



**UNIVERSIDADE FEDERAL DO CEARÁ**  
**CENTRO DE TECNOLOGIA**  
**CURSO DE ENGENHARIA CIVIL**

**ÁLYSON BRAYNER SOUSA ESTÁCIO**

**ANÁLISE DA SUSTENTABILIDADE HÍDRICA DE MANANCIAS DO PROJETO**  
**MALHA D'ÁGUA**

**FORTALEZA**

**2018**

ÁLYSON BRAYNER SOUSA ESTÁCIO

ANÁLISE DA SUSTENTABILIDADE HÍDRICA DE MANANCIAS DO PROJETO  
MALHA D'ÁGUA

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Orientador: Prof. Dr. Francisco de Assis de Souza Filho.

Coorientador: Me. Victor Costa Porto.

FORTALEZA

2018

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação  
Universidade Federal do Ceará  
Biblioteca Universitária  
Gerada automaticamente pelo módulo Catalog, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

---

- E1a Estácio, Ályson Brayner Sousa.  
Análise da Sustentabilidade Hídrica de Mananciais do Projeto Malha d'Água / Ályson Brayner Sousa  
Estácio. – 2018.  
127 f. : il. color.
- Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) – Universidade Federal do Ceará, Centro de Tecnologia,  
Curso de Engenharia Civil, Fortaleza, 2018.  
Orientação: Prof. Dr. Francisco de Assis de Souza Filho.  
Coorientação: Prof. Me. Victor Costa Porto.
1. Sustentabilidade hídrica. 2. Simulação de reservatórios. I. Título.

CDD 620

---

ÁLYSON BRAYNER SOUSA ESTÁCIO

ANÁLISE DA SUSTENTABILIDADE HÍDRICA DE MANANCIAS DO PROJETO  
MALHA D'ÁGUA

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Civil da Universidade Federal do Ceará, como requisito parcial para obtenção do título de Bacharel em Engenharia Civil.

Aprovada em \_\_\_\_/\_\_\_\_/\_\_\_\_

BANCA EXAMINADORA

---

Prof. Dr. Francisco de Assis de Souza Filho (Orientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Me. Victor Costa Porto. (Coorientador)  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Me. RenanVieira Rocha  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

---

Me Gabriela de Azevedo Reis  
Universidade Federal do Ceará (UFC)

A Deus, pelo dom da vida e a virtude da  
esperança.

À Dona Liduína pelo exemplo de disciplina e  
dedicação.

Ao Sr. Estácio pelas lições de ousadia e de  
autoconfiança.

## AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, pelo financiamento ao longo do último ano com bolsa de iniciação científica.

Ao Prof. Dr. Francisco de Assis de Souza Filho, pela notável orientação e pela motivação para a realização do trabalho.

Ao Me. Victor Costa Porto pelo coleguismo com o qual coorientou esta empreitada.

À Me. Gabriela de Azevedo Reis pela solidária colaboração na elaboração das representações cartográficas.

A todos os colegas e amigos do Grupo de Gerenciamento do Risco Climático e da Sustentabilidade Hídrica pelos comentários e sugestões, que ajudaram a engrandecer essa monografia.

Aos professores e mestres que, pela dedicação e amor ao ensino, me inspiram à vida acadêmica.

Aos parceiros de equipe dos diversos trabalhos em grupo, pela amizade e companheirismo ao longo dos últimos seis anos e meio na jornada de universitária.

À Maria Aparecida, pelo apoio e carinho que alegam meus dias.

À minha irmã, Jannayna, pelo amor e cuidado fraternal com que me acompanha desde meu nascimento.

Aos meus pais, José Maria e Liduína, por acreditarem e investirem em mim e pelo exemplo de pais que são.

“As células mirradas do Ceará  
quando o céu lhe dá a injeção de soro  
dos aguaceiros —  
as células mirradas do Ceará  
intumescem o protoplasma  
(como os seus capulhos de algodão)  
e nucleiam-se de verde  
— é a cromatina dos roçados no sertão...”  
(Demócrito Rocha)

## RESUMO

Com projeto intitulado Malha d'Água, a Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Ceará planeja adensar a rede de adutoras do estado, com expectativa de garantir o abastecimento das populações cearenses até 2041. A solução adotada demanda estudos de viabilidade, que permitam o melhoramento e detalhamento do projeto. O presente trabalho tem por objetivo avaliar, dentre os aspectos da viabilidade do Malha d'Água, a sua sustentabilidade hídrica, verificando o risco associado ao abastecimento das populações e a oferta hídrica para outros fins. A avaliação do risco de desabastecimento é realizada por meio de simulações dos balanços hídricos nos reservatórios mananciais, com vazões afluentes consideradas estacionárias. A oferta hídrica máxima é estimada através da otimização de operações de salvaguarda. A análise mostra que a maior parte dos mananciais de projeto atende com risco admissível a demanda de abastecimento humano e assegura volume relevante para outros usos da água. O Projeto Malha d'Água mostra-se, assim, viável do ponto de vista hídrico, podendo representar um instrumento eficiente e seguro na gestão dos recursos hídricos do estado.

**Palavras-Chave:** Sustentabilidade hídrica. Simulação de reservatórios.



## ABSTRACT

The State of Ceará Water Resources Secretary is designing Malha d'Água Project. This improvement of the state's water pipeline network, intend to ensure the Cearense population supply in 2041. This study aims to evaluate Malha D'Água water sustainability, verifying the risk of shortage and the water supply for other uses than household. The shortage risk evaluation is done by water system simulation. The maximum water supply is estimated by optimizing the reservoir operating rule. The analysis shows that most of the designed water systems ensure the household water demand with acceptable risk and they can provide a substantial amount of water for other uses.

**Keywords:** Water sustainability. Water system simulation.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1- Sistemas adutores concebidos no Projeto Malha d'Água .....	13
Figura 2- Sistemas adutores analisados e sistemas adutores não contemplados no estudo.....	20
Figura 3 – Evolução temporal da capacidade de armazenamentode águas superficiais do Ceará .....	22
Figura 4 – Metodologia de Análise .....	36
Figura 5 – Fluxograma de classificação dos mananciais.....	38
Figura 6 - Operação com salvaguarda .....	39

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Sistemas adutores analisados.....	14
Tabela 2 - Sistemas adutores analisados.....	19
Tabela 3 – Aquisição e procedência dos dados de entrada das simulações .....	29
Tabela 4 – Disponibilidade de dados de vazão incremental afluyente.....	29
Tabela 5 – Avaliação do suprimento do abastecimento humano - Critérios de risco .....	42
Tabela 6 – Classificação dos mananciais .....	43
Tabela 7 – Operação de salvaguarda ótima .....	44
Tabela 8 – Operação ótima de salvaguarda – Critérios de risco .....	45

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	12
<b>1.1</b>	<b>Caracterização do Projeto Malha d'água</b> .....	12
<b>1.2</b>	<b>Questão Motivadora</b> .....	17
<b>1.3</b>	<b>Objetivos</b> .....	18
<b>1.4</b>	<b>Escopo do trabalho</b> .....	18
<b>1.5</b>	<b>Estrutura da monografia</b> .....	19
<b>2</b>	<b>REVISÃO</b> .....	21
<b>2.1</b>	<b>A questão hídrica no Ceará</b> .....	21
<b>2.2</b>	<b>Sustentabilidade e segurança hídrica</b> .....	23
<b>2.3</b>	<b>Aleatoriedade na Hidrologia e risco de desabastecimento</b> .....	24
<b>2.4</b>	<b>Falha e garantia de abastecimento</b> .....	25
<b>2.5</b>	<b>Simulação de mananciais</b> .....	26
<b>3</b>	<b>METODOLOGIA</b> .....	27
<b>3.1</b>	<b>Ferramenta computacional</b> .....	27
<b>3.2</b>	<b>Dados de entrada</b> .....	28
<b>3.3</b>	<b>Hipótese básica</b> .....	30
<b>3.4</b>	<b>Metodologia de simulação</b> .....	30
<b>3.4.1</b>	<i>Hipóteses sobre as contribuições dos reservatórios a montante</i> .....	30
<b>3.4.2</b>	<i>Balanco hídrico dentro do reservatório</i> .....	31
<b>3.4.3</b>	<i>Contribuição dos reservatórios a montante para os reservatórios a jusante</i> .....	34
<b>3.5</b>	<b>Metodologia de análise</b> .....	35
<b>3.5.1</b>	<i>Avaliação de suprimento do abastecimento humano e classificação dos mananciais ....</i> .....	37
<b>3.5.2</b>	<i>Avaliação da oferta para usos além do abastecimento humano</i> .....	38
<b>3.6</b>	<b>Critério alternativo de análise</b> .....	41
<b>4</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÕES</b> .....	42
<b>4.1</b>	<b>Avaliação de suprimento do abastecimento humano e classificação dos mananciais.</b> .....	42
<b>4.2</b>	<b>Avaliação da oferta para usos além do abastecimento humano</b> .....	44
<b>5</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS</b> .....	46
	<b>REFERÊNCIAS</b> .....	48
	<b>ANEXO A -SISTEMAS ADUTORES DO PROJETO MALHA D'ÁGUA</b> .....	50

<b>ANEXO B – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS RESERVATÓRIOS EM CASCATA.....</b>	<b>54</b>
<b>ANEXO C –CASCATAS DE RESERVATÓRIOS – ORDENS DE AFLUÊNCIA E PERÍODOS DE DADOS DE VAZÃO.....</b>	<b>56</b>
<b>APÊNDICE I – ROTINA DE CÁLCULO EM R.....</b>	<b>58</b>
<b>APÊNDICE II - AVALIAÇÃO DA HIPÓTESE 1.....</b>	<b>78</b>
<b>APÊNDICE III – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES – RETIRADA IMPOSTA IGUAL À DEMANDA DE ABASTECIMENTO HUMANO.....</b>	<b>81</b>
<b>APÊNDICE IV – CURVAS GARANTIA <i>versus</i> RETIRADA.....</b>	<b>94</b>
<b>APÊNDICE V – VAZÕES CARACTERÍSTICAS .....</b>	<b>97</b>
<b>APÊNDICE VI – TEMPOS DE PERMANÊNCIA – RETIRADA IMPOSTA IGUAL À DEMANDA DE ABASTECIMENTO HUMANO .....</b>	<b>98</b>
<b>APÊNDICE VII - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES – OPERAÇÃO ÓTIMA .....</b>	<b>100</b>
<b>APÊNDICE VIII – TEMPOS DE PERMANÊNCIA – OPERAÇÃO ÓTIMA.....</b>	<b>111</b>
<b>APÊNDICE IX – CRITÉRIO ALTERNATIVO – RESUMO DOS RESULTADOS....</b>	<b>113</b>
<b>APÊNDICE X – CRITÉRIO ALTERNATIVO – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PARA A OPERAÇÃO ÓTIMA .....</b>	<b>115</b>
<b>APÊNDICE XI – CRITÉRIO ALTERNATIVO – TEMPOS DE PERMANÊNCIA PARA A OPERAÇÃO ÓTIMA .....</b>	<b>126</b>

## 1 INTRODUÇÃO

O estado do Ceará sofre historicamente os efeitos diretos e indiretos de longos períodos de estiagem. Segundo Campos (2006) “[o estado] caracteriza-se por um clima adverso e um regime hidrológico marcado por rios intermitentes”, o que impõe um balanço hídrico desfavorável. Tal condição de restrição hídrica limita o acesso das populações à água e impõe barreiras ao desenvolvimento do estado.

Em razão disso, o poder público tem, ao longo das décadas e em suas diferentes esferas, lançado mão de projetos que visam minimizar os efeitos da seca (CAMPOS, 2006). Nesse sentido, o Governo do Estado do Ceará tem idealizado o Projeto Malha d’Água, visando assegurar o abastecimento das populações cearenses e permitir melhor gestão dos usos da água.

É requerida pelo projeto uma série de estudos que avaliem sua viabilidade e gerem subsídio para o detalhamento e o aperfeiçoamento da solução adotada. Dentre os aspectos a serem avaliados, a sustentabilidade hídrica, imperativo para o prosseguimento do Projeto do Malha d’Água, constitui o objeto de estudo deste trabalho.

Na sequência deste capítulo introdutório, apresenta-se uma caracterização do projeto, os questionamentos que justificam este trabalho, os objetivos estabelecidos a fim de se responder a tais questionamentos e o escopo do estudo realizado. Por fim, é apresentada a divisão de capítulos na qual este relatório está estruturado.

### 1.1 Caracterização do Projeto Malha d’água

Projeto de iniciativa do Governo do Estado do Ceará e idealizado pela Secretaria de Recursos Hídricos, o Malha d’Água consiste no adensamento da rede de adutoras do estado, que, conectando reservatórios de maior porte aos centros urbanos, pretende garantir maior segurança ao abastecimento das populações.

Os Sistemas Adutores definidos em projeto e os mananciais que os alimentam devem assegurar o abastecimento das cidades, retirando-se, portanto, dos demais reservatórios do estado e dos cursos d’água a responsabilidade pelo abastecimento humano e permitindo, assim, melhor gestão dos usos da água.

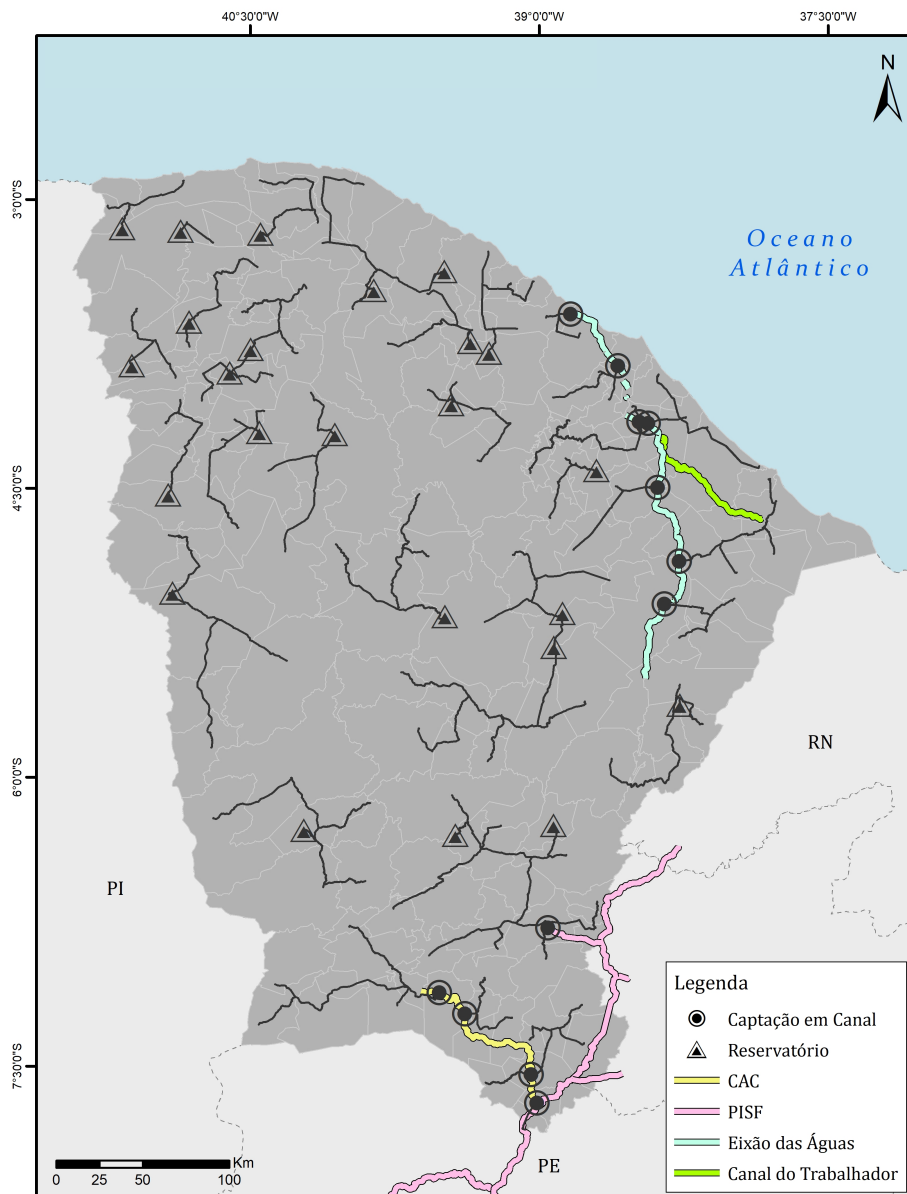
Com horizonte de projeto para o ano de 2041, o Malha d’Água teve sua concepção iniciada em 2016, estando atualmente definidos os sistemas adutores, com os

respectivos mananciais de captação e as municipalidades abastecidas por cada sistema. Tais definições podem ser observadas em maior detalhe no ANEXO A.

Os mananciais de captação estabelecidos para cada sistema adutor correspondem em cada caso a um ou mais reservatórios já existentes ou em planejamento, ou ainda a canais, como o Eixão das Águas, abastecido pelo Açude Castanhão, ou trechos já executados do Cinturão das Águas, que deve receber aporte da Transposição Rio São Francisco.

Ao procurar atender à demanda de abastecimento de uma população de projeto de mais de 6 milhões de pessoas, o Malha d'Água abrange todas as regiões do estado, como pode ser observado no mapa (Figura 1), onde estão representados os 39 sistemas de adutoras concebidos com os respectivos mananciais (reservatórios ou canais).

Figura 1- Sistemas adutores concebidos no Projeto Malha d'Água



Fonte: Adaptado de Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Ceará (2016)

As populações de projeto para cada sistema adutor, bem como a demanda hídrica para abastecimento doméstico, foram objeto de estudo de trabalho precedente, estando resumidas na Tabela 1.

Tabela 1 - Sistemas adutores analisados

<i>Sistema Adutor</i>	<i>População de Projeto (hab)</i>	<i>Demanda de abastecimento humano (l/s)</i>
Horizonte/Pacajus - Serra de Baturité	332940	612,63
Metropolitano - Litoral Leste	269625	514,47
Serras Metropolitanas	260980	505,44
Pecém - Litoral Oeste	68401	116,89
Eixão - Ocara/Ibaretama	24595	39,04
Aracoiaba - Maciço de Baturité	100716	174,84
Baixo Jaguaribe - Litoral Leste	233766	400,19
Curral Velho - Vale do Jaguaribe	188064	347,18
Figueiredo - Serra do Pereiro	104629	176,38
General Sampaio - Sertão de Canindé	156997	268,88
Vale do Curu - Litoral Oeste	177116	307,29
Caxitoré - Serra de Uruburetama	293807	543,20
Litoral - Baixo Acaraú	170804	296,53
Edson Queiroz - Alto Acaraú	97757	169,72
Araras - Alto Acaraú	178504	304,30
Taquara - Sertão de Sobral	76254	129,99
Jaibaras - Sobral	387525	728,27
Integração Taquara - Jaibaras*	387525	728,27
Ibiapaba Sul	111998	194,44
Ibiapaba Norte	170482	295,98
Coreaú	62829	106,77
Gangorra - Granja / Martinópole	68829	119,49
Itauna - Litoral Norte	117498	203,99
Tucunduba - Litoral Norte	87452	151,83
Fronteiras - Sertões de Crateús	167753	302,52
Fogareiro - Alto Banabuiú	117429	203,87
Pedras Brancas - Sertão Central	195372	357,53
Integração Banabuiú - Pedras Brancas*	195372	357,53
Banabuiú - Sertão Central	213737	366,89
Cariri Ocidental	175134	296,49
Arneiroz II - Sertão dos Inhamuns	136561	230,43
Trussu - Alto Jaguaribe	240322	440,87
Extremo Sul	29487	46,66
Cariri Oriental	184429	315,60
CRAJUBAR	632861	1,330,99
Salgado - Centro Sul	82827	138,83
Orós - Centro Sul	176966	306,35

Fonte: Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Ceará (2016)



Captar água diretamente dos reservatórios, como concebido no projeto, garante maior controle dos usos da água, permitindo uma gestão mais eficiente e assegurando os usos prioritários. Desse modo, além de reduzir o risco de desabastecimento, o projeto promove maior equidade na gestão da água, já que toda cidade terá acesso à mesma garantia de abastecimento. Além disso, o transporte da água por meio de adutoras reduz a perda em trânsito, tanto no que diz respeito às perdas por infiltração ao longo do curso d'água natural, quanto, em menor escala, às perdas por evaporação. Tal vantagem representa um ganho de eficiência na preservação dos recursos hídricos do estado. Nas palavras do Secretário de Recursos Hídricos, Francisco Teixeira (2015):

Precisamos conduzir nossa água dentro de tubos, reduzindo ao máximo o trânsito dessa água nos leitos de rios, onde as perdas são muito grandes. [...] No futuro, não podemos nos dar ao luxo de termos cidades que dependam, no seu abastecimento, de captação feita a fio d'água no leito de rios perenizados. Todas essas cidades terão de ter captações feitas nos espelhos d'água dos reservatórios por meio de adutoras.(informação verbal)<sup>1</sup>

Além de promover melhoria na gestão do montante de água disponível, o projeto tem expectativa de melhorar a qualidade da água ofertada. Como, pelo projeto, a captação de água é limitada a alguns reservatórios, detém-se maior controle do lançamento de carga orgânica sobre mananciais que abastecem as populações, limitando o processo de eutrofização nos mesmos. Além disso, um hidrossistema mais concentrado permite maior controle tecnológico da operação das Estações de Tratamento de Água.

Enumeram-se, assim, as principais contribuições do Projeto Malha d'Água para o ganho de eficiência da gestão dos recursos hídricos do estado:

- a) redução das perdas em trânsito;
- b) maior garantia de abastecimento;
- c) maior equidade na disponibilidade de água para as populações;
- d) controle do lançamento de carga orgânica e da eutrofização dos mananciais;
- e) maior controle operativo das Estações de Tratamento de Água.

Apesar das inúmeras melhorias que o Malha d'Água representa, o projeto traz consigo alguns desafios. O primeiro deles é a maior complexidade operativa da infraestrutura

---

<sup>1</sup>Trecho da fala de Francisco Teixeira durante evento realizado no dia 29 de dezembro de 2015 no auditório da Companhia de Gestão de Recursos Hídricos, transcrito na 4ª edição do Boletim Gestão da Águas (CEARÁ, 2016)

hidráulica concebida. Sem uma operação adequada dos sistemas adutores e dos reservatórios mananciais o projeto deixa de cumprir sua finalidade, ressaltando a importância da mesma.

Um segundo desafio a ser enfrentado é o provável aumento do custo da água, que deve ocorrer em função do elevado investimento na implantação da infraestrutura projetada e na operação da mesma. Apesar de não diminuírem o impacto positivo que o projeto representa na gestão dos recursos hídricos do estado, é necessário avaliar a melhor estratégia para enfrentar tais desafios.

## 1.2 Questão Motivadora

A viabilidade do Projeto Malha d'Água depende intrinsecamente de sua segurança hídrica. Em outras palavras, faz-se necessário avaliar, para cada sistema adutor, se o manancial adotado, sujeito ao regime fluviométrico local, possibilita, com risco admissível, o atendimento das demandas hídricas que possam ser a ele atribuídas. Desse modo, a principal pergunta a qual esta monografia pretende dar resposta é:

### ❖ O Projeto Malha d'Água é viável do ponto de vista hídrico?

Tendo em mente a aleatoriedade do clima, o atendimento de uma demanda hídrica está sempre associado a um risco, já que, em razão das variações climáticas, não se pode garantir, na totalidade do tempo, o atendimento da demanda. Define-se, assim, como risco admissível, o risco de desabastecimento ao qual a sociedade admite estar sujeita em troca da captação de certo volume de água para suas demandas. Desse modo, a avaliação da sustentabilidade hídrica do Projeto Malha d'Água encontra-se entre dois questionamentos secundários:

- *Qual vazão máxima de retirada pode ser tomada, dado um risco máximo admissível?*
- *Qual o risco associado a uma determinada vazão de retirada pretendida?*

Levados em conta os múltiplos usos da água, com finalidades variadas e diferentes níveis de prioridade, é natural admitirem-se riscos diferentes de acordo com o uso, surgindo, portanto, a necessidade de avaliar a relação entre vazão e risco para cada um dos usos previstos, o que pode ser traduzido no caso do Projeto Malha d'Água nas questões secundárias:

- *Os mananciais adotados asseguram com risco admissível a demanda de abastecimento humano a eles vinculada?*
- *Qual vazão para outros fins pode ser assegurada, definido um risco admissível?*

### 1.3 Objetivos

Tendo em vista a continuidade do projeto idealizado pela Secretaria de Recursos Hídricos, foi fixado como objetivo geral do referido trabalho **avaliar a sustentabilidade hídrica do Projeto Malha d'Água**.

Tal propósito foi subdividido nos seguintes objetivos específicos:

- a) Verificar se os sistemas adutores, definidos em projeto, asseguram, com um risco máximo admissível, o abastecimento das populações a eles vinculadas, classificando os mananciais de acordo com sua eficiência ao atender à demanda doméstica;
- b) Avaliar, para os sistemas capazes de assegurar usos além do abastecimento humano, a vazão máxima para os outros usos, estando fixado um risco admissível.

### 1.4 Escopo do trabalho

Nesse trabalho, a sustentabilidade hídrica é avaliada do ponto de vista quantitativo da disponibilidade de água. Apesar de sua relevância, a avaliação da qualidade da água não faz parte do escopo desse trabalho.

O caráter prognóstico do conceito de sustentabilidade está presente na análise quando consideradas a evolução da demanda, projetada para o ano de 2041, e a infraestrutura prevista. Não é considerada, no entanto, a evolução dos padrões climáticos e de uso do solo que podem ter efeitos diretos sobre os resultados da análise.

Em função da disponibilidade de dados, não foram incluídos no estudo os sistemas adutores cujos reservatórios de captação ainda não foram construídos, como é o caso do açude Lontras, ou que tenham sido construídos após o ano de 2011, como é o caso dos açudes Figueiredo, Fronteiras, Gameleira, Missi e Taquara. Em ambos os casos não há dados de vazões afluentes para os reservatórios.

Ficam igualmente excluídos da análise os sistemas adutores que integram o Sistema Jaguaribe-Metropolitano, bem como os sistemas abastecidos pelo Cinturão das Águas. Tais sistemas adutores apresentam mananciais conectados entre si e suprem demandas hídricas singulares a serem consideradas. Além disso, tais sistemas devem receber aporte advindo da transposição do Rio São Francisco. Tais peculiaridades impõem maior

complexidade à análise desses sistemas, que, diferentemente dos outros, não é facilmente replicável.

Na Figura 2 é apresentado mapa do estado do Ceará com os sistemas adutores analisados, bem como os sistemas deixados a parte.

A Tabela 2 apresenta os 13 sistemas adutores contemplados nesse estudo com os respectivos mananciais.

Tabela 2 - Sistemas adutores analisados

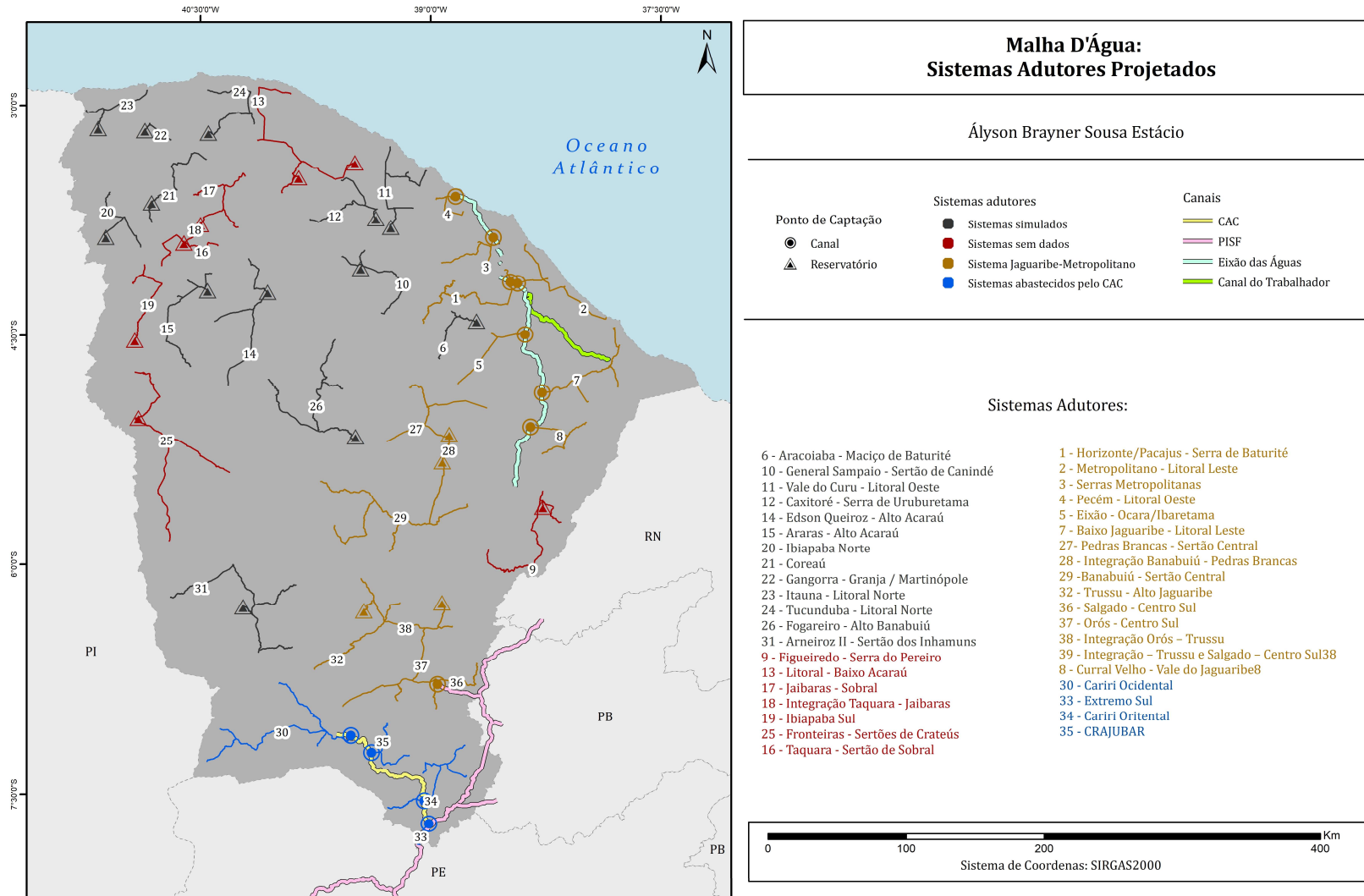
<i>Sistema Adutor</i>	<i>Manancial</i>
Aracoiaba - Maciço de Baturité	Aç. Aracoiaba
Araras - Alto Acaraú	Aç. Araras
Arneiroz II - Sertão dos Inhamuns	Aç. Arneiroz II
Caxitoré - Serra de Uruburetama	Aç. Caxitoré
Coreaú	Aç. Angicos
Edson Queiroz - Alto Acaraú	Aç. Edson Queiroz
Fogareiro - Alto Banabuiú	Aç. Fogareiro
Gangorra - Granja / Martinópolis	Aç. Gangorra
General Sampaio - Sertão de Canindé	Aç. General Sampaio
Ibiapaba Norte	Aç. Jaburu I
Itaúna - Litoral Norte	Aç. Itaúna
Tucunduba - Litoral Norte	Aç. Tucunduba
Vale do Curu - Litoral Oeste	Aç. Pentecoste

Fonte: Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Ceará 2016

## 1.5 Estrutura da monografia

Esta monografia conta com seis seções incluindo esta seção introdutória. Na seção dois, apresenta-se uma revisão dos temas e conceitos correlatos a esse estudo. Na seção três é apresentada a metodologia adotada, bem como a ferramenta computacional utilizada e os dados de entrada das simulações realizadas. Em seguida, na seção quatro são apresentados os resultados e uma análise dos mesmos. Na seção cinco são feitas observações acerca das escolhas metodológicas e suas consequências sobre os resultados encontrados, lançando-se mão de recomendações para trabalhos futuros. Por fim, na seção seis são apresentadas as conclusões que podem ser retiradas do estudo realizado.

Figura 2- Sistemas adutores analisados e sistemas adutores não contemplados no estudo



Fonte: O autor (2018)

## 2 REVISÃO

Nos tópicos a seguir é apresentada uma revisão dos temas relevantes a este trabalho, colocando-se em evidência os conceitos e análises correlatas encontradas na literatura e desenvolvidas em trabalhos anteriores.

### 2.1 A questão hídrica no Ceará

A seca e suas consequências sociais e econômicas ocupam posição central no processo histórico de formação e desenvolvimento do estado do Ceará. As desigualdades sociais e a exploração dos menos favorecidos frequentemente intensificam os efeitos da escassez hídrica, que tem por origem as condições naturais do clima e da geomorfologia do estado.

Campos (2006) explica que as chuvas sobre o território cearense são mal distribuídas no ano, concentrando-se quase que totalmente no primeiro semestre. A irregularidade das precipitações é acompanhada por alta taxa de evaporação que contribui para um balanço hídrico desfavorável. Tal conjuntura climática, associada à baixa permeabilidade dos solos cearenses dificulta a formação de rios perenes.

A condição de escassez hídrica, aliada à pressão da demanda de água para o consumo humano e para as atividades produtivas, põe em evidência a relevância de projetos que, como o Malha d'Água, promovam maior eficiência na gestão do uso da água no estado, permitindo o desenvolvimento sustentável do mesmo.

O Malha d'Água não é, no entanto, pioneiro no combate aos efeitos da estiagem no Ceará. De acordo com, Francisco Teixeira (2014):

É incontestável o histórico de investimentos em infraestrutura hídrica no Ceará. Ao longo de décadas, a parceria entre União e governo estadual conseguiu dotar o estado de uma ampla rede de empreendimentos que seriam suficientes para atender os quase 9 milhões de habitantes, se não fosse a vulnerabilidade geo-ambiental da região.

A nível regional, Campos (2006) afirma que “o processo [de Política de águas no Nordeste] iniciou-se nos primeiros anos do século XX, com a política de construção de açudes e irrigação conduzida pelo Departamento Nacional de Obras Contra as Secas (DNOCS).”

Elias e Pequeno (2014) observam, ainda a nível regional, intensificação desse processo nas últimas décadas, destacando:

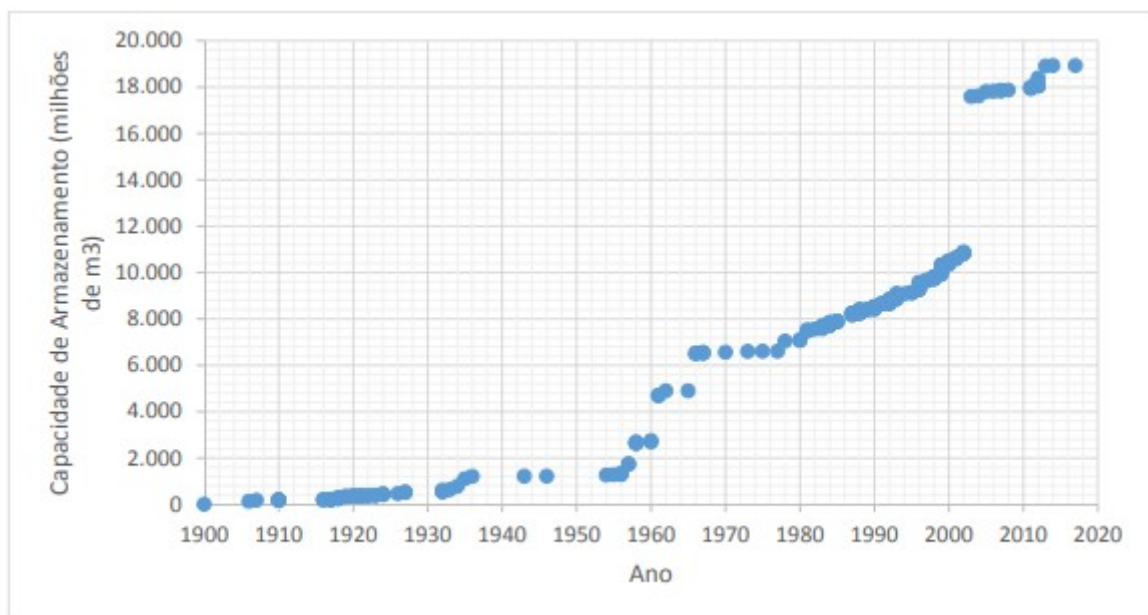
[...] a difusão da infraestrutura hídrica, com grande expansão dos sistemas técnicos e normativos inerentes às novas formas de gestão dos recursos hídricos: construção de adutoras, canais, barragens, irrigação, transposição de bacias e implantação de comitês de bacias hidrográficas, etc.

No estado do Ceará, o desenvolvimento de infraestrutura de combate ao efeitos a seca se materializou numa política de açudagem. A capacidade atual de armazenamento do estado é de 18,9 bilhões de metros cúbicos, com os cinco maiores reservatórios Castanhão (6,7 bilhões de  $m^3$ ), Orós (1,9 bilhões de  $m^3$ ), Banabuiú (1,6 bilhões de  $m^3$ ), Araras (0,89 bilhões de  $m^3$ ) e Figueiredo (0,52 bilhões de  $m^3$ ), representando 61% da capacidade (SOUZA FILHO, 2018).

A evolução temporal da capacidade de armazenamento é apresentada na Figura 3, onde pode ser observado aumento significativo da capacidade de estoque em dois períodos:

- a) após a seca de 1958 no Governo Juscelino onde foram construídos os reservatórios: Ararás (1958), Orós (1961), parcialmente Banabuiú (1966);
- b) no período de 1985- 2015 em função da construção do Castanhão (2003) e Figueiredo (2013) construído pelo DNOCS e o programa de açudagem regional do Governo do Estado nos programas PROURB (15 reservatórios) e PROGERH (10 reservatórios).

Figura 3 – Evolução temporal da capacidade de armazenamento de águas superficiais do Ceará



Fonte : SOUZA FILHO (2018)



Com a consolidação de infraestrutura e a evolução dos modelos de gestão dos recursos hídricos, o Ceará tomou lugar de destaque a nível nacional por seu pioneirismo, como destaca Campos (2006):

A partir da década de 1980, iniciou-se uma fase [...] de gestão de água inserida no contexto do desenvolvimento sustentável. O Estado do Ceará foi pioneiro nessa nova política, criando o Sistema Integrado de Gestão de Recursos Hídricos (SIGERH) e a Companhia de Gestão de Recursos Hídricos (COGERH).

Apesar dos avanços na infraestrutura e na gestão, o regime climático local continua a impor ao Ceará condições hídricas adversas, como tem sido evidenciado pelo longo período de chuvas abaixo da média observado desde 2012. A questão hídrica mantém, assim, posição de importância estratégica para o estado.

## 2.2 Sustentabilidade e segurança hídrica

A implantação de infraestrutura hídrica demanda estudos prévios de viabilidade técnica e econômica, além de análise dos impactos sociais e ambientais da intervenção.

Um dos aspectos mais importantes no tocante à viabilidade técnica de um projeto de infraestrutura hídrica é a sua sustentabilidade hídrica, sem a qual o projeto deixa de cumprir sua finalidade.

Segundo Ribeiro e Pizzo (2011):

A sustentabilidade hídrica implica [...] em se manter um equilíbrio dinâmico entre a oferta e a demanda por água, de modo que os mananciais – superficiais e/ou subterrâneos – sejam utilizados a taxas iguais ou inferiores à sua capacidade de regeneração.

Lanna (2002) comunica com o conceito trazido por Ribeiro e Silva Pizzo (2011), aproximando a sustentabilidade hídrica do que seria o objetivo da Engenharia de Recursos Hídricos, quando afirma que tal ramo da engenharia “visa promover a alteração dos padrões quantitativos e qualitativos das disponibilidades de água de forma a adequá-los aos padrões quantitativos e qualitativos das demandas hídricas”.

Loucks (1997), por sua vez, baseando-se nos princípios da Brandland Commission (WCED, 1987), define um hidrossistema sustentável como sendo “um sistema de recursos hídricos concebido e gerenciado para contribuir integralmente com os objetivos da sociedade, na atualidade e no futuro, assegurando a integridade ecológica, ambiental e hidrológica.”

A sustentabilidade do hidrossistema está fortemente ligada à sua eficiência em promover maior segurança hídrica. Bigas (2013), baseado em documentos da UNESCO (UNESCO-IHP, 2012) define a segurança hídrica como sendo a capacidade de:

Assegurar o acesso sustentável à água de qualidade, em quantidade adequada à manutenção dos meios de vida, do bem-estar humano e do desenvolvimento socioeconômico; garantir proteção contra a poluição hídrica e desastres relacionados à água; preservar os ecossistemas em um clima de paz e estabilidade política.

Nesse trabalho, a sustentabilidade é entendida como a eficiência, do ponto de vista da segurança e do baixo risco hídrico, com que a infraestrutura projetada é capaz de atender, numa perspectiva futura, à demanda a ela atribuída.

### **2.3 Aleatoriedade na Hidrologia e risco de desabastecimento**

A maioria dos eventos hidrológicos naturais, tais como as precipitações, a evaporação ou as variações de nível freático, configuram-se como processos estocásticos, conduzidos pela aleatoriedade. Desse modo, a correta compreensão da Hidrologia, bem como a aplicação da mesma na manutenção dos recursos hídricos, passa obrigatoriamente pelo uso de métodos probabilísticos (YEVJEVICH, 1971).

Em razão da aleatoriedade dos eventos hidrológicos, a garantia de atendimento de uma demanda hídrica não pode ser tratada de maneira determinística, já que a mesma não pode ser assegurada na totalidade do tempo, havendo sempre um risco de desabastecimento associado. Desse modo, o dimensionamento de obras de infraestrutura hídrica passa pela escolha de uma probabilidade de falha admissível.

O risco associado à ocorrência de um evento caracteriza-se não apenas pela probabilidade de ocorrência de tal evento como também pela gravidade do mesmo (BEKMAN et COSTA NETO, 2009). Assim, a escolha da probabilidade de falha admissível de determinada infraestrutura hídrica deve estar condicionada à gravidade do evento de desabastecimento (COLLISCHONN, 2013).

Hashimoto et al (1982) apresenta o conceito de risco como sendo a probabilidade de ocorrência da falha. Para Hashimoto et al (1982), a severidade de um evento hidrológico extremo pode ser medida por outros critérios, tais como a resiliência e a vulnerabilidade.

Nesse trabalho, o risco será avaliado em função das probabilidades de ocorrência de eventos de falha. Ressalta-se, no entanto, que a gravidade do evento de falha está imbutida na escolha da admissibilidade do risco.

## 2.4 Falha e garantia de abastecimento

No caso da operação de um reservatório, um evento de falha é observado, por exemplo, quando, em razão do esvaziamento do reservatório, a vazão que pode ser retirada não alcança o valor pré-determinado, ou o valor de demanda, provocando uma situação de desabastecimento.

Nesse sentido, Zolghadr-Asli et al (2017) considera categorizar o estado de um sistema de recursos hídricos de acordo com o atendimento da demanda. Se, em um período (mês ou ano)  $t$  (com  $t = 1, \dots, T$ ), o montante de água que pode ser ofertado é capaz de suprir a demanda, o sistema se encontrará no estado 1 (de abastecimento), caso contrário o sistema se encontrará no estado 0 (de falha).

Outros eventos de falha podem ser considerados numa análise de risco. Pode-se considerar como evento de falha, por exemplo, o esvaziamento de um reservatório abaixo de um determinado volume de armazenamento.

Dada uma série contínua suficientemente longa de ocorrência de eventos, a frequência de falha é caracterizada pela proporção de eventos de falha na série. A probabilidade de falha pode ser então aproximada pela frequência de falha num período observado ou simulado. O complementar da probabilidade de falha é comumente chamado de garantia, representando o percentual das vezes em que a demanda hídrica é atendida.

Segundo Loucks (1997), a avaliação da garantia pode ser feita por meio de uma simulação do sistema de recursos hídricos analisado, considerando um regime de vazões afluentes que acredita-se representativo do regime de vazões futuro. Simulado o sistema, a garantia poderia ser calculada como sendo a razão entre o número de períodos simulados em que não ocorre falha e o número total de períodos simulados.

Assim definidos os conceitos de probabilidade de falha e de garantia, tais parâmetros poderiam ser calculados pelas Equações 1 e 2:

$$\textit{Frequência de Falha} = \frac{\textit{nº de meses que representam falha}}{\textit{nº de meses observados ou simulados}} \quad (1)$$

$$\textit{Garantia} = 1 - \textit{Probabilidade de Falha} \approx 1 - \textit{Frequência de Falha} \quad (2)$$

## 2.5 Simulação de mananciais

Nas simulações de reservatórios reproduz-se o balanço hídrico nos mesmos, tornando possível avaliar a evolução do nível de armazenamento bem como contabilizar a ocorrência de eventos de desabastecimento.

A reprodução dos balanços hídricos demanda informações de natureza variada, desde o regime de vazões afluentes aos reservatórios, a evaporação e precipitação sobre os lagos artificiais, até a topografia da bacia hidráulica e o regime de operação adotado.

De maneira geral, o uso de simulação computacional é bastante vantajoso na análise de sistemas. Segundo Gavira (2003) tal método permite:

experimentalmente regras de decisão alternativas dentro dos limites de um laboratório severamente controlado, sem interrupções das operações do sistema real. Outra grande vantagem observada refere-se à capacidade do modelo de simulação de comprimir o tempo e o espaço, permitindo a tomadores de decisão conhecer, em pouco tempo, as consequências de longo prazo concernentes às suas ações e ao sistema como um todo.

De acordo com Albertin et al (2006), “modelos de simulação são bem aceitos na área de planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos e são usados para dar a resposta detalhada do sistema sujeito a diversas condições.”.

### 3 METODOLOGIA

A metodologia definida para este trabalho debruça-se sobre a análise da relação entre as vazões que se pretende assegurar e o risco de desabastecimento associado a tais vazões. A avaliação de tal relação pode ser realizada por meio de simulações das cascatas de reservatórios que abastecem os sistemas adutores.

Desse modo, faz-se necessário definir uma metodologia de simulação das cascatas, que permita reproduzir, em certas condições, os balanços hídricos nos reservatórios e o impacto da operação dos reservatórios a montante sobre os reservatórios a jusante. Além disso, deve-se definir uma metodologia de análise que estabeleça as condições nas quais as simulações devem ser realizadas para se obterem os resultados almejados, além de serem definidos os critérios para a interpretação dos resultados.

Nesta seção são apresentados os métodos de simulação e de análise. Antes disso são apresentados igualmente a ferramenta computacional utilizada, os dados utilizados nas simulações, além de uma breve discussão sobre uma hipótese básica necessária à validade da metodologia.

#### 3.1 Ferramenta computacional

O pré-processamento dos dados, as simulações de operação das cascatas e a geração de resultados foram realizados no programa computacional R (R CORE TEAM, 2013).

R é um ambiente de análise estatística e representação gráfica, programável em linguagem de mesmo nome. Este software de análise de dados dispõe de funções que integram uma ampla variedade de técnicas estatísticas e gráficas disponíveis ao usuário.

A ferramenta computacional utilizada apresenta como diferencial a versatilidade e qualidade das funções gráficas, com uma cuidadosa concepção das configurações básicas aliada a uma grande liberdade de aperfeiçoamento e detalhamento.

O R é um software livre e suas funções são facilmente encontradas em código aberto. Além disso, pode ser compilado e executado nos vários sistemas operacionais (Windows, Linux, MacOS, FreeBSD).

Para a leitura e armazenamento de resultados foram utilizadas as bibliotecas XLConnect e readxl. A plotagem de gráficos foi realizada com a ajuda da biblioteca ggplot2.

Para a otimização da operação utilizou-se o algoritmo desenvolvido e disponibilizado em setembro de 2015 por Paolo Pellizzari: a função `constrOptimNL`, baseada na função `constrOptim`, que permite resolver problemas de otimização com restrições não lineares pelo método de Nelder-Mead.

As rotinas de cálculo que materializam a aplicação da metodologia estão apresentadas no APÊNDICE I

### 3.2 Dados de entrada

Os dados utilizados para a implementação das simulações foram retirados da relação, atualizada no ano de 2011, dos reservatórios existentes no território cearense, com suas respectivas características, incluindo as relações montante-jusante entre os reservatórios em cascata COGERH (CEARÁ, 2013).

Ressalta-se a necessidade de uso de tal lista para se determinarem os reservatórios a montante dos reservatórios mananciais de projeto, bem como suas características.

Para cada um dos açudes, são utilizados dados dados de:

- a) Capacidade máxima de armazenamento;
- b) Série de pontos ordenados do tipo (Área, Volume), definindo a topografia da bacia hidráulica;
- c) Evaporação potencial líquida sobre o lago em valores médios para cada um dos 12 meses do ano; e
- d) Histórico de vazões afluentes da bacia incremental.

O dados de evaporação provêm do banco de dados do INMET. Os demais dados foram disponibilizados pela COGERH, com o histórico de vazões incrementais, proveniente de estudo de regionalização de parâmetros SMAP, contaando com até 100 anos de dados (1912 – 2012) podendo haver reservatórios com série de dados mais curta. (CEARÁ, 2013).

Outro dado de entrada das simulações é a demanda hídrica de abastecimento humano, calculada para cada sistema adutor, a partir da população de projeto (ano 2041) a ele vinculada e do consumo *per capita* local. Tais demandas foram calculadas em trabalhos anteriores, quando da idealização do Malha d'Água, tendo sido fornecidas pela Secretaria de Recursos Hídricos (SRH).

A origem dos dados está resumida na Tabela 3

Tabela 3 – Aquisição e procedência dos dados de entrada das simulações

<i>Dados</i>	<i>Fonte</i>
Capacidade máxima de armazenamento	COGERH
Topografia da bacia hidráulica	COGERH
Evaporação potencial líquida mensal	INMET
Histórico de vazões afluentes	COGERH
Demanda hídrica de abastecimento humano	SRH

Fonte: O Autor

Dentre os 13 reservatórios mananciais de projeto analisados, seis apresentam reservatórios a montante. São eles os açudes: Angicos, Araras, Arneiroz II, Caxitoré, Fogareiro e Pentecostes. As cascatas de reservatórios desses seis mananciais estão representadas no ANEXO B.

As ordens de afluência dos reservatórios em cascata e o período com dados de vazão afluente de cada reservatório podem ser consultados no ANEXO C

Como a análise dos reservatórios em cascata depende da simultaneidade dos dados de vazão entre os mesmos, o período de análise é condicionado pelo reservatório com menor série simultânea.

A Tabela 4 apresenta os períodos máximos de dados disponíveis para cada manancial, considerando a simultaneidade de dados nos casos de reservatórios em cascata.

Tabela 4 – Disponibilidade de dados de vazão incremental afluente

<i>Manancial</i>	<i>Condição</i>	<i>Período com dados (simultâneos)</i>	<i>nº de anos com dados</i>
Aç. Gangorra	isolado	fev 1961 – dez 2012	51 anos
Aç. Aracoiaba	isolado	out 1960 – dez 2012	52 anos
Aç. Arneiroz II	em cascata	out 1960 – dez 2012	52 anos
Aç. Pentecoste	em cascata	jan 1934 – dez 2012	79 anos
Aç. Fogareiro	em cascata	jan 1928 – dez 2012	85 anos
Aç. Araras	em cascata	fev 1919 – dez 2012	93 anos
Aç. Edson Queiroz	isolado	mai 1912 – dez 2012	99 anos
Aç. Caxitoré	em cascata	jan 1912 – dez 2012	100 anos
Aç. Angicos	em cascata	jan 1912 – dez 2012	100 anos
Aç. General Sampaio	isolado	jan 1912 – dez 2012	100 anos
Aç. Jaburu I	isolado	jan 1912 – dez 2012	100 anos
Aç. Itaúna	isolado	jan 1912 – dez 2012	100 anos
Aç. Tucunduba	isolado	jan 1912 – dez 2012	100 anos

Fonte: O Autor

### 3.3 Hipótese básica

A análise do risco de desabastecimento, cerne da metodologia adotada, considera:

- *Hipótese básica:* A série histórica de vazões incrementais afluentes, de cada reservatório, é representativa do regime de vazão local atual e futuro.

Desse modo, para cada manancial, toma-se por tempo de simulação a série histórica simultânea de vazões. Os parâmetros de avaliação do risco são, assim, calculados como as frações do tempo em que, ao longo do período simulado, ocorre algum evento de falha de abastecimento ou baixa de estoque, por exemplo.

Apesar de ser uma hipótese comum nos estudos que envolvem simulação de reservatórios, tal hipótese básica deve ser relativizada não apenas em função da confiabilidade dos dados de vazão afluente, como também da representatividade estatística do histórico de dados em relação ao regime futuro.

### 3.4 Metodologia de simulação

A simulação das cascatas de reservatórios procura reproduzir a evolução do armazenamento em cada um dos açudes caso se repetisse a série histórica de vazões afluentes e considerando um regime de operação pré-definido. A simulação é baseada no princípio de conservação de massa, que se materializa nas duas etapas recursivas da simulação:

- a) Balanço hídrico dentro do reservatório; e
- b) Contribuição dos reservatórios a montante para os reservatórios a jusante.

Tais etapas são apresentadas a seguir, juntamente com as hipóteses sobre as contribuições dos reservatórios a montante.

#### 3.4.1 *Hipóteses sobre as contribuições dos reservatórios a montante*

As simulações levaram em conta as duas hipóteses a seguir:

- *Hipótese 1:* Os reservatórios a montante do reservatório definido como manancial são operados com retirada correspondente à garantia de 90%.



- *Hipótese 2:* Para os reservatórios a montante do reservatório definido como manancial, a vazão retirada é totalmente consumida antes de atingir o reservatório a jusante, que passa a receber do reservatórios a montante apenas os vertimentos.

Tais hipóteses permitem definir a operação dos reservatórios a montante do reservatório manancial, o que é necessário para se avaliar esse último. Em outras palavras, definida a retirada nos reservatórios a montante, pode-se analisar a ocorrência de vertimentos, que são convertidos em afluência para o reservatório imediatamente a jusante.

Está implícito nas hipóteses acima que os reservatórios a montante dos reservatórios mananciais são explorados para usos múltiplos, cabendo o abastecimento das populações apenas aos reservatórios mananciais, que podem em alguns casos abastecer outros usos.

No APÊNDICE II é discutido o impacto da adoção da *Hipótese 1*.

### 3.4.2 *Balanco hídrico dentro do reservatório*

O balanço hídrico em um reservatório pode ser expresso pela Equação 3:

$$V_i = V_{i-1} + A_i - I_i - R_i - E_i - \text{Vert}_i \quad (3)$$

Onde :

$V_i$  é o volume armazenado no reservatório ao final do mês  $i$ ;

$V_{i-1}$  é o volume armazenado no reservatório ao final do mês  $i-1$  (ou início do mês  $i$ );

$A_i$  é o volume afluente ao reservatório durante o mês  $i$ ;

$I_i$  é o volume perdido pelo reservatório por infiltração na bacia hidráulica durante o mês  $i$ ;

$R_i$  é o volume retirado (defluência controlada) do reservatório durante o mês  $i$ ;

$E_i$  é o volume evaporado líquido (compensadas as precipitações sobre o lago) durante o mês  $i$ ; e

$\text{Vert}_i$  é o volume vertido durante o mês  $i$ .

Da Equação 3 infere-se que, conhecidas as afluências, perdas por infiltração, retiradas, volumes evaporados e vertidos de cada mês, pode-se calcular a evolução do armazenamento no reservatório ao longo dos meses, bastando conhecer o volume armazenado no início do período simulado.

Nas simulações realizadas, os reservatórios foram inicializados a 50% do volume útil, o que corresponde a 50% da capacidade de armazenamento do reservatório (volume máximo), já que, para os reservatórios em questão foi admitido volume mínimo de armazenamento igual a zero.

A afluência ( $A_i$ ) que recarrega os reservatórios recebe contribuição de três parcelas:

- a) da drenagem na bacia incremental do reservatório analisado, valor esse cujo histórico é conhecido;
- b) de parcela das retiradas (defluências controladas) dos reservatórios imediatamente a montante do reservatório analisado; e
- c) do vertimento dos reservatórios imediatamente a montante do reservatório analisado.

Ao contrário da primeira parcela, conhecida *a priori* para o período simulado, a segunda e a terceira parcelas dependem do modo como os reservatórios a montante são operados e dos resultados da simulação dos mesmos. Tal problema pôde ser sanado pela adoção das *Hipóteses 1 e 2*, que definem a segunda parcela igual a zero e permitem a determinação da terceira parcela. Vale ressaltar que, considerando as contribuições dos reservatórios a montante apenas no período úmido (de vertimentos), não se faz necessário considerar as perdas em trânsito devido a infiltração ao longo do curso d'água, já que as mesmas são observadas apenas no período seco.

Ressalta-se ainda que as duas últimas parcelas da afluência listadas acima não existem quando o reservatório analisado não possui outros reservatórios a montante.

O termo de perdas por infiltração ( $I_i$ ) no lago foi desprezado em razão da baixa permeabilidade dos solos cearenses, que faz com que esse termo tenha pequena importância frente aos outros termos.

O volume retirado do reservatório ( $R_i$ ), conhecido como defluência controlada, é definido pela regra de operação do reservatório, sendo função da política de gestão da água adotada e do risco de desabastecimento admitido. A regra de operação deve impor o valor da vazão retirada do reservatório. Quando, no entanto, o armazenamento atinge nível zero, a retirada real pode ser inferior à retirada imposta. Nesse trabalho, são lançadas simulações para vários níveis de retirada imposta a fim de se avaliarem os mananciais, segundo a metodologia de análise.

O vertimento ( $Vert_i$ ) do reservatório é tomado igual a zero ao longo da simulação, admitindo valor diferente apenas quando o balanço hídrico resulta em um volume armazenado maior que a capacidade do reservatório. Nesse caso, o volume armazenado é atualizado para o valor da capacidade e o vertimento é tomado igual ao excedente do volume armazenado. Observa-se que o vertimento é calculado a cada iteração da simulação, sendo, portanto, um dos resultados da mesma.

O volume evaporado ( $E_i$ ) é calculado pelo produto expresso na Equação 4:

$$E = e \times S_{med} \quad (4)$$

Onde :

$E$  é o volume evaporado durante o mês;

$e$  é a lâmina média evaporada líquida sobre o lago para o mês correspondente, sendo dada em unidade de coluna d'água por mês; e

$S_{med}$  é a superfície média do espelho d'água ao longo do mês.

A lâmina média evaporada líquida ( $e$ ) de cada um dos 12 meses do ano é conhecida para cada reservatório.

A superfície do espelho d'água, por sua vez, é função do volume armazenado no reservatório, variando ao longo do mês. A relação superfície x volume, definida pela geometria da bacia hidráulica, foi estimada pelo polinômio do 4º grau que melhor aproxima os pontos ordenados (Área, Volume) conhecidos para o reservatório. Determinada tal relação, torna-se possível, dado um volume, calcular a área correspondente.

A superfície média do espelho d'água ao longo do mês foi aproximada de maneira simplificada pelo seguinte algoritmo:

1. Obtém-se, por meio da relação área x volume, a superfície de espelho d'água correspondente ao volume no início do mês.
2. Determina-se, por meio da equação do balanço hídrico (Equação 3), o volume no final do mês, tomando para o cálculo do volume evaporado a superfície obtida na etapa 1.
3. Obtém-se, por meio da relação área x volume, a superfície de espelho d'água correspondente ao volume no final do mês obtido na etapa 2.
4. A superfície média aproximada do espelho d'água usada na simulação é a média aritmética das superfícies obtidas nas etapas 1 e 3.

Observa-se que, de acordo com a metodologia adotada, para o cálculo sucessivo do balanço hídrico mensal de um reservatório, é necessário conhecer a regra de operação, que define os valores de retirada imposta, bem como a parcela da afluência correspondente ao vertimento dos reservatórios a montante. Todos os outros termos do balanço hídrico são conhecidos *a priori* ou podem ser obtidos como explicitado acima.

### **3.4.3 Contribuição dos reservatórios a montante para os reservatórios a jusante**

Como seis dos reservatórios mananciais apresentam cascata de reservatórios a montante, a simulação dos mesmos depende dos resultados da simulação da cascata como um todo. Tal fato explica-se pela transferência de vertimento entres os reservatórios como discutido anteriormente.

Em razão disso, antes da realizar a simulação propriamente dita é necessário identificar a cascata de reservatórios a montante de cada um dos mananciais. Para tanto, deve-se determinar a ordem de afluência dos reservatórios na cascata, seguindo o algoritmo:

1. Atribui-se ordem 1 para os reservatórios que não possuem reservatório a montante;
2. Para cada um dos demais reservatórios atribui-se ordem  $k+1$ , onde  $k$  é a maior ordem entre todos os reservatórios a montante do mesmo.

A simulação é então lançada para cada reservatório por ordem de afluência, iniciando pelos reservatórios de ordem 1, que, por não possuírem açudes a montante, tem como única parcela de afluência a drenagem da bacia, cujo valor é conhecido. Em seguida operam-se sucessivamente os reservatórios de ordem imediatamente superior. Quando realizadas as simulações dos reservatórios de ordem  $i$ , ficam determinados os vertimentos dos mesmos. Tais vertimentos correspondem à parcela que falta para a determinação das afluências dos reservatórios de ordem  $i+1$ , que podem ser então simulados.

Como definido na *Hipótese 1*, todos os reservatórios, exceto o manancial, são operados para uma garantia de 90%, devendo-se calcular a retirada imposta (Q90) a tais reservatórios.

Assim, torna-se possível simular a séria histórica de cada um dos reservatórios, exceto o manancial, cuja retirada não está definida. Para os reservatórios mananciais, a retirada deve ser avaliada de acordo com os critérios definidos na metodologia de análise.

### 3.5 Metodologia de análise

O cálculo sucessivo dos balanços hídricos permite analisar a evolução do armazenamento nos reservatórios bem como a ocorrência de falhas de abastecimento.

Desse modo, definida uma retirada, a simulação permite obter a garantia de abastecimento. No entanto, em alguns casos deseja-se obter, inversamente, o valor de retirada que resulta numa garantia de abastecimento pré-definida. É o que ocorre, na simulação dos reservatórios a montante do manancial, operados com defluência controlada correspondente a garantia de 90% (também chamada de Q90). Nesse caso, usa-se um algoritmo de busca que, simulando o reservatório reiteradas vezes, permite encontrar a vazão que resulta no valor pré-definido de garantia.

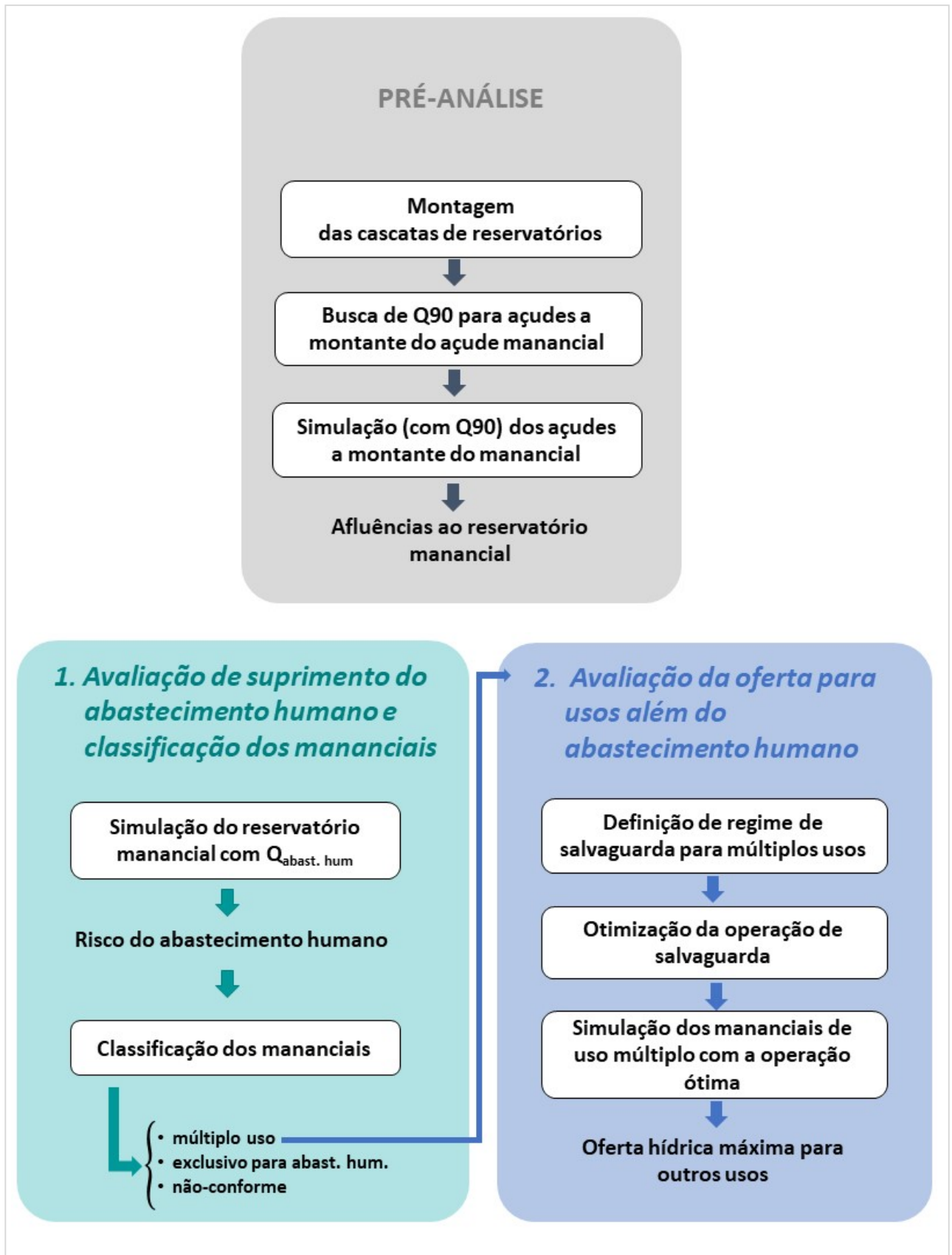
Calculando-se a vazão Q90 dos reservatórios a montante e simulando-se os mesmos, determinam-se as afluências ao reservatório manancial, como explicitado na metodologia de simulação. Após essa etapa, aqui chamada de pré-análise, o reservatório manancial pode ser simulado independentemente dos outros reservatórios, seguindo-se para as etapas de análise propriamente dita.

Inicialmente, simula-se o reservatório manancial impondo como retirada apenas a demanda de abastecimento humano. Avalia-se a partir daí se o manancial é capaz de atender a essa demanda com um risco mínimo admissível, podendo-se classificar o manancial.

Para os mananciais mais eficientes, lança-se nova simulação, tomando vazões de retirada superiores, que atendam o abastecimento humano bem como outros usos. Tal simulação incorpora regra de operação com política de salvaguarda, que toma retiradas diferentes, dependendo do nível de armazenamento no reservatório. Avalia-se assim a relação entre a garantia de abastecimento e a vazão retirada, a depender do regime de salvaguarda adotado. A partir dessa relação procura-se determinar, por meio de uma otimização do regime de salvaguarda, a máxima vazão que pode ser retirada, quando fixado um risco mínimo.

Tal metodologia de análise, aplicada aos reservatórios mananciais, está resumida no fluxograma representado na Figura 4.

Figura 4 – Metodologia de Análise



Fonte: O autor (2018).

Nos tópicos a seguir são detalhados os critérios das duas etapas de análise.

### ***3.5.1 Avaliação de suprimento do abastecimento humano e classificação dos mananciais***

A avaliação do suprimento do abastecimento humano de cada sistema adutor se dá em função da garantia de abastecimento obtida quando simulado o reservatório manancial com uma retirada constante igual à demanda de abastecimento humano.

Por meio de tal avaliação classificam-se o manancial, de acordo com os critérios:

- a) Se a garantia de abastecimento humano calculada for maior ou igual a 98%, o manancial será de uso múltiplo, abastecendo as populações e permitindo outros usos.
- b) Se a garantia de abastecimento humano calculada for maior ou igual a 90% e menor que 98%, o manancial será exclusivo para o abastecimento humano.
- c) Se a garantia de abastecimento humano calculada for inferior a 90% o manancial é considerado não-conforme, devendo-se definir mananciais complementares para o abastecimento das populações vinculadas ao sistema adutor em questão.

Nessa etapa de análise a garantia é representada pela letra G.

Como critério adicional, fica estabelecido que, tomando ainda simulações com valor de retirada imposta igual demanda de abastecimento humano:

- d) mesmo que o manancial se enquadre no caso a) ou b), ele deve apresentar volume inferior a 10% do volume útil em, no máximo, 10% do tempo simulado. Caso contrário, o manancial será considerado não-conforme.

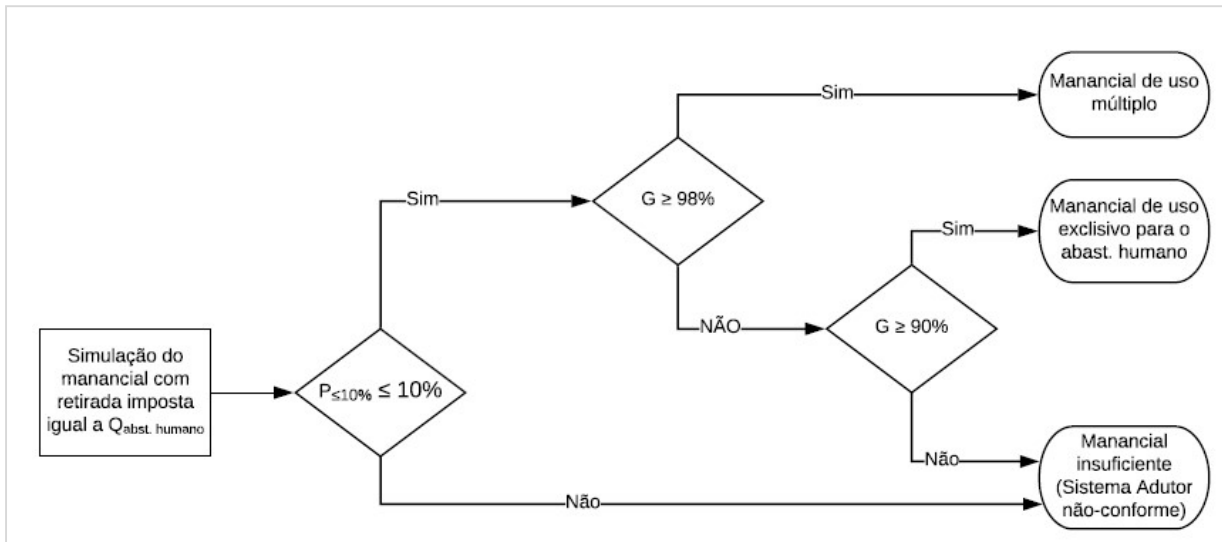
Quando adotado o critério de garantia mínima de 98% para classificar o reservatório como de uso múltiplo, considera-se, implicitamente, que reservatórios que apresentassem valores elevados de garantia no atendimento das populações, poderiam suprir outros usos da água sem prejuízo ao abastecimento humano.

O critério adicional (d) é adotado como forma de minimizar a vulnerabilidade da Hipótese básica (página 30). Sabe-se que a série de vazões pode não ser representativa do regime de aflúncias futuro, podendo ocorrer períodos de escassez mais intensa que os observados na série histórica. Desse modo, os critérios de risco admissível não devem se deter a limitar a ocorrência de desabastecimento. A permanência em volumes de armazenamento baixos, observada na simulação, pode representar em cenários futuros falha do sistema,

devendo, portanto, ser igualmente limitada. No caso, usa-se como indicador a permanência abaixo de 10% do volume útil, aqui representada por  $P_{<10\%}$ .

Os critérios de classificação dos mananciais, descritos acima, podem ser resumidos pelo fluxograma apresentado na Figura 5

Figura 5 – Fluxograma de classificação dos mananciais



Fonte : O autor (2018)

### 3.5.2 Avaliação da oferta para usos além do abastecimento humano

Para os reservatórios mananciais que forem considerados, segundo o critério do tópico anterior, de uso múltiplo, adota-se uma operação mais robusta, incorporando uma política de salvaguarda.

De acordo com a política adotada, define-se, para cada reservatório, um nível  $n$ , como um percentual do volume útil, que divide o reservatório em faixas de operação:

- a) Para níveis de armazenamento igual ou superior a  $n$ , diz-se que o reservatório está na faixa de operação normal.
- b) Para níveis de armazenamento inferior a  $n$ , diz-se que o reservatório está na faixa de operação de restrição.

Ainda de acordo com a política de salvaguarda, o valor de retirada imposta ao reservatório no início de cada mês deverá ser definido em função da faixa de operação na qual o mesmo se encontra.

Quando, no início do mês, o reservatório encontrar-se na faixa normal, determina-se que a retirada mensal imposta deve ser suficiente para suprir o abastecimento humano além



de permitir outros usos. Tal retirada é nomeada vazão total ( $Q_{tot}$ ), que pode ser calculada pela Equação 5:

$$Q_{tot} = Q_{abast. hum}(1+\alpha) \quad (5)$$

Com:

$$Q_{outros} = Q_{abast. hum} \alpha \quad (6)$$

Onde :

$Q_{tot}$  é a demanda total com a qual é operado o reservatório na faixa normal

$Q_{hum}$  é a demanda de projeto para o abastecimento humano;

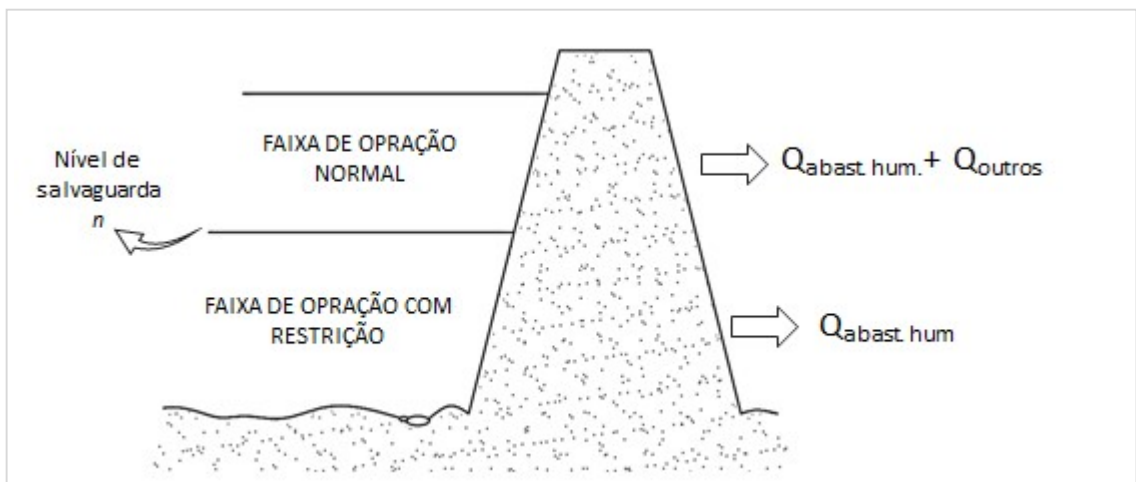
$Q_{outros}$  é a vazão retirada adicional com fins múltiplos;

$\alpha$  é o fator de vazão adicional para os outros usos ( $\alpha > 0$ ).

Quando, por outro lado, o reservatório encontra-se, no início do mês, na faixa de restrição, a retirada mensal é limitada a demanda de abastecimento humano ( $Q_{abast. hum}$ ).

Tal regra de operação esta representada na Figura 6.

Figura 6 - Operação com salvaguarda



Fonte: O autor (2018)

Como observado, a partir da escolha de  $n$  e  $\alpha$  fica estabelecida a regra de operação, ficando definida, no início de cada mês, a retirada. Assim, para a operação com regime de salvaguarda, a simulação e a avaliação do risco estão sujeitas a escolha desses dois parâmetros ( $n$  e  $\alpha$ ).

Como, nesse caso, o reservatório é operado com dois valores de retirada ( $Q_{abast. hum}$  e  $Q_{tot}$ ) a depender do armazenamento no início do mês, observam-se duas garantias a serem avaliadas:

- a)  $G_{\text{abast. hum}}$ , definida como o percentual do tempo na série histórica em que se assegura o suprimento da demanda para abastecimento humano; e
- b)  $G_{\text{tot}}$ , definida como o percentual do tempo na série histórica em que se assegura a vazão total.

De acordo com a regra de operação adotada, o suprimento da demanda de abastecimento humano será assegurado sempre que o armazenamento no reservatório no início do mês for maior que a demanda mensal. Independentemente da faixa de operação na qual o reservatório se encontra, a retirada imposta procura garantir a demanda de abastecimento humano, havendo falha apenas quando do esvaziamento do reservatório.

Já a vazão total só é retirada quando o reservatório encontra-se na faixa normal, de modo que  $G_{\text{tot}}$  corresponde numericamente ao percentual do tempo que o reservatório encontra-se nessa faixa de operação.

De maneira análoga à primeira etapa da análise, inclui-se um parâmetro de avaliação do risco que procura minimizar a vulnerabilidade da Hipótese básica (página 30). Tal parâmetro diz respeito ao percentual do tempo simulado em que o reservatório encontra-se com armazenamento inferior a 10% do volume útil e é expresso por  $P_{<10\%}$ .

Pela simulação do reservatório, dado  $\alpha$  e  $n$  obtém-se  $G_{\text{abast. hum}}$ ,  $G_{\text{tot}}$  e  $P_{<10\%}$ . Em outras palavras, a simulação permite relacionar a vazão total de operação e o nível de salvaguarda ao risco de desabastecimento.

Para se avaliar a máxima vazão a ser retirada, são fixados critérios de risco admissível. Assim, impõe-se:  $G_{\text{abast. hum}} \geq 98\%$ ,  $G_{\text{tot}} \geq 90\%$  e  $P_{<10\%} < 10\%$  e procura-se o nível de salvaguarda  $n$  que maximiza o valor de  $\alpha$  e, conseqüentemente o valor de  $Q_{\text{outros}}$ .

Em termos matemáticos resolve-se o seguinte problema de otimização:

$$\text{máx } \{f(n, \alpha) = \alpha\} \text{ variando } n,$$

Sujeito às restrições:

$$G_{\text{abast. hum}}(n, \alpha) \geq 98\%$$

$$G_{\text{tot}}(n, \alpha) \geq 90\%$$

$$P_{<10\%}(n, \alpha) < 10\%$$

$$0 < \alpha$$

$$0 < n < 1$$

Como resultado, obtém-se a máxima vazão  $Q_{\text{outros, MÁX}}$  que pode ser retirada do reservatório manancial, fixado um risco mínimo admissível. Obtém-se igualmente o nível de

salvaguarda a ser respeitado para que, mesmo retirando  $Q_{\text{outros, MÁX}}$  na faixa de operação normal, sejam assegurados os critérios de risco.

### 3.6 Critério alternativo de análise

Tendo em vista a escolha *ad hoc* dos critérios de risco admissível, propõe-se um critério alternativo de análise.

Na avaliação do suprimento do abastecimento humano, adotou-se uma garantia mínima de 98% para classificar o manancial como de uso múltiplo. Como alternativa, propõe-se considerar como de uso múltiplo apenas os mananciais que possam suprir a demanda de abastecimento humano durante 100% do período simulado, ou seja, apenas os mananciais com garantia de vazão firme.

Define-se vazão firme como sendo a máxima vazão para a qual, no período simulado, não haja falhas de abastecimento, de modo que tal vazão pode ser assegurada em 100% do tempo.

Na avaliação da oferta para outros usos, por sua vez, atualiza-se, na otimização da salvaguarda, o critério  $G_{\text{abast. hum}}(n, \alpha) \geq 98\%$  para  $G_{\text{abast. hum}}(n, \alpha) = 100\%$ .

Todos os outros critérios permaneceriam inalterados.

Vale ressaltar que o conceito de garantia de 100% só faz sentido do ponto de vista numérico, já que em termos reais não se pode garantir o abastecimento em 100% do tempo.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Nessa seção são apresentados os resultados obtidos e as análises dos mesmos. Os resultados obtidos para os critérios alternativos (página 41) são apresentados no APÊNDICE IX, APÊNDICE X e APÊNDICE XI.

### 4.1 Avaliação de suprimento do abastecimento humano e classificação dos mananciais

Simulando os mananciais com retirada imposta igual à demanda de abastecimento humano calculam-se, para cada reservatório, as garantias de abastecimento e o tempo de permanência abaixo de 10% do volume útil, obtendo-se os valores apresentados na Tabela 5.

Tabela 5 – Avaliação do suprimento do abastecimento humano - Critérios de risco

<i>Manancial</i>	<i>Garantia (%)</i>	<i>Permanência abaixo 10% V.U.</i>
Aç. Angicos	Garantia de vazão firme	≈0%
Aç. Aracoiaba	Garantia de vazão firme	0%
Aç. Araras	Garantia de vazão firme	0%
Aç. Arneiroz II	Garantia de vazão firme	0%
Aç. Caxitoré	91%	21%
Aç. Edson Queiroz	Garantia de vazão firme	0%
Aç. Fogareiro	Garantia de vazão firme	0%
Aç. Gangorra	Garantia de vazão firme	0%
Aç. General Sampaio	Garantia de vazão firme	0%
Aç. Itaúna	96%	8%
Aç. Jaburu I	Garantia de vazão firme	0%
Aç. Pentecoste	Garantia de vazão firme	0%
Aç. Tucunduba	Garantia de vazão firme	0%

Fonte: O Autor

Como observado na Tabela 5, onze reservatórios apresentam garantia de vazão firme, o que quer dizer que, para tais açudes, em 100% do período simulado a retirada imposta foi assegurada. Para os açudes Caxitoré e Itaúna as garantias observadas foram de 91% e 96%, respectivamente, o que classificaria esses dois mananciais como de uso exclusivo para o abastecimento humano. No entanto, em razão do alto tempo de permanência do Açude Caxitoré com volume inferior a 10% de armazenamento (21% do tempo), esse manancial é dito não-conforme, recomendando-se uma reavaliação do Sistema Adutor Caxitoré - Serra de Uruburetama.

Observa-se ainda que, exceto os dois açudes mencionados, os reservatórios apresentam armazenamento superior a 10% em praticamente todo o período simulado, revelando a eficiência dos mesmos no abastecimento das populações.

A classificação dos mananciais, a partir dos critérios definidos na metodologia, é apresentada na Tabela 6.

Tabela 6 – Classificação dos mananciais

<i>Manancial</i>	<i>Classificação</i>
Aç. Angicos	Uso múltiplo
Aç. Aracoiaba	Uso múltiplo
Aç. Araras	Uso múltiplo
Aç. Arneiroz II	Uso múltiplo
Aç. Caxitoré	Não-conforme
Aç. Edson Queiroz	Uso múltiplo
Aç. Fogareiro	Uso múltiplo
Aç. Gangorra	Uso múltiplo
Aç. General Sampaio	Uso múltiplo
Aç. Itaúna	Exclusivo para abastecimento humano
Aç. Jaburu I	Uso múltiplo
Aç. Pentecoste	Uso múltiplo
Aç. Tucunduba	Uso múltiplo

Fonte: O Autor

No APÊNDICE III são apresentados para cada manancial os resultados detalhados da simulação, evidenciando:

- a) a evolução do armazenamento do reservatório no fim de cada mês;
- b) a retirada no reservatório ao longo do período simulado; e
- c) os vertimentos mensais no reservatório ao longo do período simulado.

Para uma análise mais robusta dos resultados, construíram-se ainda, para cada manancial:

- a) as curva que relacionam a retirada e a garantia de abastecimento, apresentadas no APÊNDICE IV.
- b) Resumo de vazões características ( $Q_{90}$ ,  $Q_{80}$ ,  $Q_{\text{firme}}$ ), apresentadas no APÊNDICE V
- c) tabela relacionando o nível de armazenamento e tempo de permanência abaixo desse nível, apresentada no APÊNDICE VI.

## 4.2 Avaliação da oferta para usos além do abastecimento humano

A Tabela 7 apresenta, para cada um dos onze mananciais de uso múltiplo, o nível de salvaguarda ótimo ( $n_{ótimo}$ ) e o fator de vazão máximo ( $\alpha_{MÁX}$ ), bem como a vazão adicional máxima correspondente ( $Q_{outros, MÁX}$ ).

Tabela 7 – Operação de salvaguarda ótima

<i>Manancial</i>	$n_{ótimo}$	$\alpha_{MÁX}$	$Q_{outros, MÁX}$ (m <sup>3</sup> /s)
Aç. Angicos	10%	3,3	0,36
Aç. Aracoiaba	10%	3,9	0,68
Aç. Araras	10%	31,9	9,71
Aç. Arneiroz II	6%	2,8	0,64
Aç. Edson Queiroz	10%	10,5	1,79
Aç. Fogareiro	10%	12,7	2,59
Aç. Gangorra	9%	3,3	0,39
Aç. General Sampaio	10%	11,4	3,07
Aç. Jaburu I	10%	2,9	0,85
Aç. Pentecoste	10%	26,4	8,10
Aç. Tucunduba	9%	8,8	1,33

Fonte: O Autor

Observa-se que, com a operação ótima, permite-se a retirada de vazões expressivas para outros usos, chegando a valores de vazão 30 vezes maior que a demanda de abastecimento humano no caso do Sistema Araras - Alto Acaraú, com  $Q_{outros, MÁX}$  de quase 10 m<sup>3</sup>/s.

Observa-se ainda que os níveis de salvaguarda ótimos são iguais ou inferiores a 10%, com menor valor igual a 6% para o Açude Arneiroz II.

A operação ótima obedece aos critérios de risco admissível, materializados nas restrições dos valores de garantia ( $G_{abast. hum}$  e  $G_{tot}$ ) e de permanência abaixo de 10% do volume útil ( $P_{<10\%}$ ), como pode ser observado na Tabela 8.

Tabela 8 – Operação ótima de salvaguarda – Critérios de risco

<i>Manancial</i>	$G_{tot}$	$G_{abast. hum}$	$P_{<10\%}$
Aç. Angicos	90%	≈Garantia de vazão firme	10%
Aç. Aracoiaba	90%	Garantia de vazão firme	10%
Aç. Araras	90%	Garantia de vazão firme	10%
Aç. Arneiroz II	93%	99%	10%
Aç. Edson Queiroz	90%	Garantia de vazão firme	10%
Aç. Fogareiro	90%	Garantia de vazão firme	10%
Aç. Gangorra	90%	Garantia de vazão firme	10%
Aç. General Sampaio	90%	Garantia de vazão firme	10%
Aç. Jaburu I	90%	≈Garantia de vazão firme	10%
Aç. Pentecoste	90%	Garantia de vazão firme	10%
Aç. Tucunduba	90%	98%	10%

Fonte: O Autor

A Tabela 8 evidencia a observância das restrições impostas. Para todos os mananciais alcança-se o limite da restrição sobre  $P_{<10\%}$  ( $P_{<10\%}=10\%$ ) indicando que essa é a condição mais restritiva. Além disso, a restrição sobre  $G_{tot}$  é levada ao limite ( $G_{tot}=90\%$ ) na maioria dos casos.

O fato de os valores encontrados para  $n_{ótimo}$  serem sempre inferiores a 10% pode ser explicado como efeito conjugado das restrições sobre  $G_{tot}$  e  $P_{<10\%}$ . A primeira impõe que o percentual de tempo com volume abaixo de  $n$  seja de no máximo 10% do tempo, enquanto que a segunda impõe que o percentual de tempo com volume abaixo de 10% seja de no máximo 10% do tempo. Assim, se a restrição sobre  $P_{<10\%}$  for levada ao limite, como é o caso, impõe-se implicitamente  $n$  inferior ou igual a 10% do volume útil.

No APÊNDICE VII são apresentados os resultados da simulação dos mananciais com a operação ótima, constando:

- a) a evolução do armazenamento do reservatório no fim de cada mês;
- b) a retirada no reservatório ao longo do período simulado; e
- c) os vertimentos mensais no reservatório ao longo do período simulado.

Apresenta-se no APÊNDICE VIII tabela relacionando o nível de armazenamento e tempo de permanência abaixo desse nível.

## 5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A principal crítica metodológica que pode ser feita em relação a esse trabalho, diz respeito à hipótese básica de que as vazões históricas são representativas do regime de vazões atual e futuro, trazendo consigo o risco climático local. Sabe-se, no entanto, que as vazões históricas podem não ser representativas. As séries temporais utilizadas não incluem por exemplo, o último período de estiagem (2012-2018) ou as tendências de mudanças climáticas. Se a série temporal utilizada na simulação corresponder a um período úmido atípico, o risco de desabastecimento será subestimado pelo estudo. Como as séries de dados de cada manancial possuem tamanhos diferentes e abrangem períodos diferentes, não se pode considerar igual confiabilidade para os resultados de cada um deles.

Uma atualização do banco de dados de vazões afluentes, estenderia o período simulado, incluindo a última estiagem e permitindo a avaliação dos mananciais não analisados por falta de dados de vazão (Lontras, Figueiredo, Fronteiras, Gameleira, Missi e Taquara). Uma solução ainda mais robusta seria a criação de cenários de vazão afluente, que permitiria analisar os reservatórios sobre o mesmo período e sobre condições que melhor representem o risco climático.

Outra crítica que pode ser feita ao trabalho diz respeito à escolha dos critérios de risco utilizados na classificação dos mananciais e na otimização da operação de salvaguarda. Tais critérios foram tomados *ad hoc* e, apesar de terem sido propostos critérios alternativos, acredita-se que a escolha dos mesmos deva ser submetida aos órgãos e instituições públicas responsáveis pela gestão dos recursos hídricos, para que incorporem, na avaliação do risco admissível, a experiência de gestão e a sensibilidade da sociedade ao risco.

Apesar de terem sido calculados os parâmetros ótimos para a regra de salvaguarda, deve-se ressaltar não se tem a pretensão propor a mesma como uma regra a ser operacionalizada, tal metodologia limitando-se a avaliar a disponibilidade de água e permitindo estimar a máxima demanda que pode ser suprida.

Por fim, recomenda-se a extensão de tal estudo aos sistemas adutores do Sistema Jaguaribe-Metropolitano e os sistemas abastecidos pelo Cinturão das Águas. Apesar de demandarem modelagem mais complexa, a avaliação de tais sistemas é fundamental para se completar análise de sustentabilidade hídrica do Projeto Malha d'Água.

A análise dos mananciais dos 13 sistemas adutores mostra que, segundo os critérios de risco admissível, a maior parte dos mananciais (11) mostra-se eficiente na suprimimento da demanda de abastecimento humano, possibilitando ainda o suprimimento de



outras demandas. O reservatório Itaúna, por sua vez, deve ter o uso limitado ao abastecimento humano. Além disso, de acordo com os critérios estabelecidos, o reservatório Caxitoré é considerado não-conforme, recomendando-se a avaliação de mananciais complementares para garantir o abastecimento das populações vinculadas ao Sistema Adutor Caxitoré - Serra de Uruburetama.

Ainda de acordo com as análises, os onze mananciais que permitem uso múltiplo representam oferta hídrica relevante para abastecer os usos além do abastecimento humano, com vazões que variam de 0,4 m<sup>3</sup>/s a 10 m<sup>3</sup>/s.

Conforme a análise realizada, pode-se afirmar que, corrigida a inconformidade do Sistema Adutor Caxitoré - Serra de Uruburetama, o Projeto Malha d'Água é sustentável do ponto de vista hídrico, abastecendo as populações cearenses e permitindo direta e indiretamente uma melhor gestão dos usos da água nos reservatórios do estado.

## REFERÊNCIAS

- ALBERTIN, L. L.; MAUAD, F. F.; DANIEL, L. A. **Uso de Simulação Computacional para Planejamento de um Sistema Hídrico: Estudo de Caso Qualitativo e Quantitativo**, 11, 209–219.2006.
- BIGAS, Harriet. **Water Security and the Global Water Agenda : a UN-Water Analytical Brief**. Hamilton: United Nations University - Institute for Water, Environment and Health, 2013.
- BEKMAN, O. R; COSTA NETO P. L. O. **Análise Estatística da Decisão**, Blucher, 2ed, 2009.
- CEARÁ. Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos (COGERH). **Estudos de regionalização de parâmetros de modelo hidrológico chuva-vazão, para as bacias totais e incrementais dos reservatórios monitorados pela COGERH**. Fortaleza, 2013.
- CEARÁ. Secretaria de Recursos Hídricos do Governo do Estado do Ceará(SRH). **Boletim de Gestão das Águas**. Fortaleza: ed.4. p.3. jan. 2016.
- CAMPOS, Nilson. **A gestão das águas e o desenvolvimento do estado do Ceará: uma perspectiva histórica**. Revista T&C Amazônia, ano IV, n.9, p.25-31, ago.2006.
- COLLISCHONN, W; DORNE, F. **Hidrologia para engenharia e ciências ambientais**. Porto Alegre, 2013.
- ELIAS, Denise.; PEQUENO, Renato. **Reestruturação econômica e nova economia política da urbanização no Ceará**. Revista Mercator. [on-line]. Fortaleza, v. 12, n. 28, p. 95-112, mai./ago. 2013. Disponível:< <http://www.redalyc.org/html/2736/273628671008/> >. Acesso em: 1 mar. 2018.
- GAVIRA, M. de O. **Simulação Computacional como uma ferramenta de aquisição de conhecimento**, 163. 2003
- HASHIMOTO, T; STEDINGER, J.R; LOUCKS, D.P. **Reliability, resiliency, and vulnerability criteria for water resource system performance evaluation**. Water Resources Research, 18(1), 14-20, 1982
- LANNA, A. E. **Análise de Sistemas e Engenharia de Recursos Hídricos**. In: PORTO, Rubem L. L.(Orgs) Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos. 2.ed. ABRH. Porto Alegre–RS: UFRGS, 2002.
- LOUCKS, D.P. **Quantify trends in system sustainability**. Hydrological Science Journal, 42(4), 513-530, 1997
- RIBEIRO, C. R; PIZZO, H. S. **Avaliação da Sustentabilidade Hídrica de Juiz de Fora/MG**. Mercator - Revista de Geografia da UFC – Fortaleza, vol. 10, núm. 21, janeiro-abril, pp. 171-188, 2011

R CORE TEAM, **R: a Language and Environment for Statistical Computing**. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria, 2013

SOUZA FILHO, F. A. **Diagnóstico dos Recursos Hídricos do Estado do Ceará**. Projeto Ceará 2050, 2018.

TEXEIRA, Francisco. **Ceará se destaca em infraestrutura hídrica**. O Povo, Fortaleza, ano 2014, 28 jan. 2014. Disponível em: < <https://www20.opovo.com.br/app/opovo/opinioao/2014/01/28/noticiasjornalopinioao,3197762/ceara-se-destaca-em-infraestrutura-hidrica.shtml> >. Acesso em: 1 mar. 2018.

UNESCO-IHP, 2012. **Strategic Plan of the Eighth Phase of IHP (IHP-VIII, 2014-2021)**. Paris, France, 2012

YEVJEVICH, Vujica. **Probability and Statistics in Hydrology. Water Resources Publications**, Colorado: 224227, 1972.

WCED World Commission on Environment and Development **Our Common Future (The Brundland Report)** Oxford University Press, Oxford, UK, 1987

ZOLGHADR-ASLI, B., BOZORG-HADDAD, O., et LOÁICIGA, H. A. **Stiffness and sensitivity criteria and their application in water resources assessment**. Journal of Hydro-Environment Research, 2017.

**ANEXO A -SISTEMAS ADUTORES DO PROJETO MALHA D'ÁGUA**

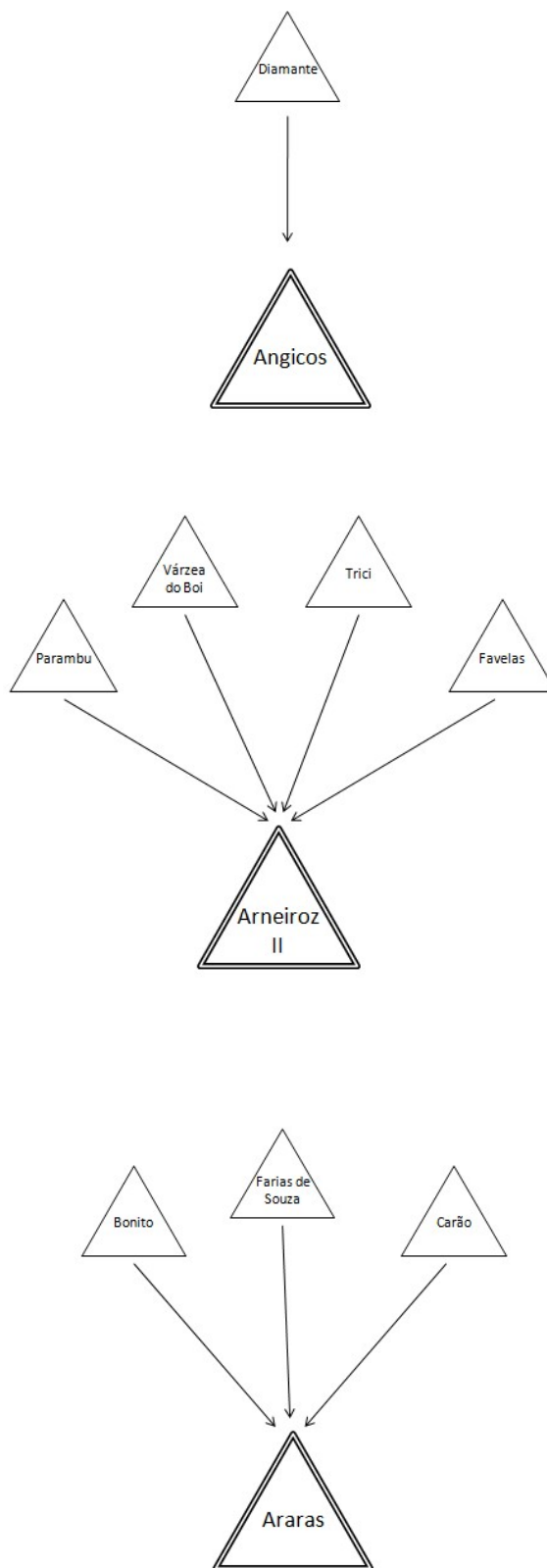
<i>Sistema Adutor</i>	<i>Manancial</i>	<i>Número de Municípios</i>	<i>Municípios</i>	<i>Bacia Hidrográfica</i>
Horizonte/Pacajus - Serra de Baturité	Eixão das Águas Trecho IV	11	Horizonte, Pacajus, Chorozinho, Barreira, Acarape, Pacoti, Redenção, Palmácia, Guaramiranga, Mulungu, Aratuba	Metropolitana
Metropolitano - Litoral Leste	Eixão das Águas Trecho IV	4	Cascavel, Pindoretama, Aquiraz e Beberibe (Sucatinga, Paripueira e Parajuru)	Metropolitana
Serras Metropolitanas	Eixão das Águas Trecho V	3	Pacatuba, Guaiuba e Maranguape (Sapupara, Ladeira Grande, Penedo, Amanari e Itapebussu)	Metropolitana
Pecém - Litoral Oeste	Eixão das Águas Trecho V	2	São Gonçalo do Amarante, Catuana e Guararu (Caucaia)	Metropolitana
Eixão - Ocara/Ibaretama	Eixão das Águas Trecho III	2	Ocara e Ibaretama	Metropolitana
Aracoiaba - Maciço de Baturité	Aç. Aracoiaba	4	Aracoiaba, Baturité, Capistrano e Itapiúna (Caio Prado)	Metropolitana
Baixo Jaguaribe - Litoral Leste	Eixão das Águas Trecho II	6	Russas, Palhano, Jaguaruana, Itaíçaba, Aracati e Fortim	Baixo Jaguaribe
Curral Velho - Vale do Jaguaribe	Eixão das Águas	5	Morada Nova, Limoeiro do Norte, Quixeré, Tabuleiro do Norte e São João do Jaguaribe	Baixo Jaguaribe
Figueiredo - Serra do Pereiro	Aç. Figueiredo	6	Alto Santo, Potiretama, Iracema, Ererê, Pereiro e Jaguaribe	Médio Jaguaribe
General Sampaio	Aç. General	6	Apuiarés, Canindé,	Curu

<i>Sistema Adutor</i>	<i>Manancial</i>	<i>Número de Municípios</i>	<i>Municípios</i>	<i>Bacia Hidrográfica</i>
- Sertão de Canindé	Sampaio		Caridade, General Sampaio, Paramoti, Tejuçuoca	
Vale do Curu - Litoral Oeste	Aç. Pentecoste	6	Croatá (SG do Amarante), Paracuru, Paraipaba, Pentecoste, São Luis do Curu, Trairi	Curu
Caxitoré - Serra de Uruburetama	Aç. Caxitoré	6	Irauçuba, Itapagé, Itapipoca, Tururu, Umirim, Uruburetama	Curu
Litoral - Baixo Acaraú	Aç. Gameleira e Aç. Missi	5	Acaraú, Amontada, Itarema, Miraíma, Morrinhos	Litoral
Edson Queiroz - Alto Acaraú	Aç. Edson Queiroz	4	Santa Quitéria, Hidrolândia, Catunda, Tamboril	Acaraú
Araras - Alto Acaraú	Aç. Araras	6	Varjota, Reriutaba, Pires Ferreira, Ipu, Ipueiras, Nova Russas, Macaraú (Santa Quitéria)	Acaraú
Taquara - Sertão de Sobral	Aç. Taquara	5	Cariré, Groáiras, Mucambo, Pacujá, Graça	Acaraú
Jaibaras - Sobral	Aç. Jaibaras	6	Sobral, Forquilha, Massapê, Meruoca, Alcântaras, Santana do Acaraú	Acaraú
Integração Taquara - Jaibaras*	Aç. Taquara	6	Sobral, Forquilha, Massapê, Meruoca, Alcântaras, Santana do Acaraú	Acaraú
Ibiapaba Sul	Aç. Lontras	4	Croatá, Guaraciaba do Norte, Carnaubal, São Benedito	Ibiapaba
Ibiapaba Norte	Aç. Jaburu I	4	Tianguá, Viçosa do Ceará, Ubajara, Ibiapina	Ibiapaba
Coreaú	Aç. Angicos	4	Coreaú, Moraújo, Uruoca, Senador Sá	Coreaú
Gangorra - Granja / Martinópole	Aç. Gangorra	2	Granja, Martinópole	Coreaú

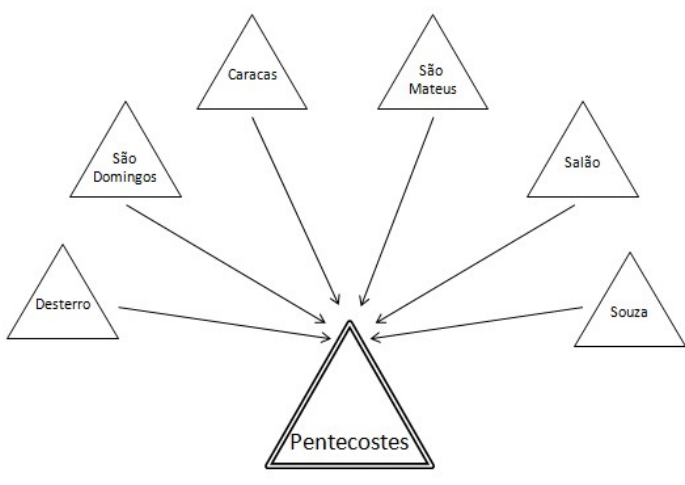
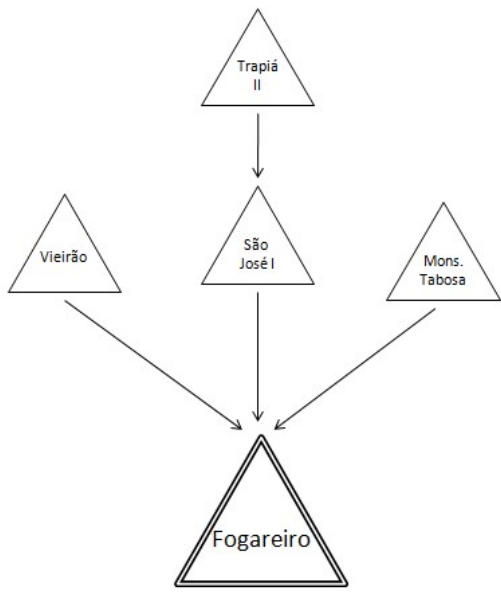
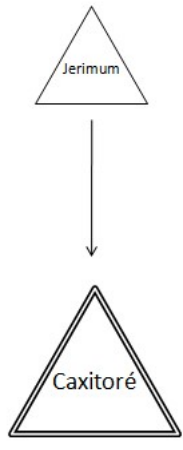
<i>Sistema Adutor</i>	<i>Manancial</i>	<i>Número de Municípios</i>	<i>Municípios</i>	<i>Bacia Hidrográfica</i>
Itauna - Litoral Norte	Aç. Itaúna	3	Barroquinha, Chaval, Camocim	Coreaú
Tucunduba - Litoral Norte	Aç. Tucunduba	4	Bela Cruz, Cruz, Jijoca, Marco	Coreaú
Fronteiras - Sertões de Crateús	Aç. Fronteiras	7	Ipaporanga, Ararendá, Poranga, Crateús, Independência, Novo Oriente, Quiterianópolis	Sertões de Crateús
Fogareiro - Alto Banabuiú	Aç. Fogareiro	4	Boa Viagem, Mosenhor Tabosa, Madalena, Itatira	Banabuiú
Pedras Brancas - Sertão Central	Aç. Pedras Brancas	4	Quixeramobim, Quixadá, Choró, Ibicuitinga	Banabuiú
Integração Banabuiú - Pedras Brancas*	Aç. Banabuiú	4	Quixeramobim, Quixadá, Choró, Ibicuitinga	Banabuiú
Banabuiú - Sertão Central	Aç. Banabuiú	9	Banabuiú, Solonópole, Jaguaretama, Milhã, Deputado Irapuan Pinheiro, Senador Pompeu, Piquet Carneiro, Mombaça, Pedra Branca	Banabuiú
Cariri Ocidental	CAC Trecho I	9	Nova Olinda, Monte Alverne (Crato), Santana do Cariri, Altaneira, Assaré, Antonina do Norte, Potengi, Araripe, Campos Sales, Salitre	Alto Jaguaribe
Arneiroz II - Sertão dos Inhamuns	Aç. Arneiroz II	6	Arneiroz, Aiuaba, Saboeiro, Catarina, Tauá, Parambu	Alto Jaguaribe
Trussu - Alto Jaguaribe	Aç. Trussu	6	Acopiara, Iguatu, Quixelô, Jucas, Cariús, Tarrafas	Alto Jaguaribe
Extremo Sul	CAC Trecho I	2	Jati e Penaforte	Salgado
Cariri Oriental	CAC Trecho I	7	Porteiras, Jardim, Brejo Santo, Milagres, Abaiara, Mauriti e Barro	Salgado

<i>Sistema Adutor</i>	<i>Manancial</i>	<i>Número de Municípios</i>	<i>Municípios</i>	<i>Bacia Hidrográfica</i>
CRAJUBAR	CAC Trecho I	5	Crato, Juazeiro do Norte, Barbalha, Missão Velha e Caririaçu	Salgado
Salgado - Centro Sul	Ramal do Salgado	5	Aurora, Lavras da Mangabeira, Ipaumirim, Baixio e Umari	Salgado
Orós - Centro Sul	Aç. Orós	6	Orós, Icó, Cedro, Granjeiro, Várzea Alegre e Farias Brito	Salgado

Fonte: Secretaria de Recursos Hídricos do Estado do Ceará 2016

**ANEXO B – REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DOS RESERVATÓRIOS EM CASCATA**





**ANEXO C –CASCATAS DE RESERVATÓRIOS – ORDENS DE AFLUÊNCIA E PERÍODOS DE DADOS DE VAZÃO**

---

**Cascata do Açude Angicos**

<b>Açude</b>	<b>Ordem</b>	<b>Período de dados</b>
<b>Diamante</b>	1	jan 1912 – dez 2012
<b>Angicos</b>	2	jan 1912 – dez 2012

---



---

**Cascata do Açude Arneiroz II**

<b>Açude</b>	<b>Ordem</b>	<b>Período de dados</b>
<b>Parambu</b>	1	out 1960 - dez 2012
<b>Várzea do Boi</b>	1	jan 1912 – dez 2012
<b>Trici</b>	1	jul 1912 – dez 2012
<b>Favelas</b>	1	jan 1912 – dez 2012
<b>Arneiroz II</b>	2	jan 1912 – dez 2012

---



---

**Cascata do Açude Araras**

<b>Açude</b>	<b>Ordem</b>	<b>Período de dados</b>
<b>Bonito</b>	1	jan 1912 – dez 2012
<b>Farias de Souza</b>	1	fev 1919 – dez 2012
<b>Carão</b>	1	jan 1912 – dez 2012
<b>Araras</b>	2	jan 1912 – dez 2012

---



---

**Cascata do Açude Caxitoré**

<b>Açude</b>	<b>Ordem</b>	<b>Período de dados</b>
<b>Jerimum</b>	1	jan 1912 – dez 2012
<b>Caxitoré</b>	2	jan 1912 – dez 2012

---

---

**Cascata do Fogareiro**

<b>Açude</b>	<b>Ordem</b>	<b>Período de dados</b>
<b>Trapiá II</b>	1	jan 1912 – dez 2012
<b>Vieirão</b>	1	jan 1912 – dez 2012
<b>Mons. Tabosa</b>	1	mai 1912 – dez 2012
<b>São José I</b>	2	jan 1912 – dez 2012
<b>Fogareiro</b>	3	jan 1928 – dez 2012

---

**Cascata do Pentecostes**

<b>Açude</b>	<b>Ordem</b>	<b>Período de dados</b>
<b>Desterro</b>	1	jan 1934 – dez 2012
<b>São Domingos</b>	1	jan 1912 – dez 2012
<b>Caracas</b>	1	jan 1912 – dez 2012
<b>São Mateus</b>	1	jan 1912 – dez 2012
<b>Salão</b>	1	jan 1912 – dez 2012
<b>Souza</b>	1	jan 1912 – dez 2012
<b>Pentecostes</b>	2	jan 1912 – dez 2012

## APÊNDICE I – ROTINA DE CÁLCULO EM R

```

#*****
#*****% % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % *****
#*****% % %      Preparação      % % % *****
#*****% % %      % % % *****
#*****% % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % *****
#*****
#
# _____
#    Limpeza do espaço de trabalho
# _____
rm(list=ls()) #apaga o workspace
cat("\014") # limpar o console, código de apertar ctr l

#
# _____
#    Inclusão de bibliotecas
# _____

library(ggplot2)
library(readxl)
library(XLConnect)

#*****
#*****% % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % *****
#*****% % % Atribuição de dados aos reservatórios % % % *****
#*****% % %      em listas      % % % *****
#*****% % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % % *****
#*****

# A lista do tipo Reservatorio deve conter:
# .Identif($Identif):
#     *ID ($ID)
#     *Nome ($Nome)
# .Geometria($Geometria):
#     *Coeficientes do polinomio de 4º grau para Volume-Area ($Coef_Area_Vol)
#     *Volume Maximo(hm3) ($Vol_Max)
#     *Volume Maximo Operacional(hm3) ($Vol_Max_Operacional)
#     *Volume Minimo(hm3) ($Vol_Min)
# .Clima:
#     *Mes inicio de dados de aflu?ncia ($mes_inicio_dados)
#     *Hist?rico de Aflu?ncias (hm3/m?s) ($Serie_Hist_Aflu)
#     *Evaporacao media (mm/mes) ($VetorEvap) Considerada fixa de uma ano a outro Dada na ordem de meses segundo o
# calendario
# .Simulacao: Posteriormente guardar? os resultutados da simula??o no formato matriz, cada coluna armazenando:
#     1-Ano
#     2-M?s
#     3-Volume Afluente Total (hm3/mes)
#     4-Retirada (hm3/mes)
#     5-Vertimento (hm3/mes)
#     6-Volume Armazenado (hm3)

#
# _____
#     Funcoes de auxiliares
# _____

#dado o ID do reservatorio, l? dados pareados de volume (hm3) e e area(km2) e fornece os coeficientes do polinômio do quarto grau
# A=Polinom4(Volume) que melhor aproxima
Polinom4_Area_Vol <- function(ID){

  dados_Vol=unlist(AreaVolume[is.element(el=AreaVolume$COD,set=ID),"VOLUME (hm3)"],use.name=FALSE)
  dados_Area=unlist(AreaVolume[is.element(el=AreaVolume$COD,set=ID),"AREA (km2)"],use.name=FALSE)
  Pol4=lm(dados_Area ~ dados_Vol+I(dados_Vol^2)+I(dados_Vol^3)+I(dados_Vol^4))
  return(c(coef(Pol4)[1],coef(Pol4)[2],coef(Pol4)[3],coef(Pol4)[4],coef(Pol4)[5]))
}

Maior_Serie_Continua <-function(serie){ #dada uma série de dados com as falhas identificadas por -999 retorna a maior serie
continua
mes=serie[1,2]
ano=serie[1,1]
ini_Ser=1
fim_Ser=1
ini_Maior_Ser=ini_Ser

```

```

fim_Maior_Ser=fim_Ser
n=1
nmaior=0
for(i in 1:nrow(serie)){
  if(mes!=serie[i,2] | ano!=serie[i,1] | serie[i,3]==-999){#falha=encerra-se uma serie
    fim_Ser=i-1
    if(n-1>nmaior){
      nmaior=n-1
      ini_Maior_Ser=ini_Ser
      fim_Maior_Ser=fim_Ser
      #guarda inicio e fim da serie que se encerrou se ela for maior
    }

    n=0 #reinicializa o contador de meses da serie
    mes=serie[i,2] #reinicializa o m?s caso m?s n?o escrito
    ano=serie[i,1] #reinicializa o ano caso ano n?o escrito
  }

  if(n==1){
    ini_Ser=i
  }
  mes=mes+1
  if(mes>12){
    mes=1
    ano=ano+1}

  n=n+1

  if(i==nrow(serie)){#verifica se a ultima serie ? maior (crit?rio de parada da ultima serie ? diferente)
    fim_Ser=i
    if(n-1>nmaior){
      nmaior=n-1
      ini_Maior_Ser=ini_Ser
      fim_Maior_Ser=fim_Ser
      #guarda inicio e fim da serie que se encerrou se ela for maior
    }
  }

  }
  maior_serie=matrix(nrow=nmaior, ncol=3)
  maior_serie=serie[ini_Maior_Ser:fim_Maior_Ser,]
  return(maior_serie)
}

# _____
# Atribuiç?o de dados de açude em list
# _____

LerAcude<-function(nID){
  Nome_Reserv=unlist(lista_Reserv_ID[is.element(el = lista_Reserv_ID$ID,set=nID),1],use.name=FALSE)
  if(length(Nome_Reserv)==0){print(paste("Reservatorio ",nID," nao encontrado!"))}else{
  Identif_Reserv=list(ID=nID,Nome=Nome_Reserv)

  Coef_Area_Vol_Reserv=Polinom4_Area_Vol(nID)
  Vol_Max_Reserv=unlist(Volumes[is.element(el = Volumes$Codigo,set=nID),"Volume Total( hm3)"],use.name=FALSE)
  Vol_Max_Operacional_Reserv=Vol_Max_Reserv # A ser alterado se houver necessidade
  Vol_Min_Reserv=0 # A ser alterado se houver necessidade
  Vol_Atual_Reserv=unlist(Volumes[is.element(el = Volumes$Codigo,set=nID),"Volume Atual (hm3)"],use.name=FALSE)
  Geometria_Reserv=list(Coef_Area_Vol=Coef_Area_Vol_Reserv, Vol_Max=Vol_Max_Reserv,
  Vol_Max_Operacional=Vol_Max_Operacional_Reserv, Vol_Min= Vol_Min_Reserv,Vol_Atual=Vol_Atual_Reserv)

  VetorEvap_Reserv=unlist(Evaporacao[is.element(el = Evaporacao$Cod,set=nID),3:14],use.name=FALSE)
  Serie_Hist_Aflu_Reserv = matrix(nrow=nrow(Hist_vazoes), ncol=3)
  Serie_Hist_Aflu_Reserv[,1]=unlist(Hist_vazoes[,2])
  Serie_Hist_Aflu_Reserv[,2]=unlist(Hist_vazoes[,3])
  Serie_Hist_Aflu_Reserv[,3]= unlist(Hist_vazoes[,paste(nID)],use.name=FALSE)
  Serie_Hist_Aflu_Reserv=Maior_Serie_Continua(Serie_Hist_Aflu_Reserv)

  Serie_Hist_Aflu_Reserv[,3]=Serie_Hist_Aflu_Reserv[,3]*3600*24*30/10^6 #transforma os dados de m3/s para hm3/mes
  if(nrow(Serie_Hist_Aflu_Reserv)<360){print(paste("Menos de 360 meses de dados para o Acude",Nome_Reserv,
  ",",nrow(Serie_Hist_Aflu_Reserv)," meses"))}
  mes_inicio_dados_Reserv=Serie_Hist_Aflu_Reserv[1,2]

```



```

}

#####
#####%>%%>%%>%%>%%>%%>%%>%%>%%>%%#####
#####%>% Interseção de dados %>%#####
#####%>% de vazões %>%#####
#####%>%%>%%>%%>%%>%%>%%>%%>%%>%%#####
#####

IntersVazoes<-function(cascata){ #trunca as series de vaz?es de cada reservat?rio tomando apenas o periodo no qual h?
simultaneidade de dados

#vetores de anos e meses inicial e final das series de cada reservat?rio da cascata
vecAnoIni=integer(0)
vecMesIni=integer(0)
vecAnoFim=integer(0)
vecMesFim=integer(0)
for(i in 1:length(cascata)){
vecAnoIni=c(vecAnoIni,cascata[[i]]$Clima$Serie_Hist_Aflu[1,1])
vecMesIni=c(vecMesIni,cascata[[i]]$Clima$Serie_Hist_Aflu[1,2])
vecAnoFim=c(vecAnoFim,cascata[[i]]$Clima$Serie_Hist_Aflu[length(cascata[[i]]$Clima$Serie_Hist_Aflu[1]),1])
vecMesFim=c(vecMesFim,cascata[[i]]$Clima$Serie_Hist_Aflu[length(cascata[[i]]$Clima$Serie_Hist_Aflu[1]),2])
}

#data de inicio de fim da maior interseção entre as séries
AnoIni=max(vecAnoIni)
MesIni=max(vecMesIni[is.element(vecAnoIni,AnoIni)])
AnoFim=min(vecAnoFim)
MesFim=min(vecMesFim[is.element(vecAnoFim,AnoFim)])
serie=AnoFim*12+MesFim-AnoIni*12-MesIni+1
print(paste(serie, "meses de s?rie simult?nea para a cascata do", cascata[[length(cascata)]]$Identif$Nome))

#verifica??es
if(serie<360){
print(paste("Menos de 360 meses de dados simult?neos para a cascata do ",cascata[[length(cascata)]]$Identif$Nome, "("serie,"
meses)"))
if(serie<0){
print("Sem interse??o entre as s?ries de vaz?o")
return(0)
}
}

#atualiza??o das s?ries para as séries simultâneas em cada reservat?rio
serieTruncada=matrix(nrow=serie,ncol=3)
for(i in 1:length(cascata)){
k=1
cascata[[i]]$Clima$mes_inicio_dados=MesIni #atualiza??o m?s de inicio dos dados
for(j in 1:nrow(cascata[[i]]$Clima$Serie_Hist_Aflu)){
DepoisdoInicio=(cascata[[i]]$Clima$Serie_Hist_Aflu[j,1]==AnoIni & cascata[[i]]$Clima$Serie_Hist_Aflu[j,2]>=MesIni) |
cascata[[i]]$Clima$Serie_Hist_Aflu[j,1]>AnoIni
AntesdoFim=(cascata[[i]]$Clima$Serie_Hist_Aflu[j,1]==AnoFim & cascata[[i]]$Clima$Serie_Hist_Aflu[j,2]<=MesFim) |
cascata[[i]]$Clima$Serie_Hist_Aflu[j,1]<AnoFim
if(DepoisdoInicio & AntesdoFim){

serieTruncada[k,]=cascata[[i]]$Clima$Serie_Hist_Aflu[j,]
k=k+1
}
}
cascata[[i]]$Clima$Serie_Hist_Aflu=serieTruncada
}

return(cascata)
}
#####
#####%>%%>%%>%%>%%>%%>%%>%%>%%>%%#####
#####%>% Dinâmica mensal %>%#####
#####%>% de um reservatório %>%#####
#####%>%%>%%>%%>%%>%%>%%>%%>%%>%%#####
#####

# _____
# Funcoes de auxiliares
# _____

```







```

#####
#####

#função realiza a mesma operação que FuncGarantia, mas armazena o resultado da simulação
# .Simulacao: (cada coluna)
# 1-Ano
# 2-M?s
# 3-Volume Afluente Total (hm3/mes)
# 4-Retirada (hm3/mes)
# 5-Vertimento (hm3/mes)
# 6-Volume Armazenado (hm3)

SimulaAcude<-function(Acude, Ret){ #retirada entra em hm3/mes
Vol_ini=Acude$Geometria$Vol_Min+(Acude$Geometria$Vol_Max_Operacional-Acude$Geometria$Vol_Min)/2; #volume m?dio
Vol=Vol_ini
mes=Acude$Clima$mes_inicio_dados

for(i in c(1:nrow(Acude$Simulacao))){#percorre os meses de simula??o
Aflu_Tot=Acude$Simulacao[i,3]
estado=Dinamica_mensal_Simplificada(Vol,Aflu_Tot, Acude$Clima$VetorEvap[mes]/1000,Ret, Acude$Geometria)
Vol=estado[1]

Acude$Simulacao[i,6]=Vol #Volume Armazenado (hm3) no final do mes i simulado
Acude$Simulacao[i,4]=estado[2] #retirada (hm3) durante o m?s i
Acude$Simulacao[i,5]=estado[3] #vertimento (hm3) durante o m?s i

mes=mes+1
if(mes>12){mes=1}

}

return(Acude)
}

#####
#####
##### Simulação Cascata #####
##### exceto reservatório principal #####
#####
Indice_Casca<-function(cascata,ID){#retorna o ?ndice na cascata dado o ID do reservat?rio
indice=0
for(i in 1:length(cascata)){
if(cascata[[i]]$Identif$ID==ID){indice=i}
}
if(indice==0){ print("Reservatorio nao encontrado!")}
return(indice)
}

#simula??o dos reservat?rios(exceto o principal=manancial), tomando por regra retirada=Q90
# e considerando que retirada=demanda do trecho subsequente, de modo que as ?nicas afluen?cias ao reservat?rio
#a jusante s?o de vertimento e das ?gua drenadas na ?rea incremental

SimulaExcetoPrinc<- function(cascata,GarantiaOperaMontantes){ #usada em Plota_Conjunto_Curvas_GarantiaRetirada
for(i in 1:length(cascata)){#para todos os reservat?rios
mont=Montantes(cascata[[i]]$Identif$ID)
cascata[[i]]$Simulacao=matrix(NA,nrow = nrow(cascata[[i]]$Clima$Serie_Hist_Aflu),ncol=6)
colnames(cascata[[i]]$Simulacao)=c("Ano","M?s","Aflu?ncia(hm3/mes)","Retirada(hm3/mes)","Vertimento(hm3/mes)","Volume
Armazenadono fim do m?s(hm3)")
cascata[[i]]$Simulacao[,1:3]=cascata[[i]]$Clima$Serie_Hist_Aflu #para reservat?rios de ordem 1 n?o h? acrescimo por vertimento
if(length(mont)>0){#para reservat?rios com outros a montante somar ?s afluen?cias da drenagem incremental o vertimento dos
montantes
for(j in 1:length(mont)){
indiceMontante=Indice_Casca(cascata,mont[j])
cascata[[i]]$Simulacao[,3] = cascata[[i]]$Simulacao[,3] + cascata[[indiceMontante]]$Simulacao[,5]
}
}
if(i!=length(cascata)){#Simula a opera??o de todos os resevat?rios exceto do reservat?rio principal
resp=AcheRetirada(cascata[[i]],GarantiaOperaMontantes) #reservat?rios operados com o garantia prefixada (exceto o principal)
Q=resp[1]
G=resp[2]
cascata[[i]]=SimulaAcude(cascata[[i]],Q)
}
}
}

```







```

GarantiasComSalvuarda <-function(Acude,Qurb,alfa,p_volSalvuarda){#Qurb entra em m3/s
#calcula as grantias da opera??o do reservat?rio
#com regra de opera??o com salvuarda:
#
# .para volumes abaixo ou igual a p_volSalvuarda % do volume util a retirada ? Qurb
# .para volumes acima de p_volSalvuarda % do volume util retira-se (1+alfa)*Qurb

VolUtil=Acude$Geometria$Vol_Max_Operacional-Acude$Geometria$Vol_Min
Vol_ini=Acude$Geometria$Vol_Min+VolUtil/2; # volume m?dio
Qurb=Qurb*3600*24*30/10^6 #transforma m3/s em hm3/mes
Qtot=(1+alfa)*Qurb

#inicializa vari?veis
Vol=Vol_ini
if((Vol-Acude$Geometria$Vol_Min)/VolUtil<=p_volSalvuarda){Ret=Qurb}else{Ret=Qtot}
mes=Acude$Clima$mes_inicio_dados
NfalhaQurb=0
NfalhaQtot=0
Abaixo10=0

for(i in c(1:nrow(Acude$Simulacao))){
Aflu_Tot=Acude$Simulacao[i,3]
estado=Dinamica_mensal_Simplificada(Vol,Aflu_Tot , Acude$Clima$VetorEvap[mes]/1000,Ret, Acude$Geometria)

#atualiza
Vol=estado[1] #volume armazenado
if((Vol-Acude$Geometria$Vol_Min)/VolUtil<=p_volSalvuarda){Ret=Qurb}else{Ret=Qtot} #retirada
mes=mes+1
if(mes>12){mes=1} #mes

#verifica falha (contagem)
if(estado[2]<Qtot){
NfalhaQtot=NfalhaQtot+1
if(estado[2]<Qurb){
NfalhaQurb=NfalhaQurb+1
}
}
if((Vol-Acude$Geometria$Vol_Min)/VolUtil<=.1){Abaixo10=Abaixo10+1}
}
#calcula das garantias
FalhaQtot=NfalhaQtot/nrow(Acude$Clima$Serie_Hist_Aflu)
FalhaQurb=NfalhaQurb/nrow(Acude$Clima$Serie_Hist_Aflu)
P10=Abaixo10/nrow(Acude$Clima$Serie_Hist_Aflu)
GarantiaQtot=1-FalhaQtot #permanencia na faixa de opera??o normal = percentual das vezes em que a retirada Qtot ? assegurada
GarantiaQurb=1-FalhaQurb #percentual das vezes em que a retirada Qurb ? assegurada = permanencia na faixa
normal+permanencia na faixa de de restri??o

return(c(GarantiaQtot,GarantiaQurb,P10))
}

```

```

SimulaComSalvuarda <-function(Acude,Qurb,alfa,p_volSalvuarda){#Qurb entra em m3/s
#simula a opera??o do reservat?rio
#com regra de opera??o com salvuarda:
#
# .para volumes abaixo ou igual a p_volSalvuarda % do volume util a retirada ? Qurb
# .para volumes acima de p_volSalvuarda % do volume util retira-se (1+alfa)*Qurb

VolUtil=Acude$Geometria$Vol_Max_Operacional-Acude$Geometria$Vol_Min
Vol_ini=Acude$Geometria$Vol_Min+VolUtil/2; # volume m?dio
Qurb=Qurb*3600*24*30/10^6 #transforma m3/s em hm3/mes
Qtot=(1+alfa)*Qurb

#inicializa vari?veis
Vol=Vol_ini
if((Vol-Acude$Geometria$Vol_Min)/VolUtil<=p_volSalvuarda){Ret=Qurb}else{Ret=Qtot}
mes=Acude$Clima$mes_inicio_dados

```



```

if (is.finite(r) && is.finite(r.old) && abs(r - r.old) <
    (0.001 + abs(r)) * outer.eps)
  break
theta <- a$par
totCounts <- totCounts + a$counts
obj <- f(theta, ...)
if (s.mu * obj > s.mu * obj.old)
  break
}
if (i == outer.iterations) {
  a$convergence <- 7
  a$message <- gettext("Barrier algorithm ran out of iterations and did not converge")
}
if (mu > 0 && obj > obj.old) {
  a$convergence <- 11
  a$message <- gettextf("Objective function increased at outer iteration %d",
    i)
}
if (mu < 0 && obj < obj.old) {
  a$convergence <- 11
  a$message <- gettextf("Objective function decreased at outer iteration %d",
    i)
}
a$outer.iterations <- i
a$counts <- totCounts
a$barrier.value <- a$value
a$value <- f(a$par, ...)
a$barrier.value <- a$barrier.value - a$value
a
}

```

```

#####
#####%*#####
#####Otimização da salvaguarda #####
#####%#####
#####%*#####
#####
#
# Deseja-se maximizar f(alfa,n)=alfa
# com Gurb(alfa,n)>98% //ou 100%
# Gtot(alfa,n)>90%
# P10(alfa,n)<10%
# alfa>0
# n>0
# n<1

```

```

#_____
# Funções da Otimização
#_____

```

```

OtimizaSalvaguarda<-function(Acude,Qurb,Gtot,Gurb,P10){#Qurb entra em m3/s
# x vetor de variaveis
# x1 = alfa
# x2 = n

passo_garantia=1/nrow(Acude$Simulacao)

funcObj <-function(x){
  return(-x[1])
}

```

```

funcRestrs <- function(x){
  resp=GarantiasComSalvaguarda(Acude,Qurb,x[1],x[2])
  GtotCalc=resp[1]
  GurbCalc=resp[2]
  P10Calc=resp[3] # -P10Calc > -P10Estabelecido
  restricao1=x[1] #alfa>0
  restricao2=x[2] #n>0
  restricao3=-x[2] #-n>-1
}

```





```

}else{
  EixoRet.max=12.5
  EixoRet.passos=seq(0,12,2)
}
}

if(MaxVert<25){
  EixoVert.max=27.5
  EixoVert.passos=seq(0,25,5)
}else{
  if(MaxVert<150){
    EixoVert.max=160
    EixoVert.passos=seq(0,150,25)
  }else{
    EixoVert.max=1050
    EixoVert.passos=seq(0,1000,100)
  }
}
Dados=data.frame(Tempo=VetorTempo,Aflu=VetorAflu,Ret=VetorRet,Vert=VetorVert)
Dados_com_inic=data.frame(Tempo=VetorTempo2,Armazenamento=VetorArmazenamentoRel)

grafArmaz = ggplot(data=Dados_com_inic, aes(x=Tempo, y=Armazenamento))+geom_line(size=.3)+ggtitle(paste("Armazenamento
do Açude",cascata[[length(cascata)]]$Identif$Nome))
grafArmaz = grafArmaz +theme_bw()+ theme(axis.text.x = element_text(size=7 ),axis.text.y = element_text(size=7))
grafArmaz = grafArmaz + theme(plot.title = element_text(hjust = 0.5,size=9),axis.title=element_text(size=8))
grafArmaz = grafArmaz + scale_x_continuous( name="Ano",breaks=
seq(round(min(VetorTempo2)/10)*10,(floor(max(VetorTempo2)/10))*10,10),limits = c(round(min(VetorTempo2)/10)*10-
5,(floor(max(VetorTempo2)/10))*10+5) )
grafArmaz = grafArmaz +scale_y_continuous( name="Armazenamento (%)",breaks=seq(0,100,10),limits = c(0, 100),expand =
c(0,0))
if(!is.null(n_salva)){ grafArmaz = grafArmaz +geom_segment(aes(x=min(VetorTempo2), y=n_salva*100, xend=max(VetorTempo2),
yend=n_salva*100),linetype = "dashed")}

grafAflu = ggplot(data=Dados, aes(x=Tempo, y=Aflu))+geom_line(size=.3)+ggtitle(paste("Afluências ao
Açude",cascata[[length(cascata)]]$Identif$Nome))
grafAflu = grafAflu +theme_bw()+ theme(axis.text.x = element_text(size=7 ),axis.text.y = element_text(size=7))
grafAflu = grafAflu + theme(plot.title = element_text(hjust = 0.5,size=9),axis.title=element_text(size=8))
grafAflu = grafAflu + scale_x_continuous( name="Ano",breaks=
seq(floor(min(VetorTempo)/10)*10,(floor(max(VetorTempo)/10))*10,10),limits=c(round(min(VetorTempo)/10)*10-
5,(floor(max(VetorTempo)/10))*10+5))
grafAflu = grafAflu + scale_y_continuous( name="Vazão Afluente (m3/s)",breaks= EixoAflu.passos,limits = c(0,EixoAflu.max),expand
= c(0,0))
grafAflu = grafAflu + theme(panel.grid.major = element_line(size = 0.3), panel.grid.minor = element_line(size = 0.15))

grafRet = ggplot(data=Dados, aes(x=Tempo, y=Ret))+geom_line(size=.3)+ggtitle(paste("Defluências controladas do
Açude",cascata[[length(cascata)]]$Identif$Nome))
grafRet = grafRet + theme_bw()+theme(axis.text.x = element_text(size=7 ),axis.text.y = element_text(size=7))
grafRet = grafRet + theme(plot.title = element_text(hjust = 0.5,size=9),axis.title=element_text(size=8))
grafRet = grafRet + scale_x_continuous( name="Ano",breaks=
seq(floor(min(VetorTempo)/10)*10,(floor(max(VetorTempo)/10))*10,10),limits=c(round(min(VetorTempo)/10)*10-
5,(floor(max(VetorTempo)/10))*10+5))
grafRet = grafRet + scale_y_continuous( name="Defluência controlada (m3/s)",breaks=
EixoRet.passos,limits=c(0,EixoRet.max),expand = c(0,0))
grafRet = grafRet + theme(panel.grid.major = element_line(size = 0.3), panel.grid.minor = element_line(size = 0.15))

grafVert = ggplot(data=Dados, aes(x=Tempo, y=Vert))+geom_line(size=.3)+ggtitle(paste("Vertimentos do
Açude",cascata[[length(cascata)]]$Identif$Nome))
grafVert = grafVert + theme_bw()+ theme(axis.text.x = element_text(size=7 ),axis.text.y = element_text(size=7))
grafVert = grafVert + theme(plot.title = element_text(hjust = 0.5,size=9),axis.title=element_text(size=8))
grafVert = grafVert + scale_x_continuous( name="Ano",breaks=
seq(floor(min(VetorTempo)/10)*10,(floor(max(VetorTempo)/10))*10,10),limits=c(round(min(VetorTempo)/10)*10-
5,(floor(max(VetorTempo)/10))*10+5))
grafVert = grafVert + scale_y_continuous( name="Vertimento (hm3/mês)",breaks=
EixoVert.passos,limits=c(0,EixoVert.max),expand = c(0,0))
grafVert = grafVert + theme(panel.grid.major = element_line(size = 0.3), panel.grid.minor = element_line(size = 0.15))

plot(grafRet)
ggsave(paste("Armazenamento",cascata[[length(cascata)]]$Identif$Nome, ".png"), plot = grafArmaz, device = "png",width =
145,height = 72, units = "mm")
ggsave(paste("Afluencias",cascata[[length(cascata)]]$Identif$Nome, ".png"), plot = grafAflu, device = "png",width = 145,height = 72,
units = "mm")
ggsave(paste("Retiradas",cascata[[length(cascata)]]$Identif$Nome, ".png"), plot = grafRet, device = "png",width = 145,height = 72,
units = "mm")

```



```

Q90[i]=round(AcheRetirada(cascata[[length(cascata)]],0.9)[1]*10^6/3600/24/30,2) # em m3/s
Qfirme[i]=round(AcheQfirm(cascata[[length(cascata)]])[1]*10^6/3600/24/30,2) # em m3/s
Plota_Curva_GarantiaRetirada(cascata)
}

CalcReservIsolados <- data.frame( Garantia_Qurb = Garantia_Qurb, Q80=Q80, Q90=Q90,Qfirme=Qfirme)
writeWorksheetToFile("Resumo_REV04.xlsx", data = CalcReservIsolados, sheet = "Sistemas Isolados", header = FALSE, clearSheets =
FALSE,startRow=2,startCol=6)

# _____
# Tabela de Permanência
# sem salvaguarda
# _____
#

P10=0

for(i in 1:length(ID)){
cascata=SimulaExcetoPrinc(IntersVazoes(LerCascata(ID[i])),9)
manancial=SimulaAcude(cascata[[length(cascata)]],Qurb[i]*3600*24*30/10^6)
tabela=TempoAbaixo(manancial)
writeWorksheetToFile("PermanênciasSoAbastecHum.xlsx", data = tabela, sheet = manancial$Identif$Nome, header = TRUE,
startRow=1,startCol=1)
P10[i]=as.numeric(tabela[2,2])
}

writeWorksheetToFile("Resumo_REV04.xlsx", data = P10, sheet = "Sistemas Isolados", header = FALSE, clearSheets =
FALSE,startRow=2,startCol=11)

# _____
# Plotagem da simulação
# sem salvaguarda
# _____
#

for(i in 1:length(ID)){
cascata=SimulaExcetoPrinc(IntersVazoes(LerCascata(ID[i])),9)
manancial=SimulaAcude(cascata[[length(cascata)]],Qurb[i]*3600*24*30/10^6)
Plota_Simulacao(manancial)
}

# _____
# Efeito da operação dos reservatórios de montante
# _____
#

# Curvas de permanência em função da operação dos reservatórios de montante
for(i in 1:length(ID)){
cascata=IntersVazoes(LerCascata(ID[i]))
if(length(cascata)>1){#somente se o manancial possuir reservatórios a montante
Plota_Conjunto_Curvas_GarantiaRetirada(cascata)
#saturacao
print(paste("Cascata do ",cascata[[length(cascata)]])$Identif$Nome," - Saturação =",Saturacao(cascata)*100, "%")
}
}

# _____
# Salvaguarda ótima 1 e curvas de operação com salvaguarda
# _____
#

N_otim1=0
alfaMax1=0

for(i in 1:length(ID)){

print(paste("Acude ",Reserv_isolados$Manancial[i],"...",i," de ",length(ID)))
Cascata=SimulaExcetoPrinc(IntersVazoes(LerCascata(ID[i])),0.9)

```

```

Acude=Cascata[[length(Cascata)]]

if(Garantia_Qurb[i]>0.98){
  otimo=OtimizaSalvaguada(Acude,Qurb[i],Gtot=.9,Gurb=.98,P10=.1)
  N_otim1[i]=otimo[2]
  alfaMax1[i]=otimo[1]

  #curvas da opera??o de salvaguada
  #Curvas_Garantia_Com_Salvaguada(Acude,Qurb[i],alfaMax1[i],N_otim1[i])
}else{print("A?ude de uso exclusivo- Garantia Qurb < 98%")}

}
#armazenar resultados
ResultOtimizacao <- data.frame( N_otim = N_otim1, alfaMax=alfaMax1)
writeWorksheetToFile("Resumo_REV04.xlsx", data = ResultOtimizacao, sheet = "Sistemas Isolados", header = FALSE, clearSheets =
FALSE,startRow=2,startCol=12)

#-----
#      Verificações
#      de Ghum, Gtot e P10 para salvag. 1
#-----
#

Gtot_calc_1=0
Ghum_calc_1=0
P10_calc_1=0

for(i in 1:length(ID)){
  if(Garantia_Qurb[i]>0.98){
    cascata=SimulaExcetoPrinc(IntersVazoes(LerCascata(ID[i])),.9)
    resp=GarantiasComSalvaguada(cascata[[length(cascata)]],Qurb[i],alfaMax1[i],N_otim1[i])
    Gtot_calc_1[i]=resp[1]
    Ghum_calc_1[i]=resp[2]
    P10_calc_1[i]=resp[3]
    tabela=data.frame(Gtot_calc_1=Gtot_calc_1,Ghum_calc_1=Ghum_calc_1,P10_calc_1= P10_calc_1)
    writeWorksheetToFile("Resumo_REV04.xlsx", data = tabela, sheet = "Riscos Salvaguada otima", header = TRUE,
startRow=1,startCol=5)
  }
}

#-----
#      Tempos de permanência
#      com salvaguada ótima 1
#-----
#

for(i in 1:length(ID)){
  if(Garantia_Qurb[i]>0.98){
    cascata=SimulaExcetoPrinc(IntersVazoes(LerCascata(ID[i])),.9)
    manancial=SimulaComSalvaguada(cascata[[length(cascata)]],Qurb[i],alfaMax1[i],N_otim1[i])
    tabela=TempoAbaixo(manancial)
    writeWorksheetToFile("Permanencias_Salva1.xlsx", data = tabela, sheet = manancial$Identif$Nome, header = TRUE,
startRow=1,startCol=1)
  }
}

#-----
#      Plotagem da simulação
#      com salvaguada ótima 1
#-----
#

for(i in 1:length(ID)){
  if(Garantia_Qurb[i]>0.98){
    cascata=SimulaExcetoPrinc(IntersVazoes(LerCascata(ID[i])),.9)
    manancial=SimulaComSalvaguada(cascata[[length(cascata)]],Qurb[i],alfaMax1[i],N_otim1[i])
    Plota_Simulacao(manancial,N_otim1[i])
  }
}

```

```

}

# _____
# Salvaguarda ótima 2 e curvas de operação com salvaguarda
# _____
#

N_otim2=0
alfaMax2=0

for(i in 1:length(ID)){

  print(paste("Acude ",Reserv_isolados$Manancial[i],"...",i," de ",length(ID)))
  Cascata=SimulaExcetoPrinc(IntersVazoes(LerCascata(ID[i])),0.9)
  #Obs: Acude e Q entram como variavel global nas funcoes de otimizacao - N?o mudar o nome
  Acude=Cascata[[length(Cascata)]]

  if(Garantia_Qurb[i]==1){
    otimo=OtimizaSalvaguarda(Acude,Qurb[i],Gtot=.9,Gurb=1,P10=.1)
    N_otim2[i]=otimo[2]
    alfaMax2[i]=otimo[1]

    #curvas da operacao de salvaguarda
    #Curvas_Garantia_Com_Salvaguarda(Acude,Qurb[i],alfaMax2[i], N_otim2[i]) #rever função melhorar
  }else{print("Açude de uso exclusivo- Garantia Qurb < 100%")}

}
#armazenar resultados
ResultOtimizacao <- data.frame( N_otim = N_otim2, alfaMax=alfaMax2)
writeWorksheetToFile("Resumo_REV04.xlsx", data = ResultOtimizacao, sheet = "Sistemas Isolados", header = FALSE, clearSheets =
FALSE,startRow=2,startCol=14)

#OBS: verificar valores arredondados

# _____
#      Verificações
#      de Ghum, Gtot e P10 para salvag. 2
# _____
#

Gtot_calc_2=0
Ghum_calc_2=0
P10_calc_2=0

for(i in 1:length(ID)){
  if(Garantia_Qurb[i]>0.98){
    cascata=SimulaExcetoPrinc(IntersVazoes(LerCascata(ID[i])),.9)
    resp=GarantiasComSalvaguarda(cascata[[length(cascata)]],Qurb[i],alfaMax2[i],N_otim2[i])
    Gtot_calc_2[i]=resp[1]
    Ghum_calc_2[i]=resp[2]
    P10_calc_2[i]=resp[3]
    tabela=data.frame(Gtot_calc_2=Gtot_calc_2,Ghum_calc_2=Ghum_calc_2, P10_calc_2= P10_calc_2)
    writeWorksheetToFile("Resumo_REV04.xlsx", data = tabela, sheet = "Riscos Salvaguarda otima", header = TRUE,
startRow=1,startCol=8)
  }
}

# _____
#      Tempos de permanência
#      com salvaguarda ótima 2
# _____
#

for(i in 1:length(ID)){
  if(Garantia_Qurb[i]==1){
    cascata=SimulaExcetoPrinc(IntersVazoes(LerCascata(ID[i])),.9)
    manancial=SimulaComSalvaguarda(cascata[[length(cascata)]],Qurb[i],alfaMax2[i],N_otim2[i])
    tabela=TempoAbaixo(manancial)
  }
}

```

```

writeWorksheetToFile("Permanencias_Salva2.xlsx", data = tabela, sheet = manancial$Identif$Nome, header = TRUE,
startRow=1,startCol=1)

}
}

#-----
#      Plotagem da simula??o
#      com salvaguarda 6tima 2
#-----
#

for(i in 1:length(ID)){
  if(Garantia_Qurb[i]==1){
    cascata=SimulaExcetoPrinc(IntersVazoes(LerCascata(ID[i])),.9)
    manancial=SimulaComSalvaguarda(cascata[[length(cascata)]],Qurb[i],alfaMax2[i],N_otim2[i])
    Plota_Simulacao(manancial, n_salva = N_otim2[i])
  }
}
}

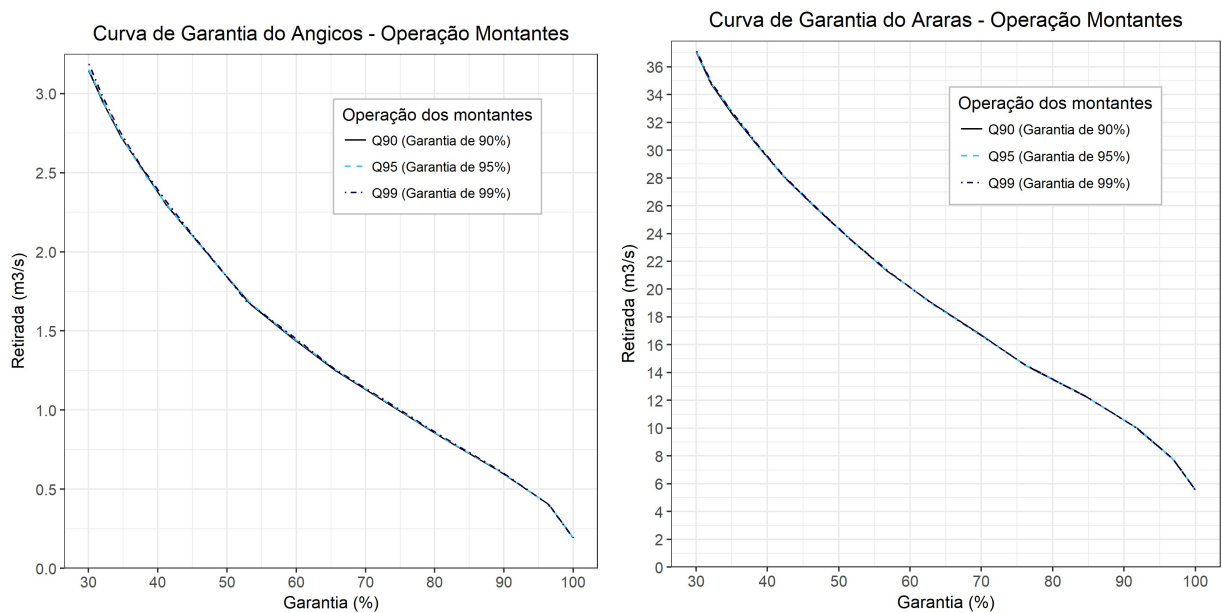
```

## APÊNDICE II - AVALIAÇÃO DA HIPÓTESE 1

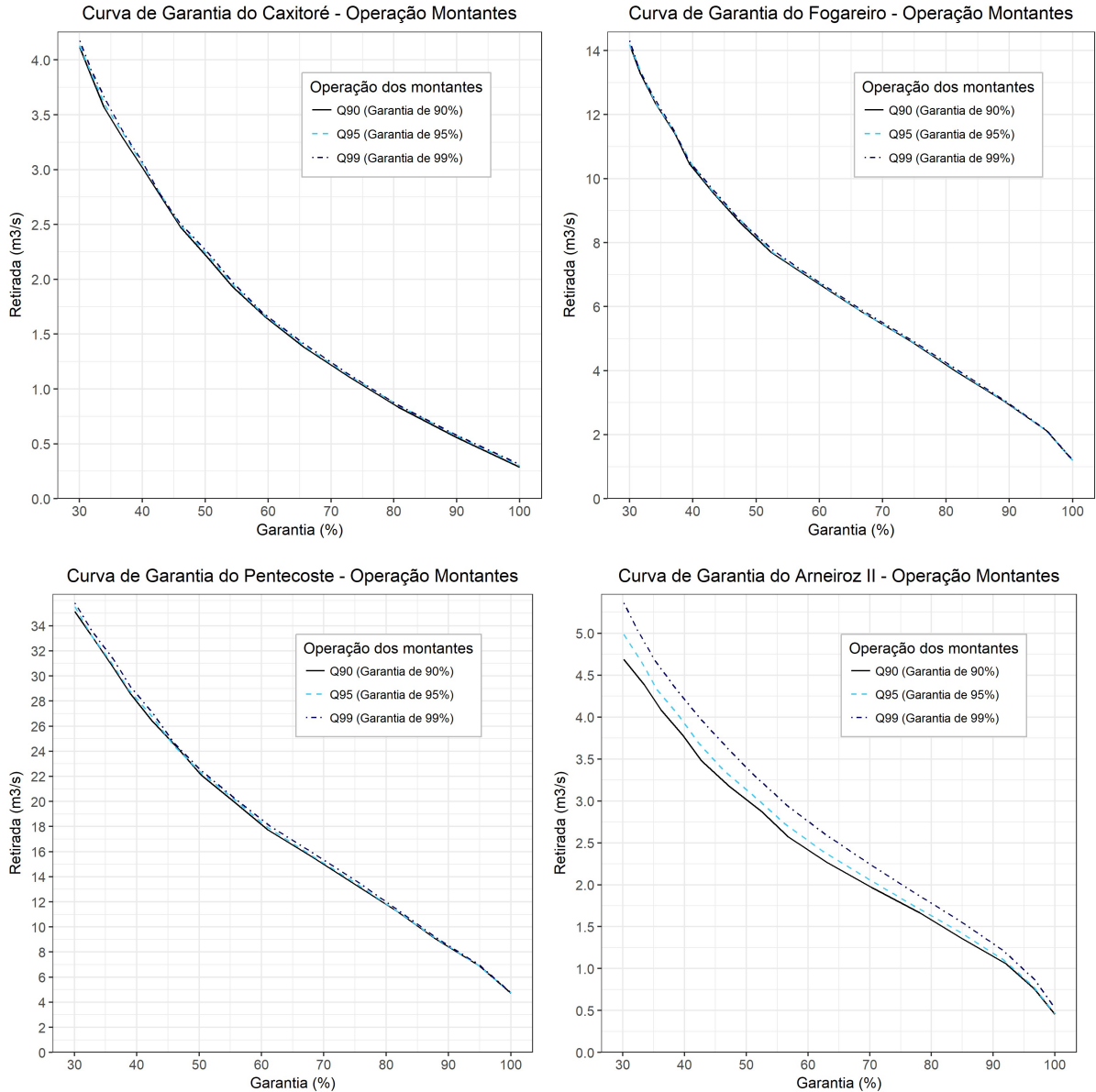
Tomando por hipótese que a operação dos reservatórios a montante do manancial é feita para uma garantia de 90%, considera-se que os mesmos estão sendo operados com uma vazão de retirada correspondente a um nível razoável de garantia. No entanto, sabendo que tais reservatórios podem ser operados com outras vazões, faz-se necessário avaliar o impacto de tal hipótese. Assim, para os seis mananciais que apresentam cascata de reservatórios a montante, avalia-se a relação garantia *versus* retirada variando a operação dos reservatórios a montante.

Os reservatórios a montante são, em cada caso, simulados com suas vazões Q90, Q95 e Q99, correspondendo as garantias de 90%, 95% e 99%. Mantida a *Hipótese 2*, esses reservatórios contribuem com os reservatórios a jusante apenas com vertimentos. Desse modo, espera-se que quando os reservatórios a montante são operados com garantias maiores (e consequentemente vazões menores), os mesmos tenham armazenamentos maiores por mais tempo, vertendo mais. Assim, maiores devem ser as afluências aos reservatórios a jusante (incluindo o manancial no último nível) e por fim maior deve ser a garantia do reservatório manancial.

As curvas em questão são apresentadas abaixo para os seis reservatórios com cascata de açudes a montante (Angicos, Araras, Arneiroz II, Caxitoré, Fogareiro e Pentecostes).







Observa-se que as curvas são praticamente coincidentes em todos os casos, exceto para o Arneiroz II. Isso indica que, exceto para esse último, a operação dos reservatórios a montante tem pouco influência sobre o comportamento dos reservatórios mananciais. Isso poderia ser explicado pela baixa acumulação que esses reservatórios a montante representam para a bacia hidrográfica do reservatório manancial. A influência do aproveitamento da bacia pode assim ser avaliada por meio da saturação da bacia, calculada por:

$$\text{Saturação} = \frac{\text{Capacidade de acumulação a montante}}{\text{Volume afluente médio anual ao açude manancial}}$$

Espera-se assim que para valores maiores de saturação, com os reservatórios a montante podendo acumular uma parcela mais significativa da afluência ao reservatório manancial, a operação desses açudes a montante deve exercer uma maior influência sobre as afluências ao manancial.

As saturações das bacias de cada um dos seis mananciais está apresentada a seguir:

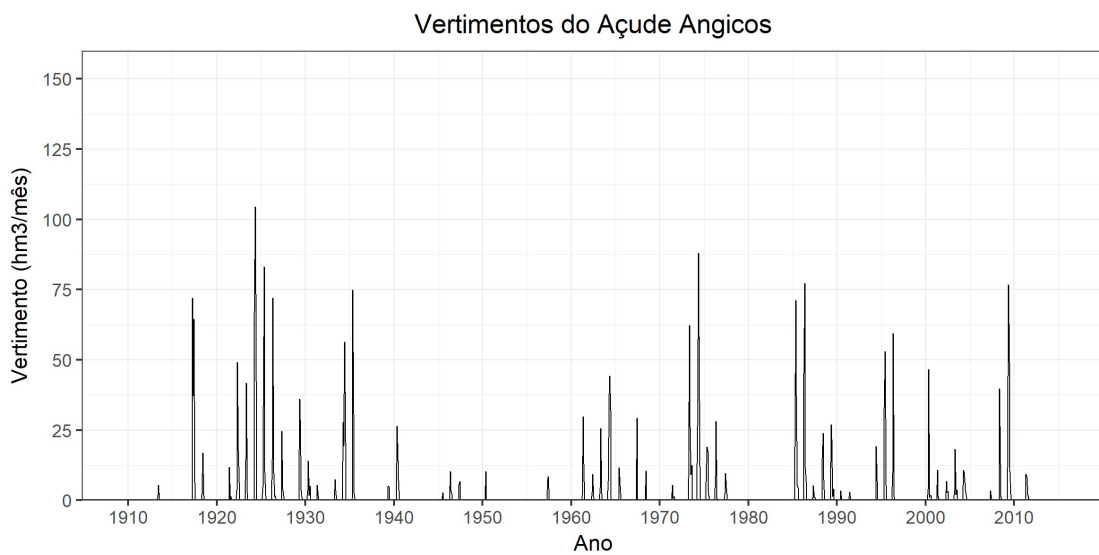
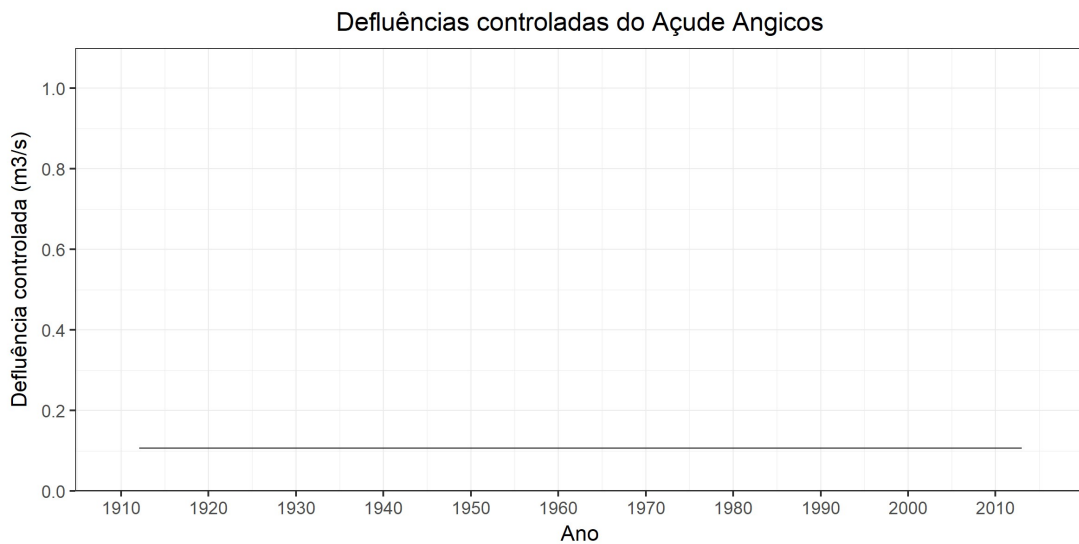
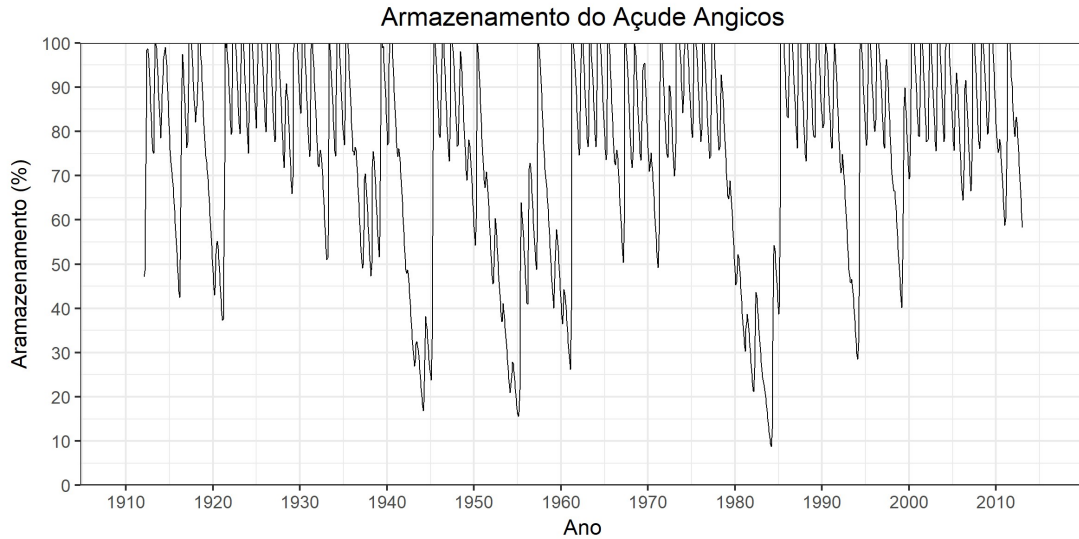
<i>Manancial</i>	<i>Saturação (%)</i>
Aç. Angicos	24%
Aç. Araras	8%
Aç. Caxitoré	26%
Aç. Fogareiro	19%
Aç. Pentecoste	11%
Aç. Arneiroz II	78%

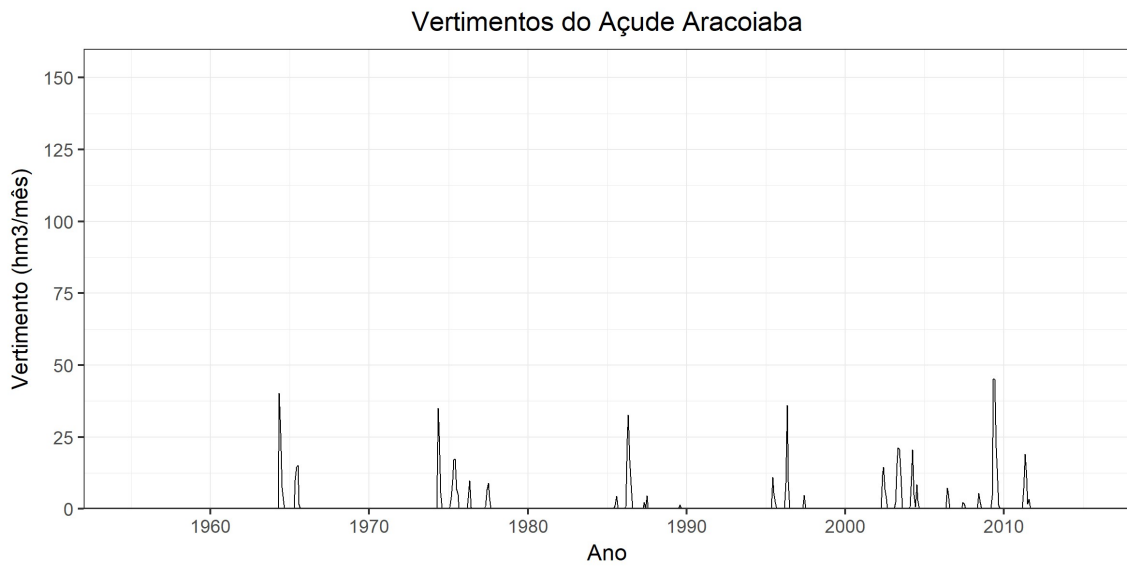
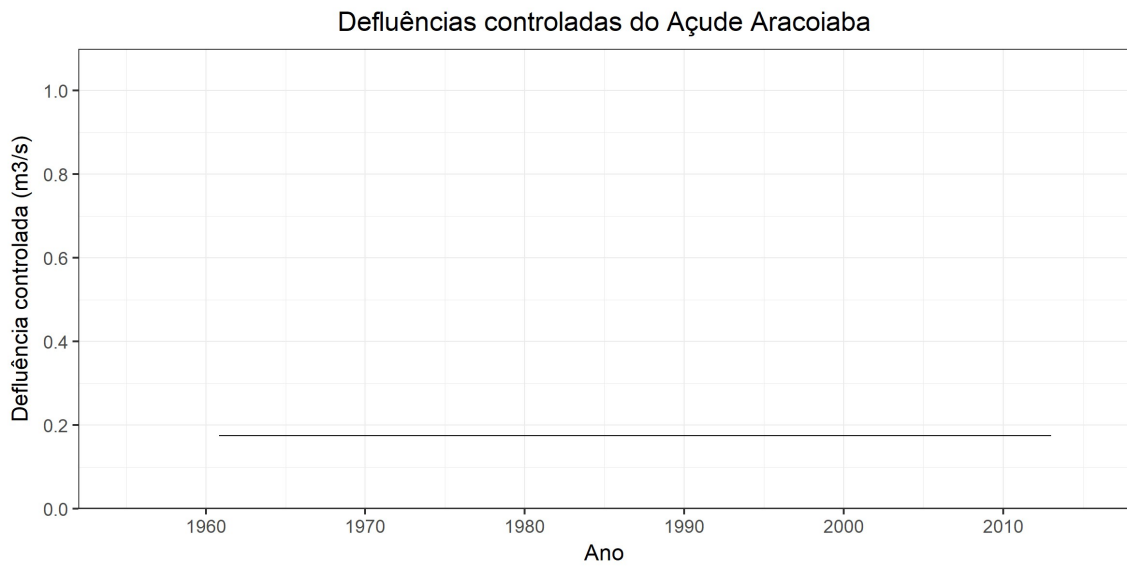
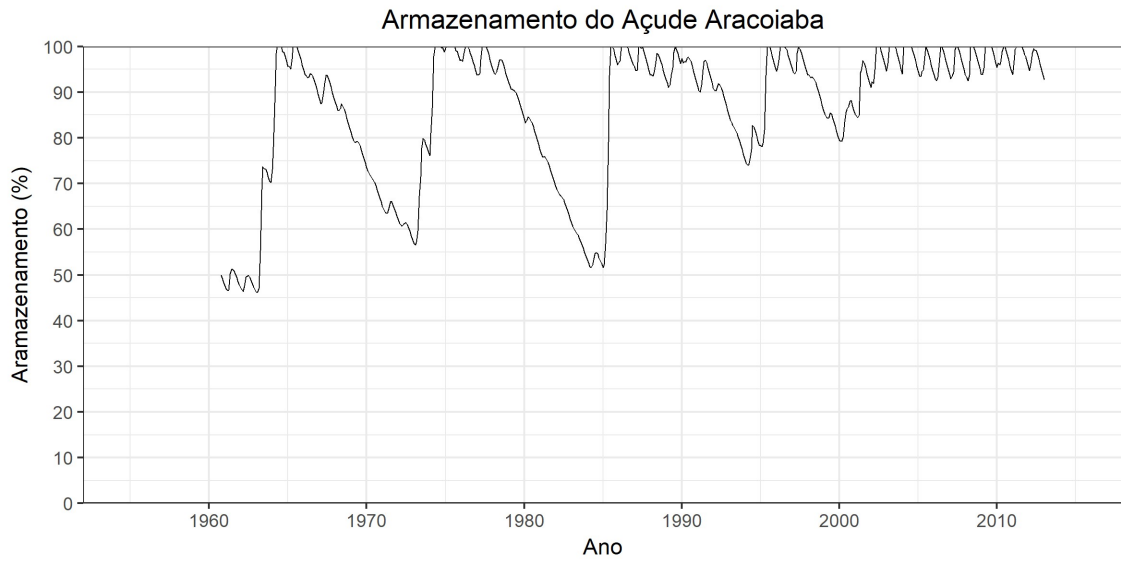
Como esperado, a bacia do Açude Arneiroz II apresenta uma saturação bem mais expressiva que a dos demais mananciais.

Por fim, conclui-se que a adoção da *Hipótese 1* não deve gerar viés na simulação dos reservatórios, exceto para o Arneiroz II, que pode apresentar alguma diferença de resultado em função da operação dos reservatórios a montante.

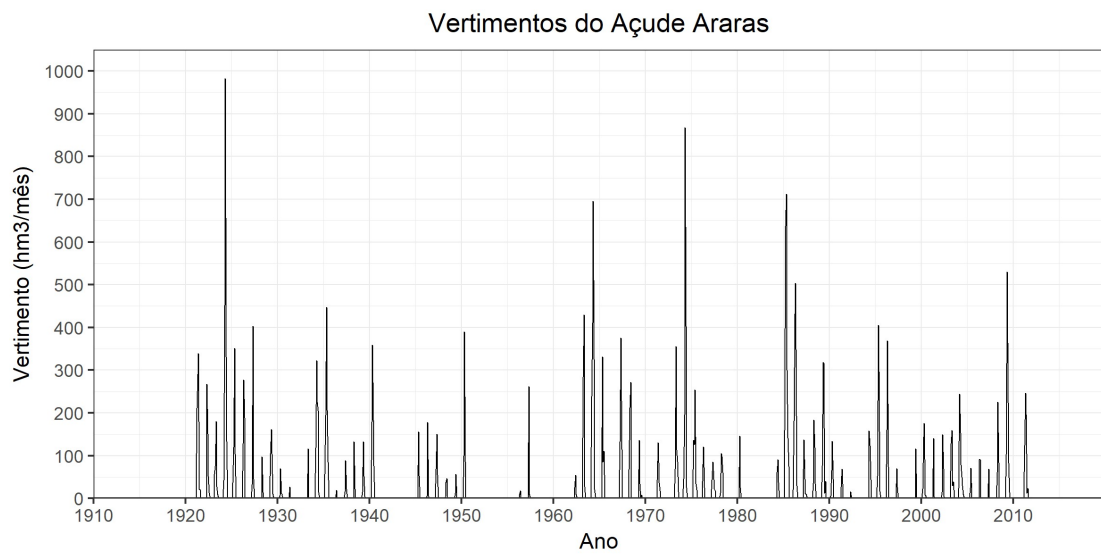
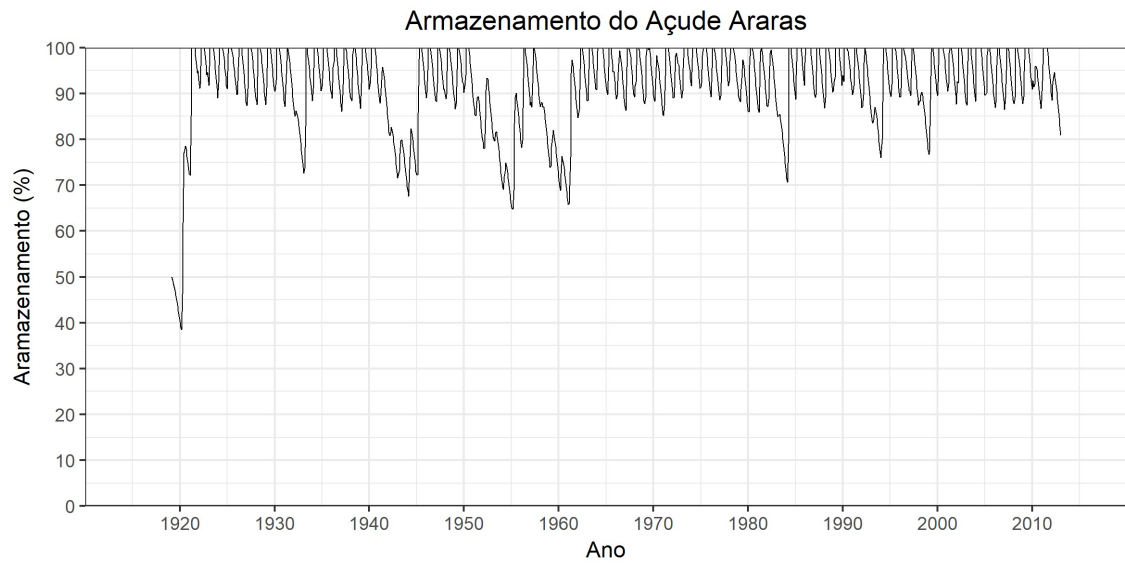
## APÊNDICE III – RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES – RETIRADA IMPOSTA IGUAL À DEMANDA DE ABASTECIMENTO HUMANO

### Açude Angicos:

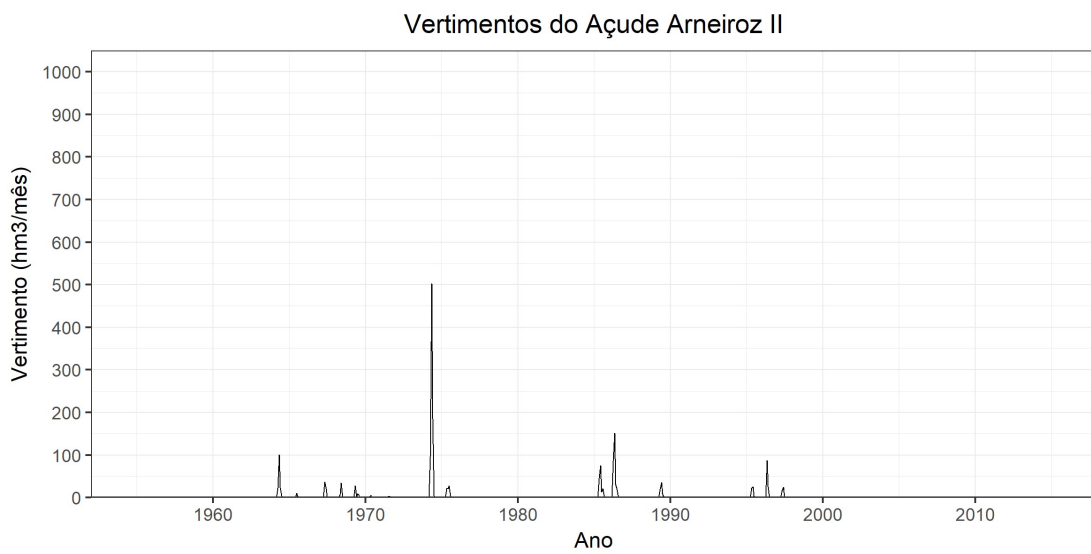
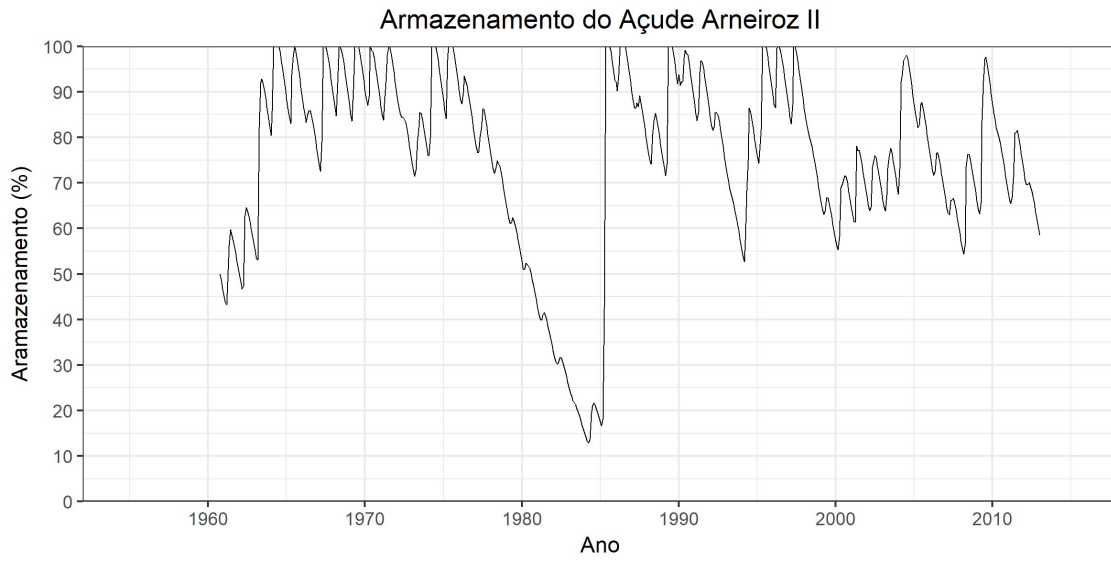


**Açude Aracoiaba:**

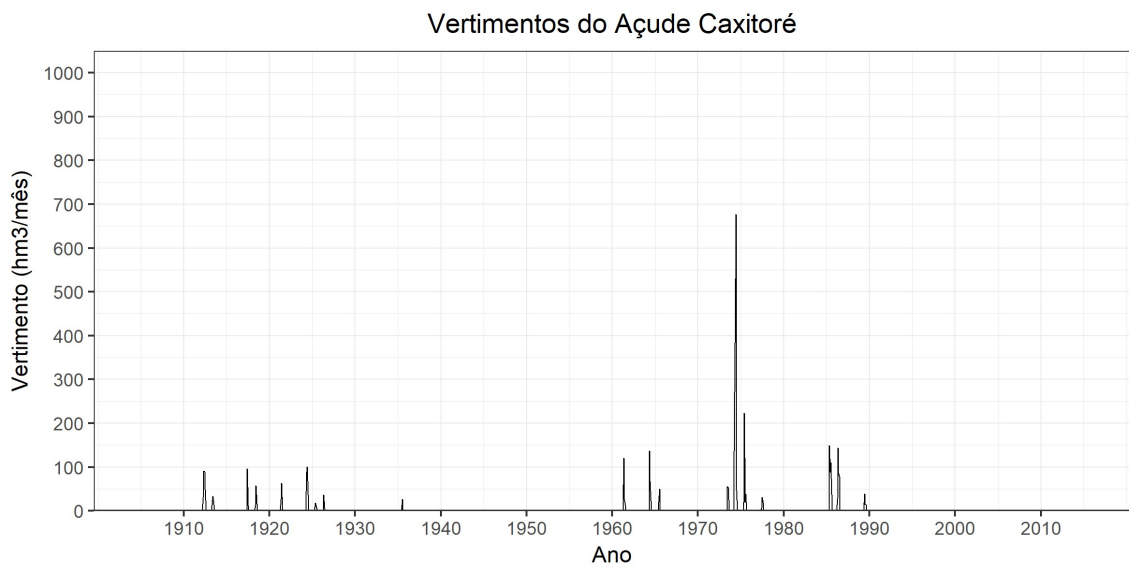
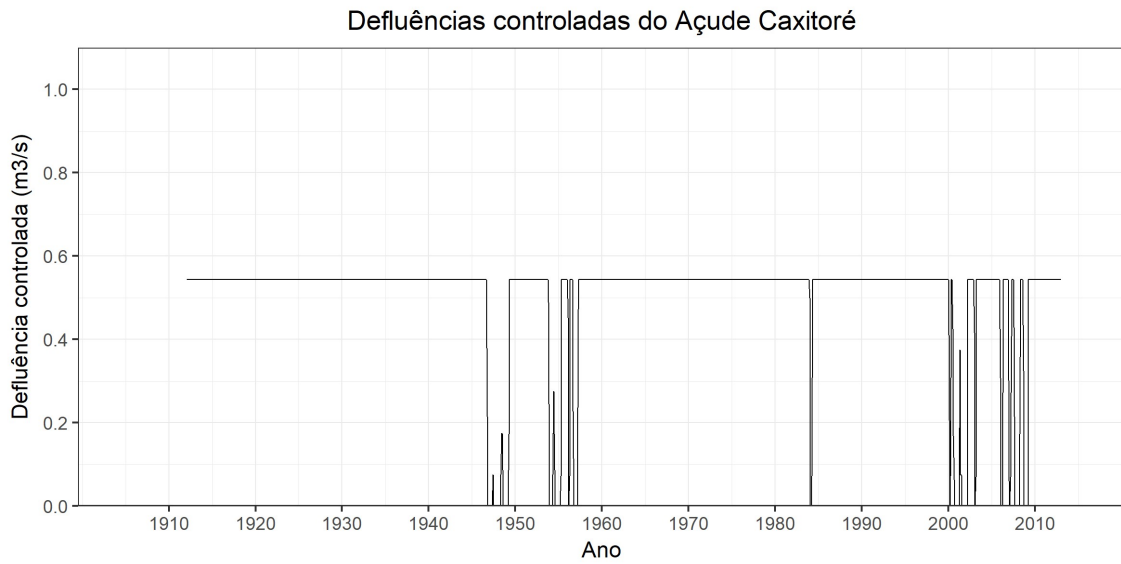
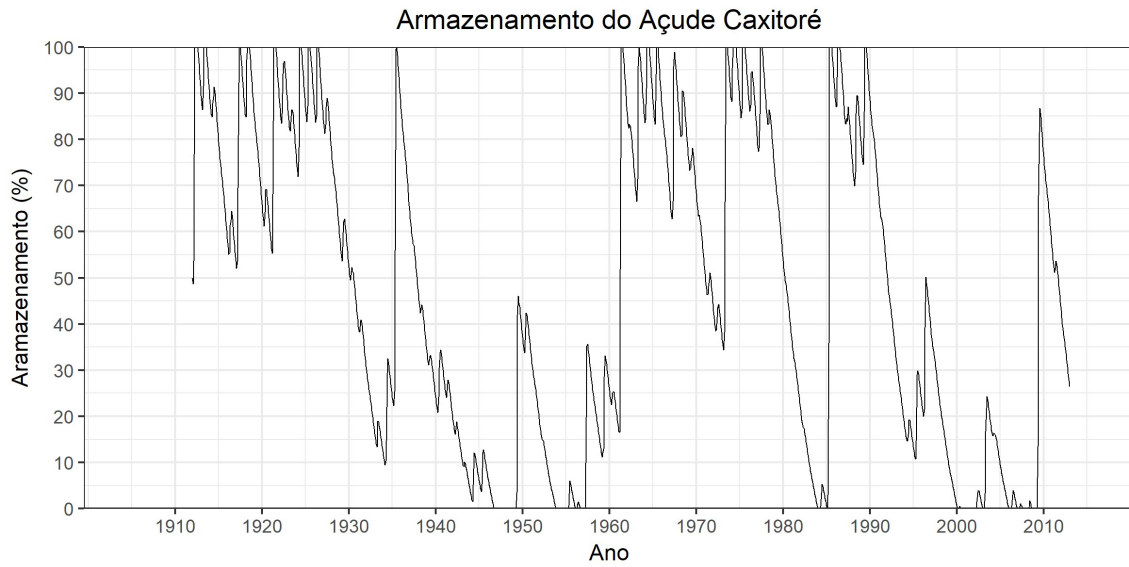
## Açude Araras:



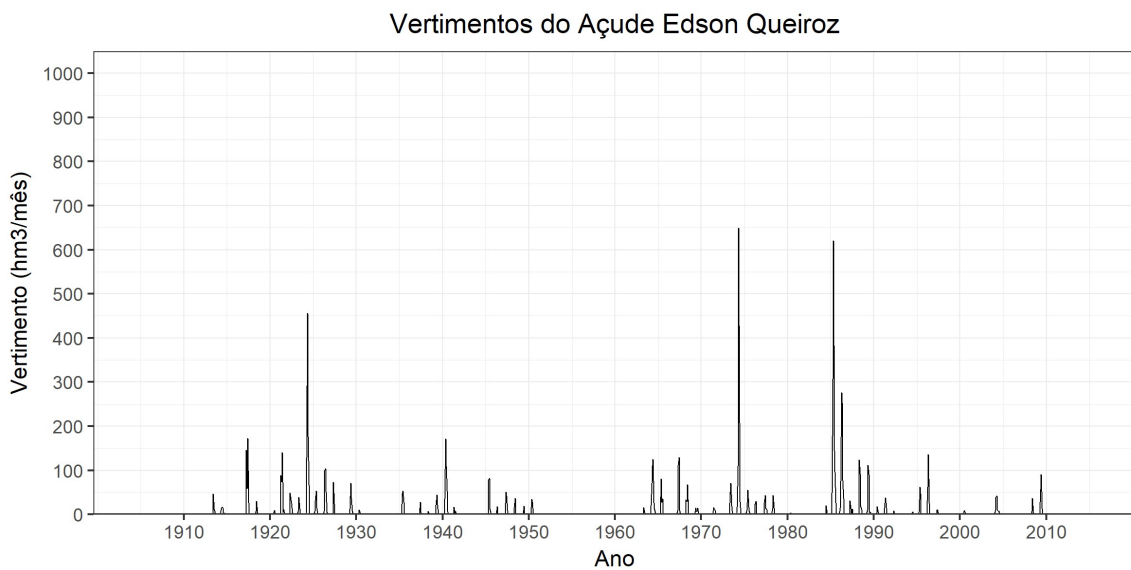
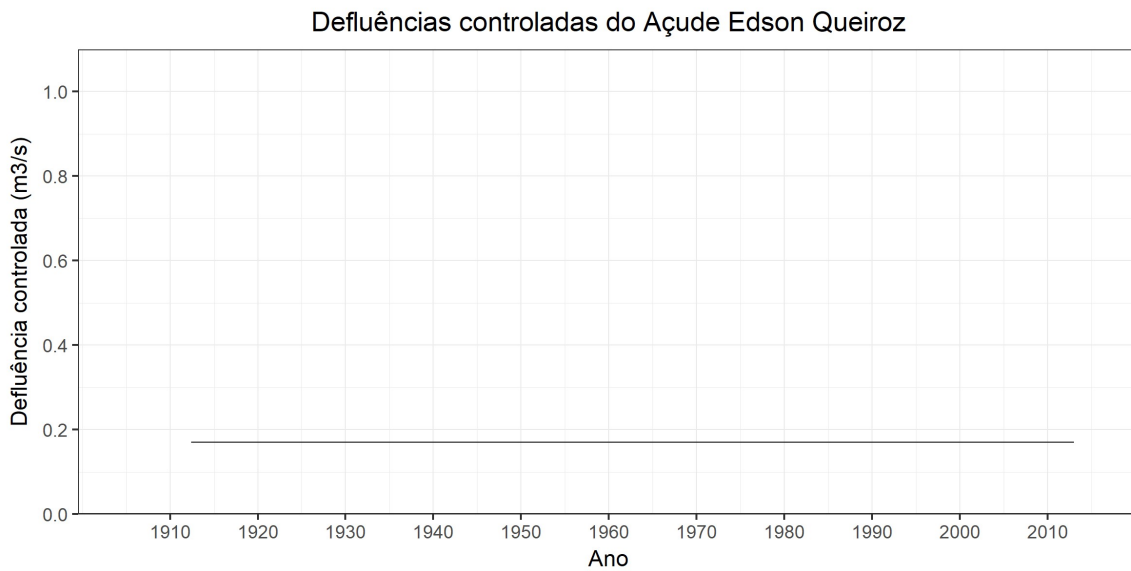
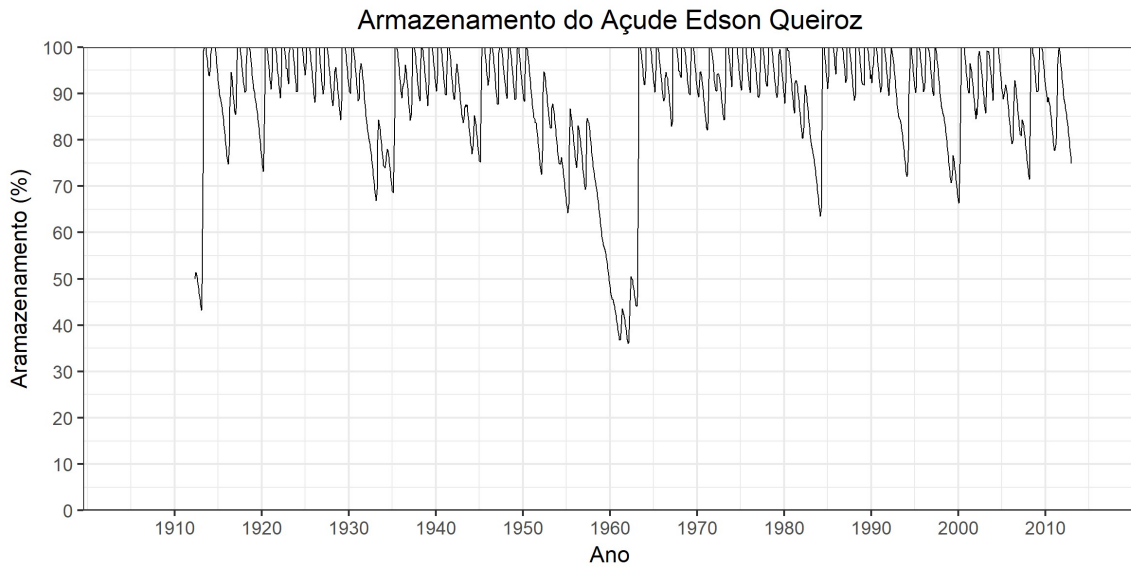
## Açude Arneiroz II:



## Açude Caxitoré:

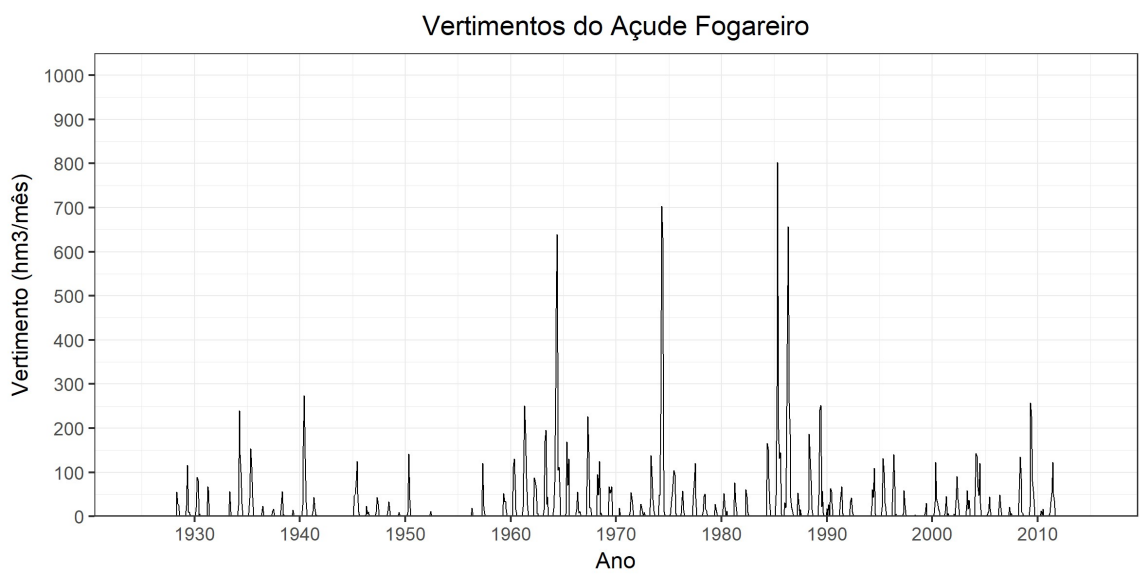
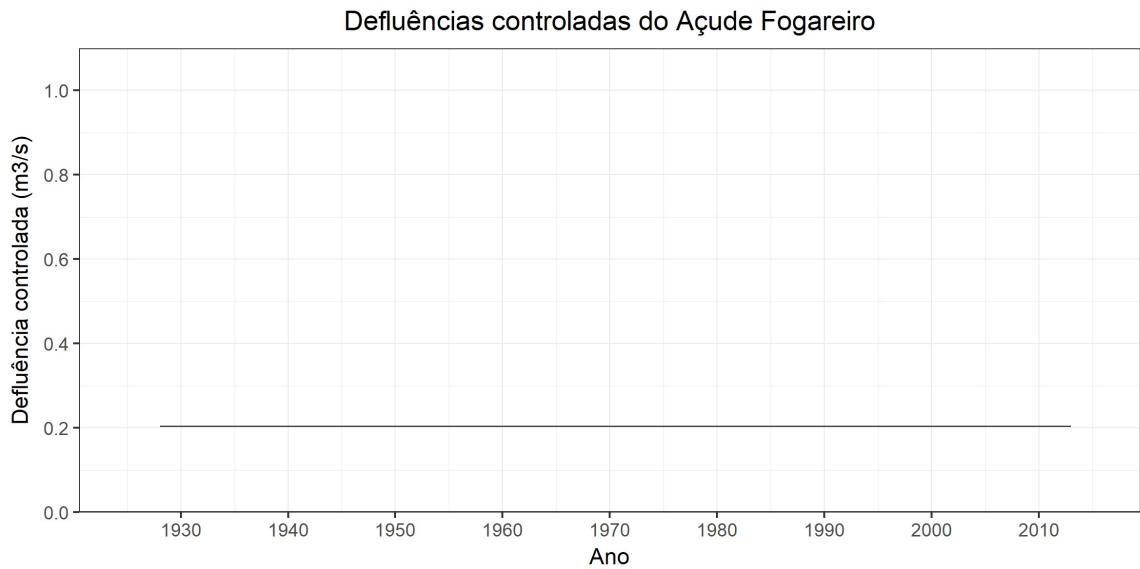
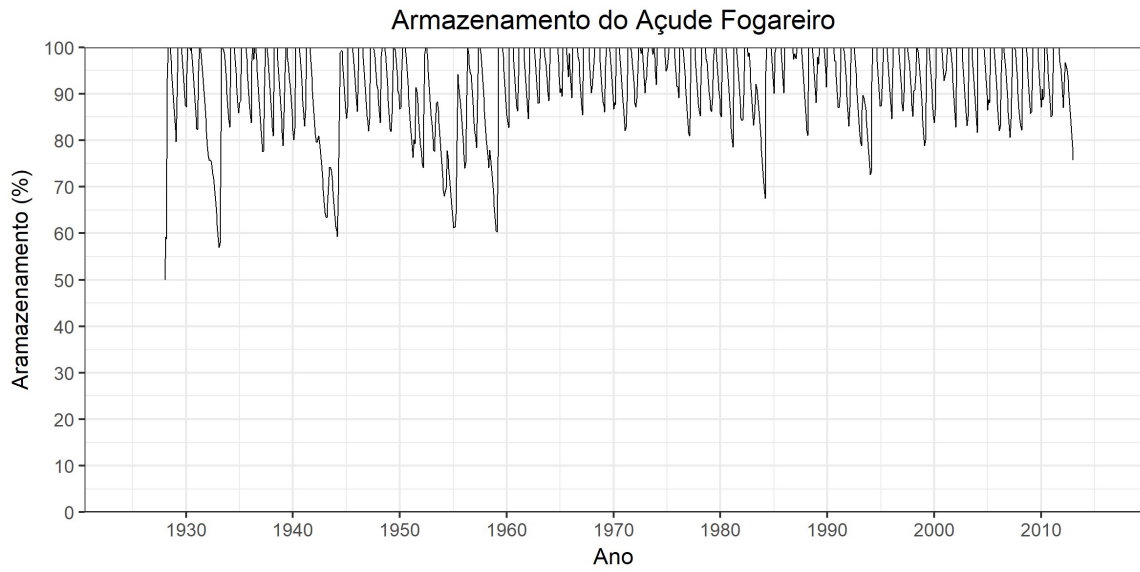


## Açude Edson Queiroz:

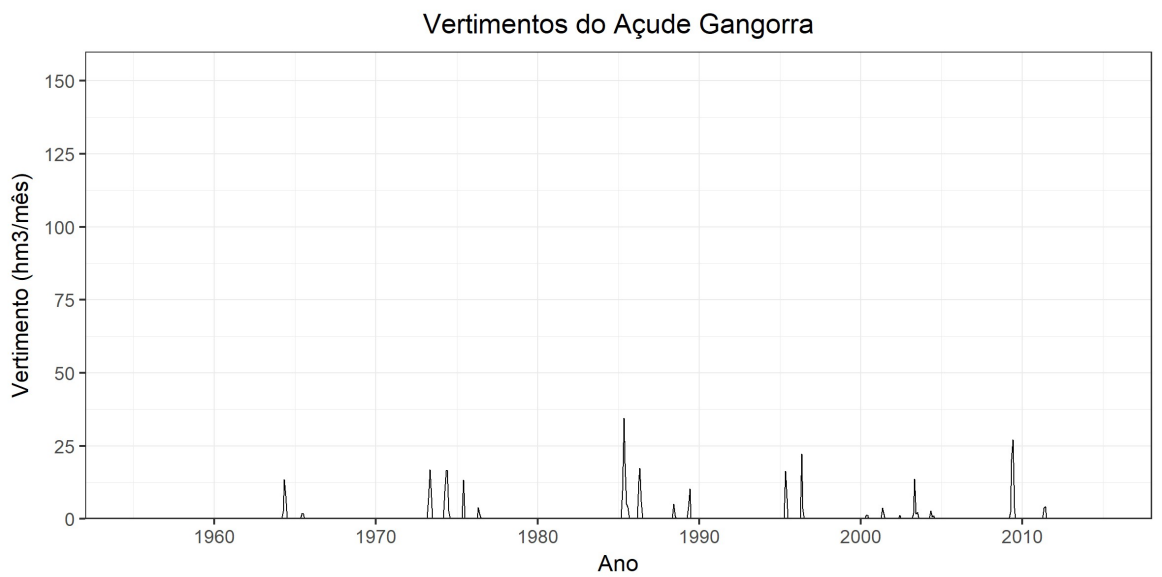
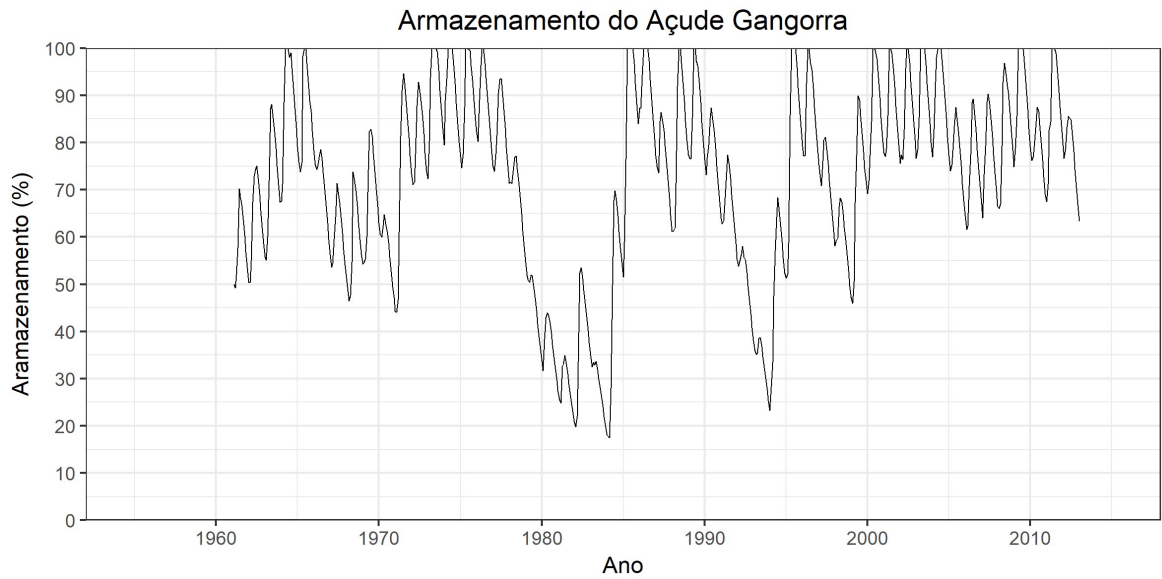


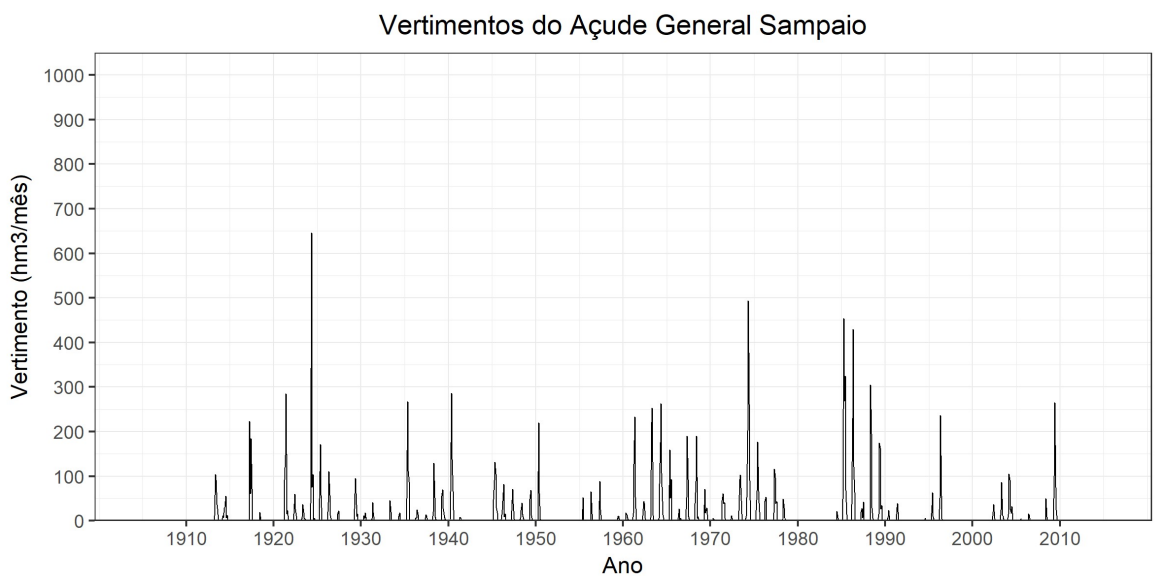
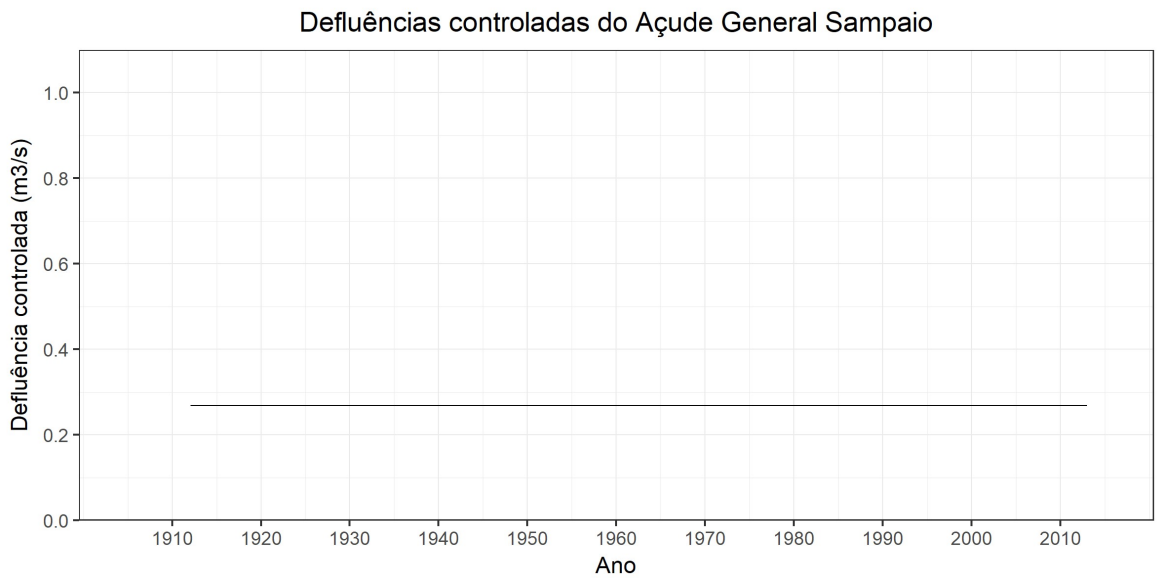
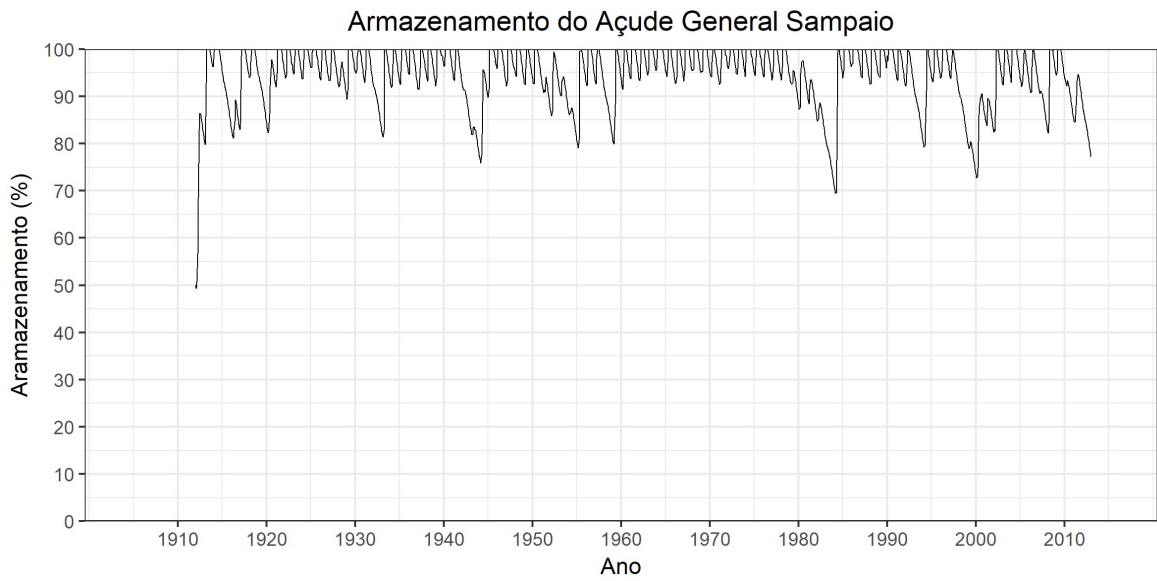


## Açude Fogareiro:



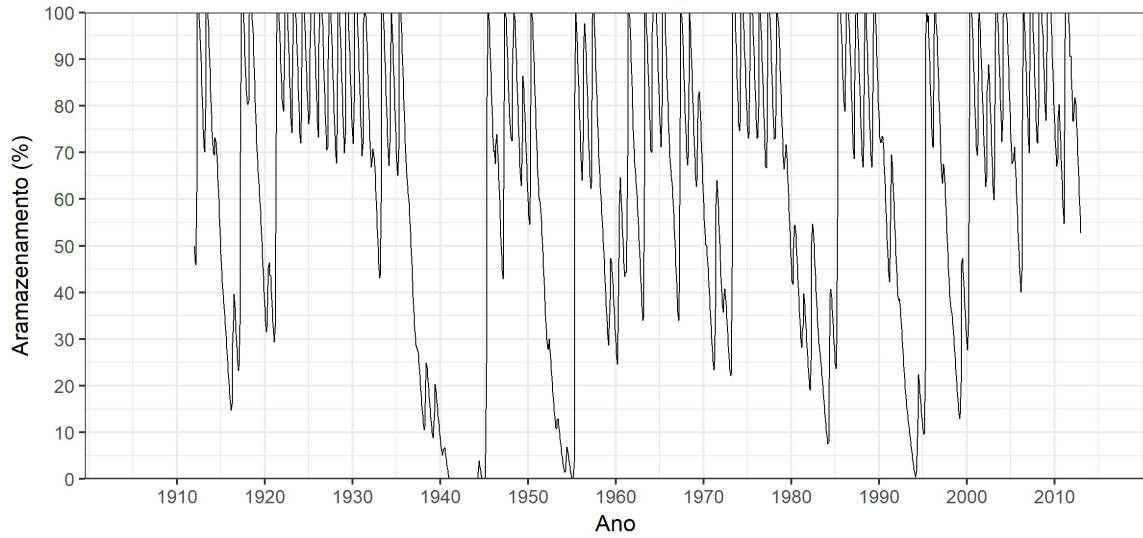
## Açude Gangorra:



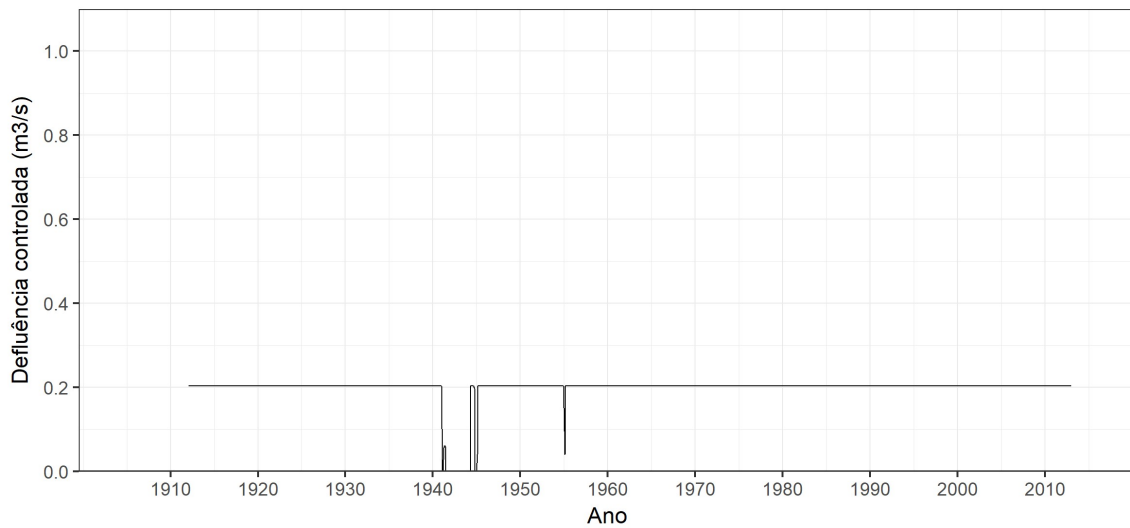
**Açude General Sampaio:**

**Açude Itaúna:**

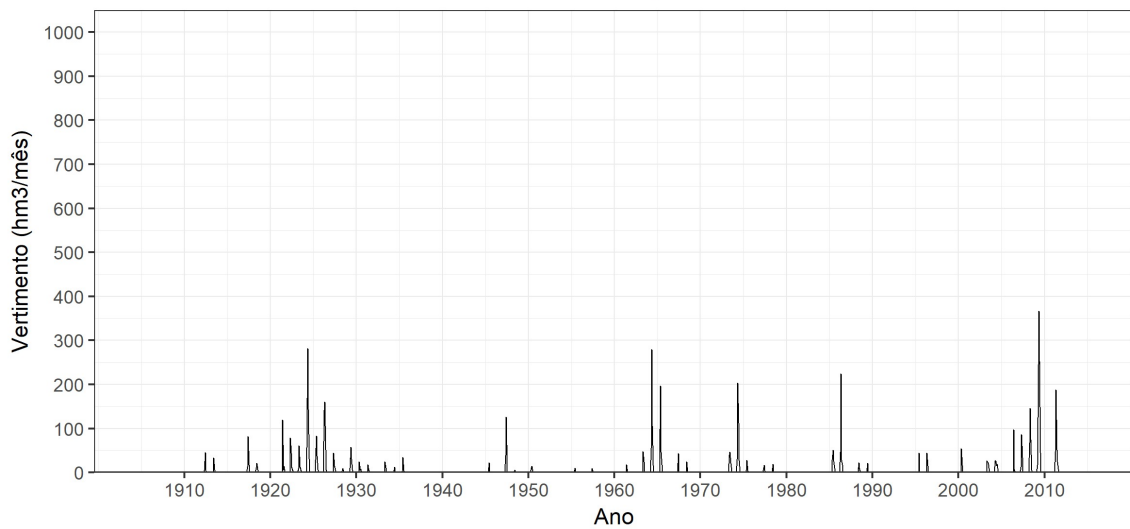
Armazenamento do Açude Itaúna

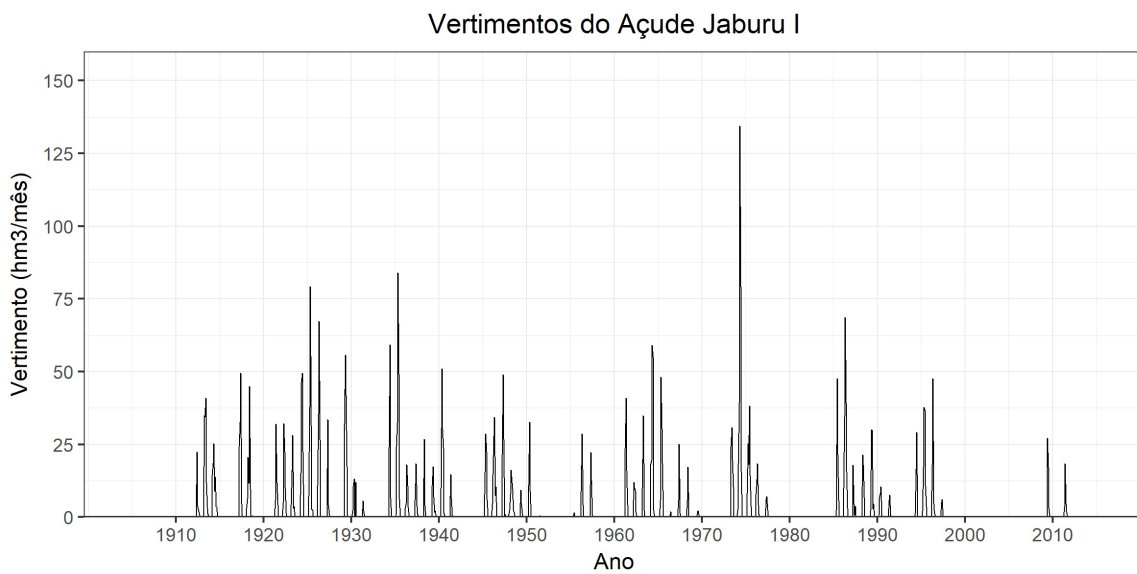
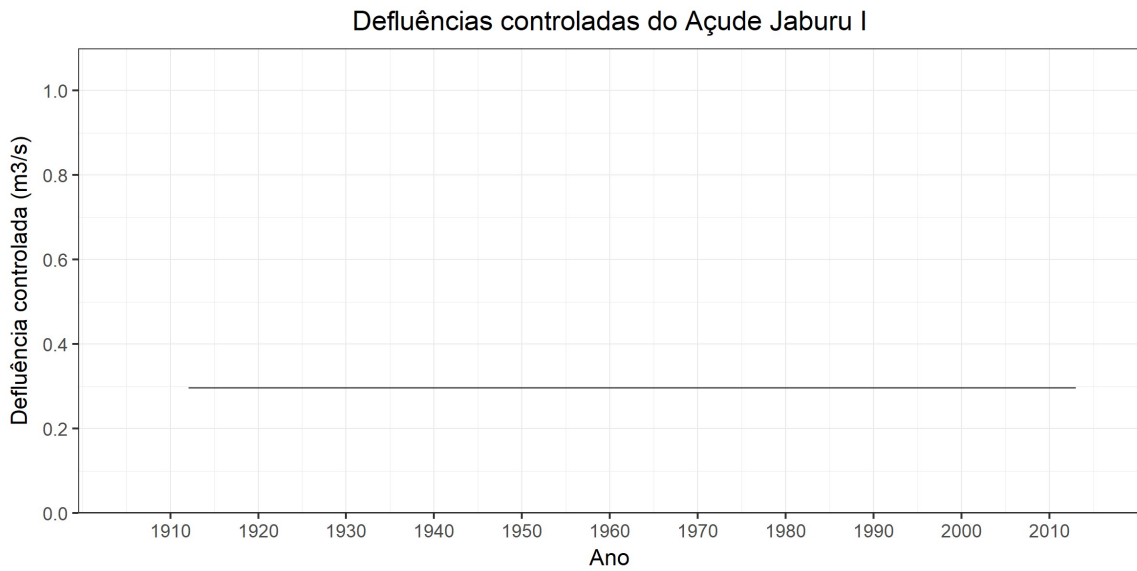
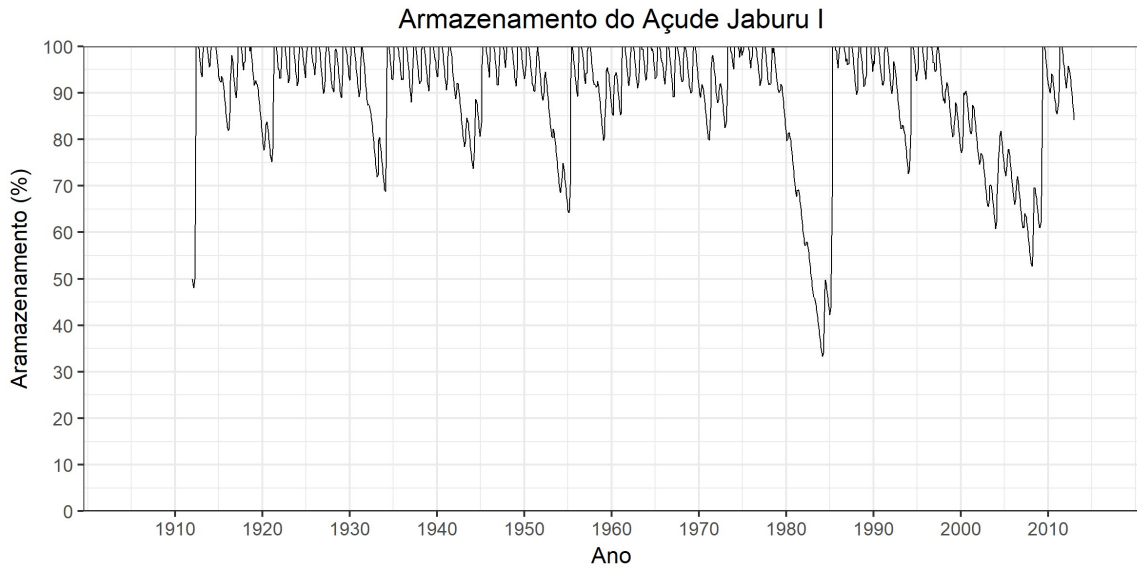


Defluências controladas do Açude Itaúna

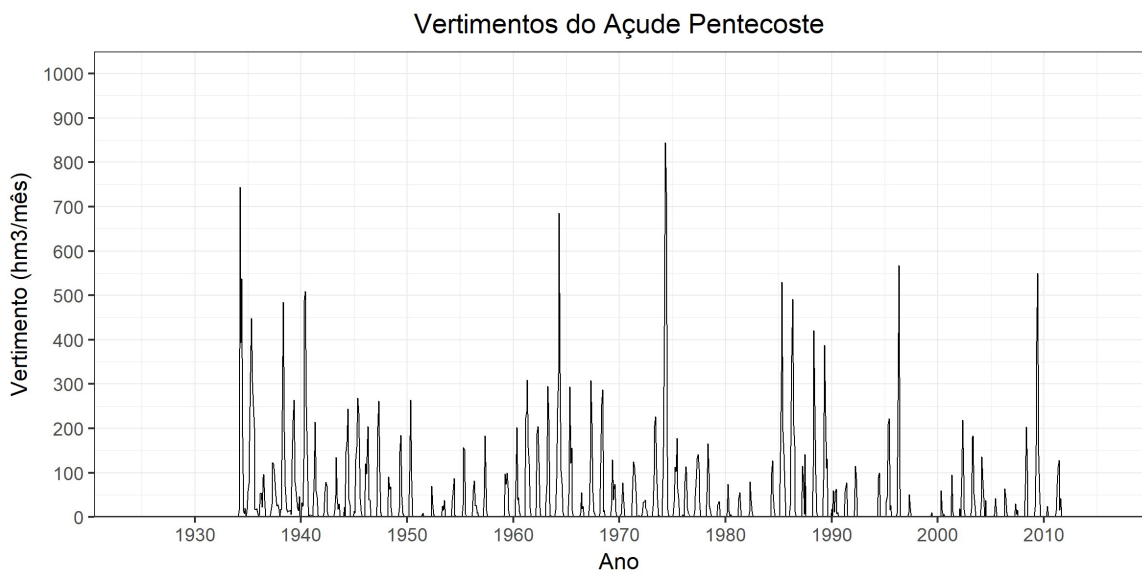
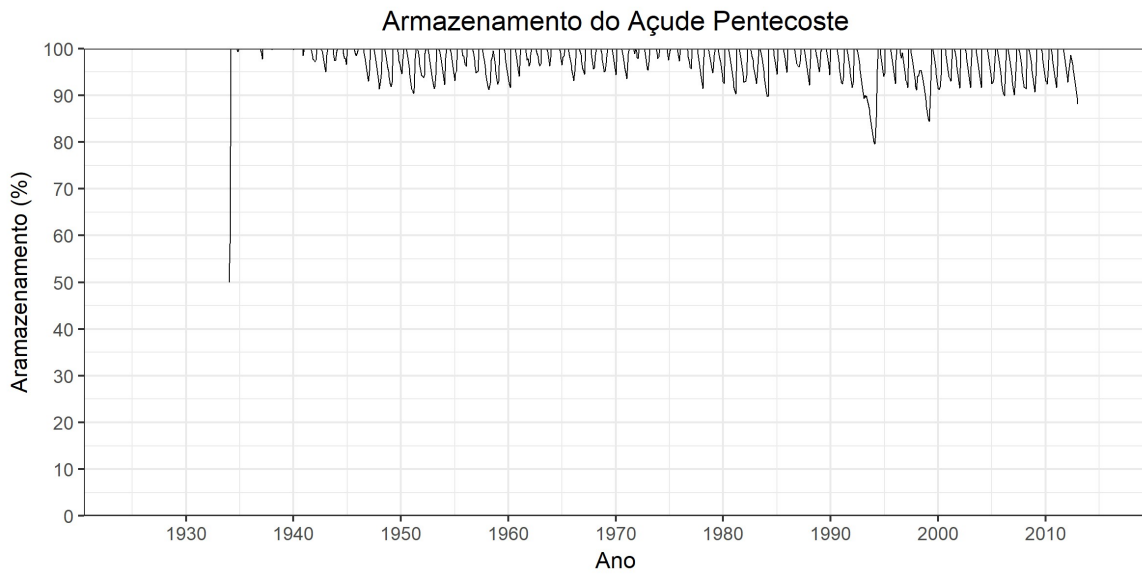


Vertimentos do Açude Itaúna



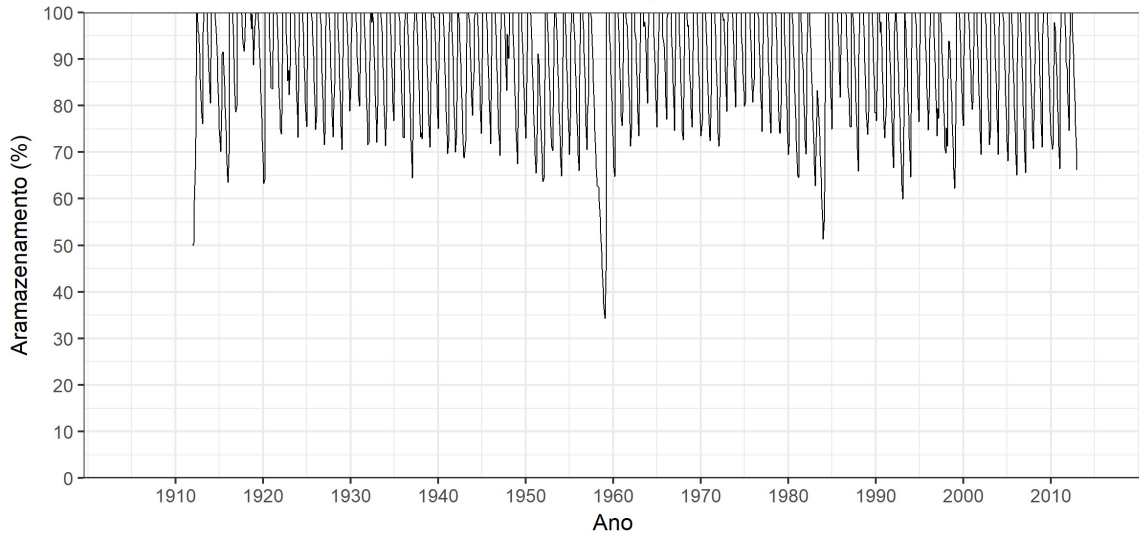
**Açude Jaburu I:**

## Açude Pentecostes:

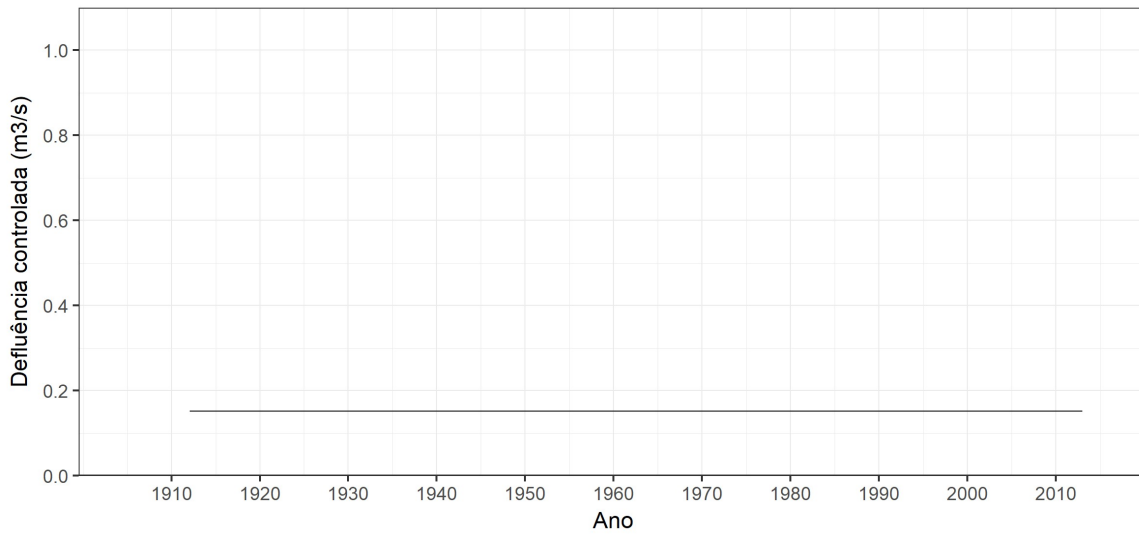


**Açude Tucuduba:**

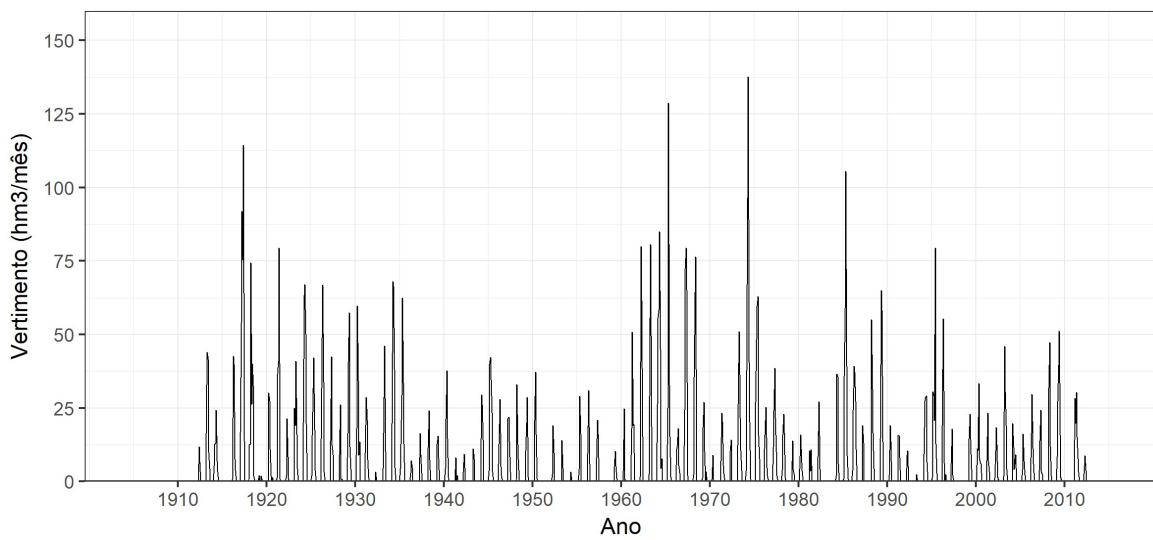
Armazenamento do Açude Tucuduba



Defluências controladas do Açude Tucuduba

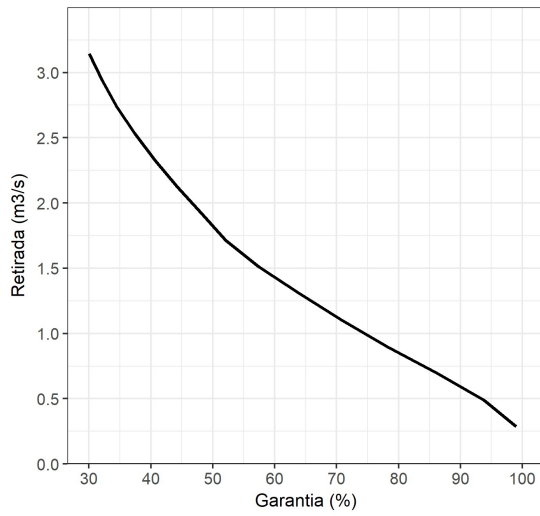


Vertimentos do Açude Tucuduba

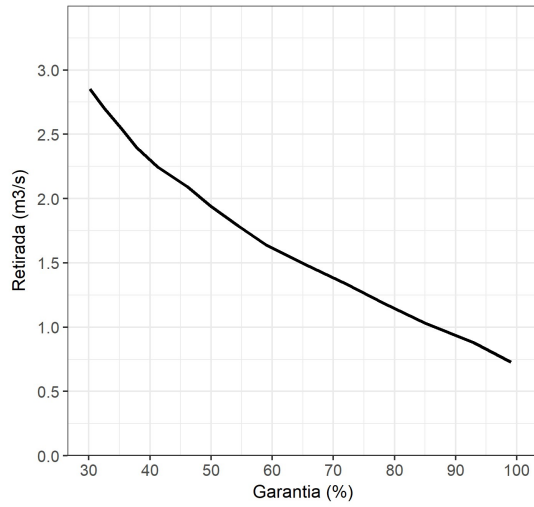


## APÊNDICE IV – CURVAS GARANTIA *versus* RETIRADA

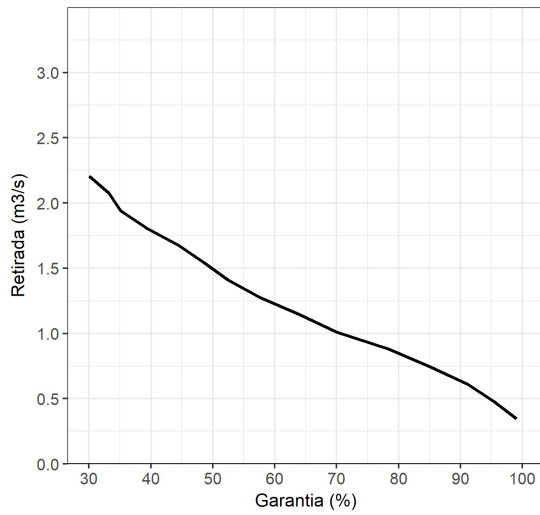
Curva de Garantia do Açude Angicos



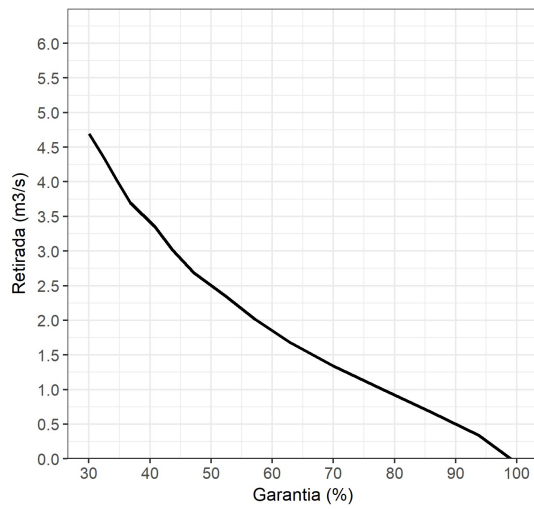
Curva de Garantia do Açude Aracoiaba



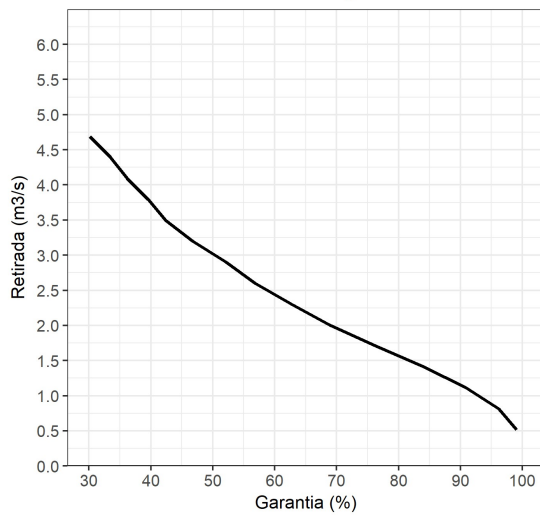
Curva de Garantia do Açude Gangorra



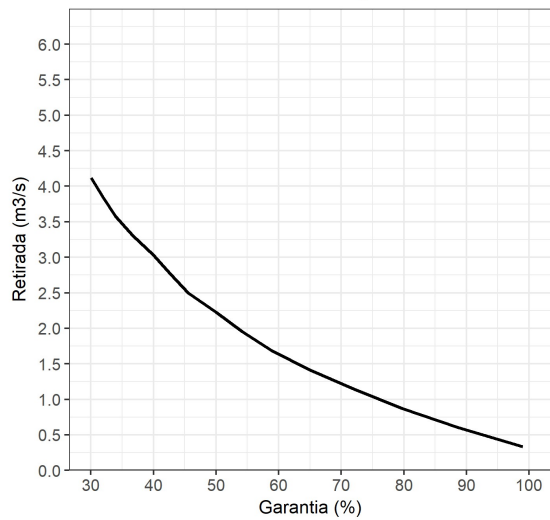
Curva de Garantia do Açude Itaúna



Curva de Garantia do Açude Arneiroz II

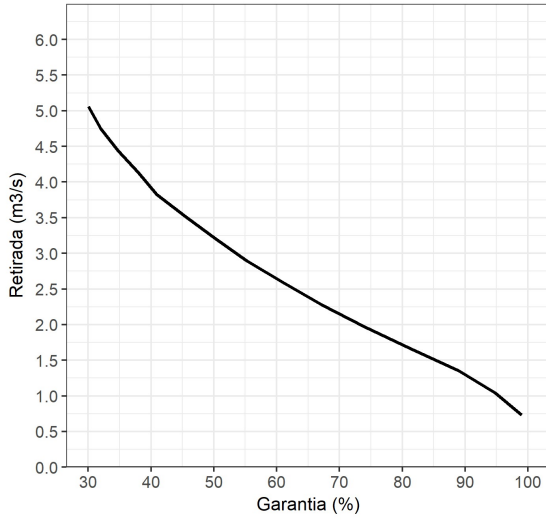


Curva de Garantia do Açude Caxitoré

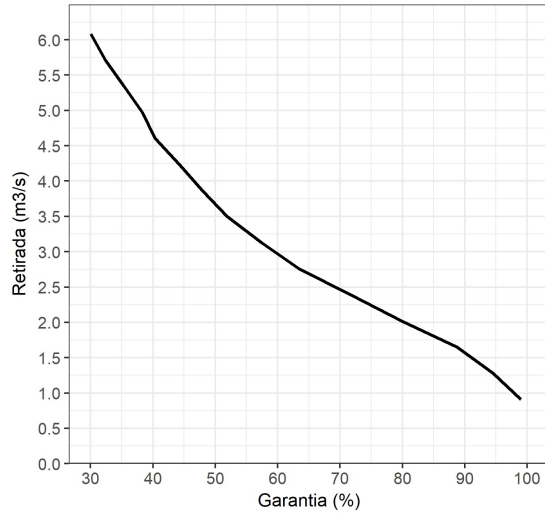




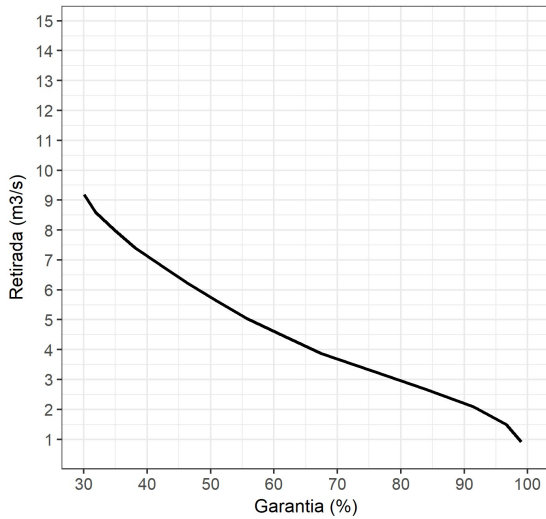
Curva de Garantia do Açude Jaburu I



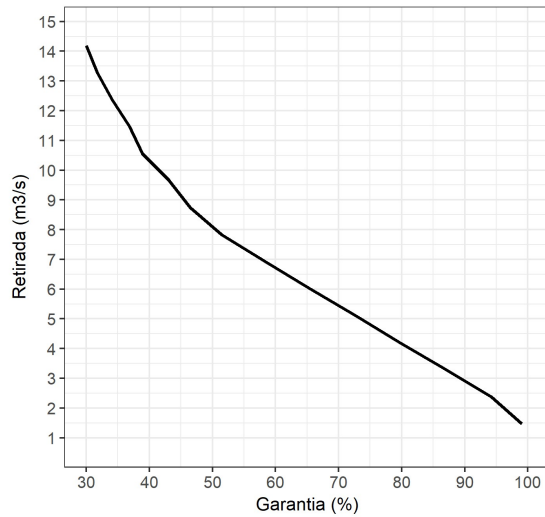
Curva de Garantia do Açude Tucunduba



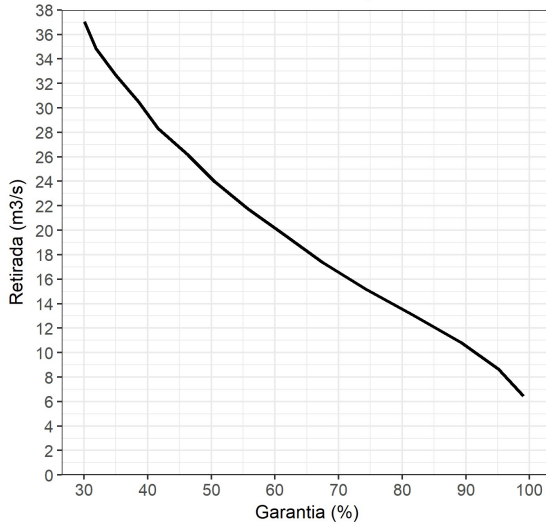
Curva de Garantia do Açude Edson Queiroz



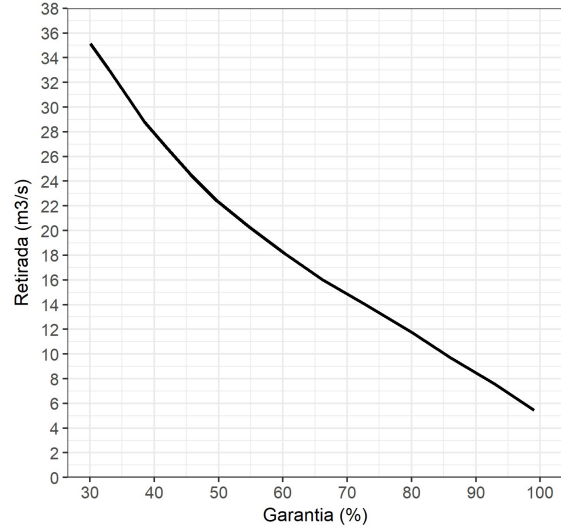
Curva de Garantia do Açude Fogareiro

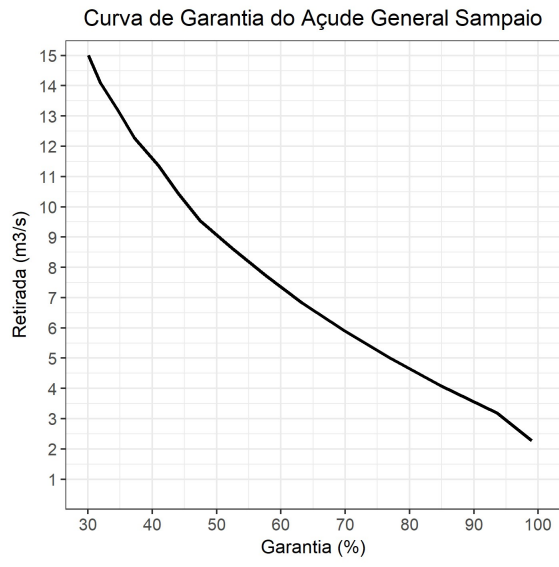


Curva de Garantia do Açude Araras



Curva de Garantia do Açude Pentecoste





## APÊNDICE V – VAZÕES CARACTERÍSTICAS

São apresentadas, para cada manancial, as vazões  $Q_{80}$ ,  $Q_{90}$  e  $Q_{firme}$ , correspondentes as garantias de 80%, de 90% e de vazão firme. A título de comparação são apresentadas igualmente as demandas de abastecimento humano ( $Q_{hum}$ ).

<i>Manancial</i>	$Q_{80} (m^3/s)$	$Q_{90} (m^3/s)$	$Q_{firme} (m^3/s)$	$Q_{hum}(m^3/s)$
Aç. Angicos	0,85	0,6	0,19	0,11
Aç. Aracoiaba	1,15	0,94	0,69	0,17
Aç. Araras	13,56	10,52	5,53	0,30
Aç. Arneiroz II	1,58	1,15	0,45	0,23
Aç. Caxitoré	0,86	0,56	0,29	0,54
Aç. Edson Queiroz	2,94	2,19	0,78	0,17
Aç. Fogareiro	4,15	2,93	1,19	0,20
Aç. Gangorra	0,85	0,64	0,31	0,12
Aç. General Sampaio	4,6	3,59	1,89	0,27
Aç. Itaúna	0,91	0,51	-	0,20
Aç. Jaburu I	1,69	1,3	0,63	0,30
Aç. Pentecoste	11,76	8,42	4,73	0,31
Aç. Tucunduba	2,02	1,58	0,57	0,15

**APÊNDICE VI – TEMPOS DE PERMANÊNCIA – RETIRADA IMPOSTA IGUAL À  
DEMANDA DE ABASTECIMENTO HUMANO**

Nível de Armazenamento	Permanência do armazenamento abaixo ou igual ao nível				
	Angicos	Aracoiaba	Araras	Arneiroz II	Caxitoré
10%	0%	0%	0%	0%	21%
20%	1%	0%	0%	3%	31%
30%	5%	0%	0%	5%	40%
40%	10%	0%	0%	7%	48%
50%	16%	4%	1%	11%	54%
60%	24%	10%	1%	17%	59%
70%	31%	17%	3%	31%	66%
80%	50%	27%	12%	50%	73%
90%	68%	41%	33%	73%	86%
100%	100%	100%	100%	100%	100%

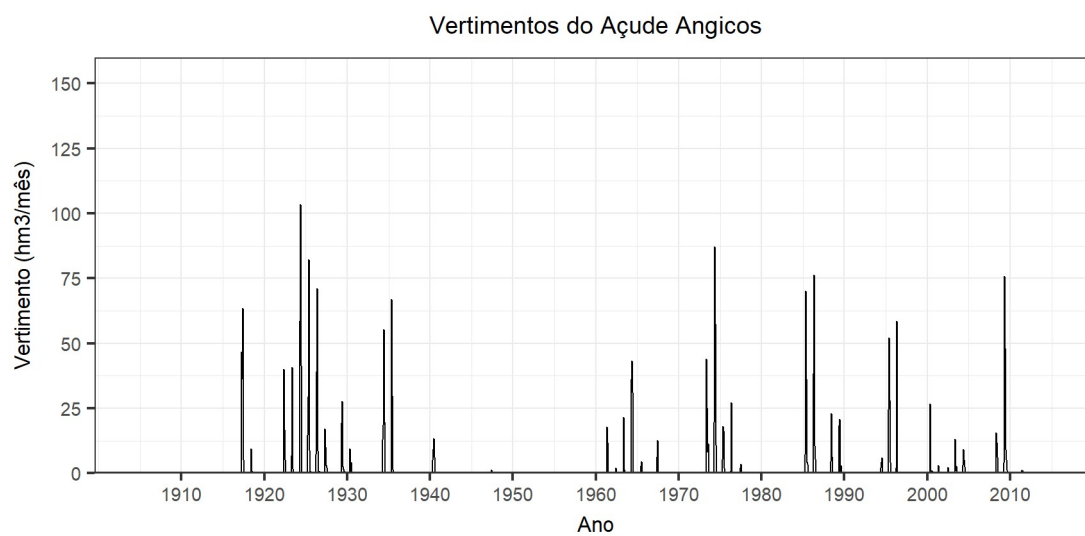
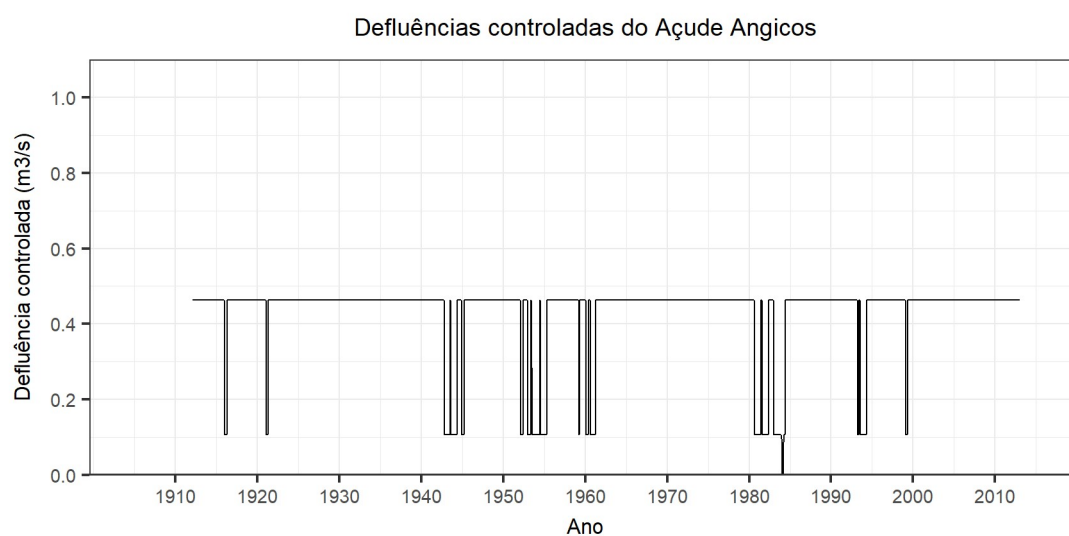
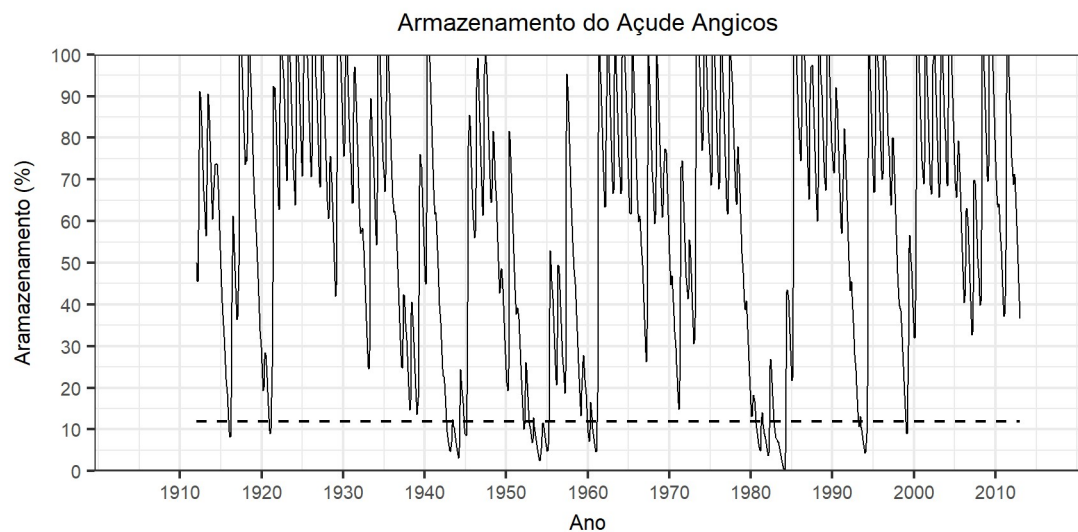
Nível de Armazenamento	Permanência do armazenamento abaixo ou igual ao nível				
	Edson Queiroz	Fogareiro	Gangorra	General Sampaio	Itaúna
10%	0%	0%	0%	0%	8%
20%	0%	0%	1%	0%	13%
30%	0%	0%	4%	0%	19%
40%	1%	0%	9%	0%	26%
50%	4%	0%	14%	0%	33%
60%	5%	1%	25%	0%	39%
70%	8%	4%	37%	0%	50%
80%	19%	11%	59%	4%	65%
90%	40%	35%	79%	20%	76%
100%	100%	100%	100%	100%	100%

Nível de Armazenamento	Permanência do armazenamento abaixo ou igual ao nível		
	Jaburu I	Pentecostes	Tucunduba
10%	0%	0%	0%
20%	0%	0%	0%
30%	0%	0%	0%
40%	1%	0%	0%
50%	2%	0%	1%
60%	4%	0%	1%
70%	10%	0%	7%
80%	18%	0%	26%
90%	34%	3%	45%
100%	100%	100%	100%

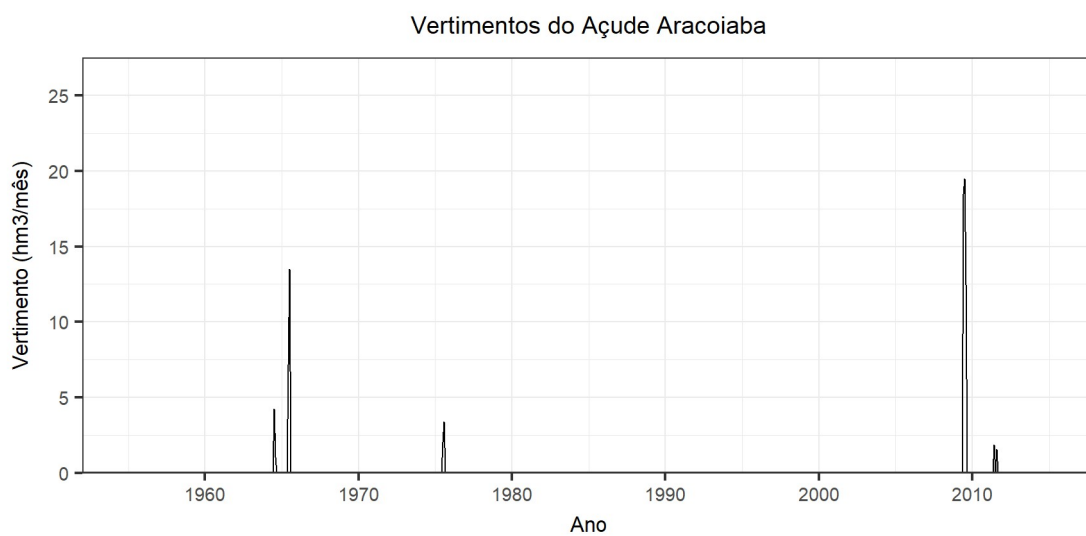
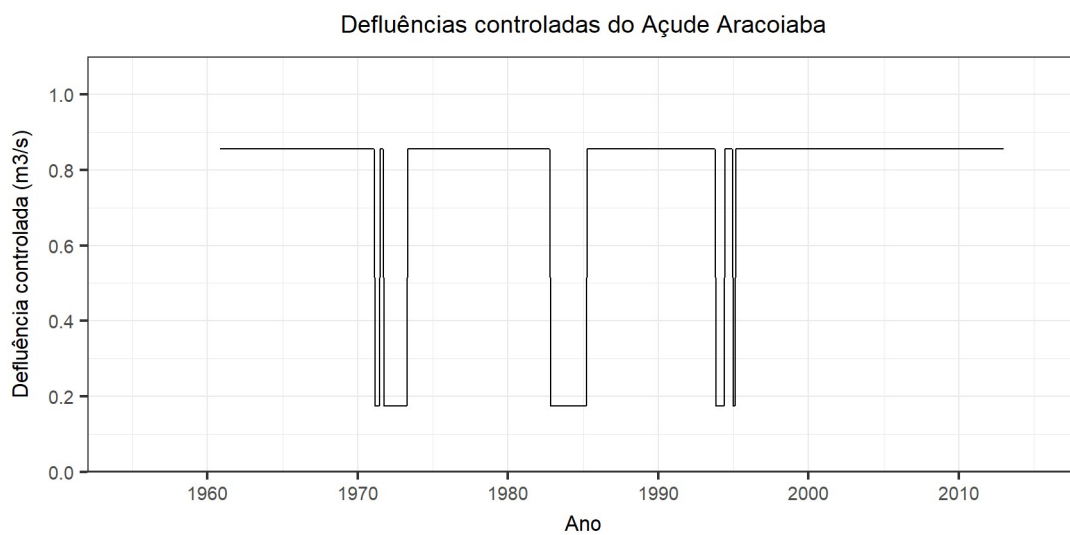
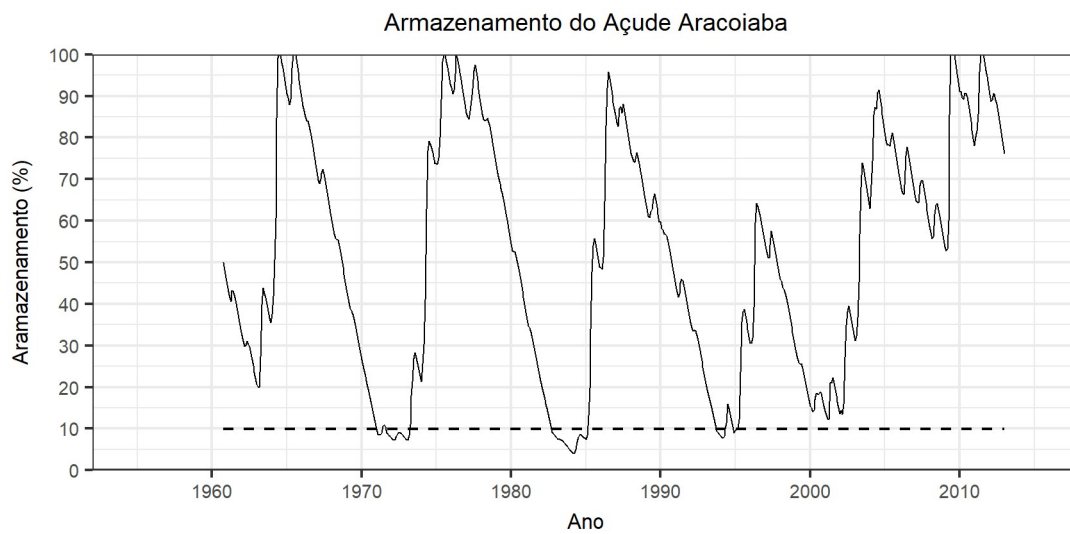


## APÊNDICE VII - RESULTADOS DAS SIMULAÇÕES – OPERAÇÃO ÓTIMA

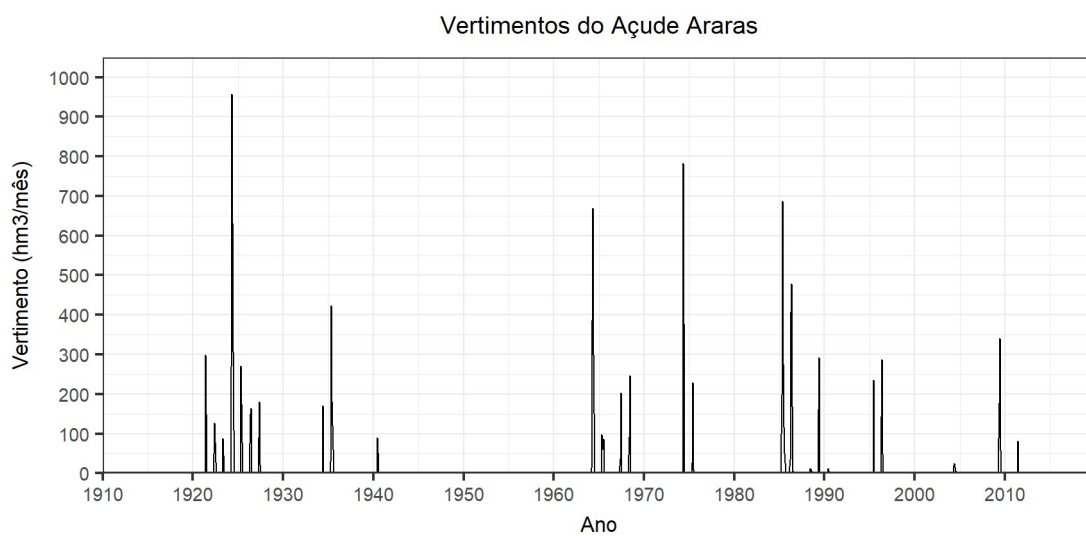
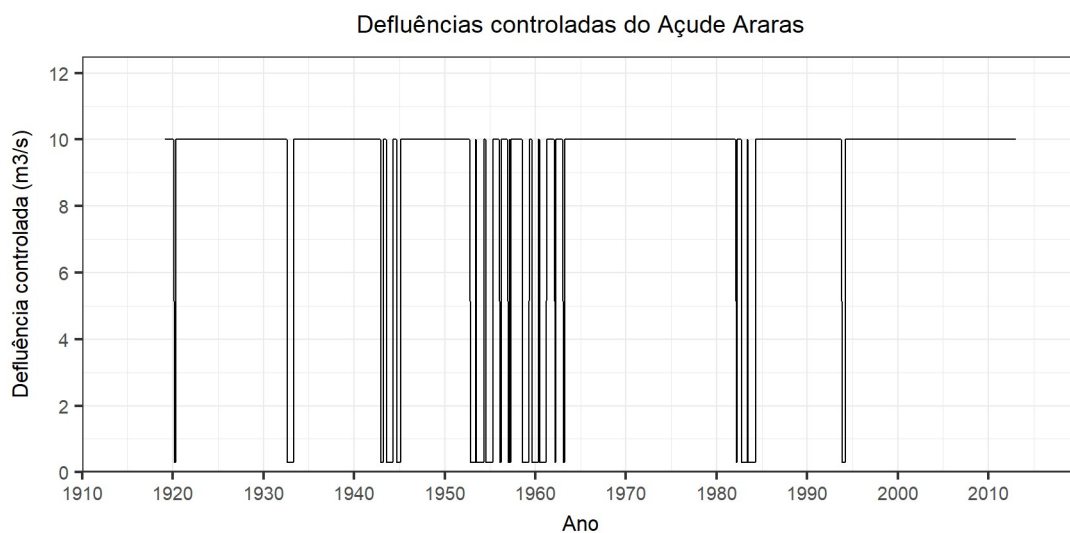
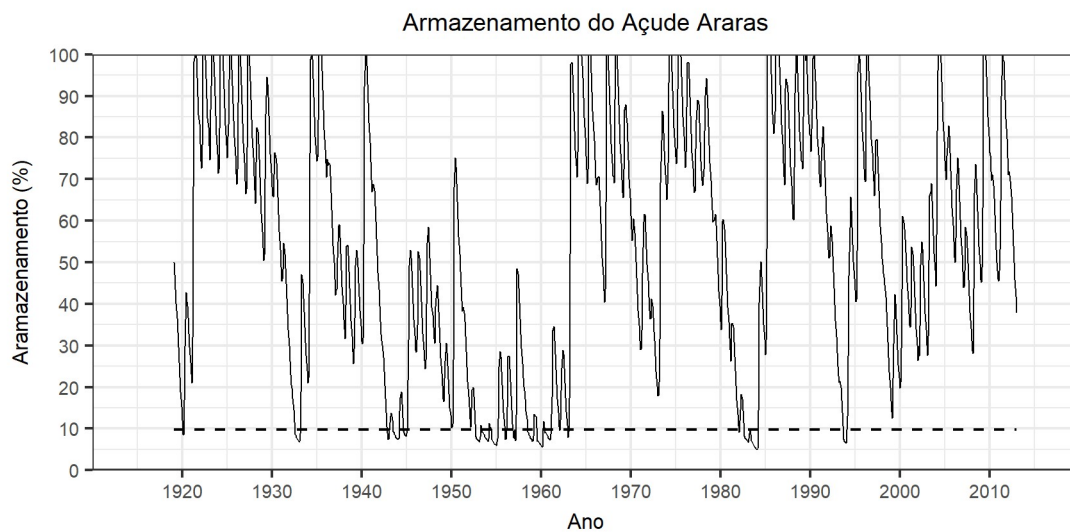
### Açude Angicos:



## Açude Aracoiaba:

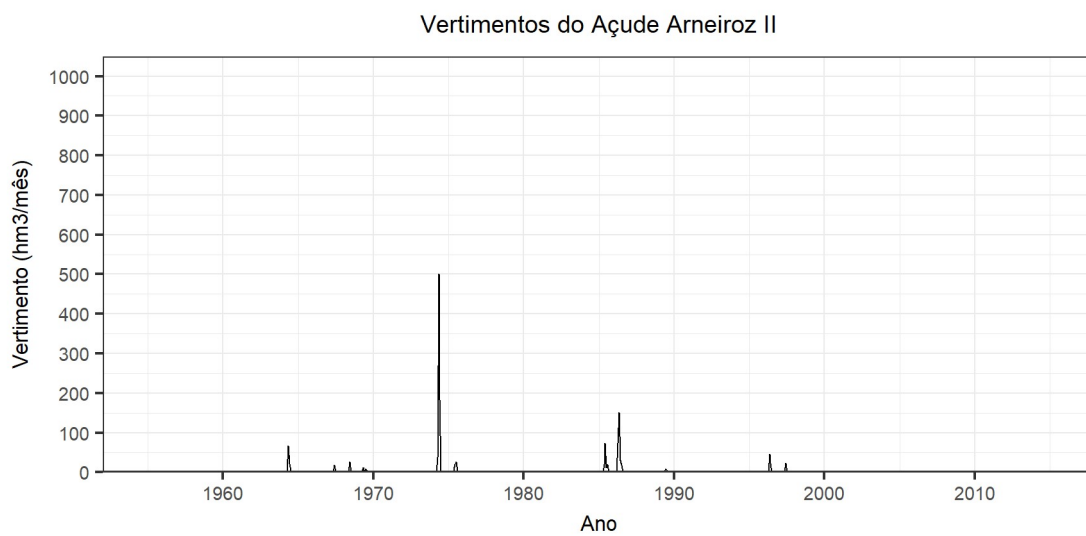
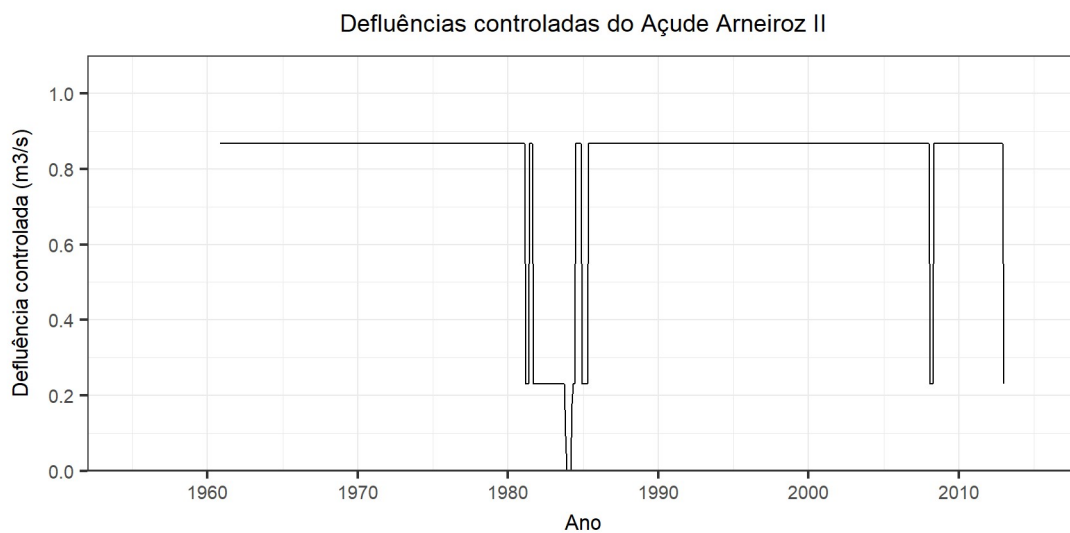
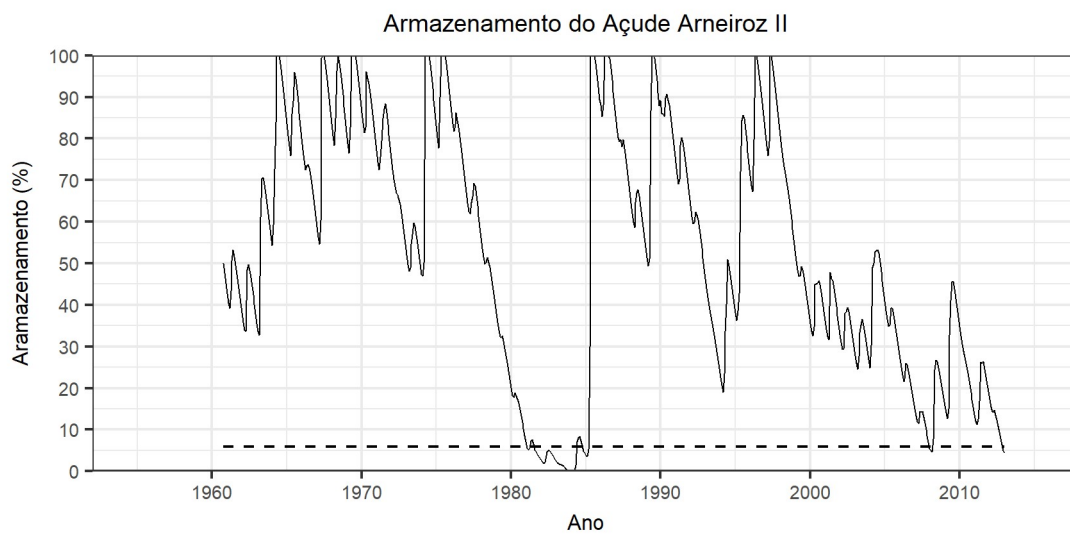


## Açude Araras:

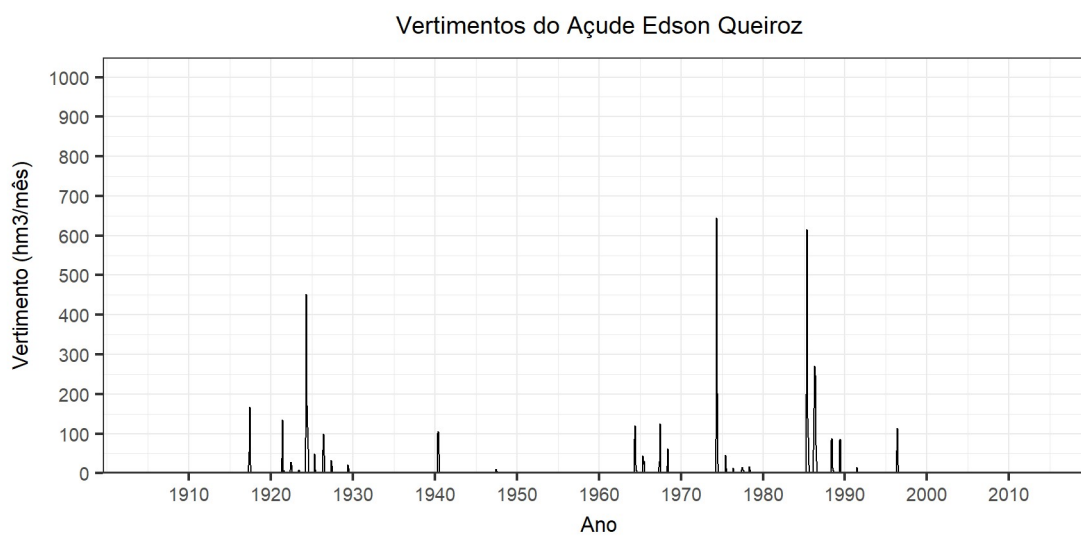
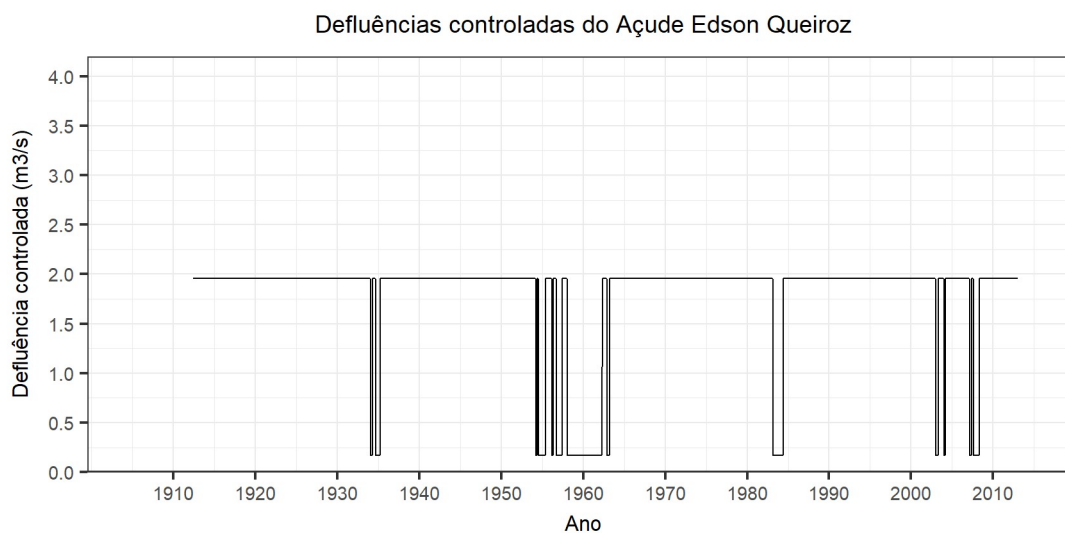
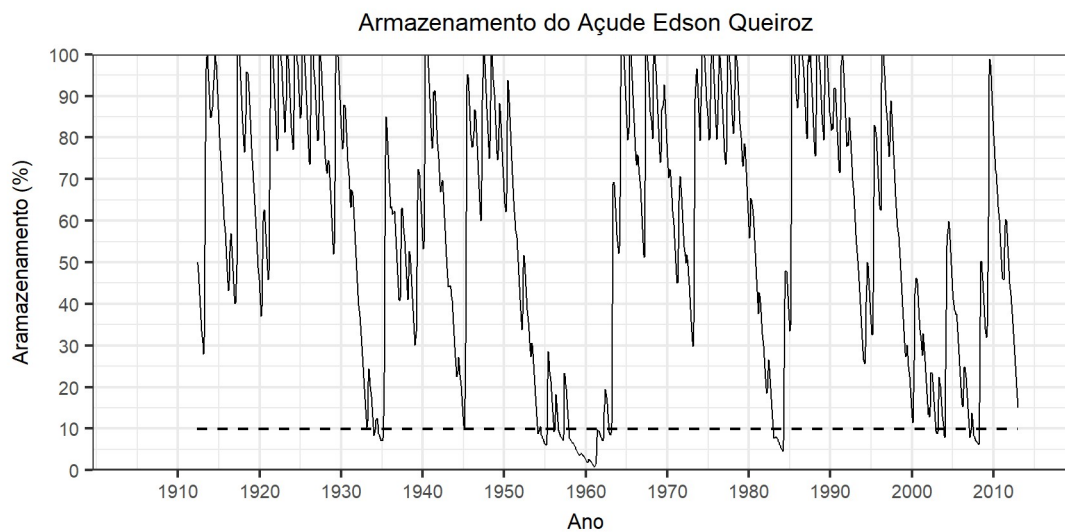




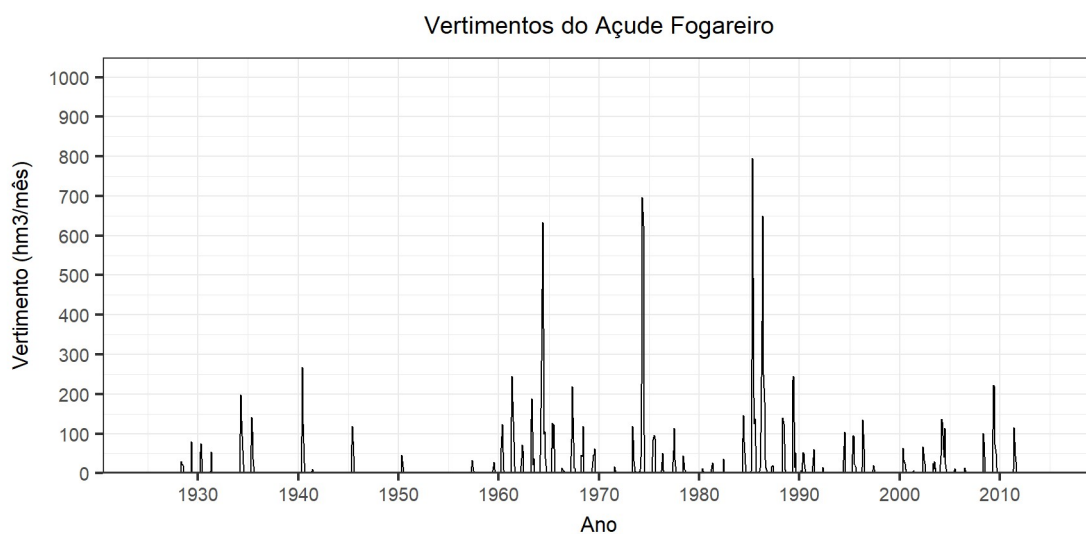
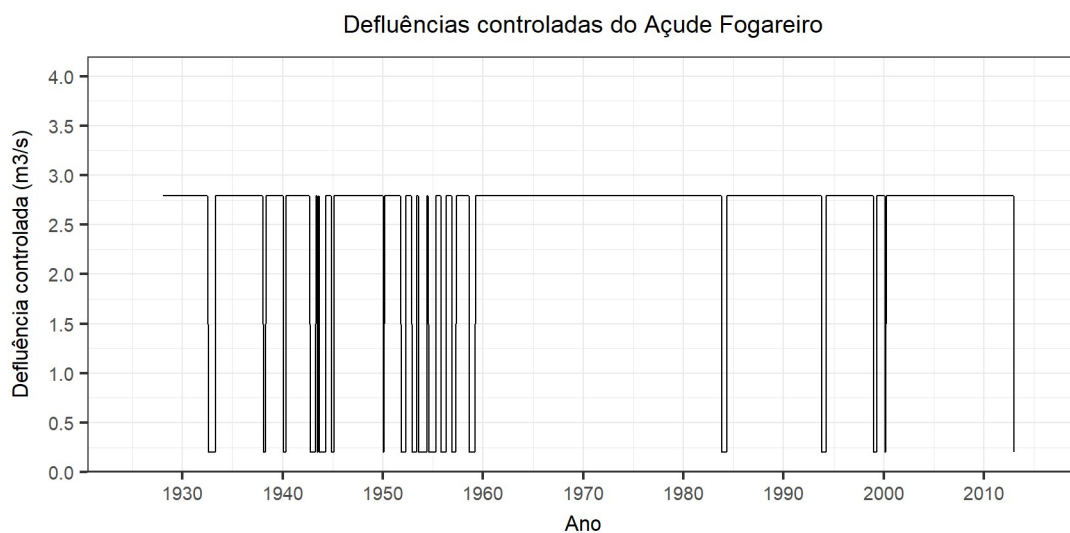
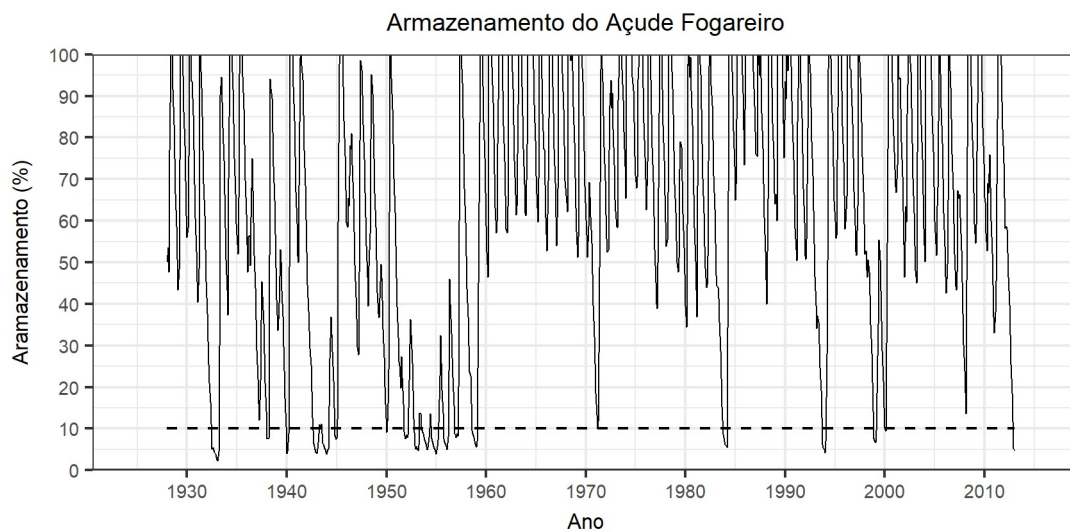
## Açude Arneiroz II:



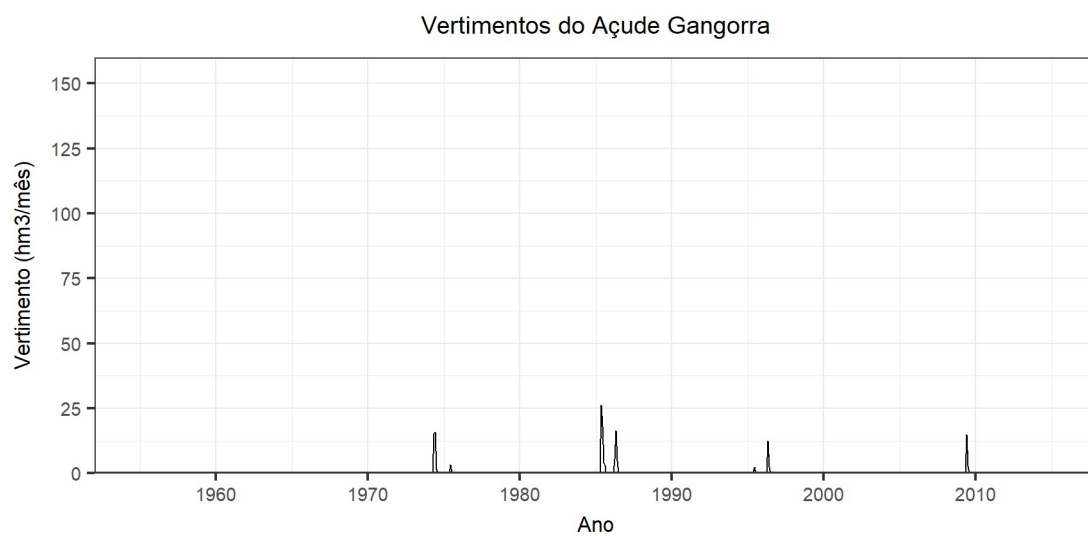
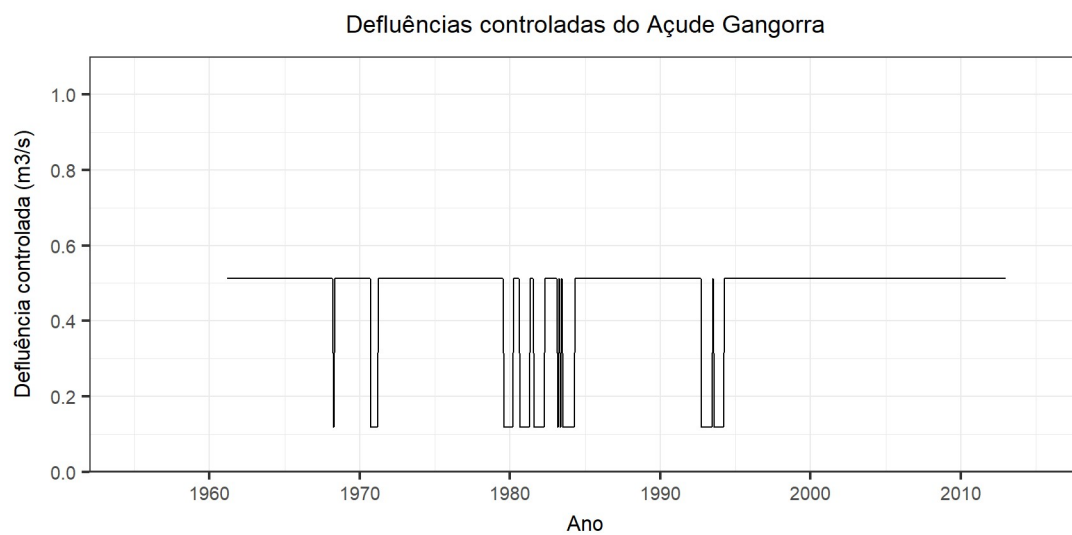
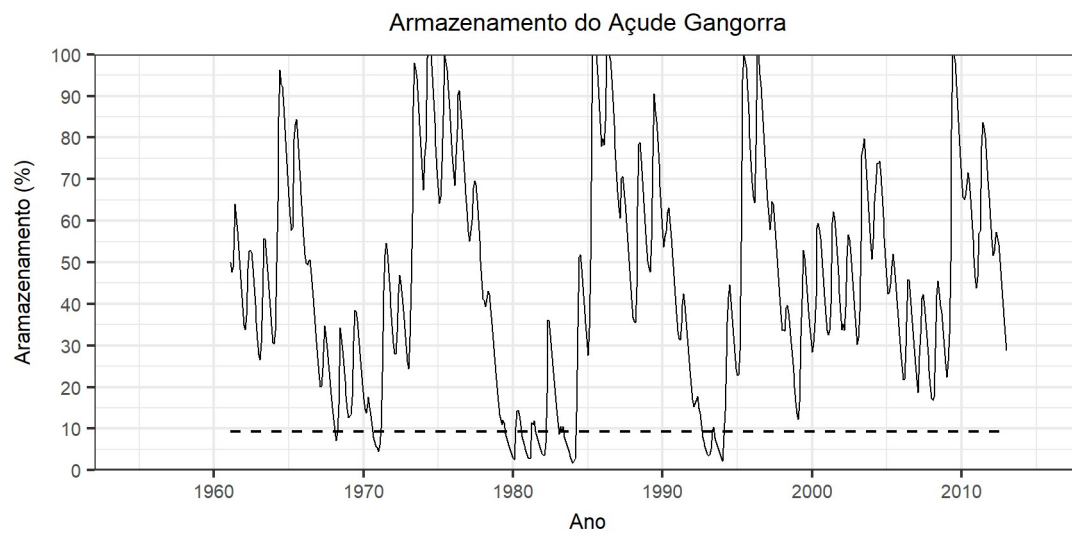
## Açude Edson Queiroz:



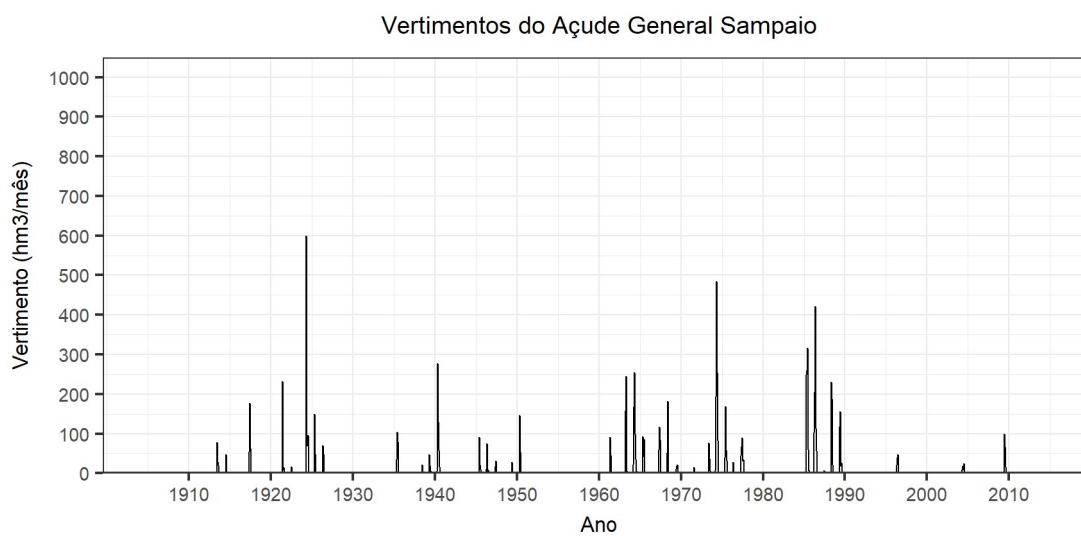
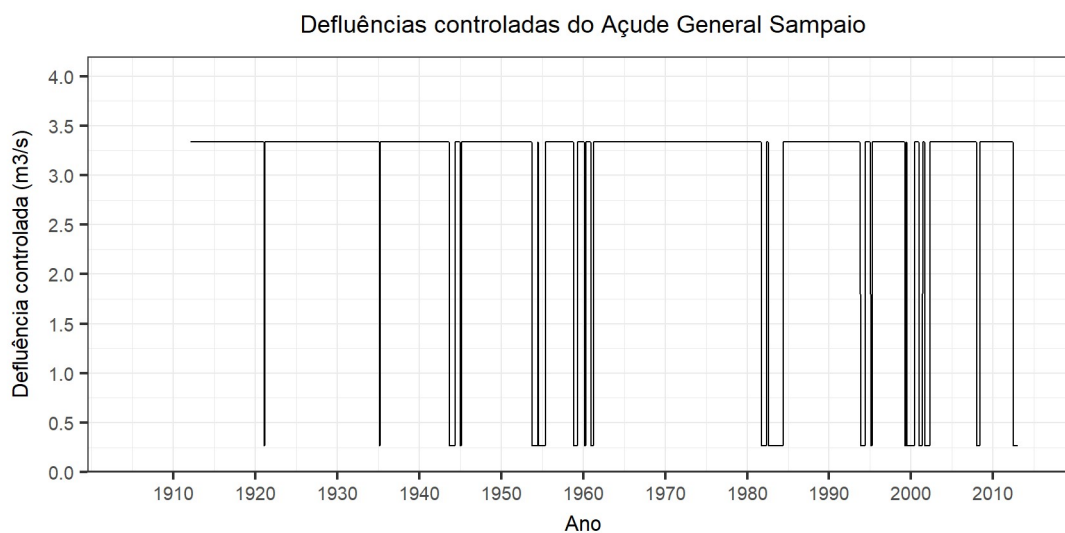
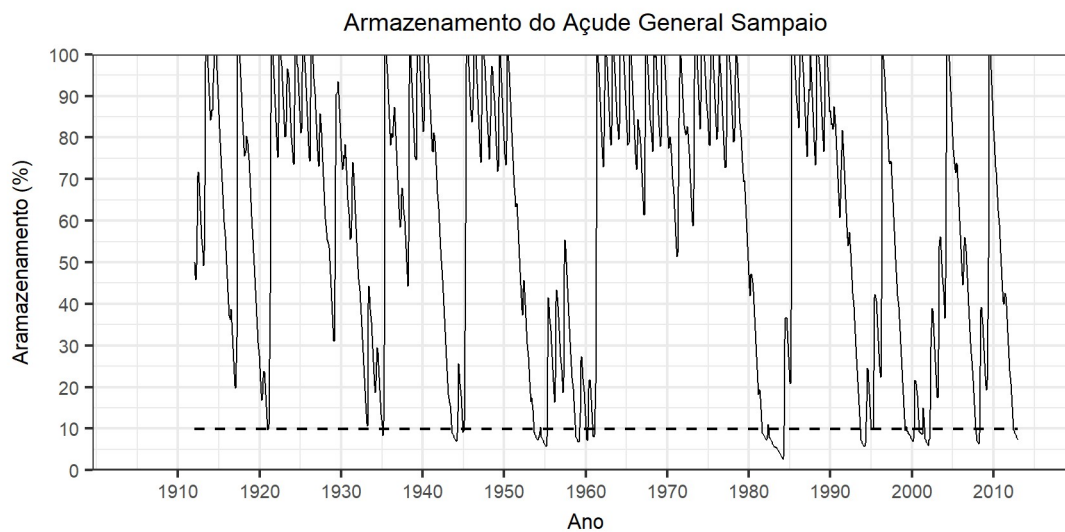
## Açude Fogareiro:



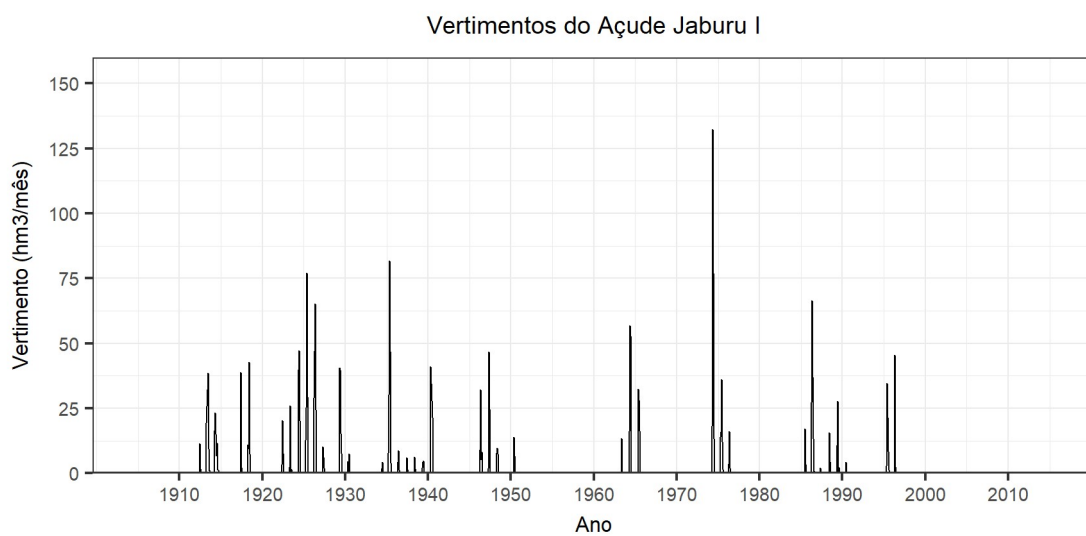
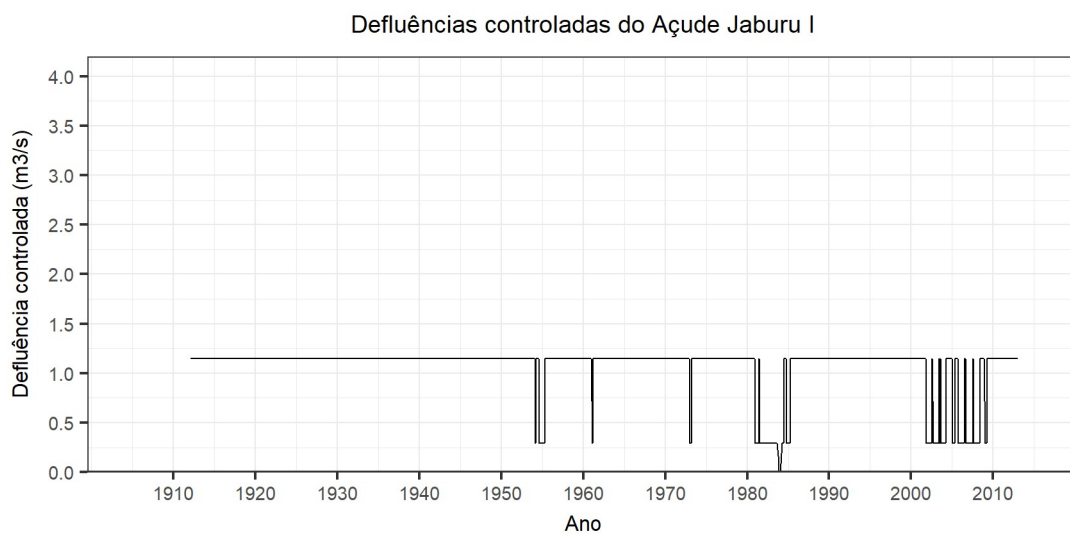
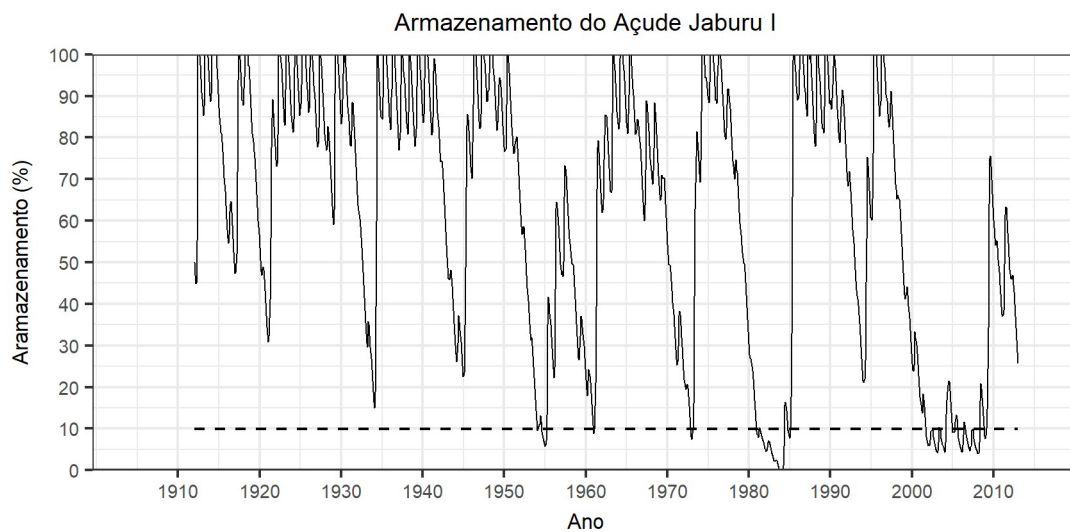
## Açude Gangorra:



## Açude General Sampaio:

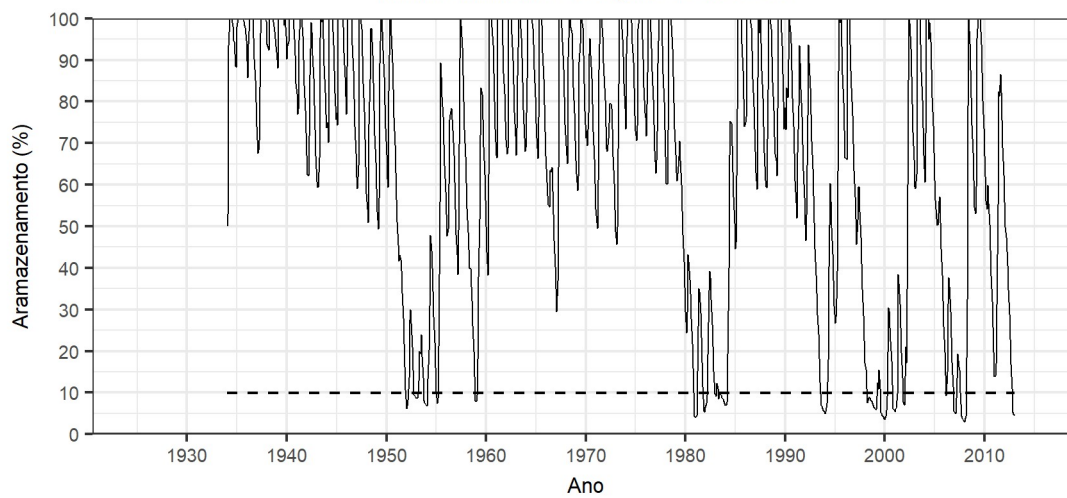


## Açude Jaburu I:

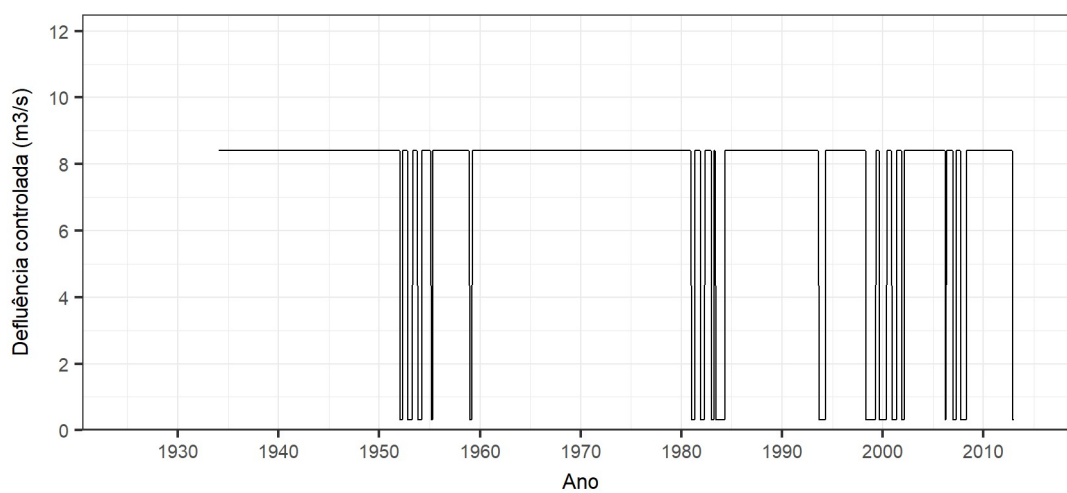


## Açude Pentecoste:

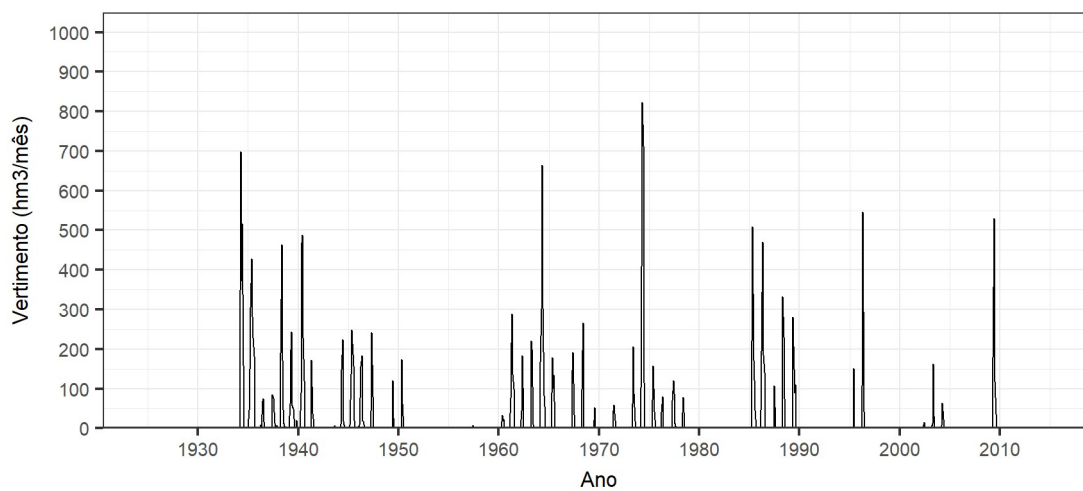
Armazenamento do Açude Pentecoste



Defluências controladas do Açude Pentecoste

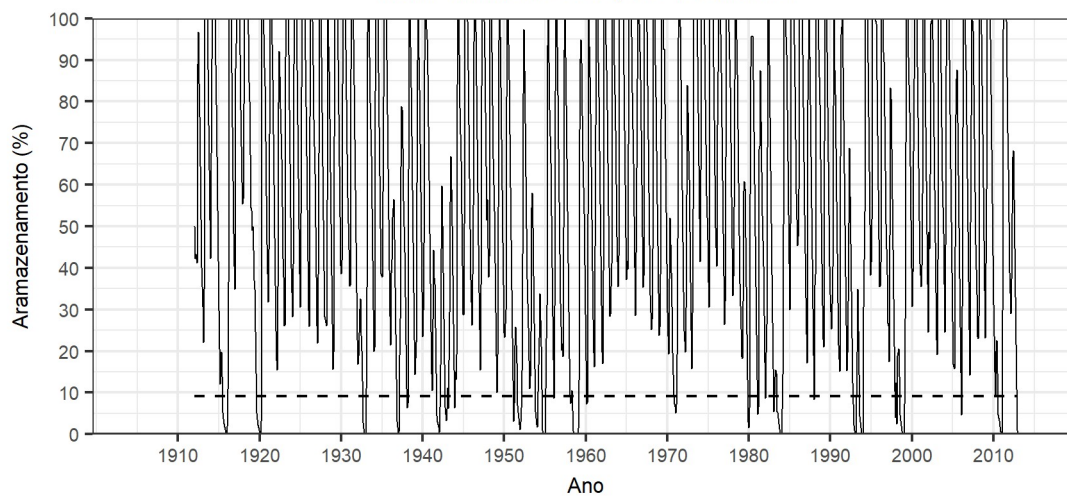


Vertimentos do Açude Pentecoste

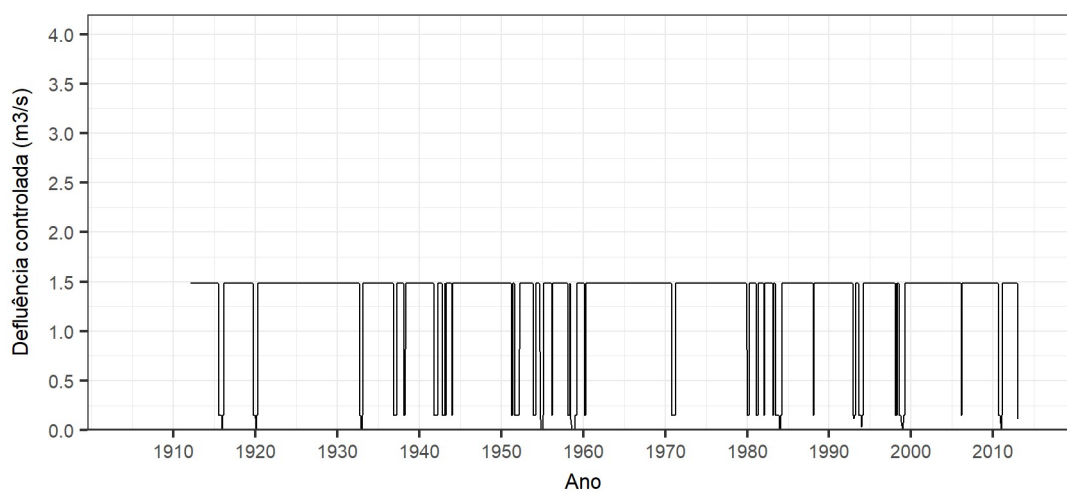


## Açude Tucunduba:

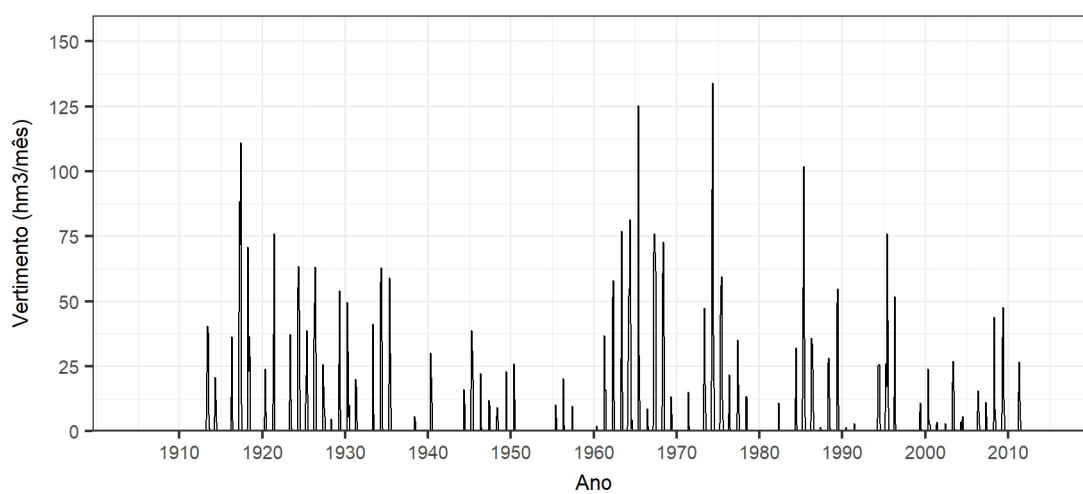
### Armazenamento do Açude Tucunduba



### Defluências controladas do Açude Tucunduba



### Vertimentos do Açude Tucunduba





## APÊNDICE VIII – TEMPOS DE PERMANÊNCIA – OPERAÇÃO ÓTIMA

Nível de Armazenamento	Permanência do armazenamento abaixo ou igual ao nível				
	Angicos	Aracoiaba	Araras	Arneiroz II	Edson Queiroz
10%	10%	10%	10%	10%	10%
20%	17%	20%	19%	17%	18%
30%	24%	29%	27%	26%	24%
40%	31%	40%	36%	37%	31%
50%	38%	48%	47%	48%	40%
60%	45%	58%	56%	57%	48%
70%	59%	68%	65%	65%	57%
80%	72%	78%	77%	75%	68%
90%	81%	89%	86%	88%	82%
100%	100%	100%	100%	100%	100%

Nível de Armazenamento	Permanência do armazenamento abaixo ou igual ao nível				
	Fogareiro	Gangorra	General Sampaio	Jaburu I	Pentecostes
10%	10%	10%	10%	10%	10%
20%	14%	20%	18%	16%	16%
30%	19%	29%	26%	22%	20%
40%	24%	46%	33%	28%	25%
50%	31%	58%	39%	35%	29%
60%	43%	71%	45%	41%	37%
70%	54%	80%	51%	48%	47%
80%	64%	88%	63%	58%	60%
90%	71%	93%	78%	75%	70%
100%	100%	100%	100%	100%	100%

Nível de Armazenamento	Permanência do armazenamento abaixo ou igual ao nível
	Tucunduba
10%	10%
20%	18%
30%	27%
40%	36%
50%	45%
60%	54%
70%	61%
80%	68%
90%	75%
100%	100%



## APÊNDICE IX – CRITÉRIO ALTERNATIVO – RESUMO DOS RESULTADOS

Na etapa de avaliação do suprimento do abastecimento humano, a mudança de critério não representou mudança na classificação dos mananciais. Isso ocorre porque todos os reservatórios classificados inicialmente como manancias de uso múltiplo ( $G > 98\%$ , de acordo com o critério inicial) já apresentam garantia de vazão firme para o abastecimento humano, obedecendo, assim, ao novo critério que os classifica como de uso múltiplo.

Na avaliação da oferta para os outros usos, observa-se que a nova restrição ( $G_{\text{abast. hum}} = 100\%$ ) já é obedecida para a maior parte dos mananciais, pois a imposição sobre  $G_{\text{abast. hum}}$  era a menos restritiva. No entanto, quatro mananciais não obedeceram à nova restrição: Angicos, Arneiroz II, Jaburu I e Tucunduba, apresentando portanto uma nova operação ótima, como pode ser observado nas Tabelas a seguir.

<i>Manancial</i>	<i>n</i> <sub>ótimo</sub>	<i>n</i> <sub>ótimo</sub>	$\alpha_{\text{MÁX}}$	$\alpha_{\text{MÁX}}$	$Q_{\text{outros, MÁX}}$	$Q_{\text{outros, MÁX}}$
	Critério1	Critério2	Critério1	Critério2	Critério1	Critério2
<b>Aç. Angicos</b>	<b>10%</b>	<b>12%</b>	<b>3,3</b>	<b>3,1</b>	<b>0,36</b>	<b>0,33</b>
Aç. Aracoiaba	10%	10%	3,9	3,9	0,68	0,68
Aç. Araras	10%	10%	31,9	31,9	9,71	9,71
<b>Aç. Arneiroz II</b>	<b>6%</b>	<b>11%</b>	<b>2,8</b>	<b>2,7</b>	<b>0,64</b>	<b>0,61</b>
Aç. Edson Queiroz	10%	10%	10,5	10,5	1,79	1,79
Aç. Fogareiro	10%	10%	12,7	12,7	2,59	2,59
Aç. Gangorra	9%	9%	3,3	3,3	0,39	0,39
Aç. General Sampaio	10%	10%	11,4	11,4	3,07	3,07
<b>Aç. Jaburu I</b>	<b>10%</b>	<b>14%</b>	<b>2,9</b>	<b>2,6</b>	<b>0,85</b>	<b>0,76</b>
Aç. Pentecoste	10%	10%	26,4	26,4	8,10	8,10
<b>Aç. Tucunduba</b>	<b>9%</b>	<b>12%</b>	<b>8,8</b>	<b>7,5</b>	<b>1,33</b>	<b>1,14</b>

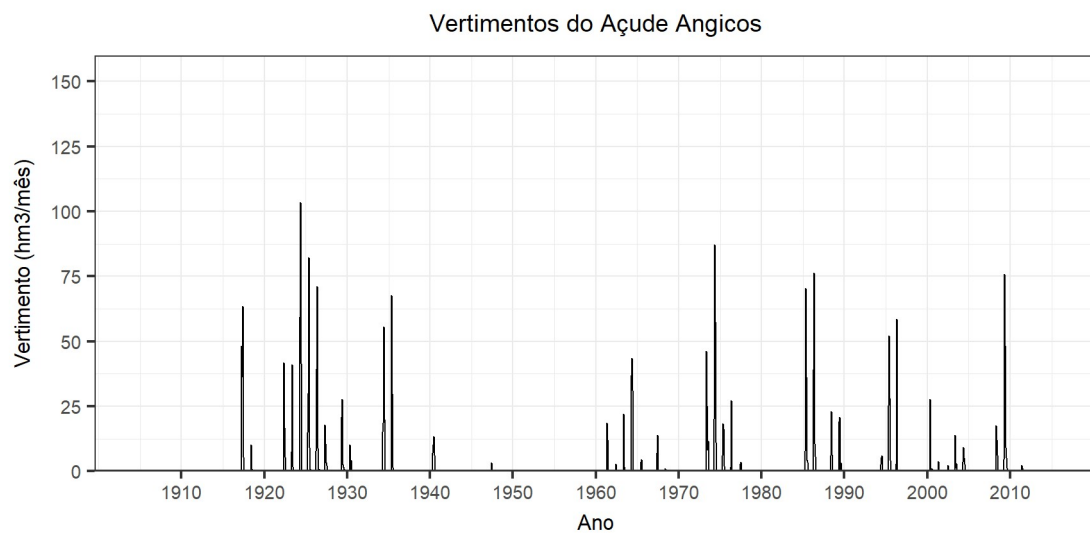
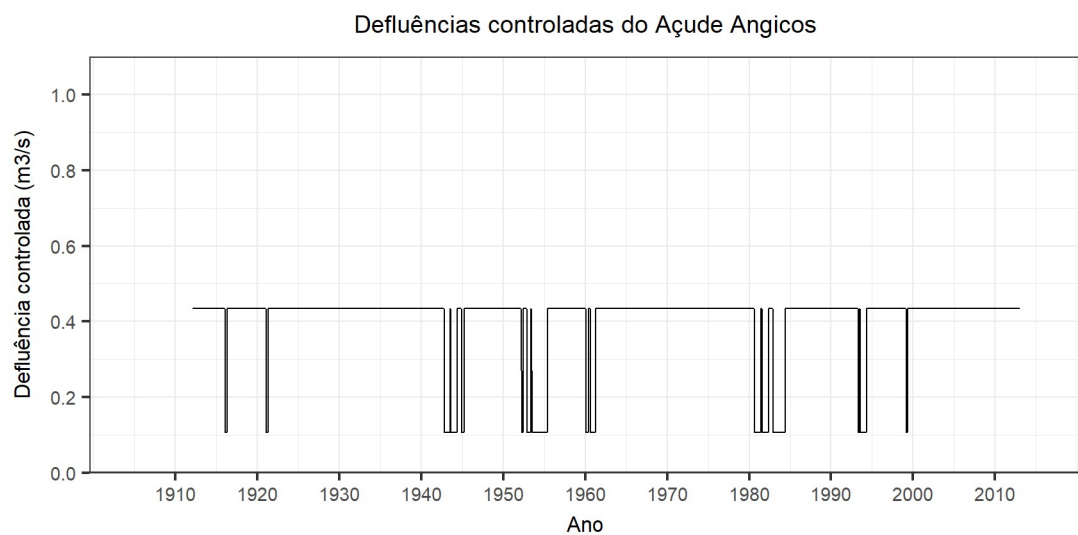
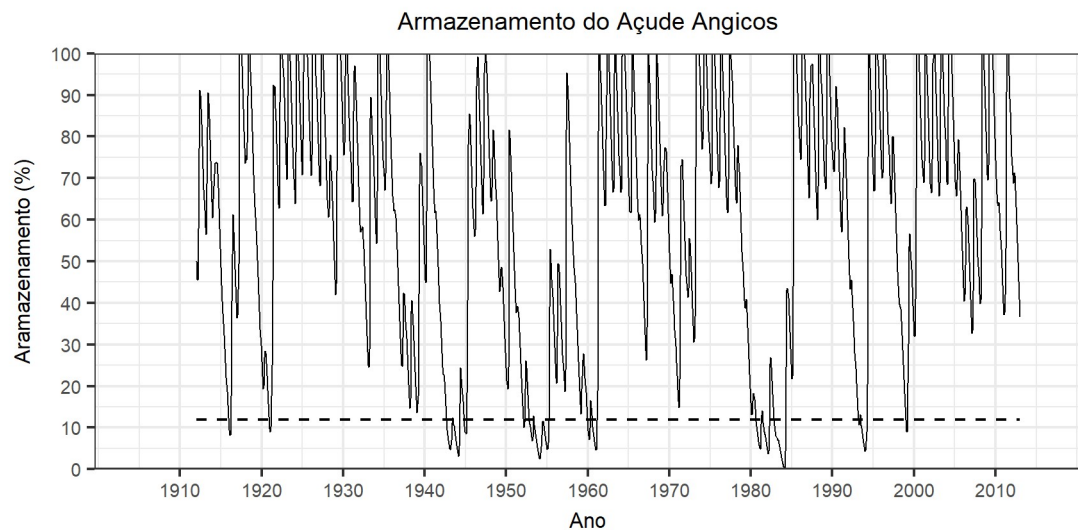
Como era esperado, a adoção de uma condição mais restritiva à otimização resultou numa operação mais protecionista, aumentando o nível de salvaguarda ótimo, e menos produtiva, diminuindo a oferta, mas ao mesmo tempo mais segura.

Analisando os critérios de risco obtidos na nova operação com o novo critério (Tabela a seguir), observa-se que, para os quatro mananciais que sofreram alteração, a restrição de  $G_{\text{hum}}$  passa a imperar sobre a restrição de  $P_{<10\%}$ . Assim, ganha-se maior folga nesta última. Para os sete outros manancias todas as restrições de risco são obedecidas simultaneamente.

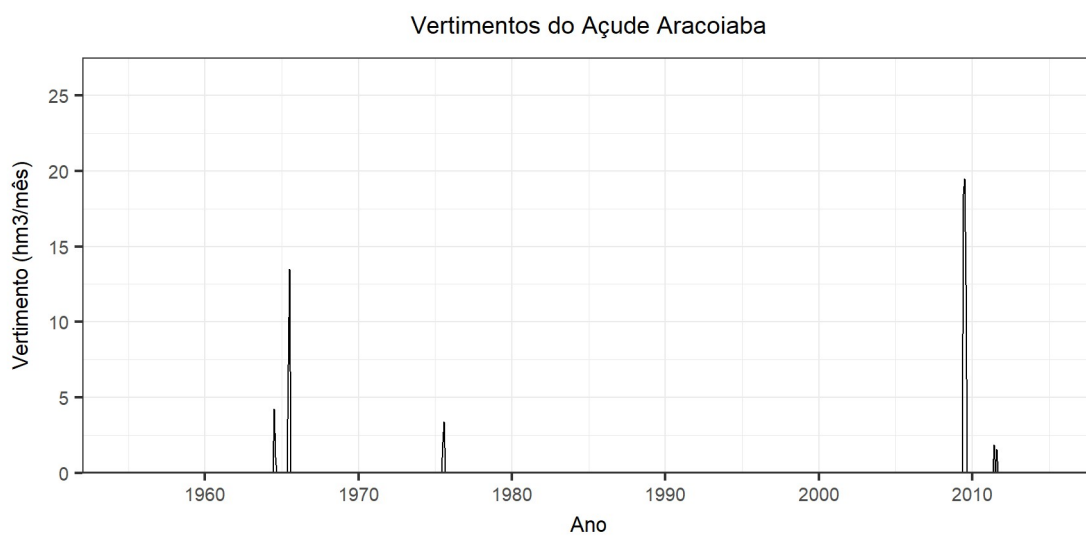
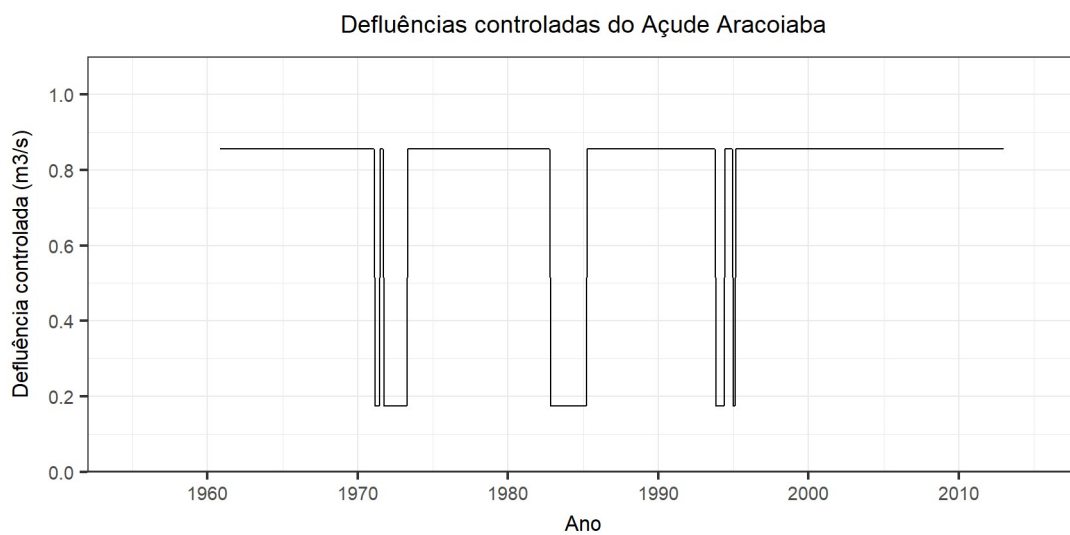
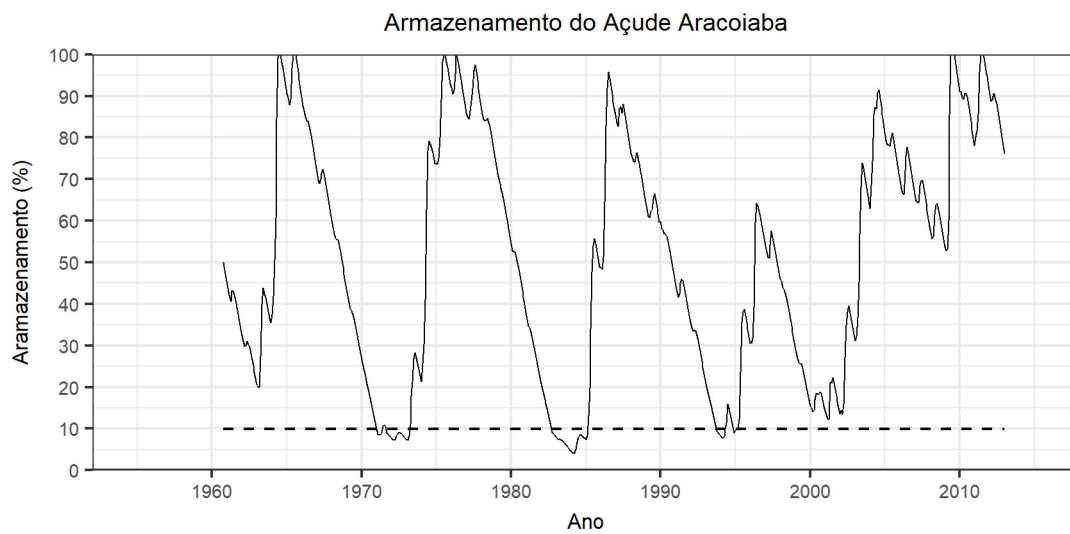
<i>Manancial</i>	$G_{tot}$	$G_{tot}$	$G_{hum}$	$G_{hum}$	$P_{<10\%}$	$P_{<10\%}$
	Cr�terio1	Cr�terio2	Cr�terio1	Cr�terio2	Cr�terio1	Cr�terio2
<b>Aç. Angicos</b>	<b>90%</b>	<b>90%</b>	<b>≈Garantia de vaz�o firme</b>	<b>Garantia de vaz�o firme</b>	<b>10%</b>	<b>8%</b>
Aç. Aracoiaba	90%	90%	Garantia de vaz�o firme	Garantia de vaz�o firme	10%	10%
Aç. Araras	90%	90%	Garantia de vaz�o firme	Garantia de vaz�o firme	10%	10%
<b>Aç. Arneiroz II</b>	<b>93%</b>	<b>90%</b>	<b>99%</b>	<b>Garantia de vaz�o firme</b>	<b>10%</b>	<b>9%</b>
Aç. Edson Queiroz	90%	90%	Garantia de vaz�o firme	Garantia de vaz�o firme	10%	10%
Aç. Fogareiro	90%	90%	Garantia de vaz�o firme	Garantia de vaz�o firme	10%	10%
Aç. Gangorra	90%	90%	Garantia de vaz�o firme	Garantia de vaz�o firme	10%	10%
Aç. General Sampaio	90%	90%	Garantia de vazão firme	Garantia de vazão firme	10%	10%
<b>Aç. Jaburu I</b>	<b>90%</b>	<b>90%</b>	<b>≈Garantia de vazão firme</b>	<b>Garantia de vazão firme</b>	<b>10%</b>	<b>4%</b>
Aç. Pentecoste	90%	90%	Garantia de vazão firme	Garantia de vazão firme	10%	10%
<b>Aç. Tucunduba</b>	<b>90%</b>	<b>92%</b>	<b>98%</b>	<b>Garantia de vazão firme</b>	<b>10%</b>	<b>7%</b>

## APÊNDICE X – CRITÉRIO ALTERNATIVO – RESULTADOS DA SIMULAÇÃO PARA A OPERAÇÃO ÓTIMA

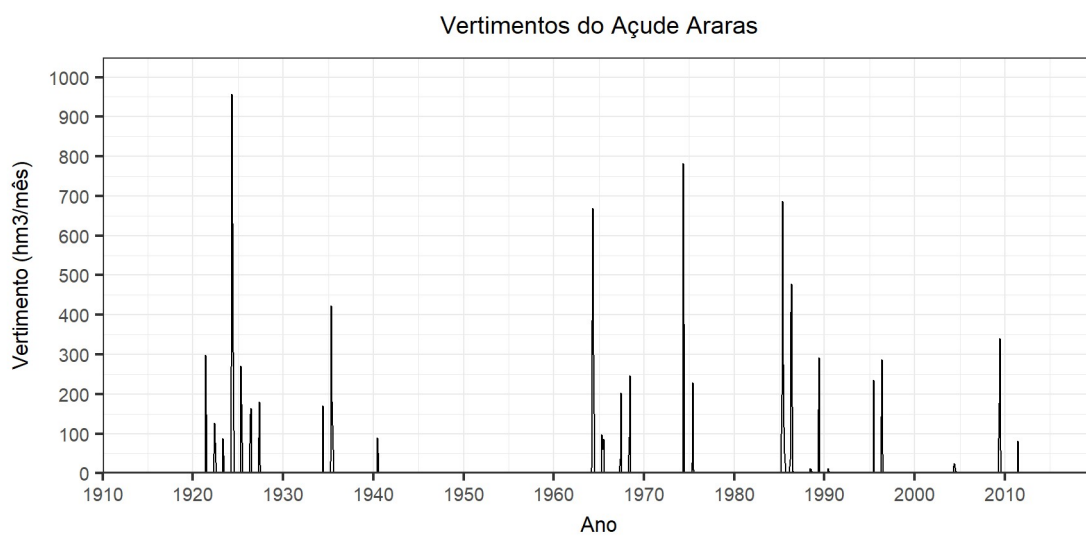
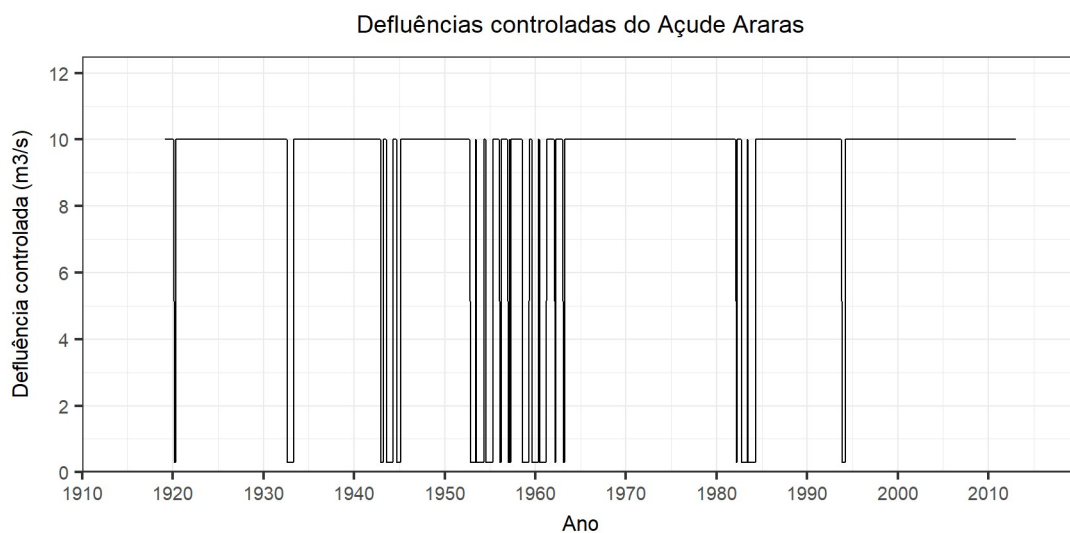
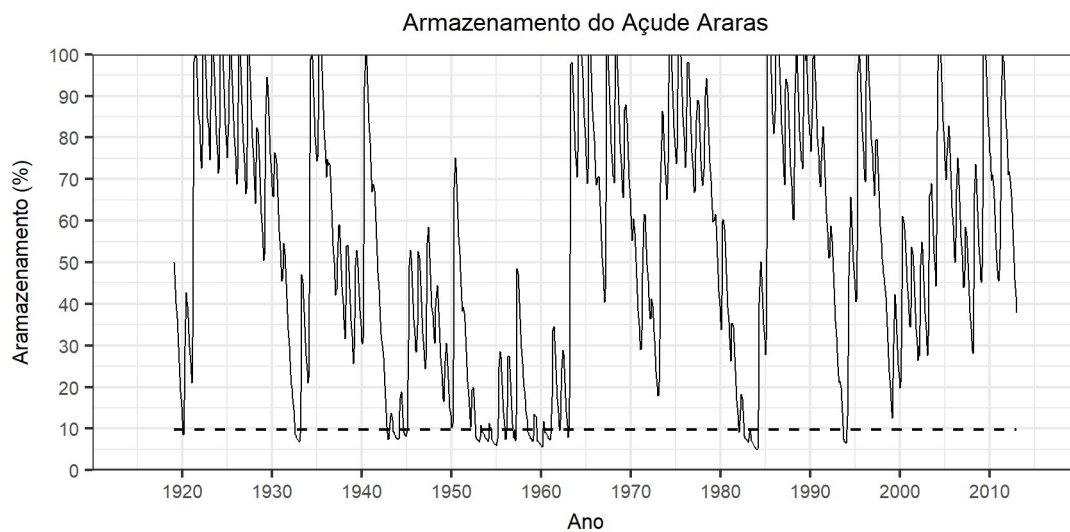
### Açude Angicos:



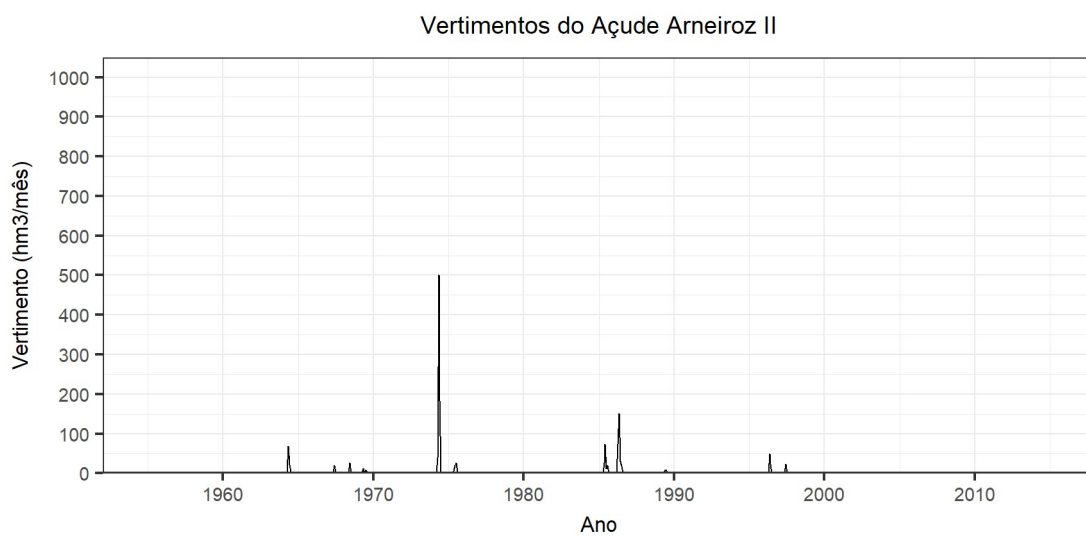
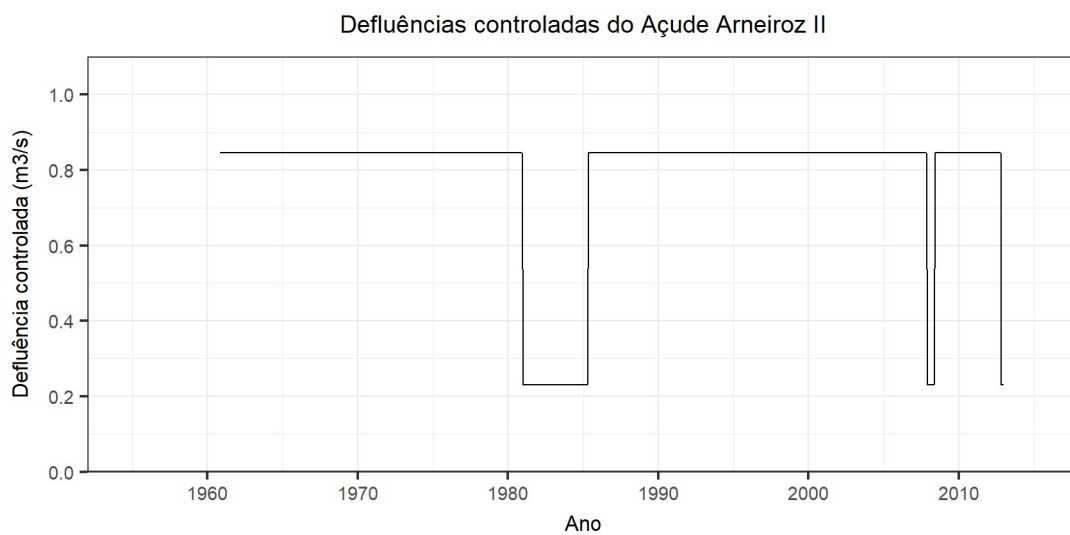
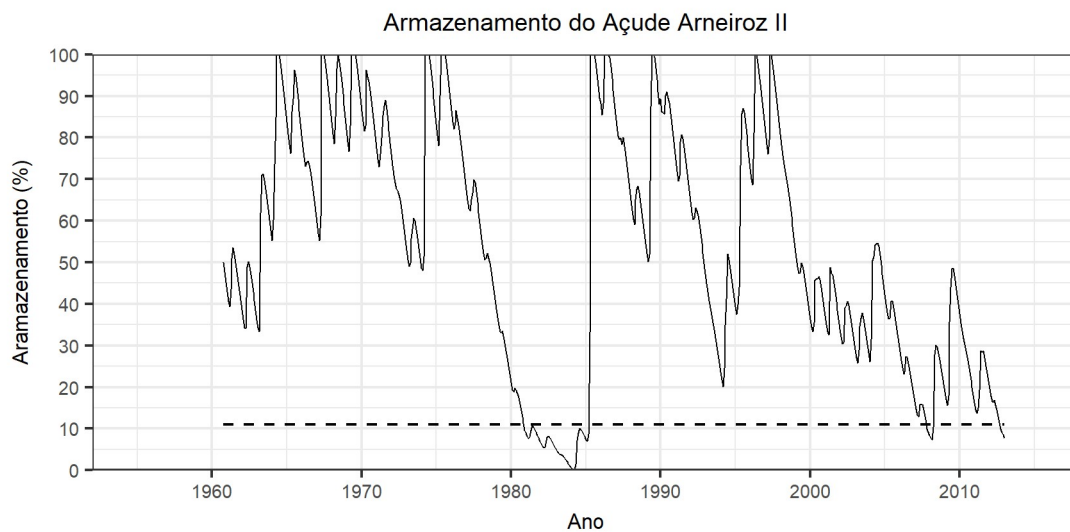
## Açude Aracoiaba:



## Açude Araras:

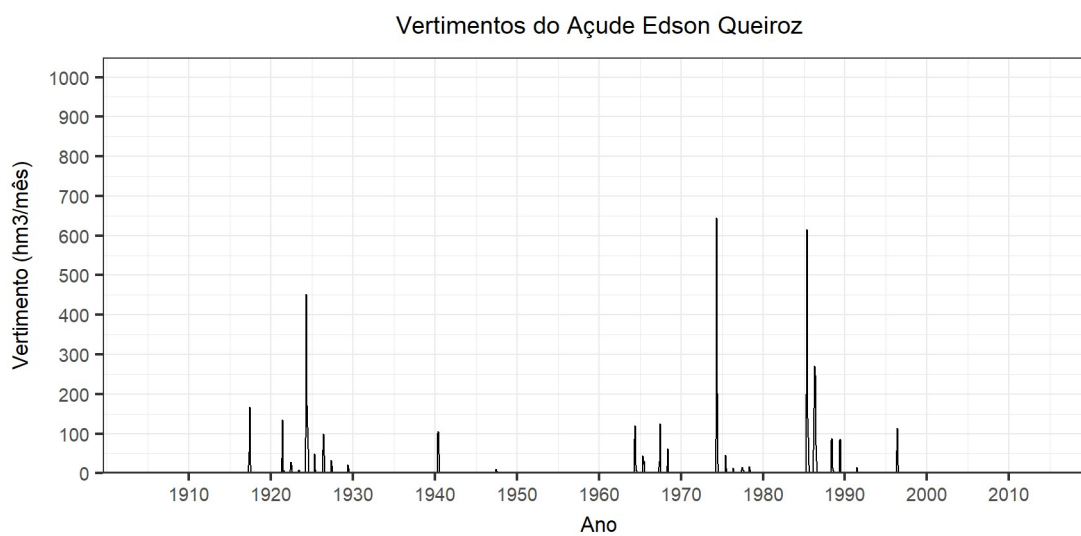
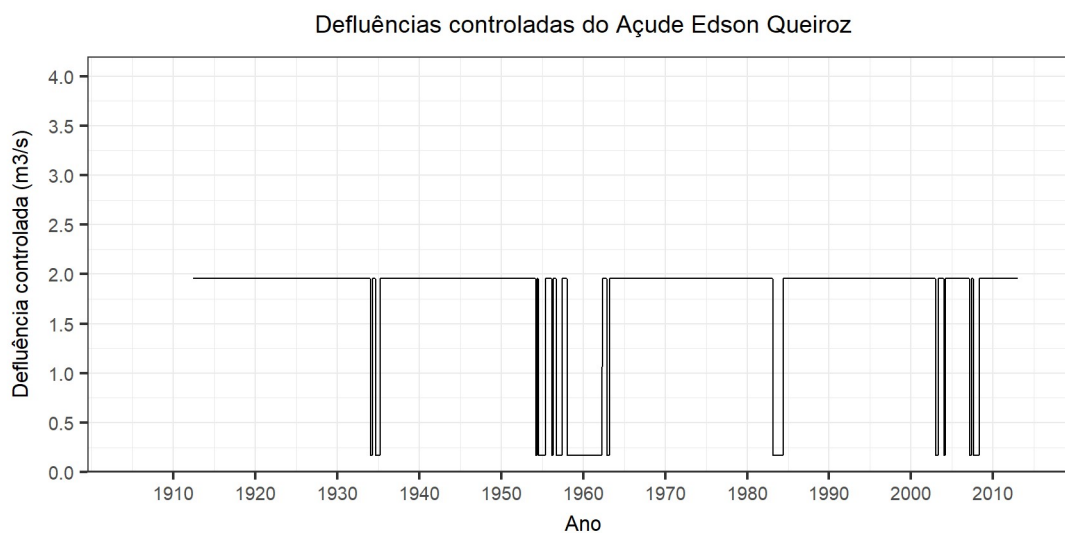
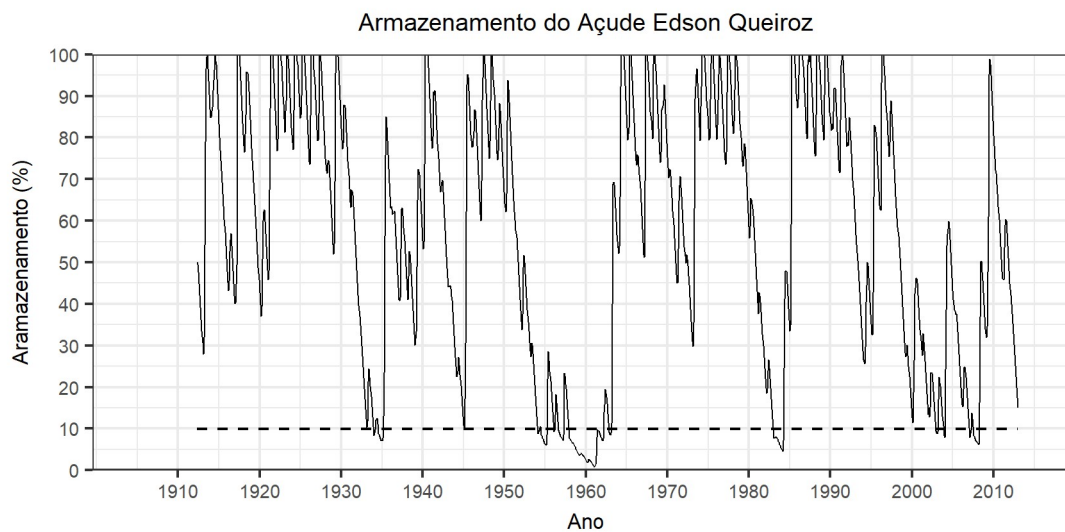


## Açude Arneiroz II:

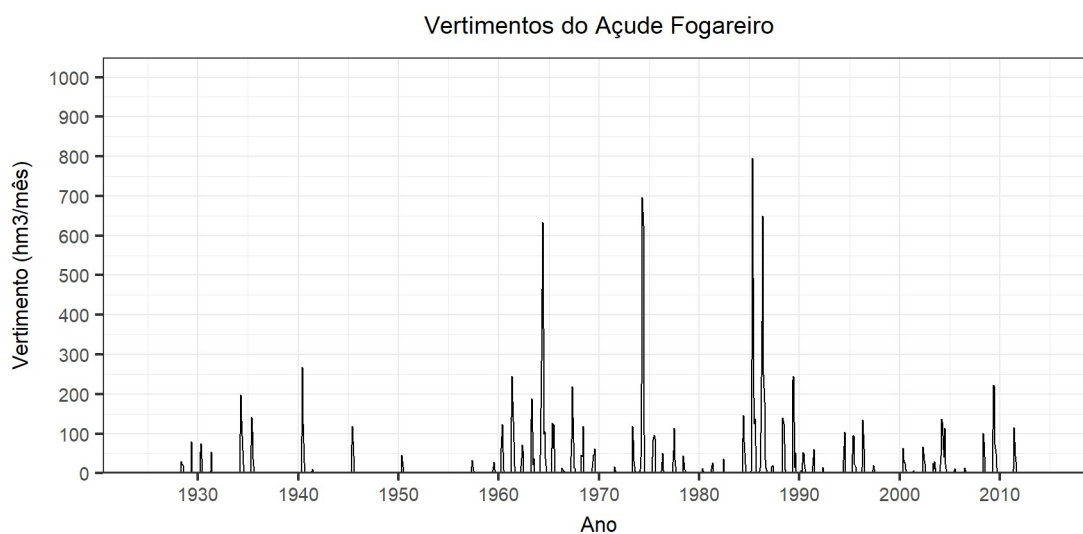
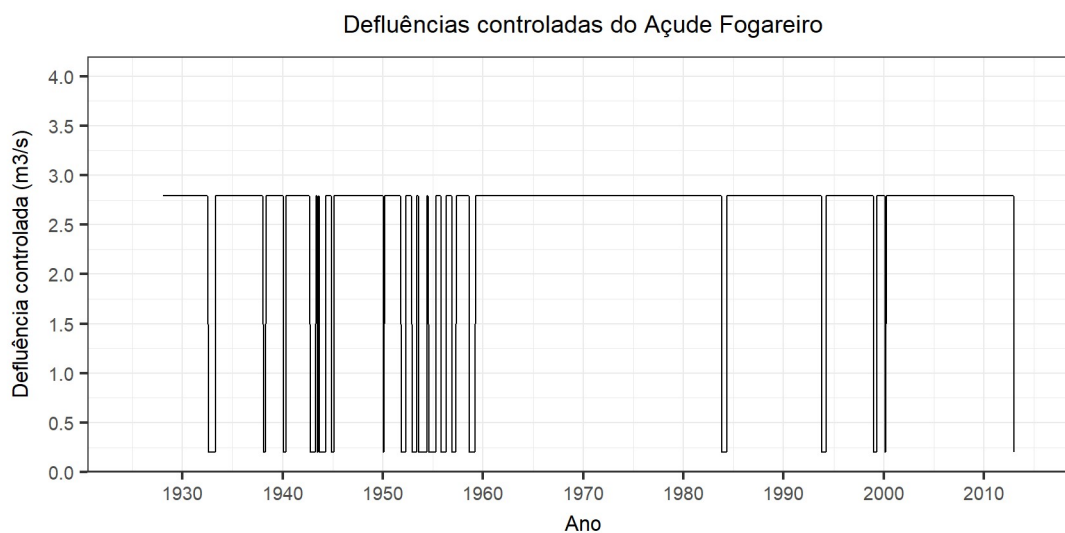
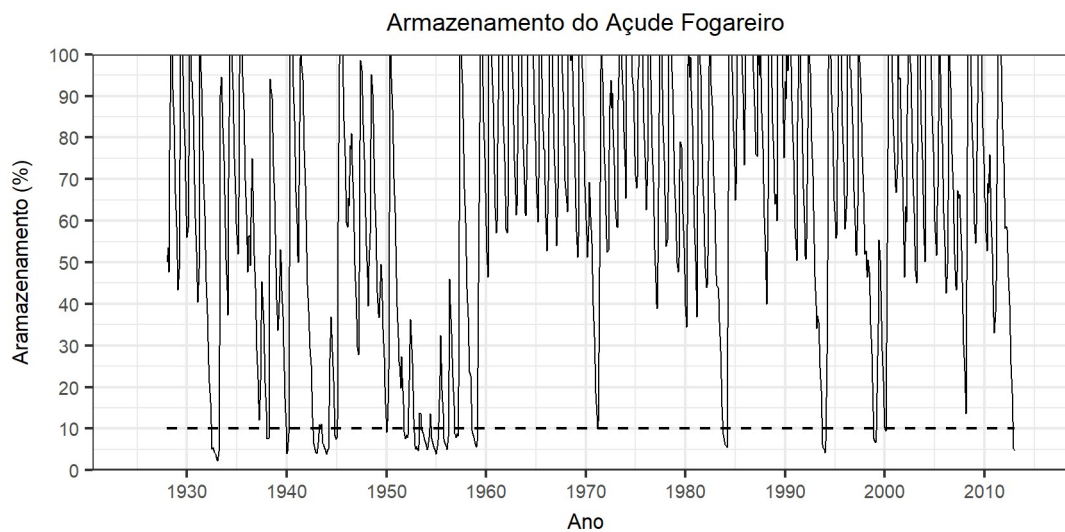




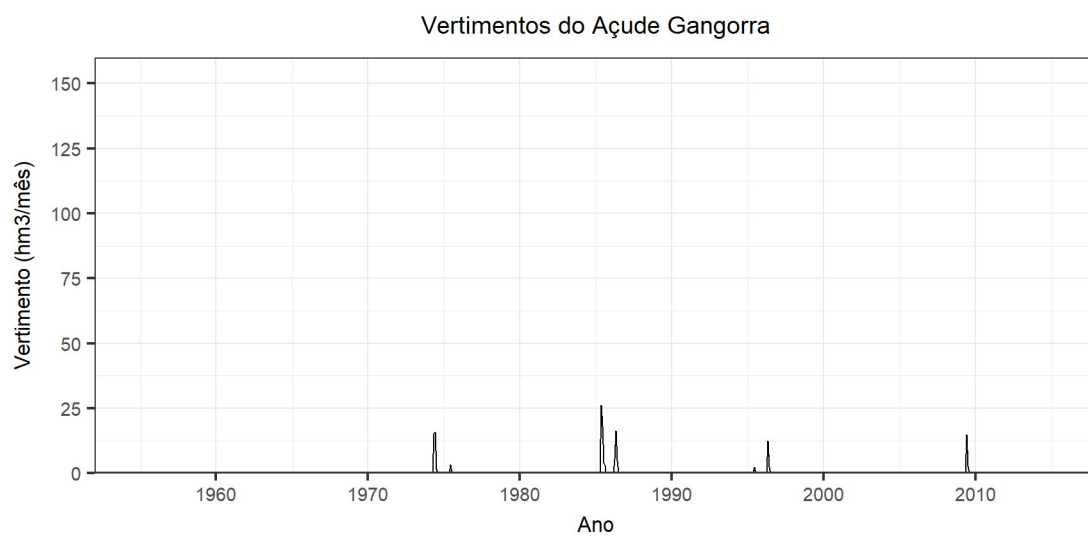
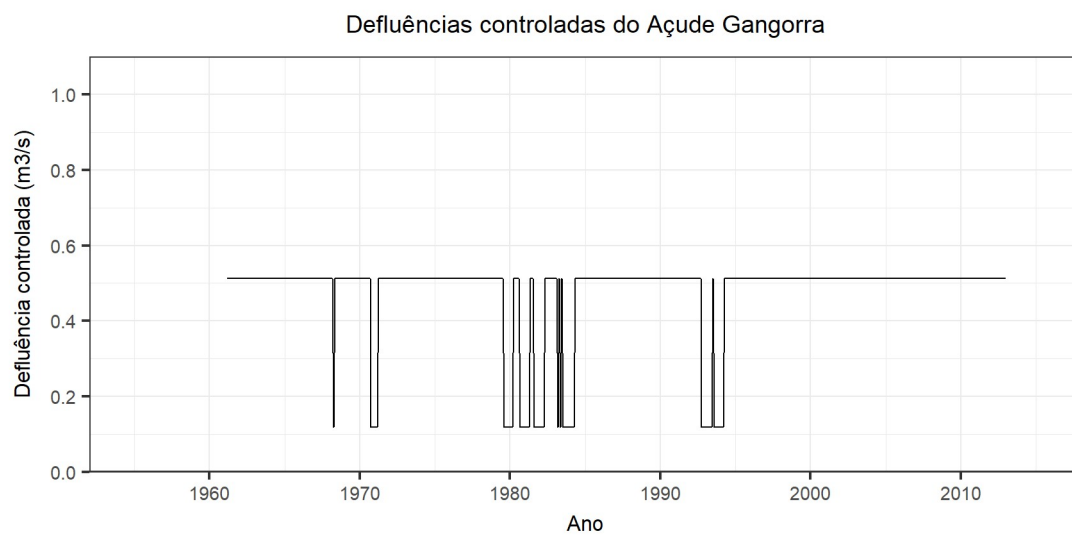
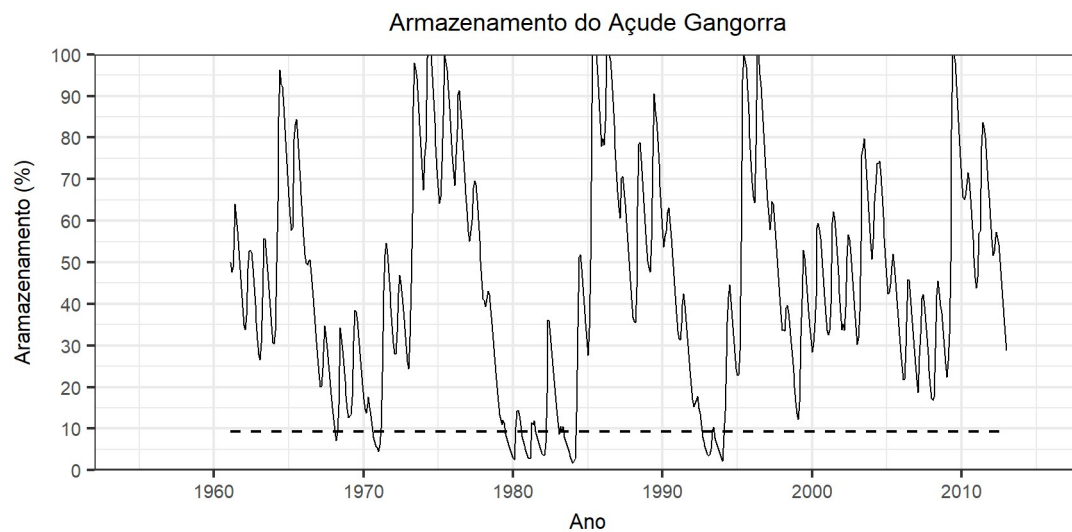
## Açude Edson Queiroz:



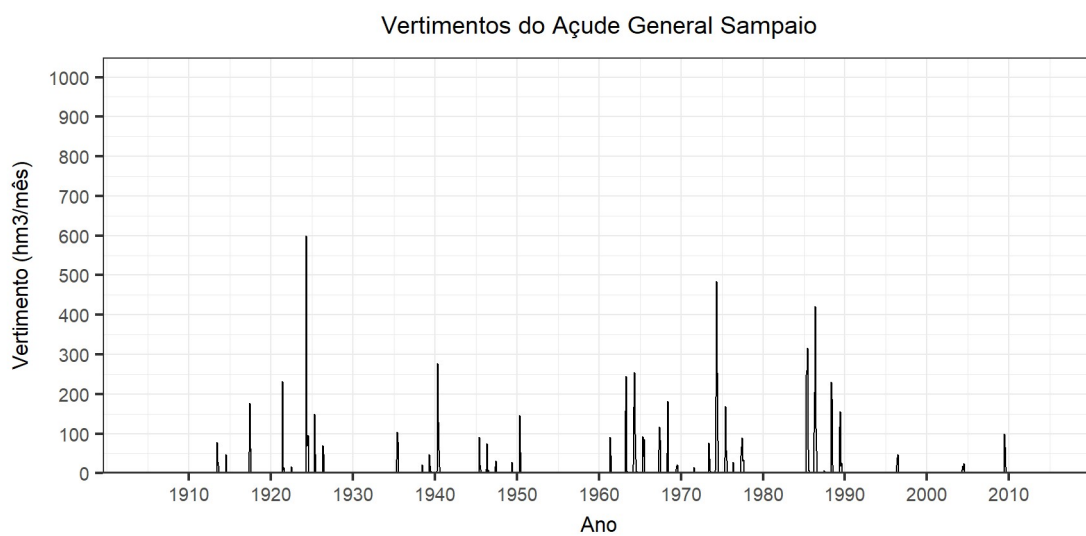
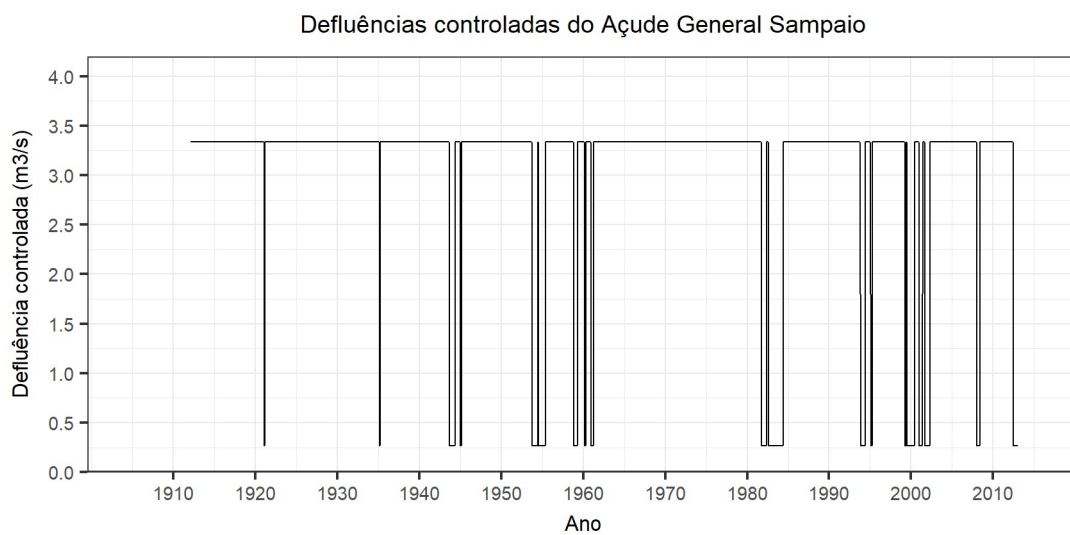
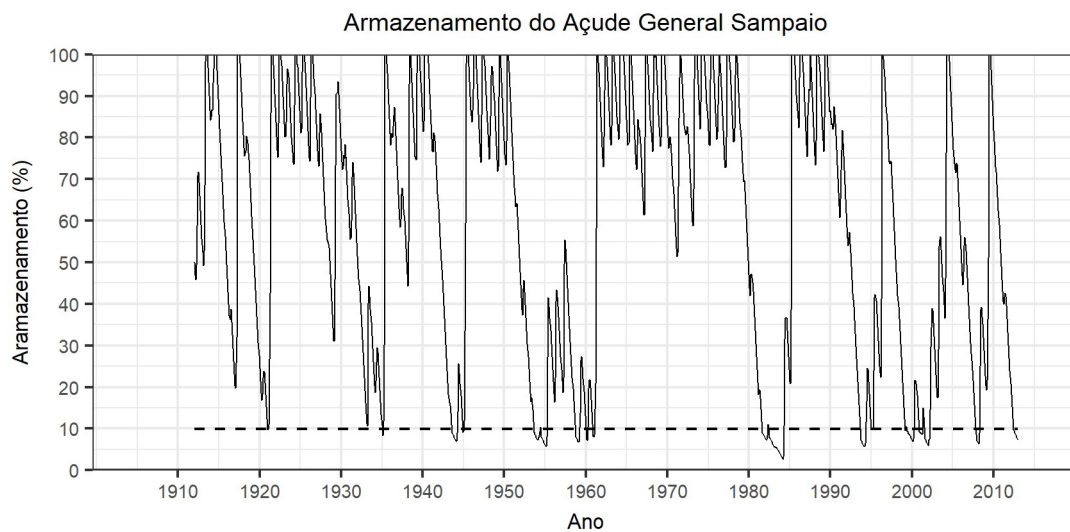
## Açude Fogareiro:



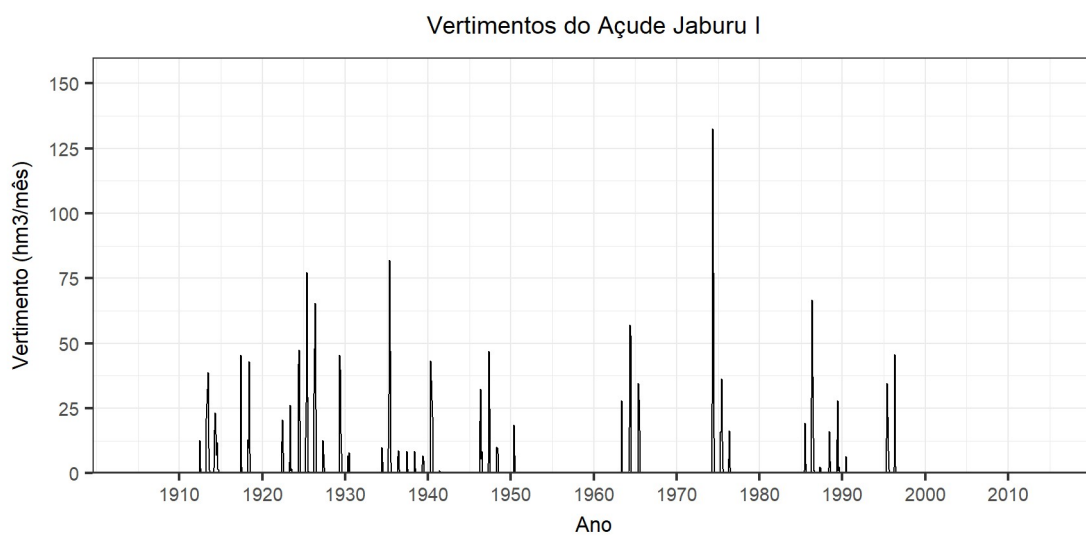
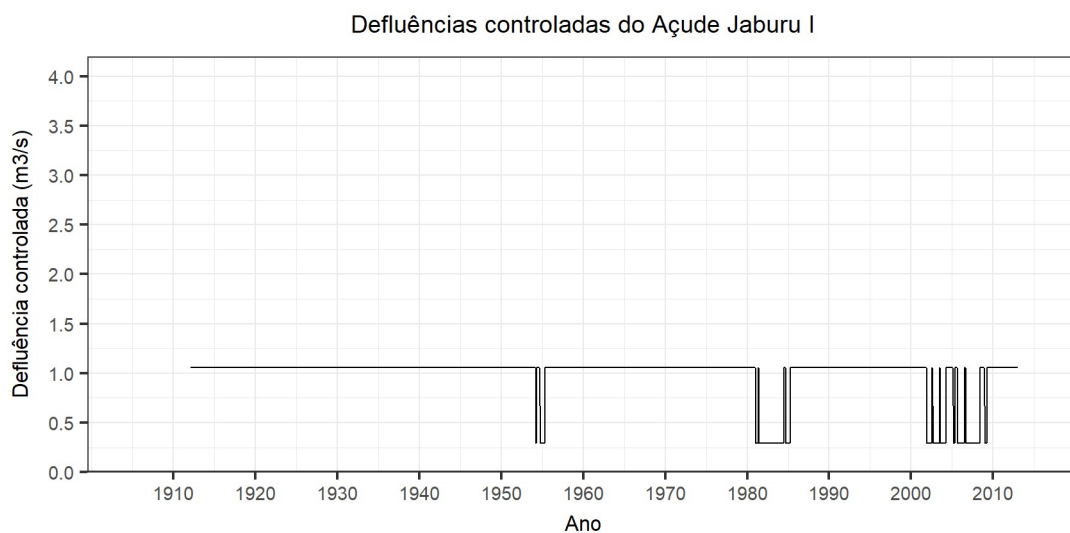
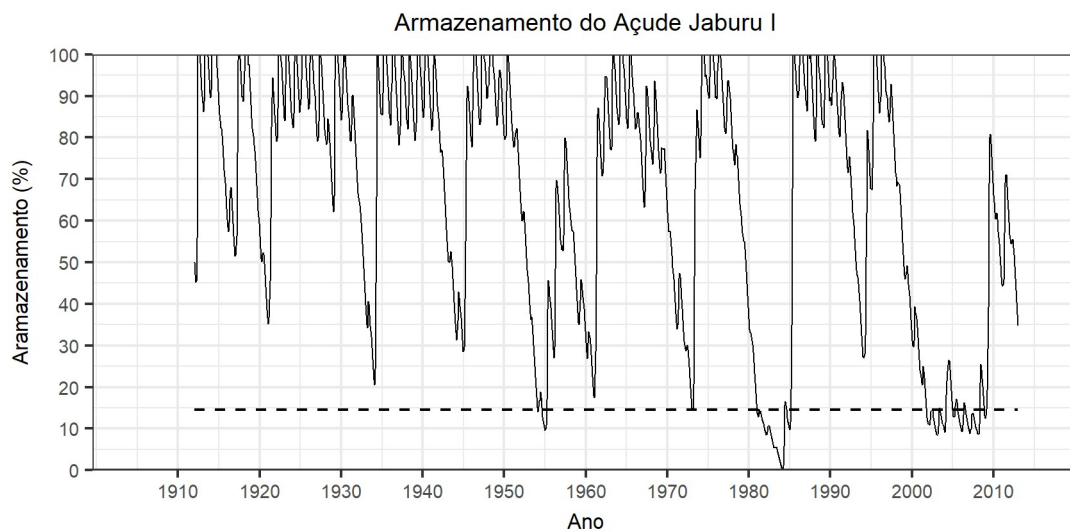
## Açude Gangorra:



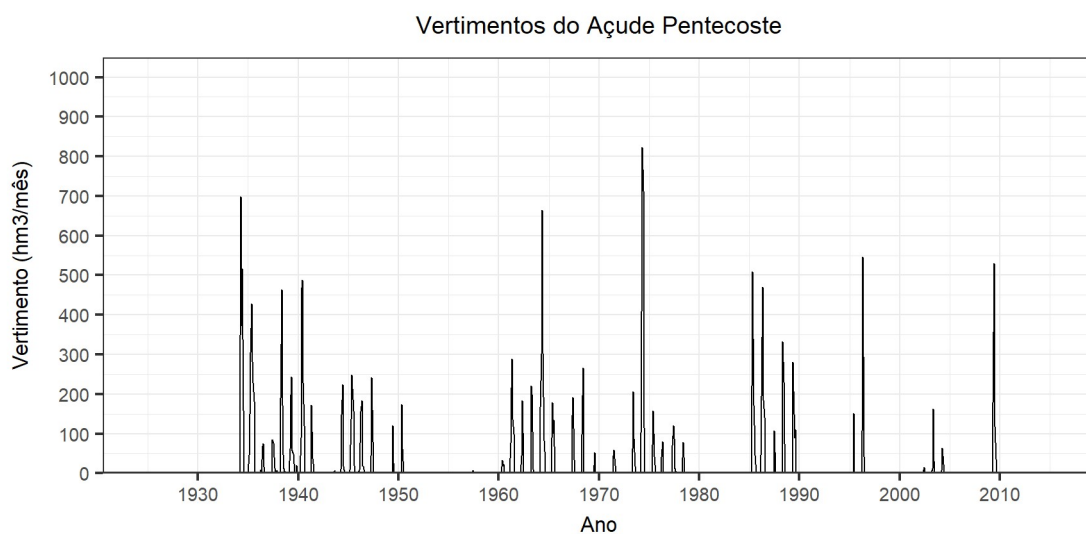
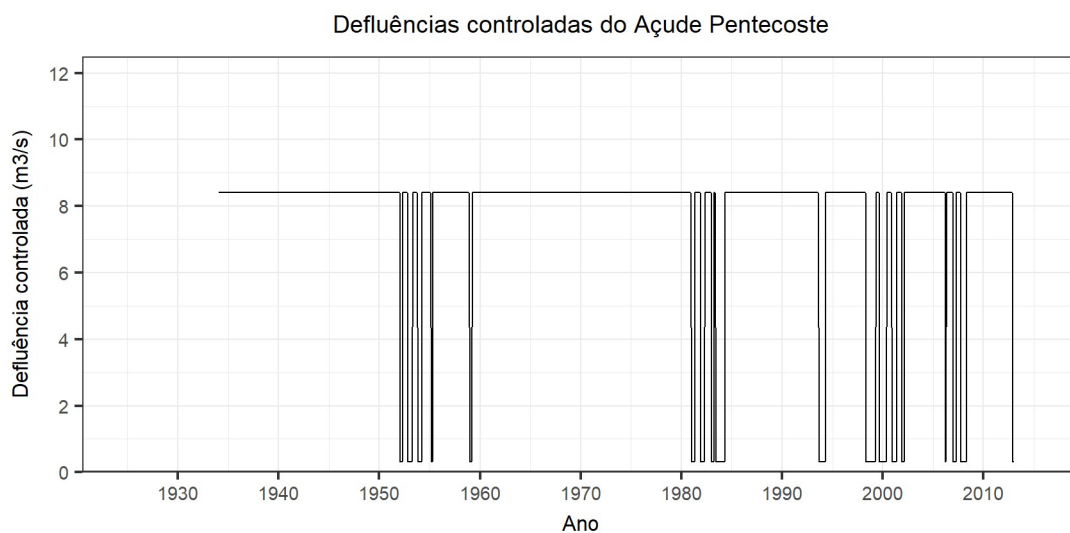
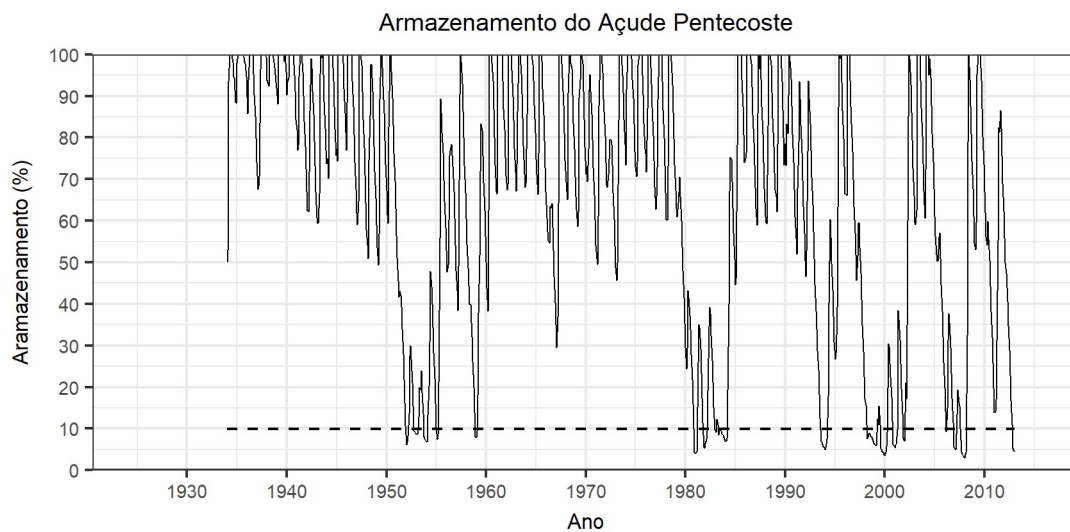
## Açude General Sampaio:



## Açude Jaburu I:

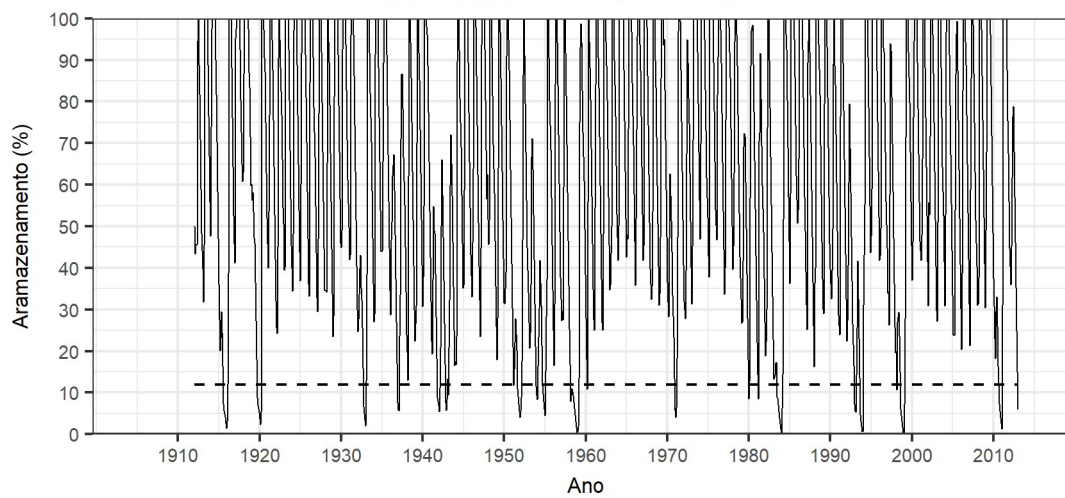


## Açude Pentecoste:

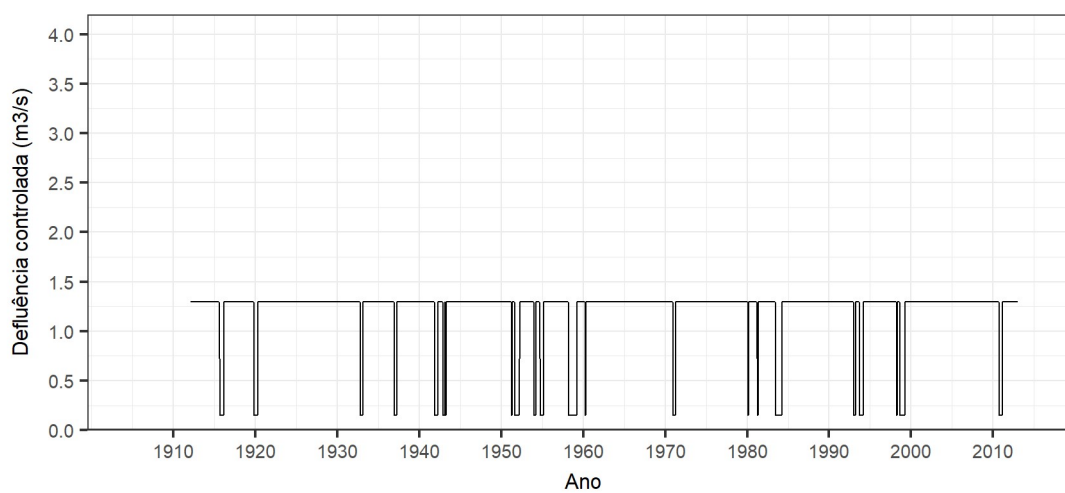


## Açude Tucunduba:

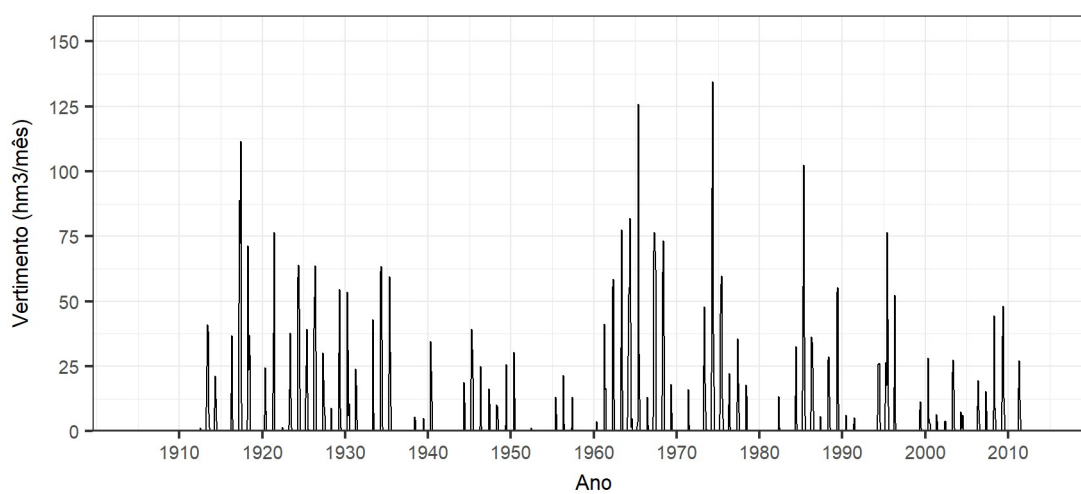
### Armazenamento do Açude Tucunduba



### Defluências controladas do Açude Tucunduba



### Vertimentos do Açude Tucunduba



## APÊNDICE XI – CRITÉRIO ALTERNATIVO – TEMPOS DE PERMANÊNCIA PARA A OPERAÇÃO ÓTIMA

Para os quatro reservatórios que sofreram alteração na operação ótima em razão da mudança de critério:

Nível de Armazenamento	Permanência do armazenamento abaixo ou igual ao nível			
	Angicos	Arneiroz II	Jaburu I	Tucunduba
10%	8%	9%	4%	7%
20%	15%	16%	13%	11%
30%	22%	24%	18%	19%
40%	29%	36%	25%	28%
50%	37%	47%	31%	39%
60%	43%	56%	38%	49%
70%	56%	65%	45%	57%
80%	71%	74%	54%	65%
90%	81%	87%	73%	73%
100%	100%	100%	100%	100%

