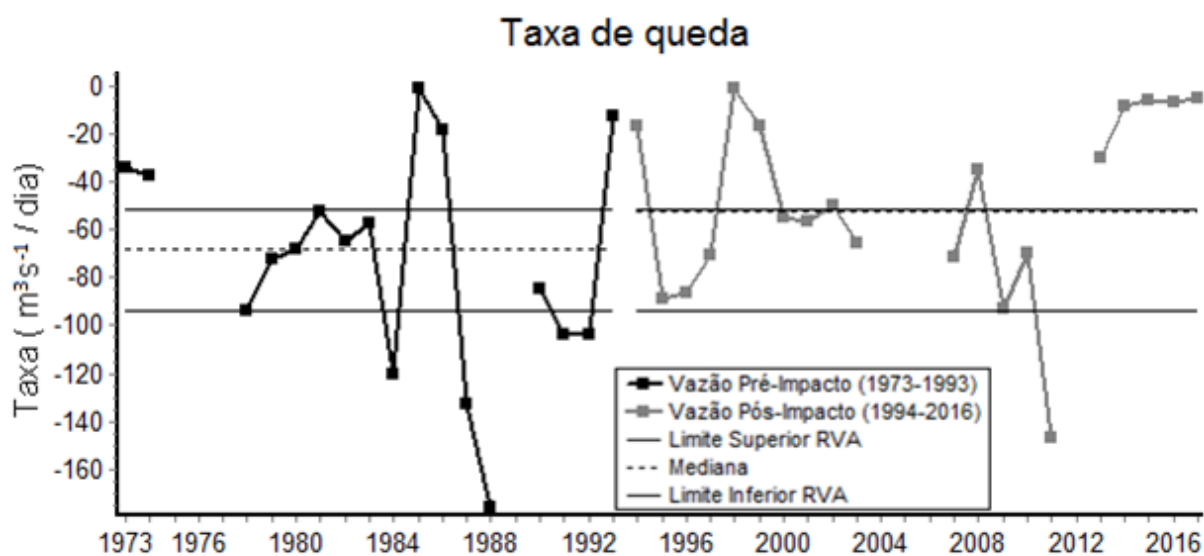


Figura 132. Série temporal da taxa de queda da vazão do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.

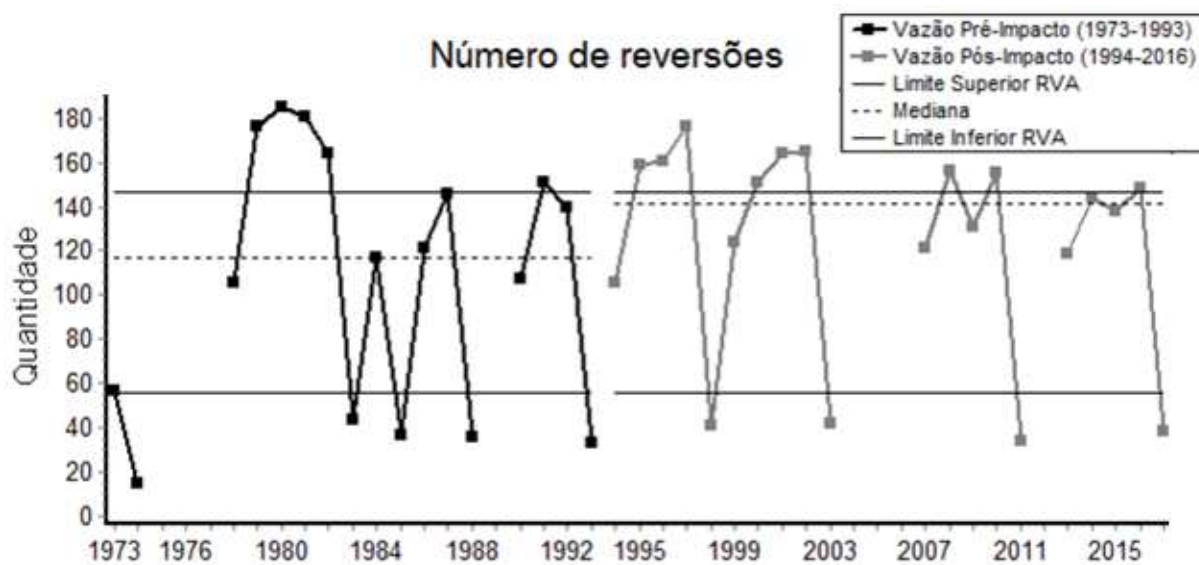


Figura 133. Série temporal do número de reversões da vazão do Rio São Francisco no município de Pão de Açúcar antes e depois da construção do reservatório de Xingó.