UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE TECNOLOGIA E GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

NYADJA MENEZES RODRIGUES RAMOS

# MODELAGEM NA GESTÃO DE SISTEMAS HÍDRICOS INTEGRADOS DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO: Estudo de caso do Agreste Pernambucano

RECIFE

2017

NYADJA MENEZES RODRIGUES RAMOS

# MODELAGEM NA GESTÃO DE SISTEMAS HÍDRICOS INTEGRADOS DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO: Estudo de caso do Agreste Pernambucano

Tese apresentada ao Programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Área de Concentração em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos da Universidade Federal de Pernambuco, em cumprimento ás exigências para obtenção do título de Doutor.

Orientador: Profº. Drº. José Almir Cirilo.

RECIFE
2017

Catalogação na fonte
Bibliotecária Valdicèa Alves, CRB-4 / 1260

R175m Ramos, Nyadja Menezes Rodrigues.
Modelagem na gestão de sistemas hídricos integrados do semiárido brasileiro: estudo de caso do agreste pernambucano / Nyadja Menezes Rodrigues. - 2017.
145folhas, Il. e Tabs.

Orientadora: Profº. Drº. José Almir Cirilo.

Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG. Programa de Pós-Graduação Engenharia Civil e Ambiental, 2017.

Inclui Referências e Apêndices.

1. Engenharia Civil. 2. Modelagem. 3. Gestão Recursos Hídricos. 4. Agreste Pernambuco. I. Cirilo, José Almir. (Orientador). II.Título.

UFPE

624 CDD (22. ed.) BCTG/2018-88

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL

A comissão examinadora da Defesa de Tese de Doutorado

**"MODELAGEM NA GESTÃO DE SISTEMAS HÍDRICOS INTEGRADOS DO SEMIÁRIDO BRASILEIRO: ESTUDO DE CASO DO AGRESTE PERNAMBUCANO"**

defendida por

Nyadja Menezes Rodrigues Ramos

Considera a candidata APROVADA

Recife, 31 de março de 2017

Banca Examinadora:

_____
Prof. Dr. José Almir Cirilo – UFPE
(Orientador)

_____
Prof.ª Dr.ª Simone Rosa da Silva – UPE
(examinadora externa)

_____
Prof. Dr. Anderson Luiz Ribeiro de Paiva – UFPE
(examinador externo)

_____
Prof.ª Dr.ª Sylvana Melo dos Santos – UFPE
(examinadora interna)

_____
Prof. Dr. Alfredo Ribeiro Neto – UFPE
(examinador interno)

*Dedico a minha família,*
*aos meus pais Nivaldo e Maria do Carmo*
*os quais sempre me ensinaram que o verdadeiro tesouro é*
*obtido através de trabalho e muito estudo,*
*aos meus irmãos Nyebson e Nyedja,*
*a meu querido esposo George pela paciência e incentivo diário*
*indispensáveis na conclusão deste trabalho*
*e ao meu competente orientador e amigo professor Almir Cirilo.*

## AGRADECIMENTOS

Sem o valioso apoio de várias pessoas não poderia de tido condições de estar apresentando a conclusão deste trabalho. Sendo assim, as próximas linhas expressarão a minha eterna gratidão.

Em primeiro lugar agradeço a Deus, meu companheiro de todas as horas, pois sem ele sei que nada é possível.

Ao meu querido e sábio orientador Almir Cirilo por seu apoio incondicional em todos os momentos ao longo do curso, serei eternamente grata pelos ensinamentos, orientações, pela compreensão ímpar e pela mão amiga. Saiba do meu carinho, respeito e gratidão extrema por tudo que fez por mim.

À Secretaria do PPGEC/UFPE, em nome de Andréa Negromonte Vieira Matoso, pela disponibilidade, atenção e apoio nos caminhos administrativos.

Aos professores Anderson Paiva, Sylvana Santos, Alfredo Ribeiro Neto pelas valiosas contribuições para conclusão deste trabalho.

Ao Roberto Tavares pela confiança depositada na minha pessoa possibilitando o meu crescimento profissional e a todos os colegas da COMPESA pelas contribuições dadas.

Ao querido amigo Sérgio Torres, por seus valiosos ensinamentos, profissional de alta competência e experiência, um verdadeiro exemplo.

A todos os professores do Doutorado pelo apoio e ensinamentos ao longo de todo o curso.

Ao meu querido pai Nivaldo Rodrigues e meus amados irmãos Nyebson Menezes e Nyedja Menezes pelo carinho e incentivo constante.

A minha mãe, Maria do Carmo Menezes Rodrigues, a pessoa que mais admiro e respeito nesta vida, pois sempre me apoiou e acreditou em mim e a quem eu devo tudo que sou e que tenho, a ela serei eternamente grata, agradeço pelo incentivo diário na minha vida. Sua insistência me fez ter forças para concluir este trabalho.

Ao meu querido esposo, George Henrique Pereira Ramos, por toda a sua paciência e compreensão, em virtude dos poucos momentos que estivemos juntos, em decorrência da elaboração deste trabalho, nos últimos 4 anos. A ele, o meu amor e a minha gratidão no qual ressalto o cuidado com esmero do nosso pequeno e amado filho Matheus em várias madrugadas, para possibilitar que eu finalizasse este trabalho.

A todas as pessoas que participaram direta ou indiretamente da realização deste sonho.

## RESUMO

O Agreste pernambucano sempre apresentou um cenário de problemas com suprimento de água e cada vez mais torna-se necessário e urgente trazer água de distâncias cada vez maiores. Neste contexto, as transposições de água se mostram de grande relevância como principal alternativa para minimizar os déficits hídricos existentes. O presente estudo buscou contribuir com a gestão de sistemas hídricos, por meio do desenvolvimento de um modelo que possibilitasse apoiar a decisão dos gestores públicos, através de uma operação racional de reservatórios e transferências de água entre bacias. Para alcançar os objetivos propostos, foram realizadas coletas de dados e simulações e pôde-se identificar os principais fatores que limitam o suprimento satisfatório de água nesta região. Para subsidiar o alcance dos objetivos específicos foram avaliados o comportamento mensal dos percentuais e volumes acumulados das barragens existentes. Foram simulados cenários para o abastecimento pleno das localidades do Agreste de Pernambuco e foi possível quantificar os déficits existentes para cada cidade do Agreste. Foram, portanto, identificadas as necessidades de vazão em litros por segundo de importação de água, de outras regiões para o Agreste, através do modelo proposto para operação de reservatórios, utilizando-se o método do monitor de secas, implantado no Nordeste brasileiro pelo Banco Mundial. Considerando-se as demandas de 2014 foram obtidos os déficits totais mínimos e máximos para atender a todas as cidades do Agreste. A partir dos resultados obtidos concluiu-se que para suprir os déficits existentes, seria necessária que a 2ª etapa da Transposição do rio São Francisco tivesse sido concluída, comprovando-se a importância da finalização destas obras de transposição para que se possa ter o atendimento pleno a população destas cidades.



Palavras-Chave: Modelagem. Gestão recursos hídricos. Agreste Pernambuco.

## ABSTRACT

The Agreste pernambucano always presented a scenario of problems with water supply and increasingly becomes necessary and urgent to bring water from ever greater distances. In this context, the jutting out of the water are of great importance as the main alternative to minimize water deficits. The present study sought to contribute to the management of water systems, through the development of a model to allow support the decision of public managers, through a rational operation of reservoirs and water transfers between basins.

To achieve the proposed objectives, and data collections were carried out simulations and can identify the main factors which limit the satisfactory water supply in this region. To support the achievement of specific objectives were evaluated monthly behavior of percentages and accumulated volumes of existing dams. Scenarios were simulated for the full supply of the locations in the Wild of Pernambuco and it was possible to quantify existing deficits for each city in the Wild. Scenarios were simulated for the full supply of the locations in the Wild of Pernambuco and it was possible to quantify existing deficits for each city in the Wild. Were, therefore, identified the needs of flow rate in liters per second of water importation from other regions to the Wild, through the proposed model for reservoir operation, using the method of dry monitor, deployed in the northeast of Brazil by the World Bank. Considering the demands of 2014 were obtained the minimum and maximum total deficits to meet all the cities of the Wild. From the results obtained it was concluded that to address existing deficits, would require that the second step of the transposition of the São Francisco River had been completed, proving the importance of the completion of these works for transposition in order to have full service the population of these cities.



Keywords: Modeling. Water resources management. Agreste Pernambuco.

## LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Áreas de limitação hídrica no mundo.....34
Figura 2 - Nova abrangência da região semiárida e subúmida seca do Nordeste do Brasil.....35
Figura 3 - Mapa do Clima, área geográfica de Pernambuco e adjacências.....36
Figura 4 - Mapa do Nordeste com áreas de desertificação identificadas.....37
Figura 5 - Mapa da média dos dias sem chuva por ano na região Nordeste.....38
Figura 6 - Vazão média por habitante nas regiões hidrográficas brasileiras.....41
Figura 7- População pernambucana abastecida pelo carro-pipa.....42
Figura 8 - Localização da área de estudo.....52
Figura 9 - Mapa de Pernambuco com as mesorregiões, com destaque o Agreste.....53
Figura 10 - Condições hídricas nas sedes municipais brasileiras, 2014.....53
Figura 11 - Condições do abastecimento nas sedes municipais brasileiras, 2014.....54
Figura 12 - Mapa contendo os municípios que necessitam de um novo manancial.....55
Figura 13 - Municípios e as respectivas frequências de ocorrência de secas e estiagens entre 2003 e 2015.....56
Figura 14 - Intensidade das áreas impactadas pela seca de outubro a novembro de 2015, na região do semiárido.....57
Figura 15 - Locais com maior extensão de áreas atingidas pela seca, na região do semiárido.....58
Figura 16 - Rios perene e intermitente no âmbito do semiárido nordestino.....59
Figura 17 - Classificação dos principais rios brasileiros quanto a razão entre a vazão de retirada e a disponibilidade hídrica.....60
Figura 18 - Cenários da seca nos anos de 2014 no Nordeste.....60
Figura 19 - Cenários da seca nos anos de 2015 no Nordeste.....61
Figura 20 - Cenários da seca nos anos de 2016 no Nordeste.....62
Figura 21 - Evolução dos estoques de água dos reservatórios e da precipitação em Pernambuco.....67
Figura 22 - Situação do percentual de volume das 24 principais barragens do Agreste e Zona da Mata de Pernambuco em dezembro de 2016.....68
Figura 23 - Infraestrutura hídrica da obra da Transposição.....68
Figura 24 - Arranjo geral do Ramal do Agreste.....69
Figura 25 - Vista aérea do início do eixo leste da obra de transposição.....69

Figura 26 - Localização da captação do sistema Pirangi.....70
Figura 27 - Croqui sistema Pirangi.....71
Figura 28 - Diagrama unifilar do sistema Pirangi.....72
Figura 29 - Imagem da Barragem Serro Azul.....73
Figura 30 - Mapa com áreas da influência do sistema Serro Azul.....73
Figura 31 - Instrumentos e coleta de dados do estudo.....75
Figura 32 - Mapa de Pernambuco com destaque para as cidades investigadas.....76
Figura 33 - Simulação realizada em Jucazinho no período de 1973 a 2016.....78
Figura 34 - Fluxograma com detalhes do modelo de simulação proposto.....84
Figura 35 - Exemplo de croqui esquemático elaborado com ofertas de água para a cidade de Caruaru.....85
Figura 36 - Exemplo de croquis esquemático de sistemas isolado e Integrado.....86
Figura 37 - Histórico dos volumes acumulados em % da Barragem do Prata, no período de 2008 a 2016.....89
Figura 38 - Vazões médias mensais da Barragem do Prata, no período de 2008 a 2016.....90
Figura 39 - Planilha utilizada para realizar as simulações, no caso da barragem do Prata, no ano de 2008.....91
Figura 40 - Planilha utilizada para realizar as simulações, no caso da barragem do Prata, no ano de 2013.....92
Figura 41 - Planilha utilizada para realizar as simulações, no caso da barragem do Prata, no ano de 2014.....92
Figura 42 - Planilha utilizada para realizar as simulações, no caso da barragem do Prata, no ano de 2014.....93
Figura 43 - Planilha utilizada para realizar as simulações, no caso da barragem do Prata, no ano de 2014.....94
Figura 44 - Volumes armazenados na barragem de Jucazinho no período de 2008 a 2016.....95
Figura 45 - Vazões captadas na barragem de Jucazinho no período de 2008 a 2016.....96
Figura 46 - Planilha utilizada para análise do comportamento da barragem em 2008.....96
Figura 47 - Planilha utilizada para análise do comportamento da barragem no ano de 2016.....97
Figura 48 - Resumo dos procedimentos utilizados para a realização das simulações do Monitor de Secas.....98

Figura 49 - Gráfico com os déficits totais mensais em l/s obtidos obtido após simulações (2014).....99
Figura 50 - Déficits totais mensais em l/s obtidos obtido após simulações (2037).....99
Figura 51 - Linha do tempo com previsão de incrementos das transposições para o Agreste.....102
Figura 52 - Volumes históricos x volumes com a regra do monitor – sistema do Prata (2014).....103
Figura 53 - Captações históricas x captações com a regra do monitor – sistema do Prata.....104
Figura 54 - Volumes históricos x volumes com a regra do monitor – sistema de Jucazinho.....104
Figura 55 - Captações históricas x captações com a regra do monitor – sistema do Jucazinho.....91

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Relação da oferta e demanda das cidades (amostra do estudo).....63
Tabela 1 - (Relação da oferta e demanda das cidades (continua).....64
Tabela 2 - Relação da oferta e demanda das cidades da amostra de estudo e situação de déficit ou superávit.....65
Tabela 2 - Relação da oferta e demanda das cidades da amostra de estudo e situação de déficit ou superávit (continua).....66
Tabela 3 - Cenários de Seca, com gatilhos e metas de Resposta.....84
Tabela 4 - Relação das cidades que serão contempladas pelo sistema adutor do agreste e suas demandas para os anos de 2014 e 2037.....87
Tabela 5 - Demandas e capacidade de transporte - Barragem do Prata.....89
Tabela 6 - Vazões médias disponibilizadas pela barragem de Jucazinho.....94
Tabela 7 - Vazões a serem disponibilizadas a partir das transposições.....100
Tabela 8 - Déficits máximos e médios de cidades no Agreste.....101

## LISTA DE ABREVIAÇÕES

ANA – Agência Nacional das águas

APAC – Agência Pernambucana de águas e Clima

COMPESA – Companhia Pernambucana de Saneamento

DMD – Demanda Máxima Diária

FDE – Fundo Nacional de Investimento do Nordeste

FUNCEME – Fundo Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos

IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística

INEMA- Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos

IP – Índice de Perdas

NDVI – Índice de Vegetação

ONU – Organização das Nações Unidas

# SUMÁRIO

**1 INTRODUÇÃO**.....15
1.1 Abordagem do Problema.....18
1.2 Objetivos.....18
1.2.1 Objetivo Geral.....18
1.2.2 Objetivos Específicos.....19
1.3 Estrutura.....19

**2 REFERENCIAL TEÓRICO**.....20
2.1 Teorias do desenvolvimento.....20
2.2 Desafios do desenvolvimento no semiárido.....21
2.3 Panorama de secas.....27
2.4 Experiências de transposições das águas.....30
2.5 Modelagem: Simulação e Otimização de Sistemas Hídricos.....34

**3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO**.....39
3.1 Composição dos sistemas onde foi aplicado o modelo.....41
3.2 Características hidroclimáticas.....43
3.3 Disponibilidade hídrica no Agreste Pernambucano.....45
3.4 Projeto Transposição: Sistema Integrado Adutor do Agreste.....53
3.5 Outros Sistemas complementares para suprimento de água para o Agreste.....56
3.5.1 Sistemas da Zona da Mata – Sistema Pirangi.....57
3.5.2 Sistemas da Zona da Mata – Sistema Sirigi.....59
3.5.3 Sistemas da Zona da Mata – Barragem Serro Azul.....59

**4 METODOLOGIA**.....61
4.1 Descrição do modelo utilizado nas simulações de barragens.....62
4.1.1 Balanço hídrico dos reservatórios.....63
4.1.2 Descrição do modelo do monitor de secas.....65
4.1.3 Croquis e esquemas gráficos utilizados.....71
4.1.4 Demandas das localidades a serem atendidas.....73

**5 ANÁLISES E RESULTADOS OBTIDOS**.....75
5.1 Evolução dos reservatórios e da oferta de água para as cidades do Agreste no atual ciclo de seca.....75
5.1.1 Barragem do Prata.....80
5.1.2 Barragem de Jucazinho.....84
5.2 Aplicação do conceito do Monitor da Seca para o balanço hídrico nos reservatórios e determinação das demandas não atendidas.....89
5.2.1 Sistema Integrado do Prata.....89
5.2.2 Sistema Jucazinho.....90
**6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES** .....92
6.1 Conclusões.....92
6.2 Recomendações para trabalhos futuros.....93

**REFERÊNCIAS**.....95

**APÊNDICE A**.....102

# 1 INTRODUÇÃO

Com o desenvolvimento das cidades alguns itens básicos da infraestrutura se tornam imprescindíveis para o crescimento saudável de uma sociedade e a água é um dos insumos mais importantes neste contexto. Por outro lado, o consumo de água tem aumentado, a cada dia, devido à sua utilização nos mais diversos usos, como também, devido ao crescimento populacional das cidades e, sobretudo face ao desenvolvimento econômico.

A água sempre foi um condicionante para a localização e o desenvolvimento das comunidades, desde que o homem se tornou um ser gregário, ou seja, aquele que vive em grupos. Dessa forma, a cada dia que passa, essa questão se torna um verdadeiro desafio agravado, principalmente, pelos fenômenos sociais e ambientais contemporâneos, ou seja, o crescimento populacional, a urbanização, a sociedade de consumo, a crise ambiental e as mudanças climáticas (HELLER & PÁDUA, 2006).

Segundo Carrera (2002), a problemática se agrava na medida que se constatam demandas por água cada vez maiores, com limitado suprimento. O crescimento econômico desordenado da ocupação não apropriada do solo, aliado ao uso do perdulário dos recursos da água, têm contribuído para tornar certas bacias hidrográficas incompatíveis com as demandas nas suas múltiplas modalidades de uso.

O aumento da urbanização foi marcante no século XX. Em 1900, somente 13% da população global residia em área urbanas. Em 2007, a população urbana cresceu para 49,4%. Em 2050, estima-se em 69,6% a população urbana mundial e neste contexto, Tucci (2010) e Tundisi *et al.* (2014) destacam o papel do processo da crescente urbanização no agravamento da crise hídrica.

De acordo com Cirilo (2015), a problemática dos recursos hídricos nas regiões semiáridas mais habitadas é uma questão crucial para superação dos obstáculos ao desenvolvimento. Historicamente, os maiores déficits hídricos do Brasil são registrados no Nordeste, em sua porção semiárida, que enfrenta ciclos recorrentes de ocorrência de secas. A seca é um dos mais complexos fenômenos naturais, sendo um enorme desafio aos governos de regiões atingidas por esse tipo de ocorrência, a realização de ações para mitigar seus efeitos e reduzir a vulnerabilidade da sociedade para o convívio com o fenômeno, que é parte do clima, de recorrência inevitável (CIRILO, 2015).

Buscar tecnologias e alternativas de otimizar a gestão dos recursos hídricos torna-se cada vez mais uma prioridade, em prol da minimização dos problemas de restrição de disponibilidade hídrica, no semiárido nordestino. Segundo Rebouças (1997), o uso de

ferramentas capazes de planejar e gerenciar de forma integrada os recursos hídricos vem se tornando frequentes e na busca para solucionar os complexos problemas, no uso dos recursos hídricos, lança-se mão de técnicas capazes de auxiliar no processo de análise, operação, planejamento e tomada de decisão em sistemas de recursos hídricos. Nestas condições, a avaliação do problema da água não pode mais se restringir a um simples balanço, entre a oferta e a demanda.

No semiárido brasileiro e mais especificamente no Agreste de Pernambuco, cenário do presente trabalho, os mananciais disponíveis não oferecem garantias para o abastecimento de água à população, seja em quantidade, seja em qualidade da água, evidenciando um cenário de conflitos que requer tratamento complexo e visão de planejamento estratégico.

O Agreste de Pernambuco historicamente apresentou problemas com suprimento de água, onde em sua grande maioria, existiam restrições ao abastecimento da população destas localidades havendo, portanto, a necessidade de alocação de água envolvendo transposições de pequeno, médio e grande porte. Esta característica é bem peculiar e específica de regiões onde há uma grande concentração de pessoas, poucas opções de mananciais locais, baixos índices pluviométricos e altas taxas de evaporação. Dessa forma, ao longo dos anos, faz-se necessário e urgente trazer água de distâncias cada vez maiores para garantir um suprimento hídrico mínimo e regular, para atender à população desta região. Neste contexto, verifica-se que as transposições de água e sistemas integrados fazem parte da realidade do Agreste de Pernambuco.

Mello (2006) enfatiza que algumas experiências anteriores de transposições de águas demonstram que estes empreendimentos têm sido absolutamente insatisfatórios, pois, seus resultados costumam ser economicamente vultuosos, socialmente injustos e ambientalmente drásticos.

Lima (2005) por outro lado apresenta que existem transposições que mesmo sendo ambientalmente incorretas são absolutamente necessárias, por conta de carência de água para o abastecimento e a dessedentação de humanos. Nesse caso, o dano ambiental passa a ser compensado pela necessidade social antrópica, porém, ainda assim, não se pode esquecer que existe um prejuízo ambiental.

No caso da transposição do rio São Francisco, após anos de polêmicas e discussões quanto à sua viabilidade, iniciou-se a sua fase de implantação, através da realização de um complexo de obras estruturadoras, com intuito de trazer uma vazão total nos dois eixos a qual está previsto de 114,3 m³/s, respeitando as projeções de consumo humano de água para 2025. De um modo geral um projeto de transposição de águas tem por objetivo amenizar ou resolver

o problema de escassez de água em determinada região e, de acordo com Caúla e Moura (2006), a integração de bacias hidrográficas é hoje uma possibilidade técnica à altura de qualquer país com razoável grau de desenvolvimento.

O cenário de secas que se desenvolveu no quinquênio 2012 - 2016, mostra uma fragilidade extrema dos mananciais existentes no Agreste de Pernambuco. Neste contexto, percebe-se que as transposições de água e os sistemas integrados de abastecimento são importantes alternativas para suprimento de água e cogitadas como soluções relevantes e até consideradas como definitivas para os problemas de desabastecimento e insegurança hídrica nesta região. Diante desta problemática, para subsidiar o presente estudo, buscou-se verificar o comportamento das barragens existentes para suprimento de água das cidades do Agreste de Pernambuco. Dessa forma, foram realizadas simulações para cada uma das barragens existentes, no período de 2008 a 2016, através de planilhas de cálculo, tendo-se como base uma metodologia aplicada pelo Monitor de Secas, implementada em Pernambuco em 2014, através do apoio do Banco Mundial.

Este método permite a análise dos volumes mensais estocados nas barragens e correlaciona outros parâmetros, tais como o cenário de secas e gatilhos para operação e controle das retiradas de volume dos reservatórios, a partir do estado de seca existente. O método estabelece 5 estados que são denominados normal, alerta, seca, seca severa e seca extrema e 4 gatilhos operacionais que estabelecem mecanismos de controle e restrição de captações. Um dos principais objetivos do uso deste modelo é minimizar problemas com colapsos das barragens em virtude da falta de um padrão operacional para controle do uso dos volumes de água armazenados.

De 2012 a 2016, a estiagem e secas no período alertam para um desafio presente e uma oportunidade político-institucional para se aprimorar métodos e práticas para combate aos seus efeitos adversos, e mecanismos de gestão e gerenciamento em resposta ao fenômeno climático e planejamentos realizados corretamente e implementados durante os períodos sem seca, pode melhorar a capacidade governamental para responder de uma forma antecipada e eficaz a escassez hídrica. A partir dos dados coletados e simulados foram analisados os comportamentos das barragens e as possibilidades de atendimento para cada uma das 67 localidades no tocante aos problemas existentes com déficit hídrico e possibilidades de suprimento pleno. Dessa forma, o modelo proposto poderá ser utilizado como suporte para o planejamento dos sistemas de água, com ações para garantir o equilíbrio entre a disponibilidade e a demanda em horizontes futuros, com a utilização de regras de operação dos sistemas hídricos em condições normais e regras para cenários futuros de seca e

consequentemente, com vistas à redução de riscos de desabastecimento e minimização dos problemas decorrentes da falta de água à população desta região.

## 1.1 Abordagem do problema

Mesmo com a existência de uma tendência de aumento da população brasileira com acesso à água tratada, esses avanços não têm sido suficientes para romper o ciclo de pobreza, desigualdade e fracassos governamentais que envolvem o tema (REYMÃO, 2007). O Agreste Pernambucano sempre foi cenário de problemas decorrentes da baixa oferta hídrica *versus* o crescente aumento populacional nessa região e dessa forma é fundamental que se tenha mecanismos para otimizar o gerenciamento dos recursos hídricos existentes. Um planejamento adequado da utilização racional da água é necessário para que se possam identificar locais onde há escassez de água e minimizar os diversos conflitos existentes, tais como o abastecimento humano, irrigação, sedentação de animais, agricultura, energia, dentre outros.

Diante do cenário apresentado, buscou-se desenvolver no presente estudo, um modelo para avaliação e análise dos comportamentos dos mananciais de 67 localidades do Agreste Pernambucano, região com piores condições de suprimento de água deste estado, como também verificar por meio de simulações as possibilidades futuras para atendimento e suprimento pleno de água.

O critério de escolha das cidades para o presente estudo, levou em consideração a localização no Agreste de Pernambuco e os suprimentos futuros, complementares de abastecimento de água, oriundos da transposição do rio São Francisco e da Zona da Mata Pernambucana.

## 1.2 Objetivos

### 1.2.1 Objetivo geral

O objetivo geral do presente trabalho é desenvolver um processo de suporte à decisão para atendimento do consumo de água, nos núcleos urbanos em regiões de escassez, que considere o aproveitamento das fontes locais, mediante operação racional das mesmas, e a transferência de água entre bacias para complementar o atendimento da demanda. Para subsidiar o alcance deste objetivo será quantificado o aporte de água necessário para

possibilitar o atendimento pleno de água para as cidades do Agreste Pernambucano, com base nos diversos estados de seca.

### 1.2.2 Objetivos específicos

1. Caracterizar o cenário atual da disponibilidade hídrica e suas limitações, para as cidades do Agreste de Pernambuco, correlacionando a produção de água existente e a relação oferta x demanda;
2. Avaliar o comportamento mensal dos percentuais e volumes acumulados das barragens existentes no Agreste de Pernambuco, a partir da simulação dos cenários de secas, no período de 2008 a 2016;
3. Avaliar a necessária importação de águas de outras regiões para o Agreste, através de um modelo para operação de reservatórios, com base nos estados de secas e quantificação dos déficits.

## 1.3 Estrutura

Este trabalho está dividido em sete capítulos onde: o primeiro traz a introdução, as considerações iniciais, objetivos do trabalho e a abordagem do problema; o segundo apresenta a revisão teórica, com os conceitos que envolvem temas relacionados ao desenvolvimento, como também ocorrências de secas na região; monitoramento e operação de sistemas integrados de abastecimento e modelos de simulação. Já o terceiro capítulo, apresenta a caracterização da área de estudo com a composição dos sistemas onde foi aplicado o modelo. o quarto traz a metodologia com a descrição do modelo de simulação e os parâmetros utilizados; o quinto capítulo apresenta os aspectos matemáticos do modelo; o sexto traz os resultados da análise da oferta e demanda das barragens do semiárido pernambucano, a análise dos cenários de tendência de crescimento das localidades utilizadas no estudo, como também quanto a alocação de água e a modelagem do sistema com vistas a otimização da alocação de água, no sétimo capítulo tem-se as conclusões e recomendações para trabalhos futuros e ao final as referências bibliográficas utilizadas e o apêndice.

# 2 REFERENCIAL TEÓRICO

## 2.1 Teorias do desenvolvimento

Neste capítulo, foram reunidos conceitos referentes às temáticas inerentes ao presente estudo que envolvem e abordam o desenvolvimento, os desafios do desenvolvimento no semiárido, a crise histórica do Agreste de Pernambuco, através do panorama das secas, transferências de águas e a modelagem: simulação e otimização de sistemas hídricos.

Veiga (2008) esclarece que existem três tipos básicos de respostas à indagação "O que é o desenvolvimento?". O mais frequente é tratar o desenvolvimento como sinônimo de crescimento econômico. Isso simplifica a tarefa de responder à pergunta, pois dois séculos de pesquisas históricas, teóricas e empíricas sobre o crescimento econômico reduziram bastante a margem de dúvida sobre essa noção.

Sandroni (1994) considera desenvolvimento econômico como crescimento econômico (incrementos positivos no produto) acompanhado por melhorias do nível de vida dos cidadãos e por alterações estruturais na economia. Para o autor, o desenvolvimento depende das características de cada país ou região. Isto é, depende do seu passado histórico, da posição e extensão geográficas, das condições demográficas, da cultura e dos recursos naturais que possuem.

No Brasil, os setores governamentais que tratam das ações relacionadas com a água, como por exemplo, os de saúde/saneamento, tiveram o seu desenvolvimento seguindo etapas diferenciadas, associando-se, de maneira geral, aos ciclos macroeconômicos, bem como às mudanças políticas endógenas e exógenas, as quais podem interferir diretamente na criação, continuidade ou abandono dos modelos norteadores das políticas setoriais implementadas por diferentes órgãos integrantes do aparelho estatal (SILVA et al, 2005).

Como propõe Reyes (2000), o desenvolvimento compreende hoje uma tripla condição: social, no sentido de acesso à educação, moradia, serviços de saúde, alimentação, uso racional e sustentável dos recursos, respeito à cultura e tradições no seu entorno social; econômico, em relação às oportunidades de emprego, satisfação, como mínimo, das necessidades básicas e uma boa distribuição da riqueza; e político, a respeito da legitimidade não só em termos legais, mas também em termos de prover à maioria da população de benefícios sociais. Outros autores como Sachs (2000) e Furtado (1998), nos remetem à uma idéia similar: o desenvolvimento econômico como mito.

O crescimento econômico pode ser importante como um meio de expandir as liberdades desfrutadas por um membro da sociedade. Porém, as liberdades dependem também de outros determinantes como os serviços básicos de educação, saúde, saneamento, ou os direitos civis (VEIGA, 2008).

Para Sen (2000), o desenvolvimento pode ser encarado como um processo de alargamento das liberdades reais de que uma pessoa goza. A tônica nas liberdades humanas contrasta com perspectivas mais restritas de desenvolvimento, que o identificam com o crescimento do produto nacional bruto, com o aumento das receitas pessoais, com a industrialização, com o processo tecnológico ou com a modernização social.

Neste aspecto, o desenvolvimento requer que se movam as principais fontes de privação de liberdade: pobreza e tirania, carência de oportunidades econômicas e destituição social sistemática, negligência dos serviços públicos e intolerâncias ou interferências de Estados repressivos (SEN, 2000).

Sen (2000) acrescenta ainda que, às vezes, a ausência de liberdades substantivas relaciona-se diretamente com a pobreza econômica que rouba das pessoas a liberdade de saciar a fome, de obter uma nutrição satisfatória ou remédios para doenças curáveis, a oportunidade de vestir-se ou de morar num local apropriado, a possibilidade a ter acesso à água tratada ou esgoto sanitário. Em outros casos, a privação de liberdade vincula-se estreitamente à carência de serviços públicos e assistência social.

O conceito de desenvolvimento é também considerado um processo de mudança qualitativa da estrutura econômica, medido pelo crescimento dos índices de nível de vida nos direciona para os índices representativos desta situação. Podem-se adotar níveis de escolaridade, de saneamento, taxas de mortalidade, ou outros indicadores sociais (BENITEZ, 2005).

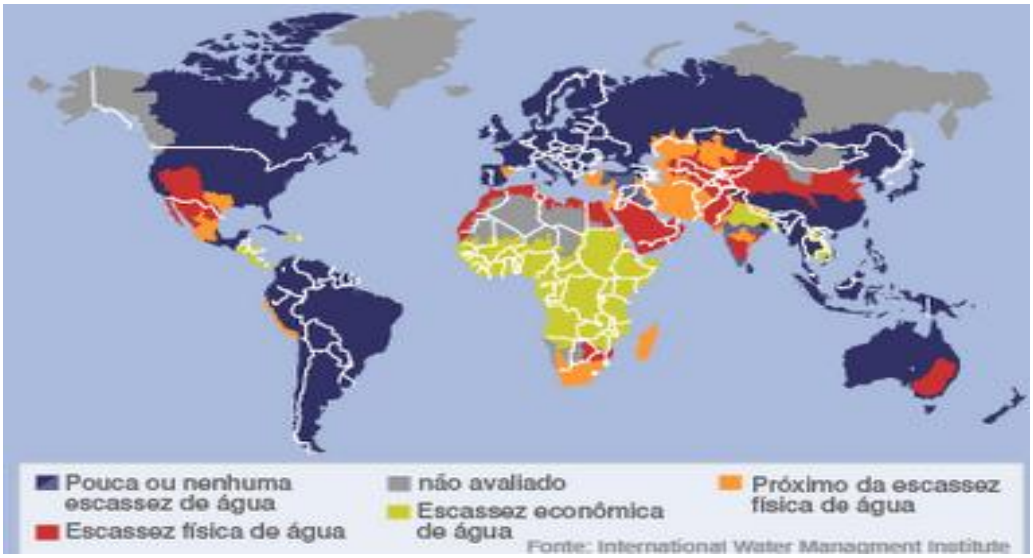
## 2.2 Desafios do Desenvolvimento no Semiárido

De acordo com Silva *et al* (2005), a área de domínio do semiárido teve ao longo da história outras denominações como Sertão e o nordeste das secas. Oficialmente, a primeira delimitação da região foi estabelecida em 1936 com o polígono das secas. O conceito técnico de semiárido é decorrente de uma norma da Constituição Brasileira de 1988, mais precisamente do seu artigo 159, que institui o Fundo Nacional de Financiamento do Nordeste (FNE).

No semiárido o período de chuvas é entre dezembro e março e na região do agreste de Pernambuco temos o regime de chuvas concentrado em quatro meses por ano com picos entre março a julho (ANA, 2012).

Verifica-se que na América do Sul além da ocorrência no Nordeste do Brasil, encontram-se áreas de semiaridez no norte do continente, na Venezuela e Colômbia e no cone sul estendendo-se desde a Patagônia na Argentina até o Norte do Chile, Peru e Equador. Na Figura 1 tem-se uma representação do mapa Mundial, contendo as áreas com limitações hídricas no cenário mundial, no qual Brasil é considerado uma região com pouca ou nenhuma escassez de água.

Figura 1 - Áreas de limitação hídrica no mundo.




Fonte: Site do Internacional Water Managment Institute, (2015), acesso em 14 de dezembro de 2016.

De acordo com Furtado (1998), as soluções para os problemas do semiárido precisam ser concebidas, programadas e executadas na perspectiva do desenvolvimento, convivência com as secas e a semiaridez. Um ponto importante é que as transformações requeridas para o desenvolvimento não podem ser implementadas com rapidez.

A contribuição do setor público é fundamental, mas é necessário considerar que já se conta com um setor privado dotado de capacidade para investir, através de organizações sociais estruturadas em função dos problemas e possibilidades do semiárido (FURTADO, 1998).

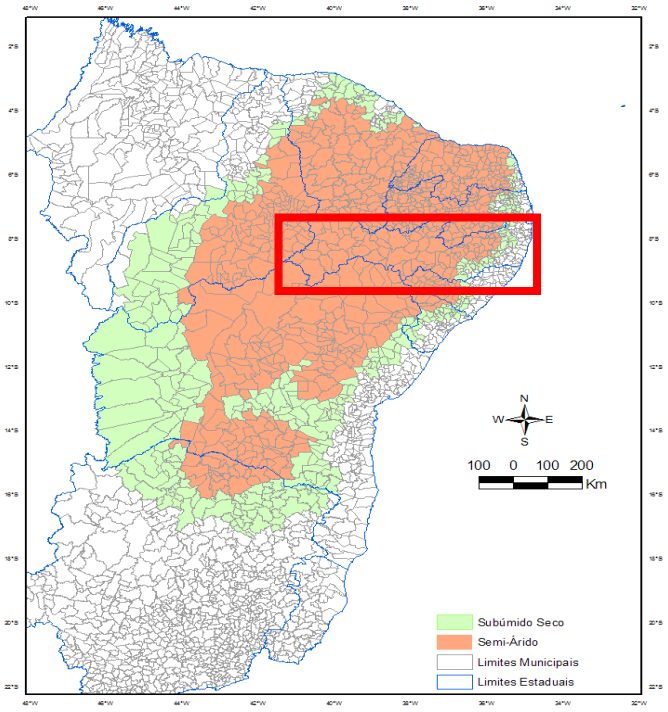
Cirilo *et al* (2008) ressalta que a problemática dos recursos hídricos nas regiões semiáridas mais habitadas é uma questão crucial para superação dos obstáculos ao desenvolvimento e que os governos de muitas regiões semiáridas do mundo vêm atuando com

o objetivo de implantar infraestruturas capazes de disponibilizar água suficiente para garantir o abastecimento humano e animal e viabilizar a irrigação.

Garjulli (2010), ressalta que a região semiárida se caracteriza, principalmente, pela escassez de água, decorrente da incidência de chuvas apenas em curtos períodos de três a cinco meses por ano, irregularmente distribuídas no tempo e no espaço. Essa característica causa uma forte dependência da intervenção do homem sobre a natureza, no sentido de garantir, por meio de obras de infraestrutura hídrica, o armazenamento de água para abastecimento humano e demais usos produtivos.

Após um trabalho desenvolvido pelo Ministério da Integração Nacional para reavaliação dos limites da região semiárida do Nordeste, foram acrescentados aos 1.031 municípios incorporados nos limites até então vigentes, outros 102 novos municípios enquadrados em critérios estabelecidos (precipitação, índice de aridez e risco de secas). Dessa forma, a área classificada oficialmente como semiárida aumentou de 892.309,4 km² para 969.589,4 km². A Figura 2 apresenta os limites dos municípios inseridos na nova delimitação do semiárido e subúmido seco nordestino com destaque para o estado de Pernambuco, definidos em 2005 pelo grupo de trabalho interministerial do Ministério Integração Nacional.

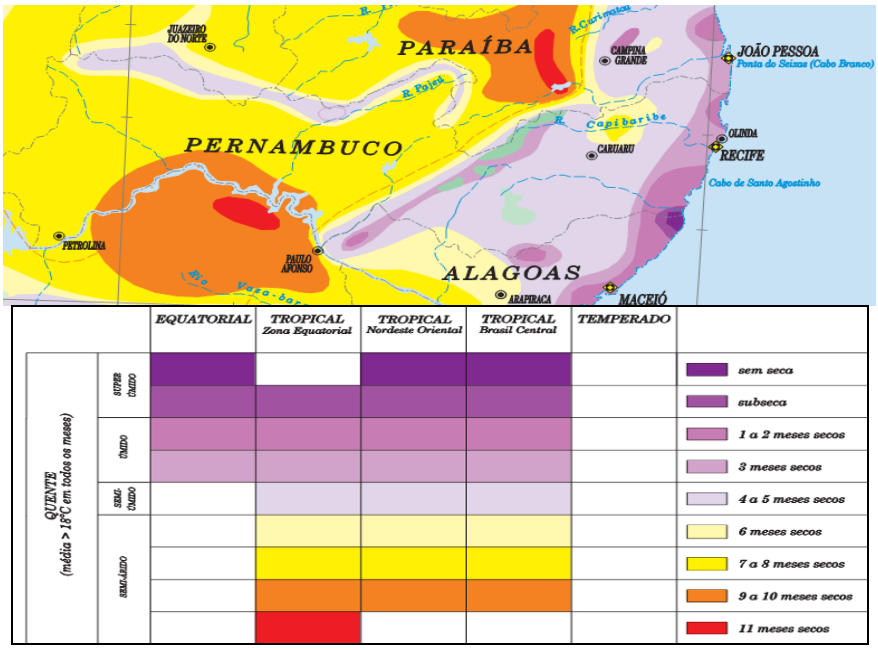
Figura 2 - Nova abrangência da região semiárida e subúmida seca do Nordeste do Brasil.




Fonte: ANA (2012).

Na Figura 3, tem-se o mapa do Clima, contendo a área geográfica de Pernambuco e adjacências, no qual verifica-se que na região Agreste do Estado tem-se até 4 a 5 meses secos, durante um ano.

Figura 3 - Mapa do Clima, área geográfica de Pernambuco e adjacências.




Fonte: Modificado, mapa clima do IBGE (2010).

Os componentes de evaporação após as chuvas são maiores do que aqueles provenientes do escoamento superficial e infiltração subterrânea configurando taxas negativas no balanço hídrico da região (CRUZ *et al*., 2008). Trata-se, portanto, de uma área vulnerável, em que a sazonalidade interanual das chuvas pode acarretar condições extremas, caracterizando períodos críticos de seca responsáveis pelo êxodo de parte da população.

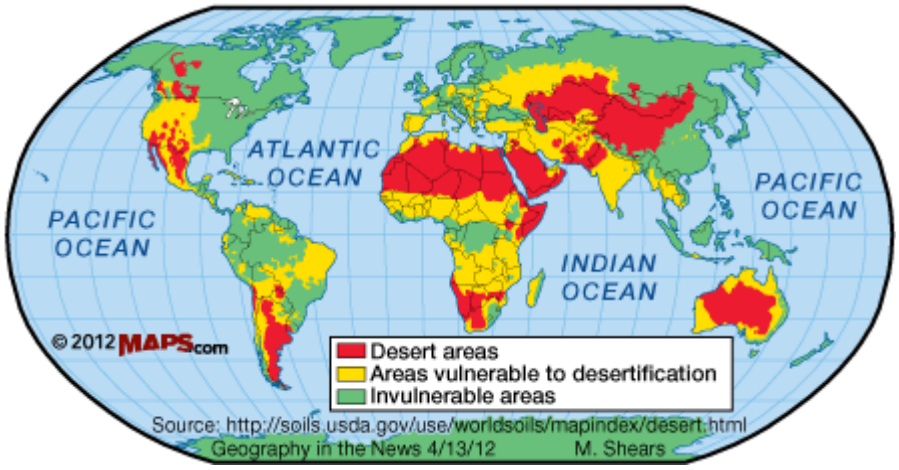
De acordo com dados da ANA (2012), a variabilidade do clima e dos eventos extremos tem afetado seriamente o Brasil durante os primeiros anos do século XXI. No Brasil equatorial e tropical, as mudanças afetam o ciclo hidrológico e nos recursos hídricos. Por exemplo, a precipitação diminui à medida que o clima fica mais quente a cada dia. As mudanças climáticas alteram os valores de precipitação e aumentam a variabilidade dos eventos de precipitação, o que pode levar a enchentes e secas ainda mais intensas e frequentes

Outro fator a se considerar é que, além da existência de um cenário climático difícil, persiste ainda o elevado contingente populacional disperso na região semiárida brasileira que se estende pelos Estados da Bahia, Sergipe, Alagoas, Pernambuco, Paraíba, Rio Grande do Norte, Ceará e Piauí e regiões Norte e Nordeste do Estado de Minas Gerais.

O problema da falta de disponibilidade de água para uso humano se apresenta nas regiões hidrográficas brasileiras em que há conjugação de densidade populacional elevada com ocorrência de vazões específicas de média a baixa (ANA, 2012).

A caatinga é hoje um dos biomas brasileiros mais ameaçados pelo uso intempestivo dos seus recursos naturais. As maiores extensões de áreas de processos de desertificação no Brasil com a perda gradual da fertilidade biológica de solo, estão localizadas no semiárido, resultado da combinação de um cultivo inadequado do campo, associado a variações climáticas e as características do solo pedregoso ou impermeável. Na Figura 4 é apresentado o mapa mundial com áreas de desertificação identificadas, onde a região do Agreste de Pernambuco é caracterizada com uma área vulnerável a desertificação.

Figura 4 - Mapa mundial com áreas de desertificação identificadas.




Fonte: Site *http://soils.usda.gov/use/worldsoils/mapindex/desert.html*, acessado em 12 de dezembro de 2016.

O cenário de baixa disponibilidade natural de água, associado a densidades populacionais mais elevadas, gera conflitos de uso pela água, como nas regiões hidrográficas costeiras do Nordeste Oriental e em parte das regiões hidrográficas do Parnaíba e do São Francisco. Nessas regiões hidrográficas, a irregularidade das chuvas, não só ao longo do ano, como também em sequências críticas plurianuais de precipitações, agrava ainda mais, a disputa pela água e os problemas sociais dessas regiões. No entanto, é no semiárido dessas regiões que o fenômeno da seca tem repercussões mais graves e a água passa a ser fator de sobrevivência.

Quanto aos grandes reservatórios, administrados por órgãos estatais garantiram-se sua utilização pública sem, contudo, articular esta disponibilidade de água com outras políticas públicas, tais como as políticas agrícolas e agrárias, o que serviu para potencializar a capacidade produtiva de quem já era proprietário de terra, quer seja nas proximidades dos

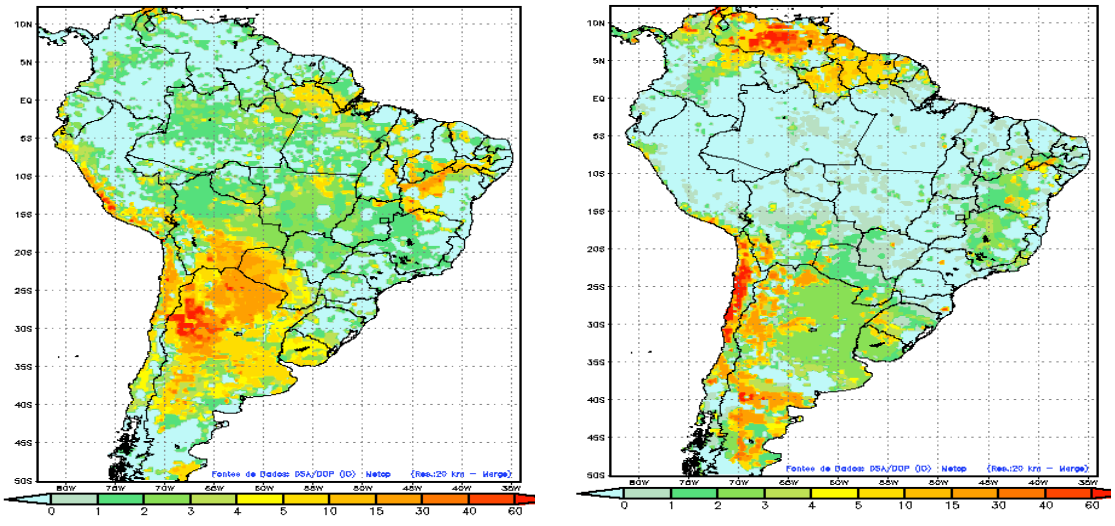
açudes ou mesmo ao longo dos vales que se tornaram perenes devido à liberação de águas desses reservatórios nos períodos de escassez (GARJULLI, 2010).

Garjulli (2010), destaca que essa nova postura frente à problemática hídrica encontra inúmeros desafios em sua implementação, uma vez que muda de forma significativa o enfoque sobre o setor e se contrapõe a práticas historicamente estabelecidas, em especial no Nordeste semiárido, tais como: a cultura de privatizar o uso da água; as decisões governamentais tomadas de forma centralizada; as ações assistenciais que caracterizam os períodos de seca; o desinteresse e a ausência de iniciativa dos usuários e da sociedade na busca de alternativas para gestão sustentável dos recursos hídricos. Como decorrência econômica direta, dessa forma de intervenção estatal, as áreas úmidas do Nordeste semiárido tornaram-se supervalorizadas, pois passaram a contar com a garantia de dois elementos produtivos essenciais: terra e água.

A situação de chuvas na região Nordeste do Brasil é um limitador do desenvolvimento seja nos aspectos inerentes as questões referentes ao abastecimento humano como também ao desenvolvimento da agricultura. Nas Figuras 5 (a) e 5 (b) o mapa da média dos dias sem chuva por ano nos anos de 2013 e 2014.

Figura 5 - Dias sem chuva por ano na região Nordeste.

(a) Dias médio sem chuvas em 2013 (b) Dias médio sem chuvas 2014



Fonte: INPE - CPTEC/NASA, (2014).

A variabilidade da precipitação pluvial não é uniforme em todo o Nordeste do Brasil. A região do semiárido nordestino tem os maiores valores de coeficiente de variação da precipitação pluvial e número de dias de chuva do que aqueles apresentados no litoral e agreste nordestino, como pode ser verificado nas Figura 5(a), 5(b). De acordo com Bezerra

(2002), o principal fator limitante do desenvolvimento no semiárido brasileiro é a água. Não propriamente pelo volume precipitado, mas pela quantidade evaporada. As variações climáticas, sobretudo nos períodos de estiagem, agravam um conjunto de questões econômicas e sociais, que comprometem o sistema produtivo.

## 2.3 Panorama de secas

Segundo Cirilo *et al* (2008), as secas diferem uma das outras em três características essenciais: intensidade, duração e cobertura espacial. A intensidade refere-se à precipitação e/ou à severidade associada à falta de chuvas. Isso é medido por meio de índices comparativamente às médias normais e relacionados a períodos na determinação do impacto.

Outra característica que distingue as secas é a sua duração. As secas usualmente requerem um mínimo de 2 a 3 meses para se estabilizar, mas podem continuar por vários anos consecutivos e a magnitude do impacto da seca está diretamente relacionada à duração do evento (CIRILO *et al*, 2008).

Estudos recentes têm demonstrado uma alta correlação entre a ocorrência de eventos extremos, ou seja, secas e cheias, em diferentes partes do planeta e o fenômeno denominado *"El Niño*", associado ao aumento da temperatura da água no oceano Pacífico. No Brasil, *"El Niño"* provoca grandes enchentes na região Sul, nas bacias hidrográficas do Iguaçu, Itajaí, Uruguai e outras, e torna mais severa a seca na região semiárida do Nordeste. Surge, então, a discussão sobre as causas dos eventos extremos, se naturais, se decorrentes da ação do homem. De acordo com Carvalho (2012), é recente o conhecimento disponível a respeito da inter-relação entre mudanças climáticas, desertificação e secas.

O semiárido brasileiro apresenta clima quente e seco com altas temperaturas com chuvas pouco frequentes. Os solos da região são rasos, de baixa fertilidade e a vegetação característica é a caatinga. Esta vegetação nativa do semiárido apresenta diversidade de espécies com folhas atrofiadas, raízes longas e cactáceas, algumas utilizadas para o consumo humano e animal A caatinga é um tipo de floresta baixa e espinhenta, formada por capins e outras plantas rasteiras, arbustos e plantas de porte médio, árvores altas e de altura mediana. Muitas espécies de plantas perdem suas folhas durante uma seca (LUCCI, 2000).

O Brasil é vulnerável às mudanças climáticas atuais e mais ainda às que se projetam para o futuro, especialmente quanto aos extremos climáticos. As áreas mais vulneráveis compreendem a Amazônia e o Nordeste do Brasil, como mostrado em estudos recentes (MARENGO, 2006; AMBRIZZI *et al*., 2007). O conhecimento sobre possíveis cenários

climático-hidrológicos futuros e as suas incertezas pode ajudar a estimar demandas de água no futuro e também a definir políticas ambientais de uso e gerenciamento de água para o futuro.

O Nordeste brasileiro possui apenas 3% de água doce. Em Pernambuco, existem apenas 1.320 litros de água por ano por habitante. A Organização das Nações Unidas (ONU) recomenda um mínimo de dois mil litros de água por habitante por ano. Segundo os relatórios do IPCC (Magrin *et al.,* 2007) e do INPE (MARENGO *et al*., 2006; AMBRIZZI *et al*.,2007), o semiárido tenderá a tornar-se mais árido. Aumentarão a frequência e a intensidade das secas e se reduzirá a disponibilidade de recursos hídricos. Isso teria impacto sobre a vegetação, a biodiversidade e atividades que dependem dos recursos naturais.

No Nordeste do Brasil, o maior problema seria o aumento da seca e da falta de água. A região poderá passar de zona semiárida a zona árida, e as consequências dessa mudança afetarão a alimentação, a sanidade e a saúde da população local. Mais de 70% das cidades do semiárido nordestino com população acima de cinco mil habitantes enfrentarão crise no abastecimento de água para o consumo humano até 2025 de acordo com estudos realizados pela Agência Nacional das Águas (MARENGO, 2006).

O conceito de seca está intimamente relacionado ao ponto de vista do observador. Embora a causa primária das secas resida na insuficiência ou na irregularidade das precipitações pluviais, existe uma sequência de causas e efeitos na qual o efeito mais próximo de uma seca torna-se a causa de um outro efeito e esse efeito passa a ser denominado também de *seca*. Assim, para citar as mais comuns, pode-se definir a seca climatológica (causa primária ou elemento que desencadeia o processo), a seca edáfica (efeito da seca climatológica), a seca social que é efeito da seca edáfica e finalmente, a seca hidrológica (CAMPOS, 2001).

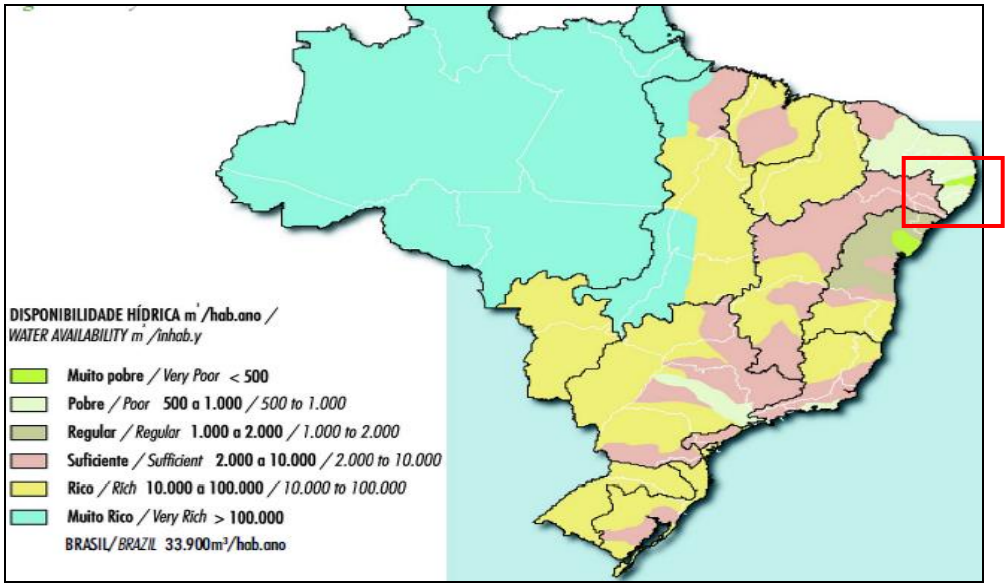
As secas diferem-se em termos de características espaciais. As áreas afetadas por uma seca severa evoluem gradualmente, e as regiões de máxima intensidade variam de estação para estação. Em países com grandes extensões territoriais, como o Brasil, a China, a Índia, os Estados Unidos da América ou a Austrália, as secas raramente atingem todo o país (WILHITE, 1993).

A severidade da seca não depende somente da duração, intensidade e extensão geográfica, mas também das ações antrópicas sobre a vegetação e sobre as fontes de recursos hídricos. A significância de uma seca não pode ser dissociada do contexto social e seu impacto depende diretamente da vulnerabilidade social (DOWNING, 1992).

A seca é uma característica natural do clima e sua recorrência é inevitável. Sua categoria pode ser aferida a partir do período de tempo em que o déficit de precipitação

permanece. Caso o evento tenha uma duração longa, atinge níveis hidrológicos que comprometem a agricultura, abastecimento e a situação socioeconômica de uma região (GUEDES, 2011). Na Figura 6 tem-se o mapa do Brasil contendo a disponibilidade hídrica em metros cúbicos por habitante/ano, onde na região de Pernambuco verifica-se a existência de áreas consideradas como muito pobre e pobre.

Figura 6 - Disponibilidade hídrica no Brasil em m/hab.ano, com ênfase para o Agreste Pernambuco.




Fonte: ANA (2012).

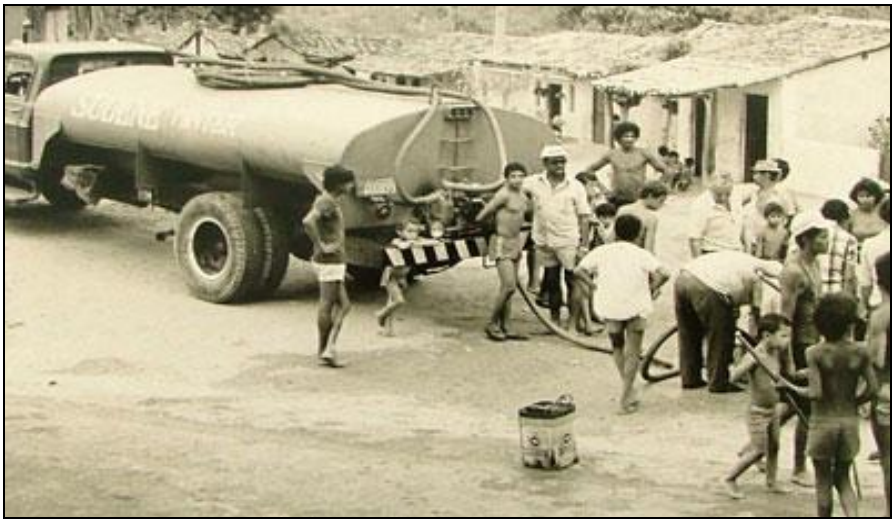
De acordo com Obasi (1994), entre 1967 e 1992 as secas afetaram 1,4 bilhões de pessoas, das quais 1,3 milhões de vidas humanas foram perdidas por impactos diretos e indiretos, no cenário mundial. De acordo com APAC (2012), responsável pelo monitoramento e previsão do tempo e clima em Pernambuco, diagnosticou e categorizou a ocorrência do evento de seca de 2012, através do método dos quantis encontrando a categoria muito seca para diferentes mesorregiões do semiárido do Estado. Havendo também uma comparação com eventos anteriores ocorridos desde 1936. O Brasil tem uma longa história de gestão de secas, principalmente no semiárido do Nordeste. O caso mais recente, uma seca extrema de mais de um ano, que vem assolando o Nordeste a partir de 2012 - tem sido a seca mais grave em décadas - ou até mesmo dos últimos 50 -100 anos. A recente seca estimulou um diálogo no país, sobre como melhorar a política e a gestão da seca.

A adaptação a mudanças climáticas por meio de uma gestão mais proativa das secas é um tema primordial para o Banco Mundial, para alcançar objetivos referentes a redução da pobreza e promoção da prosperidade. Em 2010, em parceria com a ANA, o Banco Mundial realizou uma Assistência Técnica sobre o impacto das mudanças climáticas sobre a alocação

de recursos hídricos, “O Planejamento dos Recursos Hídricos e a Adaptação à Variabilidade e Mudança Climáticas em Bacias Hidrográficas Selecionadas no Nordeste do Brasil” a qual foi executada junto com quatro dos Estados do Nordeste (Ceará, Rio Grande do Norte, Paraíba, Pernambuco).

Na Figura 7 verifica-se o abastecimento de uma comunidade através de carro-pipa já no ano de 1970, comprovando a situação crítica do abastecimento num cenário de estiagens e seca.

Figura 7 - População pernambucana abastecida pelo carro-pipa no ano de 1970.



Fonte: Disponível em http://www.abi.org.br, acesso em 12/12/2016.

A maior parte da região Nordeste do Brasil situa-se dentro da zona semiárida, com grandes problemas para a sociedade e para os ecossistemas naturais, decorrentes das secas periódicas. Dessa forma visando estabelecer um estudo nos regimes pluviométricos da região Nordeste do Brasil e viabilizar um controle melhor no monitoramento dos recursos hídricos, várias metodologias têm sido utilizadas para se analisar a variabilidade da precipitação pluvial (BALME *et al*., 2006).

## 2.4 Experiências de transposições de águas

Um projeto de transposição de águas tem por objetivo amenizar ou resolver o problema de escassez de água em determinada região que pode ser temporária ou permanente. A integração de bacias hidrográficas é hoje uma alternativa técnica à altura de qualquer país com razoável grau de desenvolvimento. Os pioneiros na execução de transposições ou manejos de água foram os chineses os quais realizam obras de transposição no rio Amarelo

antes de Cristo. Na Mesopotâmia e Egito antigo foram realizadas transposições para levar água dos rios Tigre, Eufrates e Nilo para regiões desérticas vizinhas (CAÚLA & MOURA, 2006).

Práticas de manejo de água já são adotadas em inúmeros países como África do Sul, Egito, Equador, Peru, China, Espanha, México, Estados Unidos, Canadá, Líbia, Índia, Argentina, Paquistão, e outros, interligando bacias superavitárias às deficitárias. No Brasil práticas de manejo também já foram utilizadas em sistemas de abastecimento de água nas cidades de São Paulo, Rio de Janeiro, Brasília, Fortaleza e em algumas cidades de Pernambuco, principalmente na região Agreste (CAÚLA, 2006).

Nos tempos mais remotos destaca-se o primeiro aqueduto romano, o Appia, concluído no ano 313 a.C, onde por volta de 90 a.C., com uma população de pouco mais de um milhão de habitantes, a cidade já contava com nove aquedutos e para controlar o uso da água entre os romanos, foram criadas diversas leis reguladoras, Roma contava com cerca de 700 tanques, 500 fontes públicas e 130 reservatórios de serviço (FONSECA, 2004).

Quanto as principais experiências internacionais destacam-se as inúmeras intervenções realizadas nos EUA e Canadá com diversos projetos para usos múltiplos da água. Nos EUA destaca-se o projeto de transposição do rio Colorado, caracterizado por ter fins múltiplos da água, no qual tem-se a barragem de Hoover como estrutura chave para o desenvolvimento da região do Colorado. O Rio Colorado possui uma bacia hidrográfica de grande porte cuja área tem cerca de 440.000 Km (ANDERSON, 2002).

A gestão das águas do rio Colorado suscitou inúmeras questões jurídicas e políticas, no qual outros seis estados desta bacia na ocasião assinalaram não se opor ao controle estrutural do rio, a menos que eles recebessem garantias da futura utilização da água do mesmo. A solução parecia ser o desenvolvimento de um acordo envolvendo os estados da bacia e a repartir o rio Colorado (ANDERSON, 2002). Além dos conflitos de uso anteriormente apontados que transcendem o limite do país com sérias questões e conflitos quanto aos direitos sobre as águas do Colorado com o Canadá (onde elas nascem), nas duas últimas décadas, novos valores entraram em pauta, tais como, a ocorrência de inundações na parte inferior do rio Colorado com mudanças do regime hidrológico e problemas quanto a salinização das águas do baixo Colorado, com repercussão no ecossistema aquático do rio (PEREIRA, 2002).

No caso da Espanha tem-se o aqueduto Tajo-Segura o qual transpõe água da bacia do rio Tajo, na região centro sul, para o rio Segura na região de Múrcia, situada no sul da Espanha (CAÚLA & MOURA, 2006). Esta solução técnica surgiu em 1933 com o objetivo de

minimizar um desequilíbrio hidrológico da Península Ibérica (SERRANO, 2005). Este aqueduto possui uma vazão média de transposição em torno de 33 m³/s, uma altura de bombeamento de 267 m e uma extensão total de 242 km.

No Egito a irrigação depende fundamentalmente do rio Nilo. O sistema principal é controlado pela barragem de Assuã que além de produzir energia elétrica, provisiona água para irrigação de uma área de 1,1 milhões de hectares. (CRUZ, 1999). A água do Rio Nilo é jogada para a Península do Sinai, atravessando o canal de Suez (PEREIRA, 2002). A construção da barragem de Assuã impediu que os nutrientes carreados pelo Nilo chegassem ao Mediterrâneo (FERREIRA, 2005).

No caso da China, apesar da existência de volume bem considerável de água, a média per capita é pequena cerca de 2.221 m³/ano, representando cerca de 28% da média mundial, onde os principais rios deste país são: o rio Yangtzé e o rio Amarelo (Huang He). No cenário atual o vale do rio Yangtzé apresenta a ocorrência de inundações, já o vale do rio Amarelo enfrenta dificuldades causadas pela escassez de água e depende-se unicamente de medidas de economia da água e das explorações de todos os tipos de recursos hídricos locais e quase não estão conseguindo mais equacionar o problema. A saída pensada será além de ampliar a intensidade de economizar a água e de tratamento desta inclusive com reutilização de esgotos, a realização da transposição das águas do Sul ao Norte (ANDERSON, 2002).

Khan (2008) afirma que a escassez de água é uma questão crítica na bacia do rio Amarelo. Esta região corresponde a uma zona de produção de alimento de relevância na China, dessa forma a irrigação é um método amplamente utilizado pelos agricultores locais. Na China as águas superficiais não são suficientes para fornecimento de todo o sistema devido à perda da areia para os canais permeáveis subjacentes. Neste cenário o projeto de múltiplos propósitos denominado SAN MEN, no rio Amarelo, além da irrigação cuja área é cerca de 1,2 milhões de hectares, a barragem propícia a geração de energia elétrica e controle de cheias. Este projeto possui uma extensão de aproximadamente 2.000 Km² e cerca de 17 bilhões de m³ de água serão canalizados anualmente para as regiões do Norte. Além de beneficiar a população da região, o projeto contribuirá para o desenvolvimento econômico de mais de 10 províncias, regiões autônomas e municípios centrais do Norte, e para o desenvolvimento sustentável de todo o país.

Brito (2005) afirma que o projeto da transposição do Rio São Francisco é simples e inovador. De acordo com Pereira (2002) o projeto renova e preserva o rio da integração nacional, não prejudica um só nenhum brasileiro e enfatiza que a transposição das águas do São Francisco beneficiaria cerca de oito milhões de pessoas.

Ainda de acordo com Brito (2005) todas as obras de transposição feitas no mundo envolvem captação e transferência de volumes gigantescos de água: 80% no rio Colorado, 60% no espanhol Tajo (Tejo em Portugal). No caso do São Francisco, a captação será de a penas 1,4% da água que o rio despeja no mar.

Caúla (2006) enfatiza que é indiscutível a necessidade de se buscar soluções técnicas para erradicar os efeitos das secas periódicas na região Nordeste, porém é necessária uma certeza de que a transposição seja a melhor alternativa. Os custos que são elevados, não servem como parâmetros negativos, pois os governos têm gastos contínuos com a seca.

Anderson (2002) enfatiza que a tecnologia da transposição de bacias hidrográficas com o objetivo de interligar bacias superavitárias às bacias deficitárias é uma experiência antiga e deve ser estudada a fim de aprendermos com os erros e os acertos que outros cometeram. Um empreendimento dessa dimensão deve assumir um caráter estruturador e estratégico, não se limitando às ações em infraestrutura hidráulica, mas com ações físicas e institucionais em perspectiva regional e local, contribuindo para consolidar, nas regiões beneficiadas, o princípio da gestão participativa, descentralizada e integrada. São notáveis os dados sociais e econômicos que esta obra poderá proporcionar para o desenvolvimento sustentável do Nordeste.

De acordo com Caúla (2017), um exemplo de um modelo inovador de gestão das águas é o de Santa Bárbara, na Califórnia, numa área geograficamente diversificada e onde há necessidades de se buscar alternativas de água potável para os seus residentes em virtude da ocorrência constante das secas locais. A região abrange todo o condado de Santa Barbara e possui uma população estimada de 427.358 residentes e abrange aproximadamente 2.740 Km². Possui uma gama de elevações desde o nível do mar para o pico mais alto da Big Pine Mountain com 6.828 metros e com 215.000 hectares de floresta nacional. Historicamente, o município de Santa Barbara estruturou o planejamento interdepartamental, desenvolvimento de partilha de suprimentos de água, a gestão conjunta de recursos e sistemas operacionais para fins múltiplos. Houve investimentos na qualidade da água e na proteção dos recursos naturais e para aumentar a confiabilidade do suprimento de água foram realizadas diversas medidas para maximizar o uso eficiente das fontes existentes, incluindo a água reciclada; aumento na conservação urbana e agrícola; maximização da capacidade de armazenamento de superfície e pelo desenvolvimento de novas fontes de água tais como o reuso e a dessalinização (CAÚLA,2017).

A água que Israel recebe vem basicamente do rio Jordão, do Mar da Galiléia, e de duas fontes subterrâneas. O suprimento de água, dividido entre israelenses e palestinos, mas,

como todos os temas cruciais na região, é foco de grande controvérsia. Israel é um país com problemas históricos de escassez de água e esta situação vem sendo superada, ano após ano, através do uso de tecnologias, empreendedorismo e leis de regulação do uso da água. Desde o ano de 2009, as crises de água foram drasticamente reduzidas em virtude dos investimentos realizados focados em reuso, dessalinização e otimização dos usos da água. A virada ocorreu após uma seca de sete anos, considerada uma das mais severas que já atingiram a Israel moderna, teve início em 2005 e atingiu seu pico no inverno de 2008-2009 (KERSHNER, 2015).

Ainda de acordo com Kershner (2015), as principais fontes naturais de água do país, o Mar da Galileia no Norte e os aquíferos costeiros e nas montanhas, foram severamente esgotados oferecendo o risco de uma deterioração potencialmente irreversível. Ações para aumentar a oferta e reduzir a demanda foram priorizadas e realizadas de forma ágil pela Autoridade das Águas, uma agência interministerial criada no ano de 2007. Atualmente, cerca de 50% da água consumida em Israel é extraída da água do mar, através do processo de dessalinização. Este processo foi priorizado e se tornou um dos principais focos dos esforços do governo, com quatro grandes usinas entrando em operação ao longo da última década. A cidade de Tel Aviv em Israel é um exemplo de como um país que enfrenta escassez de água pode fazer melhor uso deste recurso, onde 100% da água é reutilizada. O esgoto produzido é tratado e reutilizado para irrigação das plantações no deserto, através da adução de extensas tubulações ao longo de regiões áridas. Percebe-se que as transposições também fazem parte do cenário deste país, como alternativa de minimizar os problemas com a escassez de água.

## 2.5 Modelagem: simulação e otimização de sistemas hídricos

Um modelo é, em essência, uma forma de representação da realidade. Tucci (2010) diz que um modelo é a representação de algum objeto ou sistema, numa linguagem ou forma de fácil acesso e uso, com objetivo de entendê-lo e buscar suas respostas para diferentes entradas.

Ainda de acordo com Tucci (2010), modelo é uma representação do comportamento do sistema, onde os principais tipos são denominados físicos, analógicos e matemáticos. Os modelos analógicos valem-se da analogia das equações que regem diferentes fenômenos, para modelar no sistema mais conveniente, o processo desejado. Já os modelos matemáticos são os que representam a natureza do sistema, através de equações matemáticas e o modelo físico

representa o sistema por um protótipo em escala menor, na maior parte dos casos. Apesar de quase sempre se trabalhar com modelos matemáticos existem outros tipos de modelos. Entender quais os tipos de modelo que existem e a função de cada um ajuda a compreender o que é um modelo.

Tendo em vista a complexidade dos sistemas que compõem a natureza e as limitações da percepção humana, todo modelo construído para simular um sistema real é falho em representar a realidade por completo. Porém, mesmo com limitações, os modelos são ferramentas importantes para a ciência e para a engenharia. São muitas as definições de simulação. A simulação computacional de sistemas, ou simplesmente simulação, consiste no uso de determinadas técnicas matemáticas, empregadas em computadores, as quais permitem imitar o funcionamento de, praticamente, qualquer tipo de operação ou processo do mundo real (ANDRADE, 2000).

A simulação tem sido, cada vez mais, aceita e empregada como uma técnica que permite a analistas, dos mais diversos segmentos, tais como, administradores, engenheiros, biólogos entre outros profissionais, verificar ou encaminhar soluções, com a profundidade desejada, aos problemas com os quais lidam diariamente. Pode ser usada para prever o estado de um sistema em algum ponto no futuro, baseado nas suposições sobre seu comportamento atual e de como continuará se comportando ao longo do tempo.

Segundo Andrade (2000), aplicações pioneiras de simulação em recursos hídricos estão referidas à década de 1950, com as primeiras publicações sobre pesquisas no desenvolvimento de simulação de sistemas de reservatórios sendo produzidas pelo Havard Water Program.

De acordo com Lima & Lanna (2005), uma das principais áreas de aplicação dos modelos de análise de sistemas de recursos hídricos é no planejamento e gerenciamento dos recursos hídricos, neste cenário o planejamento e o gerenciamento dos recursos hídricos buscam a eficiência econômica e a flexibilidade operacional, além de incluir, preferencialmente, aspectos sociais, ambientais e institucionais, de forma a adequar e conciliar as intervenções humanas aos sistemas de recursos hídricos.

Uma das questões mais discutidas em planejamento e gerenciamento de sistemas de recursos hídricos é como escolher e formalizar critérios que orientarão a escolha de uma melhor alternativa. Loucks (2000) faz alusão à importância da inclusão dos melhores procedimentos científicos disponíveis no processo decisório e a constante pesquisa por novos métodos que promovam o aperfeiçoamento do conhecimento para o planejamento e gerenciamento dos sistemas hídricos.

Os autores Yeh, (1985); Simonovic, (1992) e Wurbs, (1993) afirmam que na busca de respostas para os complexos problemas de planejamento e gestão dos recursos hídricos, lança-se mão da utilização de técnicas e ferramentas capazes de auxiliarem nos processos de análise, operação, planejamento e tomadas de decisão em sistema de recursos hídricos. Os estudos de alternativas operacionais, em sistemas de recursos hídricos, são comumente feitos por meio de aplicação de elaboradas metodologias matemáticas e computacionais, incluindo técnicas de otimização e simulação.

De acordo com Mehrotra & Singh (1998), o uso de modelos na área de recursos hídricos com o objetivo de apoiar o processo de planejamento e gerenciamento de recursos hídricos é fundamental, principalmente em virtude da escassez de dados hidroclimáticos e da criação de um cenário de uso dos recursos hídricos.

De acordo com Lima & Lanna (1997), para a análise de sistemas de recursos hídricos, são dois os principais propósitos que são simular o comportamento da realidade e otimizar os processos decisórios. Simonovic (1992), afirma que simulação e otimização são ferramentas essenciais para o desenvolvimento de uma base quantitativa de decisões em gerenciamento de reservatórios e a utilização dessas técnicas no planejamento e operação de projetos reais se encontra em bastante crescimento.

A maioria dos modelos de simulação, especialmente em casos de dimensionamento de obras hídricas, assume um dado conjunto de vazões históricas para representar a série histórica inteira. Na operação de reservatórios, as liberações são determinadas com base num conjunto pré-estabelecido de influxos e regras (CELESTE *et al*, 2006). Dessa forma, a simulação tanto de procedimento simples como de procedimento complexo não gera, diretamente, políticas ótimas de operação. Mas em compensação, permite uma representação bem detalhada e mais realística do sistema. Além disso, possibilita ao tomador de decisão examinar o desempenho do sistema considerando várias entradas e regras de decisão, que podem ser modificadas, até que os resultados se aproximem do ótimo.

Segundo Celeste *et al* (2006), as técnicas de simulação matemática são consideradas as mais flexíveis dentre o escopo de metodologias de análise de sistemas de recursos hídricos, permitindo que, basicamente, qualquer sistema possa ser representado matematicamente por algoritmos computacionais. A complexidade para o desenvolvimento e aplicação de tais formulações é diretamente proporcional ao nível de detalhamento que se deseja obter.

Os modelos de simulação têm hoje aplicação em diversos segmentos da área de recursos hídricos, tais como quantificação do ciclo hidrológico, análise da qualidade da água

em rios e reservatórios, representação de processos hidráulicos do escoamento e modelagem de fenômenos ambientais e meteorológicos (CELESTE *et al.*, 2006).

Braga (1987), afirma que existem dois tipos básicos de modelos de simulação em recursos hídricos. O primeiro diz respeito à simulação dos processos hidrológicos e de qualidade da água, onde equações diferenciais e relações empíricas são utilizadas para representação de vários aspectos quantitativos e qualitativos do ciclo hidrológico. O segundo tipo de modelo de simulação é referido aos aspectos de dimensionamento e operação de sistemas de recursos hídricos.

Modelos de simulação associados com a operação de reservatórios consideram, em regra geral, um cálculo de balanço hídrico entre as afluências, efluências e variações no armazenamento, podendo, ainda, incluir avaliações econômicas de prejuízos decorrentes de enchentes, benefícios de geração de energia hidrelétrica, benefícios de irrigação, pesca e outras características similares (BRAGA, 1987).

Apesar da simulação ser uma excelente ferramenta de análise, é preciso conhecer tanto as suas vantagens, quanto as suas desvantagens. Pegden (1995) aponta que uma vez criado, um modelo pode ser utilizado inúmeras vezes para avaliar projetos e políticas propostas que a simulação é, geralmente, mais fácil de aplicar do que métodos analíticos, uma vez que estes requerem um número muito grande de simplificações para torná-los matematicamente tratáveis e modelos de simulação não apresentam tais restrições. As hipóteses sobre como ou por que certos fenômenos acontecem podem ser testadas para confirmação; o tempo pode ser controlado, comprimido ou expandido; pode-se compreender melhor quais variáveis são as mais importantes em relação a performance e como as mesmas interagem entre si e com os outros elementos do sistema; a simulação é uma ferramenta especial para explorar questões do tipo: o que aconteceria se?

Quanto às desvantagens Pegden (1995) apresenta que a construção de modelos requer treinamento especial, no qual o aprendizado se dá ao longo do tempo, que os resultados da simulação são, muitas vezes, de difícil interpretação, uma vez que os modelos tentam capturar a variabilidade do sistema e ainda que a tentativa de simplificação na modelagem ou nos experimentos objetivando economia de recursos costuma levar a resultados insatisfatórios.

De acordo com Fragoso (2009), as limitações básicas dos modelos hidrológicos são a quantidade e a qualidade dos dados hidrológicos, além da dificuldade de formular matematicamente alguns processos e a simplificação do comportamento espacial de variáveis e fenômenos.

De modo geral, pode-se dizer que modelos de simulação são mais apropriados para análise de desempenho de alternativas operacionais de longo prazo, sendo úteis para representar a operação do sistema com um grau elevado de segurança. Apesar de não serem capazes de gerar uma solução ótima, permitem a comparação de duas ou mais estratégias, quando políticas alternativas são geradas por meio de numerosas rodadas do modelo.

De acordo com Wurbs (1996), os modelos de otimização são formulados com o intuito de se determinar os melhores valores, para um dado conjunto de variáveis de decisão, que irão maximizar ou minimizar uma determinada função objetivo, sujeita a um conjunto de restrições. Não existe, porém, um procedimento de otimização geral que possa resolver eficientemente qualquer tipo de problema.

A maioria das técnicas depende da forma e propriedades matemáticas da função objetivo e restrições (MATEUS & LUNA, 1986; DAHLQUIST & BJORCK, 1974). Os modelos de otimização levam em consideração algum tipo de técnica de programação matemática e são classificados em: programação linear; programação dinâmica; programação não-linear e métodos heurísticos (Algoritmos genéticos, simulated annealing, entre outros).

Segundo Simonovic (1992), a função objetivo de um problema de otimização representa uma forma de valoração do nível de desempenho obtido por mudanças específicas num conjunto de variáveis de decisão, as quais definem como um sistema está para ser operado.

Cada vez mais, já se verifica que não é mais tão aceitável a utilização de, apenas, um modelo clássico de simulação ou otimização com apenas um objetivo e de acordo com as novas tendências no tratamento dos problemas de recursos hídricos, torna-se necessário uma subdivisão de objetivos mais genéricos em atributos que possam, de alguma forma, ser quantificados, permitindo a consideração de aspectos econômicos, sociais, políticos, ambientais e outros. Essas práticas, em recursos hídricos, estão associadas ao desenvolvimento sustentável (WURBS, 2005).

De acordo com Loucks (2000), sistemas sustentáveis de recursos hídricos são aqueles planejados e gerenciados para satisfazerem as suas demandas, variáveis no tempo, e contribuir para os objetivos da sociedade, agora e no futuro, enquanto mantêm as suas integridades ambientais e hidrológicas.

Lima & Lanna (2005), ressaltam que a escolha da metodologia dependerá das particularidades do sistema em análise. Tanto os modelos que utilizam programação matemática (linear, dinâmica ou não linear) como os modelos de simulação serão importantes em situações específicas.

# 3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Neste capítulo apresenta-se a área, objeto deste estudo como também uma descrição do universo e amostra, utilizados para a realização das simulações que constam como objetivos específicos deste trabalho.

O sistema de abastecimento de água existente em Pernambuco é composto por aproximadamente 200 barragens de acumulação, 250 poços profundos e aproximadamente 4.500 km de adutoras, sendo que no caso da região Agreste há cerca de 60 barragens e nenhum poço para abastecimento urbano (COMPESA, 2015).

Na Figura 8 tem-se o mapa do semiárido, com destaque para o Agreste de Pernambuco cenário do presente estudo.

Figura 8 - Localização da área de estudo.

Fonte: IBGE (2010).

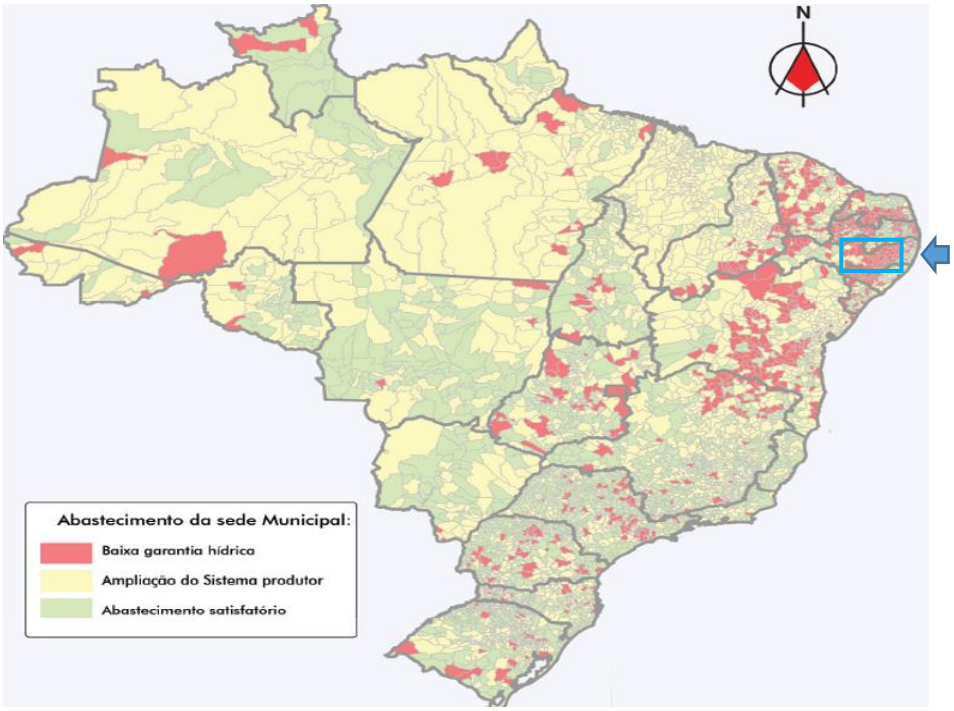
Pernambuco possui 185 municípios e população em torno de 7,05 milhões de habitantes. A porção oriental de seu território está inserida na região hidrográfica do São Francisco, com clima semiárido e limitadas disponibilidades hídricas superficiais, e o restante na região do Atlântico Nordeste Oriental, com oferta de água um pouco maior (ANA, 2015). A Figura 9 apresenta o mapa de Pernambuco com as mesorregiões, com destaque ao Agreste, onde estão localizadas as cidades foco deste estudo.

Figura 9 - Mapa de Pernambuco com as mesorregiões, com destaque o Agreste.

Fonte: Agência Estadual de Planejamento e Pesquisas de Pernambuco, (2011).

Na Figura 10 é apresentado o mapa do Brasil contendo as condições hídricas existentes para o atendimento do abastecimento de água das sedes municipais (ANA, 2015). No caso da região Agreste de Pernambuco, verifica-se a predominância da existência de cidades as quais possuem uma baixa garantia hídrica e, portanto, uma necessidade de fontes hídricas alternativas e oriundas de outras regiões.

Figura 10 - Condições hídricas nas sedes municipais brasileiras em 2014, com destaque para o Agreste -PE.




Fonte: ANA, (2014).

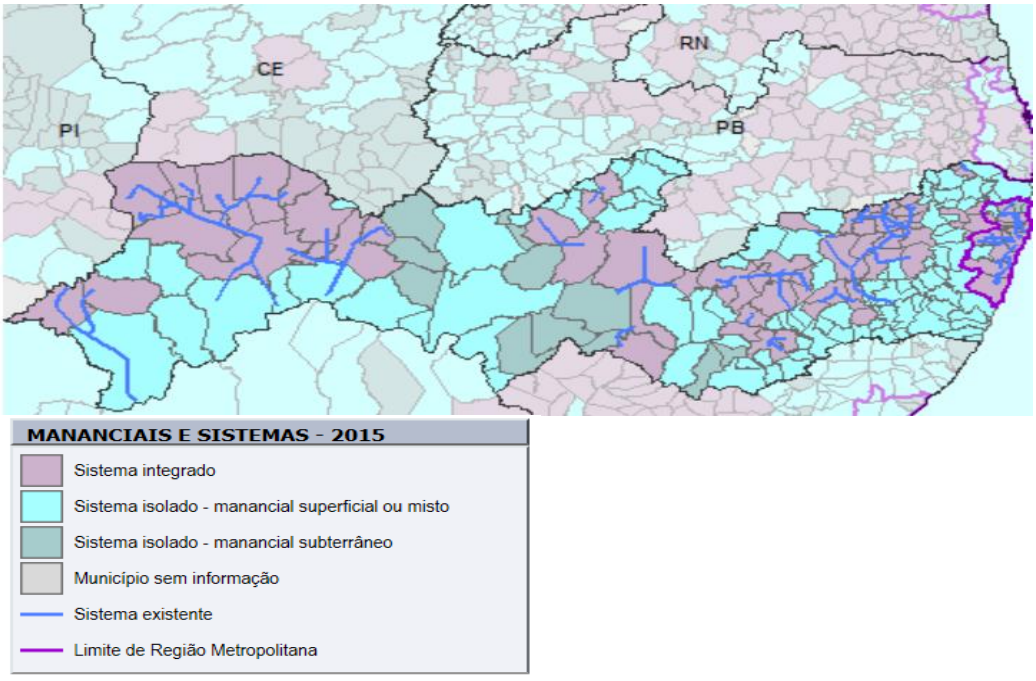
De acordo com a ANA (2015), mais de 83% das sedes municipais de Pernambuco são abastecidas por água proveniente exclusivamente de mananciais superficiais, graças a baixa vocação hidrogeológica do Estado, restando apenas 9% das sedes urbanas abastecidas por águas subterrâneas e 8% por sistemas mistos. No caso do Agreste de Pernambuco uma vez que o solo é cristalino as opções de suprimento de água subterrânea são limitadas.

## 3.1 Composição dos sistemas

Em 93% dos municípios de Pernambuco, os serviços de abastecimento de água são prestados pela Companhia Pernambucana de Saneamento (COMPESA, 2015). No Agreste de Pernambuco, por exemplo, na maioria dos rios só é possível garantir uma oferta contínua de água com o uso de açudes/reservatórios, já que esses rios naturalmente secam durante os meses de estiagem. Em outras regiões, os reservatórios são utilizados para aumentar a garantia de atendimento a demandas contínuas, como por exemplo o abastecimento humano. A recuperação dos volumes desses reservatórios, no entanto, depende do aporte de água dos rios nos períodos úmidos, que por sua vez dependem prioritariamente do regime pluviométrico (ANA, 2015).

Na Figura 11 tem-se as condições do abastecimento nas sedes municipais brasileiras. Percebe-se que em Pernambuco há muitos sistemas integrados, principalmente no interior, nas regiões Agreste e Sertão do Estado.

Figura 11 - Condições do abastecimento nas sedes municipais brasileiras, 2014.



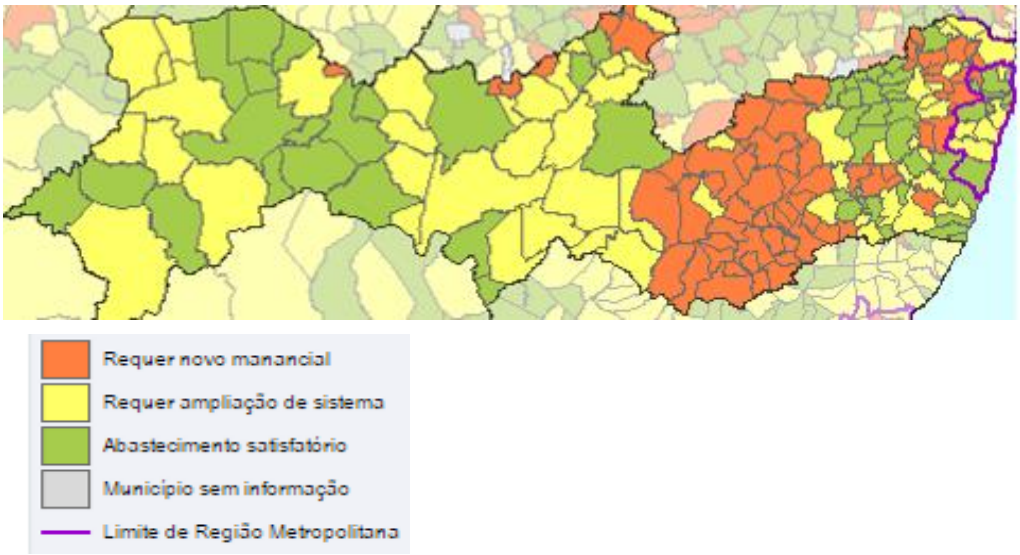

Fonte: ANA (2015).

Neste trabalho foram analisadas 67 cidades, as quais hoje possuem sistemas locais produtores de abastecimento de água e que serão contemplados com incremento de água da bacia do rio São Francisco, via adutora do Agreste e sistemas integrados da zona da mata sul. Cerca de 60% das sedes municipais são abastecidas mediante sistemas isolados, porém a população atendida por sistemas integrados é significativamente maior em torno de 72 cidades (ANA, 2015).

Na Figura 12 é apresentado mapa, contendo os municípios que necessitam de um novo manancial para que o abastecimento ás populações seja realizado de forma regular, pode-se verificar ainda os municípios de Pernambuco que necessitam de um novo manancial para suprimento da demanda de água para a população local existente ANA (2015).

Dessa forma, torna-se nítido que a região que possui maior déficit hídrico é o Agreste de Pernambuco, no qual a maioria das cidades localizadas nessa região requerem um novo manancial para suprimento hídrico da população local.

Figura 12 - Mapa de Pernambuco contendo os municípios que necessitam de novos sistemas de abastecimento.




Fonte: ANA, (2015).

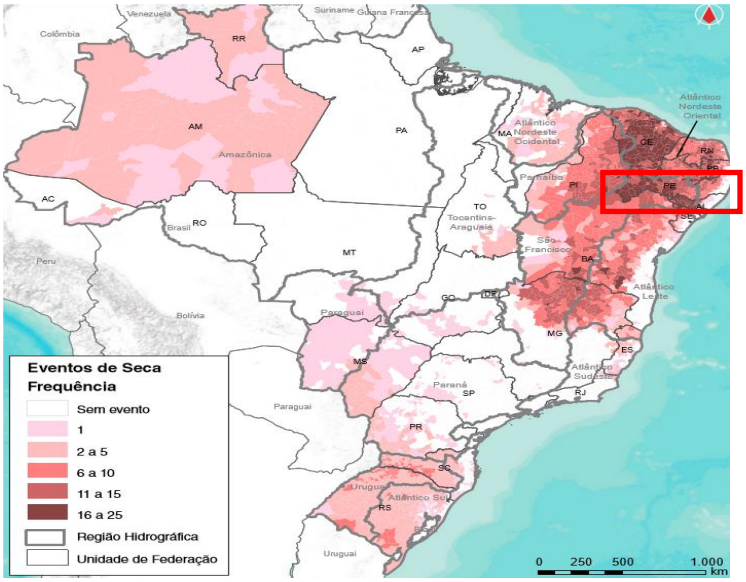
As cidades analisadas foram aquelas que serão beneficiadas com o incremento de água através da obra da adutora do Agreste que se encontra em fase de implantação com prazo de conclusão previsto para 2019 no qual citamos: Arcoverde (única na região do sertão), Iati, Águas Belas, Itaíba, Tupanatinga, Buíque, Pedra, Venturosa, Alagoinha, Pesqueira, Poção, Sanharó, Belo Jardim, São Bento do Una, Lajedo, Jupi, Jucati, Garanhuns, Caetés, Capoeiras, Paranatama, Saloá, Brejão, Terezinha, Bom Conselho, Lagoa do Ouro, Correntes, Ibirajuba, Jurema, Panelas, Angelim, Canhotinho, Palmerina, Tacaimbó, São Caetano, Brejo da Madre de Deus, Jataúba, Caruaru, Altinho, Agrestina, Cupira, Lagoa dos Gatos, Bezerros, Sairé,

Camocim de São Felix, São Joaquim do Monte, Bonito, Barra de Guabiraba, Gravatá, Santa Cruz do Capibaribe, Taquaritinga do Norte, Toritama, Vertentes, Frei Miguelinho, Santa Maria do Cambucá, Vertentes do Lério, Surubim, Casinhas, João Alfredo, Bom Jardim, Orobó, Machados, Riacho das Almas, Cumaru, Passira e Salgadinho.

## 3.2 Características hidroclimáticas

As características hidroclimáticas e socioeconômicas do semiárido brasileiro requerem tecnologias específicas de utilização e conservação dos recursos hídricos. O impacto de possíveis mudanças climáticas pode ainda interferir negativamente em processos produtivos, na saúde e na qualidade de vida na região, pela redução da disponibilidade hídrica. Segundo Marengo *et al* (2006) a história do semiárido brasileiro está intimamente relacionada às secas, cujos efeitos se apresentam nas mais variadas formas, seja pelo aumento do desemprego rural, fome, pobreza, ou pela consequente migração das áreas afetadas. Devido à irregularidade das chuvas e aos baixos índices pluviométricos (abaixo de 800 mm por ano) grande parte da região enfrenta um problema, já crônico, de falta de água, motivo desses obstáculos ao desenvolvimento das atividades agrárias e agropecuárias. Na Figura 13, tem-se o mapa com a frequência de ocorrência de eventos críticos de seca nos municípios do Brasil no período de 2003 a 2015, onde o Agreste de Pernambuco possuía uma frequência entre 6 a 15.

Figura 13 - Municípios e as respectivas frequências de ocorrência de secas e estiagens entre 2003 e 2015.



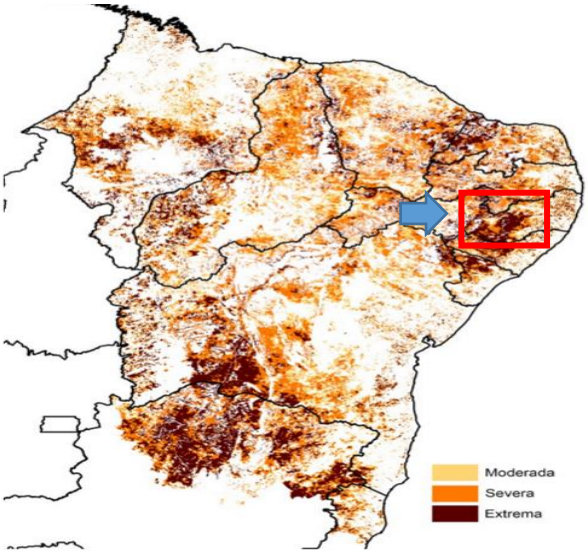

Fonte: ANA, (2015).

De acordo com a ANA (2015), pela série histórica, 34 municípios possuem mais de 20 registros de seca, todos eles localizados nos estados de Ceará e Pernambuco. Locais do Brasil tais como Amapá, Distrito Federal, Pará e Rondônia não apresentaram registro de seca nos últimos treze anos. Sabe-se que as chuvas do semiárido da região Nordeste apresentam enorme variabilidade espacial e temporal. Anos de seca e chuvas abundantes se alternam de forma irregular, conforme observado nos anos de 1710-11, 1723-27, 1736-57, 1744-45, 1777-78, 1808-09, 1824-25, 1835-37, 1844-45, 1877-79, 1982-83, 1987, 1997-98 períodos com fortes secas, e 2003 e 2005, secas de menor intensidade e magnitude.

Nos últimos seis anos, o semiárido pernambucano vem sofrendo com os efeitos da estiagem. O índice VSWI indica condição de seca quando o valor do NDVI (Índice de vegetação) é baixo, o que indica baixa atividade fotossintética, e a temperatura da vegetação é alta (indicando estresse hídrico). No período de outubro a novembro de 2015, identificou-se através do índice VSWI os impactos da seca em áreas de atividades agrícolas e/ou pastagens, considerando os impactos da seca, 910 municípios apresentaram pelo menos 50% de suas áreas impactadas pela seca. As áreas impactadas pelas condições de seca atuais totalizam aproximadamente 50,5 milhões de hectares, atingindo cerca de 1 milhão de estabelecimentos de agricultura familiar (CEMADEN, 2016).

A Figura 14 apresenta a intensidade das áreas impactadas pela seca (tons de marrom escuro estão associados a impactos mais intensos), verifica-se que no tocante a região Agreste de Pernambuco, a mesma apresenta a tonalidade de marrom escuro, no qual fica evidente que esta é a área mais crítica da região.

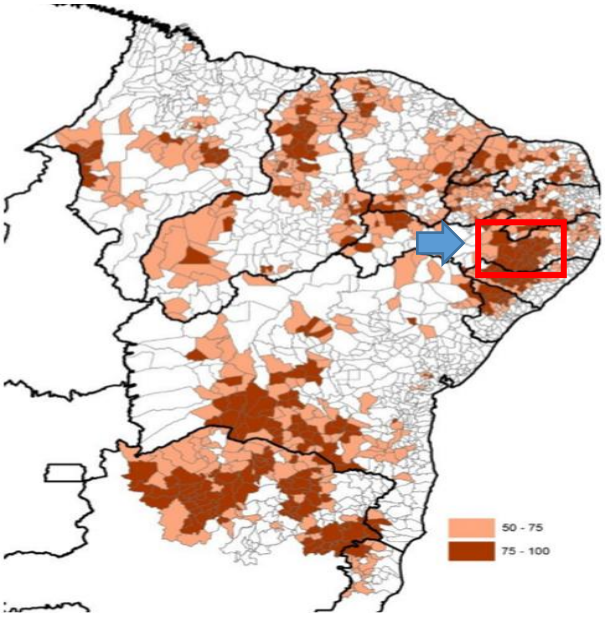
Figura 14 - Intensidade das áreas impactadas pela seca de outubro a novembro de 2015, na região do semiárido.




Fonte: ANA, (2014).

Na Figura 15 são destacados os locais com maior extensão (área impactada) de áreas atingidas pela seca no período de outubro a novembro de 2015.

Figura 15 - Locais com maior extensão de áreas atingidas pela seca, na região do semiárido.




Fonte: ANA, (2014).

### 3.3 Disponibilidade hídrica no Agreste Pernambucano

Pernambuco tem uma população de 8,4 milhões de habitantes, correspondente a 5% da população brasileira e 18,3% da nordestina e taxa de urbanização de 76,2% (maior do Nordeste), registrando uma densidade demográfica de 75 habitantes por quilômetro quadrado, também é considerado o estado do país mais pobre em quantidade de água, sendo o mesmo detentor de uma disponibilidade per capita de 1.320 $m^3$/hab./ano, o equivalente a 3,5% da disponibilidade *per capita* da média nacional (IBGE, 2015).

Por sua forma alongada no sentido leste a oeste, apresenta duas características climáticas distintas: no litoral o clima é classificado como quente e úmido, e no interior, como semiárido – 89% do território do Estado de Pernambuco está inserido na região semiárida. No litoral e na Zona da Mata os índices pluviométricos atingem 2.000 mm/ano e as chuvas se distribuem ao longo de seis meses, enquanto no interior as chuvas são escassas e ocorrem de forma concentradas em poucos meses, sendo registrados índices pluviométricos inferiores a 500 mm/ano. Por não possuir condições morfológicas favoráveis à construção de

reservatórios com grande capacidade, o nível de aproveitamento do potencial hídrico existente na região semiárida do Estado é bastante reduzido. De acordo com Cirilo (2015), historicamente um dos maiores déficits hídricos do Brasil registrado no Nordeste em sua porção semiárida, região sistematicamente submetida a ocorrência de secas. Nas Figuras 16 (a) e 16 (b), tem-se os mapas com a quantidade de rios perenes e intermitentes e verifica-se que a predominância dos rios intermitentes no semiárido nordestino.

Figura 16 - Rios perene e intermitente no âmbito do semiárido nordestino.

(a) Rios Perenes (b) Rios intermitentes

Fonte: ANA, 2005.

Em 2015, a Agência Nacional das Águas elaborou uma análise da vazão dos principais rios brasileiros e os qualificou quanto a razão entre as vazões de captação e disponibilidade (ANA, 2015). Verifica-se que em Pernambuco a situação é considerada crítica e muito crítica, da mesma forma que o agreste de Pernambuco, ou seja, a razão entre a vazão de retirada para usos consuntivos e a disponibilidade hídrica é superior a 20%, conforme detalhes apresentados na Figura 17.

A ANA (2016), em parceria com a APAC, tem trabalhado na definição de regras de restrição de uso no entorno de cinco reservatórios que devem começar a valer no segundo semestre de 2016. Embora o eixo leste da Transposição do rio São Francisco também seja a solução estruturante para a região, o início de operação da obra ainda não será suficiente, pois para a água chegar até essas localidades, é preciso construir o ramal e a adutora do Agreste (ANA, 2016). Em Pernambuco, devido às precipitações registradas no setor leste, permanece a situação de ausência de secas no litoral e na Zona da Mata. Pequenas alterações foram registradas, quando comparadas com o mês anterior, como uma expansão da área de seca extrema para o sul do Agreste.

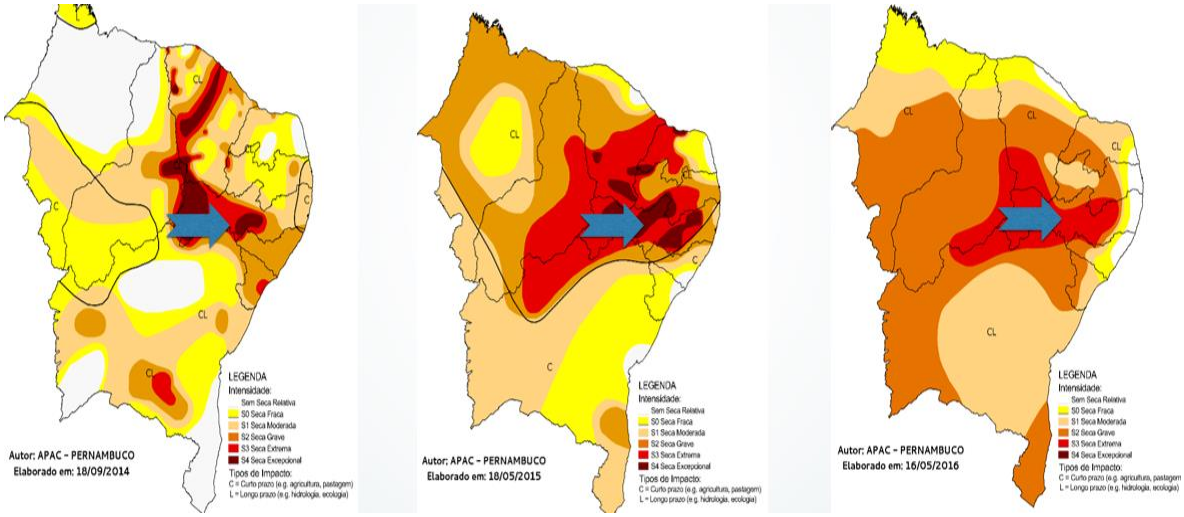
Figura 17 - Classificação dos principais rios brasileiros quanto a razão entre a vazão de retirada e a disponibilidade hídrica, com destaque para o Agreste - PE.

Fonte: ANA, (2015).

Na Figura 18 tem-se o comportamento da estiagem e no Nordeste, apresentado pelo monitoramento da seca pela ANA nos anos de 2014, 2015 e 2016, respectivamente. Neste período, Pernambuco permanece com a maior parte de sua área com seca extrema, sendo que os impactos que antes eram apenas a longo prazo, agora se apresentam como de curto e longo prazo, esta iniciada em 2011, sendo considerada a seca mais severa dos últimos 60 anos.

Verifica-se que em 2015 Pernambuco enfrentou um dos cenários mais críticos onde a seca na sua maioria foi classificada como extrema e excepcional. A consequência da estiagem a partir de 2011 até 2017 trouxe um resultado devastador para as cidades abastecidas pelos mananciais existentes. Muitas destas barragens ficaram em colapso ou com percentuais mínimos de acumulação.

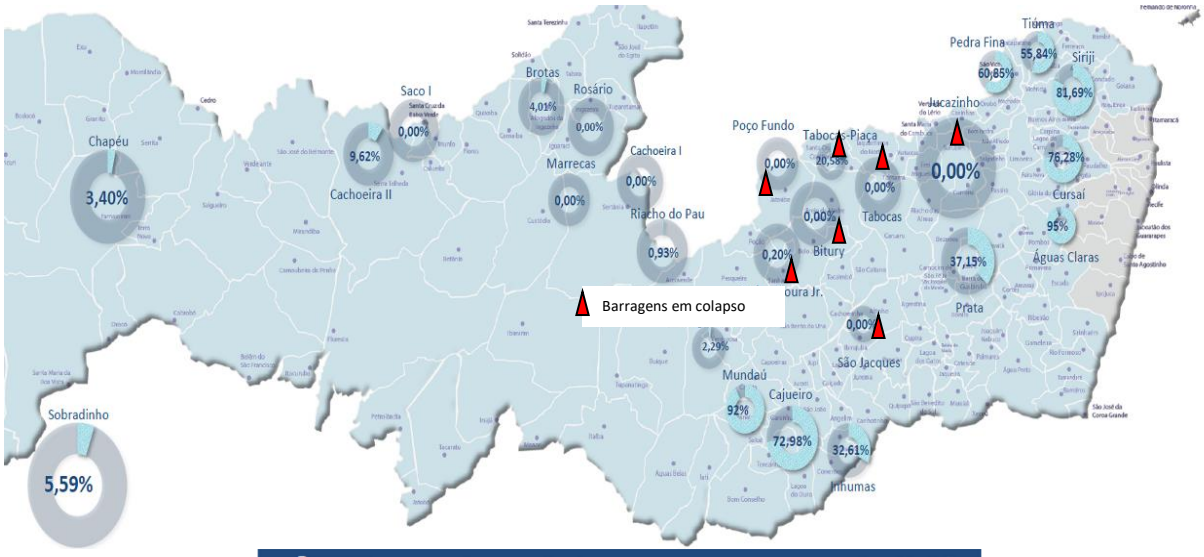
Figura 18 - Cenários da seca em 2014, 2015 e 2016, na região Nordeste.




Fonte: ANA, 2016.

Na Figura 19 é apresentado o mapa com o monitoramento do nível das barragens de acumulação, com dados da situação em dezembro de 2016, do volume das 24 principais barragens do Agreste e Zona da Mata de Pernambuco no qual verifica-se que apenas nove delas estão com capacidade acima de 40%, oito estão com volume inferior a 40% e sete estão em colapso, ou seja, com zero por cento de reservação. No Agreste, verifica-se que a região Setentrional possui o pior cenário no tocante a situação dos mananciais existentes (COMPESA, 2016).

Figura 19 - Situação do percentual de volume das principais barragens do interior de Pernambuco em dezembro de 2016.




| Barragem | Δ | Farol | VT m³ | VA m³ | Data Medição |
|---|---|---|---|---|---|
| Chapéu | ⇨ | 🔴 | 188.000.000 | 6.400.000 | 01/03/2016 |
| Cursaí | ⇩ | 🟢 | 13.034.000 | 9.941.956 | 10/11/2016 |
| Jucazinho | ⇩ | 🔴 | 327.036.000 | 0 | 23/09/2016 |
| Poço Fundo | ⇨ | 🔴 | 27.750.000 | 0 | 01/03/2016 |
| Pedra Fina | ⇩ | 🟢 | 6.500.000 | 3.955.000 | 09/11/2016 |
| Sirigi | ⇩ | 🟢 | 17.260.000 | 14.100.059 | 28/10/2016 |
| Riacho do Pau | ⇩ | 🔴 | 16.800.000 | 156.867 | 21/10/2016 |
| Ingazeira | ⇩ | 🔴 | 4.800.000 | 109.758 | 21/10/2016 |
| Pedro Moura Jr. | ⇩ | 🔴 | 30.740.000 | 60.000 | 29/04/2016 |
| Tabocas-Piaça | ⇩ | 🟡 | 1.168.000 | 240.410 | 04/10/2016 |
| Marrecas | ⇨ | 🔴 | 21.623.000 | 0 | 01/03/2016 |
| Inhumas | ⇩ | 🟢 | 6.900.000 | 2.250.000 | 25/11/2016 |
| Mundaú | ⇩ | 🟢 | 1.968.600 | 1.805.000 | 25/11/2016 |
| São Jacques | ⇩ | 🔴 | 404.000 | 0 | 17/09/2016 |

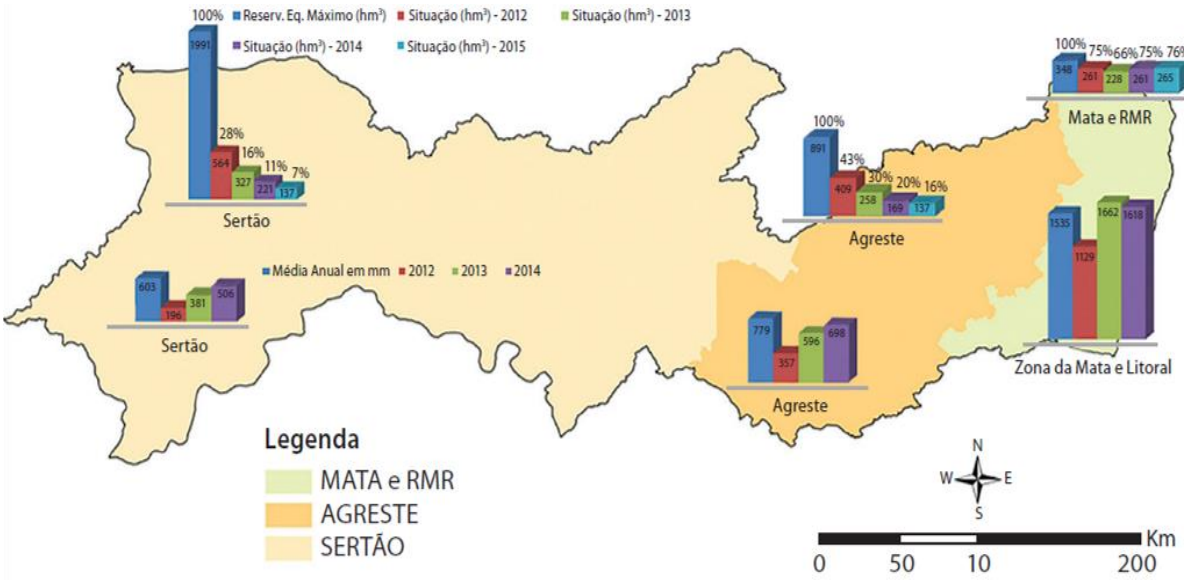
Fonte: COMPESA, (2016).

Tem-se ainda, na Figura 19, o mapa do Estado de Pernambuco contendo a situação do volume em percentual das principais barragens em dezembro de 2016, onde verifica-se que a situação principalmente no Agreste é bastante crítica com várias barragens em colapso e

outras com volume armazenado e percentuais abaixo de 50%. Há exceções para as barragens localizadas no município de Garanhuns que possuem uma situação privilegiada em virtude da localização, do potencial hídrico favorável e de fatores climáticos bem exclusivos, existentes nesta área.

Na Figura 20, tem-se a evolução dos estoques de água dos reservatórios e da precipitação em Pernambuco e pode-se verificar os estoques máximos nas primeiras colunas e as evoluções nos anos de 2012, 2013, 2014 e 2015.

Figura 20 - Evolução dos estoques de água dos reservatórios e da precipitação em Pernambuco.




Fonte: APAC, 2015.

Na Tabela 1 são apresentados os dados das demandas e ofertas em l/s, referentes as cidades foco do presente estudo e foi previsto o atendimento através das vazões a serem ofertadas a partir da Transposição do rio São Francisco tendo-se como base o ano de 2014 e o alcance para o ano de 2037, alcance previsto no projeto, como também as demandas considerando dois índices de perdas (Ip) com 40% e 50%., no qual é previsto o atendimento através das vazões a serem ofertadas da Transposição do rio São Francisco tendo-se como base o ano de 2014 e o alcance para o ano de 2037, alcance previsto no projeto.

Ainda são apresentados na Tabela 1 os índices de perdas de 40% e 50% tendo-se como base os estudos apresentados no projeto de Transposição do rio São Francisco e as vazões ofertadas pela adutora do Agreste.

Tabela 1 - Relação da oferta e demanda das cidades do Agreste de Pernambuco.

| CIDADES | Demanda 2014 Ip:40% (l/s) | Demanda 2014 Ip:50% (l/s) | Vazão Adutora Agreste (l/s) | Balanço 2014 (l/s) | Demanda 2037 (l/s) Ip:40% | Balanço 2037 (l/s) (Ip:40%) | Demanda 2037 (l/s) (Ip:50%) | Balanço 2037 (l/s) (Ip:50%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Agrestina | 51,27 | 61,53 | - | 61,53 | 66,66 | 66,66 | 79,99 | 79,99 |
| Águas belas | 65,10 | 78,12 | 69,20 | 8,92 | 84,63 | 15,43 | 101,56 | 32,36 |
| Alagoinha | 18,09 | 21,71 | 32,08 | 10,37 | 23,52 | 8,56 | 28,22 | 3,86 |
| Altinho | 41,48 | 49,78 | - | 49,78 | 53,92 | 53,92 | 64,71 | 64,71 |
| Angelim | 17,79 | 21,34 | 19,25 | 2,09 | 23,12 | 3,87 | 27,75 | 8,50 |
| Arcoverde | 155,80 | 186,96 | 195,38 | 8,42 | 202,54 | 7,16 | 243,05 | 47,67 |
| Barra de Guabiraba | 31,60 | 37,92 | 37,23 | 0,69 | 41,08 | 3,85 | 49,29 | 12,06 |
| Belo jardim | 168,64 | 202,36 | 99,28 | 103,08 | 219,23 | 119,95 | 263,07 | 163,79 |
| Bezerros | 120,74 | 144,89 | 136,83 | 8,06 | 156,96 | 20,13 | 188,36 | 51,53 |
| Bom conselho | 70,20 | 84,24 | 99,32 | 15,08 | 91,26 | 8,06 | 109,51 | 10,19 |
| Bom jardim | 59,17 | 71,01 | 50,18 | 20,83 | 76,93 | 26,75 | 92,31 | 42,13 |
| Bonito | 71,15 | 85,37 | 83,84 | 1,53 | 92,49 | 8,65 | 110,99 | 27,15 |
| Brejão | 10,00 | 12,00 | 13,75 | 1,75 | 13,00 | 0,75 | 15,60 | 1,85 |
| Brejo da M. de Deus | 35,33 | 42,40 | 87,95 | 45,55 | 45,93 | 42,02 | 55,11 | 32,84 |
| Buíque | 45,67 | 54,80 | 64,51 | 9,71 | 59,37 | 5,14 | 71,25 | 6,74 |
| Cachoeirinha | 44,42 | 53,31 | 38,53 | 14,78 | 57,75 | 19,22 | 69,30 | 30,77 |
| Caetés | 21,05 | 25,26 | 20,25 | 5,01 | 27,37 | 7,12 | 32,84 | 12,59 |
| Calçado | 10,68 | 12,82 | 8,94 | 3,88 | 13,89 | 4,95 | 16,66 | 7,72 |
| Camocim de S. Félix | 37,59 | 45,11 | 27,53 | 17,58 | 48,87 | 21,34 | 58,64 | 31,11 |
| Canhotinho | 33,50 | 40,20 | 28,75 | 11,45 | 43,56 | 14,81 | 52,27 | 23,52 |
| Capoeiras | 18,59 | 22,31 | 15,51 | 6,80 | 24,17 | 8,66 | 29,01 | 13,50 |
| Caruaru | 821,66 | 986,00 | 468,03 | 517,97 | 1.068,16 | 600,13 | 1.281,80 | 813,77 |
| Casinhas | 5,08 | 6,10 | 4,40 | 1,70 | 6,61 | 2,21 | 7,93 | 3,53 |
| Correntes | 25,16 | 30,19 | 22,93 | 7,26 | 32,71 | 9,78 | 39,25 | 16,32 |
| Cumaru | 20,50 | 24,60 | 4,91 | 19,69 | 26,65 | 21,74 | 31,98 | 27,07 |
| Cupira | 59,38 | 71,26 | - | 71,26 | 77,20 | 77,20 | 92,64 | 92,64 |
| Frei Miguelinho | 18,05 | 21,66 | 9,82 | 11,84 | 23,46 | 13,64 | 28,16 | 18,34 |
| Garanhuns | 335,32 | 402,38 | 67,48 | 334,90 | 435,91 | 368,43 | 523,10 | 455,62 |
| Gravatá | 231,67 | 278,00 | 211,96 | 66,04 | 301,17 | 89,21 | 361,41 | 149,45 |
| Iati | - | - | 19,87 | 19,87 | 19,87 | - | 23,84 | 3,97 |
| Ibirajuba | 10,21 | 12,25 | - | 12,25 | 13,27 | 13,27 | 15,93 | 15,93 |
| Itaíba | 34,91 | 41,89 | 25,07 | 16,82 | 45,38 | 20,31 | 54,45 | 29,38 |
| Jataúba | 13,10 | 15,72 | 23,42 | 7,70 | 17,03 | 6,39 | 20,44 | 2,98 |
| João Alfredo | 53,81 | 64,58 | 43,69 | 20,89 | 69,96 | 26,27 | 83,95 | 40,26 |
| Jucati | 8,27 | 9,92 | 9,26 | 0,66 | 10,75 | 1,49 | 12,90 | 3,64 |
| Jupi | 19,63 | 23,56 | 24,34 | 0,78 | 25,52 | 1,18 | 30,63 | 6,29 |
| Jurema | 17,03 | 20,43 | 30,16 | 9,73 | 22,14 | 8,02 | 26,56 | 3,60 |
| Lagoa do Ouro | 15,60 | 18,72 | 19,91 | 1,19 | 20,28 | 0,37 | 24,33 | 4,42 |
| Lagoa dos Gatos | 23,62 | 28,34 | - | 28,34 | 30,70 | 30,70 | 36,84 | 36,84 |
| Lajedo | 101,81 | 122,18 | 82,49 | 39,69 | 132,36 | 49,87 | 158,83 | 76,34 |
| Machados | 21,30 | 25,56 | 26,23 | 0,67 | 27,69 | 1,46 | 33,23 | 7,00 |
| Orobó | 26,14 | 31,36 | 14,32 | 17,04 | 33,98 | 19,66 | 40,77 | 26,45 |
| Palmeirina | 16,32 | 19,58 | 9,06 | 10,52 | 21,21 | 12,15 | 25,46 | 16,40 |
| Panelas | 28,76 | 34,51 | - | 34,51 | 37,39 | 37,39 | 44,87 | 44,87 |
| Paranatama | 6,96 | 8,35 | 3,51 | 4,84 | 9,04 | 5,53 | 10,85 | 7,34 |
| Passira | 43,23 | 51,88 | 32,36 | 19,52 | 56,20 | 23,84 | 67,44 | 35,08 |
| Pedra | 29,30 | 35,15 | 48,22 | 13,07 | 38,08 | 10,14 | 45,70 | 2,52 |
| Pesqueira | 98,54 | 118,25 | 100,46 | 17,79 | 128,10 | 27,64 | 153,72 | 53,26 |

Fonte: COMPESA, (2016).

Tabela 1 - Relação da oferta e demanda das cidades do Agreste de Pernambuco. (continua)

| CIDADES | Demanda 2014 Ip:40% (l/s) | Demanda 2014 Ip:50% (l/s) | Vazão Adutora Agreste (l/s) | Balanço 2014 (l/s) | Demanda 2037 (l/s) Ip:40% | Balanço 2037 (l/s) (Ip:40%) | Demanda 2037 (l/s) (Ip:50%) | Balanço 2037 (l/s) (Ip:50%) |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Poção | 19,99 | 23,98 | 17,97 | 6,01 | 25,98 | 8,01 | 31,18 | 13,21 |
| Riacho das Almas | 23,50 | 28,20 | 21,79 | 6,41 | 30,55 | 8,76 | 36,65 | 14,86 |
| Sairé | 22,62 | 27,14 | 21,42 | 5,72 | 29,40 | 7,98 | 35,28 | 13,86 |
| Salgadinho | 10,03 | 12,04 | 8,67 | 3,37 | 13,04 | 4,37 | 15,65 | 6,98 |
| Saloá | 19,33 | 23,19 | 18,79 | 4,40 | 25,13 | 6,34 | 30,15 | 11,36 |
| Sanharó | 50,47 | 60,56 | 17,61 | 42,95 | 65,61 | 48,00 | 78,73 | 61,12 |
| Santa C. do Capibaribe | 192,57 | 231,08 | 186,74 | 44,34 | 250,34 | 63,60 | 300,41 | 113,67 |
| Sta. Maria do Cambucá | 42,49 | 50,98 | 9,44 | 41,54 | 55,23 | 45,79 | 66,28 | 56,84 |
| São Bento do Una | 68,91 | 82,70 | 43,60 | 39,10 | 89,59 | 45,99 | 107,51 | 63,91 |
| São Caitano | 69,09 | 82,91 | 80,62 | 2,29 | 89,82 | 9,20 | 107,78 | 27,16 |
| São Joaquim do Monte | 36,05 | 43,26 | 41,30 | 1,96 | 46,87 | 5,57 | 56,24 | 14,94 |
| Surubim | 147,10 | 176,52 | 133,93 | 42,59 | 191,23 | 57,30 | 229,48 | 95,55 |
| Tacaimbó | 22,32 | 26,78 | 6,84 | 19,94 | 29,01 | 22,17 | 34,81 | 27,97 |
| Taquaritinga do Norte | 25,04 | 30,05 | 44,67 | 14,62 | 32,56 | 12,11 | 39,07 | 5,60 |
| Terezinha | 8,75 | 10,50 | 6,26 | 4,24 | 11,38 | 5,12 | 13,65 | 7,39 |
| Toritama | 101,75 | 122,10 | 79,58 | 42,52 | 132,28 | 52,70 | 158,73 | 79,15 |
| Tupanatinga | 27,03 | 32,44 | 23,44 | 9,00 | 35,14 | 11,70 | 42,17 | 18,73 |
| Venturosa | 25,62 | 30,75 | 29,92 | 0,83 | 33,31 | 3,39 | 39,97 | 10,05 |
| Vertente do Lério | 6,52 | 7,82 | 3,89 | 3,93 | 8,47 | 4,58 | 10,17 | 6,28 |
| Vertentes | 34,39 | 41,27 | 27,88 | 13,39 | 44,70 | 16,82 | 53,65 | 25,77 |
| **Totais** | **4.166,80** | **5.000,15** | **3.254,57** | **1.745,58** | **5.436,70** | **2.182,13** | **6.524,05** | **3.269,48** |

Fonte: COMPESA, (2016).

Verifica-se que todas as cidades analisadas estão numa condição de *déficit*, ou seja, as vazões disponibilizadas em 2014 são inferiores a demanda, ou seja, a necessidade total de suprimento de água para o atendimento pleno da população das cidades estudadas, conforme dados apresentados na Tabela 2, onde são apresentados dados, tais como, oferta média anual, tomando-se como referência o ano de 2014 e a demanda máxima diária, considerando a existência de uma perda de 40%. Este percentual foi utilizado levando-se em consideração os dados de perdas previstas no projeto de Transposição do rio São Francisco.

Ressalta-se, portanto, a importância da necessidade da alocação de água de outras fontes para minimizar ou equacionar a situação de déficit hídrico existente nesta região. Ainda na Tabela 2, tem-se o percentual da população em cada cidade que se encontra fora do rodízio, ou seja, que o percentual que recebe água de forma contínua, ou seja, sem racionamento.

Tabela 2 - Dados de oferta e demanda das cidades da amostra de estudo e situação de déficit ou superávit.

| Item | Município | Oferta Média anual (l/s) 2014 | DMD = Demanda Máxima Diária (l/s) com Perda de 40% | % Déficit | (% Fora do rodízio) Fev./2014 |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | Agrestina | 41,47 | 51,27 | 19,13 | 100,00% |
| 2 | Águas Belas | 19,75 | 65,10 | 69,66 | 0,00% |
| 3 | Alagoinha | 5,00 | 18,09 | 27,77 | 0,00% |
| 4 | Altinho | 31,40 | 41,48 | 24,29 | 100,00% |
| 5 | Angelim | 7,13 | 17,79 | 59,93 | 0,00% |
| 6 | Arcoverde | 99,02 | 155,80 | 36,45 | 0,00% |
| 7 | Barra de Guabiraba | 17,51 | 31,60 | 44,59 | 70,00% |
| 8 | Belo Jardim | 127,53 | 168,64 | 24,38 | 0,50% |
| 9 | Bezerros | 99,27 | 120,74 | 17,78 | 20,00% |
| 10 | Bom Conselho | 55,37 | 70,20 | 21,12 | 0,00% |
| 11 | Bom Jardim | 20,00 | 59,17 | 17,80 | 55,00% |
| 12 | Bonito | 61,73 | 71,15 | 13,23 | 100,00% |
| 13 | Brejão | 5,68 | 10,00 | 43,19 | 60,00% |
| 14 | Brejo da Madre de Deus | 13,10 | 35,33 | 62,91 | 0,00% |
| 15 | Buíque | 14,14 | 45,67 | 69,04 | 5,00% |
| 16 | Cachoeirinha | 28,03 | 44,42 | 36,90 | 80,00% |
| 17 | Caetés | 3,13 | 21,05 | 85,11 | 0,00% |
| 18 | Calçado | 0,77 | 10,68 | 92,76 | 0,00% |
| 19 | Camocim de São Félix | 17,42 | 37,59 | 53,65 | 100,00% |
| 20 | Canhotinho | 22,56 | 33,50 | 32,66 | 100,00% |
| 21 | Capoeiras | 9,81 | 18,59 | 47,23 | 0,00% |
| 22 | Caruaru | 938,50 | 1.027,08 | 8,62 | 90,00% |
| 23 | Casinhas | 4,93 | 5,08 | 36,35 | 0,00% |
| 24 | Correntes | 17,21 | 25,16 | 31,59 | 100,00% |
| 25 | Cumaru | 15,00 | 20,50 | 50,14 | 10,00% |
| 26 | Cupira | 39,21 | 59,38 | 33,97 | 100,00% |
| 27 | Frei Miguelinho | 8,87 | 18,05 | 50,84 | 0,00% |
| 28 | Garanhuns | 306,87 | 335,32 | 8,48 | 95,00% |
| 29 | Gravatá | 235,24 | 231,67 | 1,54 | 15,00% |
| 30 | Ibirajuba | 3,88 | 10,21 | 61,99 | 100,00% |
| 31 | Itaíba | 27,12 | 34,91 | 22,29 | 15,00% |
| 32 | Jataúba | 0,00 | 13,10 | 100,00 | 0,00% |
| 33 | João Alfredo | 46,13 | 53,81 | 4,30 | 10,00% |
| 34 | Jucati | 0,00 | 8,27 | 100,00 | 0,00% |
| 35 | Jupi | 0,00 | 19,63 | 100,00 | 0,00% |
| 36 | Jurema | 9,22 | 17,03 | 45,87 | 100,00% |
| 37 | Lagoa do Ouro | 10,02 | 15,60 | 35,77 | 100,00% |
| 38 | Lagoa dos Gatos | 22,41 | 23,62 | 5,11 | 100,00% |
| 39 | Lajedo | 71,78 | 101,81 | 29,49 | 20,00% |
| 40 | Machados | 13,87 | 21,30 | 34,88 | 40,00% |
| 41 | Orobó | 21,14 | 26,14 | 19,10 | 25,00% |
| 42 | Palmeirina | 7,89 | 16,32 | 51,63 | 0,00% |
| 43 | Panelas | 14,70 | 28,76 | 48,91 | 0,00% |
| 44 | Paranatama | 1,44 | 6,96 | 79,36 | 0,00% |

Fonte: Autor, a partir de dados da COMPESA (2015).

Tabela 2 - Dados de oferta e demanda das cidades da amostra de estudo e situação de déficit ou superávit (continua).

| ITEM | Município | Oferta Média anual (l/s) | DMD = Demanda Máxima Diária (l/s) Perda de 40% | % Déficit | (% Fora do rodízio) Fev./2014 |
|---|---|---|---|---|---|
| 45 | Passira | 36,05 | 43,23 | 16,61 | 65,00% |
| 46 | Pedra | 20,15 | 29,30 | 31,23 | 0,00% |
| 47 | Pesqueira | 55,16 | 98,54 | 44,02 | 10,00% |
| 48 | Poção | 6,93 | 19,99 | 65,34 | 0,00% |
| 49 | Riacho das Almas | 22,54 | 23,50 | 4,07 | 100,00% |
| 50 | Sairé | 9,15 | 22,62 | 59,55 | 40,00% |
| 51 | Salgadinho | 13,97 | 14,03 | 139,01 | 0,00% |
| 52 | Saloá | 7,10 | 19,33 | 63,27 | 0,00% |
| 53 | Sanharó | 30,52 | 50,47 | 39,52 | 1,00% |
| 54 | Santa Cruz do Capibaribe | 90,21 | 192,57 | 53,15 | 0,00% |
| 55 | Santa Maria da Boa Vista | 39,76 | 42,49 | 17,11 | 100,00% |
| 56 | São Bento do Una | 52,59 | 68,91 | 23,68 | 0,00% |
| 57 | São Caitano | 41,51 | 69,09 | 39,92 | 10,00% |
| 58 | São Joaquim do Monte | 22,47 | 36,05 | 37,66 | 45,00% |
| 59 | Surubim | 138,80 | 147,10 | 5,64 | 0,00% |
| 60 | Tacaimbó | 9,54 | 22,32 | 57,27 | 0,00% |
| 61 | Taquaritinga do Norte | 15,41 | 25,04 | 38,48 | 0,00% |
| 62 | Terezinha | 2,67 | 8,75 | 69,45 | 0,00% |
| 63 | Toritama | 57,94 | 101,75 | 43,06 | 0,00% |
| 64 | Tupanatinga | 12,48 | 27,03 | 53,82 | 100,00% |
| 65 | Venturosa | 0,00 | 25,62 | 0,00 | 0,00% |
| 66 | Vertente do Lério | 2,15 | 6,52 | 67,08 | 0,00% |
| 67 | Vertentes | 14,43 | 34,39 | 58,29 | 0,00% |

Fonte: Autor, a partir de dados da COMPESA (2015).

## 3.4 Projeto Transposição: Sistema Integrado Adutor do Agreste

Nos tempos modernos, a principal motivação para a transferência de água entre as bacias nas regiões áridas e semiáridas é a chamada segurança hídrica, cujo objetivo básico é aumentar o nível de garantia de suprimento de água para as atividades a que se destina. Tais ações são sustentadas no princípio geral de equidade no direito do acesso à água, principalmente no que se refere ao abastecimento humano e animal, assegurado como princípio moral e incorporado na legislação das nações (SBPC, 2004).

O Projeto de Transposição da água do São Francisco prevê a construção de dois canais: o Eixo Norte que levará água para os sertões de Pernambuco, Ceará, Paraíba e Rio Grande do Norte, e o Eixo Leste, que beneficiará parte do Sertão e a região Agreste de Pernambuco e da Paraíba. O arranjo geral da infraestrutura hídrica da obra da Transposição é apresentado na Figura 21.

Figura 21 - Infraestrutura hídrica da obra da Transposição.

Fonte: Ministério das Cidades, (2014).

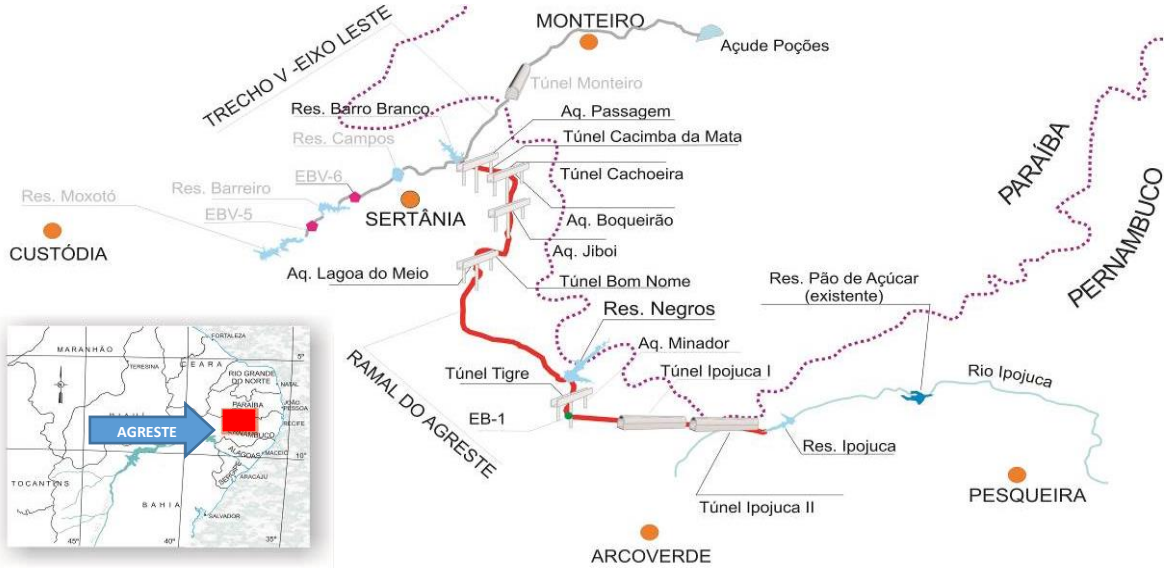
Para o atendimento das demandas da região Agreste de Pernambuco, o projeto prevê a construção de um ramal de 70 quilômetros que interligará o Eixo Leste à bacia do rio Ipojuca. Previsto para uma capacidade máxima de 28 m³/s, o Eixo Leste funcionará com uma vazão contínua de 10 m³/s, disponibilizados para consumo humano. Para atender a estas deficiências hídricas, sobretudo na região agreste pernambucana foi iniciada uma obra para implantação do Sistema Adutor do Agreste que se localiza na Mesorregião do Agreste Pernambucano, dividida em três regiões de desenvolvimento: Agreste Setentrional, Agreste Central e Agreste Meridional (COMPESA, 2014).

O Sistema Adutor do Agreste é constituído de um sistema produtor de água localizado nas proximidades do Reservatório de Ipojuca na cidade de Arcoverde em Pernambuco, ponto final do Ramal do Agreste, a partir do qual tem início um complexo de tubulações com mais de mil quilômetros de extensão que atenderá a Região do Agreste do estado de Pernambuco e beneficiará 68 sedes municipais, 80 localidades urbanas e comunidades rurais situadas dentro da faixa de 2,5 km de cada lado da adutora (COMPESA, 2014).

O Reservatório de Ipojuca será alimentado através do Ramal do Agreste que deriva do Eixo Leste do Projeto de Integração do Rio São Francisco com Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional. O sistema adutor do Agreste é composto pelas seguintes unidades: Captação; Adutoras de Água Bruta; Estação Elevatória de Água Bruta; Reservatório de Água

Bruta; Estação de Tratamento D'água; adutoras de água tratada; Estação Elevatória de água tratada e reservatórios de água tratada. Na Figura 22 pode-se ser visto o arranjo geral do ramal do Agreste (COMPESA, 2014).

Figura 22 - Arranjo geral do Ramal do Agreste.




Fonte: COMPESA, (2014).

A adutora de Água Tratada tem uma extensão de 1.030 km e que tem origem no Reservatório de Distribuição junto à ETA e se desenvolve inicialmente até a rodovia BR-232 e em seguida para os municípios que integram o projeto. O eixo principal de adução de água é ao longo da BR-232, com extensão aproximada de 125 km, passando pelas cidades Arcoverde, Pesqueira, Sanharó, Belo Jardim, São Caetano, Caruaru, Bezerros e Gravatá. Na Figura 23, tem-se a imagem aérea do início do eixo leste da obra de transposição.

Figura 23 - Vista aérea do início do eixo leste da obra de transposição.

Fonte: COMPESA, (2014).

### 3.5 Outros Sistemas complementares para suprimento de água para o Agreste

Os atuais suprimentos hídricos, localizados no Agreste de Pernambuco, não são suficientes para o atendimento pleno do abastecimento da população desta região e faz-se necessária a alocação água de outras regiões, tais como, a transposição do rio São Francisco. Na Figura 24 tem-se o croqui com o sistema do Pirangi, com a captação na cidade de Catende, integrado ao Sistema do Prata, este último tem a barragem localizada na cidade de Bonito.

Figura 24 – Sistema Pirangi.

Fonte: COMPESA, (2015).

Já na Figura 25 é apresentado o croqui com a localização dos sistemas Camevô e Serra Azul.

Figura 25 – Sistemas Camevô e Serra Azul.

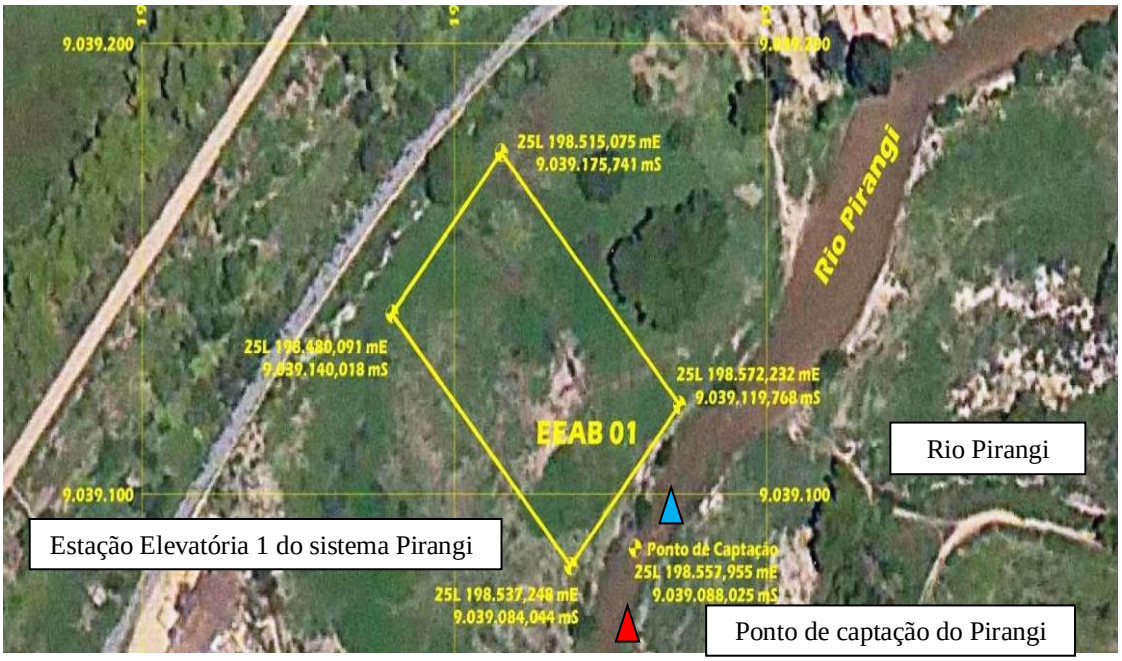
Fonte: COMPESA, (2015).

A seguir, são descritos os sistemas de transferências de água de menor porte, definidos por decisão governamental do estado, para suprimento hídrico do Agreste de Pernambuco. Estes sistemas, foram previstos para possibilitar a alocação de água oriunda da zona da mata sul, deste estado, para cidades do Agreste e são denominados Pirangi, Sirigi e Serro Azul.

### 3.5.1 Sistema Pirangi

O sistema Pirangi trata-se de uma alternativa projetada para reforçar a produção de água do Sistema do Prata, com 26.948 m de extensão de adução, dos quais 5.620 m em tubos DN 700 mm e 21.328 m em tubos DN 600 mm e duas estações elevatórias para vazões de 300 a 500 l/s, alturas manométricas da ordem de 170 m.c.a e potência dos motores de 900 cv, no qual foi prevista com uma vazão média de 500 l/s e atender a municípios tais como Caruaru, Santa Cruz do Capibaribe, Agrestina, Altinho, Cachoeirinha e Ibirajuba. A captação do sistema Pirangi encontra-se inserida na bacia hidrográfica do rio Una, a cerca de 2 Km da cidade de Catende e a cerca de 27 km da Barragem do Prata e possui potencial hídrico suficiente para aduzir a vazão complementar necessária à implantação da segunda etapa do Sistema Prata (COMPESA, 2016). Um croqui esquemático contendo a localização da captação do sistema Pirangi, no rio de mesmo nome na cidade é apresentado na Figura 26, conforme a seguir.

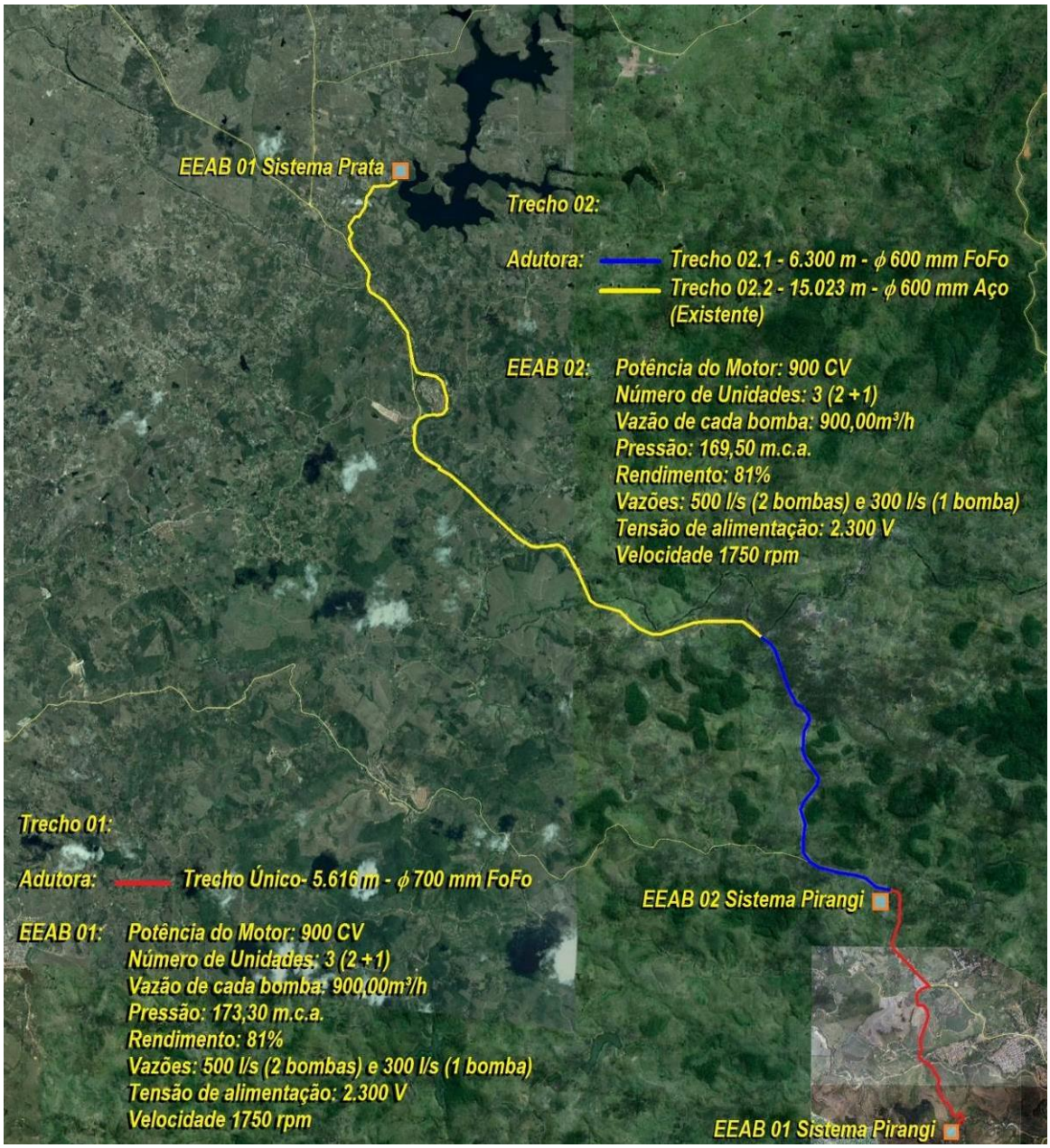
Figura 26 – Croqui do sistema Pirangi.




Fonte: COMPESA, (2016).

Através da captação no Rio Pirangi, com uma vazão média diária de 400 l/s, interligado com a Estação Elevatória I do Sistema do Prata. A partir desta última serão aproveitadas as estruturas e adutoras existentes para transportar uma vazão de 950 l/s até a cidade de Agrestina, onde existe uma demanda de 100 l/s e a partir daí segue 850 l/s até a ETA Petrópolis. Dessa forma, serão utilizados como reservatório a Barragem do Prata, alimentando o sistema com 550 l/s e o Rio Pirangi, fornecendo os 400 l/s complementares (COMPESA, 2016). Já na Figura 27 é apresentado um croqui com o traçado geral da adutora do sistema Pirangi e sua integração com o sistema do Prata.

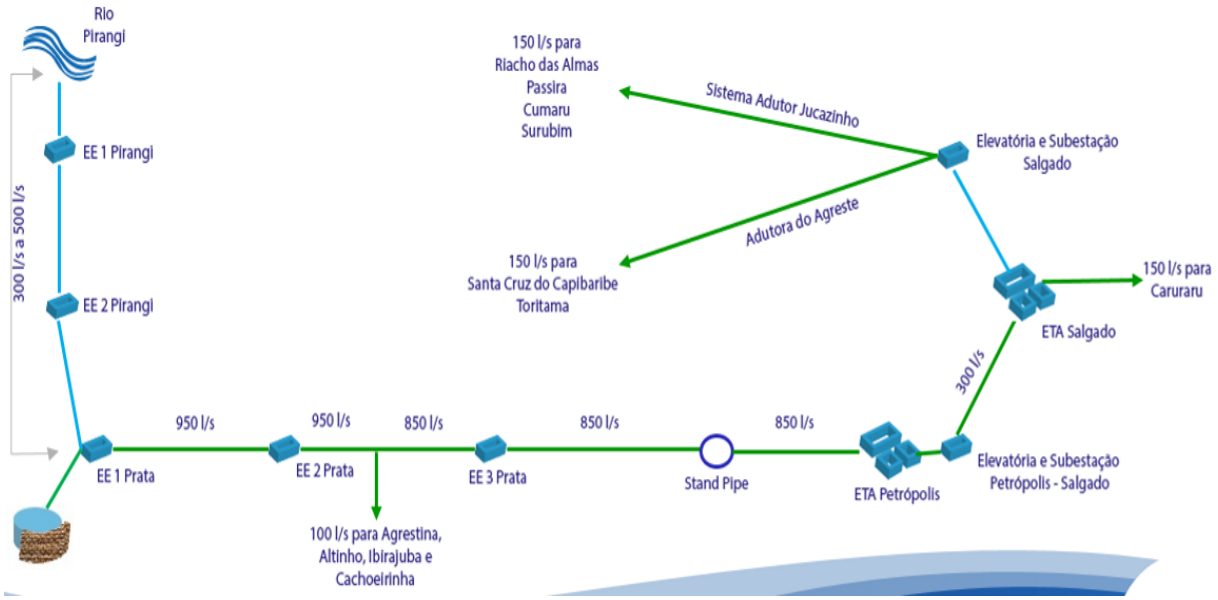
Figura 27 - Croqui sistema Pirangi com interligação com o sistema Prata.




Fonte - COMPESA, (2016).

Na Figura 28 é apresentado um diagrama unifilar do sistema Pirangi, com todas as etapas, desde a captação até a distribuição para as cidades a serem beneficiadas pelo suprimento de água a partir deste sistema.

Figura 28 – Diagrama unifilar do sistema Pirangi.




Fonte: COMPESA, (2016).

### 3.5.2 Sistema Sirigi

O sistema Sirigi está localizado também na região da Zona da Mata, no distrito de Murupé, em Vicência. O empreendimento consiste de uma captação (construída em 2001 e com capacidade para armazenar 17 milhões de metros cúbicos de água), uma estação de tratamento de água e quatro estações elevatórias (sistema de bombeamento) (COMPESA, 2016).

### 3.5.3 Sistema Serro Azul

O projeto da Barragem e sistema Serro Azul foi planejada para aproveitamento da água proveniente da Barragem de mesmo nome. Inicialmente idealizada para adução de água bruta, sendo a água tratada nas ETA's das cidades e com o objetivo do atendimento prioritário para abastecer cidades do Agreste do Estado que estão em situação de colapso ou pré-colapso de abastecimento e a vazão planejada de 560 l/s. Cidades inicialmente a serem contempladas:

Toritama; Santa Cruz do Capibaribe; São Caitano; Belo Jardim; Tacaimbó; Sanharó e São Bento do Una (COMPESA, 2016).

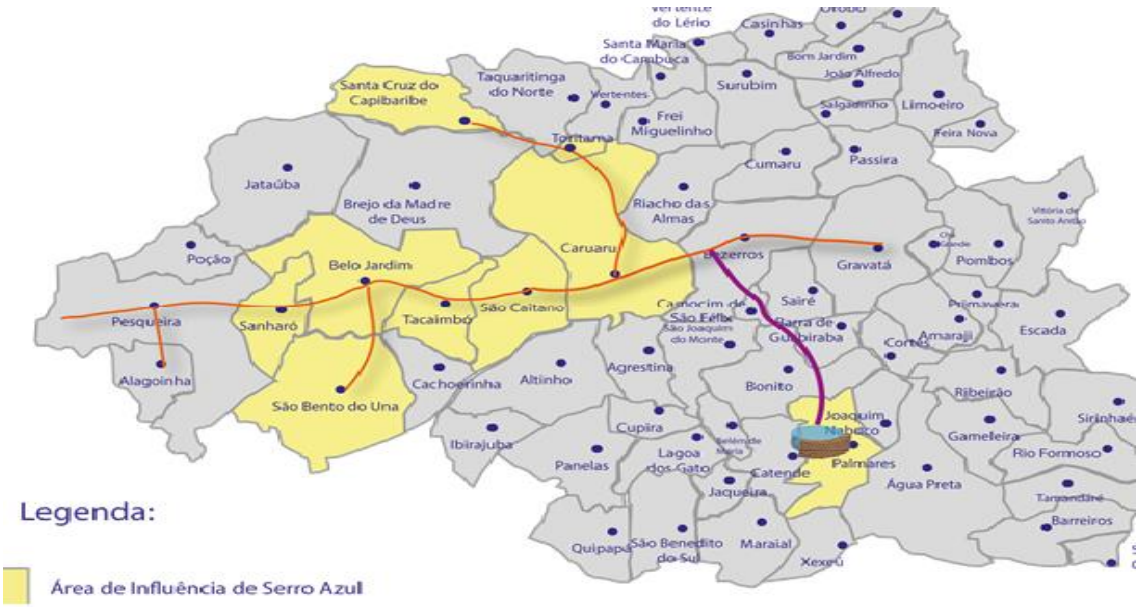
O sistema Serro Azul previsto é composto de uma Adutora de 54 km; da construção de 3 estações elevatórias; construção de uma Estação de Tratamento de Água e a vazão de expansão de 150 l/s para a cidade de Palmares. Na Figura 29 tem-se a imagem da Barragem Serro Azul numa fase da obra com quase 100% de conclusão em dezembro de 2016.

Figura 29 - Imagem da Barragem Serro Azul.

Fonte: COMPESA, (2016).

Na Figura 30 tem-se o mapa com a área de influência da barragem Serro Azul, contendo a adutora e as cidades que serão beneficiadas por este sistema integrado de abastecimento de água.

Figura 30 - Mapa com áreas da influência do sistema Serro Azul.




Fonte: COMPESA, (2016).

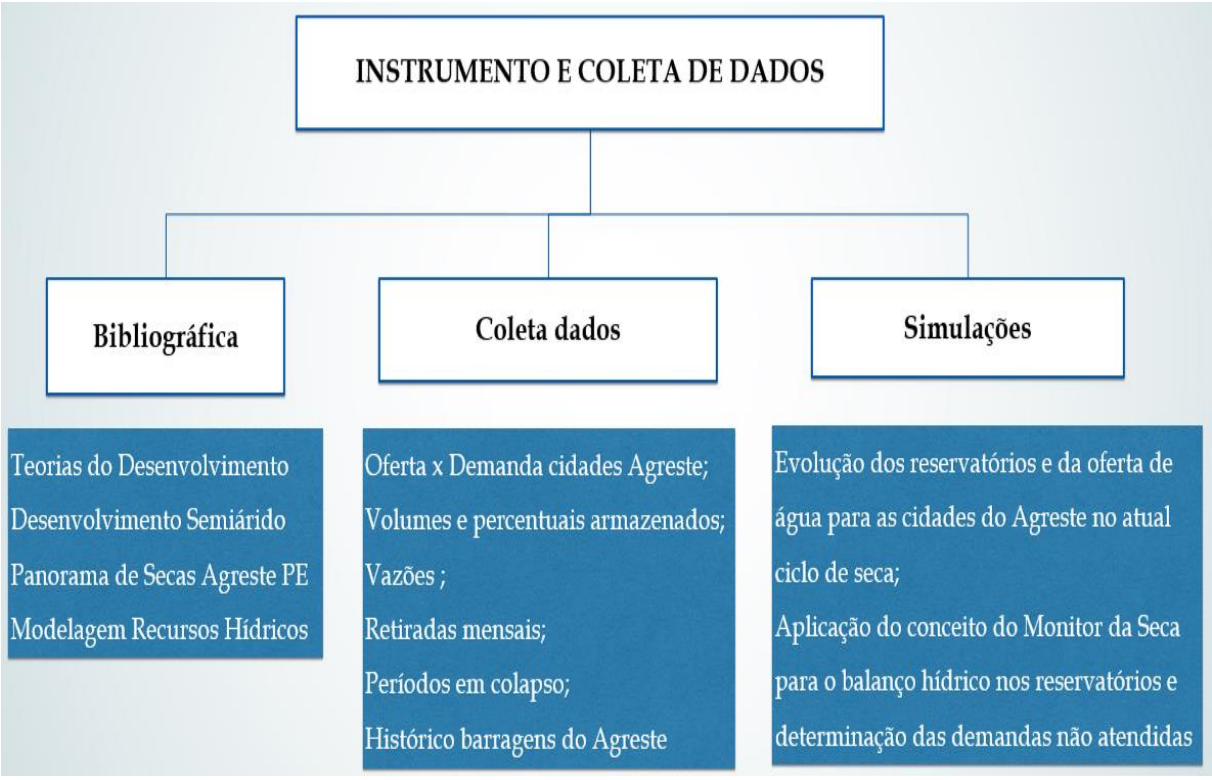
# 4 METODOLOGIA

Neste capítulo é apresentada a metodologia utilizada, no qual inicialmente, foram identificados os esquemas atuais de abastecimento das cidades do Agreste pernambucano.

Como também, utilizou-se informações das barragens tais como vazões, volumes e percentuais referentes ao intervalo de 2008 a 2016 por se tratar de um período no qual se encontram disponíveis dados confiáveis obtidos na COMPESA. Também foi realizado o levantamento do histórico de armazenamento de água em cada fonte (barragem, manancial ou poço), de janeiro de 2008 a dezembro de 2016, incluindo os anos mais críticos.

Houve a identificação das retiradas mensais da COMPESA, a partir dos reservatórios de cada cidade, como também, verificada a capacidade máxima de transporte de água de cada sistema. E a partir do histórico de acumulação nos reservatórios foi identificada a retirada mensal de água, por meio de um balanço hídrico e, portanto, o total de entradas e saídas de cada manancial. Na Figura 31 tem-se o resumo dos instrumentos e coletas de dados do estudo.

Figura 31 – Instrumentos e coleta de dados do estudo.




Fonte: Autor, 2017.

## 4.1 Descrição do modelo para a realização das simulações

O modelo construído é de balanço hídrico mensal com simulações sucessivas para possibilitar a identificação das informações destacadas a seguir:

a) A operação real dos reservatórios no período;

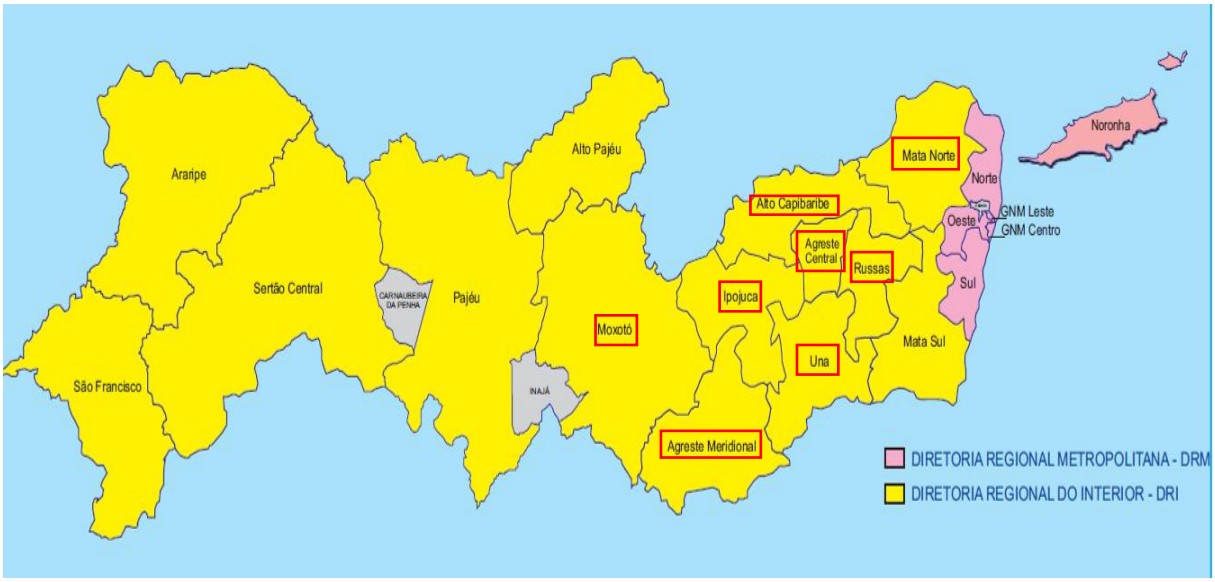
b) O balanço hídrico nos reservatórios, construído de forma indireta a partir do histórico dos mananciais e das retiradas conhecidas;

c) A operação desejável pelo uso do monitor da seca e, nesse caso, as demandas não atendidas pelos sistemas existentes.

O modelo foi construído sobre planilhas integradas por sistemas. Essa metodologia foi escolhida, ao invés de uso de software de fluxo conhecidos, pela necessidade de adequação às peculiaridades dos diversos sistemas. Utilizou-se dados, inerentes a volumes e vazões das barragens disponíveis, contendo parâmetros do sistema de abastecimento, envolvendo as cidades do Agreste pernambucano. Foram elaboradas planilhas, contendo em cada uma delas, informações sobre os mananciais existentes, vazões, volumes produzidos, demanda, oferta, déficits, estados de secas, no período de 2008 a 2016.

Estas informações principais de entrada foram obtidas através, do banco de dados da COMPESA, em várias áreas geograficamente distantes uma das outras. Ressaltamos as dificuldades existentes para coleta dos dados utilizados, diante da falta de um banco de dados único e centralizado na instituição, no qual foi necessário coletar em várias cidades através das sedes de oito gerências regionais espalhadas no interior do Estado, conforme a Figura 32.

Figura 32 - Mapa de Pernambuco com destaque para as áreas investigadas.




Fonte: Adaptado de COMPESA (2016).

Os históricos coletados das barragens do Agreste contêm as seguintes informações:

- Volumes mensais de cada barragem em m³;
- Percentuais mensais;
- Vazões captadas em l/s;
- Volumes mensais retirados para abastecimento humano;
- Períodos em colapso.

### 4.1.1 Balanço hídrico nos reservatórios

O método direto para simular o balanço hídrico nos reservatórios seria quantificar as vazões afluentes, precipitações, evaporação e retiradas, no passo de tempo adequado, no caso a cada mês. Entretanto, é escassa a disponibilidade de dados para esse fim. Em função disso, adotou-se um método indireto: como a COMPESA opera e mantém registros com boa precisão da acumulação e da retirada que faz de cada manancial, esses dados foram utilizados para, a cada mês, realizar a avaliação das entradas e saídas de água em cada reservatório.

Para as simulações, os termos do lado direito da Equação 1 são conhecidos a partir dos históricos. O cálculo realizado permite então expurgar a retirada da COMPESA para permitir as novas simulações, entretanto considerando as restrições operacionais nos reservatórios. Ao mesmo tempo, somando-se esses valores à série histórica dos volumes no reservatório, as afluências, evaporação e outros usos podem ser quantificados.

A seguir são apresentadas as Equações 1 e 2 referente ao balanço hídrico utilizado.

$$Vres\ (t+1) = Vres(t) - Vc\ (t) + Vafl\ (t) - Vevap\ (t) - Voutros\ (t) \qquad \text{Equação (1)}$$

Logo,

$$Vafl - Vevap - Voutros = Vres(t+1) - Vres(t) + Vc \qquad \text{Equação (2)}$$

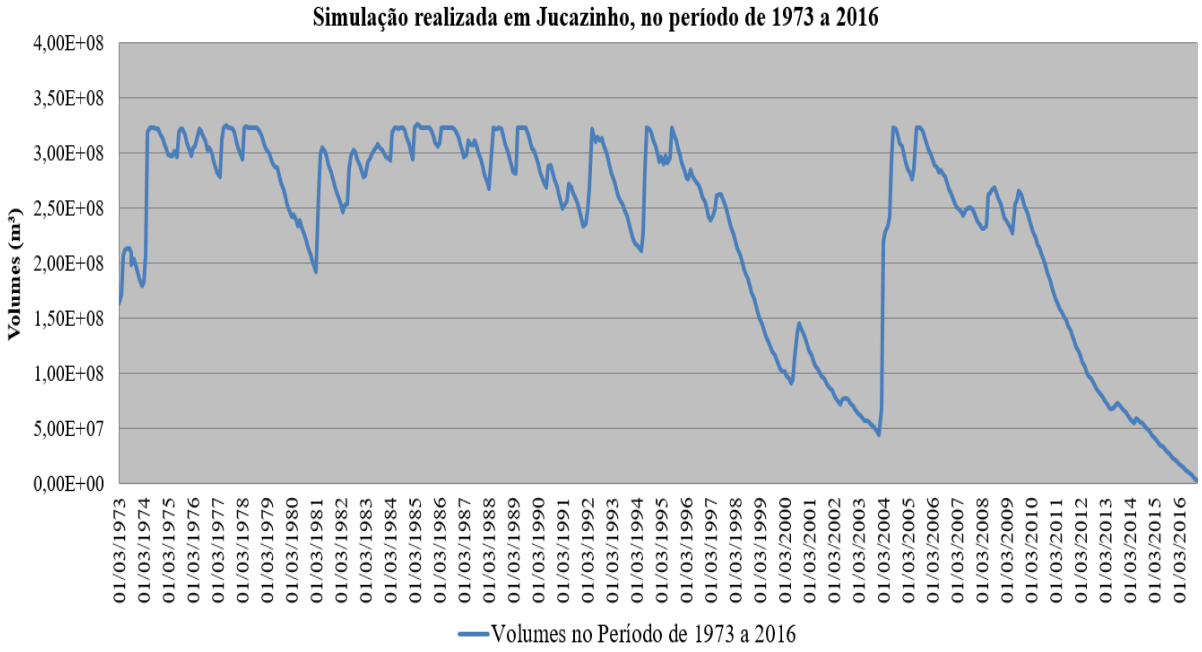
Onde:

Vres (t) = Volume do reservatório no período do tempo (t);
Vc = Volume captado em m³;
V afl = Volume afluente (recarga) em m³;
Vevap = volume evaporado em m³;
V outros = Outros Volumes, em m³.

De posse dessa série que traduz o balanço no reservatório de entradas e outras saídas, parte-se do estado inicial do reservatório para simular seu comportamento, no período de 2008 a 2016, para descobrir quais as retiradas possíveis em cada sistema.

A razoabilidade dessa estratégia de balanço hídrico obtido de forma indireta foi atestada para o reservatório de Jucazinho a partir de estudo ainda não publicado por Cirilo (2017), que utilizou séries de dados diários, de 1973 a 2015, para determinar a vazão regularizada por Jucazinho aplicando o conceito do Monitor da Seca. Os resultados foram bastante próximos aos obtidos no presente estudo. A Figura 33 apresenta os principais resultados obtidos por Cirilo (2017).

Figura 33 – Simulação realizada em Jucazinho no período de 1973 a 2016.




Fonte: Cirilo, 2017

Outra simplificação adotada foi definir para todos os reservatórios estudados, os mesmos parâmetros de operação definidos para Jucazinho pelo estudo do Monitor da Seca. Naturalmente, cada manancial deveria ter uma análise em separado, o que iria requerer análise individual mais aprofundada.

Considerou-se como premissa do atendimento que as fontes mais próximas das cidades como sendo prioritárias. Já no primeiro mês, se busca atender à demanda máxima que os sistemas adutores permitem ou que a cidade requer, se houver folga no sistema adutor quanto à capacidade de transporte de água existente em cada sistema. A simulação foi realizada primeiro para os reservatórios que abastecem somente uma cidade e depois para os

sistemas integrados. A medida que o reservatório é deplecionado para transferir água com destino a uma ou mais cidades, verifica-se como o mesmo se encontra enquadrado nos limites do Monitor da Seca. Se a situação for confortável o atendimento é pleno. Se não, aplica-se um redutor sobre o volume retirado.

Para cada cidade, na sequência de prioridades, define-se quanto se pode contar de cada manancial. Se o atendimento não for pleno, registra-se o déficit que é totalizado para a análise do conjunto dos sistemas e qual a fonte se buscará o complemento de água. No estudo de caso em questão, as fontes são: adutoras a partir de barragens na Zona da Mata, poços profundos e Transposição do rio São Francisco. Essa análise é feita em dois cenários de tempo para o ano de 2014 e para 2037, conforme período previsto de alcance do projeto da Transposição do rio São Francisco.

Para a realização das simulações, a partir dos dados organizados, utilizou-se o método do monitor de secas, implantado em 2014, no Nordeste brasileiro, tendo-se a princípio dois pilotos sendo um no Ceará e outro em Pernambuco, mais precisamente na região Agreste do Estado, considerada a área mais crítica no tocante as limitações de recursos hídricos.

Foram levados em consideração, os históricos de volumes armazenados, como também, metas operacionais baseadas em gatilhos, ou seja, em tetos contendo valores máximos possíveis, para retirada de volumes destas barragens. Dessa forma, levou-se em consideração volumes de forma a não comprometer a sustentabilidade hídrica do manancial e no qual fosse possível obter como resultado um aumento do alcance até o próximo ciclo de chuvas, ou seja, o período do ano no qual ocorre os maiores índices de precipitação em uma dada região.

### 4.1.2 Descrição do modelo do Monitor de Secas

O monitor de secas implantado no Nordeste brasileiro, com o apoio do Banco Mundial, foi inspirado no monitor de secas dos EUA (*US Drought Monitor*, programa elaborado pelo Centro Nacional de Mitigação de Secas dos EUA (NDMC), México e Espanha. Porém, o monitor brasileiro passou por adaptações de acordo com as condições locais do Nordeste, para que assim fosse possível sua implantação (APAC, 2015). Já aplicado em países como EUA, México e Espanha os quais têm áreas com características bem semelhantes às áreas semiáridas do Nordeste brasileiro, onde o índice de aridez é elevado, possuem baixa pluviometria e elevados índices de evaporação.

Estes países possuem de forma similar ao Brasil áreas críticas que sofrem com problemas de estiagem no qual, as secas fazem parte do cenário e no qual faz-se necessário a

análise mais detalhada dos comportamentos hidrológicos e meteorológicos de forma conjunta para identificação do grau da seca. O monitor consiste em um processo de monitoramento das regiões do Nordeste, em situação de seca. Esta nova ferramenta representa a busca do governo por um método de monitoramento mais completo, para possibilitar o acesso ao conhecimento de forma mais detalhada sobre as condições de secas vivenciadas pelo Nordeste, sobretudo o grau de sua severidade, a evolução, os impactos gerados e os setores mais afetados (ANA, 2016).

O processo do Monitor tem em sua essência combinar diversas fontes de dados, produtos, informações de todos os sistemas de monitoramento meteorológico, hidrológico e agrícola/pecuária da União e do Estado, apoiados na informação local trazida por quem realmente vivencia a seca (APAC, 2015).

Os dados que são coletados por meio dos sistemas de monitoramento, são processados, analisados, para serem utilizados na produção do resultado do Monitor, que consiste em um mapa, o Mapa do Monitor de Secas do Nordeste. Este mapa é divulgado e atualizado todo mês, indicando as regiões do Nordeste que estão em situação de secas, sinalizando as áreas com secas de severidade fraca até a mais grave. A partir da análise de mapas anteriores e do mais atual, pode-se verificar a evolução tanto espacial como temporal da seca na região monitorada (APAC, 2015). Dessa forma, torna-se possível identificar se uma dada seca está dando indicativos de melhora ou piora.

Entretanto, o mapa do Monitor não indica previsão de futuras secas, porém apresenta a situação atual de seca das regiões que foram monitoradas, auxiliando assim aos gestores operacionais na área de recursos hídricos na tomada de decisões e na melhoria do gerenciamento de secas na região.

O Monitor de Secas tem como objetivo integrar o conhecimento técnico e científico já existente em diferentes instituições estaduais e federais para alcançar um entendimento comum sobre as condições de seca tais como, sua severidade, a evolução espacial e no tempo, e seus impactos sobre os diferentes setores envolvidos. O Monitor facilita a tradução das informações em ferramentas e produtos utilizáveis por instituições tomadoras de decisão e indivíduos, de modo a fortalecer os mecanismos de Monitoramento, Previsão e Alerta Precoce (APAC, 2015). A metodologia utilizada busca montar estratégias para minimizar os efeitos da estiagem quando os volumes existentes nos reservatórios são considerados normais. O Monitor de Secas apesar de apresentar informações para uma análise mais completa quando comparada aos estudos anteriormente já realizados no Brasil até 2013, não basta ter apenas os dados, é preciso saber interpretá-los.

No caso do semiárido Nordestino, por exemplo, sabemos que há períodos em que normalmente não chove durante meses. Esses períodos sem chuva são normais, são parte do clima da região. Na hora de desenhar o Mapa do Monitor de Secas, isso também é levado em consideração. Se levássemos em consideração somente a quantidade de chuva, talvez um período que normalmente é seco no semiárido recebesse uma classificação errada podendo levar as pessoas a tomarem decisões erradas. Isso é o que faz a diferença entre um simples programa de computador, ou o uso de indicadores isolados, como quantidade de chuva e o mapa do monitor de secas, que é produzido e analisado por pessoas. Estas pessoas que são responsáveis pelo monitoramento da seca e produção do mapa do monitor são instituições e seus representantes residentes nos noves estados do Nordeste, os quais trabalham em conjunto, este pessoal que participa do processo de produção do mapa, recebem o nome de provedores de dados, autores, validadores e instituição central, de acordo com o papel que cada um desempenha, ANA (2015).

As instituições provedoras de dados são as organizações federais, estaduais e algumas internacionais que enviam dados para que o monitor seja atualizado. Os autores são organizações responsáveis pela criação do mapa e sua validação, os quais estudam e analisam os dados recebidos. A cada mês o mapa tem uma autoria diferente, as organizações que atualmente exercem a função de autores são o INEMA (Instituto do Meio Ambiente e Recursos Hídricos) do estado da Bahia, FUNCEME (Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos) do estado do Ceará e APAC (Agência Pernambucana de Águas e Clima) do estado de Pernambuco, os validadores correspondem as instituições que estão nas regiões que estão passando por secas, responsáveis por comunicar a situação do local que estão para os autores. Além dessa responsabilidade, os validadores exercem a função de confirmar as informações presentes no mapa produzido pelo autor e também de sugerir modificações caso discorde das condições apresentadas no mapa e a Instituição Central é a responsável por organizar, supervisionar e cobrar dos provedores de dados e dos autores que eles façam o seu trabalho. Esta Instituição Central é a ANA – Agência Nacional das Águas, MARTINS et al., (2015).

No modelo do Monitor de Secas, as medidas a serem realizadas para controle da captação de água nas barragens, devem ser compatíveis com a severidade da seca que de forma mais específica, podem ser descritas conforme a seguir: Normal - as demandas são supridas sem nenhum tipo de restrição; Alerta - preparação administrativa e operacional para o início efetivo da seca operacional; Conservação (Reduções) - reduzindo o consumo por meio de incentivos econômicos e campanhas de conservação da água, assim como,

incremento de recursos financeiros para ampliação da oferta hídrica e redução de perdas; Restrições - redução física do consumo para o reforço das medidas de execução de impacto socioeconômico mais elevado e Emergência - grande gravidade com impactos severos, medidas de alto custo social e econômico-financeiro para evitar o colapso total do sistema.

As medidas serão executadas conforme a severidade da seca caracterizada através do Estado da Seca. Estes estados da seca são definidos a partir de indicadores baseados nas variáveis meteorológica (precipitação, evaporação), hidrológica (vazão) ou de alguma característica do hidrossistema (estoques de água).

O acionamento de cada uma das medidas de preparação, mitigação e resposta são condicionados pelo Estado da Seca e a definição desse se dá através de faixas de ocorrência de um indicador. A separação entre estas faixas se dá por um valor no indicador (limiar entre as faixas) que quando ultrapassado aciona uma ação. Por servir para o acionamento este limiar é chamado de Gatilho. Os gatilhos estão apresentados na Tabela 3. O conjunto das ações associadas a um estado de seca tem por objetivo cumprir uma meta de ampliação da oferta, redução da demanda, mitigação de impactos e conflitos associados à seca.

A definição do nível meta aqui proposto, baseia-se na construção de níveis, tomados a partir da disponibilidade hídrica da série histórica de vazões afluentes, utilizando a otimização de uma curva genérica, calculada da seguinte forma: inicialmente constrói-se uma curva (C1) de disponibilidade tomando como ponto inicial um volume h1, definida inicialmente como 80% do volume de acumulação máxima do reservatório, para o primeiro nível meta, cujo critério foi definido utilizando a mesma premissa e estudos já utilizada dos em países como EUA e México. A definição deste percentual como primeiro nível de meta Utiliza-se a equação do balanço hídrico 3, com vazão afluente zero e retirada mensal, inicialmente, igual a 30% da média das vazões afluentes da série histórica disponível, para o cálculo da acumulação dos onzes meses subsequentes. A Equação 3 do balanço hídrico é definida da seguinte forma:

$$V_{t+\Delta t} = V_t + I_t - E_t . A_t - R_t - P_t \qquad \text{Equação (3)}$$

Onde,

$V(t+\Delta t)$ = Volume do reservatório no período de tempo $t+\Delta t$, onde $\Delta t$=1 mês em m³;

Vt = Volume armazenado no início do período de tempo t, em m³;

It = Volume afluente ao reservatório durante o período de tempo t. em m³;

Et = Lâmina evaporada durante o período de tempo t, suposta constante ao longo do período;

At = Área do espelho d'água no início do período t, suposta constante para intervalos de tempos pequenos;

Rt = Retiradas operacionais visando suprimento das demandas e vertimentos;

Pt = Perdas por infiltração, em m³.

Uma segunda curva (C2) é construída, tomando-se como o volume do décimo segundo mês o mesmo valor h1. Utiliza-se a mesma equação do balanço para o cálculo dos onzes meses anteriores, com a forma:

$$V_t = V_{t+\Delta t} + E_t . A_t + R_t + P_t$$ Equação (4)

Onde:

Vt= Volume armazenado no início do período de tempo t, em m³;

V(t+Δt) = Volume do reservatório no período de tempo t+Δt, onde Δt=1 mês em m³;

Et= Lâmina evaporada durante o período de tempo t, suposta constante ao longo do período;

At = Área do espelho d'água no início do período t, suposta constante para intervalos de tempos pequenos;

Rt = Retiradas operacionais visando suprimento das demandas e vertimentos;

Pt = Perdas por infiltração, em m³.

Sendo a retirada operacional igual à da curva construída anteriormente.

Uma terceira curva (C3) é construída tomando-se o volume afluente igual a um determinado quantil da série histórica de vazões. Constrói-se uma matriz de probabilidade de não excedência, e toma-se o valor de vazões afluentes do ano correspondente igual a mediana das probabilidades de não excedência. A Equação do balanço hídrico é utilizada para a construção da terceira curva, sendo o volume inicial e a retirada operacional com valores iguais ao da curva 1. Por fim, a definição do nível meta se dá pela utilização dos valores correspondentes, mês a mês, pelo máximo entre a curva (C1) e curva (C3), e o mínimo entre esse resultado e a curva (C2).

X= máx (C1, C3) Equação (5)

Vmeta = mín (X, C2) Equação (6)

Na sequência, são construídos os outros níveis metas definidos a partir de um plano de operação para o reservatório. Repete-se o algoritmo proposto, modificando valores de volume inicial para cada nível meta, por exemplo, h2 = 0.5 x Vmáx; h3= 0.4 x Vmáx; h4=0.35 x Vmáx, permitindo-se a construção de quatro níveis metas. Definido os níveis metas, o

algoritmo inicia o cálculo da acumulação do reservatório utilizando a equação do balanço hídrico sujeita a uma regra de operação citada anteriormente.

A definição dos estados de secas pode ser calculada através do zoneamento do reservatório. Cada zona do reservatório estará associada a um estado de seca. A cada uma das faixas (zonas) de armazenamento será associada uma liberação de forma a constituir a política de operação do reservatório que define por sua vez a quantidade de água disponível para o abastecimento e consequentemente se há ou não a necessidade de redução da demanda na cidade.

Na Tabela 3 são apresentados os estados, cenários de secas e respectivas metas de resposta. Dessa forma quando o reservatório estiver com 80% do seu volume total será disparado um gatilho onde a meta de resposta onde deverá haver uma redução de 10% no volume captado a partir do mês seguinte. Quando o reservatório estiver com 60% do volume total a redução no consumo deverá ser de 20%, quando atingir apenas 45% a redução será de 30% do consumo e por fim quando for 30% da capacidade total a meta de resposta será um total de restrição de 60%.

Tabela 3 - Cenários de Seca, com gatilhos e metas de Resposta.

| Cenários de Seca | | |
|---|---|---|
| Estado | Gatilhos das Secas* | Metas de Resposta |
| Alerta | 80% | Redução 10% no consumo |
| Seca | 60% | Redução 20% no consumo |
| Seca Severa | 45% | Redução 30% no consumo |
| Seca Extrema | 30% | Redução 60% no consumo |

Fonte: Assis, (2014).

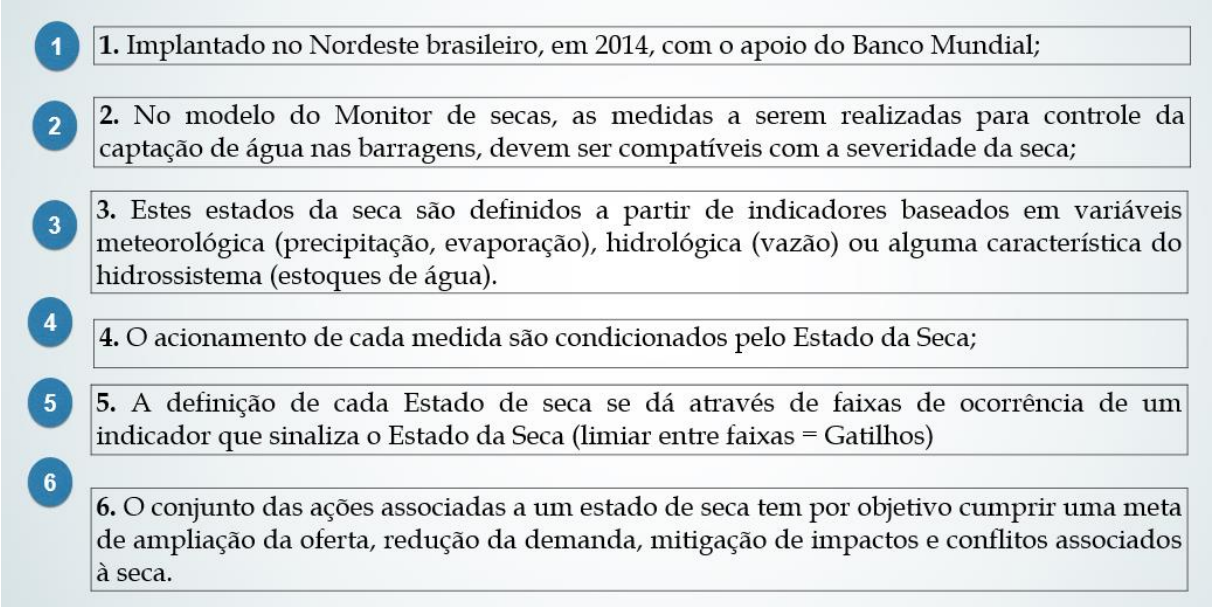
Inicialmente, ressalta-se que o modelo foi implantado como piloto, pela primeira vez no Brasil, por meio do Banco Mundial no Ceará e em Pernambuco, neste último mais precisamente foi realizado um estudo tendo-se a barragem de Jucazinho como obejto deste estudo. Esta barragem destaca-se pela relevância existente, sendo responsável pelo suprimento de água de aproximadamente 15 cidades do Agreste de Pernambuco.

No modelo as medidas utilizadas para controle da captação de água em barragens utiliza critérios que são compatíveis com a severidade do estado de seca num dado momento. Os estados de seca são definidos a partir de várias variáveis que levam em consideração aspectos metereológicos tais como precipitação, evaporação, regimes hidrológicos e estoques de água. O acionamento de cada gatilho é disparado tendo-se como base os volumes acumulados na barragem. Paralelamente as ações de redução na captação de água das barragens, a metodologia prevista pelo monitor de secas orienta a realização de ações de mitigação dos impactos e conflitos associados com as secas, como por exemplo, a busca por

alternativas de suprimento de água, investimentos em infraestrutura hídrica e combate a perdas de água entre outras intervenções.

Na Figura 34 é apresentado um fluxograma contendo um resumo das principais informações referentes ao modelo do Monitor de Secas no qual são destacados sete tópicos com as principais características do modelo de simulação proposto.

Figura 34 – Fluxograma com detalhes do modelo de simulação proposto.




Fonte: Autor, (2016)

### 4.1.3 Croquis e esquemas gráficos utilizados

Para subsidiar o conhecimento e a análise de cada sistema foi necessário elaborar os croquis esquemáticos para identificação das fontes existentes locais e integradas, assim como, as fontes previstas futuras para suprimento de água de cada cidade estudada. Dessa forma, para exemplificar, na Figura 35 é apresentado um dos croquis esquemáticos elaborados, especificamente, referente a cidade de Caruaru.

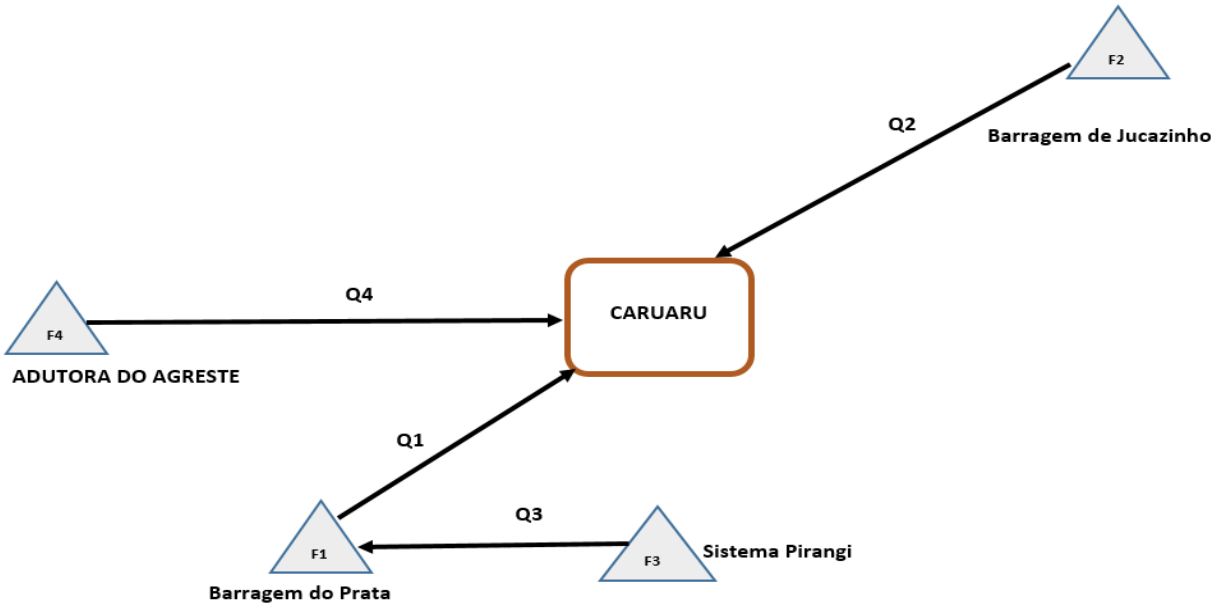
A elaboração dos croquis esquemáticos de todas as cidades estudadas facilitou a identificação das opções de suprimento existentes sejam elas barragens, captações a fio d'água ou poços. No caso da cidade de Caruaru são apresentadas os suprimentos de água existentes tais como a barragem do Prata, como fonte 1, localizada a aproximadamente 40 Km de distância da sede da cidade de Caruaru, a barragem de Jucazinho como fonte 2, com 70Km de distância, o sistema do Pirangi como fonte 3, concluída no primeiro trimestre de 2017

distante em média 67 Km e o sistema adutor do Agreste, com mais 1.000 Km de extensão como fonte futura prevista para atender a esta e outras cidades desta região.

No caso da cidade de Caruaru, não existem sistemas locais que atendam a demanda necessária à população, portanto se tornou imprescindivel, de forma gradativa se buscar alternativas de abastecimento em locais cada vez mais distantes. Esta situação mostra como as transposições de água são relevantes como solução principal para o suprimento d'água, para a maioria das cidades do Agreste que não possuem fontes locais que possam atender de forma plena as demandas hídricas existentes. No caso da cidade de Caruaru é necessária a vinda de água de locais distantes através de sistemas adutores com distâncias superiores a 35 Km, com captações nas cidades de Bonito e Surubim por meio das barragens do Prata e Jucazinho.

A barragem do Prata como também a de Jucazinho trata-se de um sistema integrado pois atende a várias cidades, mais precisamente um total de seis que são Caruaru, Agrestina, Altinho, Ibirajuba, Cachoeirinha e Santa Cruz do Capibaribe. Algumas destas cidades também possuem suprimento de água oriundo de mais de uma barragem ou manancial. Na Figura 35 tem-se um exemplo de croqui esquemático de um sistema integrado com as ofertas de água para a cidade de Caruaru

Figura 35 - Exemplo de croqui esquemático elaborado com ofertas de água para a cidade de Caruaru.

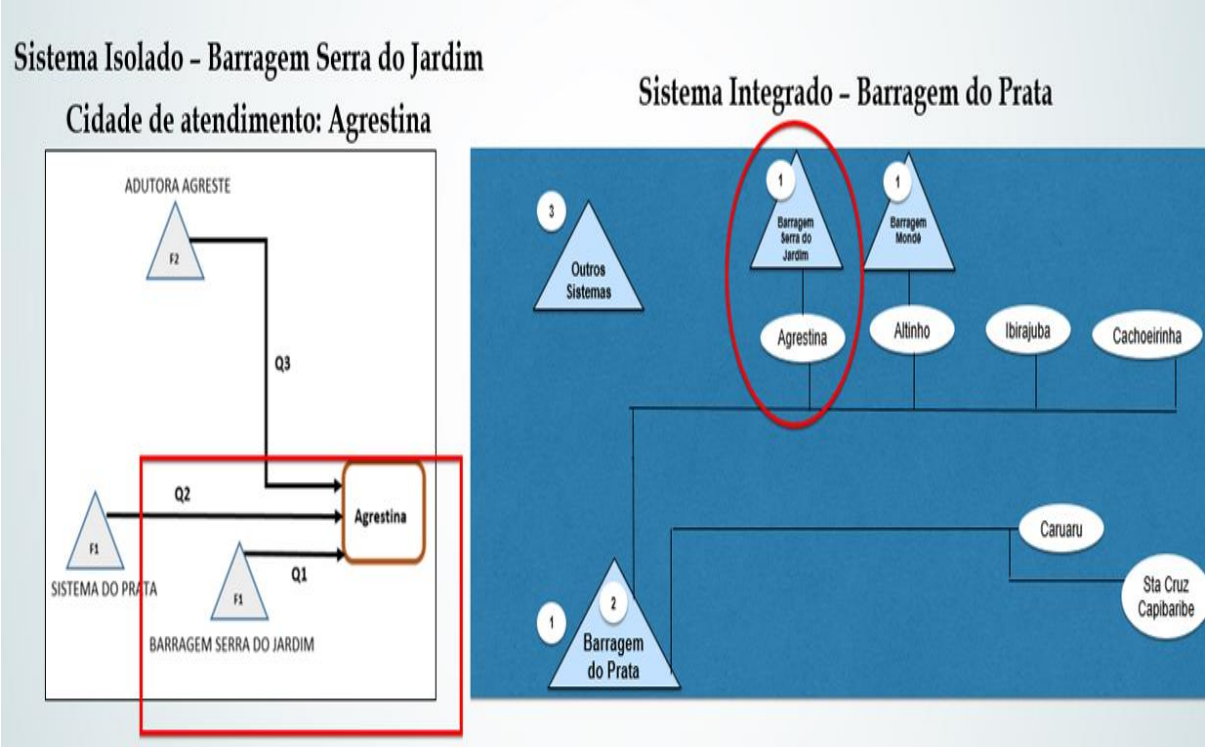



Fonte: Autor, (2016).

Na Figura 36, pode-se visualizar o sistema do tipo isolado, tal como a da barragem de Serra do Jardim, que é utilizada exclusivamente para suprir o abastecimento de água da cidade de Agrestina, entretanto como este manancial é de pequeno porte e só disponibilizar

uma média mensal de 10 l/s, faz-se necessária a captação de água para Agrestina a partir de outro manancial que neste caso é retirado da barragem do Prata.

Figura 36 - Exemplo de croqui esquemático de sistemas isolado e integrado.




Fonte: Autor, (2016).

### 4.1.4 Demandas das localidades a serem atendidas

Na Tabela 4 são apresentadas informações sobre as demandas das cidades que serão contempladas pelo sistema adutor do Agreste, foco deste estudo, para os anos de 2014 e 2037, onde foram considerados os consumos per capita, baseados em valores médios, utilizados no projeto da Transposição do rio São Francisco.

Esses valores foram obtidos do projeto, no qual havia a premissa de que as fontes de água locais não deveriam ser consideradas.

Tabela 4 - Relação das cidades que serão contempladas pelo sistema adutor do agreste e suas demandas para os anos de 2014 e 2037.

| Município | Demanda 2014 l/s | Demanda 2037 l/s | Município | Demanda 2014 l/s | Demanda 2037 l/s |
|---|---|---|---|---|---|
| Agrestina | 51,27 | 73,84 | Jucati | 53,81 | 77,49 |
| Águas Belas | 65,10 | 93,75 | Jupi | 8,27 | 11,91 |
| Alagoinha | 18,09 | 26,05 | Jurema | 19,63 | 28,27 |
| Altinho | 41,48 | 59,73 | Lagoa do Ouro | 17,03 | 24,52 |
| Angelim | 17,79 | 25,61 | Lagoa dos Gatos | 23,62 | 34,01 |
| Barra de Guabiraba | 31,60 | 45,50 | Lajedo | 101,81 | 146,61 |
| Belo Jardim | 168,64 | 242,84 | Machados | 21,30 | 30,68 |
| Bezerros | 120,74 | 173,87 | Palmeirina | 16,32 | 23,50 |
| Bom Conselho | 70,20 | 101,08 | Panelas | 28,76 | 41,42 |
| Bom Jardim | 59,17 | 85,21 | Paranatama | 6,96 | 10,02 |
| Bonito | 71,15 | 102,45 | Passira | 43,23 | 62,26 |
| Brejão | 10,00 | 14,40 | Pesqueira | 98,54 | 141,90 |
| Brejo da Madre de Deus | 35,33 | 50,87 | Poção | 19,99 | 28,78 |
| Cachoeirinha | 44,42 | 63,97 | Riacho das Almas | 23,50 | 33,84 |
| Caetés | 21,05 | 30,31 | Sairé | 22,62 | 32,57 |
| Calçado | 10,68 | 15,38 | Salgadinho | 10,03 | 14,44 |
| Camocim de São Félix | 37,59 | 54,13 | Saloá | 19,33 | 27,83 |
| Canhotinho | 33,50 | 48,25 | Sanharó | 50,47 | 72,67 |
| Capoeiras | 18,59 | 26,78 | Santa Cruz do Capibaribe | 192,57 | 277,30 |
| Caruaru | 821,66 | 1.183,20 | São Bento do Una | 68,91 | 99,24 |
| Casinhas | 5,08 | 7,32 | São Caitano | 69,09 | 99,49 |
| Correntes | 25,16 | 36,23 | São Joaquim do Monte | 36,05 | 51,91 |
| Cumaru | 20,50 | 29,52 | Surubim | 147,10 | 211,83 |
| Cupira | 59,38 | 85,51 | Tacaimbó | 22,32 | 32,14 |
| Frei Miguelinho | 18,05 | 25,99 | Taquaritinga do Norte | 25,04 | 36,06 |
| Garanhuns | 335,32 | 482,86 | Terezinha | 8,75 | 12,60 |
| Gravatá | 231,67 | 333,60 | Toritama | 101,75 | 146,52 |
| Ibirajuba | - | - | Tupanatinga | 27,03 | 38,93 |
| Itaíba | 10,21 | 14,70 | Venturosa | 25,62 | 36,90 |
| Jataúba | 34,91 | 50,27 | Vertente do Lério | 6,52 | 9,38 |
| João Alfredo | 13,10 | 18,87 | Vertentes | 34,39 | 49,52 |

Fonte: Projeto da Transposição do Rio São Francisco, (2014).

# 5 ANÁLISES E RESULTADOS OBTIDOS

## 5.1 Evolução dos reservatórios e da oferta de água para as cidades do Agreste no atual ciclo de seca

A partir da correlação do histórico das captações, retiradas e volumes armazenados das barragens do Agreste, no período de 2008 a 2016, com as simulações dos estados de seca pelo método do Monitor de Secas foi possível identificar além das entradas e saídas destes reservatórios, se ocorreu alguma restrição das captações, principalmente, nos intervalos onde ocorreu decréscimos significativos no volume acumulado.

Foram realizadas as simulações contemplando as barragens que suprem o abastecimento de água das cidades do Agreste, onde foram analisados os sistemas integrados e isolados. A seguir, serão apresentados os resultados dos principais sistemas do Agreste no qual serão descritos os resultados dos sistemas integrados do Prata e Jucazinho. As planilhas, referentes aos demais sistemas integrados e isolados, estão apresentadas no apêndice do final do presente trabalho e ao final deste capítulo são elencados os principais resultados identificados.

### 5.1.1 Barragem do Prata

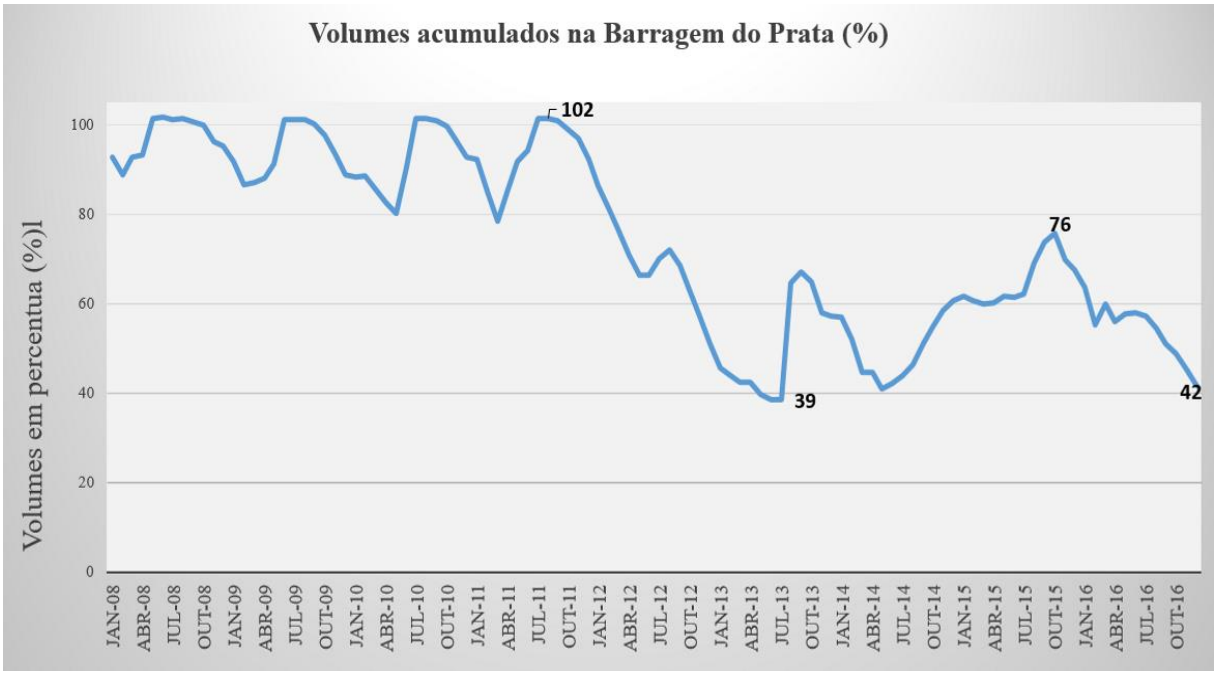
Na Figura 37, tem-se o gráfico, contendo o histórico dos volumes acumulados em percentual da barragem do Prata, pertencente à bacia hidrográfica do Rio Una, localizada na cidade de Bonito. Esta barragem é responsável pelo suprimento de água para um total de seis cidades do Agreste, tais como, Caruaru, Agrestina, Altinho, Ibirajuba, Cachoeirinha e Santa Cruz do Capibaribe.

Ainda na Figura 37, verifica-se que a partir de janeiro de 2016, a barragem do Prata passou a ter um volume acumulado inferior a 60% do total, e correlacionando-se a parâmetros coletados tais como volume no reservatório e o estado de seca no período, percebe-se nitidamente as consequências da estiagem prolongada na região, com 5 anos sem ocorrência de chuvas regulares. Dessa forma o reservatório, de forma gradativa, não conseguiu recuperar o volume perdido, com os usos múltiplos, sejam através das retiradas para abastecimento humano seja para outros fins.

Verifica-se no período de 2008 a 2016, apenas a partir do ano de 2013, que a barragem do Prata passou a ter percentuais de acumulação de água abaixo de 40%, sendo um dos poucos do Agreste que não entrou em colapso. Esta barragem manteve-se de 2008 a 2011

com volumes próximos a capacidade total e a partir do ano de 2012 identifica-se que esta barragem passou a ter quedas significativas até julho de 2013 e oscilações nos meses mais quentes dos anos subsequentes, normalmente entre outubro a fevereiro.

Figura 37 - Histórico dos volumes acumulados em % da Barragem do Prata, no período de 2008 a 2016.




Fonte: Autor, (2016).

As demandas das cidades atendidas pelo reservatório (barragem) do Prata, no ano de 2014, assim como as capacidades máximas de transporte são apresentadas na Tabela 5, a seguir.

A capacidade de transporte significa a quantidade máxima de água que pode ser transportada em um dado trecho de tubulação. Esta é uma limitação que não foi considerada no presente estudo. Buscou-se analisar o atendimento pleno das cidades sem considerar limitações de transporte através de suas adutoras ou problemas de subdimensionamento das redes distribuidoras existentes nas cidades.

Ressalta-se que estas limitações são importantes e devem ser observadas e sanadas para permitir que as águas armazenadas nas barragens e transportadas pelos sistemas adutores possam de forma efetiva suprir plenamente o abastecimento das cidades estudadas.

Tabela 5 – Demandas e capacidade de transporte - Barragem do Prata.

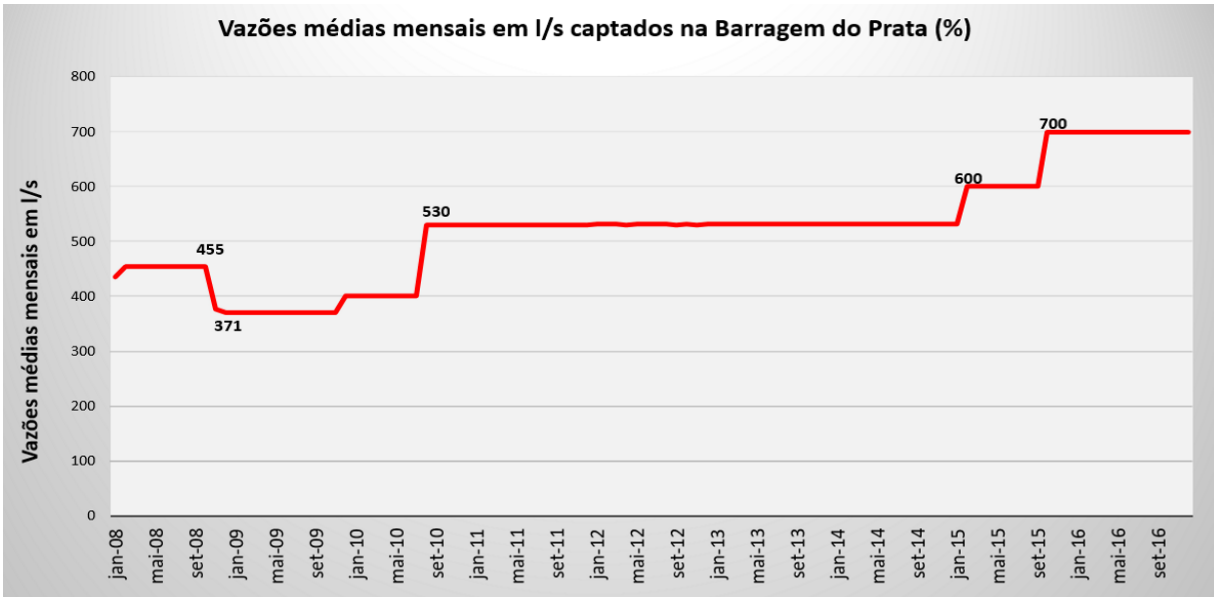
| DEMANDAS DAS CIDADES l/s 2014 | Agrestina | Altinho | Ibirajuba | Cachoeirinha | Sta. Cruz do Capibaribe | Caruaru |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 51,27 | 59,73 | 10,25 | 44,42 | 192,57 | 1200 |
| Capacidade de transporte l/s | 40 | 30 | 7 | 40 | 120 | 600 |

Fonte: Autor, (2016).

As vazões médias mensais captadas da Barragem do Prata, podem ser observadas na Figura 38, no período de 2008 a 2016, onde em 2008 ocorreram captações máximas de até 455l/s, entretanto, a partir de julho de 2010 até janeiro de 2015, houve um aumento na retirada de água deste reservatório o qual passou a ser em torno de 530 l/s, a partir de fevereiro de 2015 até o mês de setembro deste mesmo ano, passou a ser de 600 l/s e de outubro a novembro de 2016, a captação retirada, chegou ao seu máximo em torno de 700 l/s.

Percebe-se pelos dados apresentados, ainda na Figura 38, que não havia critérios operacionais padronizados para a realização das captações na barragem do Prata. Este fato pode gerar problemas no qual destacamos riscos de colapso da barragem, como pode ser identificado em várias situações no Agreste de Pernambuco.

Figura 38 - Vazões médias mensais da Barragem do Prata, no período de 2008 a 2016.




Fonte: Autor, (2016).

Nas Figuras 39 a 42 pode-se verificar gráficos contendo informações mensais do volume, percentual da barragem, vazões de captação, volumes retirados, volumes metas e a situação atual quanto aos cenários relativos a situação da seca, podendo estar normal, alerta, seca, seca severa e seca extrema. Foi utilizada a mesma metodologia de cálculo das ferramentas do Monitor de Secas.

Figura 39 – Planilha utilizada para realizar as simulações, no caso da barragem do Prata, no ano de 2008.

CENÁRIO REAL - HISTÓRICO DA BARRAGEM DO PRATA

| DATA | Volumes (m³) Históricos | Incremento (Recarga mensal) | Volume final (m³) com todas as demandas sem redutor | Volume final com redutor | % | Captação (l/s) | CAPTAÇÃO com redutor | Volume Retirado mensal (m³) Histórico | Volumes Metas - Monitor Secas | | | | | Monitor aplicado ao histórico | Monitor aplicado à simulação |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | Mês | Meta1 | Meta2 | Meta3 | Meta4 | | |
| jan-08 | 39.075.549 | 0 | 37.479.150 | 37.479.150 | 93 | 435 | 2.004.086 | 1.165.104 | 1 | 18,57 | 16,14 | 13,70 | 11,28 | Normal | Normal |
| fev-08 | 37.479.150 | -431.295 | 39.137.885 | 35.237.713 | 89 | 455 | 1.810.142 | 1.100.736 | 2 | 17,65 | 15,23 | 12,82 | 10,41 | Normal | Normal |
| mar-08 | 39.137.885 | 2.759.471 | 39.325.311 | 35.993.098 | 93 | 455 | 2.004.086 | 1.218.672 | 3 | 16,76 | 14,35 | 11,95 | 9,56 | Normal | Normal |
| abr-08 | 39.325.311 | 1.406.098 | 42.145.115 | 35.459.758 | 93 | 455 | 1.939.438 | 1.179.360 | 4 | 15,86 | 13,47 | 11,09 | 8,71 | Normal | Normal |
| mai-08 | 42.807.684 | 4.661.733 | 42.145.115 | 38.117.405 | 102 | 455 | 2.004.086 | 1.218.672 | 5 | 14,99 | 12,62 | 10,25 | 7,89 | Normal | Normal |
| jun-08 | 42.940.666 | 1.351.654 | 42.145.115 | 37.529.621 | 102 | 455 | 1.939.438 | 1.179.360 | 6 | 16,39 | 13,87 | 11,34 | 8,81 | Normal | Normal |
| jul-08 | 42.674.991 | 913.685 | 42.145.115 | 36.439.220 | 101 | 455 | 2.004.086 | 1.218.672 | 7 | 20,06 | 17,54 | 15,03 | 12,51 | Normal | Normal |
| ago-08 | 42.807.684 | 1.351.365 | 42.145.115 | 35.851.147 | 102 | 455 | 1.939.438 | 1.179.360 | 8 | 21,66 | 19,15 | 16,64 | 14,14 | Normal | Normal |
| set-08 | 42.410.472 | 782.148 | 42.145.115 | 34.629.209 | 101 | 455 | 2.004.086 | 1.218.672 | 9 | 21,79 | 19,29 | 16,79 | 14,30 | Normal | Normal |
| out-08 | 42.147.105 | 955.305 | 40.590.945 | 33.645.076 | 100 | 455 | 1.939.438 | 1.179.360 | 10 | 21,27 | 18,79 | 16,30 | 13,82 | Normal | Normal |
| nov-08 | 40.590.945 | -376.800 | 40.208.299 | 31.264.190 | 96 | 376 | 2.004.086 | 1.007.078 | 11 | 20,43 | 17,96 | 15,49 | 13,03 | Normal | Normal |
| dez-08 | 40.208.299 | 624.432 | 38.702.997 | 29.949.184 | 95 | 371 | 1.939.438 | 961.632 | 12 | 19,50 | 17,05 | 14,60 | 12,15 | Normal | Normal |

Fonte: Autor, (2016).

Por meio dos dados obtidos, a partir da planilha apresentada na Figura 39, verifica-se que em 2008 a barragem do Prata se manteve com percentuais elevados de acumulação acima de 82% do volume total e, portanto, após a simulação realizada, foi identificado que o estado de seca é considerado normal, tanto quando se analisa os volumes históricos, como também ao utilizar os volumes aplicados ao monitor. Foi identificado que com o uso das regras do monitor as captações neste período poderiam ser superiores aos volumes mensais históricos retirados, o que pode ser explicado pelo fato do reservatório se encontrar em alguns meses, neste período, com volumes superiores à sua capacidade total, ou seja, vertendo.

Na Figura 40, verifica-se que em 2013, considerado o 2ª ano de estiagem, neste intervalo, principalmente nos meses de janeiro a julho, a barragem do Prata já demonstrava reflexos da ausência de chuvas, com percentuais abaixo de 50%. Entretanto, a partir do mês de agosto, houve a ocorrência de chuvas locais as quais permitiu um incremento no volume, havendo uma recuperação, no qual a partir do mês de agosto os percentuais passaram de 39% (mês de julho) para 60%.

Dessa forma a simulação já apresenta situações que demandam uma maior preocupação por parte dos gestores públicos com sinalizadores de estados de seca com estágios de alertas, seca, seca severa e seca extrema.

Figura 40 - Planilha utilizada para realizar as simulações, no caso da barragem do Prata, no ano de 2013.

CENÁRIO REAL - HISTÓRICO DA BARRAGEM DO PRATA

| DATA | Volumes (m³) Históricos | Incremento (Recarga mensal) | Volume final (m³) com todas as demandas sem redutor | Volume final com redutor | % | Captação (l/s) | CAPTAÇÃO com redutor | Volume Retirado mensal (m³) Histórico | Volumes Metas - Monitor Secas | | | | | Monitor aplicado ao histórico | Monitor aplicado à simulação |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | Mês | Meta1 | Meta2 | Meta3 | Meta4 | | |
| jan-13 | 19.260.817 | -912.843 | 18.504.415 | 384.785 | 46 | 531 | 788.167 | 1.422.230 | 1 | 17,654 | 15,233 | 12,817 | 10,408 | Normal | Seca Extrema |
| fev-13 | 18.504.415 | 665.829 | 17.914.798 | 338.720 | 44 | 531 | 711.893 | 1.284.595 | 2 | 16,758 | 14,352 | 11,952 | 9,5599 | Normal | Seca Extrema |
| mar-13 | 17.914.798 | 694.979 | 17.924.849 | 138.395 | 43 | 531 | 895.303 | 1.422.230 | 3 | 15,861 | 13,47 | 11,087 | 8,713 | Normal | Seca Extrema |
| abr-13 | 17.924.849 | 1.432.281 | 16.782.071 | 704.254 | 43 | 531 | 866.423 | 1.376.352 | 4 | 14,992 | 12,615 | 10,247 | 7,8887 | Normal | Seca Extrema |
| mai-13 | 16.782.071 | 233.574 | 16.235.312 | 42.524 | 40 | 531 | 895.303 | 1.422.230 | 5 | 16,393 | 13,865 | 11,337 | 8,8094 | Normal | Seca Extrema |
| jun-13 | 16.235.312 | 875.472 | 16.235.312 | 51.573 | 39 | 531 | 866.423 | 1.376.352 | 6 | 20,062 | 17,544 | 15,027 | 12,51 | Normal | Seca Extrema |
| jul-13 | 16.235.312 | 1.376.352 | 27.266.439 | 532.622 | 39 | 531 | 895.303 | 1.422.230 | 7 | 21,657 | 19,149 | 16,642 | 14,137 | Seca | Seca Extrema |
| ago-13 | 27.266.439 | 12.453.357 | 28.345.911 | 12.119.557 | 65 | 531 | 866.423 | 1.376.352 | 8 | 21,787 | 19,29 | 16,795 | 14,302 | Seca Severa | Seca Extrema |
| set-13 | 28.345.911 | 2.455.824 | 27.411.912 | 13.680.077 | 67 | 531 | 895.303 | 1.422.230 | 9 | 21,27 | 18,786 | 16,304 | 13,825 | Normal | Seca Extrema |
| out-13 | 27.411.912 | 488.231 | 24.424.540 | 13.301.885 | 65 | 531 | 866.423 | 1.376.352 | 10 | 20,427 | 17,958 | 15,492 | 13,029 | Normal | Seca Severa |
| nov-13 | 24.424.540 | -1.611.020 | 24.112.328 | 10.124.085 | 58 | 531 | 1.566.781 | 1.422.230 | 11 | 19,502 | 17,048 | 14,598 | 12,153 | Normal | Seca Extrema |
| dez-13 | 24.112.328 | 1.110.018 | 24.067.956 | 10.367.680 | 57 | 531 | 866.423 | 1.376.352 | 12 | 18,573 | 16,135 | 13,703 | 11,276 | Normal | Seca Extrema |

Fonte: Autor, (2016).

Na Figura 41, tem-se os dados de 2014, onde apenas durantes os meses de julho a setembro a simulação apresentou situações de alerta e seca, considerando os dados históricos. Neste período os percentuais de volume acumulado variaram de 41% a 61% da capacidade total de acumulação. Os volumes mensais captados se mantiveram estáveis em torno de 1.400.000 m³ durante os 12 meses de 2014. Ainda, em 2014, verificou-se que houve recarga, ou seja, incremento de água, na barragem do Prata, praticamente durante todo este ano, com exceção dos meses de fevereiro, março e maio.

Figura 41 - Planilha utilizada para realizar as simulações, no caso da barragem do Prata, no ano de 2014.

CENÁRIO REAL - HISTÓRICO DA BARRAGEM DO PRATA

| DATA | Volumes (m³) Históricos | Incremento (Recarga mensal) | Volume final (m³) com todas as demandas sem redutor | Volume final com redutor | % | Captação (l/s) | CAPTAÇÃO com redutor | Volume Retirado mensal (m³) Histórico | Volumes Metas - Monitor Secas | | | | | Monitor aplicado ao histórico | Monitor aplicado à simulação |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | Mês | Meta1 | Meta2 | Meta3 | Meta4 | | |
| jan-14 | 24.067.956 | 1.331.980 | 21.921.555 | 10.804.357 | 57 | 531 | 895.303 | 1.422.230 | 1 | 17,654 | 15,233 | 12,817 | 10,408 | Normal | Seca Severa |
| fev-14 | 21.921.555 | -724.170 | 18.884.170 | 8.665.029 | 52 | 531 | 1.415.157 | 1.284.595 | 2 | 16,758 | 14,352 | 11,952 | 9,5599 | Normal | Seca Extrema |
| mar-14 | 18.884.170 | -1.752.790 | 18.884.170 | 6.016.936 | 45 | 531 | 895.303 | 1.422.230 | 3 | 15,861 | 13,47 | 11,087 | 8,713 | Normal | Seca Extrema |
| abr-14 | 18.884.170 | 1.422.230 | 17.252.985 | 6.572.744 | 45 | 531 | 866.423 | 1.376.352 | 4 | 14,992 | 12,615 | 10,247 | 7,8887 | Normal | Seca Extrema |
| mai-14 | 17.252.985 | -254.833 | 17.857.079 | 5.422.607 | 41 | 531 | 895.303 | 1.422.230 | 5 | 16,393 | 13,865 | 11,337 | 8,8094 | Normal | Seca Extrema |
| jun-14 | 17.857.079 | 2.026.324 | 18.512.720 | 6.582.509 | 42 | 531 | 866.423 | 1.376.352 | 6 | 20,062 | 17,544 | 15,027 | 12,51 | Normal | Seca Extrema |
| jul-14 | 18.512.720 | 2.031.994 | 19.604.278 | 7.719.199 | 44 | 531 | 895.303 | 1.422.230 | 7 | 21,657 | 19,149 | 16,642 | 14,137 | Alerta | Seca Extrema |
| ago-14 | 19.604.278 | 2.513.788 | 21.509.004 | 9.366.565 | 47 | 531 | 866.423 | 1.376.352 | 8 | 21,787 | 19,29 | 16,795 | 14,302 | Seca | Seca Extrema |
| set-14 | 21.509.004 | 3.281.078 | 23.122.119 | 11.752.340 | 51 | 531 | 895.303 | 1.422.230 | 9 | 21,27 | 18,786 | 16,304 | 13,825 | Alerta | Seca Extrema |
| out-14 | 23.122.119 | 3.035.345 | 24.660.971 | 13.921.262 | 55 | 531 | 866.423 | 1.376.352 | 10 | 20,427 | 17,958 | 15,492 | 13,029 | Normal | Seca Severa |
| nov-14 | 24.660.971 | 2.915.204 | 25.638.789 | 15.269.685 | 59 | 531 | 1.566.781 | 1.422.230 | 11 | 19,502 | 17,048 | 14,598 | 12,153 | Normal | Seca |
| dez-14 | 25.638.789 | 2.400.049 | 25.987.654 | 15.936.888 | 61 | 531 | 1.732.845 | 1.376.352 | 12 | 18,573 | 16,135 | 13,703 | 11,276 | Normal | Seca |

Fonte: Autor, (2016).

Em 2016, conforme mostrado na Figura 42, durante apenas os meses de julho a agosto, a simulação apresentou situações de alerta e seca e no período de outubro a dezembro a barragem do Prata obteve uma recuperação do seu volume, em virtude da ocorrência de chuvas pontuais na área do reservatório.

Figura 42 - Planilha utilizada para realizar as simulações, no caso da barragem do Prata, no ano de 2014.

CENÁRIO REAL - HISTÓRICO DA BARRAGEM DO PRATA

| DATA | Volumes (m³) Históricos | Incremento (Recarga mensal) | Volume final (m³) com todas as demandas sem redutor | Volume final com redutor | % | Captação (l/s) | CAPTAÇÃO com redutor | Volume Retirado mensal (m³) Histórico | Volumes Metas - Monitor Secas | | | | | Monitor aplicado ao histórico | Monitor aplicado à simulação |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | Mês | Meta1 | Meta2 | Meta3 | Meta4 | | |
| jan-16 | 26.881.162 | 200.164 | 23.279.020 | 14.032.185 | 64 | 700 | 2.241.799 | 1.874.880 | 1 | 17,654 | 15,233 | 12,817 | 10,408 | Normal | Seca |
| fev-16 | 23.279.020 | -1.727.262 | 25.286.259 | 9.796.232 | 55 | 700 | 2.508.691 | 1.693.440 | 2 | 16,758 | 14,352 | 11,952 | 9,5599 | Normal | Seca Severa |
| mar-16 | 25.286.259 | 3.700.680 | 23.627.381 | 11.066.617 | 60 | 700 | 2.430.294 | 1.874.880 | 3 | 15,861 | 13,47 | 11,087 | 8,713 | Normal | Seca Severa |
| abr-16 | 23.627.381 | 216.002 | 24.379.766 | 8.930.721 | 56 | 700 | 2.351.898 | 1.814.400 | 4 | 14,992 | 12,615 | 10,247 | 7,8887 | Normal | Seca Severa |
| mai-16 | 24.379.766 | 2.566.785 | 24.514.262 | 9.067.211 | 58 | 700 | 2.430.294 | 1.874.880 | 5 | 16,393 | 13,865 | 11,337 | 8,8094 | Normal | Seca Severa |
| jun-16 | 24.514.262 | 2.009.376 | 24.201.243 | 8.271.090 | 58 | 700 | 2.805.498 | 1.814.400 | 6 | 20,062 | 17,544 | 15,027 | 12,51 | Normal | Seca Extrema |
| jul-16 | 24.201.243 | 1.501.381 | 22.977.174 | 8.115.891 | 57 | 700 | 1.656.580 | 1.874.880 | 7 | 21,657 | 19,149 | 16,642 | 14,137 | Normal | Seca Extrema |
| ago-16 | 22.977.174 | 650.811 | 21.514.263 | 7.163.560 | 55 | 700 | 1.603.142 | 1.814.400 | 8 | 21,787 | 19,29 | 16,795 | 14,302 | Normal | Seca Extrema |
| set-16 | 21.514.263 | 351.489 | 20.655.444 | 5.858.470 | 51 | 700 | 1.656.580 | 1.874.880 | 9 | 21,27 | 18,786 | 16,304 | 13,825 | Normal | Seca Extrema |
| out-16 | 20.655.444 | 1.016.061 | 19.147.274 | 5.271.389 | 49 | 700 | 1.603.142 | 1.814.400 | 10 | 20,427 | 17,958 | 15,492 | 13,029 | Alerta | Seca Extrema |
| nov-16 | 19.147.274 | 306.230 | 17.639.105 | 3.921.040 | 45 | 700 | 1.656.580 | 1.874.880 | 11 | 19,502 | 17,048 | 14,598 | 12,153 | Alerta | Seca Extrema |
| dez-16 | 17.639.105 | 366.710 | 15.824.705 | 2.684.609 | 42 | 700 | 1.603.142 | 1.814.400 | 12 | 18,576 | 16,138 | 13,704 | 11,276 | Seca | Seca Extrema |

Fonte: Autor, (2016).

### 5.1.2 Barragem de Jucazinho

A barragem de Jucazinho possui a maior reservação do Agreste, com capacidade total de 327 milhões de metros cúbicos sendo responsável pelo suprimento de água de quinze localidades que são Caruaru, Bezerros, Gravatá, Toritama, Santa Cruz do Capibaribe, Cumaru, Ameixas, Passira, Riacho das Almas, Salgadinho, Vertentes, Vertente do Lério, Surubim, Santa Maria do Cambucá e Frei Miguelinho.

Na Tabela 6 tem-se as vazões médias fornecidas pela barragem de Jucazinho para cada uma das cidades beneficiadas por este reservatório (barragem). As vazões disponibilizadas pela barragem de Jucazinho não suprem de forma plena as necessidades destas populações, sendo necessária a busca de outras alternativas de suprimento. Cidades como Bezerros e Gravatá possuem outras fontes locais para abastecimento, entretanto outras tais como Cumaru e Passira, têm Jucazinho como fonte única de suprimento de água.

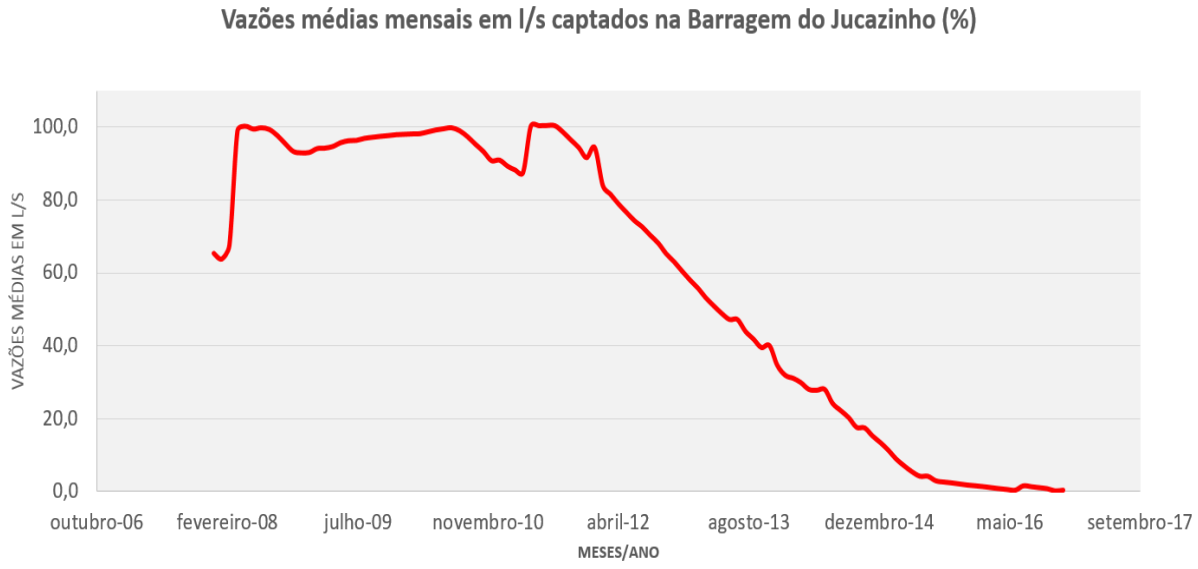
Tabela 6 - Vazões médias disponibilizadas pela barragem de Jucazinho.

| Cidade | Vazão (l/s) |
|---|---|
| Caruaru | 700 |
| Surubim | 120 |
| Vertentes | 20 |
| Vertente do Lério | 5 |
| Santa M. do Cambucá | 5 |
| Salgadinho | 5 |
| Toritama | 50 |
| Santa C. do Capibaribe | 100 |
| Cumaru | 60 |
| Passira | 40 |
| Riacho das Almas | 30 |
| Bezerros | 30 |
| Gravatá | 60 |
| Ameixas | 5 |
| Frei Miguelinho | 15 |
| TOTAL | 1245 |

Fonte: Autor, 2016.

Já na Figura 43 tem-se os volumes máximos acumulados na barragem de Jucazinho, no período de 2008 a 2016. Verifica-se no gráfico que desde o ano de 2011 os volumes armazenados, ano a ano, foram gradativamente reduzidos até chegar ao colapso em 2016, em virtude sobretudo da ausência de chuvas e forte estiagem nesta região nos últimos 6 anos.

Figura 43 – Vazões médias mensais em l/s captados na barragem de Jucazinho, no período de 2008 a 2016.

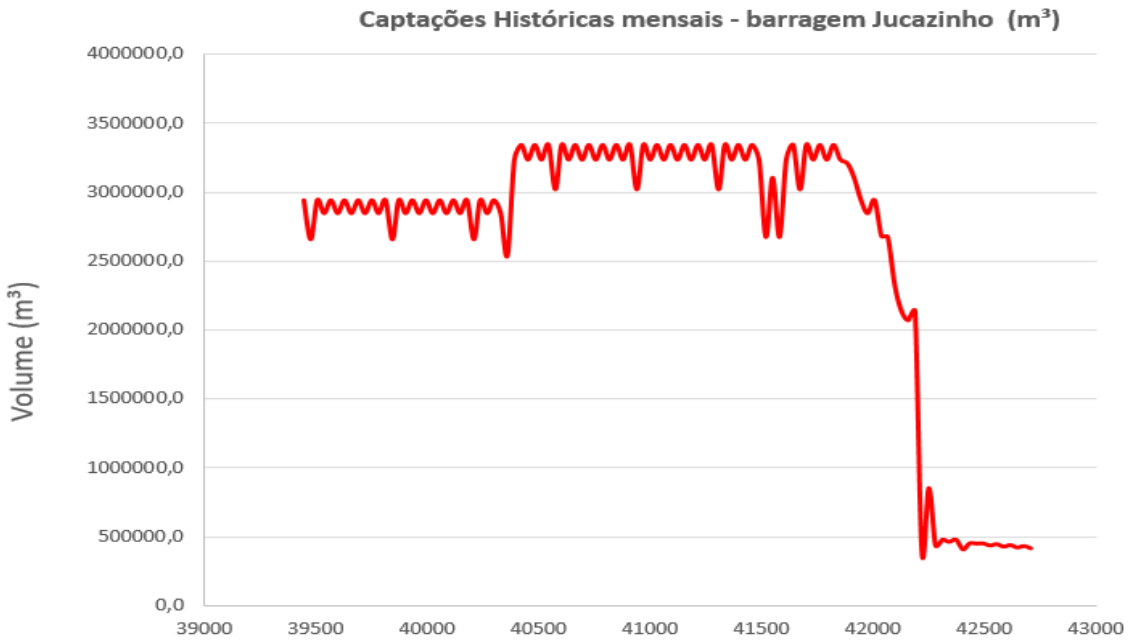



Fonte: Autor, (2016).

Na Figura 44 tem-se apresentado o comportamento das vazões captadas em Jucazinho, com suprimento de água para abastecimento humano, também no período de 2008

a 2016. Com os dados apresentados, verifica-se que a partir do ano de 2015, as vazões captadas na barragem de Jucazinho foram reduzidas de forma significativa, passando de uma média de 900 l/s para menos de 200 l/s, vazões insuficientes para o atendimento pleno da população de 15 localidades do Agreste.

Figura 44 - Volumes captados na barragem de Jucazinho no período de 2008 a 2016.




Fonte: Autor, 2016.

Em 2008, verifica-se que a barragem de Jucazinho estava numa situação com volumes superiores a 60% da sua capacidade máxima de reservação e dessa forma, os dados analisados, mostram que a situação do manancial se encontrava de acordo com os critérios estabelecidos pelo monitor de secas, na situação normal. Em 2016, os dados apresentados na Figura 45, mostram um cenário completamente diferente, daquele existente em 2008, onde verifica-se percentuais da barragem praticamente na situação de colapso total.

Na Figura 45 encontram-se apresentados os dados principais utilizados na simulação da barragem de Jucazinho no período de 2008 a 2016.

Figura 45 - Planilha utilizada para análise do comportamento da barragem em 2008.

CENÁRIO REAL - HISTÓRICO DA BARRAGEM DE JUCAZINHO

| DATA | VOLUME (m³) Histórico | Incremento (Recarga mensal) | Volume final (m³) com todas as demandas sem redutor | Volume final com redutor | % | CAPTAÇÃO | CAPTAÇÃO com redutor | Volume Histórico Retirado mensal (m³) | Volumes Metas | | | | | Monitor aplicado ao histórico | Monitor aplicado a simulação |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | Mês | Meta1 | Meta2 | Meta3 | Meta4 | | |
| jan-08 | 213.837.533 | | 208.798.306 | 208.798.306 | 65 | 1.100 | 3.737.332 | **2.946.240** | 1 | 145 | 126 | 107 | 88 | Normal | Normal |
| fev-08 | 208.798.306 | -2.092.986 | 221.155.887 | 203.329.665 | 64 | 1.100 | **3.375.655** | **2.661.120** | 2 | 137 | 119 | 100 | 81 | Normal | Normal |
| mar-08 | 221.155.887 | 15.018.700 | 323.692.550 | 214.611.033 | 68 | 1.100 | **3.737.332** | **2.946.240** | 3 | 130 | 112 | 93 | 74 | Normal | Normal |
| abr-08 | 323.692.550 | 105.482.903 | 327.000.000 | 316.477.164 | 99 | 1.100 | **3.616.773** | **2.851.200** | 4 | 123 | 105 | 86 | 68 | Normal | Normal |
| mai-08 | 327.713.264 | 6.871.914 | 325.196.486 | 319.611.745 | 100 | 1.100 | **3.737.332** | **2.946.240** | 5 | 117 | 98 | 80 | 61 | Normal | Normal |
| jun-08 | 325.196.486 | 429.463 | 326.369.392 | 316.424.435 | 99 | 1.100 | **3.616.773** | **2.851.200** | 6 | 128 | 108 | 88 | 69 | Normal | Normal |
| jul-08 | 326.369.392 | 4.024.105 | 324.861.881 | 316.711.208 | 100 | 1.100 | **3.737.332** | **2.946.240** | 7 | 156 | 137 | 117 | 97 | Normal | Normal |
| ago-08 | 324.861.881 | 1.438.730 | 319.373.601 | 314.533.164 | 99 | 1.100 | **3.616.773** | **2.851.200** | 8 | 169 | 149 | 130 | 110 | Normal | Normal |
| set-08 | 319.373.601 | -2.637.080 | 312.151.409 | 308.158.752 | 98 | 1.100 | **3.737.332** | **2.946.240** | 9 | 170 | 150 | 131 | 111 | Normal | Normal |
| out-08 | 312.151.409 | -4.275.952 | 305.198.130 | 300.266.027 | 95 | 1.100 | **3.616.773** | **2.851.200** | 10 | 166 | 146 | 127 | 108 | Normal | Normal |
| nov-08 | 305.198.130 | -4.102.079 | 303.915.863 | 292.426.615 | 93 | 1.100 | **3.737.332** | **2.946.240** | 11 | 159 | 140 | 121 | 101 | Normal | Normal |
| dez-08 | 303.915.863 | 1.663.973 | 304.236.097 | 290.473.816 | 93 | 1.100 | **3.616.773** | **2.851.200** | 12 | 152 | 133 | 114 | 95 | Normal | Normal |

Fonte: Autor, (2016).

O reservatório (barragem) de Jucazinho se tornou um piloto do monitor de secas em Pernambuco em 2014. Entretanto, a aplicação do monitor iniciou apenas em 2014 quando o período de secas já estava instalado, entretanto os resultados práticos obtidos é que foi possível postergar o colapso da barragem de Jucazinho por um período de 1 ano. Este caso isolado mostrou a importância da aplicação do modelo para todas as outras barragens do Agreste de Pernambuco.

Figura 46 - Planilha utilizada para análise do comportamento da barragem no ano de 2016.

CENÁRIO REAL - HISTÓRICO DA BARRAGEM DE JUCAZINHO

| DATA | VOLUME (m³) Histórico | Incremento (Recarga mensal) | Volume final (m³) com todas as demandas sem redutor | Volume final com redutor | % | CAPTAÇÃO | CAPTAÇÃO com redutor | Volume Histórico Retirado mensal (m³) | Volumes Metas | | | | | Monitor aplicado ao histórico | Monitor aplicado a simulação |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| | | | | | | | | | Mês | Meta1 | Meta2 | Meta3 | Meta4 | | |
| jan-16 | 5.491.763 | -250.632 | 4.739.285 | | 2 | 180 | **0** | **482.112** | 2 | 137 | 119 | 100 | 81 | Seca Extrema | Colapso |
| fev-16 | 4.739.285 | -270.366 | 3.846.059 | | 1 | 170 | **0** | **411.264** | 3 | 130 | 112 | 93 | 74 | Seca Extrema | Colapso |
| mar-16 | 3.846.059 | -481.962 | 2.968.135 | | 1 | 170 | **0** | **455.328** | 4 | 123 | 105 | 86 | 68 | Seca Extrema | Colapso |
| abr-16 | 2.968.135 | -422.596 | 2.221.540 | | 1 | 175 | **0** | **453.600** | 5 | 117 | 98 | 80 | 61 | Seca Extrema | Colapso |
| mai-16 | 2.221.540 | -292.995 | 1.607.075 | | 1 | 170 | **0** | **455.328** | 6 | 128 | 108 | 88 | 69 | Seca Extrema | Colapso |
| jun-16 | 1.607.075 | -159.137 | 5.491.763 | | 0 | 170 | **0** | **440.640** | 7 | 156 | 137 | 117 | 97 | Seca Extrema | Colapso |
| jul-16 | 5.491.763 | 4.325.328 | 4.739.285 | 4.325.328 | 2 | 168 | **0** | **449.971** | 8 | 169 | 149 | 130 | 110 | Seca Extrema | Seca Extrema |
| ago-16 | 4.739.285 | -302.506 | 3.846.059 | 2.775.769 | 1 | 167 | **1.247.053** | **432.123** | 9 | 170 | 150 | 131 | 111 | Seca Extrema | Seca Extrema |
| set-16 | 3.846.059 | -461.103 | 1.562.725 | 1.055.078 | 1 | 165 | **1.259.587** | **443.084** | 10 | 166 | 146 | 127 | 108 | Seca Extrema | Seca Extrema |
| out-16 | 1.562.725 | -1.840.250 | 976.532 | | 1 | 164 | **1.218.955** | **425.458** | 11 | 159 | 140 | 121 | 101 | Seca Extrema | Colapso |
| nov-16 | 976.532 | -160.734 | 1.607.075 | | 0 | 163 | **0** | **436.197** | 12 | 152 | 133 | 114 | 95 | Seca Extrema | Colapso |
| dez-16 | 1.607.075 | 1.066.739 | 1.188.282 | 1.066.739 | 0 | 162 | **0** | **418.793** | 1 | 145 | 126 | 107 | 88 | Seca Extrema | Seca Extrema |

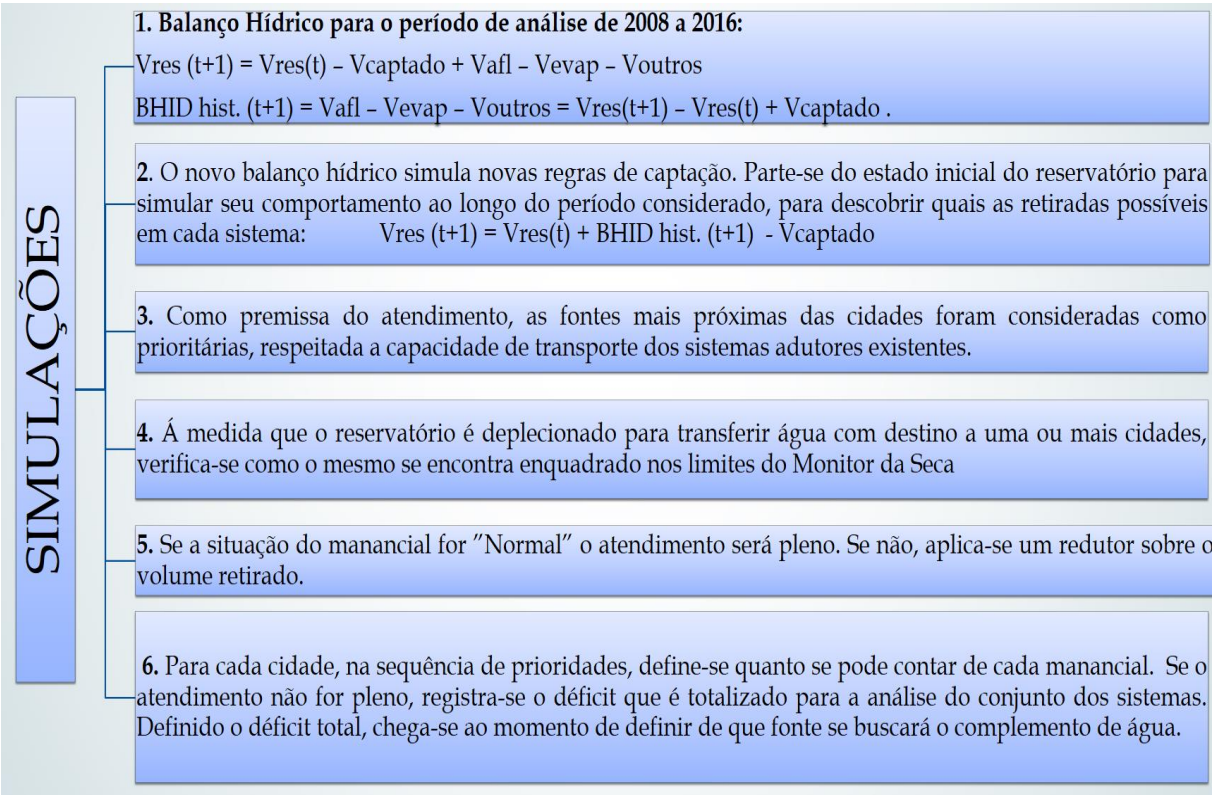
Fonte: Autor, 2016.

## 5.2 Aplicação do conceito do Monitor da Seca para o balanço hídrico nos reservatórios e determinação das demandas não atendidas

Para o alcance do objetivo geral do presente estudo foram realizados balanços hídricos para cada sistema, tanto os sistemas isolados, como os sistemas integrados, a exemplo destacam-se os sistemas do Prata e Jucazinho, contendo dados referentes aos volumes iniciais e finais de cada manancial e considerando as retiradas mensais para cada localidade e incrementos mensais existentes (recarga).

Na Figura 47 tem os procedimentos utilizados para a realização das simulações prospecção do atendimento pleno das cidades que compõem o Agreste de Pernambuco.

Figura 47 – Resumo dos procedimentos utilizados para a realização das simulações – Monitor de Secas.




Fonte: Autor, 2016.

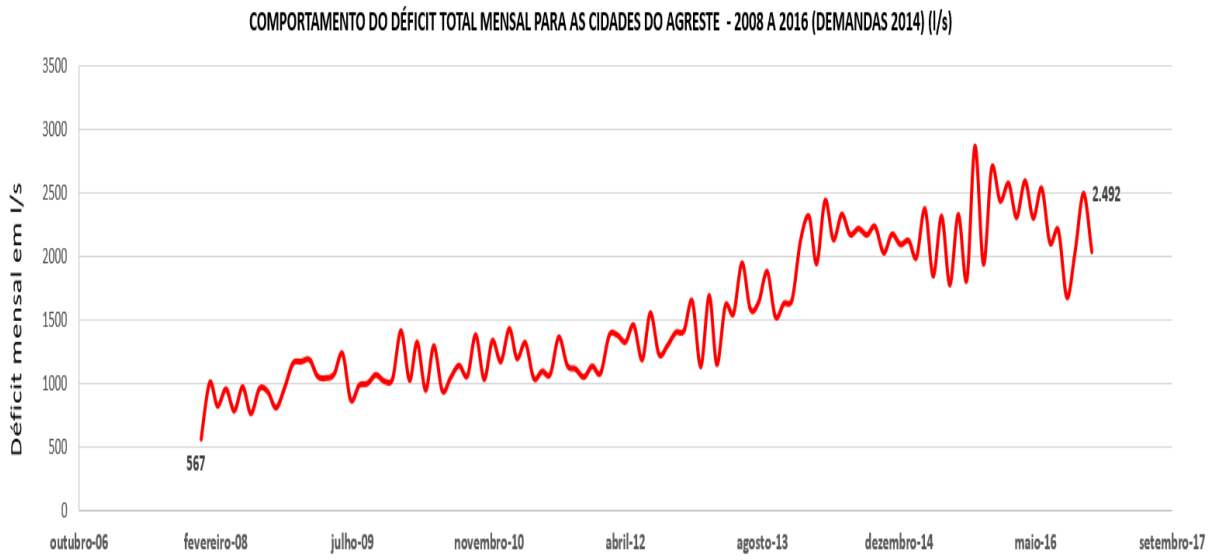
Após a realização das simulações foi possível quantificar o aporte de água necessário para as cidades do Agreste de Pernambuco com base nos diversos cenários de seca. Foram utilizadas duas situações, inicialmente foram consideradas as demandas de água para o ano de 2014 e depois considerando uma projeção para 2037. Foram escolhidos e utilizados os anos

de 2014 e 2037 tendo-se como base os dados utilizados no projeto da transposição do rio São Francisco.

Na Figura 48 o gráfico com os resultados dos déficits de água das cidades do Agreste no período de 2008 a 2016 é apresentado. Onde foi possível quantificar em litros por segundo as deficiências existentes para abastecimento pleno. Considerando as demandas de água em 2014 e analisando-se o período de 2008 a 2016 foi verificado que o déficit mínimo requerido foi de 567 l/s e o máximo de 2.861 l/s.

Os resultados obtidos sinalizam que os déficits passaram de uma média de 567 l/s em 2008 para 1.000 l/s em 2009, 1250 l/s em 2010, acima de 1.500 l/s em 2012, acima de 2.000 l/s em 2013 chegando ao ápice em 2015 com valores próximos a 2.861 l/s. Estes resultados servem de subsídio para reforçar a necessidade urgente de sistemas alternativos para possibilitar minimizar os problemas de desabastecimento nas cidades do Agreste.

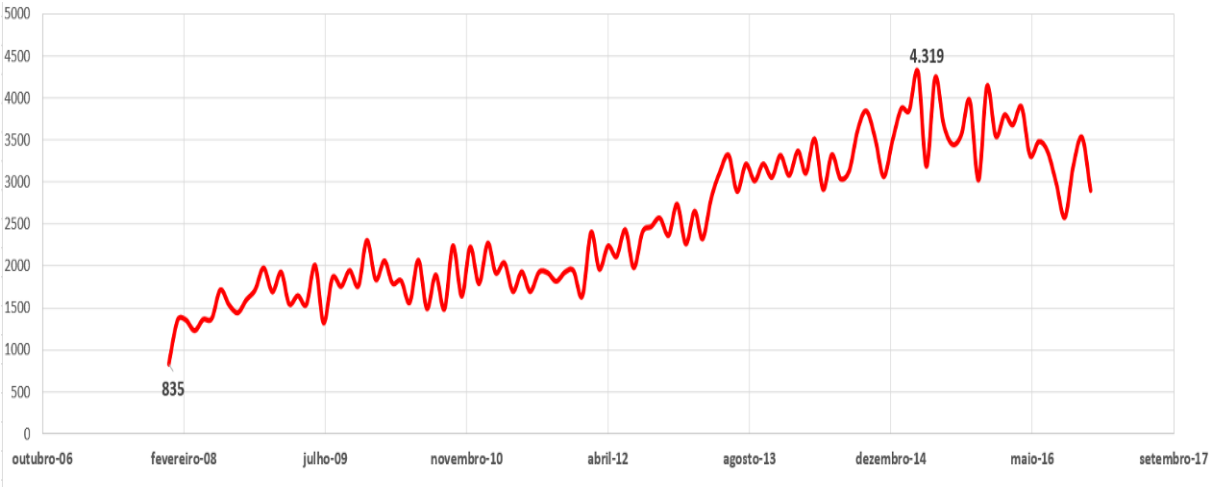
Figura 48 – Gráfico com os déficits totais mensais em l/s obtidos após simulações (2014).




Fonte: Autor, 2017.

Considerando a demanda necessária para o atendimento às cidades do Agreste, numa projeção para 2037, também foi realizada uma simulação e na Figura 49 são apresentados graficamente os resultados obtidos. Dessa forma, foram quantificados os déficits de suprimento de água para uma projeção com alcance de 2037 onde pode-se verificar que há uma variação de 835 l/s para um valor máximo de 4.319 l/s.

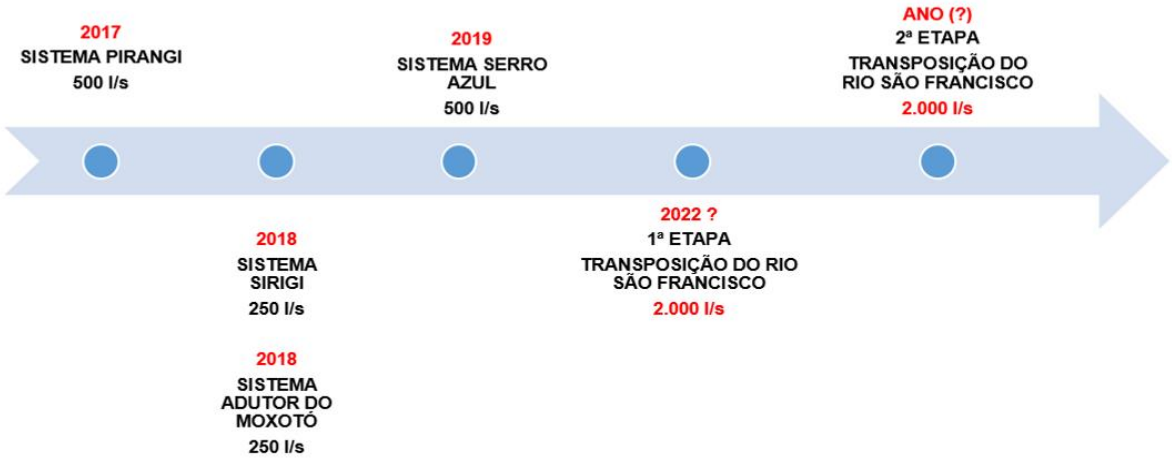
Figura 49 – Déficits totais mensais em l/s obtidos após simulações (2037)




Fonte: Autor, 2017.

Portanto, no cenário atual, para se eliminar o déficit hídrico existente nas cidades do Agreste, seria necessária a conclusão da 1ª etapa da obra da Transposição do Rio São Francisco, com vazão prevista disponível na ordem de 2.000 l/s. Entretanto, a previsão para a conclusão desta 1ª etapa está estimada somente para o ano de 2022. Na Figura 50 pode ser visualizada a linha do tempo contendo as previsões de incrementos das transposições previstas para as cidades do Agreste.

Figura 50 – Linha do tempo com previsão de incrementos das transposições para o Agreste




Fonte: Autor, 2017.

Na Tabela 7, encontram-se as vazões disponíveis, a partir das transposições previstas, para atendimento às localidades do Agreste de Pernambuco. Verifica-se ainda que as transposições referentes aos sistemas Pirangi, Sirigi, Serro Azul e Moxotó totalizam uma

vazão de 1.670 l/s e com a conclusão de todas elas até 2020, já seria possível resolver 60% do déficit existente, considerando os dados de 2014, uma vez que seriam necessárias uma vazão total de 2.861 l/s, conforme dados apresentados na Figura 48. Na Tabela 7 foram colocadas interrogações quanto as definições de prazos para conclusões das duas etapas da transposição do rio São Francisco, uma vez que na prática verifica-se que o cronograma físico financeiro das obras não vem sendo cumpridos e não existe uma precisão por parte dos gestores a nível federal quanto aos prazos reais para conclusão das intervenções previstas que irão beneficiar a maioria das cidades do Agreste pernambucano.

Tabela 7 - Vazões a serem disponibilizadas a partir das transposições.

| Item | Sistema – Descrição | Vazão a ser disponibilizada (l/s) | Prazo estimado |
|---|---|---|---|
| 1 | Transposição Rio São Francisco – 1ª Etapa | 2.000 | 2022 (?) |
| 2 | Transposição Rio São Francisco – 2ª Etapa | 2.000 | ? |
| 3 | Sistema Pirangi | 500 | 2017 |
| 4 | Sistema Sirigi | 220 | 2018 |
| 5 | Sistema Serro Azul | 500 | 2019 |
| 6 | Adutora do Moxotó | 450 | 2018 |
| | **TOTAL** | 5.670 | |

Fonte: Autor, 2017.

Analisando-se os dados apresentados na Figura 50, juntamente com a Tabela 7, conclui-se que para suprir o déficit hídrico das cidades do Agreste já no cenário de 2014 seria necessário que a segunda etapa do sistema de transposição já estivesse concluída. Quando se analisa a prospecção para 2037, conclui-se que caso as transposições sinalizadas na Tabela 7 sejam concluídas será possível atender de forma plena as demandas da população do Agreste. Dessa forma verifica-se a necessidade da conclusão de todas as obras mencionadas na Tabela 7.

Na Tabela 8 são apresentados os déficits máximos e médios das cidades que compõem os sistemas integrados do Prata e Jucazinho, levando-se em consideração as demandas necessárias para o atendimento à população considerando os dados populacionais tendo-se como referência o ano de 2014.

Os resultados obtidos mostram a diversidade das situações de déficit hídrico existente quando se analisa a situação de cada cidade, com vazões que variam de 2 l/s a 650l/s. No presente estudo não foram levadas em consideração as limitações de sistema, ou

seja, limitações inerentes ao transporte de água (adução) nas redes existentes, como também aquelas inerentes aos sistemas de bombeamento.

Tabela 8 - Déficits máximos e médios de cidades no Agreste com demandas de 2014

| Cidade | Déficit máximo l/s | Déficit médio l/s |
|---|---|---|
| Agrestina | 44,27 | 41,94 |
| Águas Belas | 65,10 | 56,60 |
| Alagoinha | 49,80 | 29,00 |
| Altinho | 39,73 | 39,73 |
| Angelim | 6,00 | 4,50 |
| Barra de Guabiraba | 5,00 | 4,10 |
| Belo Jardim | 169,90 | 65,60 |
| Bezerros | 23,09 | 22,25 |
| Bom Conselho | 90,20 | 69,32 |
| Bonito | 4,00 | 2,00 |
| Brejão | 8,00 | 7,80 |
| Brejo da Madre de Deus | 9,90 | 9,40 |
| Cachoeirinha | 0,02 | 0,02 |
| Caetes | 5,70 | 4,00 |
| Calçado | 6,00 | 4,50 |
| Camocim de São Féliz | 37,59 | 0,47 |
| Canhotinho | 10,00 | 7,50 |
| Capoeiras | 5,00 | 3,57 |
| Caruaru | 650,00 | 211,48 |
| Correntes | 5,30 | 3,10 |
| Cumaru | 15,00 | 15,00 |
| Cupira | 48,39 | 47,80 |
| Frei Miguelinho | 3,50 | 3,50 |
| Garanhuns | 110,00 | 33,82 |
| Gravatá | 174,02 | 167,71 |
| Ibirajuba | 2,00 | 0,50 |
| Jataúba | 7,91 | 5,00 |
| João Alfredo | 4,10 | 3,10 |
| Jucati | 48,40 | 47,80 |
| Jupi | 3,27 | 2,50 |
| Jurema | 6,00 | 4,50 |
| Lagoa do Ouro | 5,30 | 4,00 |
| Lagoa dos Gatos | 20,00 | 19,60 |
| Lajedo | 60,00 | 53,10 |
| Machados | 7,80 | 6,30 |
| Palmeirina | 4,00 | 3,50 |
| Panaratama | 3,00 | 2,30 |
| Panelas | 10,70 | 8,70 |
| Passira | 10,32 | 10,10 |
| Pesqueira | 20,54 | 16,54 |
| Poção | 3,99 | 2,99 |
| Riacho das Almas | 3,76 | 3,35 |
| Sairé | 4,60 | 2,60 |
| Salgadinho | 3,00 | 3,00 |
| Saloá | 10,33 | 8,33 |
| Sanharó | 9,00 | 8,47 |
| Santa Cruz do Capibaribe | 42,91 | 41,99 |
| Santa Maria do Cambucá | 15,00 | 15,00 |
| São Bento do Una | 42,00 | 38,41 |
| São Caetano | 69,09 | 21,48 |
| São Joaquim do Monte | 18,00 | 16,00 |
| Surubim | 27,10 | 2,10 |
| Surubim | 27,10 | 26,10 |
| Tacaimbo | 9,00 | 7,32 |
| Taquaritinga do Norte | 28,00 | 11,14 |
| Terezinha | 5,00 | 4,30 |
| Toritama | 16,75 | 16,75 |
| Tupanatinga | 9,00 | 7,50 |
| Venturosa | 9,50 | 7,40 |
| Vertente do Lério | 2,00 | 2,00 |
| Vertentes | 14,39 | 14,39 |
| | **1651.18** | **913.61** |

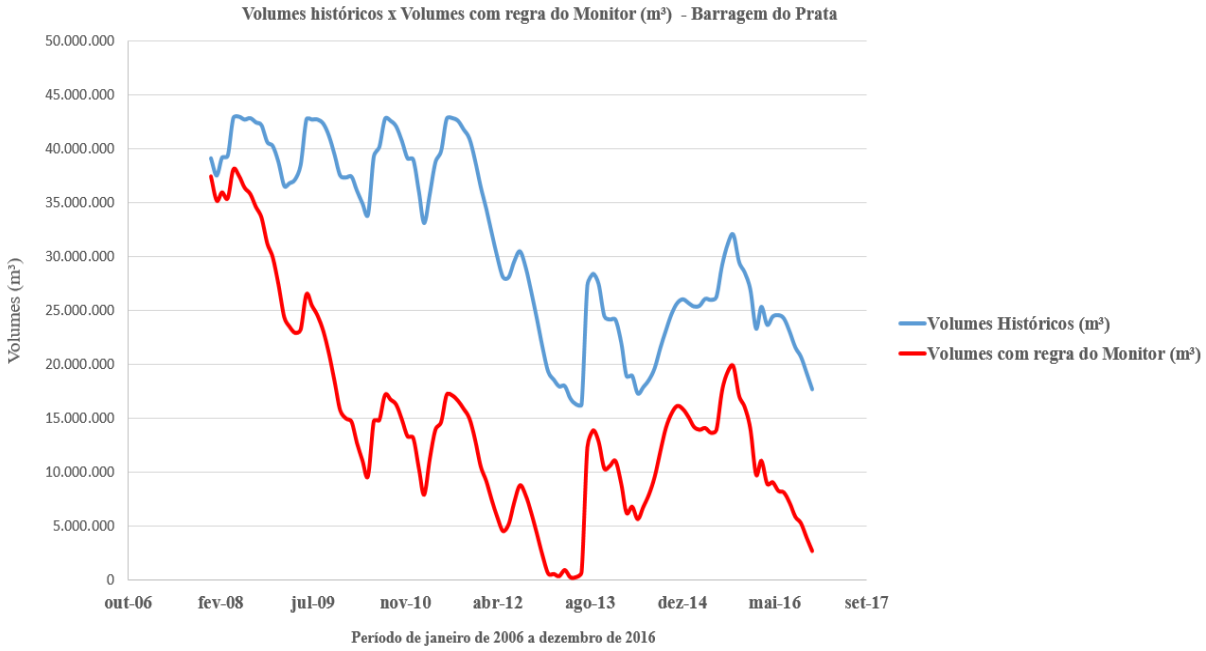
Fonte: Autor, 2017.

A seguir são apresentados os resultados dos sistemas integrados e isolados, através de gráficos, contendo os dados referentes aos volumes históricos, *versus* os volumes obtidos após as simulações realizadas, tendo-se como base as regras do Monitor de secas utilizada no presente estudo. Estes últimos volumes seriam aqueles captados através do uso de gatilhos e metas de supressão do consumo dos reservatórios a partir do uso da regra do monitor de secas.

### 5.2.1 Sistema Integrado do Prata

Na Figura 51 tem-se os volumes históricos, no período de 2008 a 2016, *versus* os volumes que seriam captados utilizando a operação dos reservatórios com as regras estabelecidas pelo monitor de secas. No caso da barragem do Prata, em todo o período analisado, os volumes históricos são bem superiores aos volumes para os quais considerou-se a utilização das regras do monitor.

Figura 51 – Volumes históricos x volumes com a regra do monitor – sistema do Prata (2014)

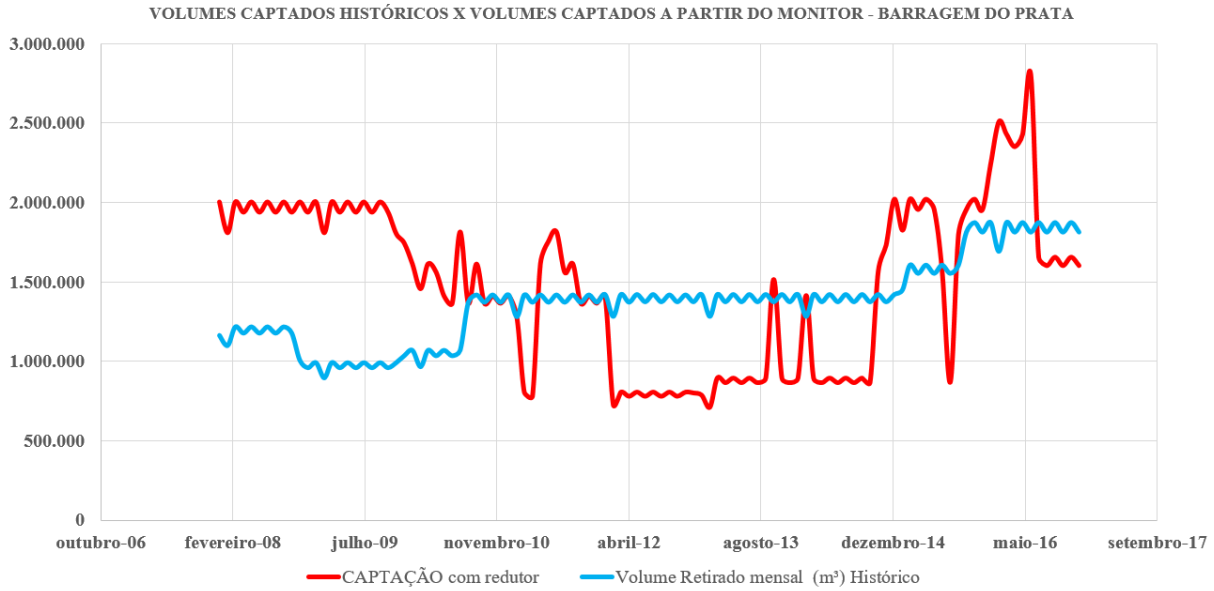



Fonte: Autor, 2017.

Na Figura 52 são apresentadas as captações históricas *versus* as captações caso fosse utilizado as regras do monitor. Portanto, verifica-se que há períodos onde as captações históricas foram inferiores aquelas que seriam praticadas utilizando-se as regras do monitor. Dessa forma, conclui-se que com o uso de regras operacionais é possível por um lado maximizar as retiradas de cada barragem, nos períodos em que o cenário é considerado

normal e por outro haver restrições na captação quando o estoque de água estiver nos percentuais previamente estabelecidos. Um dos principais resultados obtidos é a possibilidade de minimizar problemas com a ocorrência de colapsos das barragens. Quando isso ocorre, as populações passam por uma supressão drástica na oferta de água e na maioria das vezes têm o abastecimento via carros-pipa como a única solução existente.

Figura 52 – Captações históricas x captações com a regra do monitor (Barragem do Prata).

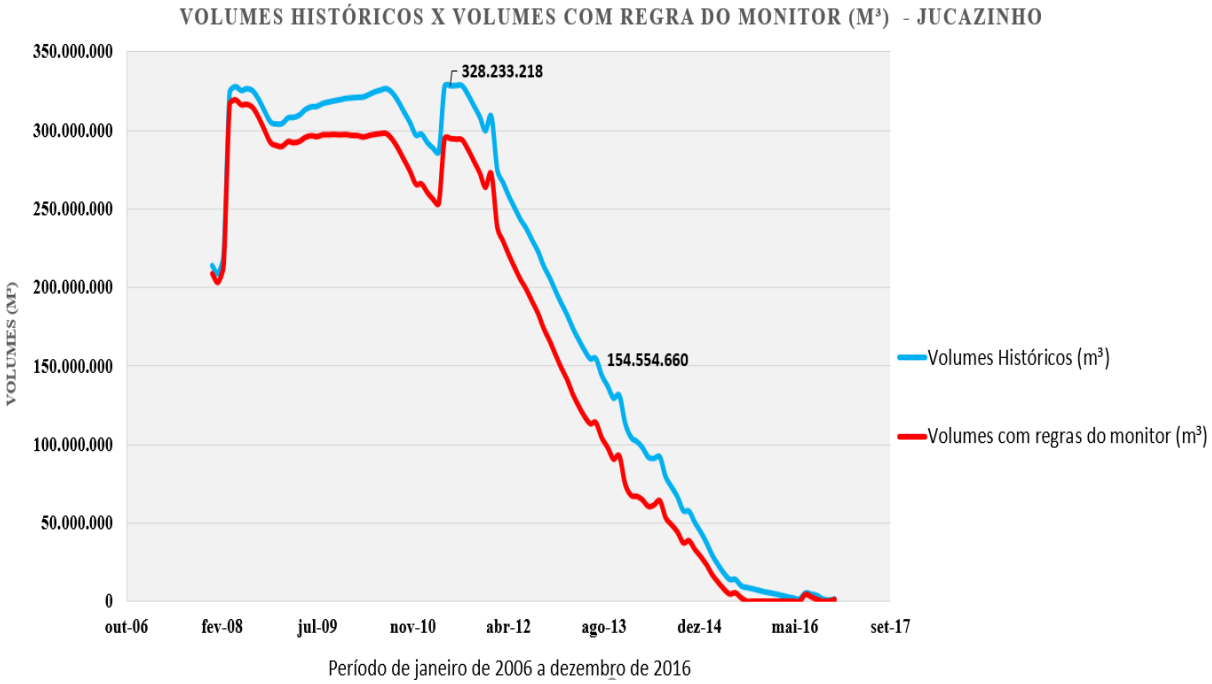



Fonte: Autor, 2017.

### 5.2.2 Sistema Jucazinho

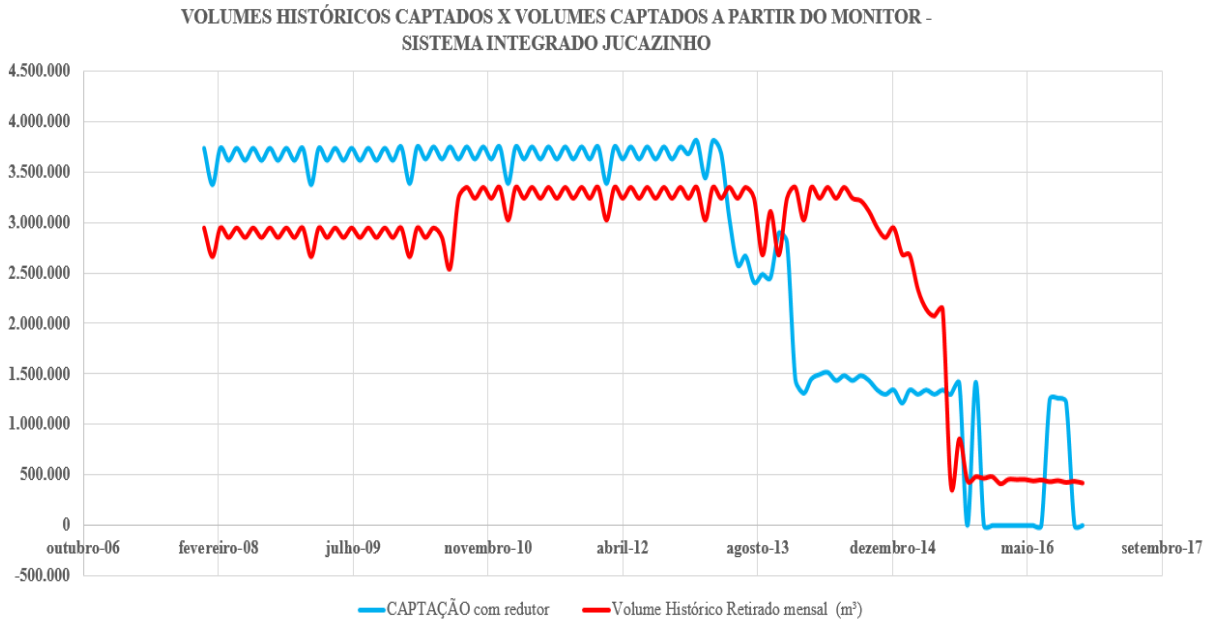
São apresentados os volumes históricos, na Figura 53, no intervalo de 2008 a 2016, *versus* os volumes que seriam captados utilizando para a operação dos reservatórios as regras estabelecidas pelo monitor de secas. No caso da barragem de Jucazinho verifica-se no gráfico a linha em azul correspondente aos volumes históricos captados e em vermelho aqueles existentes caso fossem aplicadas as regras do monitor.

Figura 53 – Volumes históricos x volumes com a regra do monitor – sistema de Jucazinho.




Fonte: Autor, 2017.

Figura 54 – Captações históricas x captações com a regra do monitor – sistema de Jucazinho.




Fonte: Autor, 2017.

# 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

## 6.1 Conclusões

O presente estudo buscou contribuir com a gestão de sistemas hídricos, através do desenvolvimento de um modelo que possibilitasse apoiar a decisão dos gestores públicos, quanto ao atendimento racional do consumo de água, através de uma operação racional de reservatórios e transferências de água entre bacias, na região do Agreste de Pernambuco. Dessa forma, para alcançar os objetivos propostos, após a realização das coletas de dados, levantamentos e simulações pôde-se identificar os principais fatores que limitam o suprimento satisfatório de água nesta região, nos quais destacam-se os fatores climáticos, a baixa precipitação, o elevado índice de aridez, a alta densidade demográfica, o subsolo cristalino, mananciais superficiais intermitentes e/ou temporários, problemas estes que somados demonstram a existência de déficits hídricos quando se correlaciona demanda *versus* oferta. Levando-se em conta todos os aspectos levantados e apontados que caracterizam a região do Agreste conclui-se que nesta região para minimizar os problemas de déficit hídrico as transposições de água são imprescindíveis. Por outro ressalta-se que outros aspectos são relevantes para minimizar os problemas locais de escassez hídrica no qual citamos outras alternativas tais como barragens subterrâneas, açudagens de pequeno e médio porte e ações no combate a perdas de água nas diversas unidades que compõem os sistemas de abastecimento de água.

Para subsidiar o alcance dos objetivos específicos também foram avaliados o comportamento mensal dos percentuais e volumes acumulados das barragens existentes no Agreste de Pernambuco, a partir da simulação dos cenários de secas, durante o período de 2008 a 2016 e de uma maneira geral, verificou-se que a operação dos reservatórios (barragens) ocorreu sem critérios pré-definidos. Não houve uma regulação sistemática na captação de água dos reservatórios existentes de acordo com os cenários diversos, ao longo de cada ano. Na maioria dos casos, os volumes de retirada mensais foram similares nas épocas chuvosas e secas, sem critérios de restrição ou de maior exploração que poderiam ter minimizado os problemas com a ocorrência de colapsos destes reservatórios. Os resultados obtidos apresentaram situações comuns no tocante as condições de operação, no qual percebeu-se que de fato não há regras bem definidas para operação dos reservatórios havendo uma probabilidade significativa dos mesmos, em cenários de estiagem prolongada chegarem em situação de colapso total. Fato este que foi identificado na análise dos dados coletados e

comprovado em diversos momento e sobretudo, no ano de 2016 onde mais de 70% das barragens desta região entraram em colapso total.

Também foram simulados cenários para o abastecimento pleno das localidades do Agreste de Pernambuco, no qual considerou-se não haver limitações de sistema, ou seja, limitações na capacidade de transporte de água, via adutoras, elevatórias ou problemas específicos nas redes distribuidoras, sendo, portanto, possível o transporte total da água disponível de uma dada barragem.

Por meio das simulações realizadas foi possível quantificar os déficits existentes para cada cidade do Agreste. Foram, portanto, identificadas as necessidades de vazão em litros por segundo de importação de água, de outras regiões para o Agreste, através do modelo proposto para operação de reservatórios. Este modelo, conforme especificado anteriormente, teve como base os diversos cenários de secas, utilizando-se o método do monitor de secas, implantado no Nordeste brasileiro pelo Banco Mundial.

Considerando-se as demandas de 2014 foram obtidos os déficits totais mínimos de 567 l/s e máximos de 2.861 l/s para atender a todas as cidades do Agreste. E para o alcance do ano de 2037 os déficits mínimos passam a ser de 835 l/s e máximos de 4.319 l/s. A partir dos resultados obtidos concluiu-se que para suprir os déficits existentes já considerando as demandas previstas em 2014, seria necessária que a 2ª etapa da Transposição do rio São Francisco tivesse sido concluída, comprovando-se a importância da finalização destas obras de transposição para que se possa ter o atendimento pleno a população destas cidades.

Por outro os dados obtidos mostram que tão logo as transposições de pequeno e médio porte mencionadas no presente estudo sejam concluídas até 2020 aproximadamente 70% do déficit hídrico nesta região estará equacionada. Dessa forma sinaliza a importância do poder público de priorizar a alocação de recursos e finalização destas transposições para que possa ter um avanço considerável em busca da minimização do déficit hídrico para a região do Agreste Pernambucano nos próximos 4 anos.

## 6.2 Recomendações para Trabalhos Futuros

Neste trabalho foram consideradas como possíveis fontes de complementação da oferta de água somente as importações a partir do rio São Francisco e da Mata Sul. Existem planos e projetos de aumentar a infraestrutura hídrica em algumas regiões mais favoráveis a armazenamento, como é o caso do Agreste Meridional. Essas fontes devem ser consideradas no processo de planejamento e decisão.

No presente estudo não foram considerados cenários de restrição das demandas, o que é desejável, em qualquer planejamento racional, no qual sugere-se para fins de trabalhos futuros, como também que sejam realizadas as simulações com um período histórico o mais longo possível, para cada reservatório, considerando os dados hidrológicos pertinentes a cada sistema hídrico e avaliando as outras retiradas de água além da realizada pela COMPESA. Um caminho é o cadastro de outorgas.

Ressalta-se ainda a importância da aplicação do conceito do Monitor da Seca de forma individualizada para cada manancial, o que trará mais segurança para a operação do mesmo. Importante que futuros trabalhos possam vir a monitorar a utilização e aplicabilidade deste estudo em mananciais estratégicos de pequeno, médio e grande porte em Pernambuco e acompanhar as suas implicações. Dessa forma, sugere-se que o presente estudo possa servir de base para que Companhia Pernambucana de Saneamento possa aplicar o modelo em cada reservatório existente e elaborar um manual de operação servindo como instrumento operacional e de tomada de decisão.

## 7 REFERÊNCIAS

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS. Transposição do rio São Francisco, 2010. Disponível em: <http://geodados.wordpress.com/2010/10/08/a-transposicao-do-rio-sao-francisco>. Acesso em: 5 set. 2010.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUA, 2012. Nota técnica 010/2003/SPR- Memorial descritivo do cálculo da demanda humana de água contidas no documento "Plano Nacional de Recursos Hídricos – Documento Base de Referência, Minuta".

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2015. Resolução nº 687, de 03 de dezembro de 2015. Agencia Nacional de Águas.

ANA - AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (Brasil). Atlas Brasil: abastecimento urbano de água: resultados por estado. Engecorps/Cobrape, Brasília, v.2, 2016. Disponível em<http://atlas.ana.gov.br/Atlas/forms/Download.aspx> Acesso em 04 dez. 2016.

AMBRIZZI, T. *et al*. Cenários regionalizados de clima no Brasil para o século XXI: Projeções de clima usando três modelos regionais. Relatório 3, 2007. Ministério do Meio Ambiente.

ANDERSON, D.L. Utah's Perspective The Colorado River, maio 2002.

ANDRADE, E. L. (2000). Introdução à Pesquisa Operacional: Métodos e Modelos para Análise de Decisão, 2ª ed., LTC, Rio de Janeiro.

APAC, AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMA, (2012). Disponível em: < www.apac.pe.gov.br>.

APAC - AGÊNCIA PERNAMBUCANA DE ÁGUAS E CLIMAS. Relatório de situação de Recursos Hídricos do Estado de Pernambuco 2014/2015 – Recife: 2015.

BALME, M.; Vischel, T.; Lebel, T.; Peugeot, C.; Galle, S. Assessing the water balance in the Sahel: Impact of small scale rainfall variability on runoff. Part 1: Rainfall variability analysis. Journal of Hydrology, v.33, p.336-348, 2006.

BANCO MUNDIAL. World development report, 1994: *Infraestructure for development. Washington*, 1994.

BENITEZ, R.M. O capital social fixo como insumo do desenvolvimento regional. Revista Econômica do Nordeste, Fortaleza, v. 29, n.2, p. 143- 157, abr./jun. 2005.

BEZERRA, N. F. Água no semiárido nordestino. Experiências e desafios. Fundação Konrad Adenauer, Fortaleza, Série Debates n. 24, dezembro 2002.

BRAGA, B. P. F. (1987). Técnicas de Otimização e Simulação Aplicadas em Sistemas de Recursos Hídricos. In: Modelos para o Gerenciamento de Recursos Hídricos. NOBEL/ABRH. São Paulo, p. 427-518.

BRASIL. Ministério das Cidades. Cadernos Mcidades, n. 1 a 8. Brasília: MCidades, 2014.

BRITO, P. Transposição, um antídoto contra a indústria da seca. Valor Econômico, 15 dez. 2005, Opinião.

CAMPOS, J. N. B.; STUDART, T. M. C. Secas no Nordeste do Brasil: origens, causas e soluções. In: Fourth Inter-American Dialogue on Water16 Management, 2001, Foz do Iguaçu. Anais do IV Diálogo Interamericano de. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2001.

CARRERA-FERNANDEZ, José. et al. Impactos da cobrança pelo uso da água sobre a economia regional. XXX Encontro Nacional de Economia da ANPEC, 2002.

CARVALHO, P.C.M.: Água potável via energia solar; Ciência hoje, volume 27, número 158, março 2012.

CAÚLA, B.Q.; MOURA G.B. Aspectos Ambientais e Jurídicos da Transposição do Rio São Francisco, Maio 2006, UNIFOR-CE.

CELESTE, A. B., CURI, W. F., CURI, R. C. (2006). Otimização de Modelagens de Alternativas de Esvaziamento de um Sistema de Reservatórios na Bacia do Rio Piancó. In: VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. São Luís. CD-ROM.

CIRILO, J. A.; COSTA, M. R.; ABREU, G. H. F. G.; BALTAR, A M.; AZEVEDO, L. G., Soluções para o suprimento de água de comunidades rurais difusas no semiárido brasileiro: avaliação de barragens subterrâneas. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v.8, n.4, p.5-24, out./dez.2008.

CIRILO, J. A. Políticas públicas de recursos hídricos para o semiárido. 2008. Revista USP. ISSN 0103-4014. vol.22 nº.63 São Paulo.

CIRILO, J. A.; Crise Hídrica: Desafios e Superação. Revista USP, São Paulo, nº106, p. 45-58, julho/agosto/setembro 2015.

CRUZ, H.P.; COIMBRA, R.M.; FREITAS, M.A.V. Vulnerabilidade Climática, Recursos Hídricos e Energia Elétrica no Nordeste Brasileiro, Jan. 1999, Brasília.

CRUZ, F. O. *et al*. Infraestrutura e desenvolvimento regional: uma análise multivariada dos estados brasileiros no período de 2000 a 2004. IV Encontro de Economia Baiana. Setembro, 2008.

COMPANHIA PERNAMBUCANA DE SANEAMENTO - COMPESA. Projeto Básico da Transposição do Agreste. Recife. 2014

COMPANHIA PERNAMBUCANA DE SANEAMENTO - COMPESA. Relatório Técnico Barragens Agreste. Recife. 2015.

COMPESA - COMPANHIA PERNAMBUCANA DE SANEAMENTO –. Sistemas de Abastecimento. Recife, 2016.

Dahlquist G. and A. Bjorck, "*Numerical Methods," Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1974.*

DOWNING, T. E., *Vulnerability and global environmental change in semi-arid tropics: modeling regional and household agricultural impacts and responses. Presented at ICID, Fortaleza, CE, Brasil, 1992.*

FERREIRA, J. Contra o ambiente. O Dia (RJ), 27 abr. 2005, Opinião.

FONSECA, A.F.C. Controle e uso da água na Ouro Preto dos séculos XVIII e XIX, Nov. 2004.

FURTADO,C. Desenvolvimento e subdesenvolvimento. Rio de Janeiro: Ed. Fundo de Cultura,1998.

GARJULLI, R. Os recursos hídricos no semiárido, 2003. Disponível em: <http://cienciaecultura.bvs.br/scielo. Acessado em 14 de setembro de 2010.

GUEDES, R, V. S. (2011). Previsão de seca na bacia hidrográfica do Açude Epitácio Pessoa com base em redes neurais artificiais. Dissertação em Meteorologia pela UFCG.

HELLER, L.; PÁDUA L. Abastecimento de água para consumo humano. Belo Horizonte, editora UFMG, 2006.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico Brasileiro. 2000.

IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Censo Demográfico Brasileiro. 2010.

KERSHNER, Isabel, Revolução de água em Israel afasta qualquer ameaça de seca. *The New York Times*, 2015.

KHAN, S. et al. *Enhancing water productivity at the irrigation system level: A geospatial hydrology application in the Yellow River Basin. Journal of Arid Environments* vol.72, pág. 1046–106, Fev. 2008.

LIMA, H. V. C.; LANNA, A. E. L. (2005). Operação Ótima de Sistemas de Reservatórios: Aplicação ao Sistema de Abastecimento da Região Metropolitana de Fortaleza. In: XIV Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos. Aracaju. CD-ROM.

LIMA, L.E.C., 2005. A Transposição das Águas do Rio São Francisco: Diálogo entre os Ambientalistas e o Governo Federal sobre a Transposição das Águas do Rio São Francisco, www.vejosaojose.com.br.

LOUCKS, D. P. (2000). Sustainable Water Resources Management. Water International Resource Association, v. 25, n. 1 p. 3-10.

LUCCI, Eliane A. IBGE/Geografia Homem & Espaço. Editora Saraiva. 2000.

MAGRIN, G. et al. Latin America. In:PARRY, M.L et al. (Ed.) Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Forth Assessment Reporto the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007. P.581 - 615.

MARENGO, J.A. Mudanças Climáticas globais e seus impactos nos recursos hídricos. In: Rebouças, A.C.; BRAGA,B. ;TUNDISI, J.G. (Ed.) Águas Doces no Brasil: capital ecológico, uso e conservação. 3. Ed. São Paulo: Instituto de estudos Avançados da USP, Academia Brasileira de Ciências, 2006.

MATEUS, G. R.; LUNA, H. P. C. (1986). Programação Não Linear. Belo Horizonte. UFMG, 289p.

MEHROTRA, R.; SINGH, R. D. (1998). The Influence of Model Structure on the Efficiency of Rainfall-Runoffe Models: A Comparative Study for Some Catchments of Central India, Water Resouces Management, v. 12, n.5, p.325-341.

MELLO, M., 2006. Integralizar bacias gera polêmica em todo mundo, http://www3.atarde.com.br/especiais/futurodaagua/integralizar.html.

OBASI, G.O.P. (1994). WMO's role in the international decade for natural disaster reduction. Bulletin, American Meteorological Society, 75 (1), 655–1661.

Pegden, C.D., Shannon, R.E e Sadowski R.P. – Introduction to Simulation Using SIMAN, 2º ed., McGraw-Hill, Nova Iorque, 1995.

PEREIRA, M.C. Com a obra, 8 milhões de pessoas serão beneficiadas. Valor Econômico, 22 mar 2002.

REBOUÇAS, A. C. Panorama da degradação do ar, da água doce e da terra no Brasil. São Paulo: IEA/USP, 1997.

REYES, Giovanni E. Four main theories of development: modernization, dependency, word-system and globalization. Nómadas, Revista Crítica de Ciencias Sociales y Jurídicas. nº.4, julho-dezembro, 2000.

REYMÃO, A. E. Acesso a água tratada e insuficiência de renda: duas dimensões da pobreza no nordeste brasileiro sob a ótica dos objetivos do milênio. Boletim da Sociedade Brasileira de Economia Ecológica. IPEA, 2007.

SACHS, W. Dicionário do desenvolvimento. Rio de Janeiro: Vozes, 2000.

SANDRONI, Paulo. Dicionário de economia. São Paulo: Atlas, 1994.

SEN, Amartya. Desenvolvimento como liberdade. São Paulo, Companhia das Letras, 2000.

SERRANO, D.E. El Trasvase Tajo-Segura: El Fracaso de Uma Gran Obra, Dez. 2005. Disponível em: http://deciamosayer. blogcindario.com/2005/12/00031-el-trasvase-tajosegura-el-fracaso-deuna- gran-obra.html.

SILVA et al. Alternativas de captação, conservação e uso da água para abastecimento do meio rural. EMBRAPA, Petrolina - PE, 2005.

SIMONOVIC, S. P. (1992) Reservoir system analysis: closing gap between theory and practice. Journal of Water Resources Planning and Management, New York. Vol. 118, nº.3.

Tucci, C. E. M. Modelos Hidrológicos. 2. ed. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2010.

TUNDISI, J. G. *et al.* "*Urban Waters in Brazil", in Urban Water Challenges in the Americas. Ianas: The Inter-American Network of Academies of Sciences, 1th., v. 1, Mexico City, 2014.*

VEIGA JOSÉ ELI DA. Desenvolvimento sustentável: O desafio do século XXI. Garamon. 3ª edição. Rio de Janeiro, 2008.

WILHITE, D.A. The enigma of drought. In Drought assessment, managemet ad planning: theory and case studies, WHILHITE, D.A. (Ed.) Boston, London: Kluwer Academia Publishers, ISBN, 1993.

WURBS, R. A., (2005) Comparative Evaluation of Generalized River/Reservoir System Models. Technical Report, n. 282. Texas Water Resources Institute.

YEH, W. W. G. (1985) *Reservoir management and operations models: a state-of-the-art review. Water Resources Research, Washington*. Vol. 21, nº 12, pp. 1797 – 1818.

Fragoso-Jr, C.R., Ferreira, T.F., Marques, D.M.L.M., 2009. Modelagem Ecológica em Ecossistemas Aquáticos, 1ª ed. Oficina de Textos, São Paulo.

# APÊNDICE I

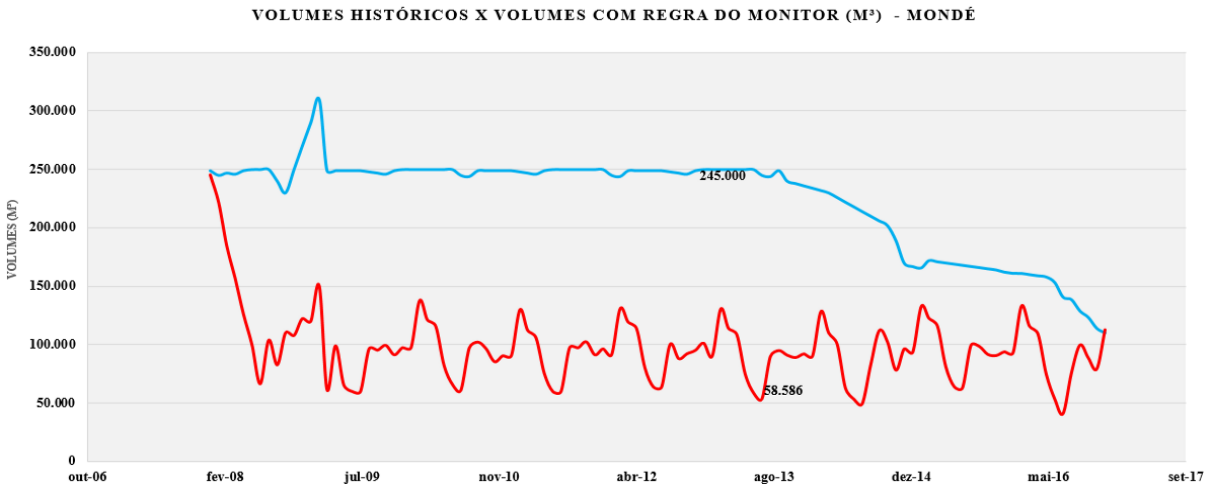



Figura I2 – Volumes retirados históricos x volume captados com regra do monitor – Mondé.

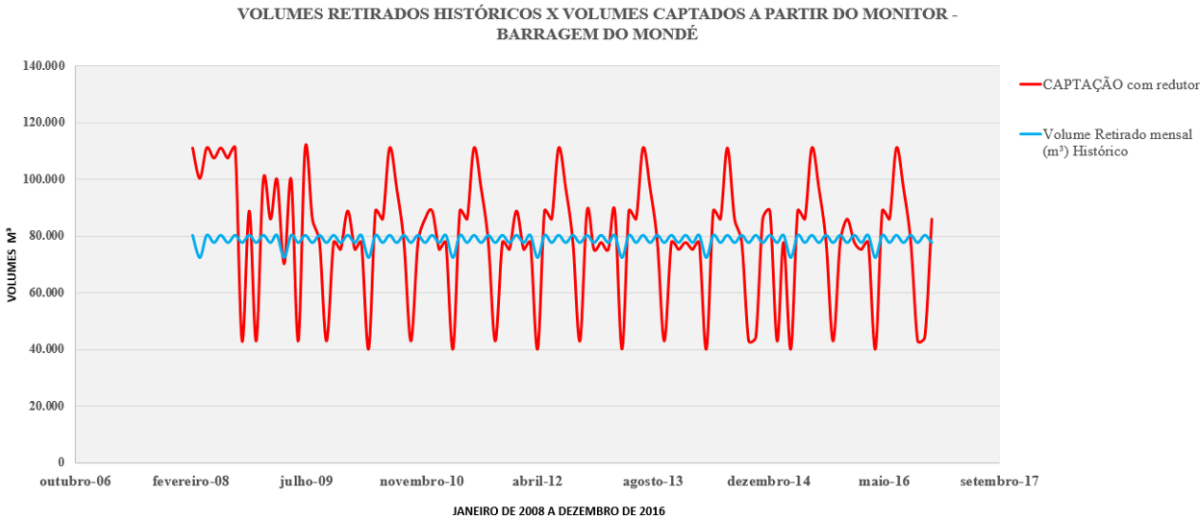



Figura I3 – Croqui esquemático dos sistemas produtores Altinho

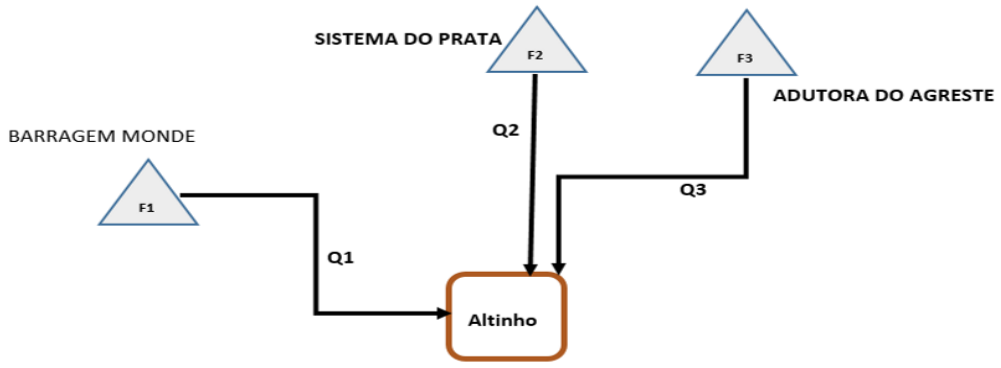



Figura I4 – Volumes históricos x volume com regra do monitor – Serra do Jardim

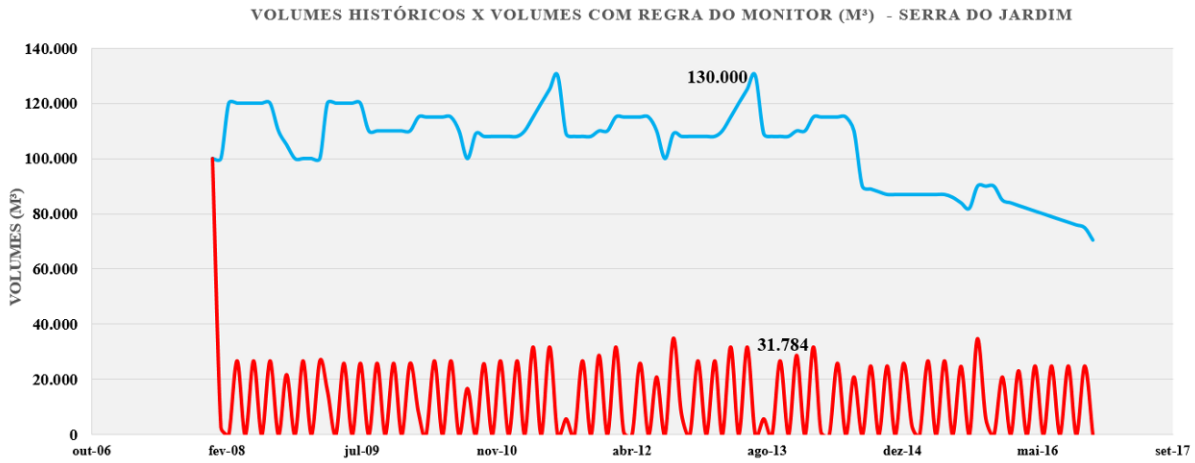



Figura I5 – Volumes retirados históricos x volume captados com regra do monitor

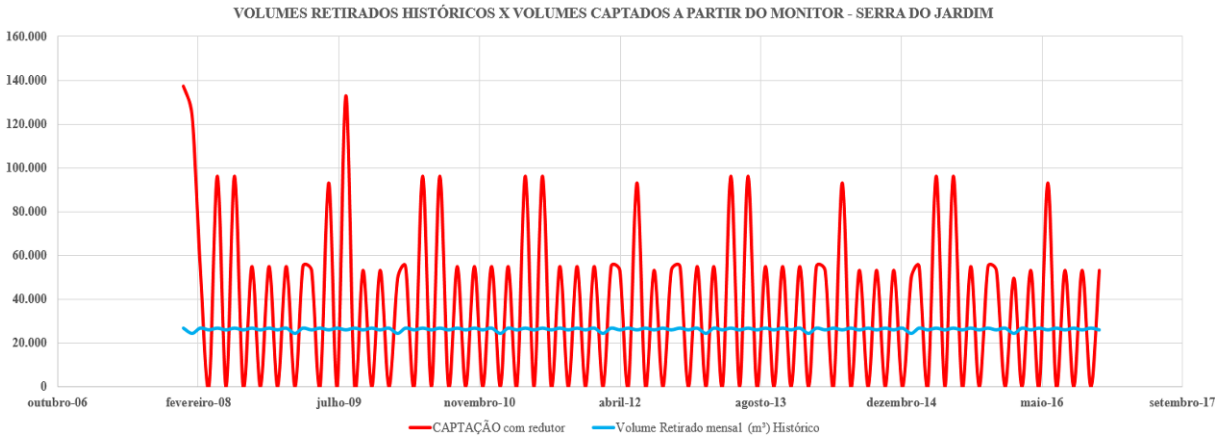



Figura I6 – Croqui esquemático dos sistemas produtores Agrestina

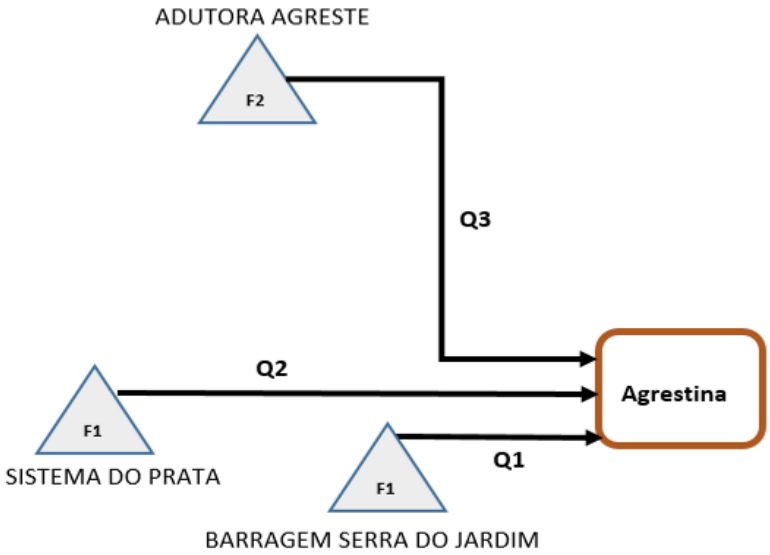



Figura I7 –

Volumes históricos x volume com regra do monitor – Tabocas

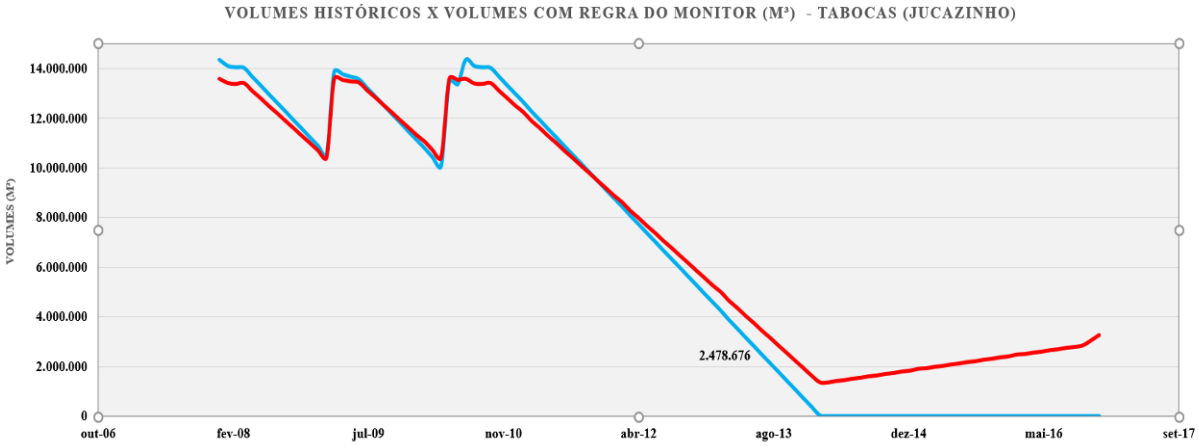



Figura I8 – Volumes retirados históricos x volume captados com regra do monitor

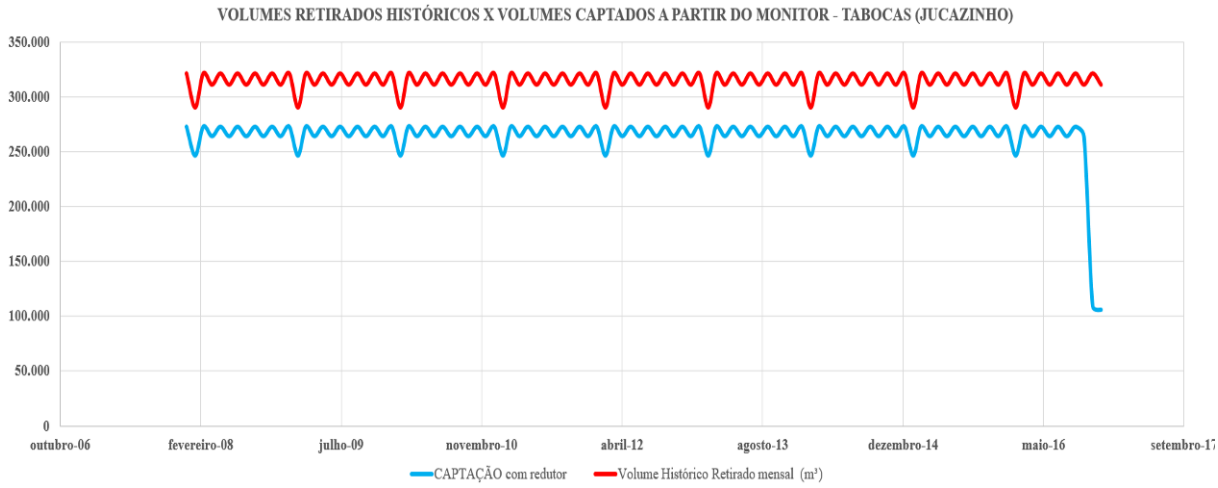


Figura I9 – Volumes históricos x volume com regra do monitor – Boa Vista

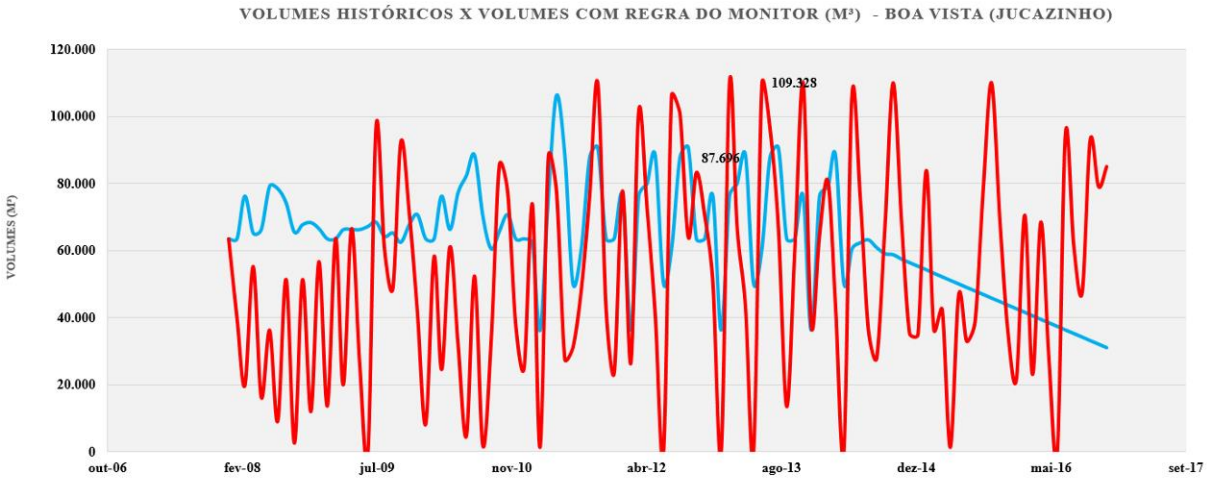



Figura I10– Volumes retirados históricos x volume captados com regra do monitor

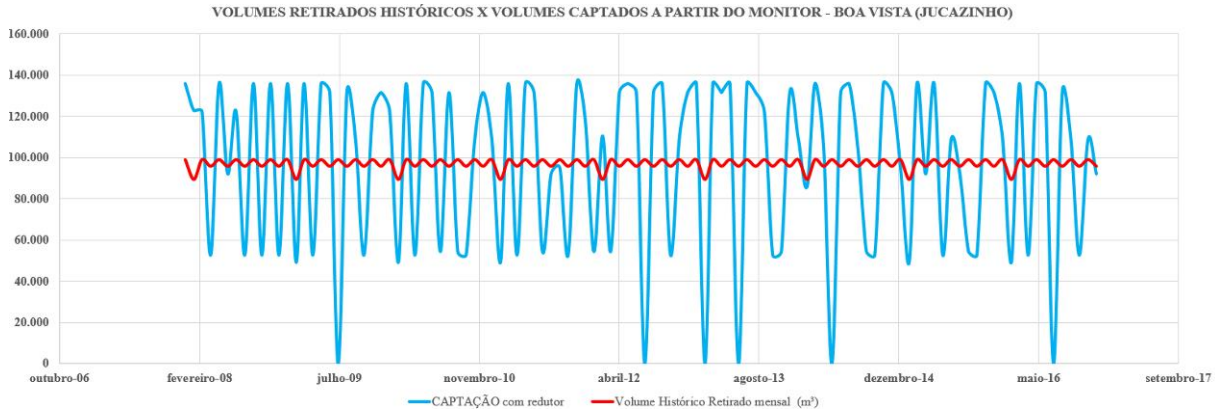



Figura I11 – Croqui esquemático dos sistemas produtor Bezerros

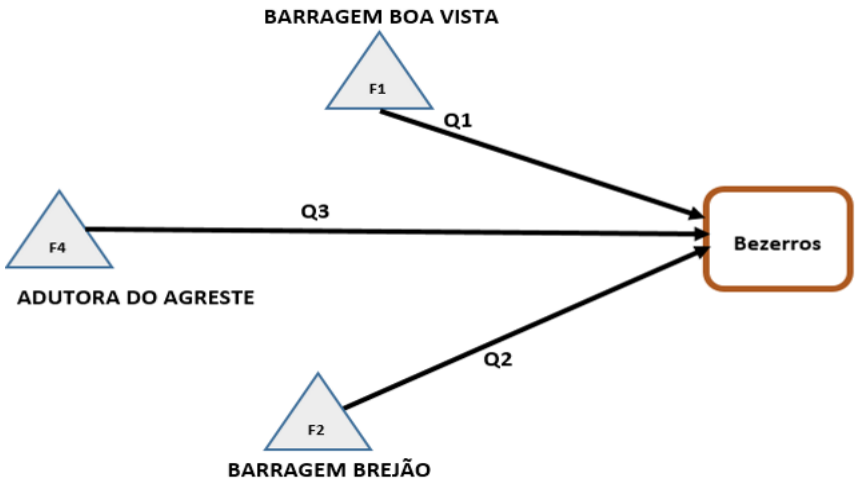


Figura I12 – Volumes históricos x volume com regra do monitor – Brejão

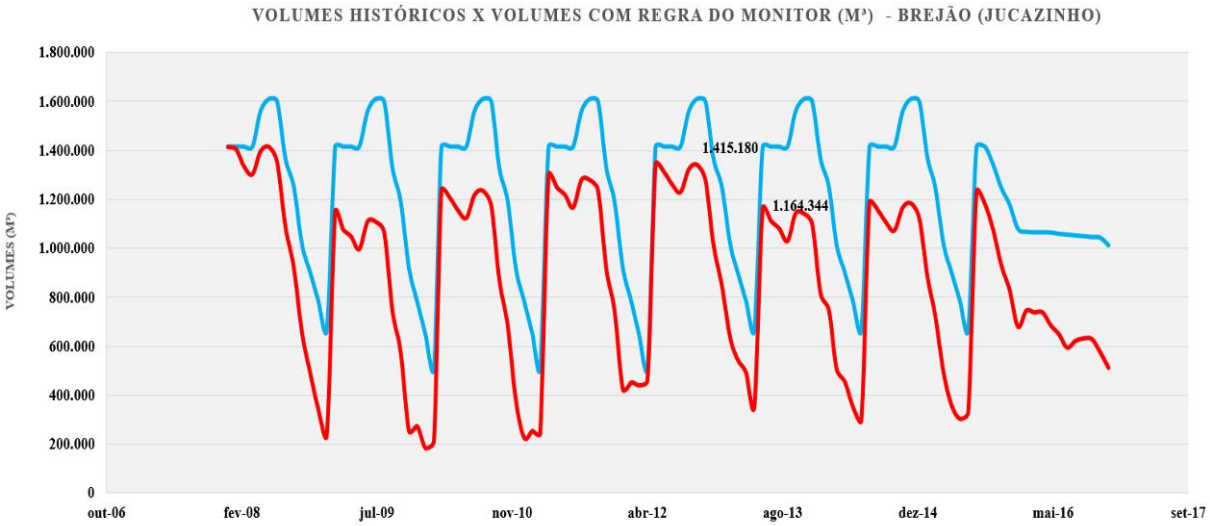



Figura I13– Volumes retirados históricos x volume captados com regra do monitor

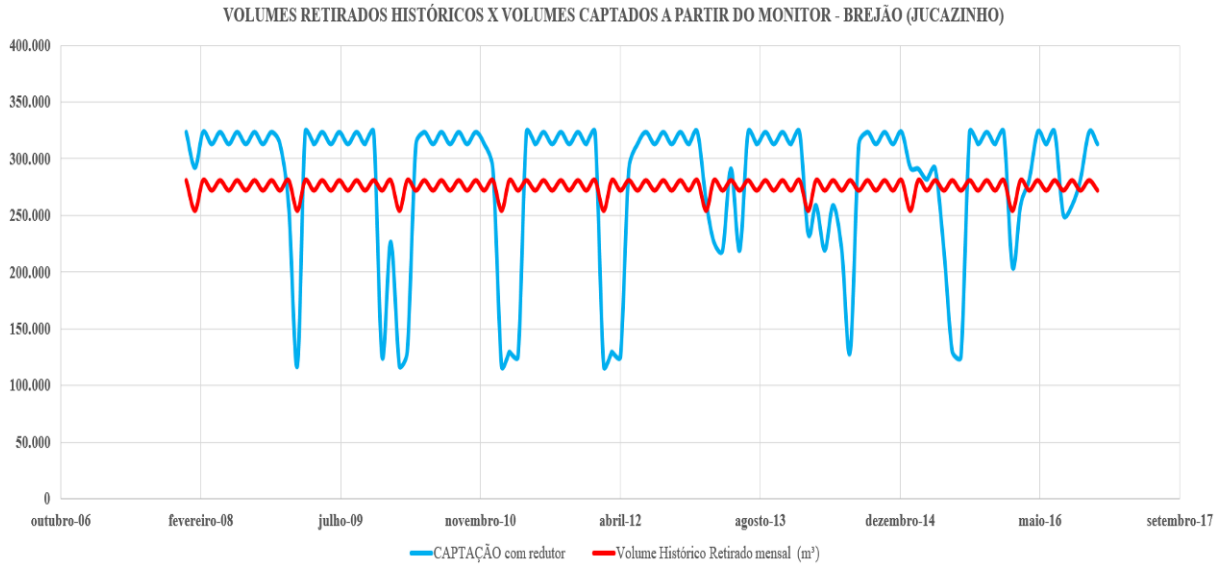


Figura I14 – Volumes históricos x volume com regra do monitor – Manuíno

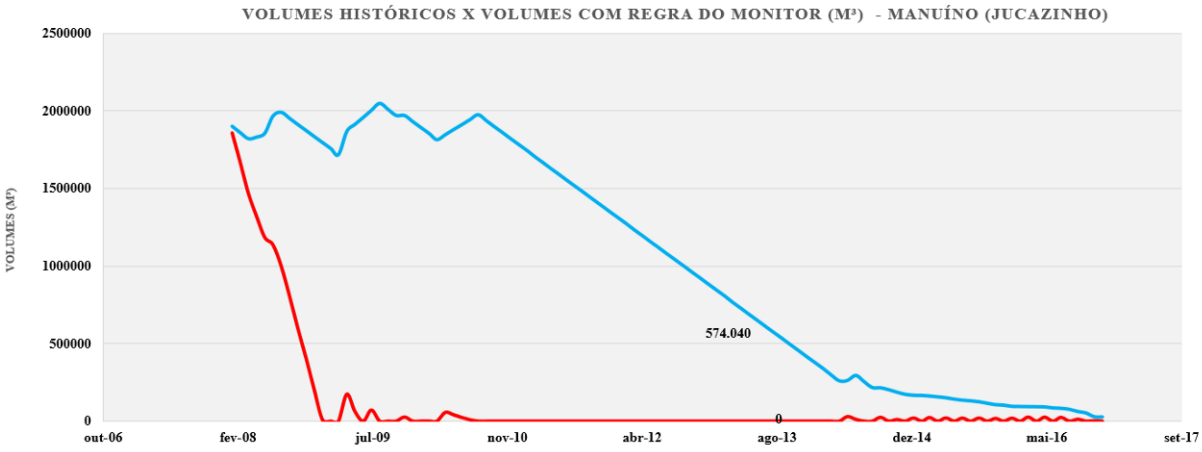



Figura I15– Volumes retirados históricos x volume captados com regra do monitor

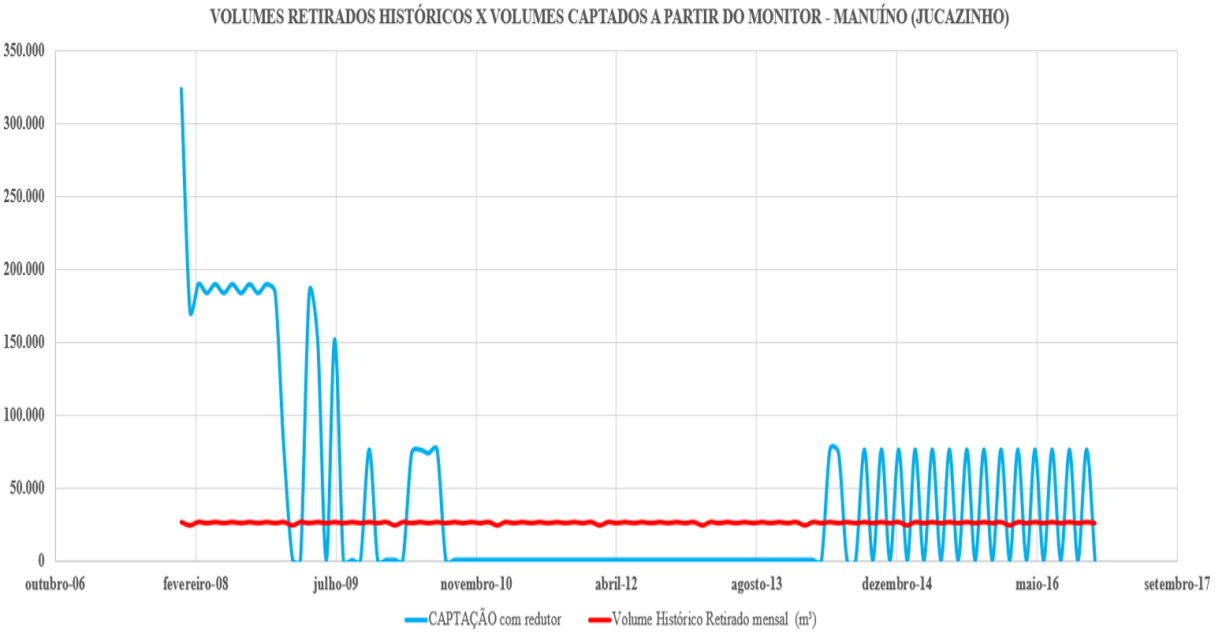


Figura I16 – Volumes históricos x volume com regra do monitor – Vertente

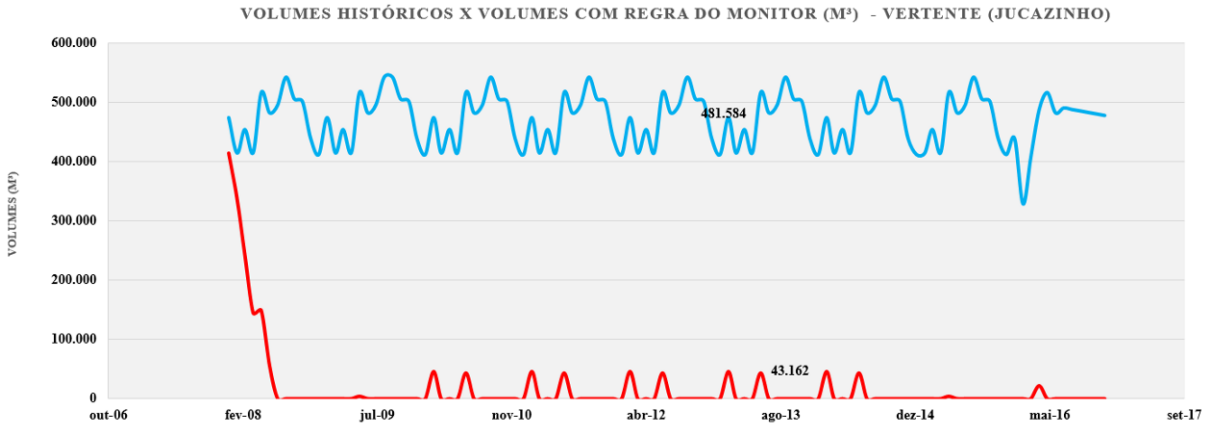



Figura I17 – Volumes retirados históricos x volume captados com regra do monitor

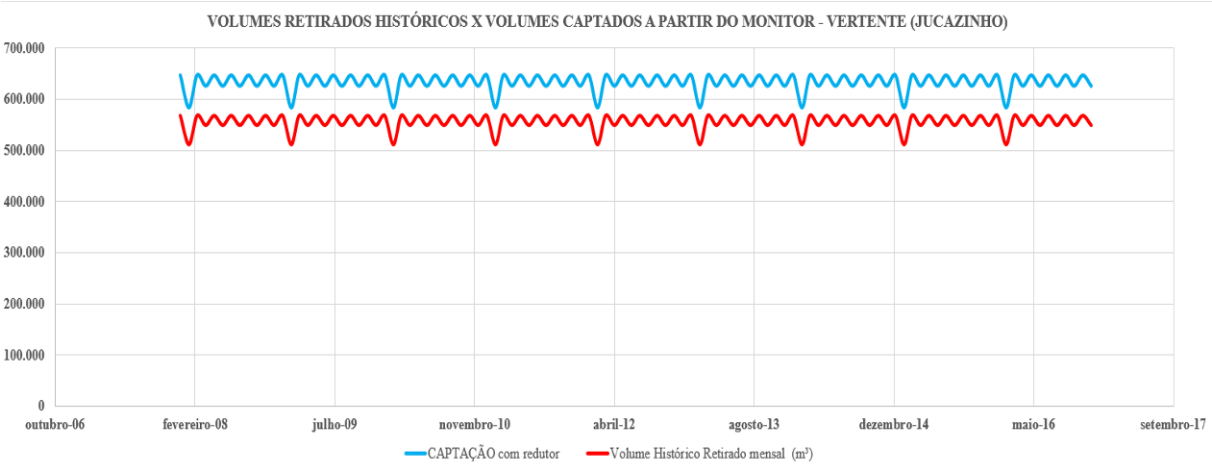



Figura I18 – Croqui esquemático dos sistemas produtor Gravatá

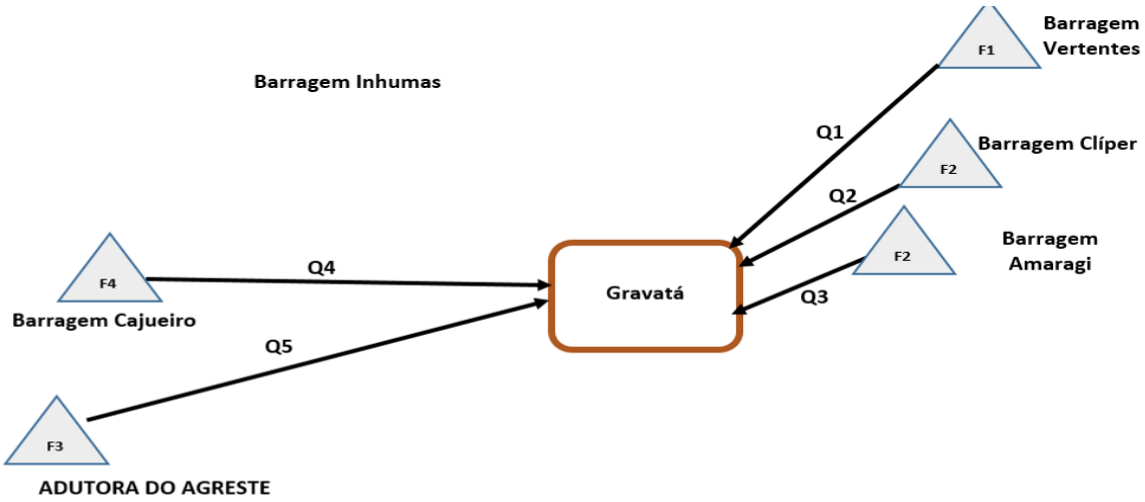


Figura I19 – Volumes históricos x volume com regra do monitor

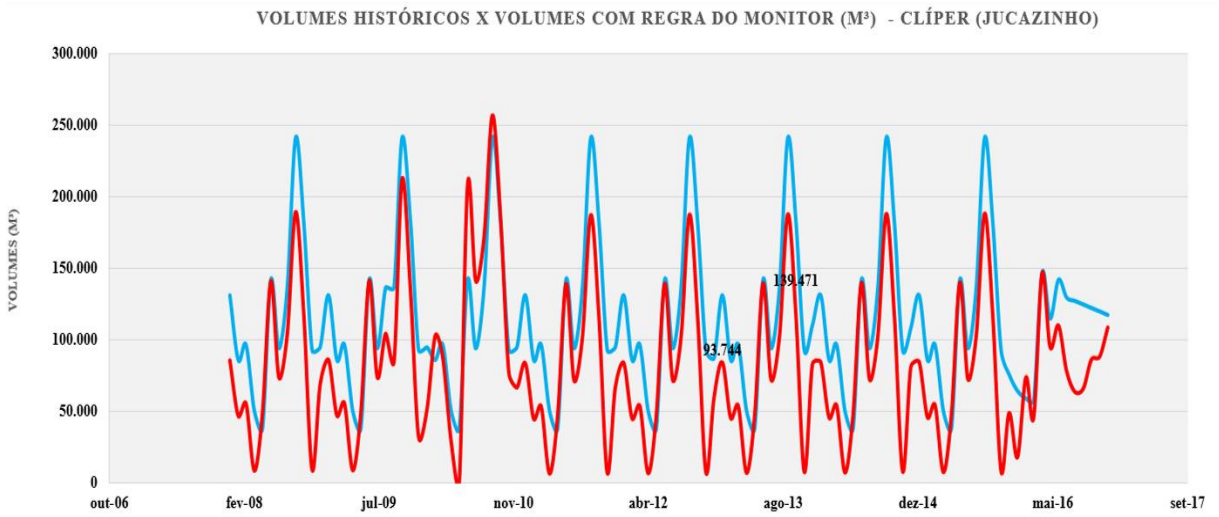



Figura I20 – Volumes retirados históricos x volume captados com regra do monitor

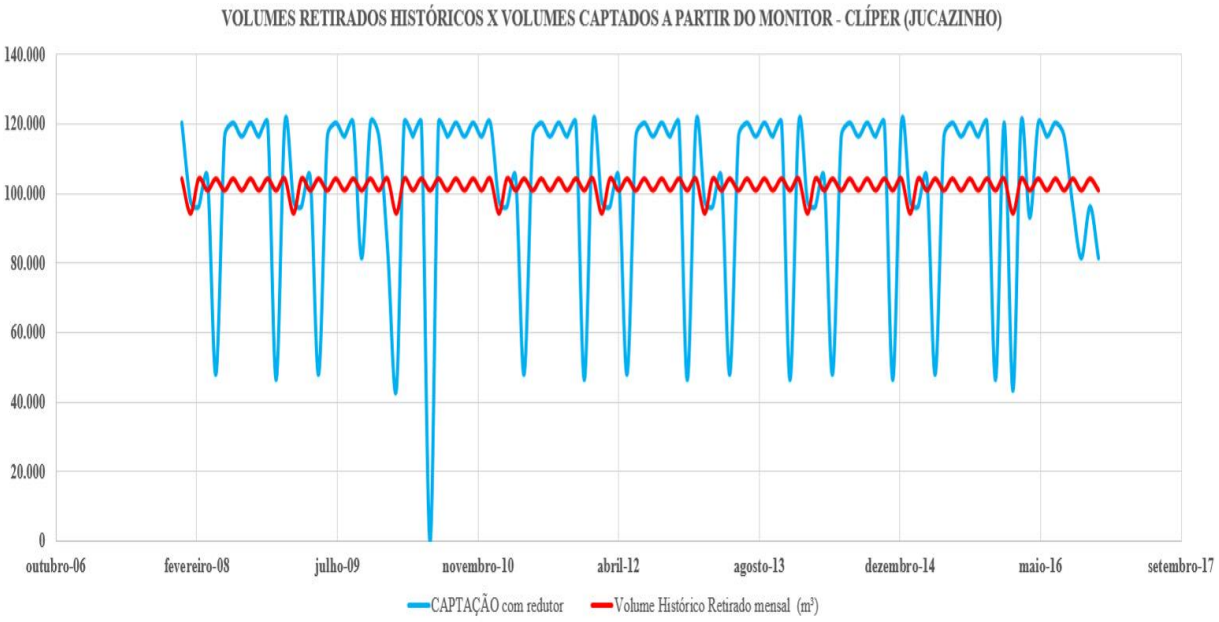



Figura I21 – Volumes históricos x volume com regra do monitor

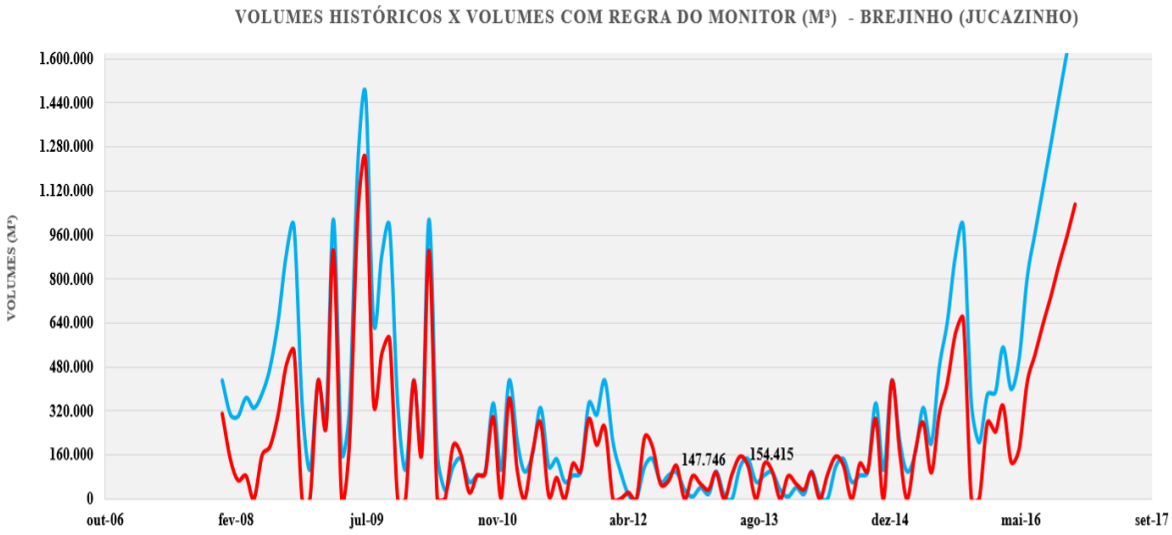



Figura I22 – Volumes retirados históricos x volume captados com regra do monitor

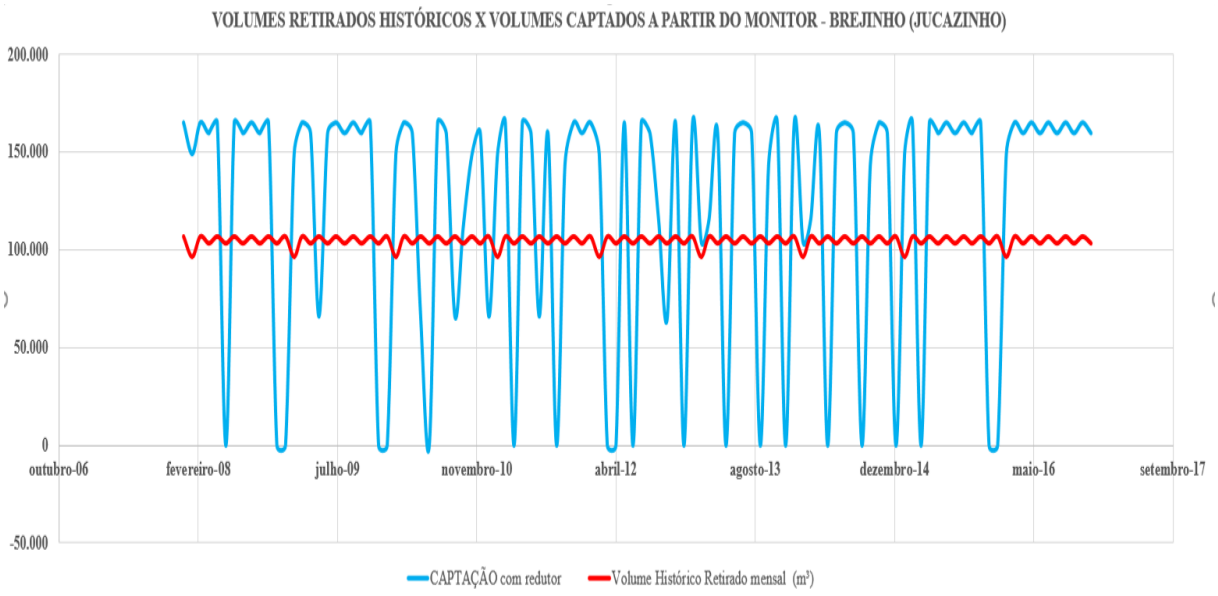



Figura I23 – Volumes históricos x volume com regra do monitor

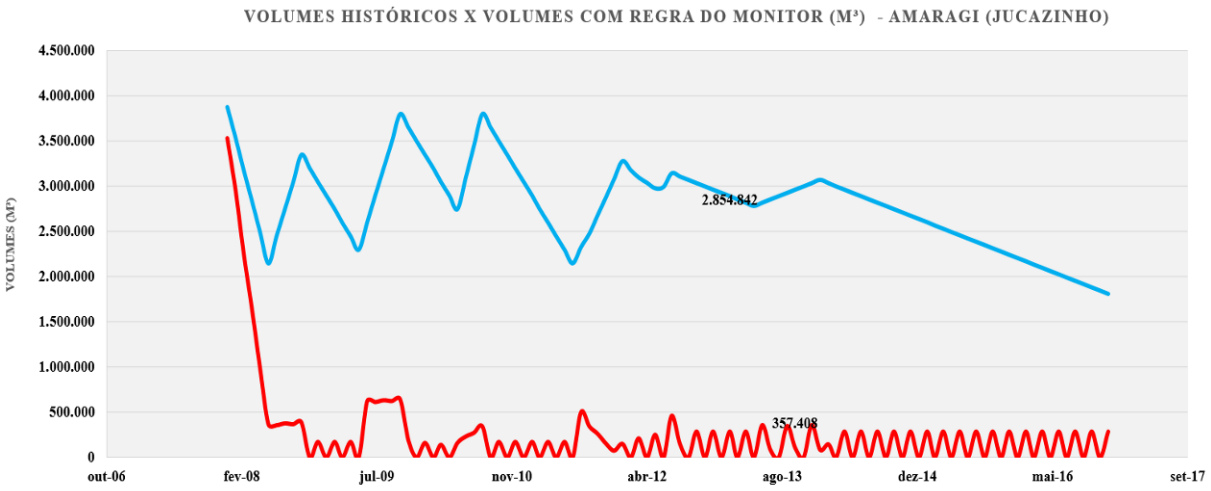



Figura I24 – Volumes retirados históricos x volume captados com regra do monitor

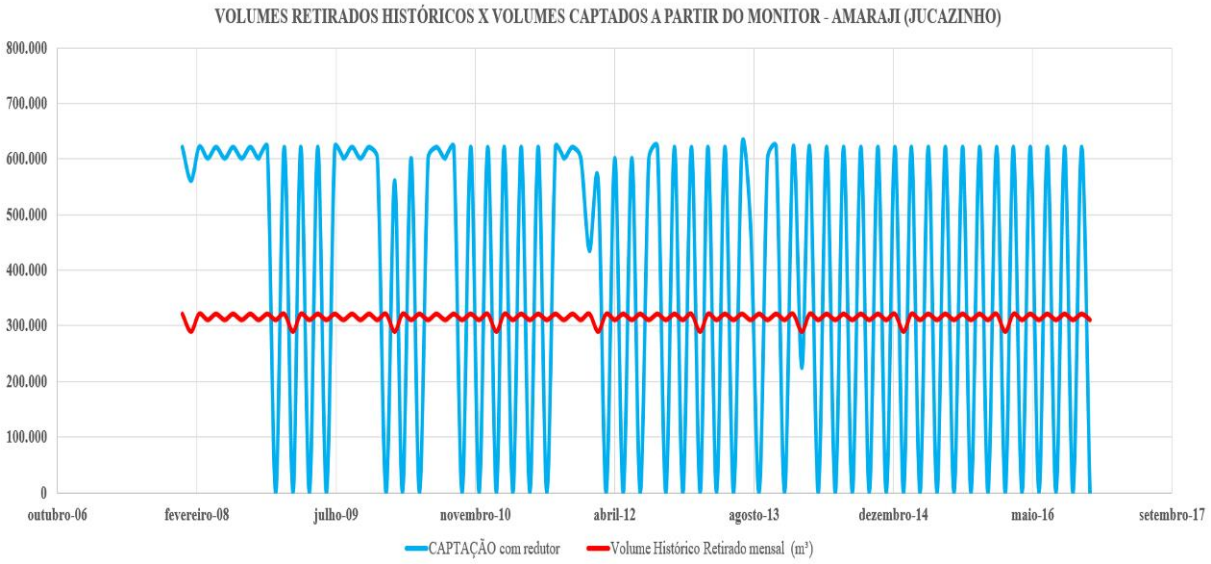



Figura I25 – Volumes históricos x volume com regra do monitor

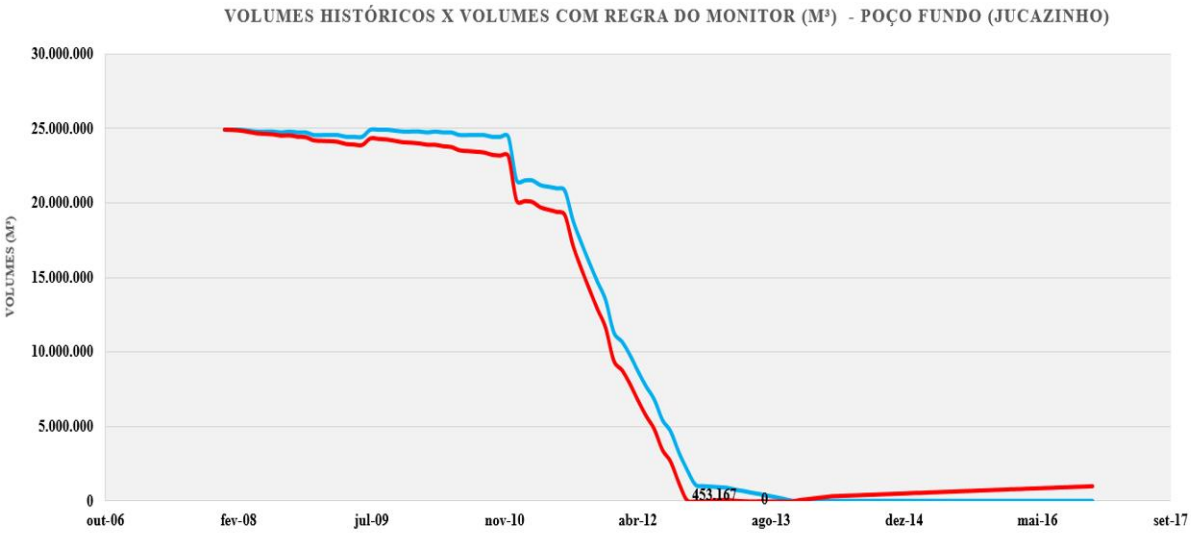



Figura I26 – Volumes retirados históricos x volume captados com regra do monitor

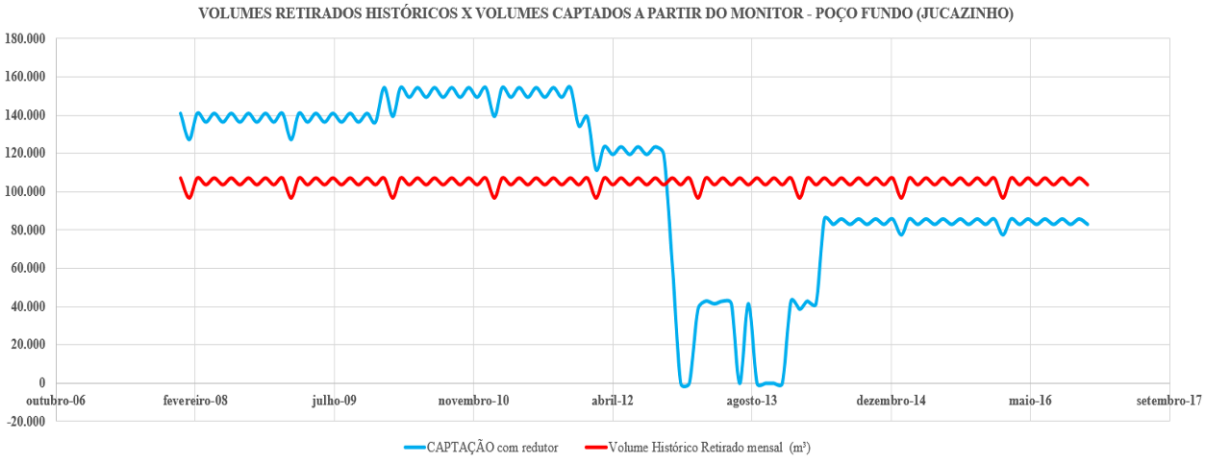



Figura I27 – Croqui esquemático dos sistemas produtor Gravatá

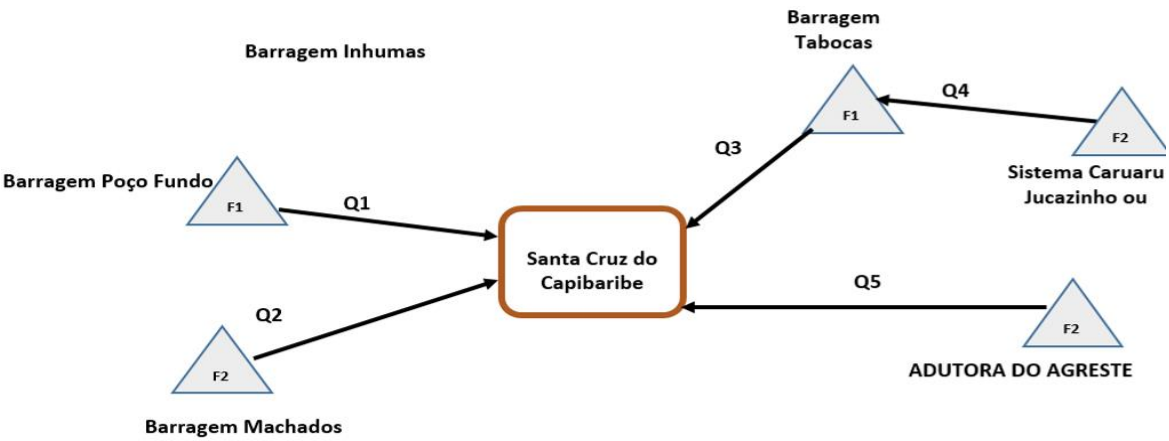



Figura I28 – Volumes históricos x volume com regra do monitor

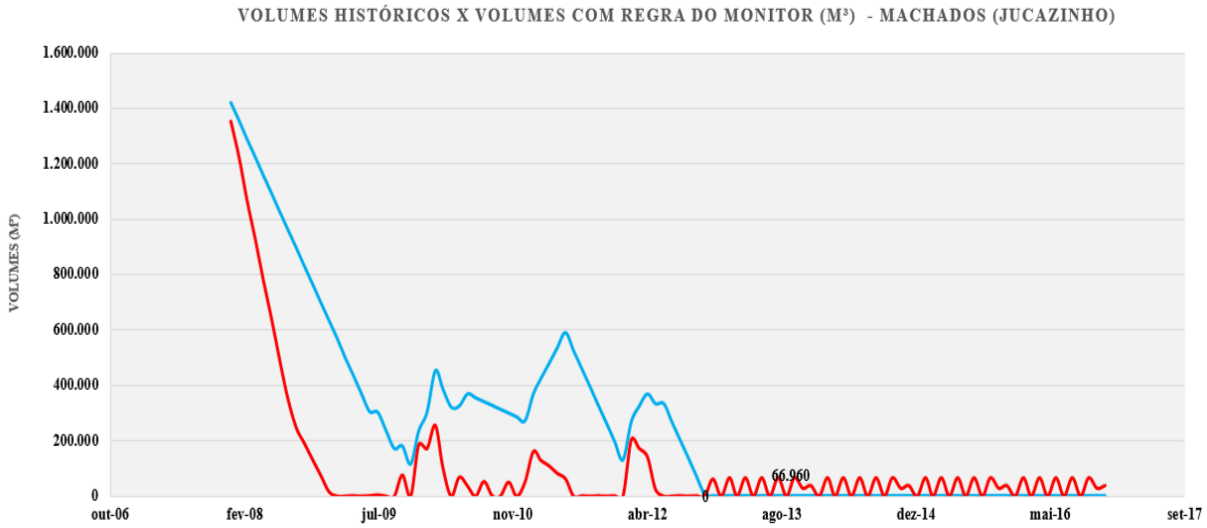



Figura I29 – Volumes retirados históricos x volume captados com regra do monitor

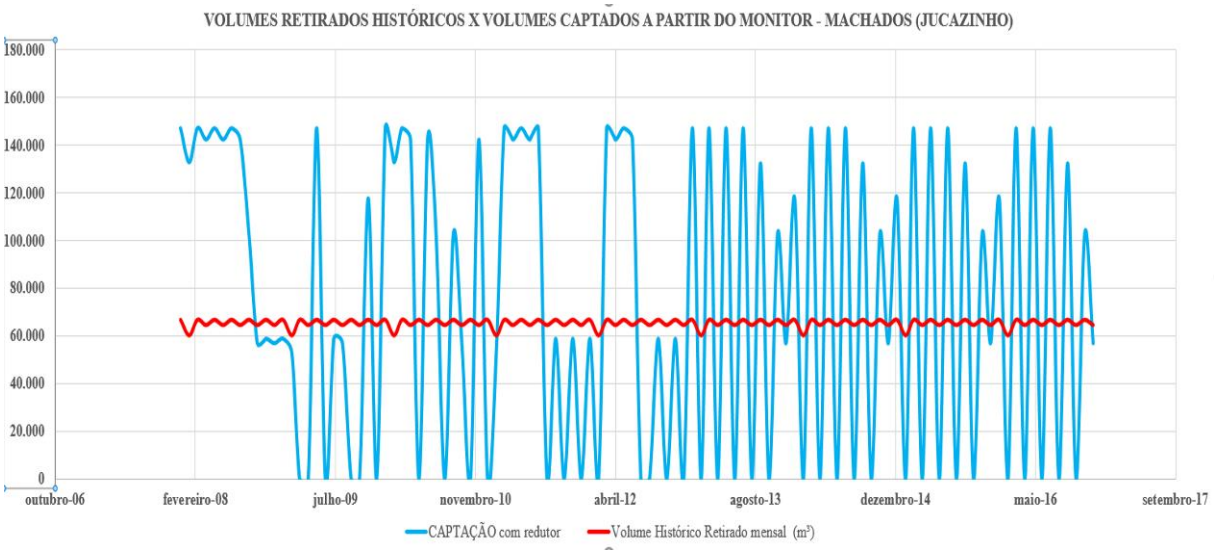



Figura I30 – Volumes históricos x volume com regra do monitor

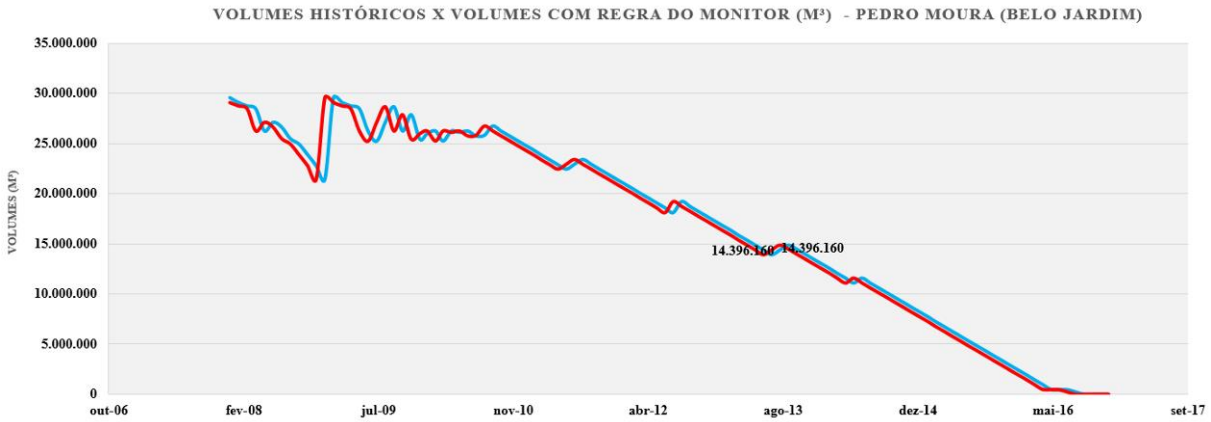



Figura I31 – Volumes retirados históricos x volume captados com regra do monitor

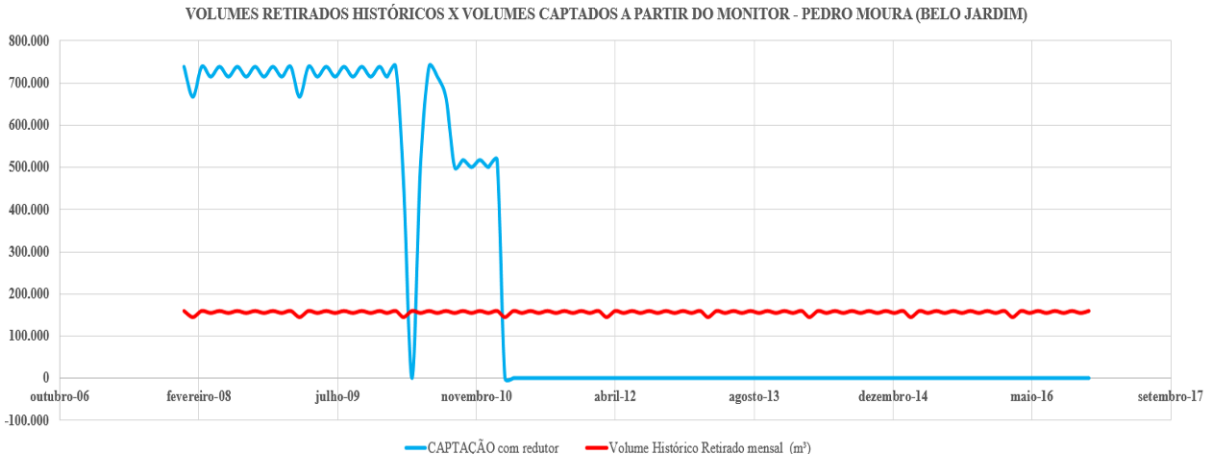



Figura I27 – Croqui esquemático dos sistemas produtor Belo Jardim

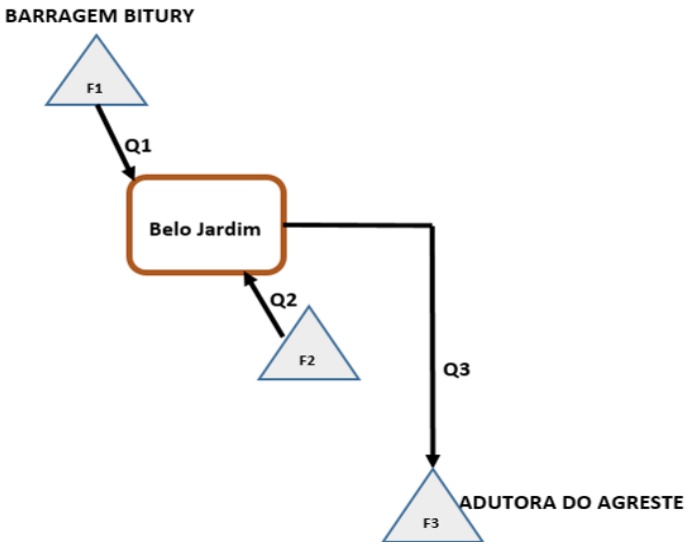



Figura I32 – Volumes históricos x volume com regra do monitor

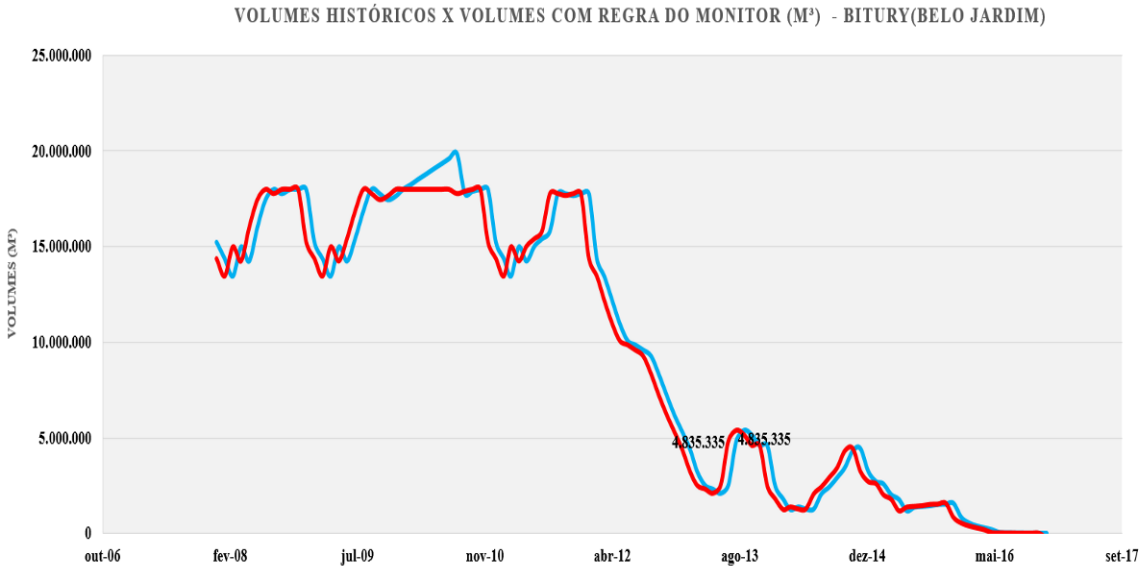



Figura I33 – Volumes retirados históricos x volume captados com regra do monitor

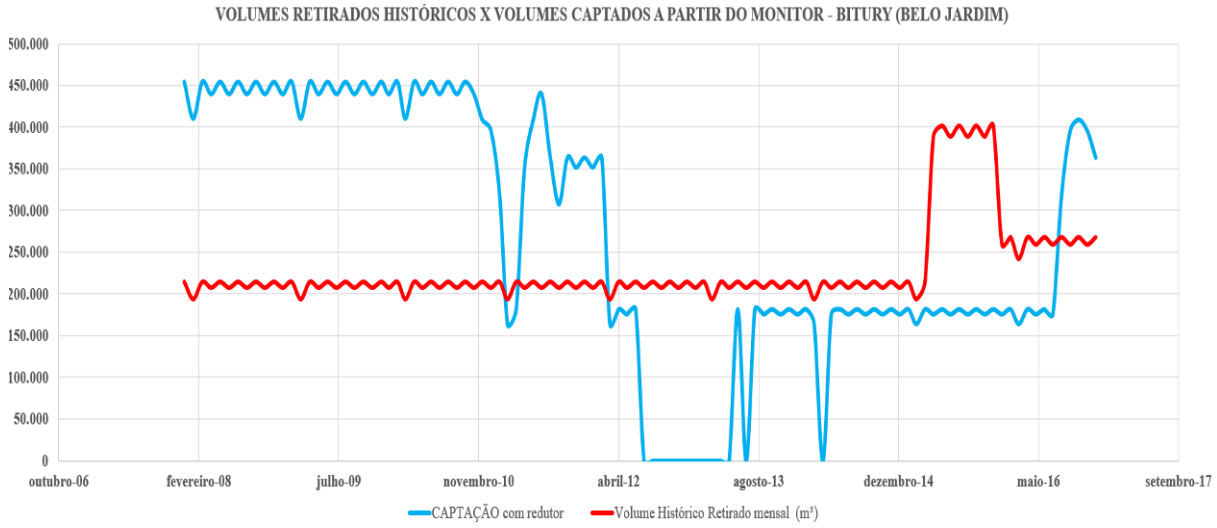



Figura I34 – Volumes históricos x volume com regra do monitor

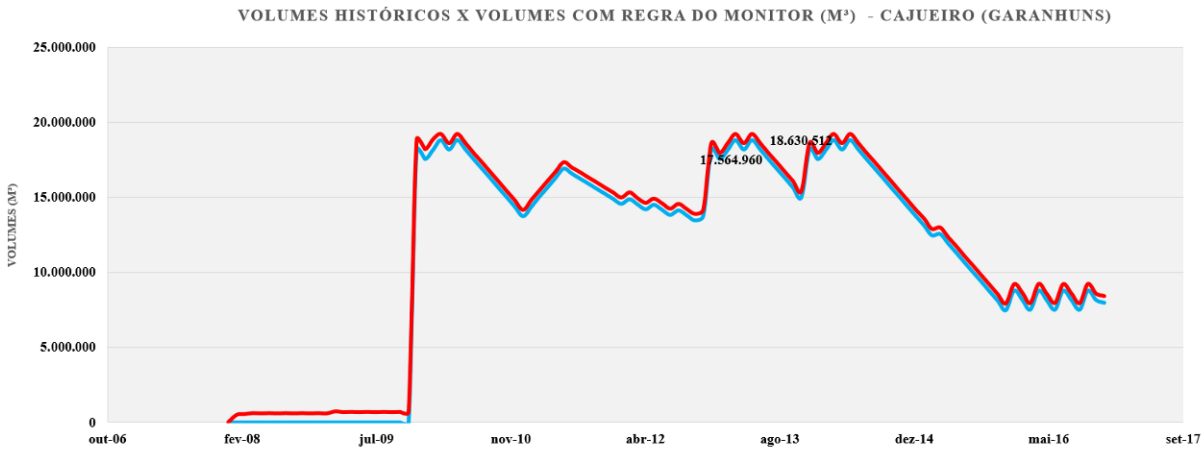



Figura I35 – Volumes retirados históricos x volume captados com regra do monitor

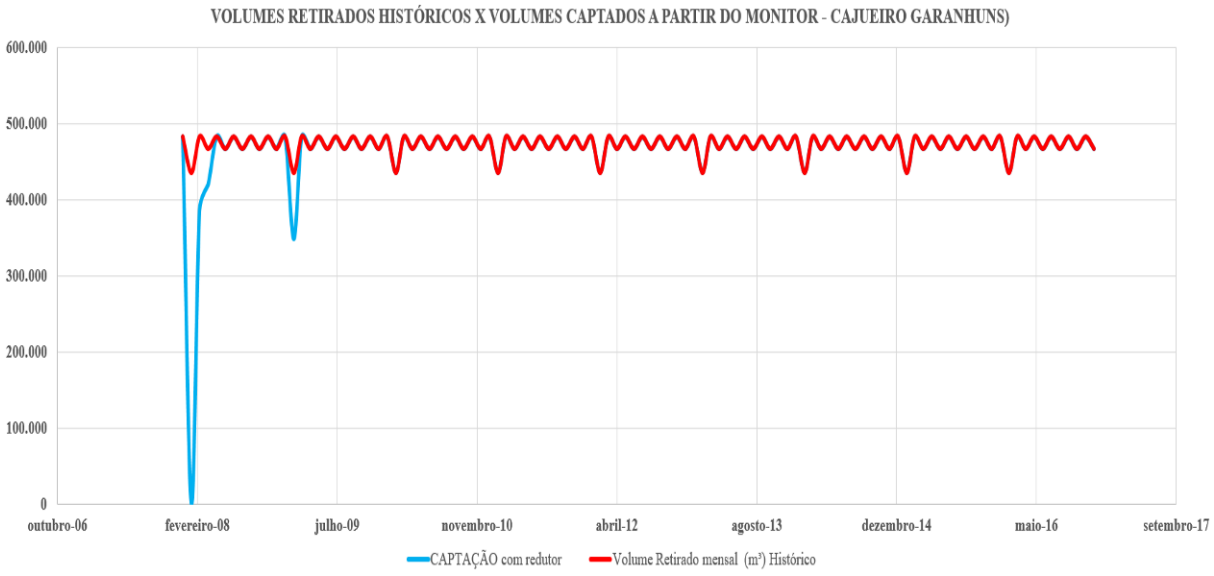



Figura I36 – Volumes históricos x volume com regra do monitor

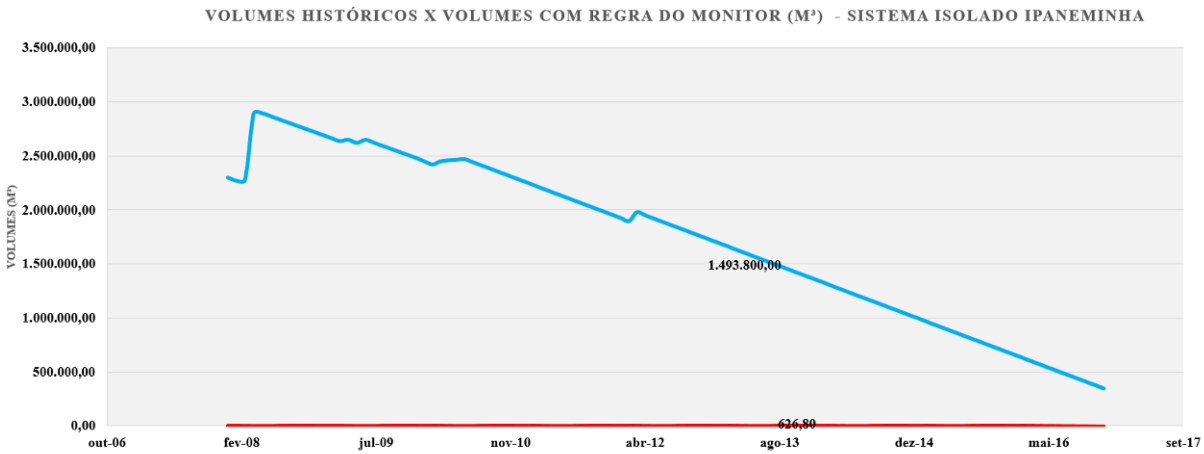



Figura I37 – Volumes retirados históricos x volume captados com regra do monitor

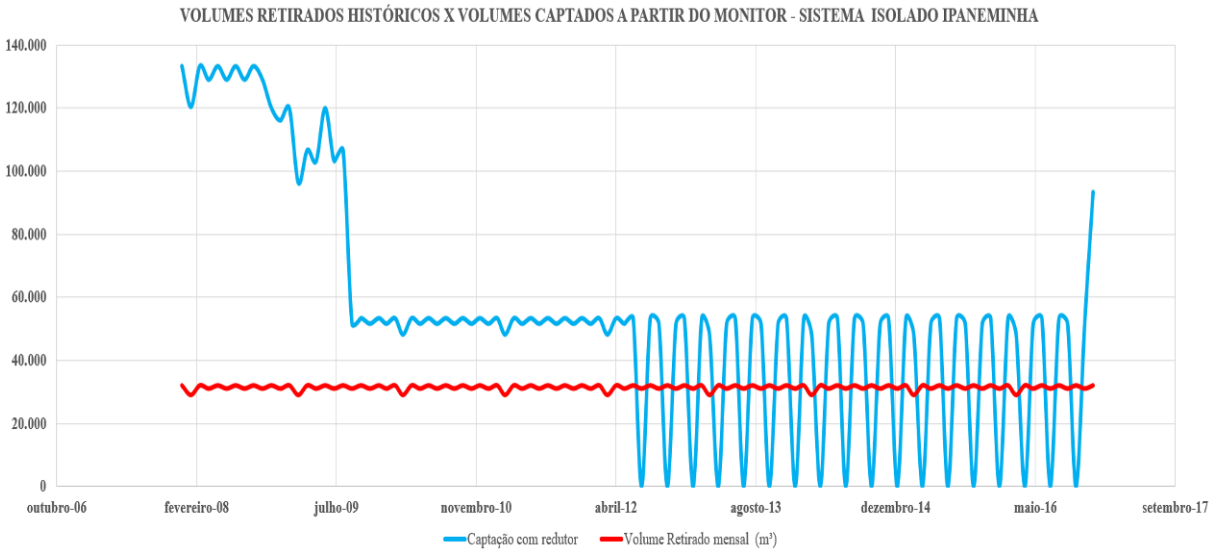



Figura I38 - Volumes históricos x volume com regra do monitor

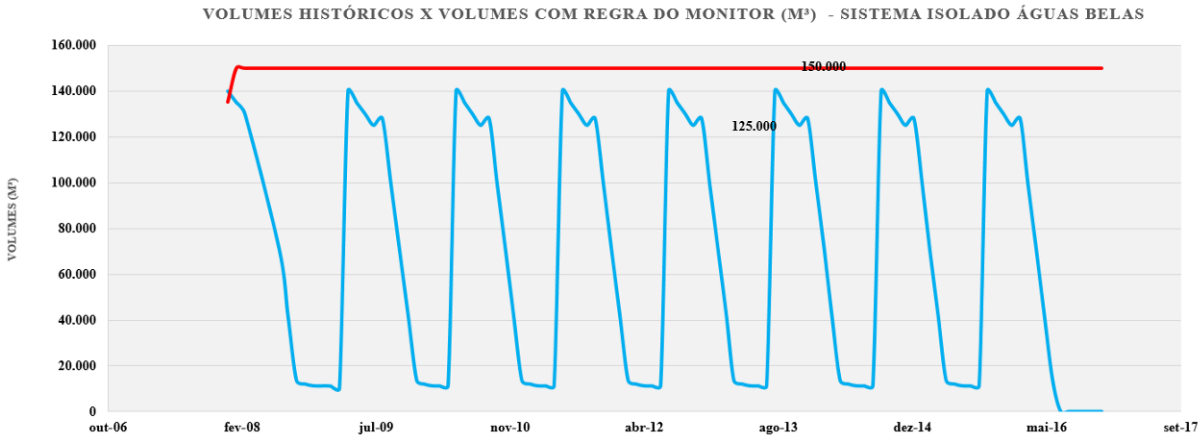



Figura I39 – Volumes retirados históricos x volume captados com regra do monitor

Figura I40 – Croqui esquemático dos sistemas produtor Águas Belas

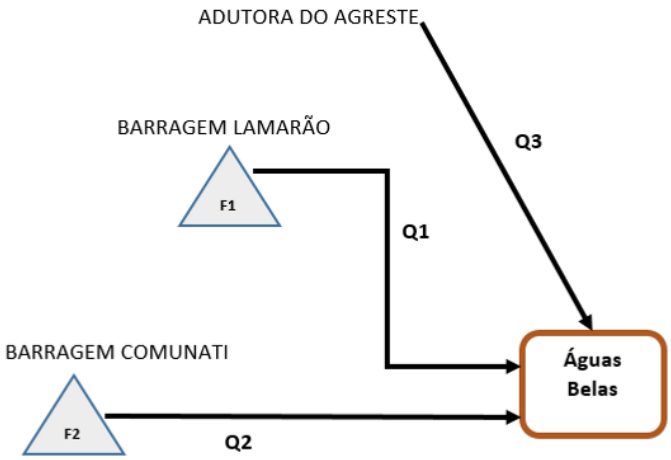



Figura I41 - Volumes históricos x volume com regra do monitor

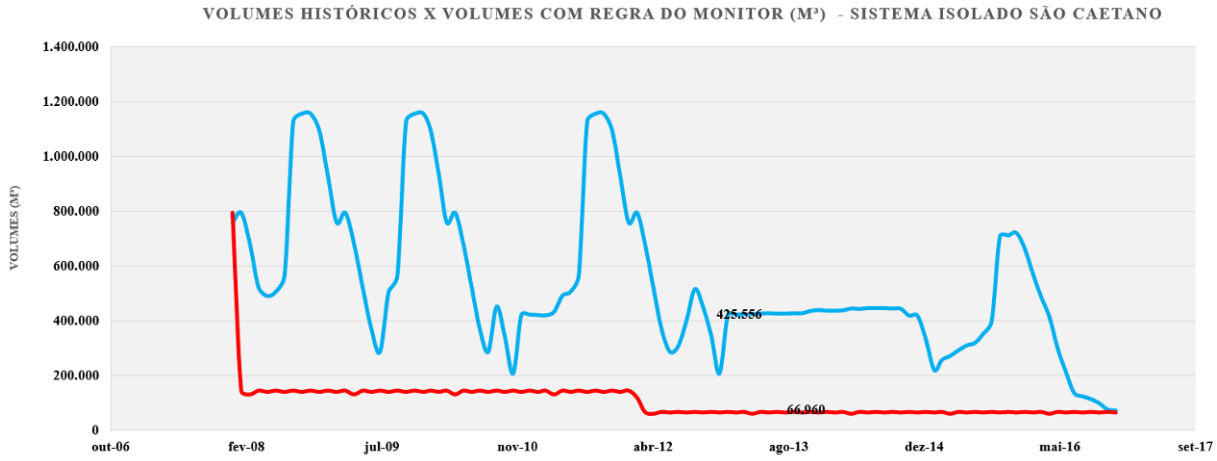



Figura I42 – Volumes retirados históricos x volume captados com regra do monitor

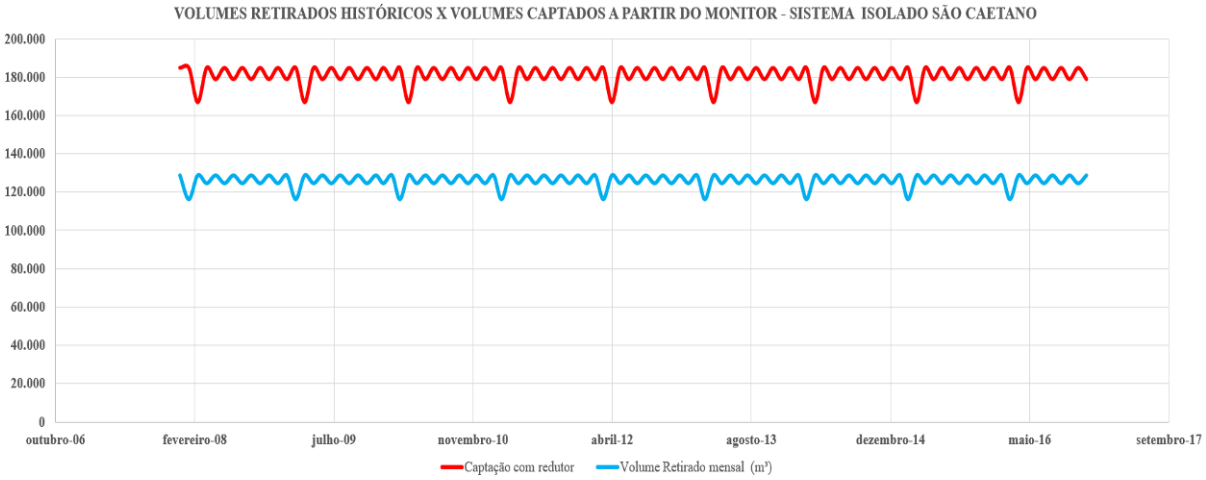



Figura I43 – Croqui esquemático dos sistemas produtor São Caetano

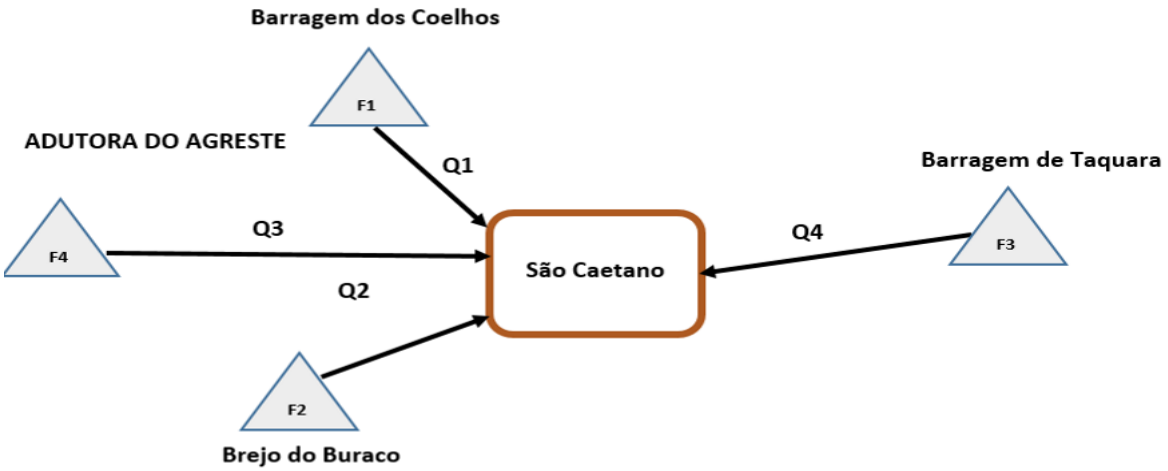



Figura I44 - Volumes históricos x volume com regra do monitor

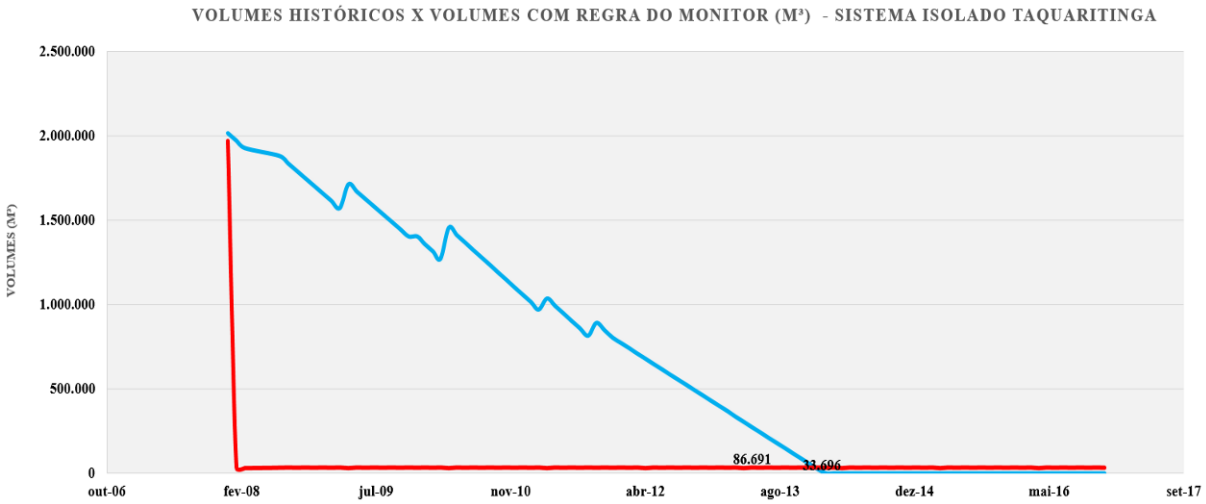



Figura I45 – Volumes retirados históricos x volume captados com regra do monitor

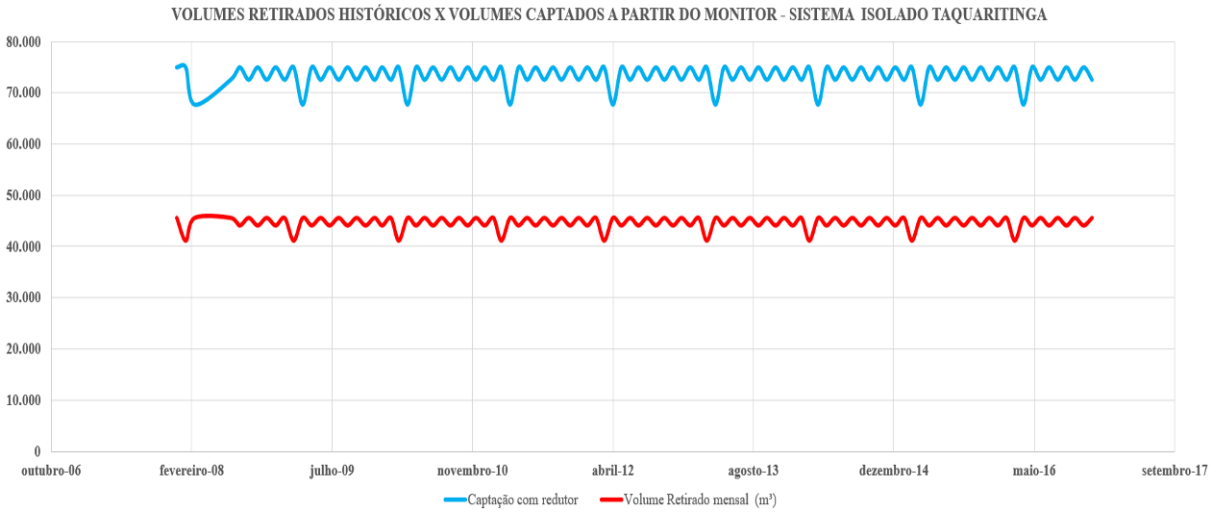



Figura I46 – Croqui esquemático dos sistemas produtores de Taquaritinga do Norte

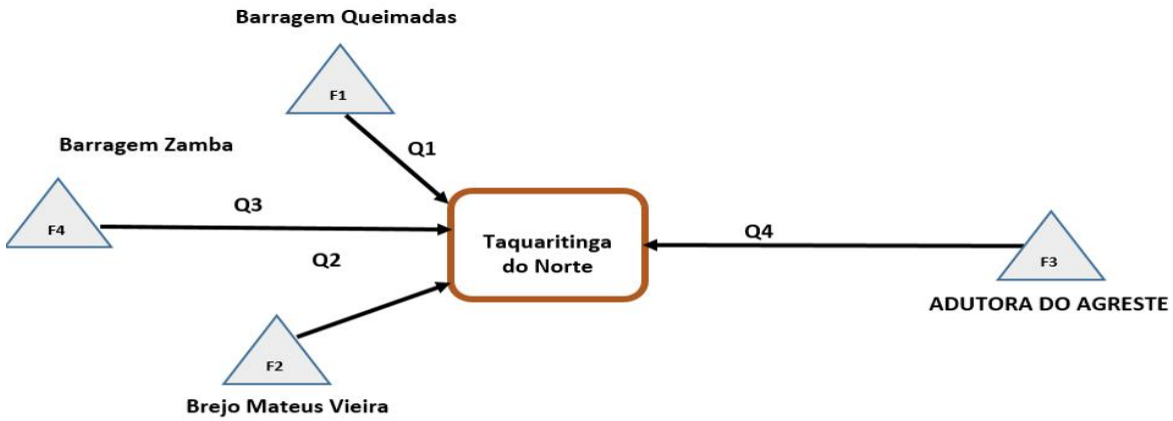



Figura I47 - Volumes históricos x volume com regra do monitor – Bom Conselho

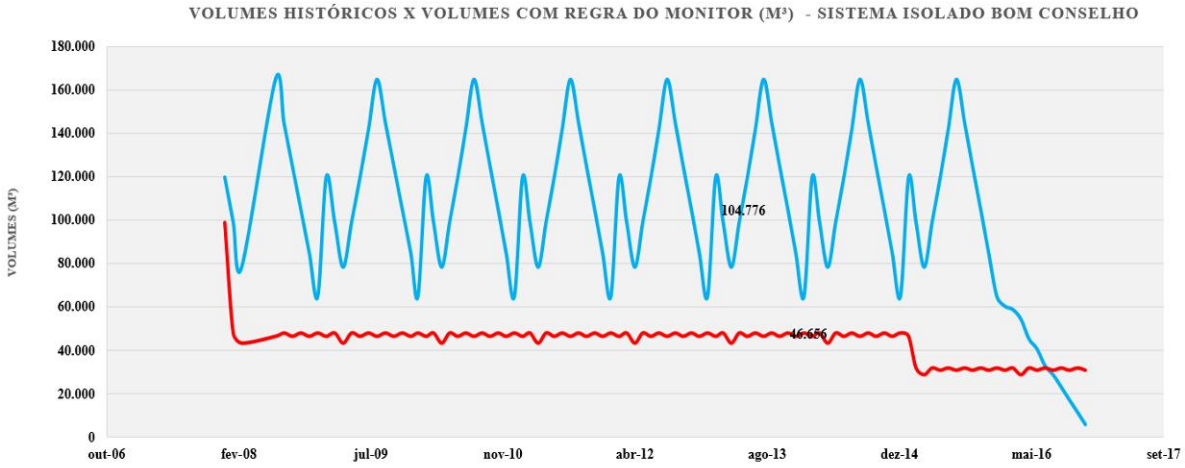



Figura I48 – Volumes retirados históricos x volume captados com regra do monitor

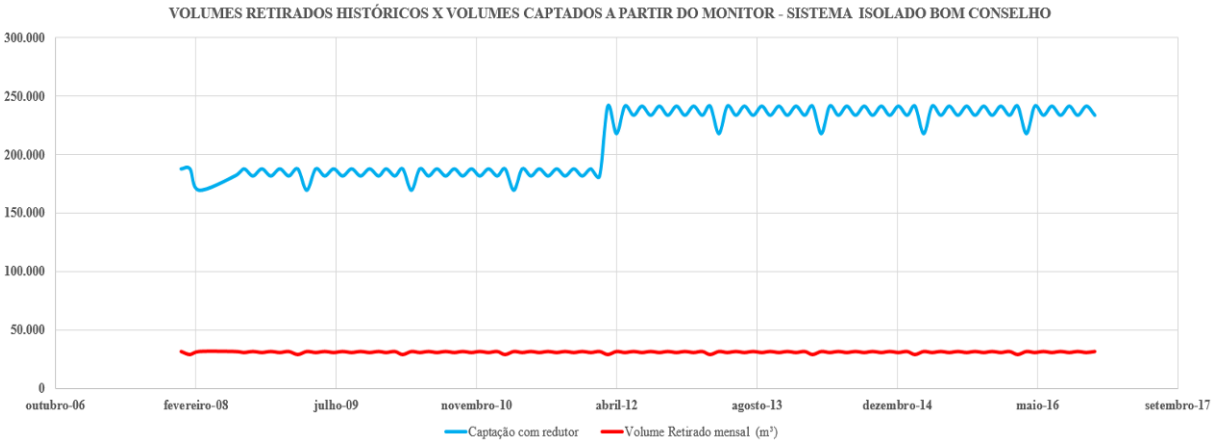



Figura I49 – Croqui esquemático dos sistemas produtores de Bom Conselho

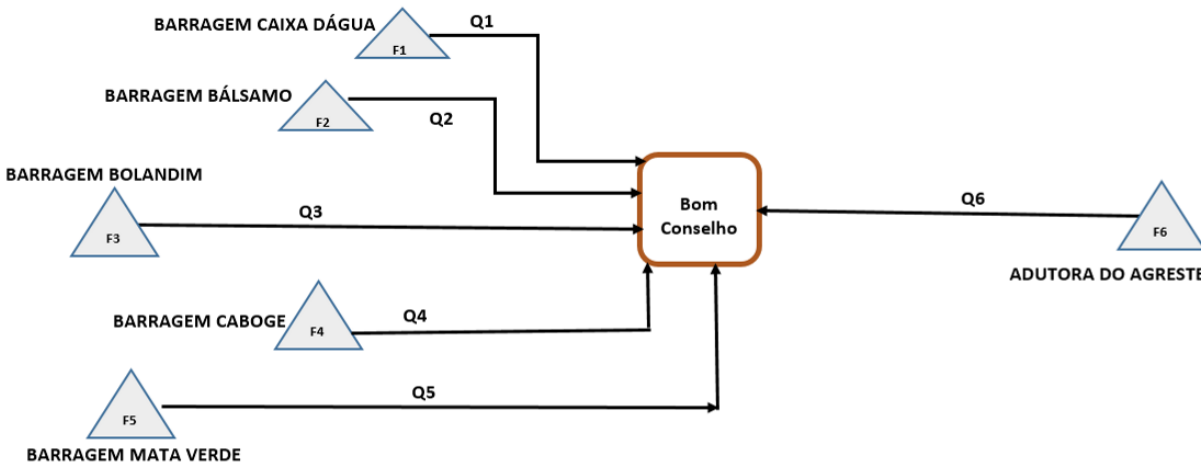



Figura I50 - Volumes históricos x volume com regra do monitor

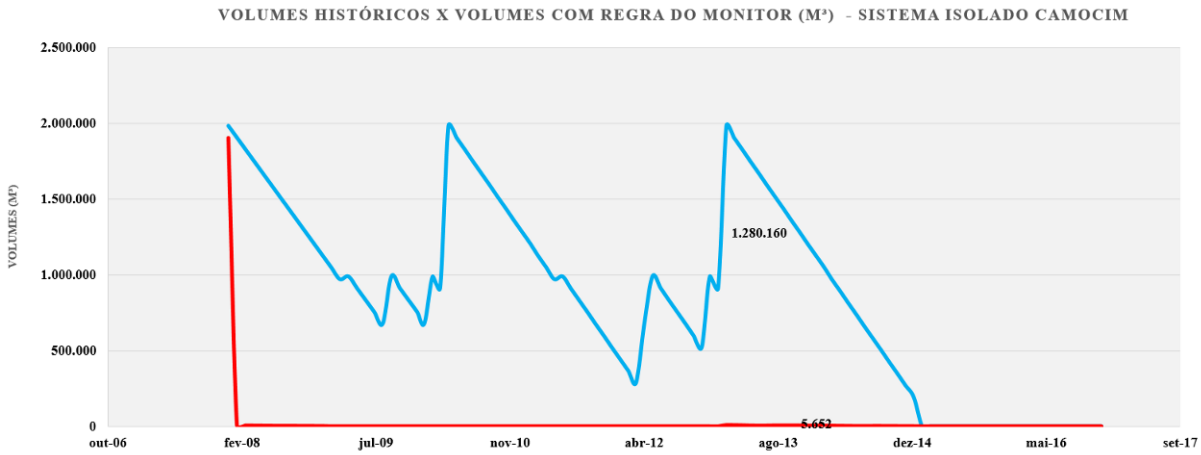



Figura I51 – Volumes retirados históricos x volume captados com regra do monitor

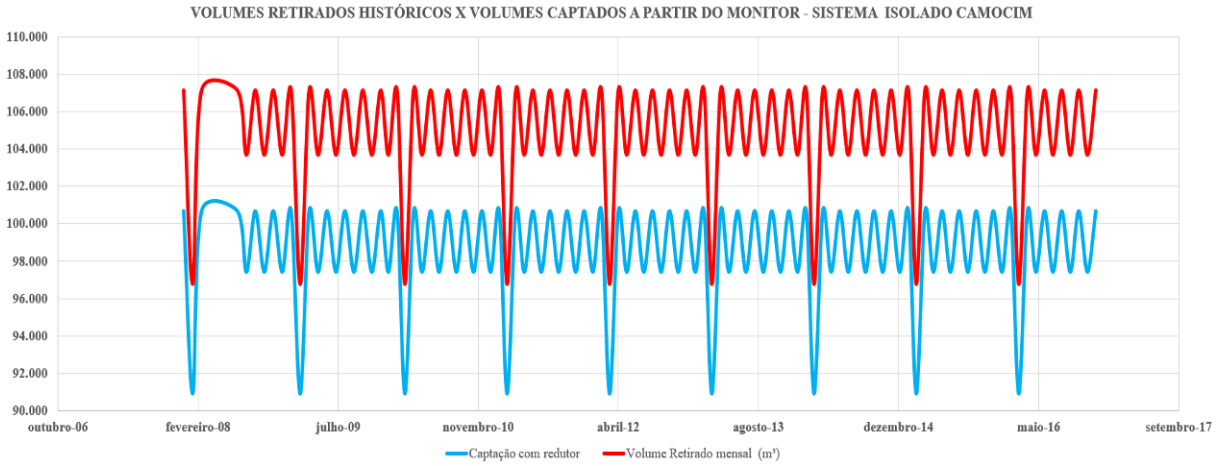



Figura I52 – Croqui esquemático dos sistemas produtores de Camocim de São Félix

Figura I53 - Volumes históricos x volume com regra do monitor

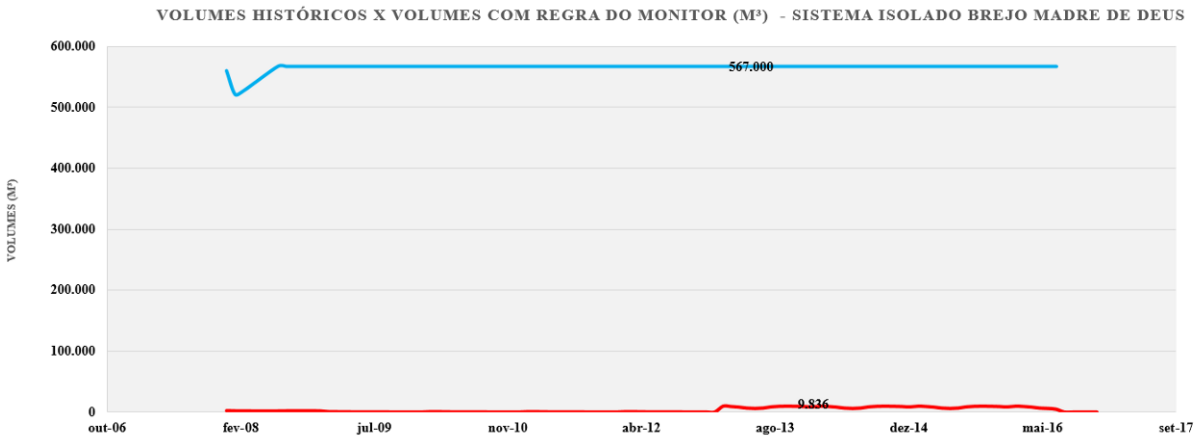



Figura I54 – Volumes retirados históricos x volume captados com regra do monitor

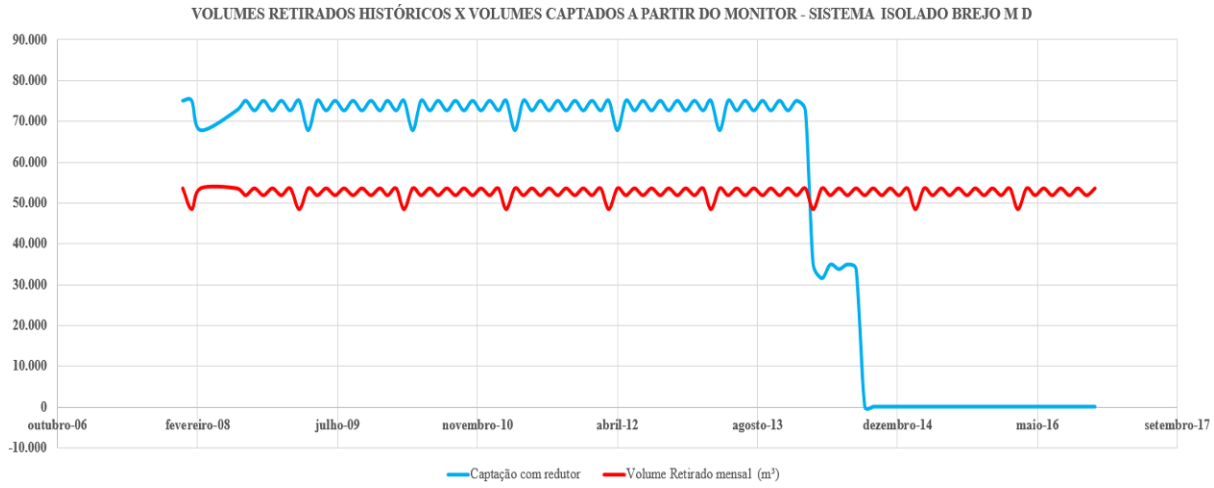



Figura I55 – Croqui esquemático dos sistemas produtores de Brejo da Madre de Deus

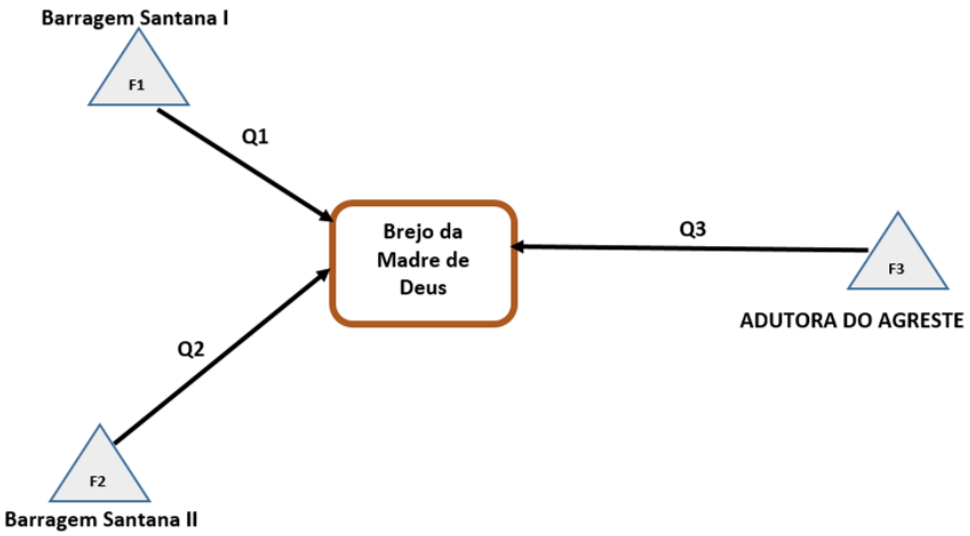



Figura I56 - Volumes históricos x volume com regra do monitor

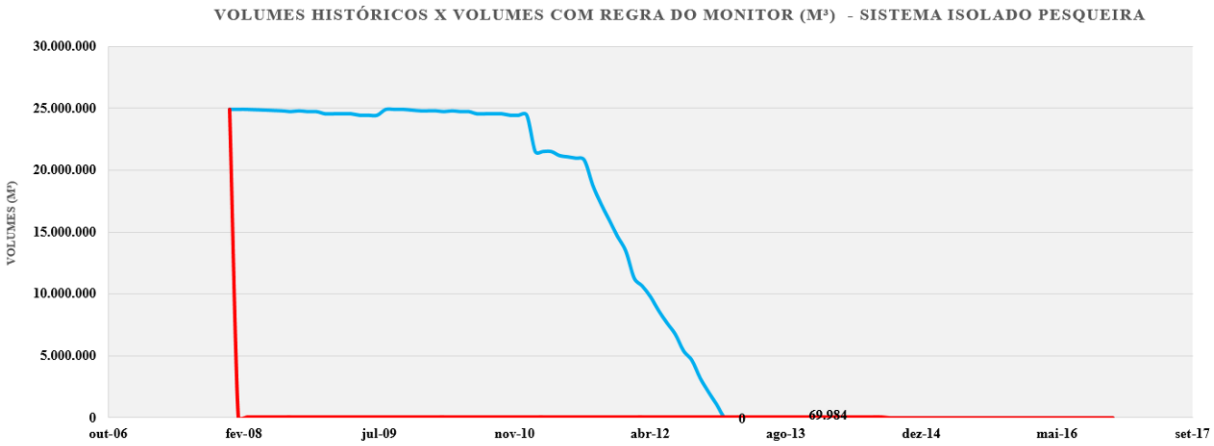



Figura I57 – Volumes retirados históricos x volume captados com regra do monitor

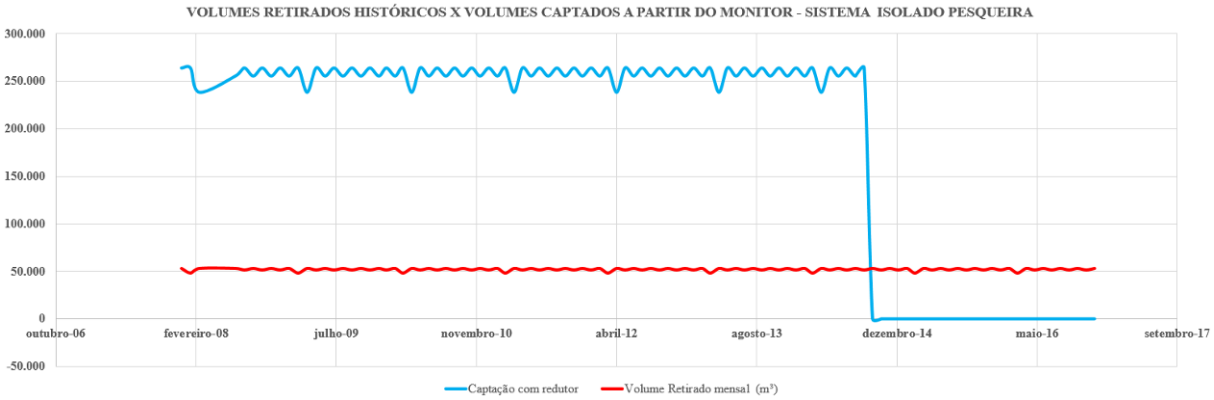



Figura I58 – Croqui esquemático dos sistemas produtores de Pesqueira

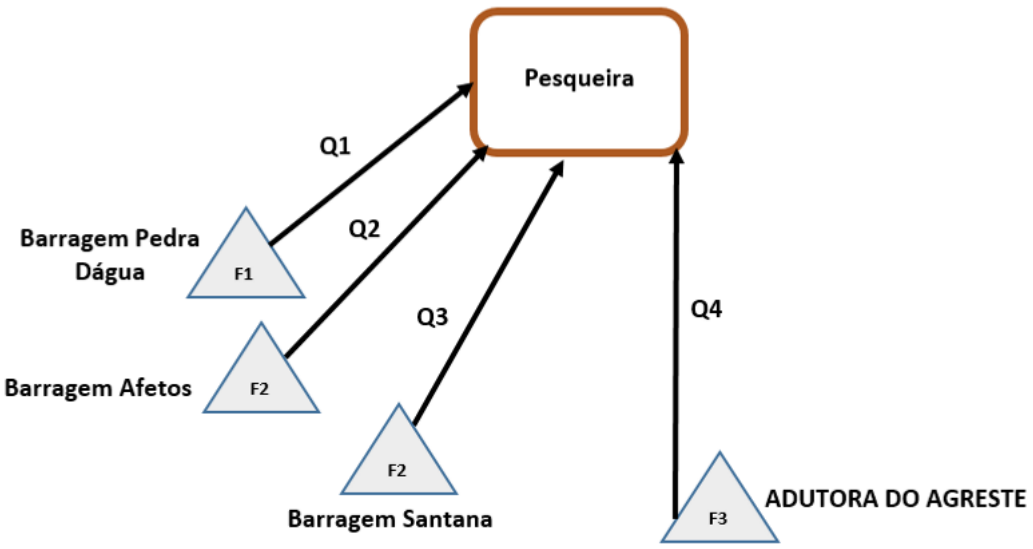



Figura I59 - Volumes históricos x volume com regra do monitor

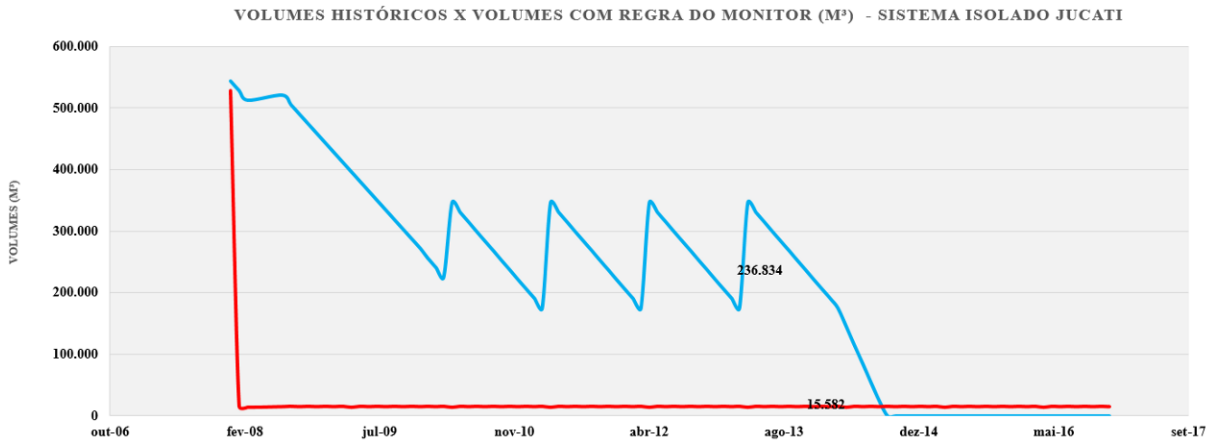



Figura I60 – Volumes retirados históricos x volume captados com regra do monitor

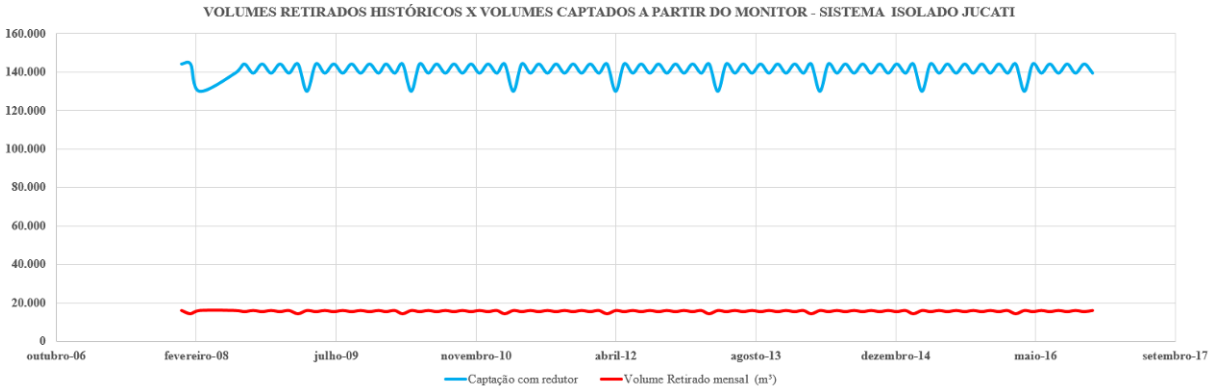



Figura I61 – Croqui esquemático dos sistemas produtores de Jucati

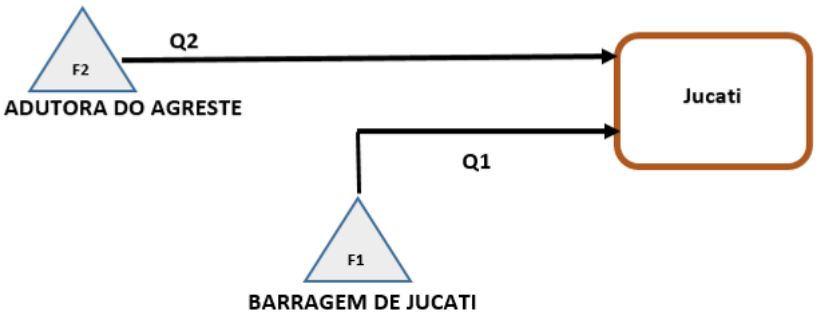



Figura I62 - Volumes históricos x volume com regra do monitor

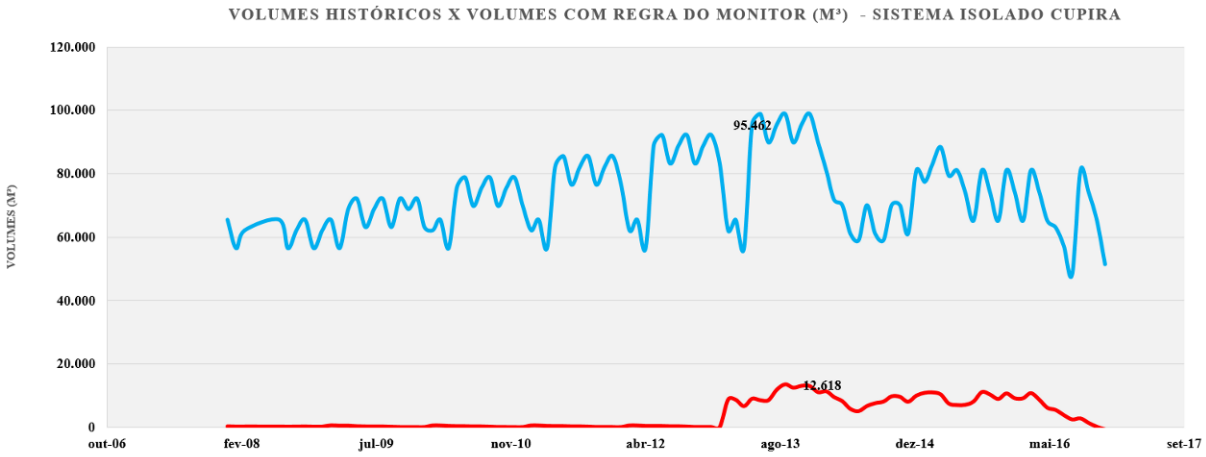



Figura I63 – Volumes retirados históricos x volume captados com regra do monitor

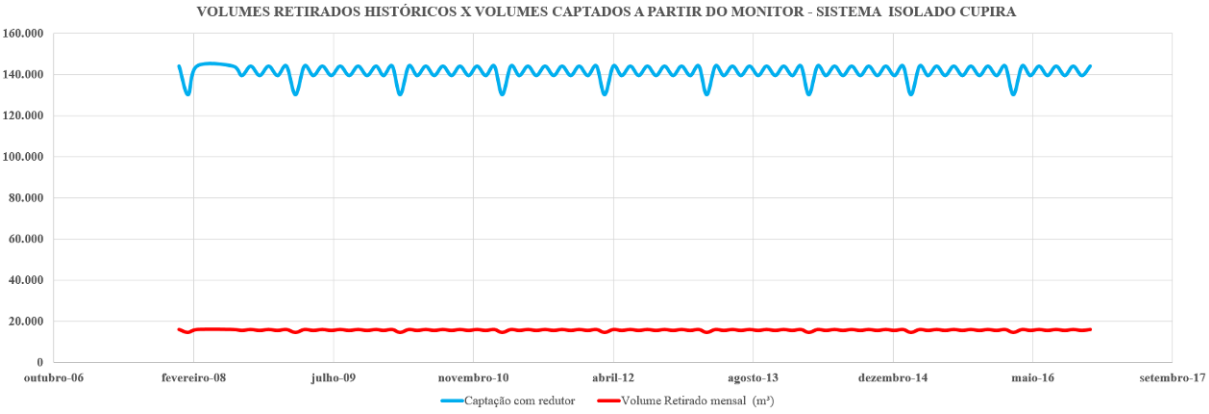



Figura I64 - Volumes históricos x volume com regra do monitor

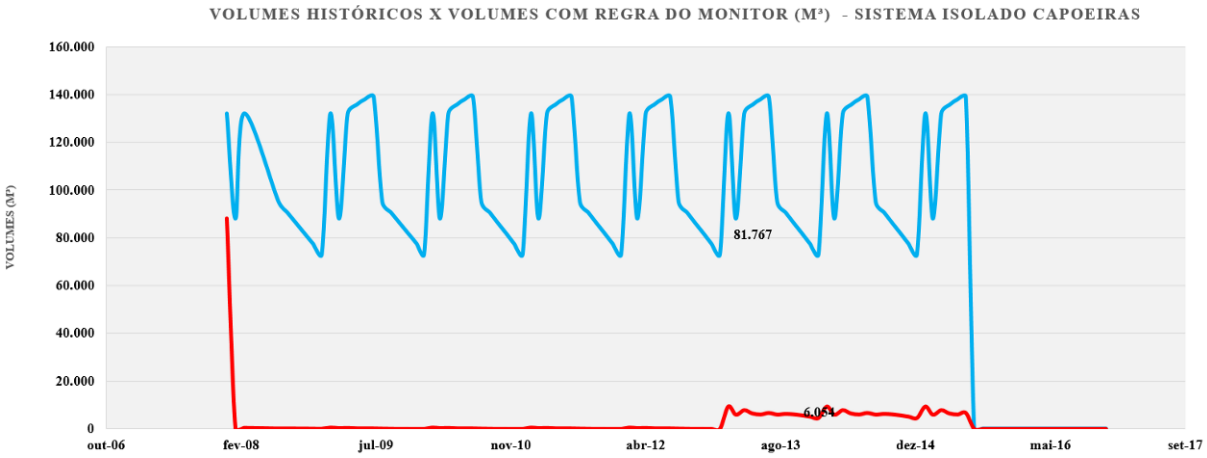



Figura I65 – Volumes retirados históricos x volume captados com regra do monitor

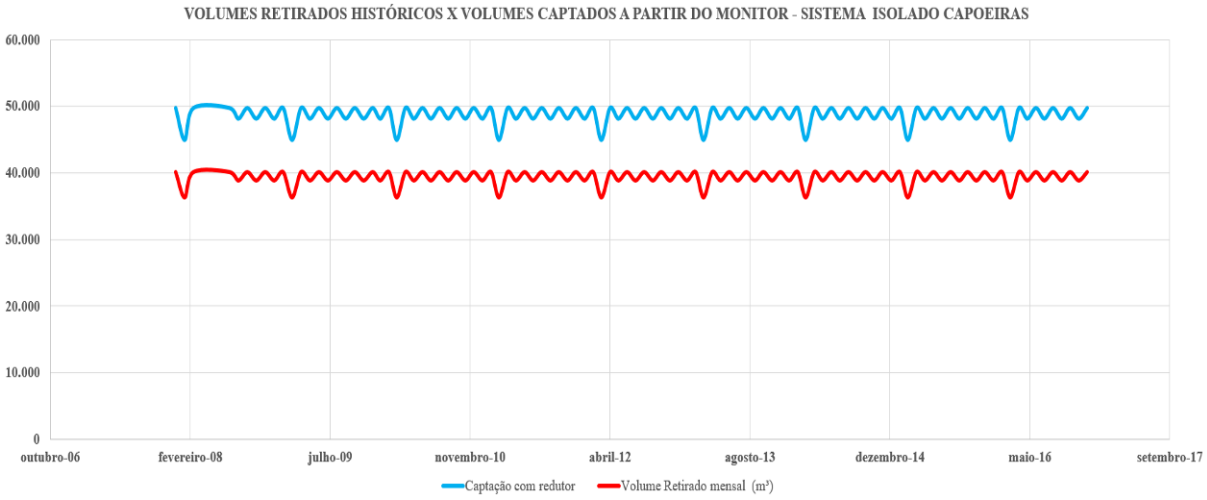



Figura I66 – Croqui esquemático dos sistemas produtores de Capoeiras

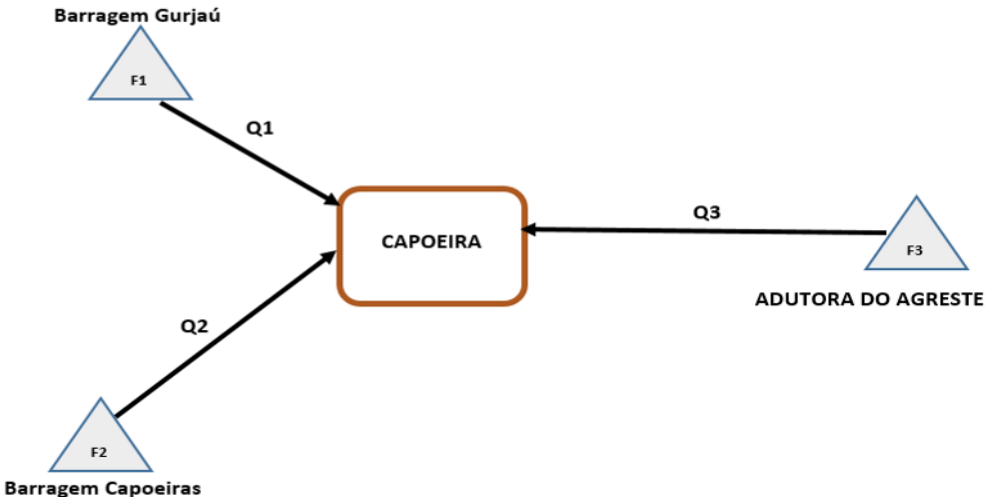



Figura I67 - Volumes históricos x volume com regra do monitor

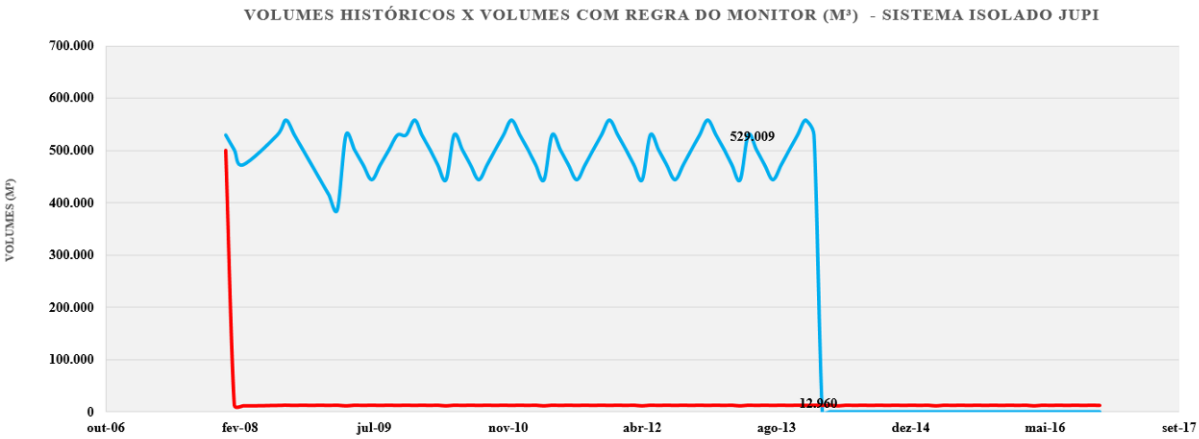



Figura I68 – Volumes retirados históricos x volume captados com regra do monitor

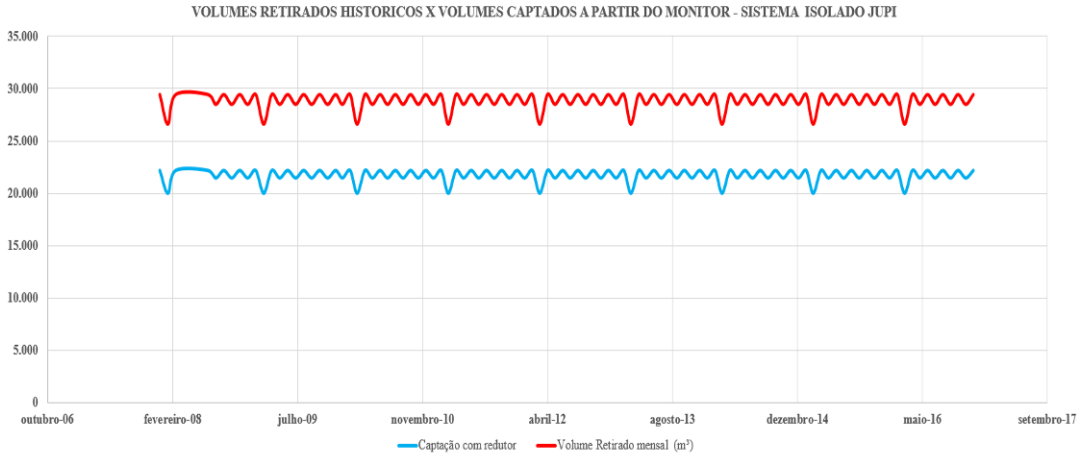



Figura I69 – Croqui esquemático dos sistemas produtores de Jupi

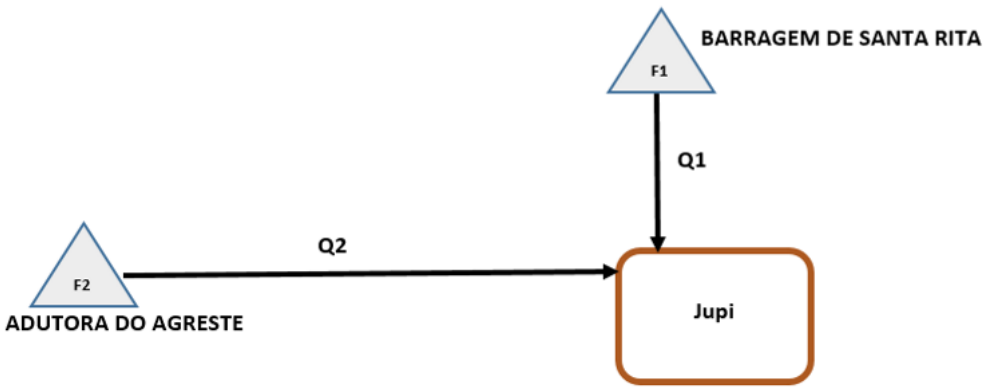



Figura I70 - Volumes históricos x volume com regra do monitor

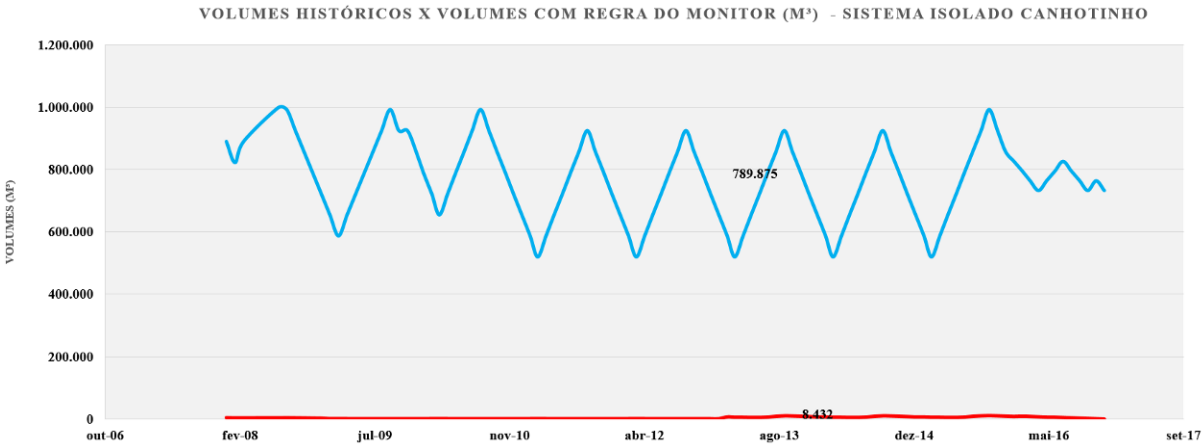



Figura I71 – Volumes retirados históricos x volume captados com regra do monitor

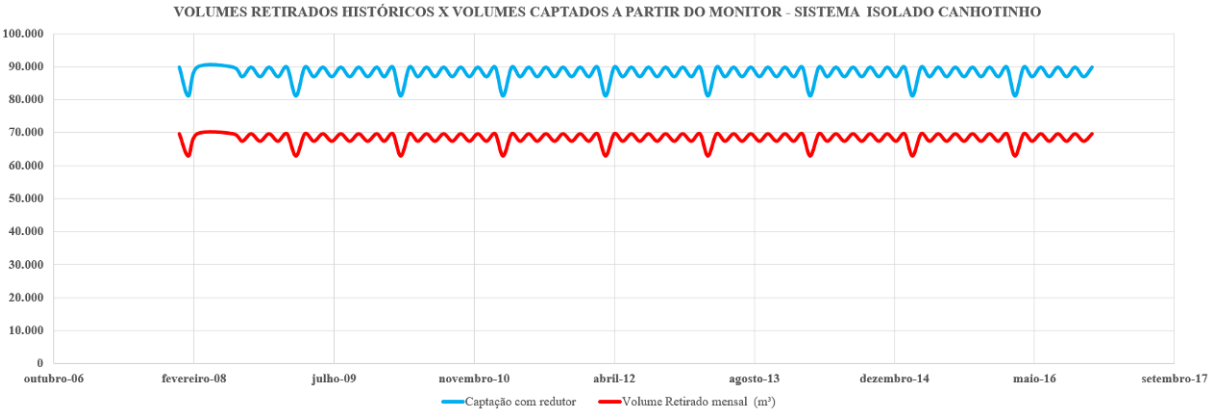



Figura I72 – Croqui esquemático dos sistemas produtores de Canhotinho

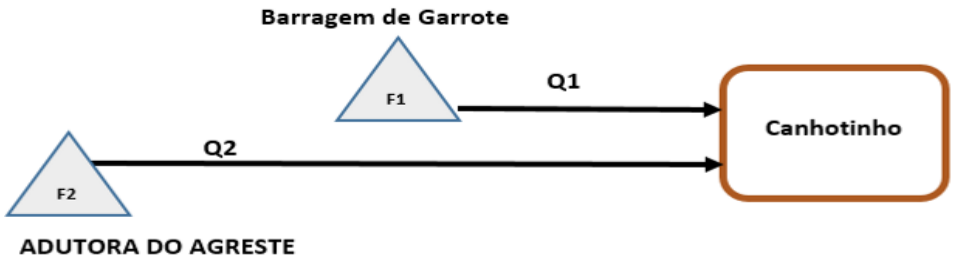



Figura I73 - Volumes históricos x volume com regra do monitor Panelas

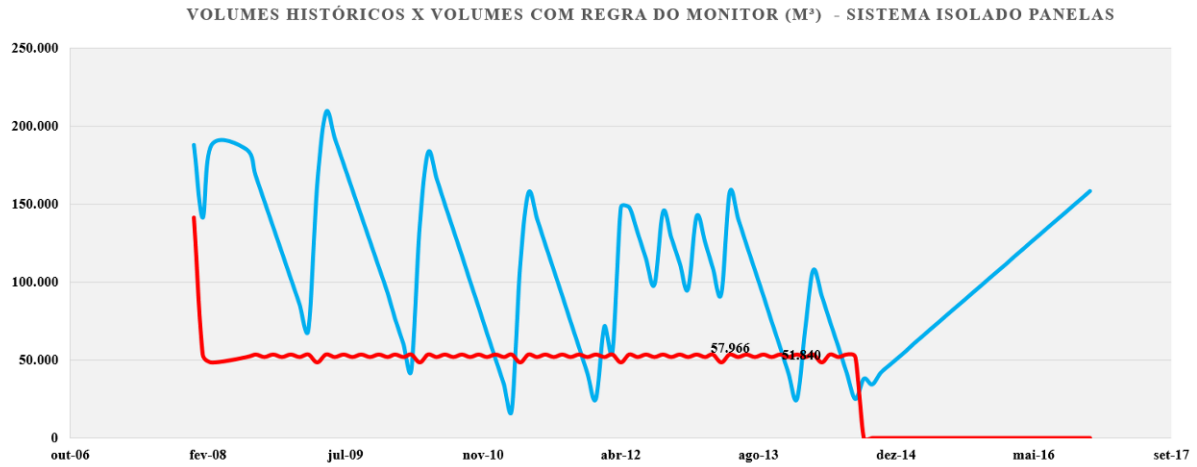



Figura I74 – Volumes retirados históricos x volume captados com regra do monitor

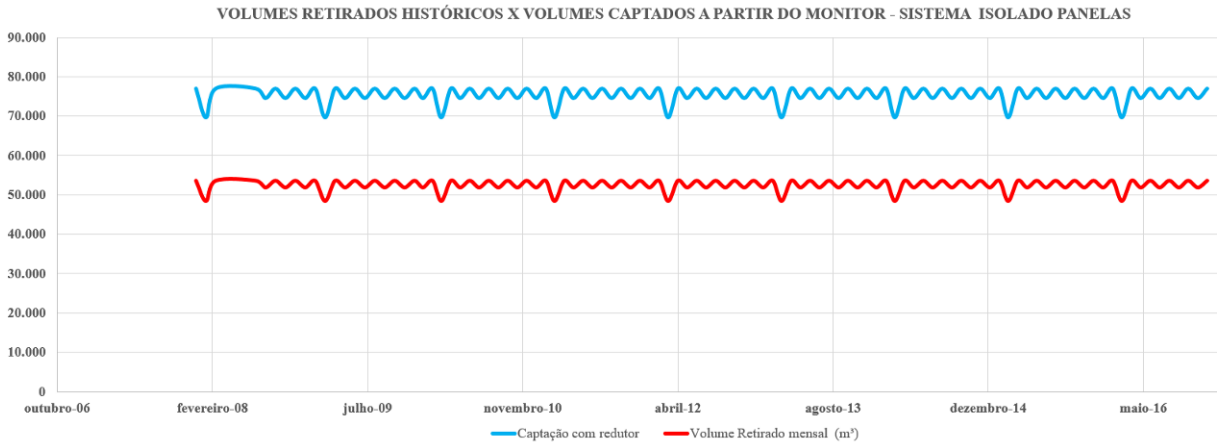



Figura I75 – Croqui esquemático dos sistemas produtores de Canhotinho

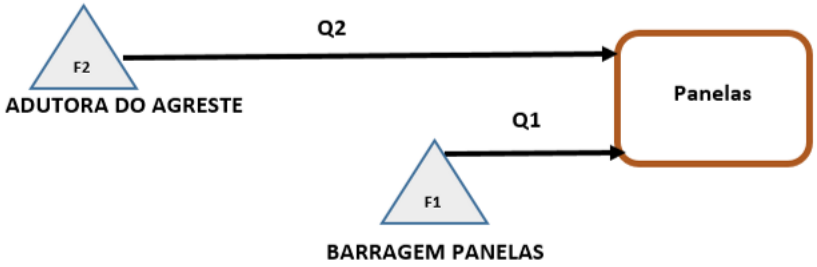



Figura I76 - Volumes históricos x volume com regra do monitor

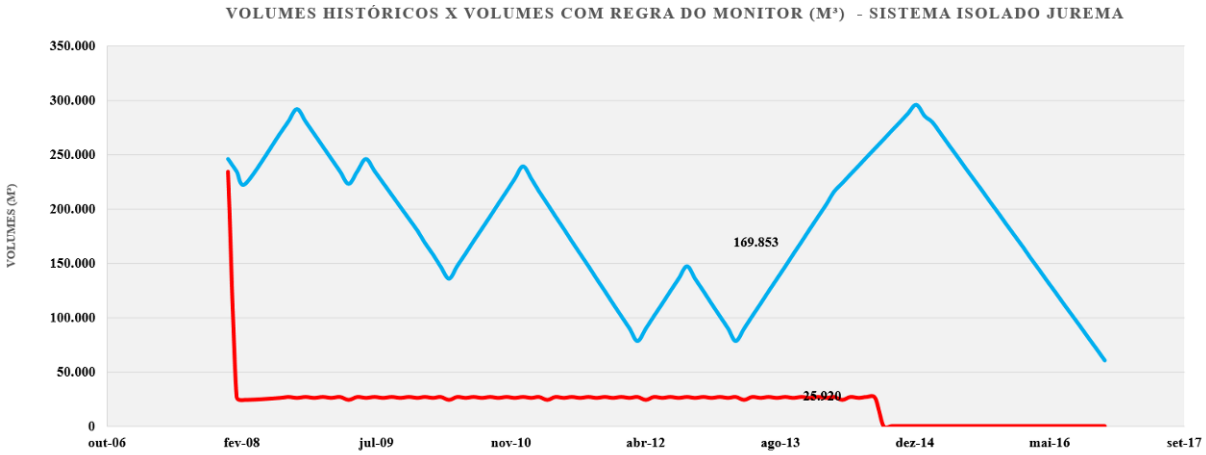



Figura I77 – Volumes retirados históricos x volume captados com regra do monitor

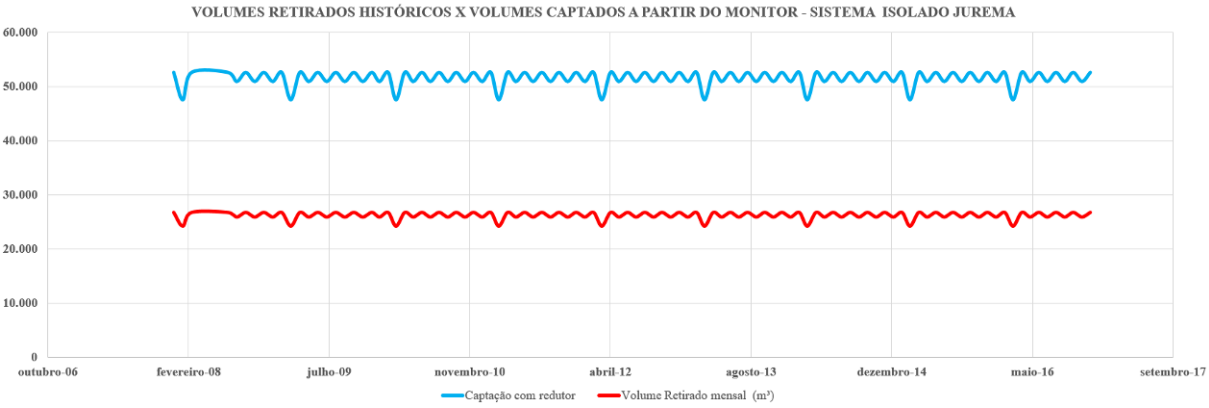



Figura I78 – Croqui esquemático dos sistemas produtores de Jurema

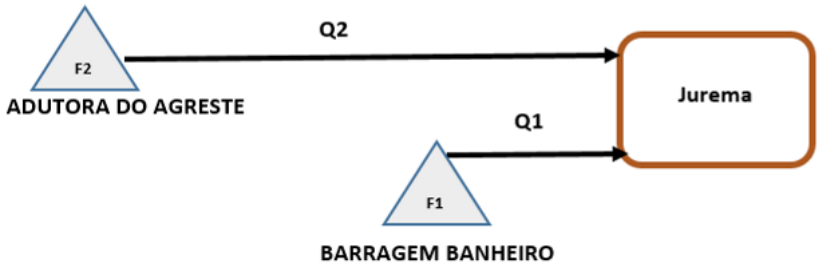



Figura I79 - Volumes históricos x volume com regra do monitor

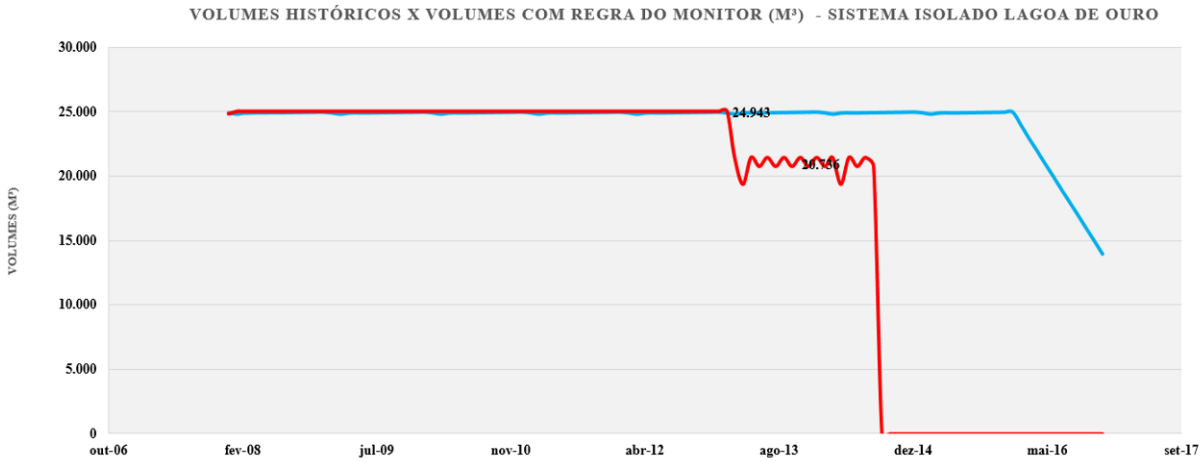



Figura I80 – Volumes retirados históricos x volume captados com regra do monitor

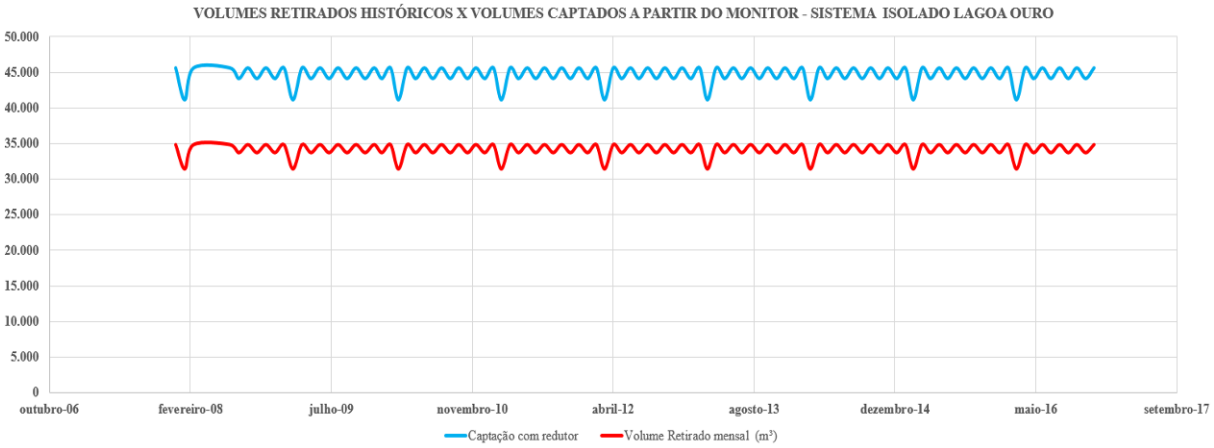



Figura I81 – Croqui esquemático dos sistemas produtores de Lagoa do ouro

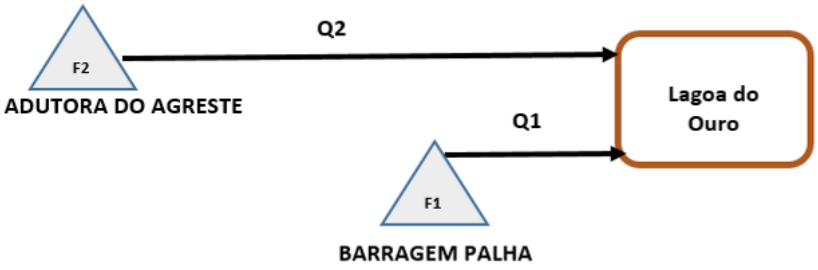



Figura I82 - Volumes históricos x volume com regra do monitor

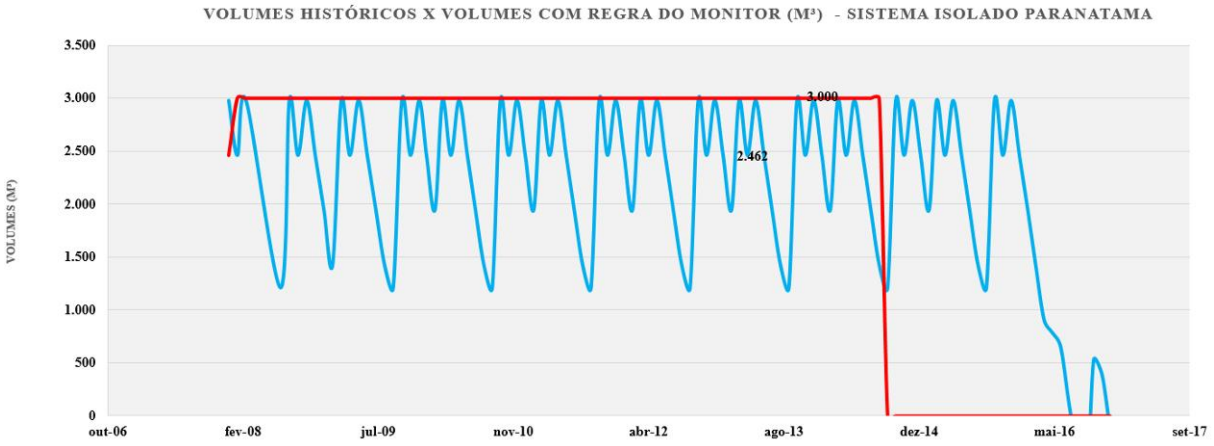



Figura I83 – Volumes retirados históricos x volume captados com regra do monitor

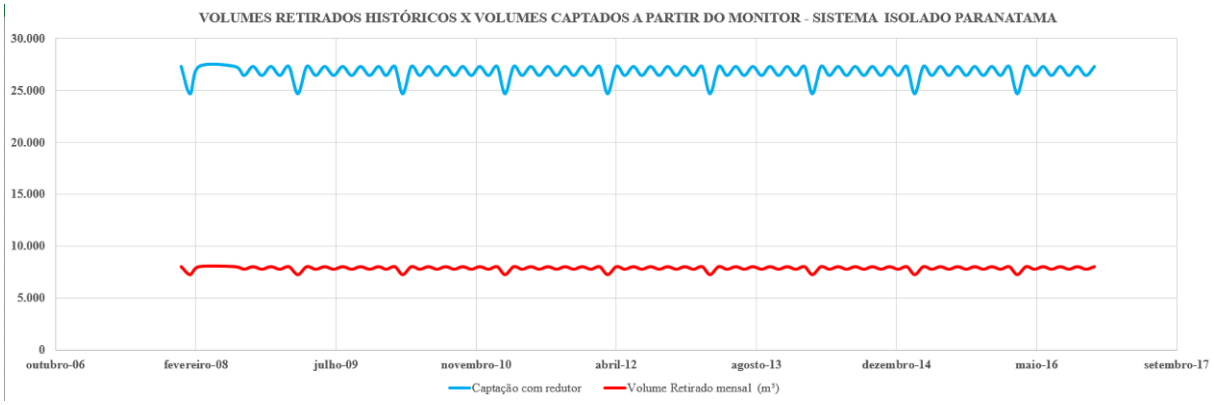



Figura I84 – Croqui esquemático dos sistemas produtores de Paranatama

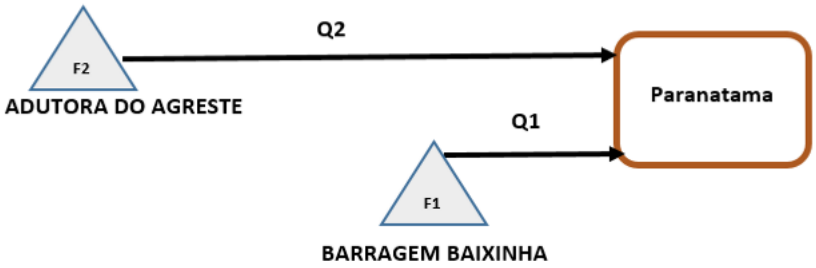



Figura I85 - Volumes históricos x volume com regra do monitor

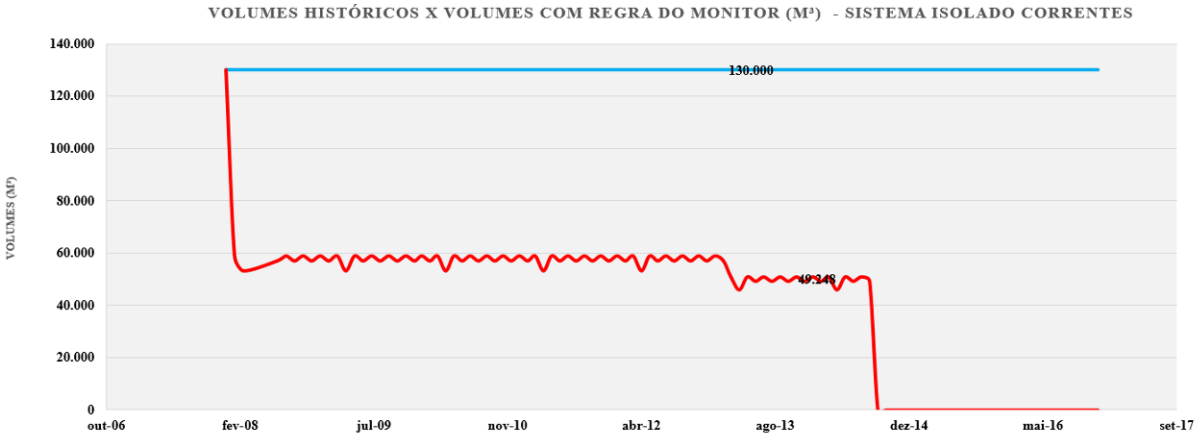



Figura I86 – Volumes retirados históricos x volume captados com regra do monitor

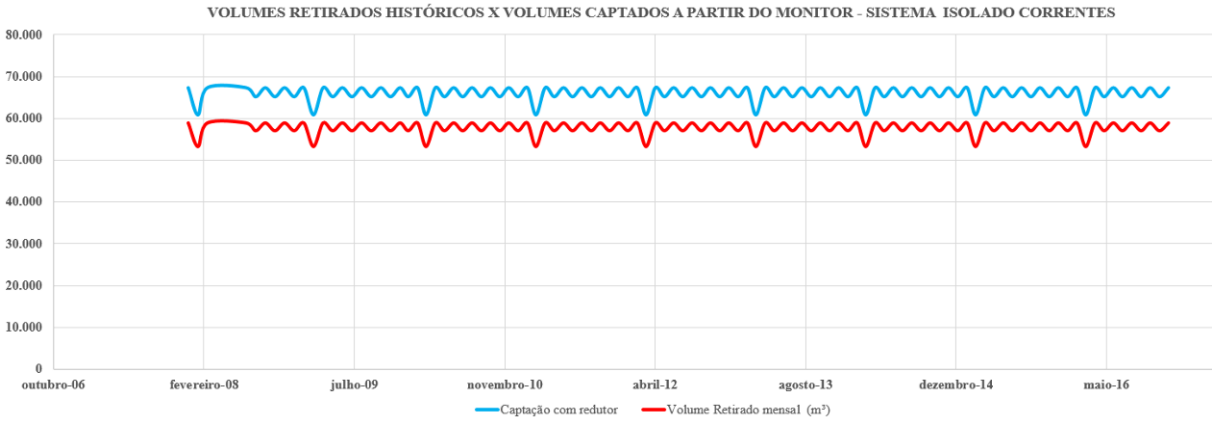



Figura I87 – Croqui esquemático dos sistemas produtores de Correntes

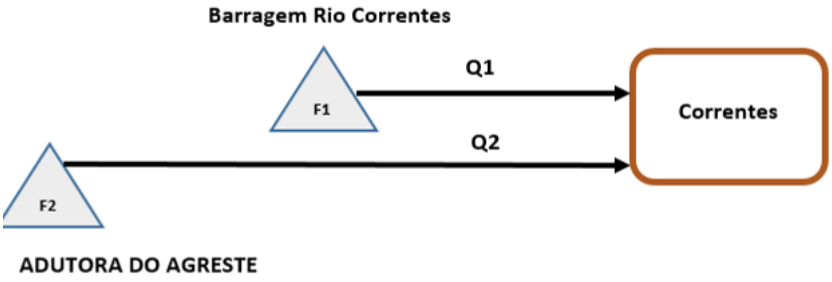



Figura I88 - Volumes históricos x volume com regra do monitor

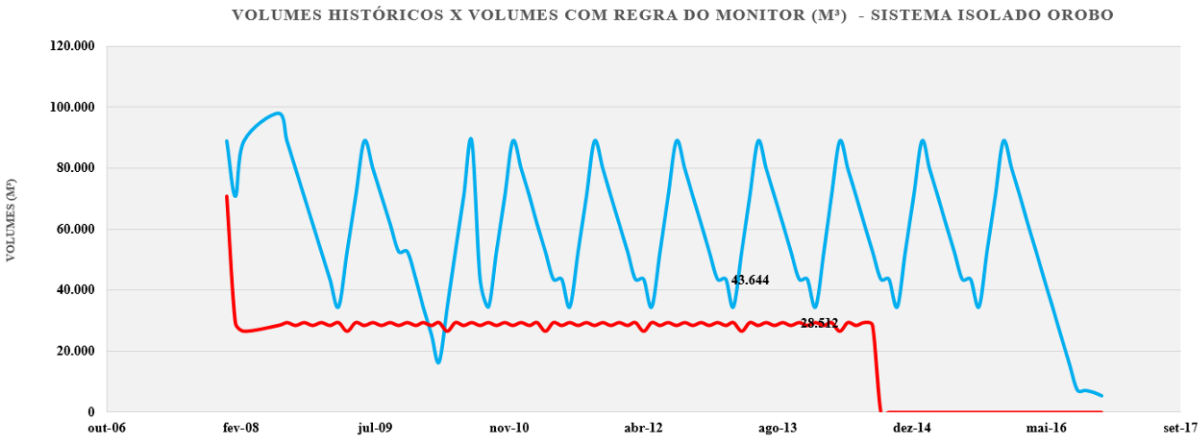



Figura I89 – Volumes retirados históricos x volume captados com regra do monitor

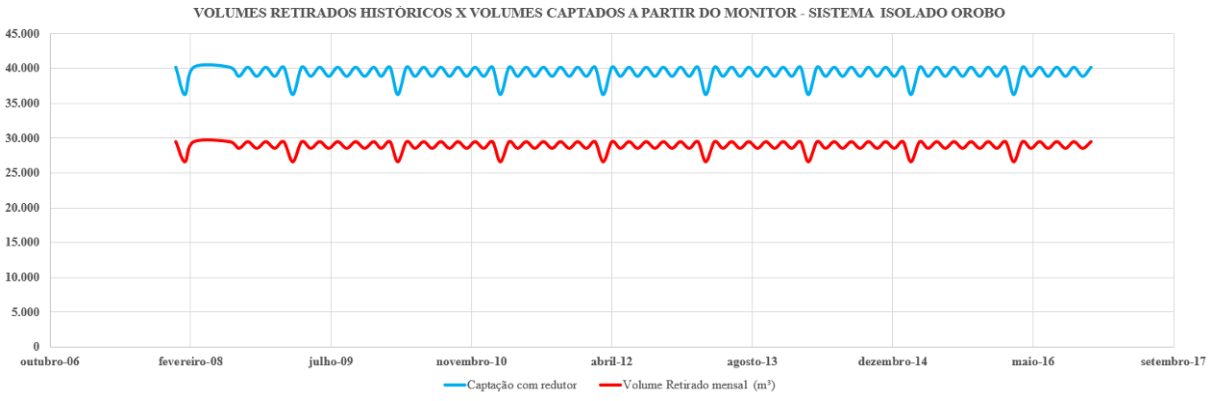



Figura I90 – Croqui esquemático dos sistemas produtores de Correntes

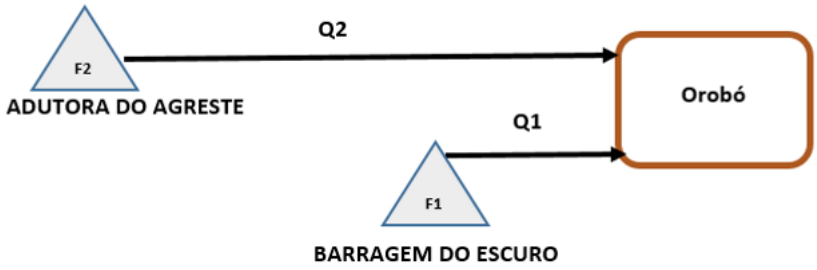



Figura I91 - Volumes históricos x volume com regra do monitor

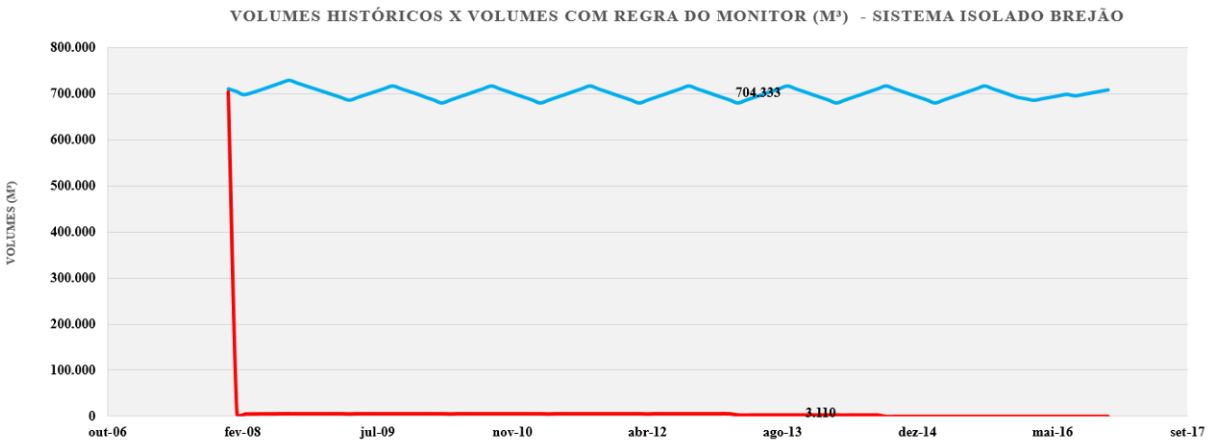



Figura I92 – Volumes retirados históricos x volume captados com regra do monitor

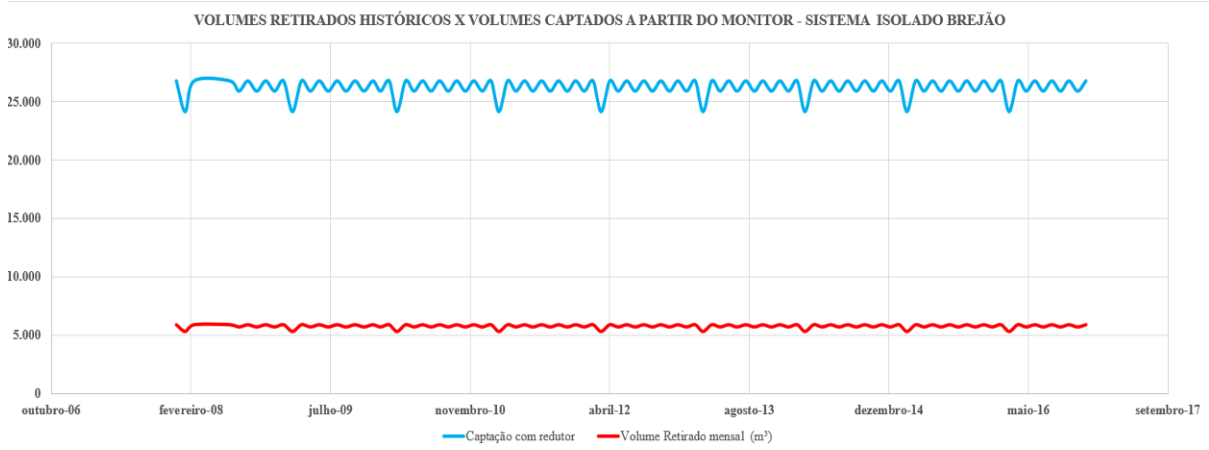



Figura I93 – Croqui esquemático dos sistemas produtores de Brejão

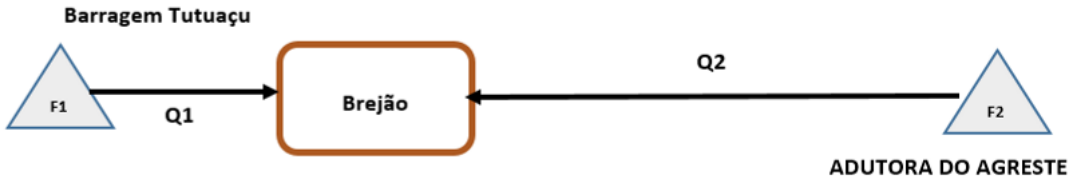



Figura I94 - Volumes históricos x volume com regra do monitor

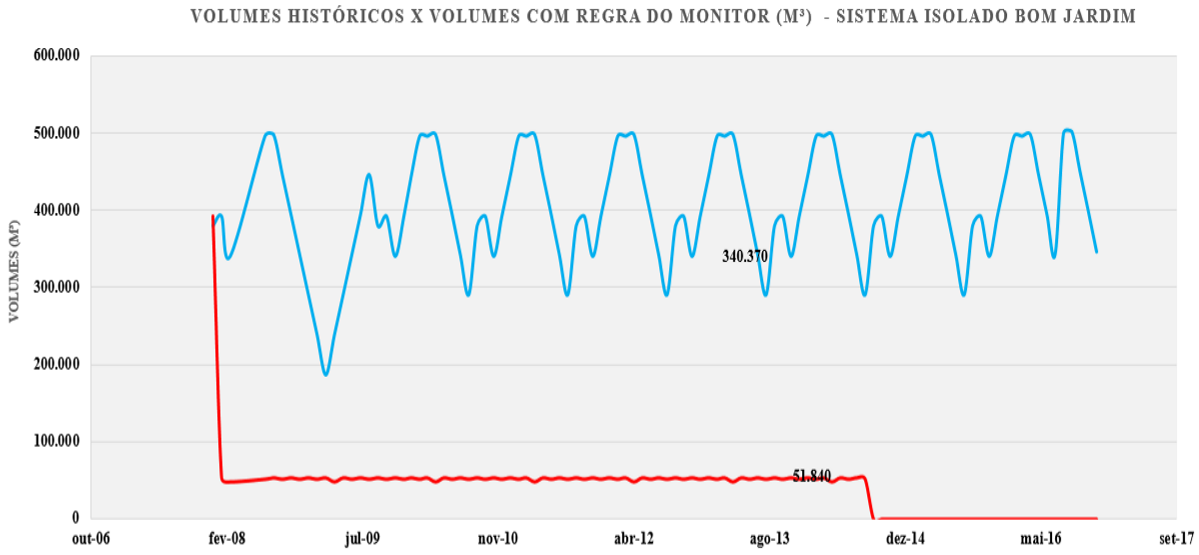



Figura I95 – Volumes retirados históricos x volume captados com regra do monitor

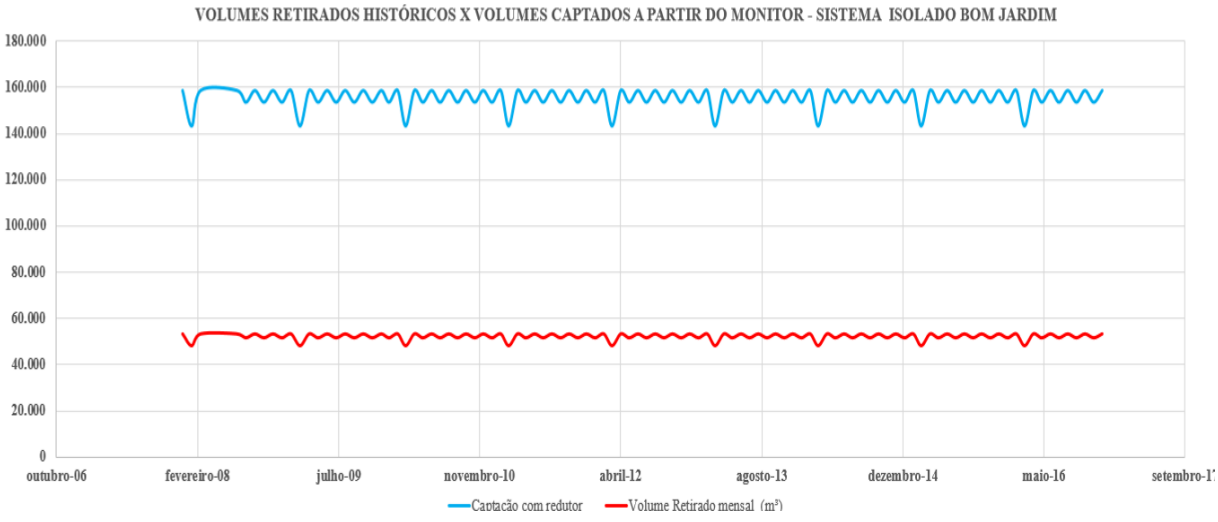



Figura I96 - Volumes históricos x volume com regra do monitor

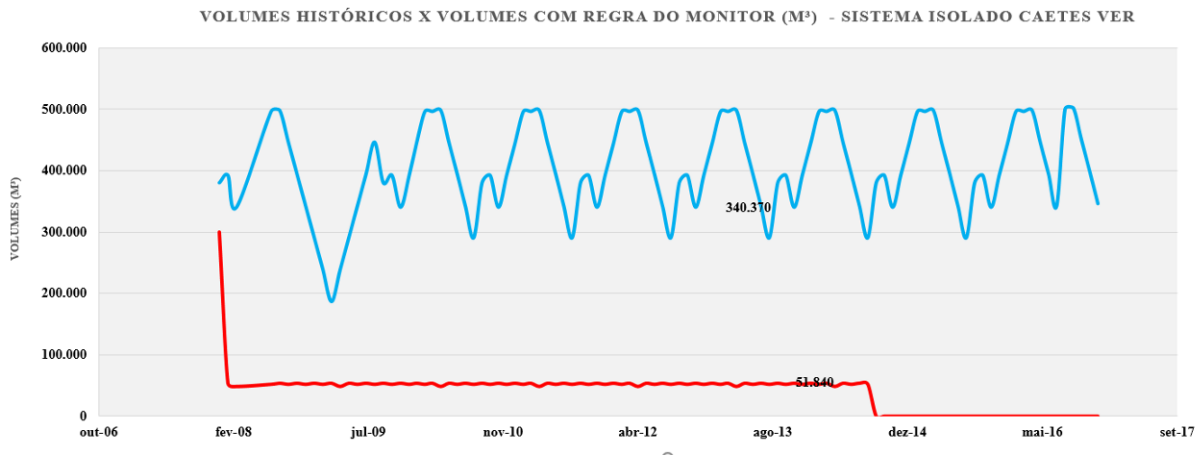



Figura I97 – Volumes retirados históricos x volume captados com regra do monitor

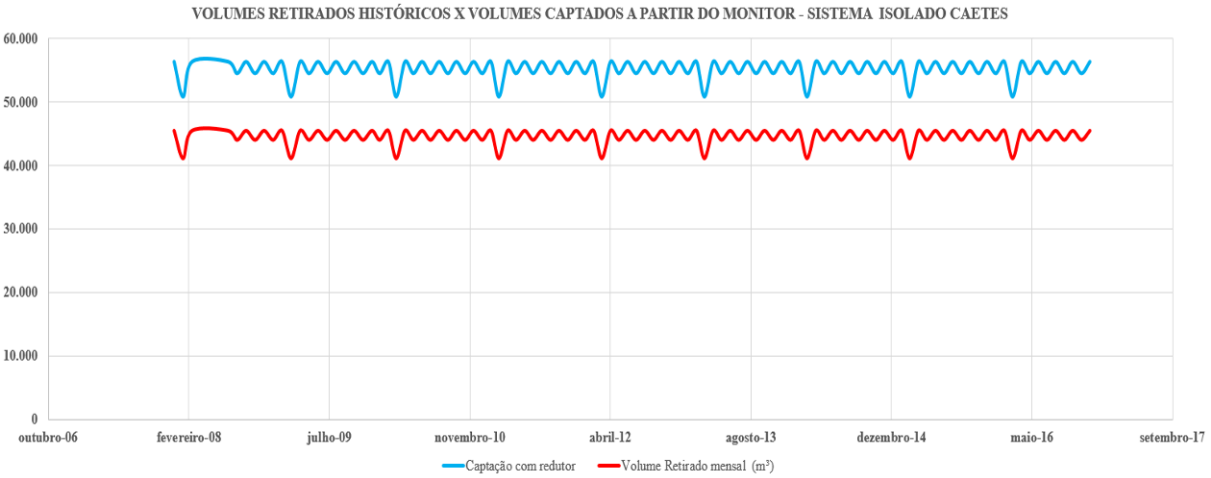



Figura I98 – Croqui esquemático dos sistemas produtores de Caetes

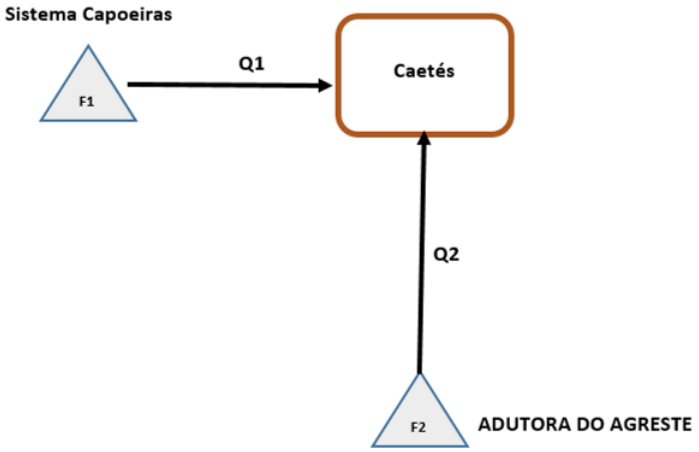



Figura I99 - Volumes históricos x volume com regra do monitor

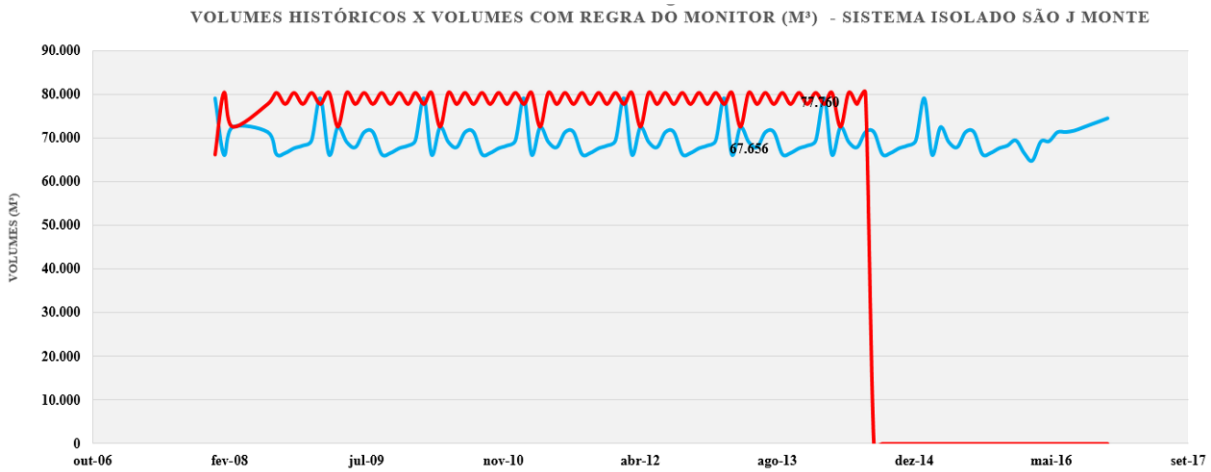



Figura I100 – Volumes retirados históricos x volume captados com regra do monitor

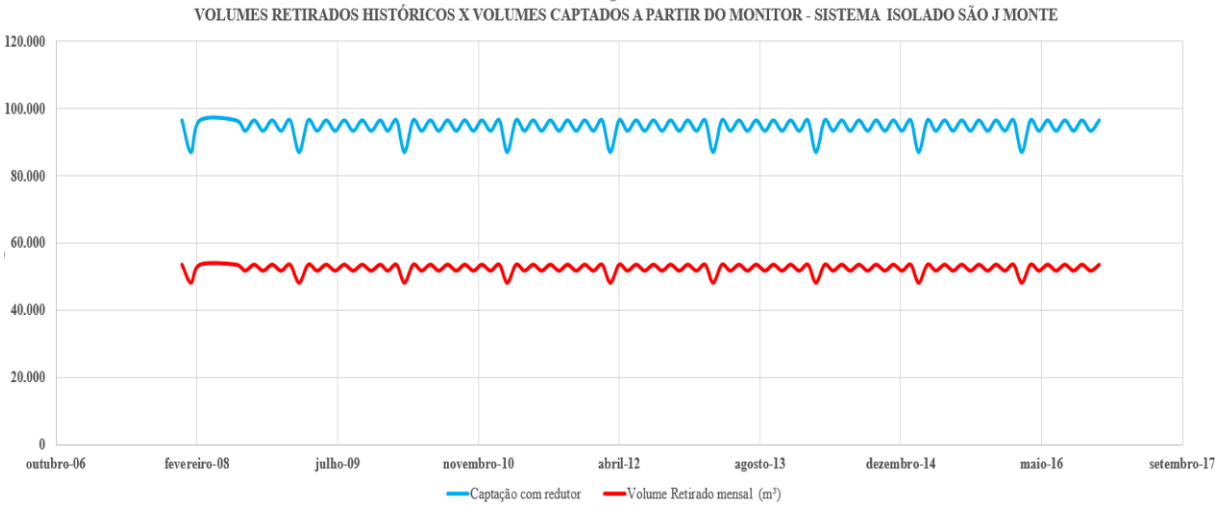



Figura I101 – Croqui esquemático dos sistemas produtores de São Joaquim do Monte

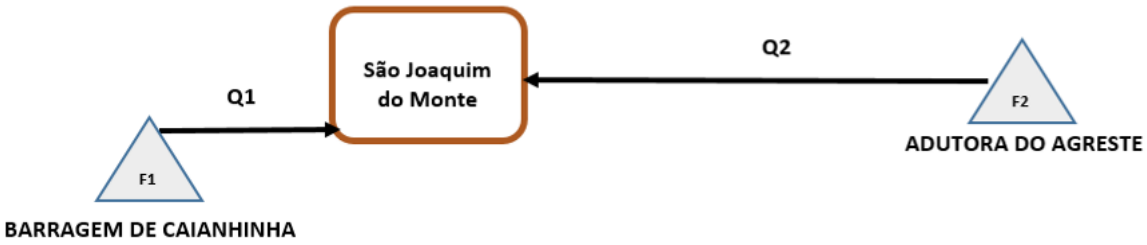



Figura I102 - Volumes históricos x volume com regra do monitor

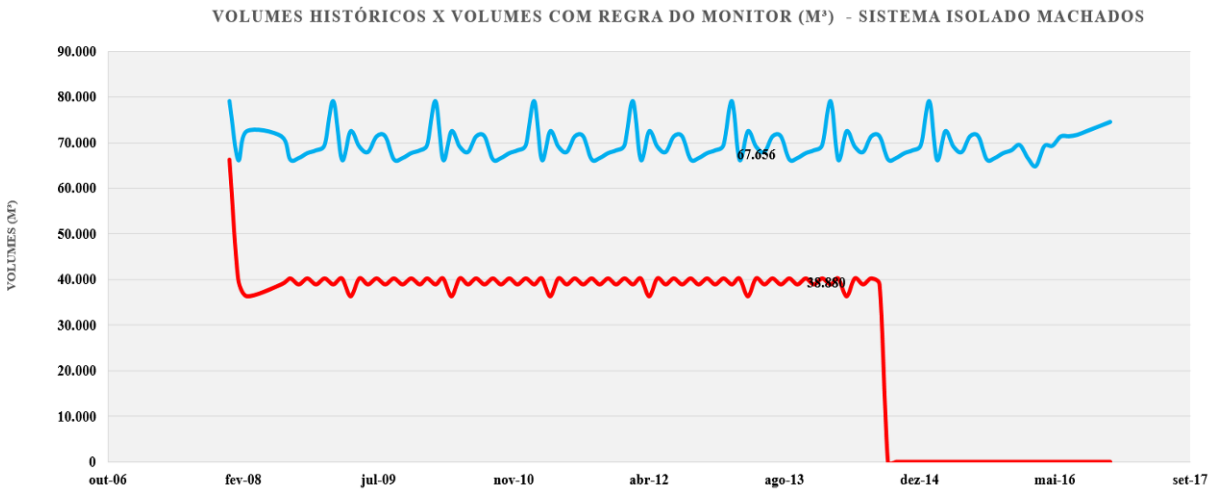



Figura I103 – Volumes retirados históricos x volume captados com regra do monitor

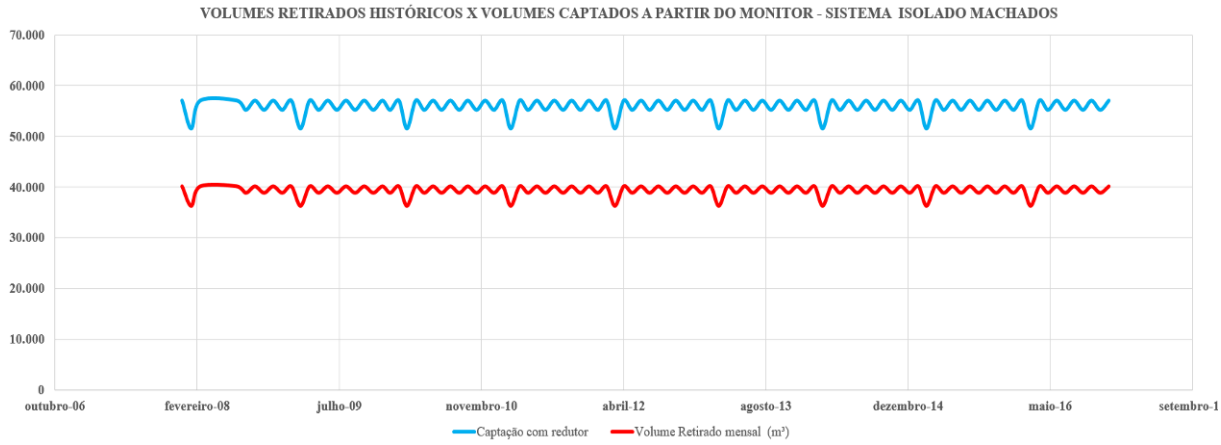



Figura I104 – Croqui esquemático dos sistemas produtores de Machados

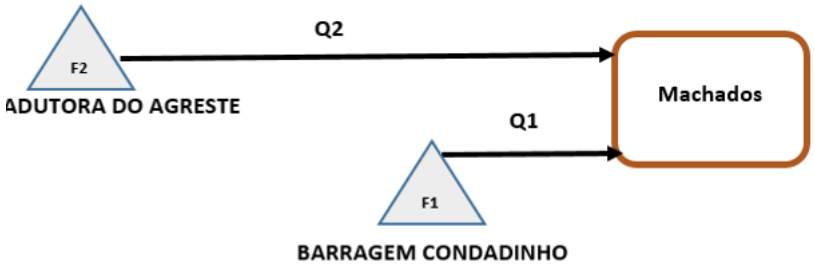



Figura I105 - Volumes históricos x volume com regra do monitor

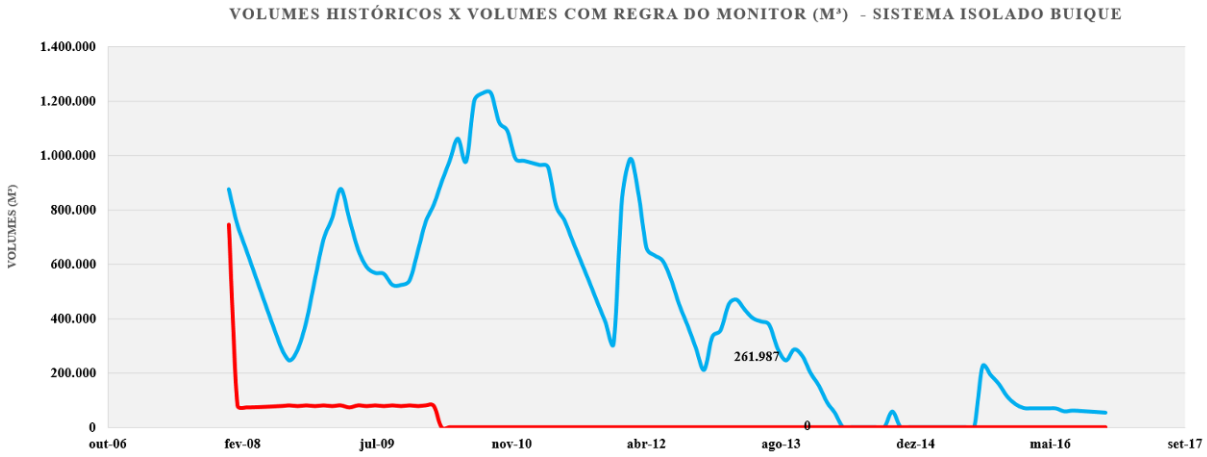



Figura I106 – Volumes retirados históricos x volume captados com regra do monitor

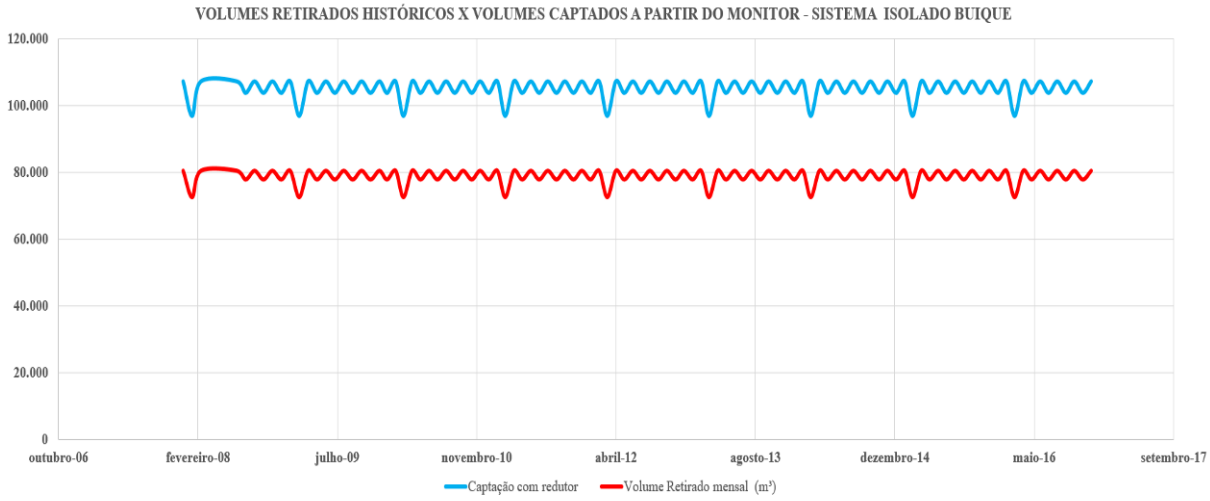



Figura I107 – Croqui esquemático dos sistemas produtores de Buique

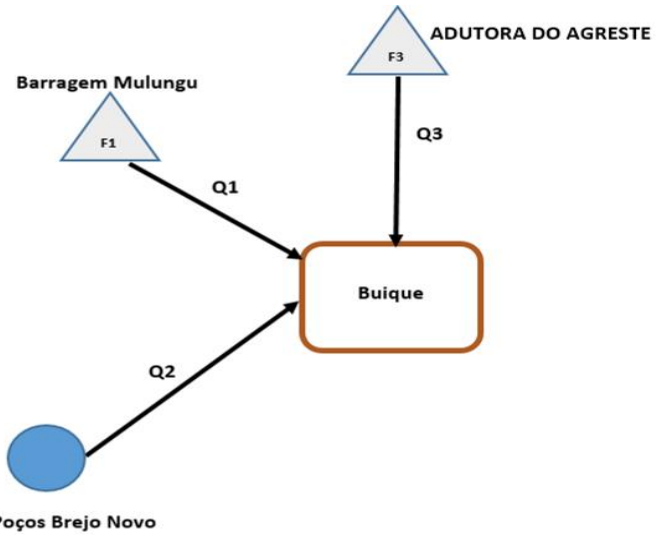



Figura I108 - Volumes históricos x volume com regra do monitor

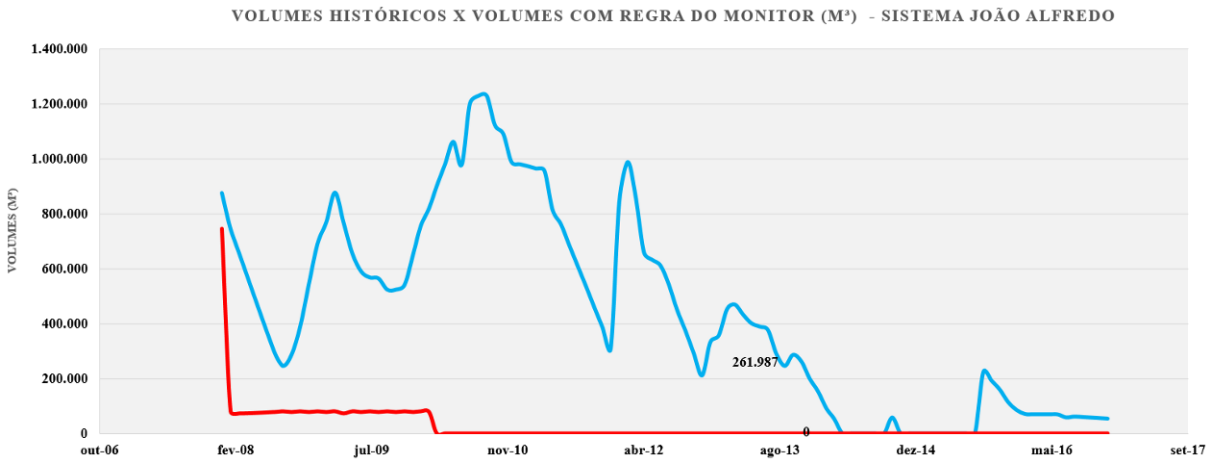



Figura I109 – Volumes retirados históricos x volume captados com regra do monitor

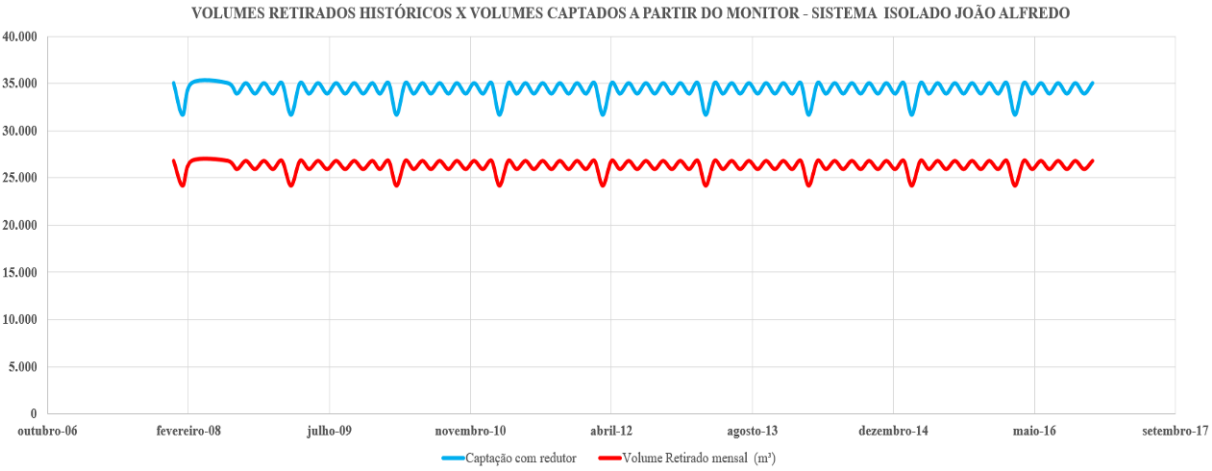



Figura I110 – Croqui esquemático dos sistemas produtores de São Alfredo

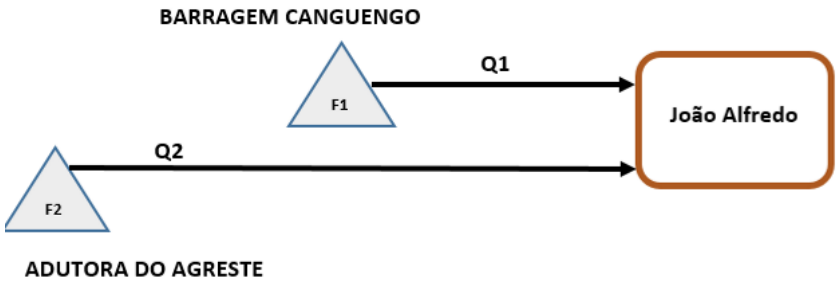



Figura I111 - Volumes históricos x volume com regra do monitor

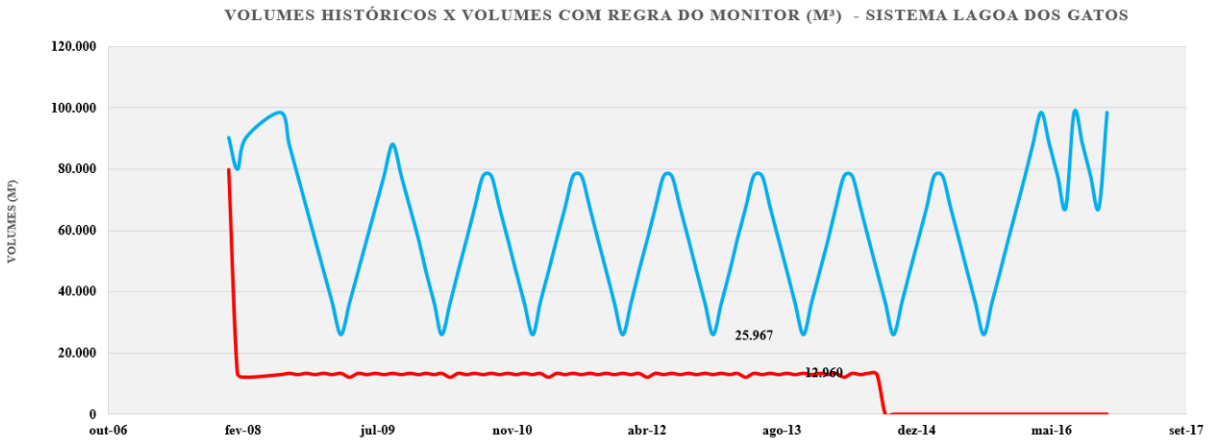



Figura I112 – Volumes retirados históricos x volume captados com regra do monitor

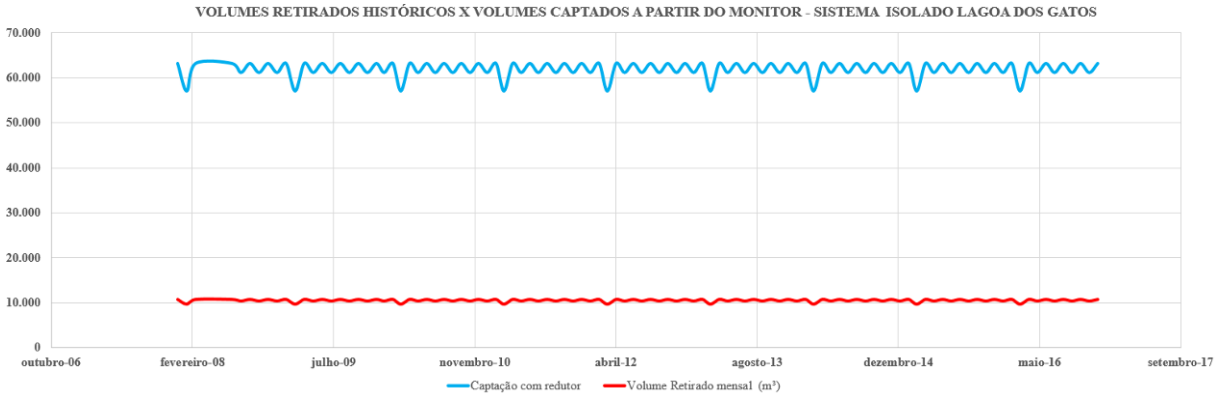



Figura I113 – Croqui esquemático dos sistemas produtores de Lagoa dos Gatos

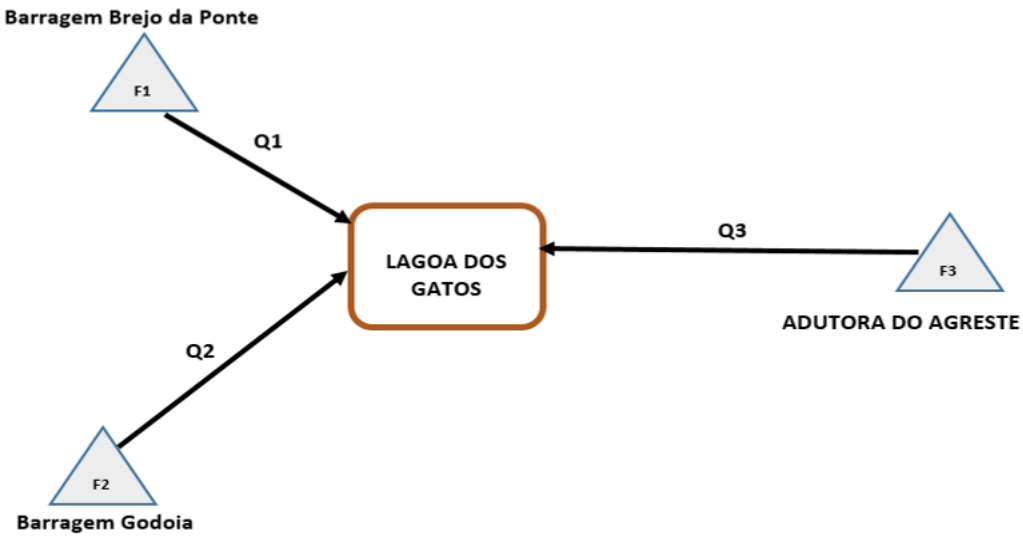



Figura I114 - Volumes históricos x volume com regra do monitor

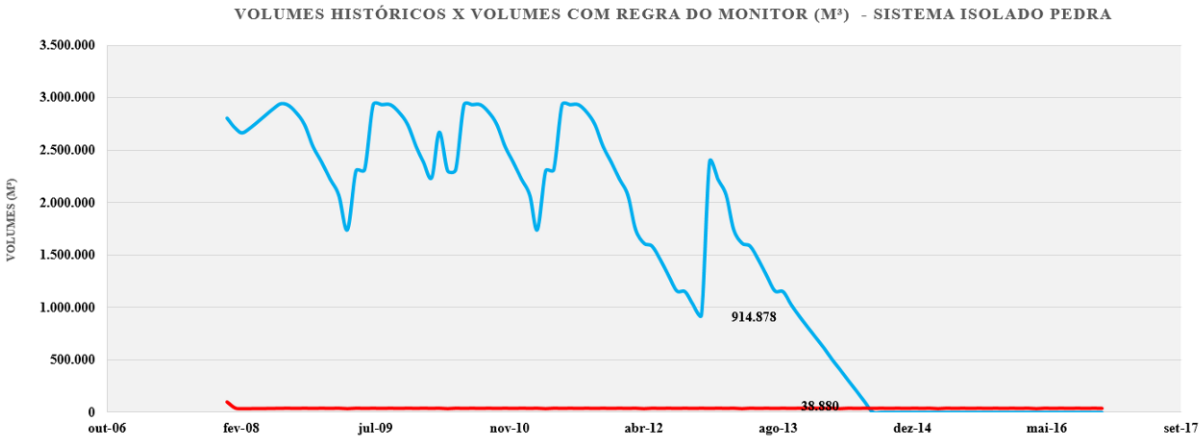



Figura I115 – Volumes retirados históricos x volume captados com regra do monitor

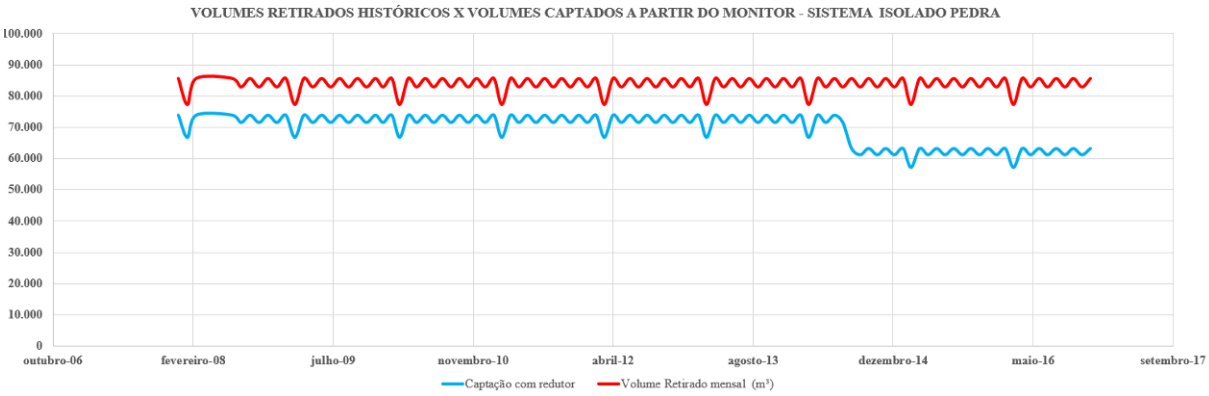



Figura I116 – Croqui esquemático dos sistemas produtores de Pedra

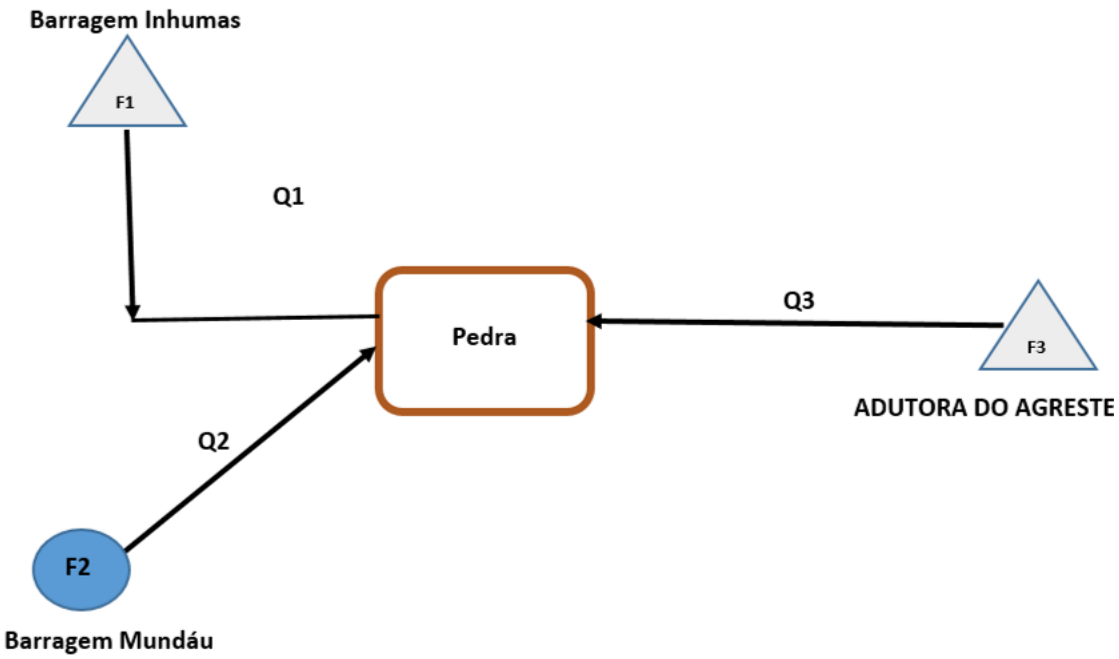



Figura I117 - Volumes históricos x volume com regra do monitor

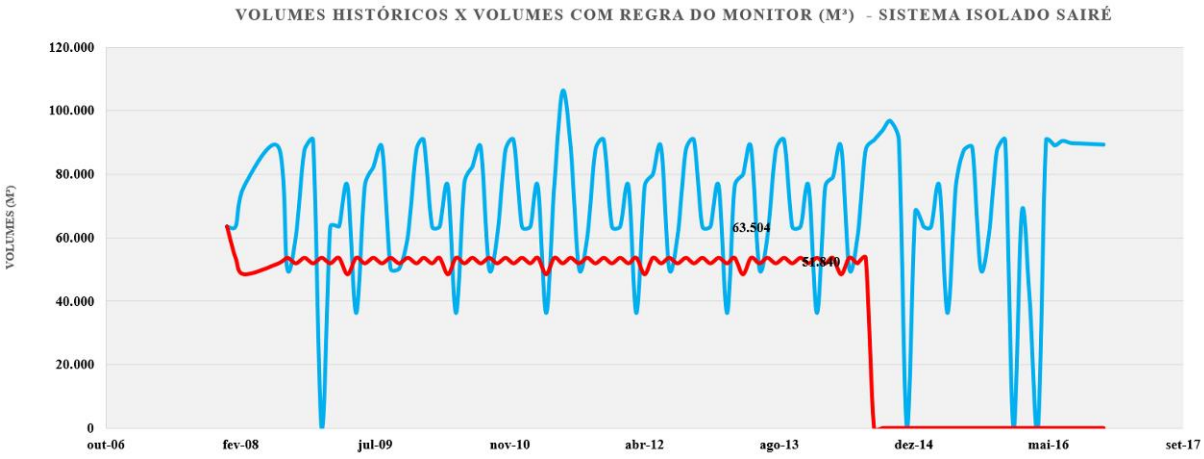
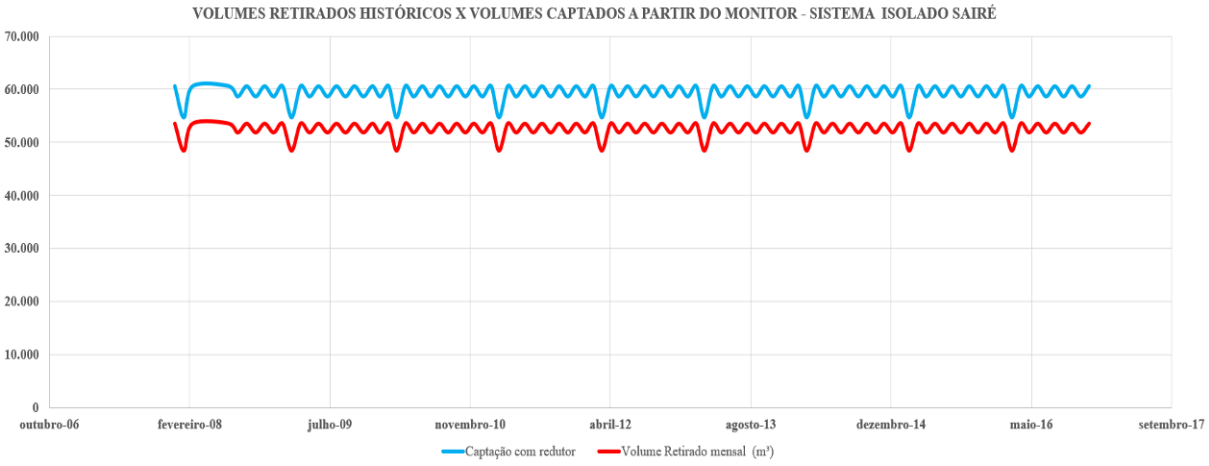



Figura I118 – Volumes retirados históricos x volume captados com regra do monitor



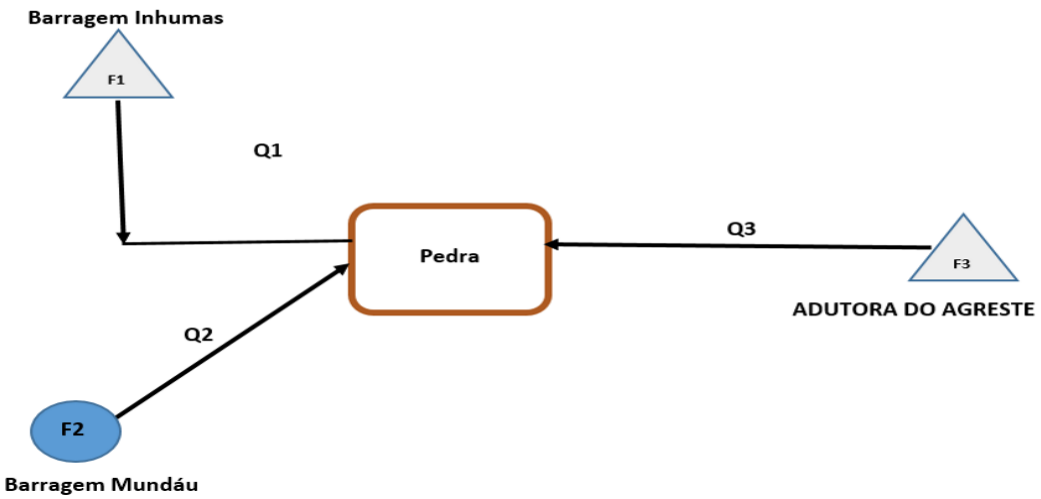


Figura I119 – Croqui esquemático dos sistemas produtores de Pedra