

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

GERALD NORBERT SOUZA DA SILVA

APOIO À GESTÃO SUSTENTÁVEL DE RECURSOS HÍDRICOS ATRAVÉS DE
UM MODELO HIDRO-ECONÔMICO DESENVOLVIDO EM DIFERENTES
CENÁRIOS DE USO DO SOLO E CLIMA:
O CASO DO SUB-MÉDIO DO SÃO FRANCISCO

Recife

2017

GERALD NORBERT SOUZA DA SILVA

APOIO À GESTÃO SUSTENTÁVEL DE RECURSOS HÍDRICOS ATRAVÉS DE
UM MODELO HIDRO-ECONÔMICO DESENVOLVIDO EM DIFERENTES
CENÁRIOS DE USO DO SOLO E CLIMA:
O CASO DO SUB-MÉDIO DO SÃO FRANCISCO

Tese submetida ao Programa de Pós-Graduação em
Engenharia Civil da Universidade Federal de
Pernambuco, como parte dos requisitos para a
obtenção do título de Doutor.

Área de concentração: Tecnologia Ambiental e
Recursos Hídricos.

Orientador: Prof. José Roberto Gonçalves de
Azevedo.

Coorientadora: Profa. Márcia Maria Guedes
Alcoforado de Moraes.

Recife

2017

Catálogo na fonte
Bibliotecária Valdicéa Alves, CRB-4 / 1260

- S586a Silva, Gerald Norbert Souza da.
Apoio à gestão sustentável de recursos hídricos através de um modelo hidro-econômico desenvolvido em diferentes cenários de uso do solo e clima: o caso do sub-médio do São Francisco. / Gerald Norbert Souza da Silva - 2017.
202folhas, Ilus.; Tab. e Abr. e Sigl.
- Orientador: Prof. Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo.
Coorientadora: Prof.^a Dr.^a Márcia Maria Guedes Alcoforado de Moraes.
- Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Pernambuco. CTG.
Programa de Graduação em Engenharia Civil, 2017.
Inclui Referências e Apêndices.
1. Engenharia Civil. 2. Modelo hidro-econômico. 3. Curvas de demanda.
4. Gestão integrada de recursos hídricos. 5. Desenvolvimento sustentável.
6. Alocação de água. 7. Mudanças climáticas. I. Azevedo, José Roberto Gonçalves de Orientador. II. Moraes, Márcia Maria Guedes Alcoforado de (Coorientadora). III. Título.
- UFPE
- 624 CDD (22. ed.) BCTG/2017-204



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

A comissão examinadora da Defesa de Tese de Doutorado

**“APOIO A GESTÃO SUSTENTÁVEL DE RECURSOS HÍDRICOS ATRAVÉS DE UM
MODELO HIDRO-ECONÔMICO DESENVOLVIDO EM DIFERENTES CENÁRIOS DE
USO DO
SOLO E CLIMA: O CASO DO SUB-MÉDIO DO SÃO FRANCISCO”**

defendida por

Gerald Norbert Souza da Silva

Considera o candidato APROVADO

Recife, 29 de março de 2017

Prof. Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo – Orientador - UFPE
Prof.^a Dr.^a Márcia Maria Guedes Alcoforado de Moraes – Coorientadora - UFPE

Banca Examinadora:

Prof.^a Dr.^a Márcia Maria Guedes Alcoforado de Moraes – UFPE
(Coorientadora)

Prof. Dr. Hagen Koch – PIK
(examinador externo)

Prof. Dr. Guilherme Fernandes Marques – UFRGS
(examinador externo)

Prof. Dr. Ignácio Tavares de Araújo Junior – UFPB
(examinador externo)

Prof. Dr. Jaime Joaquim da Silva Pereira Cabral – UFPE
(examinador interno)

À minha esposa, aos meus filhos e aos meus pais,
sempre presentes em todos os momentos da minha
vida.

Dedico!

AGRADECIMENTOS

À minha coorientadora Profa. Dra. Márcia Maria Guedes Alcoforado de Moraes, transmissora de ideias e conhecimentos sobre os temas relacionados aos recursos hídricos e economia.

Ao meu orientador Prof. Dr. José Roberto Gonçalves de Azevedo, pela orientação e integração no programa de pós-graduação e no projeto INNOVATE.

À minha esposa Ana Cristina, pelo incentivo, companheirismo, paciência, suporte e cumplicidade.

À equipe do projeto INNOVATE pelo apoio e cooperação, especialmente Hagen Koch e Marianna Siegmund-Schultze, que deram contribuições essenciais para o desenvolvimento do trabalho.

Aos alunos do Programa de Pós-Graduação em Economia Ana Cristina e Luiz Figueiredo, pelas contribuições.

Ao Prof. Dr. Cristiano Almeida, pela amizade e incentivo desde o mestrado no Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGECAM) da UFPB.

Aos professores do PPGEAC, pelo convívio acadêmico, especialmente a: Suzana Montenegro, Alfredo Ribeiro, Maria do Carmo e Jaime Cabral.

Ao CNPq (Financiadora de Estudos e Projetos), pelo apoio financeiro aos projetos “INNOVATE”, “CT-Hidro projeto 35/2013” e pela bolsa de doutorado sob número 140275/2013-4.

Aos alunos e professores do Laboratório de Recursos Hídricos e Engenharia Ambiental (LARHENA) da UFPB, pelo auxílio durante o processamento dos dados e troca de conhecimentos, em especial a Victor Coelho e Luís Romero.

A todos os brasileiros, verdadeiros financiadores das universidades públicas, nas quais tive a oportunidade de realizar pós-graduação.

RESUMO

O desenvolvimento de modelagem adequada ao nível de bacia para estabelecer políticas públicas tem um papel importante na gestão dos recursos hídricos. Modelos hidro-econômicos podem mensurar efeitos econômicos de diferentes regras operacionais, restrições ambientais, serviços ecossistêmicos, restrições técnicas e institucionais. Além disso, a alocação de água pode ser aperfeiçoada através da consideração de critérios econômicos para apoiar a gestão integrada de recursos hídricos. Da mesma forma, cenários de clima e do uso de solo podem ser analisados para proporcionar resiliência e promover um desenvolvimento sustentável. Nesta Tese, é desenvolvido e aplicado um modelo hidro-econômico para determinar a alocação ótima de água dos principais usuários do rio São Francisco na bacia hidrográfica conhecida como o Sub-Médio do São Francisco. O modelo utiliza curvas de demanda geradas para os projetos de irrigação, pequenos agricultores, abastecimento humano e o projeto de transposição do São Francisco (PISF), ao invés de requisitos fixos para recursos hídricos. Este estudo analisou diversas restrições e alternativas operacionais das hidrelétricas instaladas em termos econômicos, no contexto de cenários de mudanças climáticas e variabilidade climática. Os resultados mostram que as regras de operação dos reservatórios e as restrições institucionais, como as prioridades para o consumo humano, têm alto impacto nos custos e benefícios dos principais usos econômicos na área de estudo. Dentro dos custos das demandas ambientais, as restrições operacionais dos reservatórios têm impactos maiores do que os cenários de uso do solo e de mudança climática estudados. Os custos de escassez dos usuários de irrigação associados à manutenção dos ecossistemas e restrições ambientais são particularmente significativos. Além disso, as restrições institucionais, como a priorização da oferta humana, os limites mínimos de liberação a jusante dos reservatórios e a implementação do projeto de transposição (PISF) provocam impactos nos custos e benefícios dos dois principais setores econômicos (irrigação e produção de energia). Os custos de escassez para os usuários de irrigação geralmente aumentam mais (em termos percentuais) do que os outros usuários associados às restrições ambientais e institucionais.

Palavras-chave: Modelo hidro-econômico. Curvas de demanda. Gestão integrada de recursos hídricos. Desenvolvimento sustentável. Alocação de água. Mudanças climáticas.

ABSTRACT

Development of adequate modeling at basin level to support the design of public policies is an important study area in the water resources management. Hydro-economic models can measure the economic effects of different operating rules, environmental restrictions, ecosystems services, technical constraints and institutional constraints. Furthermore, water allocation can be improved by considering economical criteria's and is important for supporting integrated water resources management. Likewise, climate and land use change can be analyzed to provide resilience and promote a sustainable development. In this thesis, a hydro-economic optimization model is developed and applied to determine the optimal water allocation of main users in the Lower-middle São Francisco River Basin in Northeast (NE) of Brazil. The model uses demand curves for the irrigation projects, small farmers and human supply, rather than fixed requirements for water resources. This study analyzed various constraints and operating alternatives for the installed hydropower dams in economic terms, in the context of climate change scenarios e climate variability. The results show that operation rules of reservoirs and institutional constraints such as priorities for human consumption, have high impacts on costs and benefits of the principal economic uses in the study area. Within these costs of environmental demands, operational constraints have higher impacts than the studied land use and climate change scenarios. Scarcity costs of irrigation users associated with maintaining ecosystems and environmental constraints are particularly significant. In addition, institutional constraints such as prioritizing human supply, minimum release limits downstream of the reservoirs and the implementation of the transposition project impact the costs and benefits of the two main economic sectors (irrigation and power generation) in the region of the Lower-middle of the São Francisco river basin. Scarcity costs for irrigation users generally increase more (in percentage terms) than the other users associated to environmental and institutional constraints.

Keyword: Hydro-economic model. Demand curves. Integrated water resources management. Sustainable development. Water allocation. Climate change.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Classificação dos modelos hidrológicos de acordo como eles tratam aleatoriedade e a variabilidade espacial e temporal dos fenômenos hidrológicos (CHOW e MAIDMENT, 1988)	35
Figura 2 – Abordagens e Principais Características dos Modelos para apoio à Gestão de Recursos Hídricos (adaptado de MORAES, 2012)	35
Figura 3 – Plataforma conceitual para o desenvolvimento de modelos econômico-hidrológicos integrados (modelos de otimização). Fonte: Adaptado de McKinney et al. (1999).....	41
Quadro 1 – Benefícios e custos (adaptado de McLaughlin (2006))	44
Figura 4 – Curva de indiferença adaptado de McLaughlin (2006)	45
Figura 5 – Metodologia de desenvolvimento de RCPs (VUUREN, EDMONDS, et al., 2011a)	47
Figura 6 – Uso de solo (área cultivada, área de pastagem, área vegetação nativa) de quatro RCPs (SMITH, GREGORY, et al., 2010; apud VUUREN, EDMONDS, et al., 2011a)	48
Quadro 2 – Características dos principais componentes de RCPs, extraído de Vuuren, Edmonds et al. (2011a)	49
Figura 7 – Localização da bacia hidrográfica do rio São Francisco e área de estudo no Brasil	51
Figura 8 – Região semiárida e área de estudo	52
Figura 9 – Vazão natural Itaparica (média, desvio padrão e extremos) – Dados (ONS, 2015).....	53
Figura 10 – Área de estudo e principais usos	55
Figura 11 – Trechos navegáveis do São Francisco, Extraído de SUM (2004).....	59
Quadro 3 – Atrativos turísticos dos clusters potenciais de turismo no Sub-Médio do São Francisco, Extraído de Moraes (2016)	61
Figura 12 – INNOVATE Framework - (KOCH e SIEGMUND-SCHULTZE, 2014).....	64
Quadro 4 – Dados utilizados para o desenvolvimento dos modelos hidro-econômicos	66
Figura 13 – Curva de demanda com elasticidade constante	68
Figura 14 – Exemplo de curva de demanda adaptada	69
Figura 15 – Interação entre dados globais e regionais na obtenção das curvas de demanda nos cenários futuros	74
Figura 16 – Estrutura de uma rede no modelo hidro-econômico e dados de entrada.....	76
Figura 17 – Relação cota volume do reservatório Sobradinho (ONS, 2014).....	77
Figura 18 – Relação entre vazão e nível d’água no canal de fuga – reservatório Sobradinho (ONS, 2014)	80
Figura 19 – Função de demanda normalizada entre 0 e 1	82
Quadro 5 – Cenários e principais características	84
Figura 20 – Projeções de modelos climáticos – tendência da precipitação [mm/100anos] e da temperatura [K/100anos] (KOCH, 2014)	85
Figura 21 – Vazão afluente Sobradinho do modelo SWIM: CMIP5: HadGEM – B1	86
Figura 22 – Mudanças nas terras agrícolas utilizadas para as diferentes culturas em milhões de hectares na bacia do São Francisco (KOCH, BIEWALD, et al., 2015c)	87
Figura 23 – Mudanças no uso de solo no cenário A2 e B1 no cluster 9 (Dados: MAgPIE)	88

Figura 24 – Clusters 8,9 e 10 do MAgPIE regionalizado para o SMSF e os municípios da região	89
Figura 25 – MAgPIE Cluster, municípios e Classes de solo (Dados: IBGE, EMPRAPA)	90
Figura 26 – Área de estudo e projetos de irrigação - existentes (amarelo) e planejados (verde)	91
Figura 27 – Distribuição das áreas irrigadas e culturas nos projetos de irrigação para 2006...	92
Figura 28 – Distribuição das áreas irrigadas e culturas nos projetos de irrigação para 2035 no cenário A2 com mudanças climáticas	92
Figura 29 – Distribuição das áreas irrigadas e culturas nos projetos de irrigação para 2035 no cenário B1 com mudanças climáticas.....	93
Figura 30 – Vazão afluente Sobradinho [m ³ /s] - 2000-2006 (Baseline), 2035-2041 (Cenário A2 -HadGEM RCP8.5), 2037-2043 (Cenário B1 – Miroc), 2010-2016 (Seca NE)	98
Figura 31 – Sistema de Apoio à Decisão.....	105
Figura 32 – Composição das imagens de Landsat 8 (bandas 6, 5, 2).....	106
Figura 33 – Classificação da imagem de Landsat 8 em 3 classes: áreas irrigadas, espelhos d’água e outros – a jusante Sobradinho (SILVA, MORAES e SILVA, 2014)	107
Figura 34 – Áreas outorgadas dos perímetros irrigados e identificadas através de sensoriamento remoto.....	109
Figura 35 – Discretização da área de estudo com nós e links	110
Figura 36 – Curva de demanda – irrigação difusa Petrolina	114
Figura 37 – Curva de demanda irrigação Petrolina para elasticidade-preço 0 a 2	114
Figura 38 – Curva de benefício para irrigação difusa de Petrolina	115
Figura 39 – Curvas de demanda para várias irrigações difusas nos municípios obtidas com o método de expansão de ponto.....	115
Figura 40 – Curvas de benefício da irrigação difusa	116
Figura 41 – Valor econômico da água para os usuários da irrigação difusa nos diversos municípios do SMSF para alocações de 60 a 100% (PMP)	117
Figura 42 – Curva de demanda abastecimento humano no município Petrolina (anual)	119
Figura 43 – Curva de demanda abastecimento de Petrolina para elasticidade-preço 0 a 2....	119
Figura 44 – Curvas de demanda mensais do abastecimento municipal no estado de Pernambuco	120
Figura 45 – Curvas de benefício mensais do abastecimento no estado Pernambuco.....	120
Figura 46 – Curva de demanda anual do abastecimento no município Juazeiro -BA.....	121
Figura 47 – Curvas de demanda abastecimento humano cenário A2.....	122
Figura 48 – Curvas de demanda abastecimento humano cenário B1	123
Figura 49 – Curvas de demanda mensais do abastecimento nos municípios sem perdas	124
Figura 50 – Valor econômico da água para os perímetros irrigado no cenário Baseline (2006)	125
Figura 51 – Valor econômico da água para os perímetros irrigados existentes no cenário A2	126
Figura 52 – Valor econômico da água para os perímetros irrigados futuros no cenário A2..	127
Figura 53 – Valor econômico da água para os perímetros irrigados no cenário B1 com mudanças climáticas.....	127
Figura 54 – Valores PLD para o Nordeste do Brasil e regressão exponencial.....	128

Figura 55 – Gráfico de dispersão com processamento de dados e regressão exponencial Vazão/PLD	130
Figura 56 – Curva de demanda PISF no cenário Baseline	132
Figura 57 – Curva de demanda PISF no cenário A2	132
Figura 58 – Curva de demanda PISF no cenário B1	133
Figura 59 – Reservatório Sobradinho – período 2000 a 2006 – simulação volume armazenado e vazão efluente	134
Figura 60 – Produção de energia e energia assegurada usina Sobradinho	135
Figura 61 – Resultado otimização - Alocação de água durante o período de 2000 - 2006 – perímetros irrigados, irrigação difusa, abastecimento humano	135
Figura 62 – Alocação média para os usos consuntivos no cenário Baseline (Referência).....	136
Figura 63 – Diferenças de custos de escassez na alocação econômica ótima em relação a referência das regras operacionais no cenário Baseline (2000-2006)	137
Figura 64 – Diferenças de benefícios da produção hidroelétrica em relação a referência das regras operacionais no cenário Baseline (2000-2006).....	138
Figura 65 – Resultado otimização - Reservatório Sobradinho – período 2010 a 2016 –volume armazenado e vazão efluente	140
Figura 66 – Resultado otimização - Alocação de água durante o período 2010-2016 – perímetros irrigados, irrigação difusa, abastecimento humano	141
Figura 67 – Alocação média ótima para os usos consuntivos no cenário CV (Referencia)...	141
Figura 68 – Resultado otimização - Produção de energia das usinas hidroelétricas durante o período 2010-2016.....	142
Figura 69 – Diferenças de custos de alocação em relação à referência das regras operacionais no cenário CV	143
Figura 70 – Diferenças de benefícios da produção hidroelétrica em relação à referência das regras operacionais no cenário CV	143
Figura 71 – Vazão mínima Hidrograma ambiental e vazões factíveis nos cenários CV e B1	144
Figura 72 – Resultado otimização – Reservatório Sobradinho – cenário A2 período 2035 a 2041 –volume armazenado e vazão efluente	145
Figura 73 – Resultado otimização – Alocação de água no cenário A2 – período 2035 -2041 – perímetros irrigados, irrigação difusa, abastecimento humano	146
Figura 74 – Alocação média de água para os perímetros irrigados no cenário A2	147
Figura 75 – Diferenças de custos de escassez na alocação econômica em relação à referência do cenário A2 para as regras operacionais	148
Figura 76 - Diferenças de benefícios da produção hidroelétrica em relação à referência das regras operacionais no cenário A2.....	149
Figura 77 – Resultado otimização – Reservatório Sobradinho – cenário B1 período 2037 a 2043 – volume armazenado e vazão efluente	150
Figura 78 – Produção de energia das usinas hidroelétricas durante o período 2037 – 2043 no cenário B1.....	150
Figura 79 – Resultado otimização - Alocação de água no cenário B1 - período 2037 a 2043 – perímetros irrigados, irrigação difusa, abastecimento humano	151
Figura 80 – Alocação média para os usos consuntivos no cenário B1 (Referência).....	151

Figura 81 – Diferenças de custos de alocação em relação à referência das regras operacionais no cenário B1	152
Figura 82 – Diferenças de benefícios da produção hidroelétrica em relação à referência das regras operacionais no cenário B1	153
Figura 83 – Comparativo da alocação de água dos usos consuntivos de água nos cenários..	154
Figura 84 – Alocação média de água para perímetros irrigados nos cenários	155
Figura 85 – Alocação média de água por região e cenários	156
Figura 86 – Alocação média de água para irrigação difusa (por município) nos cenários.....	156
Figura 87 – Alocação de água PISF nos cenários (Box Plot).....	157
Figura 88 – Diferença nos benefícios das hidroelétricas e dos custos de usos consuntivos na bacia doadora com e sem PISF nos cenários na solução ótima.....	157
Figura 89 – Alocação média de água para abastecimento municipal nos cenários.....	158
Figura 90 – Custos para os outros usos de água da regra prioridade abastecimento nos cenários	159
Figura 91 – Diferença nos custos dos usos consuntivos e benefícios das hidroelétricas em relação à alteração de energia assegurada nos cenários simulados	159
Figura 92 – Custos das regras ambientais em relação à disponibilidade hídrica nos cenários simulados.....	160
Figura 93 – Preço sombra vazão efluente reservatório Sobradinho	161
Figura 94 – Esquema conceitual do SADE em desenvolvimento	162
Figura 95 – Retrato -Relações banco de dados – Nós e links no banco de dados.....	163
Figura 96 – Formulários de nós no SGDB (Access)	163
Figura 97 – Consulta no SGDB (Access).....	164
Figura 98 – Interface SADE 2.0 – ArcGIS Javascript API.....	164
Figura 99 – Alocação de água para o PISF no cenário A2.....	172

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Aproveitamentos hidrelétricos na área de estudo (SIPOT, 2002)	79
Tabela 2 – Projeção da demanda hídrica para ‘Outras culturas’ nos municípios no cenário A2 (MORAES, CARNEIRO, et al., 2016).....	94
Tabela 3 – Volume de espera (ONS, 2016) em % do volume útil	99
Tabela 4 – Vazões mensais mínimas do Hidrograma ambiental.....	101
Tabela 5 – Comparação de fontes de dados referentes às áreas plantadas (irrigação difusa) em municípios (SILVA, MORAES e SILVA, 2014).....	107
Tabela 6 – Áreas irrigadas por Município identificadas através de sensoriamento remoto (SILVA, MORAES e SILVA, 2014)	108
Tabela 7 – Produção agrícola no Município Petrolina (ano base 2012) (IBGE, 2006-2012) e nos perímetros Nilo Coelho, Maria Tereza e Bebedouro (CODEVASF, 2006).....	112
Tabela 8 – Método de irrigação (Fonte: (ANA, 2001-2013))	112
Tabela 9 – Dados abastecimento municipal no estado de Pernambuco (SNIS, 2012).....	118
Tabela 10 – Dados abastecimento municipal no estado da Bahia (SNIS, 2012).....	121
Tabela 11 – Benefícios líquidos usuários irrigação.....	131
Tabela 12 – Lavoura Juazeiro (IBGE, 2006-2012)	188
Tabela 13 – Lavoura Lagoa Grande (IBGE, 2006-2012).....	188
Tabela 14 – Lavoura Santa Maria da Boa Vista (IBGE, 2006-2012).....	189
Tabela 15 – Lavoura Orocó (IBGE, 2006-2012).....	189
Tabela 16 – Lavoura Cabrobó (IBGE, 2006-2012).....	190
Tabela 17 – Lavoura Belém do São Francisco (IBGE, 2006-2012).....	190
Tabela 18 – Lavoura Curaça (IBGE, 2006-2012)	191
Tabela 19 – Lavoura Abaré (IBGE, 2006-2012).....	191
Tabela 20 – Proporções atuais de outras áreas de cultivo nos municípios contendo perímetros considerados em 2035	192
Tabela 21 – Demanda de água anual e mensal de cana-de-açúcar atualizados para 2035 em metros cúbicos por mês por hectare em cada município (cenário A2).....	193
Tabela 22 – Demanda média ponderada de água anual e mensal para Outras culturas em metros cúbicos por mês por hectare em cada município para 2035 (cenário A2).....	193
Tabela 23 – Número de trabalhadores por tonelada produzida no ano de referência (2006) e no cenário A2 por safra e município	194
Tabela 24 – Requisitos de mão-de-obra para área irrigada em cada município para 2035 sob cenário A2.....	195
Tabela 25 – Valor de suprimentos por unidade de produção (Mil Reais por tonelada produzida) em 2006, obtido a partir do valor do suprimento por área irrigada e dos rendimentos das culturas	196
Tabela 26 – Custos variáveis da terra em 2006 e atualizado para 2035 no perímetros atuais e cenário A2, utilizando a taxa de crescimento dos custos de produção dada por MagPIE entre 2005 e 2035	196
Tabela 27 – Custos variáveis dos trabalhadores em Milhares de Reais / Trabalhador em cada município (Dados do Censo 2006) projetados para o futuro usando MagPIE taxa de crescimento dos custos de produção e mudanças nos rendimentos das culturas no cenário A2	197

Tabela 28 – Preços médios em Milhares de Reais por Tonelada produzidos nos cenários Baseline e A2, utilizando a taxa de crescimento dos custos de produção pelas lavouras	198
Tabela 29 – Resumo resultados simulação modelo - Cenário: Baseline	202
Tabela 30 – Resumo resultados simulação modelo - Cenário: CV (*Hidrograma ambiental adaptado e redução vazão mínima para 700m ³ /s).....	202
Tabela 31 – Resumo resultados simulação modelo - Cenário: A2.....	203
Tabela 32 – Resumo resultados simulação modelo - Cenário: B1 (*Hidrograma ambiental adaptado e redução vazão mínima para 900m ³ /s).....	203

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AGB.....	Agência de bacia
ANA	Agência Nacional de Águas
BMBF.....	Bundesministerium für Bildung und Forschung
CBHSF	Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco
CHESF.....	Companhia Hidrelétrica do São Francisco
CNARH	Cadastro Nacional de Usuários de Recursos Hídricos
CNRH.....	Conselho Nacional de Recursos Hídricos
COGERH.....	Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará
CONOPT	Solver for large-scale nonlinear optimization
CV.....	Climate Variability (variabilidade climática)
EUA	Estados Unidos da América
GAMS.....	General Algebraic Modeling System
GEVAZP	Geração de Séries Sintéticas de Energias e Vazões Periódicas
GRH.....	Grupo de Recursos Hídricos
GWP	Global Water Partnership
HadCEM.....	Hadley Centre Coupled Eddy-permitting Model (modelo climático)
IBGE.....	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
IEA	Instituto de Economia Agrícola
IPCC	Intergovernmental Panel on Climate Change
IPH.....	Instituto de Pesquisas Hidráulicas
LARHENA....	Laboratório de Recursos Hídricos e Engenharia Ambiental
LPJmL	Lund-Potsdam-Jena managed Land
MAGPIE.....	Model of Agricultural Production and its Impact on the Environment
MCTI	Ministério Brasileiro da Ciência, Tecnologia e Inovação
MIROC	Earth system model (modelo climático)
ONS	Operador Nacional do Sistema Elétrico
PAM	Produção Agrícola Municipal
PIB	Produto interno bruto
PISF	Projeto de Integração do Rio São Francisco
PIVAS.....	Pivas – Projeto de Irrigação Várzea de Souza
PLD.....	Preço de Liquidação das Diferenças
PMP	Programação Matemática Positiva
PNRH	Política Nacional de Recursos Hídricos
PPGEC.....	Pós-Graduação em Engenharia Civil
PPGECAM....	Pós-Graduação em Engenharia Civil e Ambiental
PVA	Argissolos
QL.....	Quocientes Locacionais
RCP.....	Representative Concentration Pathways
RGB	Red, Green e Blue (três cores primárias)
SAD	Sistema de apoio à decisão
SADE.....	Sistema de apoio à decisão espacial
SF.....	São Francisco

SGBDSistema Gerenciador de Base de Dados
SGBM.....Sistema Gerenciador de Base de Modelos
SGDBSistema Gerenciador de Base de Dados
SIDRASistema IBGE de Recuperação Automática
SIG.....Sistema de informação geográfica
SIN.....Sistema Interligado Nacional
SMSF.....Sub-Médio do rio São Francisco
SPOTmercado spot, transações em que a entrega da mercadoria é imediata
SRES.....Special Report on Emissions Scenarios
SWIMSoil and Water Integrated Model
UFCGUniversidade Federal de Campina Grande
UFPEUniversidade Federal de Pernambuco
UFRGSUniversidade Federal do Rio Grande do Sul

SUMÁRIO

1.	INTRODUÇÃO	20
2.	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	28
2.1	GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS E A ANÁLISE ECONÔMICA.....	29
2.1.1	Plano de Recursos Hídricos	30
2.1.2	Outorga e Alocação de água	31
2.1.3	Comitê de bacia hidrográfica	32
2.1.4	Cobrança	33
2.2	MODELOS PARA APOIO A GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS	34
2.2.1	Modelos de análise sistêmica em geral e modelos de alocação de águas	34
2.2.2	Os modelos hidro-econômicos	37
2.2.3	Modelos de otimização estocásticos	39
2.2.4	Gestão integrada de recursos hídricos	40
2.2.5	Custos e benefícios de água	42
2.3	MUDANÇAS DE USO DO SOLO E MUDANÇAS CLIMÁTICAS.....	46
2.4	PROJETOS DE PESQUISA	49
3.	ESTUDO DE CASO	50
3.1	CARACTERÍSTICAS DA BACIA E DA REGIÃO HIDROGRÁFICA ESTUDADA	51
3.2	RESERVATÓRIOS DE ACUMULAÇÃO DE ÁGUA	53
3.3	USOS E USUÁRIOS DE ÁGUA	54
3.3.1	Geração de Energia Elétrica	56
3.3.2	Perímetros Irrigados	57
3.3.3	Aquicultura	58
3.3.4	Navegação	59
3.3.5	Vazão ecológica	60
3.3.6	Turismo e Lazer	60
3.3.7	Transposição do rio São Francisco	62
4.	MATERIAIS E MÉTODOS	64
4.1	PLATAFORMA UTILIZADA	64
4.2	AQUISIÇÃO E ANÁLISE DE DADOS.....	65
4.3	CURVAS DE DEMANDA	67
4.3.1	Elasticidade preço e Método de expansão de ponto	67
4.3.2	Programação Matemática Positiva - PMP	71
4.4	MODELAGEM HIDRO-ECONÔMICA.....	74
4.4.1.1	Restrições e balanço hídrico dos nós	76
4.4.1.2	Hidroeletricidade	79
4.4.1.3	Função objetivo	80
4.5	MUDANÇAS DE USO DE SOLO E MUDANÇAS CLIMÁTICAS	83
4.5.1	Cenários	83
4.5.2	Modelo de Produção Agrícola (MAGPIE)	86
4.5.3	Downscaling e regionalização	88
4.6	DISPONIBILIDADE DE ÁGUA - MODELO CHUVA-VAZÃO (SWIM)	96
4.7	CENÁRIOS DE REGRAS OPERACIONAIS	98
4.7.1	Referência	99
4.7.2	Priorizando o abastecimento humano	99
4.7.3	Redução de energia assegurada	100
4.7.4	Transposição do SF (PISF)	100
4.7.5	Abastecimento humano sem perdas	100

4.7.6	Hidrograma Ambiental.....	101
4.7.7	Controle de nível - INNOVATE.....	101
4.7.8	Capacidade reduzida - INNOVATE.....	101
4.7.9	Restrição de vazão mínima a jusante de Sobradinho menor do que 1.300 m³/s	102
4.7.10	Operação sem controle de cheias.....	102
4.8	OTIMIZAÇÃO DE ALOCAÇÃO DE ÁGUA PARA OS VÁRIOS USOS DE ÁGUA	102
4.9	SISTEMA DE APOIO À DECISÃO (SAD)	104
5.	RESULTADOS	106
5.1	ANÁLISE DOS DADOS	106
5.2	REPRESENTAÇÃO ESPACIAL DA ÁREA DE ESTUDO ATRAVÉS DE UMA REDE DE NÓS E LINKS	109
5.3	CURVAS DE DEMANDA	111
5.3.1	Irrigação difusa.....	111
5.3.2	Abastecimento humano.....	118
5.3.2.1	Baseline	118
5.3.2.2	Abastecimento humano - Cenário A2	121
5.3.2.3	Abastecimento humano - Cenário B1	122
5.3.2.4	Baseline sem perdas nos sistemas de distribuição.....	123
5.3.3	Perímetros irrigados.....	124
5.3.3.1	Perímetros irrigados - Baseline	124
5.3.3.2	Perímetros irrigados - Cenário A2.....	125
5.3.3.3	Perímetros irrigados - Cenário B1	127
5.3.4	Hidroeletricidade.....	128
5.3.5	Projeto de integração do Rio São Francisco Projeto (PISF)	130
5.3.5.1	PISF - Baseline	131
5.3.5.2	PISF - Cenário A2	132
5.3.5.3	PISF - Cenário B1	133
5.4	ANÁLISE HIDRO-ECONÔMICA.....	133
5.4.1	Baseline.....	134
5.4.1.1	Baseline - Referência.....	134
5.4.1.2	Baseline - Regras operacionais/ restrições ambientais.....	136
5.4.2	Cenário CV (variabilidade climática).....	139
5.4.2.1	CV - Referência.....	139
5.4.2.2	CV - Regras operacionais/ restrições ambientais	142
5.4.3	Cenário A2	145
5.4.3.1	A2 - Referência	145
5.4.3.2	A2 - Regras operacionais/ restrições ambientais.....	147
5.4.4	Cenário B1.....	149
5.4.4.1	B1 - Referência.....	149
5.4.4.2	B1 - Regras operacionais/ restrições ambientais	151
5.4.5	Comparativo dos cenários/ usos.....	154
5.4.5.1	Irrigação.....	154
5.4.5.2	PISF	156
5.4.5.3	Abastecimento	158
5.4.5.4	Hidroelétrica.....	159
5.4.5.5	Manutenção dos ecossistemas	160
5.4.5.6	Preço sombra - vazão efluente Sobradinho	161
5.5	SISTEMA DE APOIO À DECISÃO (SADE)	161
6.	CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES.....	165

6.1	ANÁLISE E DIAGNÓSTICO DO MODELO HIDRO-ECONÔMICO	165
6.1.1	Cenários.....	167
6.1.2	Regras de gestão de reservatórios	170
6.2	POLÍTICAS, ESTRUTURAS DE INCENTIVOS E TRADE-OFF	173
6.3	RECOMENDAÇÕES PARA CONTINUIDADE DA PESQUISA	175
7.	REFERÊNCIAS.....	177
	APÊNDICE A	188
	APÊNDICE B	192
	APÊNDICE C	199
	APÊNDICE D	201

1. INTRODUÇÃO

A gestão da água é a atividade de planejamento, desenvolvimento, distribuição e gerenciamento dos recursos hídricos. Grigg (1996) definiu gerenciamento de recursos hídricos como medidas estruturais e não estruturais para controlar os sistemas hídricos em benefício humano e atender a objetivos ambientais. A Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) visa proporcionar meios para que a água seja usada de forma racional e justa para o conjunto da sociedade (CAMPOS, 2001). A Lei nº 9.433 (BRASIL, 1997), que dispõe sobre a PNRH estabelece como um dos seus fundamentos que a água é um recurso natural limitado e dotado de valor econômico, e inclui entre os instrumentos de gestão, além das abordagens de comando-e-controle ou regulatórias (p.ex. as outorgas e enquadramentos) aqueles baseados no mercado (p. ex. a cobrança) (MORAES e SILVA, 2017).

A alocação eficiente de água é um desafio para a gestão integrada de recursos hídricos. Ela é um desafio para gestores, usuários e pesquisadores, principalmente, devido à crescente demanda de água, em cenários de escassez relativa cada vez mais evidente (MACHADO, GALVÃO e SOUZA FILHO, 2012). No processo de alocação de água, devem ser mediados diversos conflitos entre múltiplos usuários, considerando incertezas sobre a disponibilidade hídrica, diversidade e distância espacial dos múltiplos usuários. Em contexto de escassez, em períodos de estiagem prolongados, as dificuldades na gestão de recursos hídricos são mais evidentes.

Para a formulação de políticas realmente efetivas, o uso dos instrumentos regulatórios e econômicos deve ser parte de uma análise de alocação inter-setorial integrada que avalie custos e benefícios, e inclua os custos de oportunidade dos usos. Assim, a ideia é que essas políticas sejam construídas e avaliadas de forma a não só focar nas questões de eficiência no uso (nos aspectos de quantidade e qualidade de água) como também incorporar custos e benefícios socioeconômicos. É com essas características que as mesmas tornam-se agentes de um real processo de Gestão Integrada dos Recursos Hídricos¹ (*Integrated Water Resource Management*

¹ De acordo com a definição da GWP (Global Water Partnership), IWRM é um processo que promove o desenvolvimento e gestão coordenada da água, de solo e de recursos relacionados, a fim de maximizar o bem-estar econômico e social resultante de uma forma equitativa sem comprometer a sustentabilidade de eco-sistemas. (<http://www.gwp.org>)

Systems - IWRM), viabilizando o desenvolvimento econômico e o bem-estar social de forma sustentável (MORAES e SILVA, 2017).²

Segundo Jiménez Cisneros et al. (2014), as mudanças climáticas devem ocasionar mudanças no ciclo hidrológico, implicando em diversos impactos e riscos, que são dependentes e interagem com condutores não climáticos de mudança e respostas do manejo da água. Os condutores não climáticos, como o aumento populacional, o desenvolvimento econômico, a urbanização e o uso da terra, desafiam igualmente a sustentabilidade dos recursos, diminuindo a disponibilidade para abastecimento de água ou aumentando a demanda pela água (IPCC, 2014). Neste sentido, impactos das mudanças climáticas e do uso do solo incrementam incertezas sobre a disponibilidade de água. Para o planejamento dos recursos hídricos, a investigação desses impactos precisa ser explorada na identificação de alternativas de alocação da água, com intuito de garantir a distribuição adequada para os vários usos e a mediação de conflitos de interesses. Entretanto, essa investigação demanda por esforços múltiplos.

Estudos recentes mostram que a alocação de água para os usos múltiplos, analisada na escala de bacias ou sub-bacias hidrográficas, aumenta consideravelmente a eficácia da gestão de recursos hídricos. Exemplos são encontrados no mundo inteiro, por exemplo, na Espanha (PULIDO-VELAZQUEZ, ANDREU e SAHUQUILLO, 2006; GOETZ, MARTINEZ e RODRIGO, 2008), no Iran (NIKOU EI, ZIBAEI e WARD, 2012), nos EUA (BRINEGAR e WARD, 2009), na Turquia (GÜRLÜK e WARD, 2009), África do Sul (JONKER, 2007), na França (LANINI, COURTOIS, *et al.*, 2004) e no Egipto (GOHAR e WARD, 2010).

Escassez de água e as várias demandas provocam mais conflitos referentes a este bem. A água é um recurso natural determinante para o crescimento econômico e o desenvolvimento da região semiárida brasileira. O valor da água é uma consequência da sua escassez, onde essa escassez só pode ser medida pela comparação entre demanda e oferta. Entretanto, a oferta de água não está aumentando, ela está diminuindo devido à poluição e esgotamento da água subterrânea. Cenários de mudanças climáticas projetam um aumento de temperaturas e taxas de evapotranspiração que poderá aumentar a demanda pela água (GRIFFIN, 2006).

² Segundo Grigg (1996) a gestão integrada constitui um framework para o planejamento, a organização e a exploração dos sistemas de recursos hídricos, com a finalidade de unificar e equilibrar as visões e os objetivos das partes interessadas (*stakeholders*).

A Lei nº 9.433 (BRASIL, 1997) visa uma gestão de recursos hídricos participativa, através dos comitês de bacias, com a participação do Poder Público, dos usuários de água e da sociedade civil organizada. Entretanto, esse processo é complexo, a decisão dos usuários e da sociedade é, frequentemente, não atendida com argumentos de autoridade e superposição de leis. Pode-se citar, como exemplos recentes, a outorga ao Projeto da Integração do São Francisco (PISF) com as bacias hidrográficas do Nordeste Setentrional, e a redução da descarga mínima defluente instantânea dos reservatórios de Sobradinho e Xingó para 1.100 m³/s (ANA, 2013b), sem a devida deliberação do comitê desta bacia (AGB PEIXE VIVO & CBHSF, 2011; RODORFF, SIEGMUND-SCHULTZE, *et al.*, 2013; CBHSF, 2014; ANA, 2013b).

Muitas vezes, não existe um nivelamento no conhecimento relativo à alocação de água. Por exemplo, usuários e sociedade civil não possuem resultados provenientes de estudos próprios, enquanto o poder público apresenta propostas baseadas em estudos que podem apresentar vieses dos próprios interesses e muitas vezes não incluem alternativas que considerem usos de água com benefícios intangíveis (vazão ecológica, turismo, etc.) (ANA, 2013a). Além disso, a dupla dominialidade dos recursos hídricos (rios estaduais/federais, reservatórios da união) dificulta a gestão integrada dos recursos hídricos (SILVA, SILVA e GALVÃO, 2014). Neste aspecto, é interessante perceber que os usos frequentemente considerados não rivais, têm surgido como os mais conflitantes. Por exemplo, a diminuição da vazão efluente de uma barragem, voltada ao armazenamento de água para a produção de energia, pode dificultar a navegação ou os ecossistemas nos trechos a jusante da barragem (RODORFF, SIEGMUND-SCHULTZE, *et al.*, 2013).

Por isso, o planejamento e a gestão de recursos hídricos são elementos críticos do desenvolvimento econômico sustentável. A falta de uma análise crítica dos benefícios e custos econômicos e das consequências ambientais de determinadas decisões leva a um aproveitamento inadequado dos recursos hídricos, no que diz respeito à utilização dos escassos recursos econômicos e naturais e não melhora o equilíbrio ecológico dos sistemas em geral (MCKINNEY e SAVITSKY, 2006).

As grandes barragens continuam a ser uma opção para o desenvolvimento, necessárias para o fornecimento de água e de energia para a população. A produção de energia hidroelétrica tem relativamente baixos custos e altos benefícios. Entretanto, os grandes reservatórios necessários para assegurar a produção de energia têm vários impactos, que em geral não são considerados como custos. Na linguagem econômica estes impactos são chamados de externalidades, que podem ser negativas ou positivas. Por exemplo, questões ecológicas têm ainda uma baixa

prioridade, especialmente, no Nordeste Brasileiro. Segundo Scudder (2005), os impactos ambientais e sociais negativos das grandes barragens estão contribuindo para a degradação dos sistemas de suporte de vida global e dos ecossistemas das bacias hidrográficas. Além disso, o potencial de desenvolvimento a partir de grandes barragens é raramente alcançado, devido à complexidade envolvida, insuficiências institucionais e incertezas de implementação de políticas da gestão de reservatórios.

Especialmente, na região semiárida do Nordeste do Brasil, grandes reservatórios foram construídos para atender múltiplas demandas de água. A Companhia Hidro Elétrica do São Francisco (CHESF) construiu vários reservatórios de acumulação de água no Sub-Médio do rio São Francisco (SMSF). A região possui altas taxas de evaporação (PEREIRA, PRUSKI, *et al.*, 2009), portanto envolve perdas e uma descaracterização do uso de geração de energia como não-consuntivo. Ademais, para assegurar geração de energia durante os períodos de baixas vazões, reduzem-se as vazões mínimas de liberação a jusante dos reservatórios, o que leva a conflitos com os demais usos.

O caso de estudo, a bacia hidrográfica do rio São Francisco é considerada uma das mais complexas do Brasil, em termos de gestão de Recursos Hídricos. O rio atravessa cinco estados e duas regiões geográficas (Sudeste e Nordeste) do Brasil. Cobre uma área de 8% do país, e 48% da bacia está na região semiárida. Irrigação, abastecimento humano e a indústria são os principais usos, ao lado da geração de energia hidroelétrica (MORAES, RIBEIRO, *et al.*, 2015; CBHSF, 2004).

A transposição do rio São Francisco para bacias localizadas no Semiárido brasileiro acrescentam ainda mais complexidade e conflitos na gestão de recursos hídricos nessa bacia hidrográfica. A bacia hidrográfica do rio São Francisco é considerada de extrema relevância social e econômica no cenário nacional, com comitê de bacia hidrográfica instalado e atuante; e com plano de bacia hidrográfica aprovado (SILVA e CIRILO, 2011). O plano dessa bacia está, atualmente, em processo de revisão. Para a resolução de conflitos pelo uso dos recursos hídricos, é necessária a elaboração de planos de recursos hídricos que considerem mudanças climáticas.

A bacia hidrográfica do Sub-Médio do rio São Francisco (SMSF), que vai da região a jusante do reservatório de Sobradinho até Xingó, apresenta uma diversidade de usos/usuários (consuntivos e não-consuntivos), que configura por si só, uma série de conflitos já estabelecidos extremamente interessante (MORAES, FILHO, *et al.*, 2013). Relativamente às demais regiões

fisiográficas, o SMSF contribui com uma oferta hídrica de aproximadamente 4%, enquanto que a sua demanda só perde para o Médio, que é de 33% (CBHSF, 2004). A avaliação da disponibilidade e demanda de recursos hídricos feita pelas Nações Unidas, e disponibilizada no Plano Decenal do Comitê da Bacia do São Francisco de 2004, enquadra todas as sub-bacias do Sub-Médio como tendo uma situação crítica ou como sendo de gerenciamento indispensável. Nesse contexto, a bacia hidrográfica do Sub-Médio da bacia do rio São Francisco (SMSF) foi selecionada como caso de estudo.

A hipótese desta Tese é a de que o critério econômico deve ser incorporado a análise de alternativas de alocação da água na região de estudo, sob cenários de mudanças de uso do solo e climáticas.

Para isso, desenvolve-se e utiliza-se a modelagem hidro-econômica para apoiar a decisão na gestão sustentável, que identifica uma alocação econômica ótima entre os setores na bacia, ao mesmo tempo que incorpora aspectos ambientais e sociais. Ademais, podem ser considerados diferentes cenários de mudanças climáticas e de uso do solo. Isso poderá subsidiar a elaboração de um plano integrado de operação dos reservatórios e definição de instrumentos econômicos que consigam efetivamente implementar políticas públicas que levem ao desenvolvimento econômico sustentável.

A modelagem aqui desenvolvida funcionará como uma plataforma, que deve instrumentalizar o apoio à tomada de decisão na gestão de recursos hídricos. Poderão ser mensurados os benefícios econômicos para os diferentes usos associados a diferentes políticas de gestão de águas. *Trade-offs* entre os usos podem também ser obtidos, e poderão ser utilizados como entradas para outros estudos, como também diretamente pelos órgãos gestores de recursos hídricos para análises e negociações. Os mesmos resultados, obtidos num contexto de futuras mudanças climáticas, podem ser usados na formulação de políticas regionais e voltadas a gestão da água e do solo consistentes a médio e longo prazo. Análises de sensibilidade poderão ser conduzidas para levar em conta incertezas consideráveis nos cenários climáticos futuros, mudanças de políticas e desenvolvimentos de novas tecnologias.

A modelagem econômica dos recursos hídricos tem avançado nos últimos cinquenta anos e tem sido utilizada para resolver uma grande variedade de questões relativas a políticas de gestão de recursos hídricos (ECKSTEIN, 1958; MAASS, M., *et al.*, 1962). Segundo Harou et al. (2009), modelos hidro-econômicos assentam-se sobre uma plataforma conceitual (BEAR, LEVIN e BURAS, 1964; GISSER e MERCADO, 1972; NOEL, GARDNER e MOORE, 1980) para

gestão integrada de recursos hídricos em escala regional aonde a água é alocada e gerida de forma a maximizar benefícios líquidos derivados de curvas econômicas de benefícios marginais. Dessa forma, representam aspectos hidrológicos, ambientais e econômicos numa plataforma única e incluem os conceitos econômicos no centro das estratégias de alocação de água.

A gestão dos reservatórios e a alocação dos usos múltiplos na bacia hidrográfica do Sub-Médio são investigados, utilizando-se desta abordagem. Os benefícios líquidos serão maximizados (ou de forma equivalente a minimização dos custos de escassez, ou seja, os benefícios líquidos perdidos) para a identificação da alocação ótima entre os usos de um ponto de vista econômico. Dessa forma, os modelos realocarão água até que os benefícios marginais líquidos sejam iguais entre todos os usos³ (Princípio da equimarginalidade microeconômica⁴).

Esta Tese faz parte do projeto INNOVATE (*Interplay among multiple uses of water reservoirs via innovative coupling of substance cycles in aquatic and terrestrial ecosystems*), que tem um programa de 05 anos de pesquisa sob a coordenação da Universidade Técnica de Berlim e da Universidade Federal de Pernambuco. A questão geral da pesquisa desenvolvida pelo projeto INNOVATE é: "Que opções de governança podem promover serviços de ecossistemas sustentáveis e viabilidade econômica sob condições de mudanças climáticas?" (INNOVATE, 2012). Mais especificamente, esta Tese contribuirá para o Subprojeto de Economia (SP6, *Research Module 1*), cujo objetivo é fazer uma avaliação Regional dos impactos das mudanças globais e práticas de melhoramento agrícola no setor agrícola/ uso da terra. Propõe-se alcançar este objetivo através da aplicação de diferentes resultados de modelos que incluam a componente econômica no apoio à decisão.

Ademais, a Tese também é parte de um projeto de pesquisa nacional aprovado na Chamada de nº 35/2013 e financiado pelo MCTI/CNPq/CT-Hidro. Intitulado "*Sistema de Apoio à Decisão Hidro-Econômico para usos múltiplos da Água no Sub-Médio do São Francisco*", une esforços da Universidade Federal de Pernambuco (UFPE), Universidade Federal de Campina Grande

³ Na prática porém, nem sempre se observam nas soluções ótimas obtidas destes modelos (CAI, 2008) valores marginais iguais. Isto reflete na verdade, o impacto das restrições não-econômicas como as hidrológicas ou institucionais. Soluções como essas indicam necessidades de investimento e/ ou reformas institucionais que levem a uma equalização dos valores marginais de água entre os setores.

⁴ O princípio da equimarginalidade microeconômica estabelece que numa alocação ótima entre os setores, cada setor deriva a mesma utilidade da última unidade do recurso alocado (MORAES, 2012).

(UFCEG) e o Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS) para atender a chamada, que visa o apoio à decisão no desenvolvimento e aplicação dos instrumentos de gestão previstos na Política Nacional de Recursos Hídricos. Os modelos objeto desta tese deverão ser disponibilizados de forma interativa na plataforma computacional, sendo desenvolvida com este fim.

Diante do exposto pode-se identificar como sendo o objetivo geral desta Tese:

Obtenção dos valores de alocação econômica ótima, considerando cenários de mudanças de uso do solo e climáticas, para apoio à gestão integrada de recursos hídricos. Estes valores ótimos considerarão aspectos hidrológicos, institucionais e ambientais, subsidiando assim uma gestão integrada de recursos hídricos alinhada com a definição do Global Water Partnership (GWP). Serão obtidos os valores de alocação hidro-econômica ótima na sub-bacia hidrográfica conhecida como o Sub-Médio do rio São Francisco (SMSF).

Os Objetivos Específicos são os seguintes:

- Desenvolver um modelo hidro-econômico, utilizando a Programação Não-Linear, implementada usando o software de otimização GAMS;
- Obter a alocação econômica ótima de água considerando as restrições hidrológicas, institucionais e ambientais em nível de sub-bacia hidrográfica para diversos usos (consumo humano, irrigação, geração de energia, demandas ambientais);
- Obter diferentes soluções econômicas ótimas diante dos diversos cenários de oferta: hidro-climatológicos e de mudanças climáticas;
- Analisar diferentes estruturas de incentivos (instrumentos de regulação), através do modelo, para analisar os *trade-offs* entre as várias opções de políticas, levando em conta múltiplas demandas no entorno de reservatórios e a jusante;
- Analisar diferentes estratégias de operação de reservatórios através do modelo e avaliá-las comparando os ganhos / reduções de benefícios e custos econômicos resultantes, fornecendo assim uma ferramenta de suporte à decisão aos órgãos gestores de recursos hídricos;

A estruturação desta Tese é composta por sete capítulos. Neste primeiro capítulo foram apresentados uma introdução ao tema, os questionamentos postos, os pressupostos assumidos, os objetivos da tese e a sua estrutura de apresentação. O segundo capítulo apresenta o embasamento teórico da tese, no que se refere a gestão de recursos hídricos, aos modelos para apoio à gestão de recursos hídricos, às mudanças de uso de solo e climáticas e o framework dos

projetos de pesquisa em que este trabalho está inserido. No terceiro capítulo, são descritas as características do estudo de caso, focando nas características da bacia e da região hidrográfica, reservatórios e usos de água. O quarto capítulo apresenta os materiais e métodos utilizados neste trabalho. O quinto capítulo traz os resultados e discussões da tese e, finalmente, o sexto apresenta as conclusões, limitações e recomendações do estudo. Por fim, as referências utilizadas são listadas.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

Segundo recente relatório publicado pelo World Bank Group (2016), uma das prioridades políticas que podem ajudar os países a estabelecer economias com segurança hídrica e resilientes ao clima é a otimização do uso da água através de um melhor planejamento e uso de incentivos adequados. O documento ressalta que construir economias resilientes ao clima, que possam se desenvolver e crescer em um mundo com crescente escassez hídrica resultado de mais altas temperaturas e maiores taxas de evaporação, exigirá formas de alocação dos recursos hídricos com transferências de direitos de uso entre os setores para aqueles de maior valor, ao mesmo tempo assegurando os direitos dos menos favorecidos bem como as adequadas condições ambientais. Isso pode ser implementado através de planejamento e regulação, usando além da abordagem de comando e controle, sinais de mercado por meio de instrumentos econômicos como preços e licenças comercializáveis. Entretanto, isso exigirá o estabelecimento de instituições com credibilidade, políticas e sistemas legais que possam facilitar as transferências de água de forma que beneficiem todas as partes envolvidas. Instrumentos regulatórios e econômicos, como outorga de uso da água e preços de água adequados, podem ser valiosos para promover uma melhor gestão ambiental e dos recursos hídricos.

A gestão integrada de recursos hídricos deve-se privilegiar de uma integração de instrumentos regulatórios e econômicos, criando sinergias e diminuindo os conflitos, de forma a contribuir para uma alocação inter-setorial que viabilize o desenvolvimento econômico com sustentabilidade. Segundo (THOMAS e CALLAN, 2010), é essa a tendência atual na gestão de recursos naturais: a aplicação de instrumentos econômicos, combinados com as abordagens mais tradicionais de comando-e-controle (MORAES e SILVA, 2017).

Um dos objetivos deste trabalho é analisar a gestão de recursos hídricos no contexto da sustentabilidade. O desenvolvimento sustentável, que incorpora estratégias ambientalmente mais adequadas e ao mesmo tempo busca um desenvolvimento socioeconômico mais equilibrado, tem um caráter instrumental de ações estruturantes de um novo modelo de crescimento econômico, que maximiza os resultados socioeconômicos e minimiza os impactos ambientais. O desenvolvimento sustentável incorpora aspectos ambientais, técnicos, socioeconômicos e políticos-institucionais, ou seja, a racionalidade ambiental agregada à racionalidade econômica (VEIGA, 2005; PERH-PB, 2006; PNUD, 2016). Um dos objetivos da Agenda 2030 (PNUD, 2016) é assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e

especificamente de aumentar a eficiência do uso da água, além de assegurar retiradas sustentáveis de águas. Neste trabalho são utilizadas demandas ambientais, que são introduzidas como regras na operação dos reservatórios e a análise dos impactos econômicos para os usuários de água no caso de estudo.

2.1 GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS E A ANÁLISE ECONÔMICA

A gestão de recursos hídricos no Brasil é baseada na Lei nº 9.433 (BRASIL, 1997), conhecida como Lei das Águas. Essa lei institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos e instituiu cinco instrumentos de gestão:

Art. 5º São instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos:

I - os Planos de Recursos Hídricos;

II - o enquadramento dos corpos de água em classes, segundo os usos preponderantes da água;

III - a outorga dos direitos de uso de recursos hídricos;

IV - a cobrança pelo uso de recursos hídricos;

V - a compensação a municípios;

VI - o Sistema de Informações sobre Recursos Hídricos.

(BRASIL, 1997)

Um princípio estabelecido na declaração da água e desenvolvimento sustentável em Dublin (ICWE, 1992), e incorporado na lei brasileira em seu artigo 1, reconhece que a água tem um valor econômico em todos os seus usos competitivos e deve ser reconhecida como um bem econômico⁵. Dentro deste princípio, destaque-se que a gestão de água como um bem econômico é uma forma importante de alcançar uma utilização eficiente tanto do ponto de vista alocativo⁶ como técnico⁷, mas que não impede que questões de equidade, bem como de conservação e proteção ambiental possam ser incorporados. Isto porque admitindo-se que o conceito teórico de ótimo econômico envolve uma série de dificuldades na prática, é possível - mesmo não

⁵ Segundo a teoria econômica, o valor econômico de um bem advém das suas condições de escassez (VARIAN, 2006)

⁶ A eficiência alocativa de um instrumento requer que a resultante alocação de água entre os setores seja economicamente ótima. Nesta alocação ótima cada setor obtém a mesma utilidade da unidade marginal do recurso alocada, ou seja, o princípio da equimarginalidade econômica é atendido (MORAES e SILVA, 2017)

⁷ O segundo melhor critério, também conhecido como "critério de eficiência técnica", é o critério de custo-efetividade, que é definido como aquele que leva em conta o menor custo incorrido para atingir um determinado objetivo (THOMAS e CALLAN, 2010)

atendendo o princípio da equimarginalidade ao incorporar restrições não-econômicas, tais como as hidrológicas e as institucionais (HAROU, PULIDO-VELAZQUEZ, *et al.*, 2009).

A análise econômica assim, especialmente num contexto de escassez de recursos, tem um papel importante no planejamento, na tomada de decisão e na gestão de recursos hídricos sustentável. A decisão de alocação de água entre os usos, sendo um dos principais problemas dos planejadores de recursos hídricos, deve se beneficiar de modelos úteis para comparar os diversos mecanismos regulatórios e econômicos alocativos segundo critérios de eficiência econômica. Dessa forma, os instrumentos poderão ser comparados no que se refere a sua efetividade como implementadores de um bem-estar máximo.

2.1.1 Plano de Recursos Hídricos

“[...] Os Planos de Recursos Hídricos são planos diretores que visam fundamentar e orientar a implementação da Política Nacional de Recursos Hídricos e o gerenciamento dos recursos hídricos.[...]” (BRASIL, 1997)

O processo de elaboração do Plano Decenal de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do rio São Francisco teve início em 2003 e foi aprovado, com a deliberação do Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco, em Julho de 2004. O desenvolvimento do Plano foi baseado nas diretrizes da Lei nº 9.433 (BRASIL, 1997) e as deliberações do Comitê. Ele é um resultado de um processo de planejamento participativo, através de um Grupo de Trabalho, composto por representantes da ANA, CODEVASF, Estados (Minas Gerais, Goiás, Bahia, Pernambuco, Sergipe e Alagoas), Distrito Federal e outras instituições (CBHSF, 2004). Atualmente, o plano decenal desta bacia hidrográfica está sendo atualizado.

Com relação à alocação de águas, o plano da bacia define valores máximos de consumos médios anuais nas principais áreas de contribuição para a formação de vazões da bacia e em cada trecho do rio São Francisco:

“[...]Diante do exposto, o Plano adota, provisoriamente, como vazão máxima alocável na Bacia o valor de 360 m³ /s, estabelecida em função da disponibilidade hídrica, da vazão remanescente média e da vazão mínima ecológica na foz do rio São Francisco. [...]” (CBHSF, 2004)

Segundo o Plano de Recursos Hídricos da bacia hidrográfica do rio São Francisco: “[...]a questão da utilização das águas do rio São Francisco para uso em projetos de irrigação tem que ser analisada em um contexto sócio econômico das relações custo-benefício e de oportunidade. [...]” (CBHSF, 2004). O plano destaca o uso de água para irrigação na transposição do rio São

Francisco (PISF), que necessita comparar o uso na própria região semiárida da bacia do rio São Francisco e o uso externo para verificar quais das opções (uso interno ou externo) apresenta a melhor relação custo-benefício.

2.1.2 Outorga e Alocação de água

Um instrumento regulatório da Política Nacional de Recursos Hídricos é a outorga dos direitos de uso de água. “O regime de outorga de direitos de uso de recursos hídricos tem como objetivos assegurar o controle quantitativo e qualitativo dos usos da água e o efetivo exercício dos direitos de acesso à água.” (BRASIL, 1997).

A outorga é um dos instrumentos usados para a alocação de água entre os usos/ usuários, cujo objetivo deve ser o atendimento das demandas de usuários, enquanto se assegura a sustentabilidade do recurso. De forma geral, a alocação da água pode ser entendida como a compatibilização entre sua demanda e oferta. Quando a demanda de água excede a oferta de água, existem dois métodos gerais para lidar com o problema: melhoria da oferta e gestão da demanda (GRIFFIN, 2006). Exemplos para a melhoria da oferta de água são a construção de reservatórios ou poços. O desafio da gestão da demanda é gerar poupanças físicas e econômicas de água aumentando a produção por unidade de perda evaporativa de água, reduzindo a poluição da água bem como reduzindo os seus usos não benéficos. Dentre os instrumentos utilizados para estimular o uso racional e eficiente estão os instrumentos de comando-e-controle ou regulatórios (p.ex. a outorga) e os instrumentos econômicos (p. ex: cobrança, pagamento por serviços ambientais, mercados, etc.) (UNEP DTIE , 2011).

Segundo Silva e Monteiro (2004), o critério de outorgas como método de alocação de água, mais adotado no Brasil, baseia-se na definição de vazões mínimas de referência e no estabelecimento de limites de utilização dessas vazões por usos da água, objeto de autorizações pelo poder público. As vazões mínimas de referência caracterizam as disponibilidades hídricas dos corpos de água e são geralmente definidas por vazões com alta permanência no tempo (como a Q90) ou por vazões mínimas associadas a probabilidades de ocorrência (como a Q7,10⁸). Dessa forma, a vazão mínima de referência é aquela que está disponível mesmo nos períodos de estiagem, com pequena probabilidade de falha.

⁸ Q7,10 -Vazão mínima média de 7 dias sequentes, estimada para um período de retorno igual a 10 anos
Q90 - Vazão com frequência igual a 90% do tempo em que as vazões são iguais ou superiores

Existem outros critérios de outorgas estabelecidos em situações de escassez. Por exemplo, no período atual (ano 2012-2015), que vem se constituindo numa época de estiagem prolongada, a ANA (Agencia Nacional de Água) limitou o uso de água para irrigação em várias regiões do Semiárido nordestino para uma área máxima determinada (por exemplo, 5 hectares), através da Resolução N° 641 de 14 de Abril de 2014 (ANA, 2014d).

Em outros casos, têm se estabelecido uma cobrança determinando-se um custo fixo por hectare de lavoura que é cobrado para a água. Isso viola princípios econômicos, desde que o preço não esteja relacionado com a quantidade de água aplicada ou usada, e há pouco incentivo para conservação de água. Este tipo de cobrança é, frequentemente, justificado pela dificuldade e despesa para determinar a quantidade de água que é entregue a uma fazenda (MCKINNEY e SAVITSKY, 2006).

Crítérios diferentes utilizados na outorga e cobrança são aplicados em função do número dos usuários e do grau de organização dos empreendimentos. Perímetros irrigados possuem uma estrutura mais organizada e são mais fáceis de serem fiscalizados ou ‘punidos’ num período de escassez. Por exemplo, no sistema Coremas/Mãe d’água, no estado da Paraíba, em recente período de escassez, o perímetro irrigado (PIVAS) outorgado pela ANA, foi o primeiro que teve a sua outorga drasticamente diminuída, entretanto os usos difusos (a maioria irregular ou com dispensa de outorga) não sofreram cortes significativos de água alocada, através da Resolução N° 641 de 14 de Abril de 2014 (ANA, 2014d). Comumente, pequenos irrigantes também não necessitam de direitos de uso, já que há um valor mínimo para que seja necessário o pedido da outorga e além disso também não são cobrados pelo uso da água.

2.1.3 Comitê de bacia hidrográfica

A Política nacional de recursos hídricos, através dos princípios de gestão estabelecidos na ‘Lei das Águas’ (BRASIL, 1997), estabelece a gestão descentralizada e participativa. Neste sentido, compete aos comitês da bacia hidrográfica:

I - promover o debate das questões relacionadas a recursos hídricos e articular a atuação das entidades intervenientes;

II - arbitrar, em primeira instância administrativa, os conflitos relacionados aos recursos hídricos;

III - aprovar o Plano de Recursos Hídricos da bacia;

IV - acompanhar a execução do Plano de Recursos Hídricos da bacia e sugerir as providências necessárias ao cumprimento de suas metas;

V - propor ao Conselho Nacional e aos Conselhos Estaduais de Recursos Hídricos as acumulações, derivações, captações e lançamentos de pouca expressão, para efeito de isenção da obrigatoriedade de outorga de direitos de uso de recursos hídricos, de acordo com os domínios destes;

VI - estabelecer os mecanismos de cobrança pelo uso de recursos hídricos e sugerir os valores a serem cobrados;

(BRASIL, 1997)

O Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco – CBHSF é um órgão colegiado, integrado pelo poder público, sociedade civil e empresas usuárias de água, que tem o objetivo de realizar a gestão descentralizada e participativa dos recursos hídricos da bacia hidrográfica do Rio São Francisco, para proteger os seus mananciais e colaborar para o seu desenvolvimento sustentável. Para tanto, o governo federal lhe conferiu atribuições normativas, deliberativas e consultivas. O CBHSF foi instituído por decreto (BRASIL, 2001), com 62 membros titulares, sendo os usuários das águas da bacia representados por 38,7%; o poder público (federal, estadual e municipal) por 32,2%, a sociedade civil por 25,8% e as comunidades tradicionais por 3,3% do total desses membros (CBHSF, 2014).

A Associação Executiva de Apoio à Gestão de Bacias Hidrográficas Peixe Vivo (AGB Peixe Vivo) é a Agência de Bacia para o Comitê da Bacia Hidrográfica do rio São Francisco com a finalidade de apoiar a gestão dos recursos hídricos. Ela cumpre a função de secretaria executiva do Comitê e fornece suporte ao mesmo através do planejamento, execução, acompanhamento de ações, programas, projetos e pesquisas (AGB PEIXE VIVO, 2014).

2.1.4 Cobrança

A Lei nº 9.433 (BRASIL, 1997) estabelece a cobrança como um dos instrumentos de gestão, que também é usado na alocação dos recursos hídricos. O objetivo da cobrança é dar uma indicação ao usuário do real valor do recurso, reconhecendo a água como um bem econômico. A cobrança possui objetivos econômicos e arrecadatórios, pois promove o uso eficiente e racional de água e ainda tem a finalidade de obter recursos financeiros para o financiamento dos programas e intervenções contemplados nos planos de recursos hídricos (BRASIL, 1997).

O CBHSF implementou a cobrança pelo uso da água no rio São Francisco, em julho de 2010 (CNRH, 2010). Os mecanismos e valores de cobrança foram estabelecidos na Deliberação CBHSF nº 40/08. Os valores são cobrados e arrecadados pela ANA e repassados à AGB Peixe Vivo, a quem compete desembolsar os recursos nas ações previstas no Plano de Recursos Hídricos da bacia e conforme as diretrizes estabelecidas no plano de aplicação (ANA, 2014c).

Segundo Vera (2014), em termos de quantitativos financeiros obtidos com a cobrança, apesar da irrigação consumir mais de 70 % dos volumes totais de uso na bacia, o total da agricultura irrigada representa apenas 9% do valor arrecadado total. Segundo a autora, isto é um resultado do mecanismo de cobrança adotado que dá um desconto de 97,5% no valor cobrado para a agricultura e nos preços fixos unitários estabelecidos. A avaliação da evolução do consumo e das vazões de captação dos usos mostram um crescimento para o período de 2011 a 2013, o que pode estar sinalizando para uma utilização não eficiente da água.

2.2 MODELOS PARA APOIO A GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

2.2.1 Modelos de análise sistêmica em geral e modelos de alocação de águas

A análise sistêmica aplicada aos Recursos Hídricos usa modelos de simulação e otimização para explorar os benefícios e gerir sistemas ambientais como unidades interdependentes integradas (HAROU, PULIDO-VELAZQUEZ, *et al.*, 2009). Esses modelos de simulação e otimização são simplificações dos sistemas físicos reais e têm como objetivo auxiliar o decisor na interpretação de como esses sistemas funcionarão sob condições diferentes, muitas vezes controversas e sempre relacionadas com incertezas. Por isso, incluem necessariamente pressuposições sobre condições e eventos futuros que não são conhecidos. A maioria das atividades relacionadas a gestão de recursos hídricos requer a utilização de modelos, sejam problemas de inundação, operação de reservatórios, águas subterrâneas, alocação de água, ou de melhoramentos do ecossistema aquático. Os modelos precisam incluir considerações econômicas, ambientais e sociais, bem como identificar *trade-offs* e subsidiar o estabelecimento de planos, projetos e políticas que maximizem os efeitos desejados e minimizem aqueles indesejados (LOUCKS, 2008).

Existem vários tipos de modelos, utilizando diferentes abordagens, aplicados na gestão de recursos hídricos. A Figura 1 mostra uma classificação simplificada dos modelos considerando aspectos hidrológicos em termos de aleatoriedade e variabilidade espacial e temporal, segundo Chow e Maidment (1988). Essa classificação é, principalmente, útil para descrever como o modelo analisa processos hidrológicos na extensão espacial e temporal.

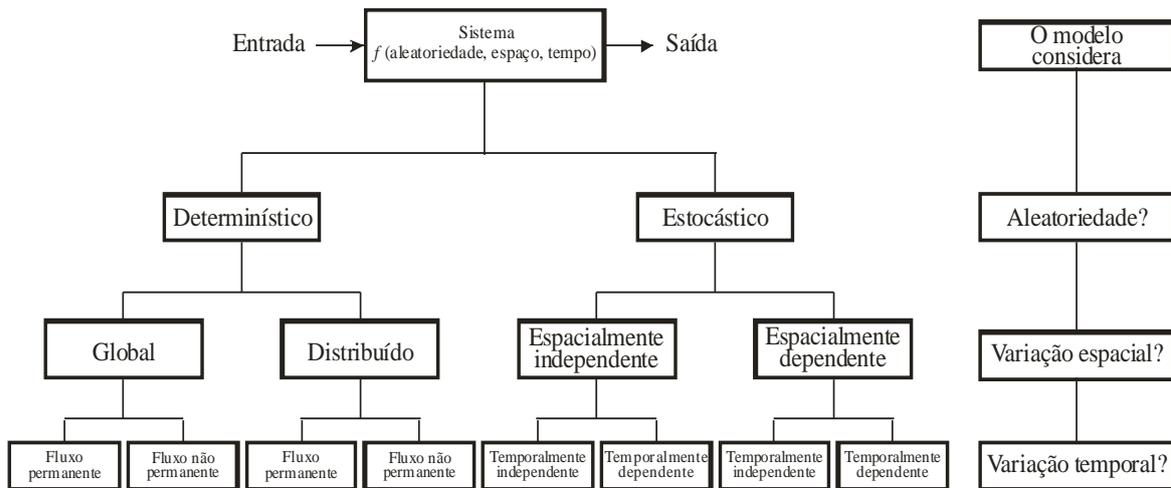


Figura 1 – Classificação dos modelos hidrológicos de acordo como eles tratam aleatoriedade e a variabilidade espacial e temporal dos fenômenos hidrológicos (CHOW e MAIDMENT, 1988)

Uma classificação para os modelos de análise sistêmica em geral, adotada por Wurbs (2005) categorizando os mesmos como sendo Prescritivos ou Descritivos, foi proposta por Moraes e Marques (2012), para ser aplicada aos modelos de alocação de águas para apoio à gestão de recursos hídricos. Os modelos Prescritivos determinam o plano que deverá ser adotado para satisfazer um determinado objetivo ou critério de decisão, já os modelos Descritivos mostram o que ocorrerá se um determinado plano é adotado. A Figura 2 apresenta e detalha a proposta de aplicação desses conceitos à gestão de sistemas de recursos hídricos com os referentes subtipos.

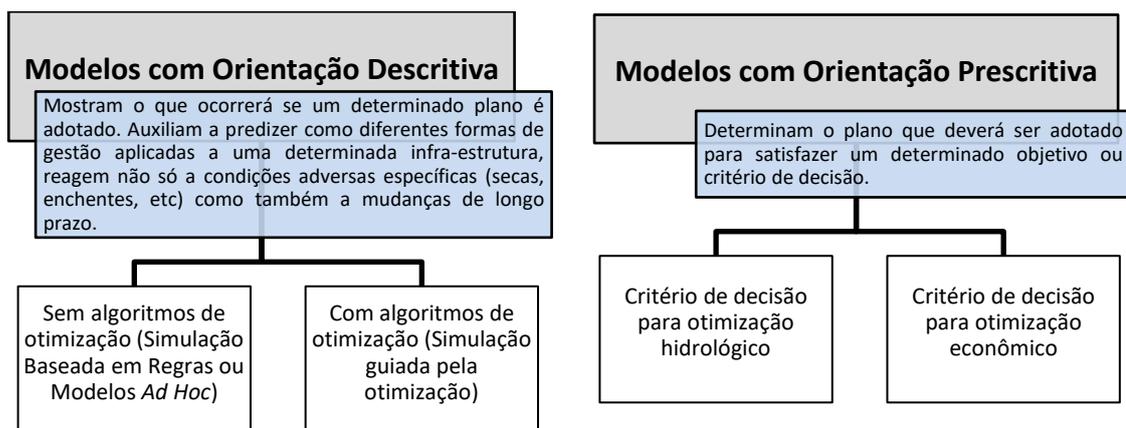


Figura 2 – Abordagens e Principais Características dos Modelos para apoio à Gestão de Recursos Hídricos (adaptado de MORAES, 2012)

Os modelos com Orientação Descritiva podem ou não ter algoritmos de otimização e simulam a alocação dos recursos hídricos de acordo com um conjunto de regras predefinidas. Estes

modelos são muitas vezes a melhor abordagem para a avaliação do desempenho do sistema e de estratégias alternativas a se testar, permitindo uma representação mais detalhada e realista das características complexas de um sistema de recursos hídricos. Os modelos com Orientação Prescritiva são particularmente úteis para identificar soluções de planejamento / gestão ótimas (quais são as melhores estratégias). A incorporação realista de incertezas hidrológicas ainda permanece como um dos principais desafios para os modelos de apoio à decisão para a gestão de sistemas integrados de recursos hídricos (LABADIE, 2004; apud PULIDO-VELAZQUEZ, ANDREU, *et al.*, 2008).

Os Modelos Descritivos (com ou sem algoritmos de otimização) simulam sequencialmente para cada intervalo de tempo os fluxos, alocações e volumes nos diversos nós e links da rede. Esta abordagem emergiu das ciências hidrológicas e pode ser considerada como uma extensão de modelos de chuva-vazão que são amplamente utilizados em hidrologia (ver, por exemplo, (KOCH, LIERSCH, *et al.*, 2015a)). Estes modelos vêm auxiliando há algum tempo (LOUCKS, STEDINGER e HAITH, 1981; LOUCKS e BEEK, 2005) os gestores não só no planejamento, mas também no projeto e operação de sistemas hídricos. Segundo Matrosov *et al.* (2011), ao utilizar as regras de operação e alocação definidas pelo usuário, para prever fluxos e volumes de água nos nós e links de uma rede num determinado horizonte de tempo, auxiliam a prever como diferentes formas de gestão aplicadas a uma determinada infra-estrutura, reagem não só a condições adversas específicas (secas, enchentes, etc.), como também a mudanças de longo prazo.

Os Modelos Prescritivos tipicamente usam técnicas de otimização, ou seja, maximizam ou minimizam uma função-objetivo específica para fornecer valores das variáveis de decisão (valores alocados) simultaneamente em todos os períodos de tempo, considerando todos os influxos relativos ao horizonte de tempo em análise. Este horizonte em análise, ao contrário dos modelos descritivos em geral não se constituem de longo períodos. McKinney *et al.* (1999) citam, como uma vantagem desses modelos, a capacidade dos mesmos incorporarem valores sociais e econômicos na alocação de recursos hídricos. Os autores citam dois tipos de otimização: a hidrológica (*hydrology-inferred*), na qual a função objetivo para a decisão na alocação inter-setorial é derivada de especificações hidrológicas e econômicas, utilizando o princípio da equimarginalidade econômica.

Os princípios de Dublin (ICWE, 1992) estabeleceram o conceito da água como um bem econômico na agenda global. Entretanto, o significado exato de alguns dos princípios articulados não está claro. A afirmação que a água é um "bem econômico" ou o conceito de

água como um bem econômico, principalmente para não-economistas, não é em geral um conceito bem compreendido. O significado, especialmente, em termos práticos para o gestor de água ou para a sociedade precisa ser melhor divulgado e explicitado (ROGERS, BHATIA e HUBER, 1998).

2.2.2 Os modelos hidro-econômicos

Os modelos hidro-econômicos, que sob a classificação proposta por Moraes et al. (2012) são modelos de otimização de orientação prescritiva usando um critério econômico, têm avançado rapidamente nos últimos anos, e devem impactar, significativamente, nas abordagens conceituais e práticas de gestão de recursos hídricos. A finalidade desses modelos é examinar o sistema de recursos hídricos de uma forma nova e investigar sistemas de gestão de recursos hídricos e aumentar os conhecimentos das políticas adotadas (MAYER e MUÑOZ-HERNANDEZ, 2009; HAROU, PULIDO-VELAZQUEZ, *et al.*, 2009; NULL, MEDELLIN-AZUARA, *et al.*, 2014; SICKE, LUND e MEDELLIN-AZUARA, 2013).

Torres et al. (2011) apresentaram um modelo hidro-econômico e aplicaram na bacia hidrográfica do rio São Francisco, com o objetivo de analisar os efeitos de políticas de uso da água e as mudanças nos preços dos produtos para a agricultura, baseado no trabalho de Maneta et al. (2009). Esse trabalho concentrou-se nas mudanças para o setor agrícola e teve contribuições notáveis para entender os impactos de políticas de uso da água para a agricultura irrigada.

A engenharia, muitas vezes, propõe uma visão estática da demanda de água. Em modelos hidrológicos, as demandas de água são comumente representadas por uma quantidade de água fixa. A visão estática é, também, definida pela própria política de recursos hídricos, através do sistema de outorga e as prioridades de usos (BRASIL, 1997). Para enfrentar problemas de escassez de água relacionados com um aumento dos conflitos entre os usuários de água, um conceito de demandas variáveis é necessário.

A economia ajuda gestores da água a passar de uma visão que trata a demanda hídrica como um requerimento, normalmente fixo, para uma visão que reflita a percepção da escassez. Nessa última, a demanda não é fixa e varia conforme o benefício marginal da água para o usuário. As demandas de água não são representadas por requerimentos “fixos”, definidas através de outorgas, prioridades, etc., mas sim através do conceito econômico de valor. Isto é possível através do uso de curvas de demanda por água nos modelos. Estas curvas representam a disposição a pagar dos consumidores ou os benefícios marginais (de uma unidade a mais do

recurso) variando com diferentes quantidades de água alocadas. A partir dessas curvas obtêm-se os benefícios econômicos totais⁹, associados a valores alocados aos usos. Em modelos hidro-econômicos, representam-se os principais elementos hidrológicos, como bacias hidrográficas, rios, reservatórios e usuários de água, distribuídos espacialmente em uma rede de nós e links. Esta rede possibilita que se integrem dados físicos e econômicos associados aos usuários da água.

A estrutura clássica de modelos de otimização hidro-econômicos consiste em uma função objetivo escalar representando um critério econômico, sujeito a certas restrições em geral hidrológicas e institucionais para garantir a viabilidade e a sustentabilidade da operação do sistema resultante. Na maioria desses modelos, os benefícios econômicos líquidos dos usuários são maximizados (PULIDO-VELAZQUEZ, ANDREU, *et al.*, 2008). Em alguns modelos, a função objetivo pode ser representada por custos e o problema passa a ser de minimização, onde os custos modelados incluem benefícios não obtidos, devido a não alocação ou custos evitados (DRAPER, JENKINS, *et al.*, 2003; apud PULIDO-VELAZQUEZ, ANDREU, *et al.*, 2008).

Restrições são utilizadas para representar o sistema de recursos hídricos, considerando às características físicas, ambientais, legais, institucionais e operacionais. As restrições podem se configurar como limites, que podem ser superiores (por exemplo, armazenamento de reservatórios) e inferiores (como a vazão ecológica). Restrições como limites inferiores, ao contrário das restrições de limites superiores, que muitas vezes representam limitações físicas reais do sistema que não podem ser violados, podem representar objetivos implícitos ou objetivos que poderiam ser violados, mesmo que o custo dessa violação seja alto. Em modelos de otimização, o uso de variáveis com folga ou excedentes, mesmo com um custo elevado, permitem introduzir algum grau de flexibilidade para estas restrições (PULIDO-VELAZQUEZ, ANDREU, *et al.*, 2008).

Segundo Dalhuisen *et al.* (2003), as opções de políticas de recursos hídricos orientadas pela demanda, a chamada gestão da demanda, para lidar com a crescente escassez de água, são cada vez mais aceitas como um complemento necessário das políticas tradicionais orientadas pela oferta. Uma avaliação do potencial de tais políticas deve se basear em uma compreensão completa das respostas do consumidor às mudanças de preços e de benefícios. O conhecimento detalhado sobre elasticidades-preços e rendimento da demanda de água está disponível, através

⁹ Isto é feito através da integração da área sob a curva de demanda, já que a mesma mensura os benefícios marginais associadas a diversas alocações.

de um número significativos de estudos empíricos. A elasticidade-preço da demanda é a variação percentual na quantidade demandada de água dada uma variação percentual no preço, sendo necessária para a obtenção das curvas de demanda em algumas metodologias.

Referências contendo estimativas de elasticidades-preços e rendimentos da demanda de água são encontrados ao redor do mundo, no Brasil, no entanto, poucos estudos são encontrados. Dalhuisen *et al.* (2001), utilizaram um meta-análise para identificar fatores importantes que explicam a variação nas elasticidades de preços e de rendimentos na demanda de água residencial. Esse trabalho aplicou métodos estatísticos para sintetizar resultados de pesquisa sobre elasticidades de preços e rendimentos da demanda de água residencial relatado na literatura, principalmente nos EUA e Europa. Uma abordagem semelhante foi adotada pelo Scheierling *et al.* (2006), que também realizou uma meta-análise para investigar estatisticamente potenciais fontes de variação nas estimativas empíricas disponíveis da elasticidade-preço da demanda de água de irrigação.

2.2.3 Modelos de otimização estocásticos

Uma das dificuldades na gestão dos recursos hídricos é o fato da oferta e demanda não coincidirem espacialmente e temporalmente. Na bacia do SMSF, vários reservatórios de aproveitamentos hidroelétricos foram construídos para superar essas dificuldades temporais. A capacidade de armazenamento dos reservatórios é utilizada para assegurar a disponibilidade hídrica e a produção de energia para as épocas de menor disponibilidade. No entanto, a disponibilidade dessa energia hidrelétrica é limitada pela capacidade de armazenamento do reservatório. Isto introduz uma relação entre a decisão operatória em uma determinada fase e futuras consequências dessa decisão. Por exemplo, se a energia hidráulica armazenada é utilizada hoje em dia, e uma seca ocorre, pode ser necessário o uso de geração térmica no futuro ou mesmo poderá levar a uma interrupção no fornecimento de energia (TILMANT, ARJOON e MARQUES, 2012; PEREIRA, CAMPODÓNICO e KELMAN, 1998).

A abordagem para a determinação do valor econômico de armazenamento considera que os reservatórios são agentes econômicos que oferecem o serviço de transferência de água no tempo. O elemento estocástico, nos modelos de otimização é a vazão afluente ao reservatório, que varia na sua distribuição temporal e depende da variabilidade e mudanças climáticas. A contribuição econômica dos reservatórios, em toda a bacia, considerando os mesmos como agentes econômicos, pode ser caracterizada pela sua função de benefício líquido marginal. Na economia, o valor do benefício líquido marginal da água representa a disposição do usuário em

pagar por uma unidade adicional do recurso. A partir do valor do benefício líquido marginal do armazenamento de água bruta em um reservatório, para uso posterior para diferentes usuários, pode-se determinar o valor econômico associado a mudanças no armazenamento das políticas operacionais dos reservatórios e o valor marginal da água armazenada nos reservatórios. Esta informação pode ser obtida a partir de modelos de otimização estocásticas (PEREIRA, CAMPODÓNICO e KELMAN, 1998; TILMANT, ARJOON e MARQUES, 2012; PEREIRA, 1985).

Uma abordagem semelhante é proposta por Vicuna et al. (2010), que usa a Programação Dinâmica Estocástica com Amostragens (SSDP – *sampling stochastic dynamic prog.*) para otimizar os benefícios considerando também mudanças climáticas. A vantagem do SDP é que a técnica não depende de uma determinada descrição probabilística das entradas, portanto, pode lidar com processos hidrológicos não estacionários. A técnica tem sido utilizada para otimizar as operações em tempo real de reservatórios utilizando conjuntos de cenários de vazões previstas continuamente atualizados (VICUNA, DRACUP, *et al.*, 2010).

2.2.4 Gestão integrada de recursos hídricos

Ao representar aspectos hidrológicos, ambientais e econômicos, numa plataforma única, e incluir os conceitos econômicos no centro das estratégias de alocação de água, os modelos hidro-econômicos têm emergido como uma ferramenta privilegiada para a implementação de uma gestão integrada de recursos hídricos (*Integrated Water Resources Management - IWRM*), como definida pelo *Global Water Partnership*¹⁰ (ver <http://www.gwp.org>).

Uma plataforma conceitual, para o desenvolvimento de modelos econômico-hidrológicos integrados, utilizando a otimização, foi descrita por McKinney et al. (1999). Essa plataforma ainda se mantém atual, pois incorpora todos os elementos para uma modelagem de gestão de água em nível de bacia (ver Figura 3), alinhada com as tendências correntes. Ela inclui decisões em vários níveis de bacia e subbacia, tais como: quantidade de água retirada de rios/reservatórios; requerimento de fluxo para fins ambientais, etc. e incorpora todos os possíveis

¹⁰ De acordo com a definição da GWP (*Global Water Partnership*), IWRM é “um processo que promove o desenvolvimento e a gestão de água, terra e recursos naturais relacionados com o objetivo de maximizar o bem-estar econômico e social de uma maneira equitativa sem comprometer a sustentabilidade de ecossistemas vitais ao planeta.”

usos não-consuntivos - incluindo geração de energia, lazer- e os consuntivos, tais como agricultura e uso doméstico e industrial.

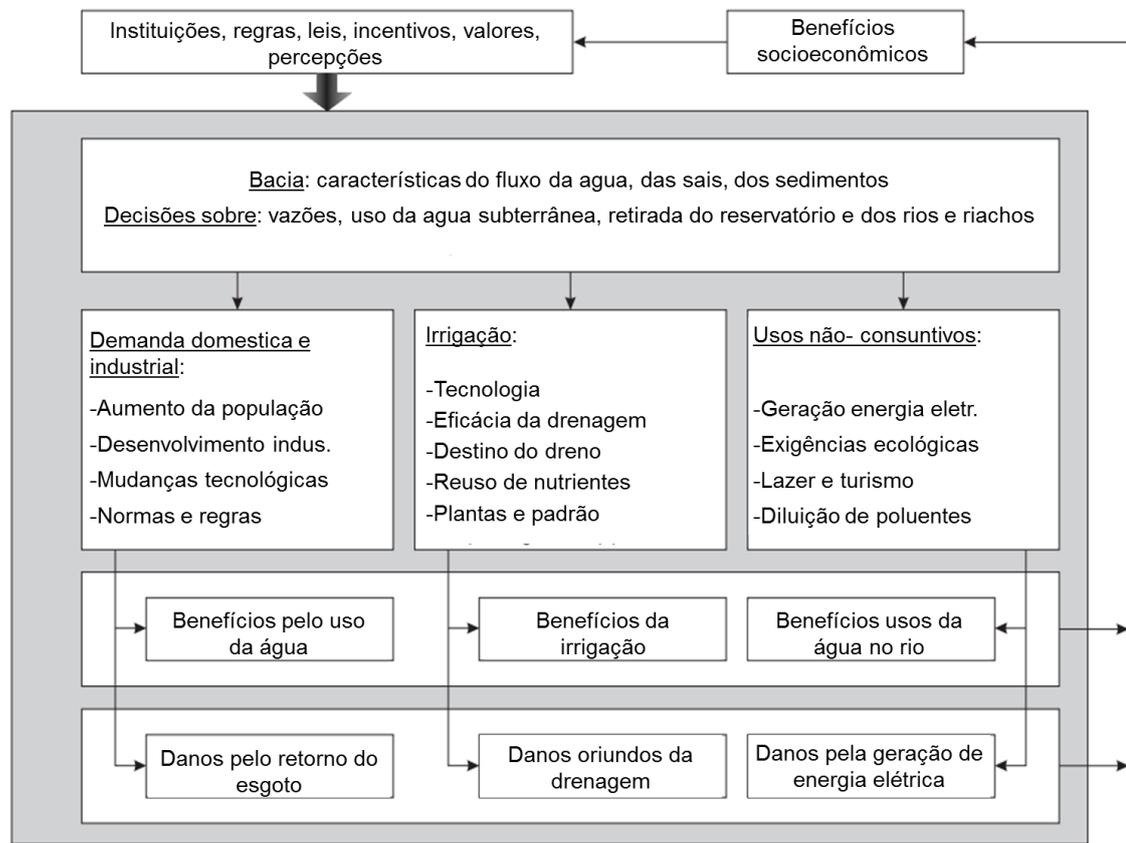


Figura 3 – Plataforma conceitual para o desenvolvimento de modelos econômico-hidrológicos integrados (modelos de otimização). Fonte: Adaptado de McKinney et al. (1999)

Maximizam-se os benefícios líquidos socioeconômicos da bacia, na medida em que se agregam os benefícios e prejuízos de cada uso. Estes valores ótimos realimentam o bloco de controle do sistema, que inclui tanto as questões institucionais, como os incentivos econômicos, que restringem ou estimulam decisões de consumo, bem como operações hidrológicas. Assim, o sistema hidrológico interage com as diversas decisões de uso da água e, ao mesmo tempo, as decisões de consumo da água são restritas pelo sistema hidrológico. Além disso, a plataforma representa a bacia como um todo, o que possibilita a representação de todas as conexões entre fontes e usos de água e entre consumidores a montante e a jusante, considerando-se inclusive o processo de fluxo de retorno no modelo. Dessa forma, a plataforma tanto pode servir como uma ferramenta de auxílio na avaliação de políticas de água, como um sistema de apoio à decisão das questões operativas hidrológicas.

A integração dos aspectos econômicos e hidrológicos, proposta nesta plataforma, especialmente nos estudos voltados a avaliar alternativas e políticas de alocação de água envolve uma série de dificuldades¹¹. As duas estratégias existentes, para combinar os componentes econômicos e hidrológicos nos modelos de otimização são: “modelagem compartimentada” e a “modelagem holística” (BRAAT e LIEROP, 1987). Na primeira, tratam-se os componentes hidrológico e econômico como sub-modelos cujas soluções individuais são modificadas por algum método de coordenação que una as mesmas. Na modelagem holística, ao contrário, os sub-modelos são combinados em um único modelo, que em geral é resolvido de uma só vez.

O tratamento endógeno das relações hidrológicas e econômicas apresenta uma série de vantagens, tais como (adaptado de CAI, 2008): i) Permite uma análise econômico-ambiental mais efetiva; ii) Consegue apreender as relações entre o homem e o meio ambiente; iii) Imitam o impacto do ambiente, dessa forma podendo, efetivamente, apoiar decisões relacionadas a um desenvolvimento econômico sustentável.

Os modelos holísticos (*Holistic Water resources-economic models – HWEMs*) têm se apresentado como uma ferramenta importante para a gestão integrada de bacias e despertado crescente interesse de estudo. São, particularmente, úteis para regiões onde a competição por água é intensa, usos econômicos da água dominam, há interesse pelos impactos econômicos e operacionais de instrumentos de gestão, e dados são disponíveis para calibrar os modelos econômicos (MARQUES, LUND, *et al.*, 2006).

2.2.5 Custos e benefícios de água

A partir da utilização de água, os custos e os benefícios relacionados com a água podem ser determinados individualmente para cada uso/ usuário, os valores podem ser afetados pela finalidade de uso de água e a qualidade da água. Os valores podem ser analisados por usuário ou para todo o sistema. Entretanto, para avaliar completamente os custos e benefícios na gestão de recursos hídricos devem ser considerados além dos aspectos econômicos, relações entre vários usos de água e *stakeholders*¹². Para demandas derivadas, ou seja, quando a água entra

¹¹ De uma forma básica, relativa a construção dos modelos em si, poderia-se citar as mesmas dificuldades relatadas em McKinney et al, 1999 baseado em Braat & Lierop, 1987 para a integração econômico-ecológica: dificuldades na troca de informações entre os dois componentes; limites políticos e administrativos que podem não ser os mesmos para os dois sistemas; diferentes horizontes espaciais, bem como horizontes de tempo, além da disponibilidade de dados.

¹² Partes interessadas na decisão

como um insumo num processo produtivo, como a demanda de água para irrigação e geração de energia hidrelétrica, os benefícios econômicos podem ser estimados isolando a proporção de água que contribui para o valor total ou o valor residual (YOUNG, 2005; apud PULIDO-VELAZQUEZ, ANDREU, *et al.*, 2008).

Os custos de água, para um consumidor doméstico, incluem os custos associados com o abastecimento de água. Estes custos são associados com o funcionamento diário do sistema de abastecimento. Os custos típicos incluem a tarifa de água bruta, energia elétrica para o bombeamento, trabalho, materiais de reparação, e insumos para o funcionamento do sistema. Existem vários estudos sobre custos de água para uso na irrigação (ROCHA, PEREIRA e COELHO, 2003; MAROUELLI e SILVA, 2011; FARIAS, 2006; XAVIER, COSTA e COSTA, 2005). Como já mencionado, os custos para o consumidor dependem também da finalidade, no caso da irrigação como insumos na produção agrícola. Existem inúmeras análises dos custos de produção referentes à rentabilidade de culturas em várias regiões (ARAUJO, CORREIA e RAMALHO, 2006; ARAUJO e CORREIA, 2007; ALVES, JÚNIOR, *et al.*, 2011; JÚNIOR, 2005).

Além dos custos diretos do usuário, existem outros custos econômicos como encargos de capital, custos de operação e manutenção, custos de oportunidade e externalidades econômicas. O custo de oportunidade relaciona-se ao seguinte fato: ao consumir água para uma determinada finalidade, o usuário está privando água que poderia ser utilizada para um outro uso. Caso este outro uso tenha um valor mais elevado para a água, então há perdas para a sociedade, devido a essa má alocação de recursos. O custo de oportunidade da água é zero, apenas quando não há uso alternativo. Os custos de oportunidade podem ser diferentes dos custos financeiros ou contábeis (ROGERS, BHATIA e HUBER, 1998; GRIFFIN, 2006).

Externalidades econômicas são os efeitos colaterais sobre outros não diretamente envolvidos no consumo da água, por exemplo, poluição da água e o tratamento por um terceiro. As externalidades podem ser positivas ou negativas, ou seja, elas podem gerar benefícios ou custos para a sociedade. Os custos/benefícios das externalidades não são considerados no mercado que as impõe, eles têm o efeito de propagação associado à atividade econômica que se estende a um terceiro, fora do mercado. Para melhorar análises de custos e benefícios, as externalidades negativas poderão ser internalizadas, ou seja, incluídas dentro da análise de mercado, por exemplo, através de taxas (THOMAS e CALLAN, 2010).

O modelo de otimização, segundo o critério econômico, associa-se ao conceito de eficiência alocativa, ou seja, alocação de água economicamente ótima entre os usos/ setores. Nesta alocação ótima, cada setor obtém a mesma utilidade da unidade marginal do recurso alocada, ou seja, o princípio da equimarginalidade econômica é atendido. Esta é uma alocação teórica, posto que, na prática, a mesma envolve uma série de dificuldades. Mesmo na modelagem, o princípio da equimarginalidade não é sempre atendido (nem espacialmente e temporalmente na rede), dado que restrições não-econômicas, tais como as hidrológicas e as institucionais são incorporadas (HAROU, PULIDO-VELAZQUEZ, *et al.*, 2009).

O valor da água não é limitado ao benefício direto gerado para o usuário. A alocação da água para uma certa finalidade gera benefícios sociais, econômicos e ambientais, que não necessariamente restringem-se aos benefícios gerados pelo uso direto da água. Por exemplo, muitos investimentos em infraestrutura hídrica concretizados resultaram em benefícios maiores do que as estimativas previstas por essas obras hídricas (KELMAN e RAMOS, 2005; YOUNG, 2005).

Ademais, os benefícios e os custos são muitas vezes intangíveis e difíceis de ser mensurados, sendo muitas vezes conflitantes, com *trade-offs* a ser considerados. A análise multiobjectivo reconhece isso ao revelar compensações entre objetivos diferentes, por exemplo:

Quadro 1 – Benefícios e custos (adaptado de McLaughlin (2006))

Benefício	Custo
Produção das hidrelétricas [MWh, R\$]	A diminuição da vazão ecológica, a perda de habitat de espécies ou as oportunidades de lazer [Unidade?]
Receitas de culturas adicionais que beneficiam agricultores à montante de desvio de água [R\$]	Receitas das culturas reduziram para os agricultores a jusante com menos água [R\$]

A Figura 4 mostra uma abordagem para encontrar uma solução ótima utilizando a função de utilidade (ou preferência) e diversos valores de benefícios obtidos segundo diferentes critérios. A fronteira de Pareto define combinações de F_1 e F_2 , que são funções-objetivo segundo critérios diferentes. Ao longo desta fronteira, perdas ou reduções de benefícios sob um critério podem ser compensados pelos ganhos no outro. A curva de indiferença, que representa os valores igualmente aceitáveis para um determinado uso ou *stakeholder* deve definir o ponto ótimo que maximiza a utilidade, ou preferência do decisor (MCLAUGHLIN, 2006).

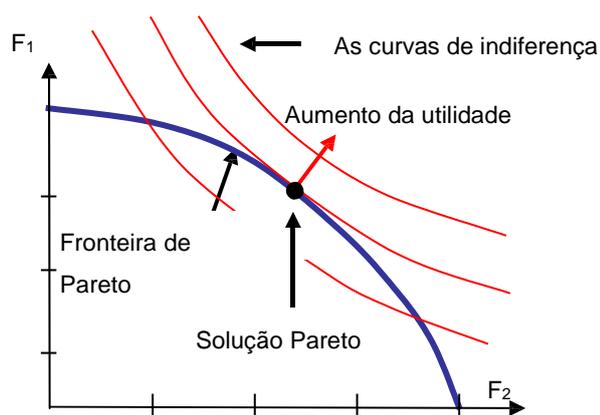


Figura 4 – Curva de indiferença adaptado de McLaughlin (2006)

A operação de reservatórios tem papel fundamental na gestão de recursos hídricos e ambiental no Semiárido. Diferentes estratégias de operação dos mesmos, mais ou menos conservadoras, diante de diferentes cenários climáticos resultarão em diferentes benefícios econômicos. Resultados como esses subsidiarão a discussão sobre a gestão adequada de reservatórios. Trata-se de valores que permitirão quantificar benefícios econômicos ganhos e perdidos pelos diversos setores usuários, associados às diversas estratégias de operação.

A medida da capacidade de resposta da quantidade demandada de um bem às mudanças em seu próprio preço é conhecida como elasticidade-preço da demanda (LIPSEY, 1988). Para estimar a função de demanda pelo recurso hídrico, que mede os benefícios marginais associados a diversas quantidades do recurso, são necessários os dados relativos às quantidades do recurso, bem como os benefícios econômicos associados ao mesmo. Existem muitas formas de utilização dos recursos hídricos, seja para consumo direto ou indireto num processo produtivo, como, por exemplo: a produção de alimentos, bem como para os serviços de ecossistemas básicos. Devido a essa diversidade de uso dos recursos hídricos e suas características específicas, uma variedade de métodos para estimar as demandas econômicas da água foi desenvolvida e continuam a se desenvolver (BOOKER, MICHELSEN, *et al.*, 2012). Em geral, os métodos econométricos são intensivos em dados, ou seja, requerem uma série extensa e confiável, entretanto existem métodos não tão intensivos em dados, a saber: o método de expansão de ponto e a programação matemática positiva (GRIFFIN, 2006).

2.3 MUDANÇAS DE USO DO SOLO E MUDANÇAS CLIMÁTICAS

A gestão de recursos hídricos deve considerar os potenciais impactos das mudanças climáticas e do aquecimento global, os quais podem colocar os sistemas de recursos hídricos ainda mais em situações de estresse, impactando assim a economia, a disponibilidade de água para uso humano e a manutenção dos ecossistemas naturais (QI, SUN, *et al.*, 2009; apud KIM, PARK, *et al.*, 2013). Durante as últimas décadas, a mudança climática tem sido muito discutida e estudada. Todos os aspectos da vida humana, podem ser afetados por esta mudança, não se podendo ignorar, assim, a mesma e nem tratar os seus efeitos como um tema irrelevante (NORDLUND, 2008).

O IPCC (*Intergovernmental Panel on Climate Change*) formou um fórum central relativo às avaliações dos efeitos das mudanças climáticas sobre o ambiente natural e da vida humana, considerando os estudos sobre as mudanças climáticas e os fenômenos atmosféricos. A principal atividade do IPCC é fornecer relatórios periódicos de avaliação sobre as mudanças climáticas. O relatório mais recente é o quinto Relatório ‘Mudança Climática de 2013’, que foi concluído em novembro de 2014 (IPCC, 2013).

Projeções de mudanças climáticas são feitas usando modelos climáticos, que simulam mudanças com base em um conjunto de cenários de forçantes antropogênicas. Novos conjuntos de cenários, os *Representative Concentration Pathways*¹³ (RCPs), foram estabelecidos para as simulações de modelos climáticos desenvolvidas no âmbito do framework do *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5* (CMIP5) do *World Climate Research Programme*. Um grande número de modelos climáticos globais estão presentes no CMIP5, cujos resultados formam o núcleo das projeções de mudanças climáticas (IPCC, 2014; TAYLOR, STOUFFER e MEEHL, 2012).

Cenários são elementos essenciais na análise das mudanças climáticas. Eles permitem que os pesquisadores analisem as consequências a longo prazo das decisões presentes, tendo em conta a inércia, tanto no sistema socioeconômico como físico. Cenários também constituem um elemento de integração entre as diferentes disciplinas de análise, tais como economia, climatologia, química atmosférica e geologia. Em 2007, o IPCC solicitou à comunidade científica para desenvolver um novo conjunto de cenários, dado que os cenários existentes

¹³ RCPs - Vias de concentração representativas

(NAKICENOVIC e SWART, 2000), chamado *Special Report on Emissions Scenarios*¹⁴ (SRES), precisam ser atualizados e expandidos em escopo (VUUREN, EDMONDS, *et al.*, 2011b).

A metodologia para o desenvolvimento de RCPs é esquematizada na Figura 5 (VUUREN, EDMONDS, *et al.*, 2011a, p. 10). Modelos de avaliação integrada (IAMs)¹⁵ utilizam uma série temporal de emissões de gases de efeito estufa, poluentes atmosféricos e mudanças no uso de solo de RCPs futuros, com a finalidade de realizar novas análises de modelos de clima e produzir novos cenários climáticos. Ao mesmo tempo, IAMs irão explorar uma gama de diferentes futuros tecnológicos, socioeconômicos e políticas que podem levar a outras emissões de gases de efeito estufa e outras magnitudes da mudança climática. Não são abordados aqui todos os elementos para o desenvolvimento de RCPs.

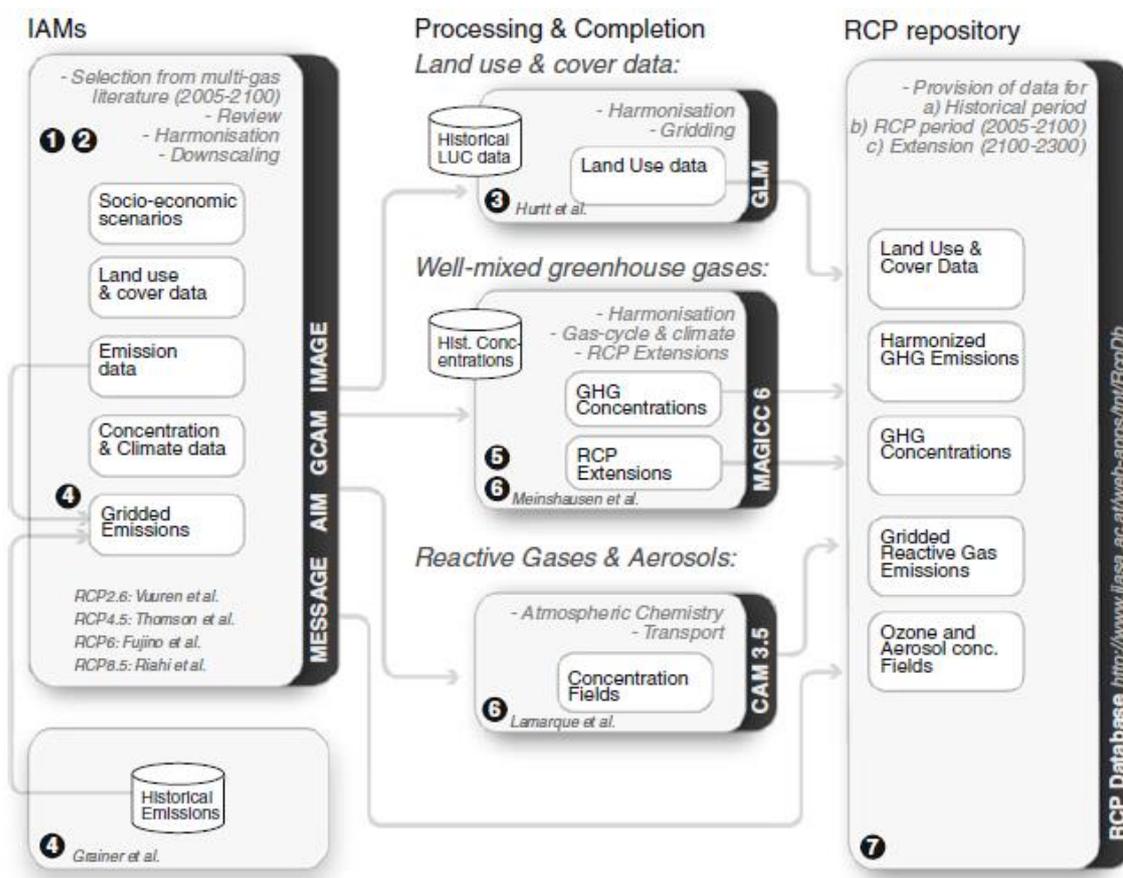


Figura 5 – Metodologia de desenvolvimento de RCPs (VUUREN, EDMONDS, *et al.*, 2011a)

¹⁴ SRES - Relatório Especial sobre Cenários de Emissões

¹⁵ IAMs - refere-se aos modelos que combinam aspectos de ciências naturais e socioeconômicos das alterações climáticas principalmente com a finalidade de avaliar as opções políticas para controlar as alterações climáticas

Os RCPs são nomeados com base no número de reflexão de radiação para o ano 2100. As estimativas de radiações são baseadas na intensidade da emissão dos gases de efeito estufa e outros agentes. Quatro RCPs foram selecionados e considerados no trabalho de Vuuren *et al.* (2011a), a saber: um cenário de mitigação, com um nível de emissões muito baixo (RCP2.6), dois cenários de estabilização médio (RCP4.5 / RCP6) e um cenário com uma base de emissões muito elevadas (RCP8.5).

Um elemento determinante dos cenários é o uso do solo (*Land use & cover data*). O uso do solo influencia o sistema climático, através do seu impacto em diversas variáveis, incluindo o volume de emissões diretas dos gases de efeito estufa, fatores hidrológicos, aspectos biogeofísicos (tais como, mudanças no albedo e rugosidade da superfície), e área de vegetação nativa. Historicamente, terras cultivadas e o uso de pastagens pelo homem aumentaram, impulsionado pelo aumento da população e mudança dos padrões alimentares (VUUREN, EDMONDS, *et al.*, 2011a). A Figura 6 mostra cenários de quatro RCPs considerando diferentes hipóteses referentes ao uso de solo (área cultivada, área de pastagem, área vegetação nativa).

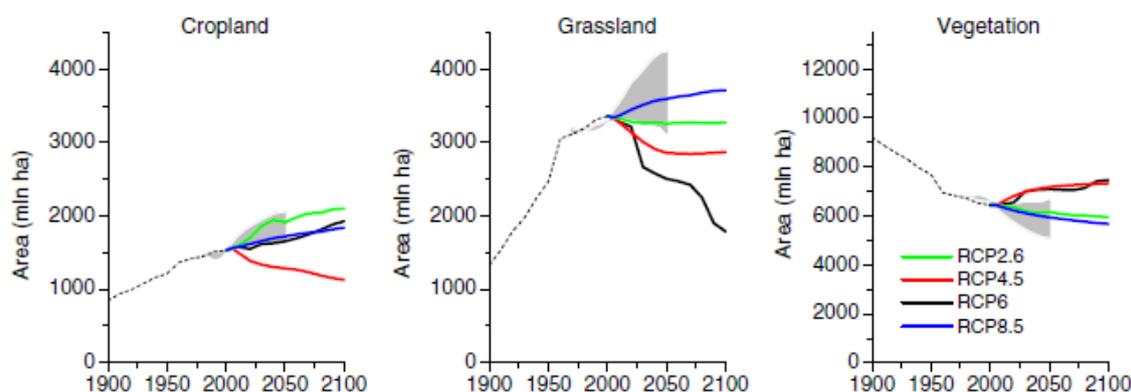


Figura 6 – Uso de solo (área cultivada, área de pastagem, área vegetação nativa) de quatro RCPs (SMITH, GREGORY, *et al.*, 2010; *apud* VUUREN, EDMONDS, *et al.*, 2011a)

Muitos fatores devem ser analisados quando se tenta prever como um futuro aquecimento global irá contribuir para a mudança climática. A quantidade de emissões futuras de gases de efeito estufa é uma variável chave. Além das mudanças no uso de solo, a evolução da tecnologia, as mudanças na geração de energia, as circunstâncias econômicas globais e regionais e o crescimento da população devem ser consideradas. O Quadro 2 mostra as características dos principais componentes de RCP 2.6, RCP 4.5, RCP 6 e RCP 8.5.

Quadro 2 – Características dos principais componentes de RCPs, extraído de Vuuren, Edmonds et al. (2011a)

Componente cenário	RCP 2.6	RCP 4.5	RCP 6	RCP 8.5
As emissões de gases com efeito de estufa	Muito baixo	Mitigação médio-baixo; Base muito baixa	Base Médio; Mitigação alta	Base alta
Área agrícola	Médio para terras cultiváveis e pastagem	Muito baixo para ambos terras cultivadas e pastagem	Médio para terras cultivadas, mas muito baixo para pastagens (baixa total)	Médio para ambos terras cultivadas e pastagem
Poluição atmosférica	Baixo - médio	Médio	Médio	Médio - alto

2.4 PROJETOS DE PESQUISA

O projeto de pesquisa INNOVATE (*Interplay among multiple uses of water reservoirs via innovative coupling of substance cycles in aquatic and terrestrial ecosystems*) tem 22 módulos de pesquisa, instalados tanto na Alemanha quanto no Brasil, os quais estão incluídos em sete subprojetos (SP): SP1 - Funções ecossistêmicas aquáticas, SP2 - Funções ecossistêmicas terrestres, SP3 - Fígado verde, SP4 - Biodiversidade / Serviços ambientais, SP5 - Modelagem, SP6 - Economia e SP7 - Abordagem para apoio em decisões. O objetivo principal do projeto INNOVATE é o desenvolvimento de uma ligação inovativa de ciclos biogeoquímicos, os quais são analisados em diferentes escalas (macro, média, micro e local) e integrados em aspectos socioeconômicos. A região do estudo se estende pela bacia hidrográfica do rio São Francisco até a barragem de Itaparica. A equipe é composta por pesquisadores brasileiros e alemães e o projeto tem 05 anos de pesquisa. O Ministério Brasileiro da Ciência, Tecnologia e Inovação (MCTI) coordena o grupo de patrocinadores brasileiros e estabelece, com isso, uma contrapartida direta à BMBF/DLR, da parte alemã (INNOVATE, 2012).

INNOVATE compreende uma ampla gama de disciplinas, com diversos níveis de estudo. Alguns estudos focam na bacia hidrográfica, escalando para o nível global, outros lidam com estudos regionais. Vários modelos e resultados são conectados, fornecendo uma imagem detalhada dos processos na bacia hidrográfica e da gestão de recursos hídricos. Cenários diferentes serão projetados e verificados quanto à sua sensibilidade às projeções de mudanças climáticas. Vários resultados das pesquisas já foram publicados (BIEWALD, LOTZE-

CAMPEN, *et al.*, 2014; KOCH, SELGE, *et al.*, 2015b; KOCH, BIEWALD, *et al.*, 2015c; MATTA, SELGE, *et al.*, 2016; GUNKEL, STEEMANN e SOBRAL, 2013; SIEGMUND-SCHULTZE, 2014; KOCH e SIEGMUND-SCHULTZE, 2014), os quais são parcialmente utilizadas neste trabalho.

O projeto “Sistema de Apoio à Decisão Hidro-Econômico para usos múltiplos da Água no Sub-Médio do São Francisco”, com recursos do CT-HIDRO (Chamada de nº 35/2013), tem o objetivo geral de fornecer subsídios, com o emprego de uma plataforma de modelagem hidro-econômica integrada a modelos de otimização, ao processo decisório presente nas políticas públicas de água, incluindo instrumentos de gestão previstos na Política Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997) e outros que promovam uma alocação inter e intra-setorialmente equitativa, sustentável e eficiente no sentido econômico (MORAES, 2016). Os resultados deste trabalho fornecem subsídios para decisão no planejamento e gestão de bacias hidrográficas, utilizando a plataforma de modelagem hidro-econômica integrada a ferramentas de otimização estocástica, aplicada à região do Sub-Médio do rio São Francisco. Este trabalho foca na análise de conflitos e *trade-offs* associados aonexo água-energia presente na região, no contexto de demandas urbanas, irrigação e geração hidrelétrica.

3. ESTUDO DE CASO

A área de estudo se constitui em uma das regiões hidrográficas da bacia do Rio São Francisco conhecida como o Sub-Médio do rio São Francisco. A bacia hidrográfica do Rio São Francisco localiza-se no Nordeste Brasileiro, entre os paralelos 7,272° e 20,929° de latitude sul e 47,644° e 36,315° de longitude oeste. Já o Sub-Médio do rio São Francisco está localizado entre os paralelos 7,272° e 11,475° latitude sul 41,460 ° e 36,983 ° longitude oeste. A Figura 7 mostra a localização da bacia na América do Sul e no território nacional, apresentando o rio São Francisco e os principais reservatórios de armazenamento de suas águas: Três Marias, Sobradinho e Itaparica.

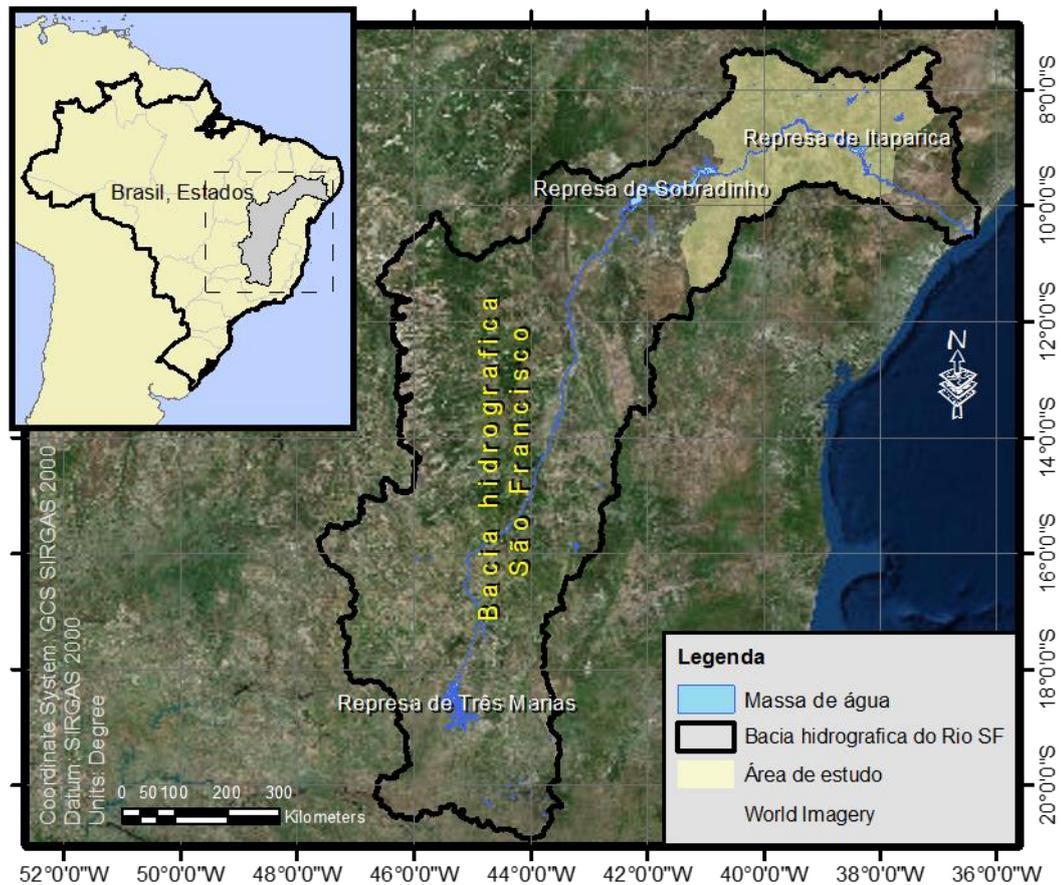


Figura 7 – Localização da bacia hidrográfica do rio São Francisco e área de estudo no Brasil

3.1 CARACTERÍSTICAS DA BACIA E DA REGIÃO HIDROGRÁFICA ESTUDADA

A área de drenagem da bacia ocupa 8% do Brasil e abrange seis Estados: Bahia, Minas Gerais, Pernambuco, Alagoas, Sergipe, Goiás e o Distrito Federal. Mais de 14,2 milhões de pessoas, o equivalente a 7,5% da população do País, habitava a região, em 2010 (IBGE, 2010). Pela sua diversidade e extensão, a bacia hidrográfica do rio São Francisco está dividida nas seguintes regiões fisiográficas: Alto São Francisco, Médio São Francisco, Sub-Médio São Francisco e Baixo São Francisco. As regiões representam características diferentes em relação ao clima, meio físico/biótico, aspectos socioeconômicos e uso de solo (CBHSF, 2004). A região hidrográfica do Sub-Médio do rio São Francisco compreende uma área de 110.366 km², que corresponde a 17,2% da área da bacia hidrográfica do Rio São Francisco (640.085 km²). O Sub-Médio do rio São Francisco (SMSF) inclui regiões dos Estados de Pernambuco e Bahia. As cidades de Petrolina, Juazeiro, Petrolândia, Remanso e a Paulo Afonso são os maiores centros urbanos.

A área de estudo (SMSF) está inserida na região semiárida brasileira, que possui características especiais, principalmente, com relação ao clima e a vegetação. O clima tropical semiárido no Brasil caracteriza-se pelo regime e pela quantidade de chuvas, determinado pela escassez, irregularidade espacial e concentração das precipitações pluviométricas, além de taxas de evapotranspiração elevadas. Na região semiárida, as chuvas anuais variam de um mínimo de 400 mm a um máximo de 800 mm ao ano. O período seco é predominante e pode atingir até 11 meses nas áreas de maior aridez. A precipitação ocorre de forma irregular e fica concentrada em 2 a 3 meses do ano, nessa época intensas precipitações (120 a 130 mm em 24 horas) podem ser observadas (MIN, 2005; EMPRAPA, 2008). A Figura 8 mostra a área de estudo inserida na região semiárida brasileira.

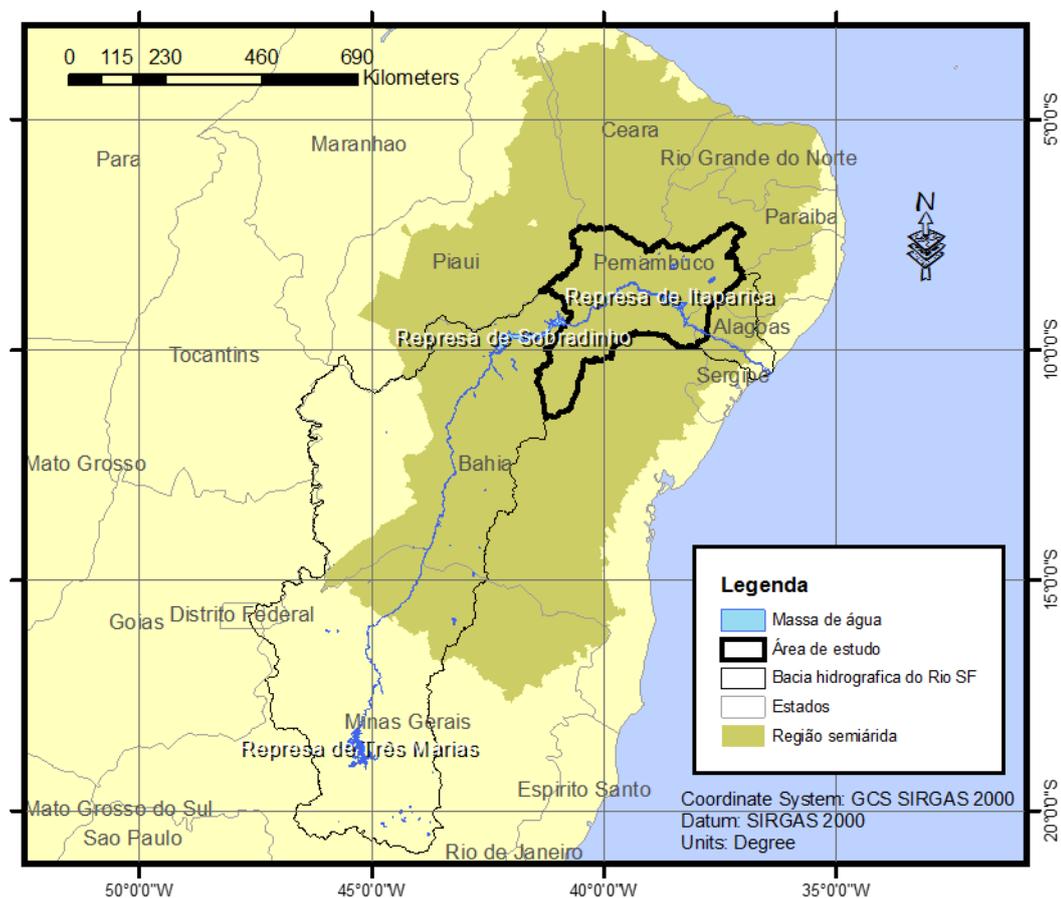


Figura 8 – Região semiárida e área de estudo

A temperatura média anual é de 27 °C. Em função das características do clima e temperatura, a evapotranspiração potencial é muito elevada e pode chegar a 2.000 mm por ano. Isso significa, que grandes reservatórios de armazenamento, como Sobradinho, têm uma perda por evaporação muito elevada, de cerca de 200 m³/s (10-15% da vazão no SMSF). A vegetação de caatinga é predominante em quase toda área do SMSF. Os solos dominantes na região hidrográfica são

das classes dos Latossolos e Argissolos. Os solos irrigáveis que incluem além dos Argissolos e Latossolos, os Vertissolos. Os Neossolos Quartzarênicos com altas taxas de infiltração foram incorporados aos sistemas produtivos utilizando sistemas de irrigação localizados (EMPRAPA, 2008; CBHSF, 2004).

A vazão natural média anual na foz do rio São Francisco é de 2.850 m³/s e em 95 % do tempo, a vazão natural é maior a 854 m³/s. Como a vazão é regularizada pelos reservatórios, o plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio São Francisco (CBHSF, 2004) estabeleceu uma vazão média diária de 1.300 m³/s, como uma vazão mínima ecológica na foz do rio São Francisco. Entretanto, a vazão mínima a jusante do reservatório de Sobradinho e Xingo foi reduzida várias vezes, mais recentemente (desde 8 de abril de 2013), para uma vazão mínima de 1.100 m³/s a 700 m³/s (ANA, 2013b; ANA, 2014b; ANA, 2015a; ANA, 2013a; ANA, 2016a; ANA, 2016b; ANA, 2016c). Para os usos consuntivos, foi definida a alocação máxima de 360 m³/s para a bacia do rio São Francisco (CBHSF, 2004). A Figura 9 mostra as séries históricas de vazões naturais durante o ano, obtidas no período de 1931 a 2013, em Itaparica no rio São Francisco (ONS, 2015).

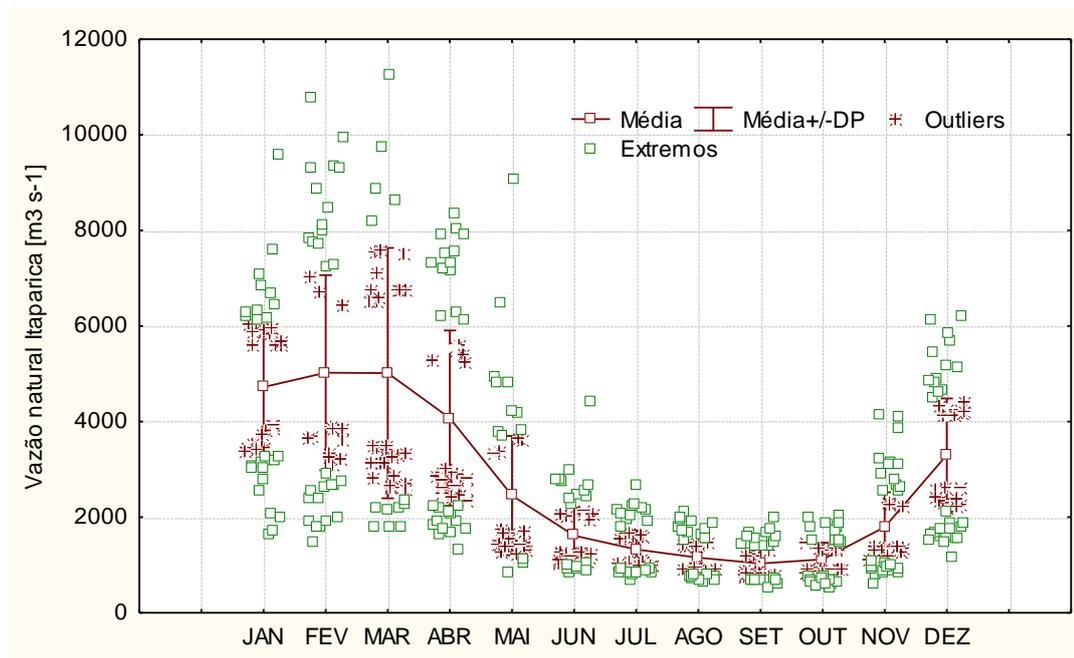


Figura 9 – Vazão natural Itaparica (média, desvio padrão e extremos) – Dados (ONS, 2015)

3.2 RESERVATÓRIOS DE ACUMULAÇÃO DE ÁGUA

A Companhia Hidroelétrica do São Francisco (CHESF) construiu vários reservatórios de acumulação de água no Sub-Médio do rio São Francisco (SMSF). Na década de 1970, foi

iniciada a construção do reservatório de Sobradinho, com superfície de 4.214 km² (espelho de água), um volume máximo de 34.117 hm³ e um volume máximo maximorum de 38.539 hm³ (ONS, 2014). Por estas características, o Sobradinho é um dos maiores reservatórios do mundo. O reservatório de Sobradinho tem uma grande importância para a região do SMSF e para todos os usos a jusante, por ser o reservatório de regularização plurianual para toda a região até a foz do rio. O próximo reservatório à jusante, seguindo o curso do rio, é o de Itaparica (Luiz Gonzaga), que foi construído na década de 1980 e tem uma capacidade de 10.782 hm³ (12.062 hm³ volume máximo maximorum). Os reservatórios seguindo a cascata até a foz, são o complexo de Paulo Afonso (I, II, III e IV), Moxotó e Xingó. Estes últimos alimentam as hidrelétricas associadas aos reservatórios e não possuem um volume de acumulação elevado.

Um dos principais problemas dos grandes reservatórios é a perda por evaporação, que pode chegar a níveis muito elevados. Principalmente na região semiárida as evaporações totais anuais podem chegar a 2.000 mm. A construção do reservatório de Sobradinho, por exemplo, resultou numa redução da vazão média de cerca 163 m³/s (PEREIRA, PRUSKI, *et al.*, 2009), incluindo às demais atividades desenvolvidas, resultando em uma evaporação líquida média anual de cerca 132 m³/s e uma vazão líquida evaporada máxima de 211 m³/s.

3.3 USOS E USUÁRIOS DE ÁGUA

A região do SMSF apresenta uma variedade de usos e usuários de água (consuntivos e não-consuntivos), que configuram por si, uma série de conflitos pelo uso da água existentes e potenciais. Conflitos são principalmente notados, entre o setor da geração de energia e a agricultura irrigada, em contexto das demandas ambientais, no rio São Francisco. Em função do crescimento das áreas irrigadas e o crescimento da demanda para a produção de energia hidroelétrica, junto com a exportação de parte das águas do São Francisco para outras bacias (PISF), além da navegação fluvial maiores conflitos podem ser provocados. A Figura 10 mostra a localização de alguns usos na área de estudo.

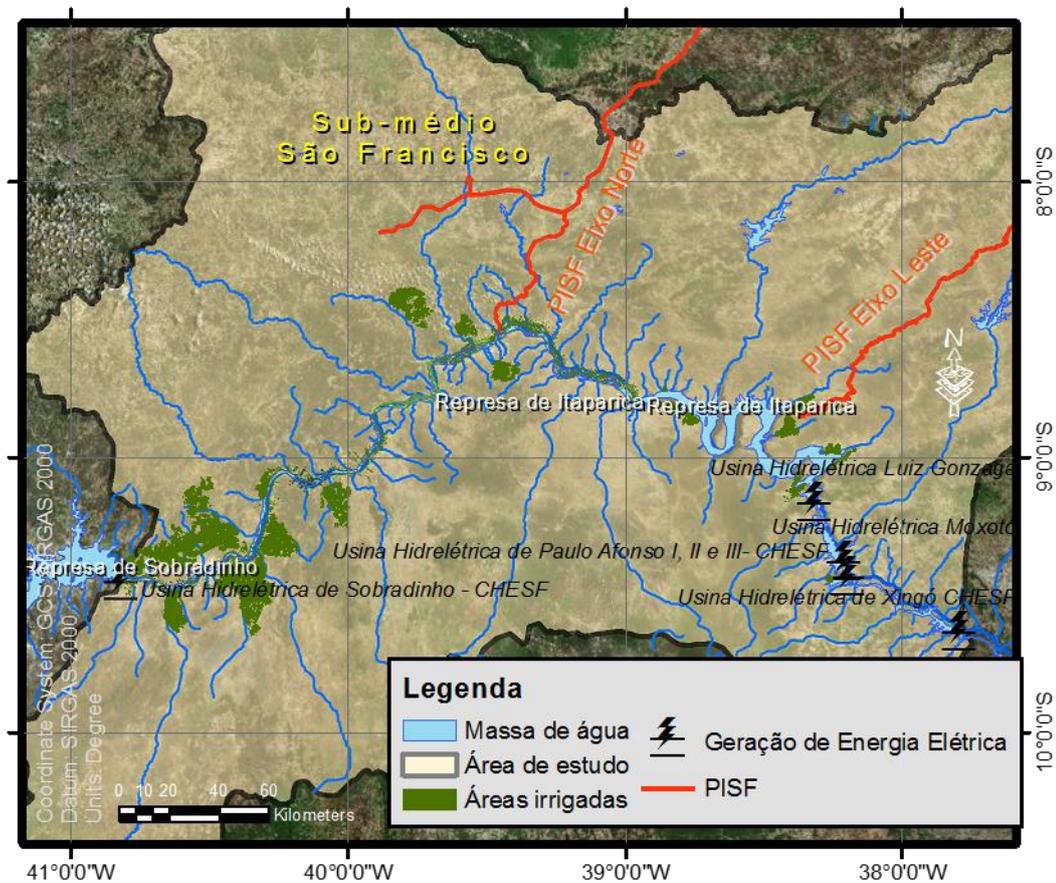


Figura 10 – Área de estudo e principais usos

Igualmente, relativamente às demais regiões hidrográficas, o SMSF contribui com uma oferta hídrica em cerca de 4%, enquanto que a sua demanda só perde para o Médio, e é de 33%. A avaliação da disponibilidade e demanda de recursos hídricos feita pelas Nações Unidas, e disponibilizada no Plano Decenal do Comitê da Bacia do São Francisco, enquadra todas as sub-bacias desta região fisiográfica como tendo uma situação crítica ou como sendo de gerenciamento indispensável (CBHSF, 2004).

O plano estabeleceu um valor de 360 m³/s para toda a bacia hidrográfica do São Francisco como vazão máxima alocável de uso consuntivo médio anual para atender a todos os usos consuntivos da água previstos, até o horizonte de 2025, inclusive todos os grandes projetos de irrigação previstos pela CODEVASF e o próprio Projeto de Transposição. Na época da determinação dessa vazão, 335 m³/s já tinham sido outorgados (CBHSF, 2004; CASTRO, 2011).

A partir de um primeiro levantamento de alguns dos principais usos no SMSF, percebe-se que apesar de muitos deles serem de usos não-consuntivos, como geração de energia elétrica, turismo e lazer, navegação e aquicultura, isto não assegura a inexistência de conflitos. Por

exemplo, operações programadas da Cachoeira de Paulo Afonso reduzem a disponibilidade hídrica a ser turbinada, que causam perdas na produção de energia.

O princípio dos usos múltiplos foi instituído como um dos fundamentos da Política Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997) e os diferentes setores usuários passaram a ter igualdade de direito de acesso à água. A única exceção, já estabelecida na própria Lei, é que em situações de escassez a prioridade de uso da água no Brasil é o abastecimento público e a dessedentação de animais. Por isso, tendo em vista que a gestão dos recursos hídricos deve garantir os usos múltiplos das águas, existe a necessidade de se definir, adequadamente, as condições de operação dos reservatórios, analisando para cada situação os benefícios e prejuízos locais, regionais e nacionais, compatibilizando, sempre que possível, os diversos usos da água, já que não há ordem de prioridade definida na Lei entre nenhum deles (FINEP, 2007).

3.3.1 Geração de Energia Elétrica

A reestruturação e privatização do setor elétrico no Brasil ocorreu efetivamente durante a década de 90, quando várias empresas de energia foram privatizadas. A implementação de um modelo competitivo, demandou uma agência reguladora, a Agência Nacional de Energia Elétrica (Aneel), responsável pelas atuais regras e modelo do setor elétrico brasileiro. Com o objetivo de promover a competitividade e desenvolvimento do setor elétrico, foi criado, no ano 1998, o Operador Nacional do Sistema Elétrico – ONS (FERREIRA, 2006; LEITE, 2013). O ONS é órgão responsável pela coordenação e controle da operação das instalações de geração e transmissão de energia elétrica no Sistema Interligado Nacional (SIN), sob a fiscalização e regulação da Aneel. O ONS teve suas atribuições ratificadas pelo decreto 5.081/04.

Para o planejamento energético do SIN são utilizados programas computacionais baseados em modelos matemáticos de otimização. O modelo NEWAVE é utilizado para o planejamento da operação de longo e médio prazos e o modelo DECOMP é responsável pelo planejamento da operação de curto prazo e definição do preço spot de energia, ambos desenvolvidos pelo CEPEL (CEPEL, 2015). Estes modelos consideram todos os recursos e requisitos existentes no sistema e distribui a geração por subsistemas e usinas, de forma a minimizar o custo da operação. O problema é formulado utilizando a programação linear, considerando as características físicas e as restrições operativas das usinas hidroelétricas de forma individualizada. A estocasticidade das afluições é considerada, através de cenários de afluições às usinas do sistema, produzidos pelo modelo GEVAZP (Geração de Séries Sintéticas de Energias e Vazões Periódicas) (CEPEL, 2015). Os usos múltiplos são vistos como restrições nos modelos.

Além das usinas hidroelétricas instaladas nos reservatórios de acumulação de água e regularização de vazão Sobradinho e Itaparica, encontra-se na área de estudo (SMSF) o complexo de Paulo Afonso, que é constituído das usinas Paulo Afonso I, II, III; Paulo Afonso IV e Moxotó com uma potência instalada de 4.283 MW (FINEP, 2007; ONS, 2014). Novas usinas são planejadas, como a usina hidroelétrica Riacho Seco (MME, 2010), localizada no município de Santa Maria da Boa Vista (PE), com uma potência de 276 MW. Apesar dessa usina ser a fio d'água (*pass trough*) e de não ser previsto reservatório de acumulação, a mesma trará impactos para os outros usos.

A Resolução do Conselho Nacional de Recursos Hídricos nº 37, de 26 de março de 2004, estabelece as diretrizes para a outorga de recursos hídricos para a implantação de barragens em corpos de água de domínio dos Estados, do Distrito Federal ou da União. Na outorga, normalmente, estão especificadas as condições de operação a que está sujeito o reservatório, ficando o outorgado autorizado a operá-lo entre a cota do nível mínimo operacional e a cota do nível máximo normal, os quais definem o denominado volume útil do reservatório. As vazões liberadas pelos reservatórios, também, estão sujeitas a restrições operacionais. Denomina-se vazão de restrição, a vazão que expressa os limites estabelecidos para que haja o atendimento satisfatório aos múltiplos usos dos recursos hídricos e que orienta a operação do reservatório.

3.3.2 Perímetros Irrigados

O maior uso consuntivo no SMSF são os perímetros irrigados ao longo do rio São Francisco. No contexto econômico da agricultura, diversos efeitos positivos podem ser destacados. A agricultura irrigada gera desenvolvimento com empregos, renda, alimentos e outras melhorias das condições de vida da população na região. Entretanto, aspectos negativos, também, podem ser verificados, destacando a crescente demanda hídrica da agricultura irrigada em contexto de desfavoráveis aspectos climáticos (aridez). A baixa disponibilidade de água no SMSF, prejudica a utilização desse recurso em seus diversos usos. Como consequência, surge a necessidade de não somente obter, mas pôr em uso, tecnologias eficientes de irrigação (XAVIER, COSTA e COSTA, 2006).

Os principais perímetros (sobretudo da CODEVASF (Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba)), no Sub-Médio do rio São Francisco, são: Nilho Coelho, Salitre (em implementação), Tourão, Mandacaru, Maniçoba (em implementação), Pontal, Bebedouro, Curaça, Caraibas, Brígida, Pedra Branca, Manga de baixo, Rodelas, Apolonio Sales, Barreiras, Iço Mandantes, Gloria e Jusante. Além dos perímetros irrigados, existem

pequenas cooperativas agropecuárias e irrigação difusa nas proximidades do Rio São Francisco. Existem grandes projetos, como o Salitre, que, embora já tivessem o consumo máximo autorizado, há vários anos, ainda estavam consumindo vazões muito inferiores, não havendo previsões sobre quando atingiriam suas capacidades máximas (CASTRO, 2011).

Nos perímetros irrigados, o abastecimento de água e infraestrutura são subsidiados por fundos governamentais. Estes perímetros públicos, muitas vezes, não são economicamente eficientes. No contexto de conflito pelo uso da água, estudos mostram que, na maioria dos perímetros no SMSF, a disposição dos usuários para pagar pelo uso da água é geralmente maior ou pelo menos igual aos preços cobrados pelo uso da água na bacia hidrográfica (SILVA, FIGUEIREDO e MORAES, 2015). Os usuários de água, na bacia hidrográfica do rio São Francisco, são cobrados pela água, desde 2010. E, embora o setor de irrigação seja responsável pela maior parte do uso consuntivo da bacia hidrográfica, ele contribui com apenas 9% do valor cobrado (VERA, 2014). Indicando, assim, que os preços pagos pelo setor agrícola são demasiadamente baixos.

3.3.3 Aquicultura

Um outro importante uso sendo demandado, nos reservatórios do Sub-Médio do rio São Francisco é a chamada aquicultura, em especial a piscicultura, onde as instituições governamentais deverão contribuir na cadeia produtiva, atuando na área de pesquisas, capacitação de recursos humanos, assistência técnica e extensão aquícola, linhas de crédito, incentivos, regulamento e apoio à decisão. A aquicultura requer condições especiais dos reservatórios. Para a aplicação de tanques-redes, existe um nível máximo de produção que o mesmo pode suportar, pois a produção de peixes, de forma intensiva, pode estimular a produtividade aquítica, o que favorece o processo de eutrofização, podendo deteriorar a qualidade da água e causar a mortalidade dos estoques. Na maioria dos casos, o fator limitante é o fósforo (P), elemento essencial para os crescimentos dos peixes e desenvolvimento ósseo. Dentre os reservatórios da região, apenas o reservatório referente a Paulo Afonso I, II e III, não apresenta condições de aproveitamento para empreendimentos aquícolas, devido a sua dimensão reduzida e restrições técnicas impostas pela CHESF. A aquicultura traz um desenvolvimento econômico desejável, mas também pode contaminar os corpos de água com eutrofização e sedimentos, levando a condições anóxicas (GUNKEL, STEEMANN e SOBRAL, 2013; MATTA, SELGE, *et al.*, 2016; FINEP, 2007).

3.3.4 Navegação

Segundo SUM (2004), a vazão regularizada da barragem de Sobradinho de 2050 m³/s foi tomada como referência para a realização dos derrocamentos levados a efeito na década de 80, destinados a garantir o calado de 1,50 m e profundidade mínima de 2,00 m em todo o trecho. Entretanto, esta posição não tem prevalecido e, em condições normais de operação, a usina vem liberando vazões entre 1.300 e 4.000 m³/s, o que nem sempre atende às condições necessárias para a navegação. Em períodos críticos, a vazão liberada é reduzida drasticamente (tendo chegado a até 700 m³/s, como ocorreu em vários anos (ANA, 2013b; ANA, 2015a; ANA, 2016c).

Como pode ser observado, na Figura 11, os trechos navegáveis, na região do Sub-Médio à jusante da barragem de Sobradinho, que se destacam são os compreendidos entre Petrolina/Juazeiro até a barragem de Itaparica e o trecho entre Itaparica e Piranhas. No primeiro trecho são deslocadas cerca de 2.000 toneladas, com calado de 1,70 m, mas em águas mínimas, reduzem sua capacidade para 1300 a 1400 toneladas, condição está imposta pelo trecho em que o rio é navegado em corrente livre. No segundo trecho vem despertando o interesse da navegação turística, na barragem de Xingó, uma vez que o rio São Francisco, neste trecho de 105 km, cai da cota topográfica de 252 m para 13 m, com uma declividade de 228 cm/km (SUM, 2004).



Figura 11 – Trechos navegáveis do São Francisco, Extraído de SUM (2004)

3.3.5 Vazão ecológica

A operação dos reservatórios afeta a vazão no rio à jusante da barragem e, desta forma, o ecossistema do rio. No último século, cresceu o pensamento de uma operação de reservatórios mais ecologicamente orientada (YIN, YANG e PETTS, 2011; FERREIRA, 2014; MEDEIROS, FREITAS, *et al.*, 2013). Entretanto, as demandas ecológicas estão, muitas vezes, em conflito com as demandas humanas, citadas neste capítulo. Além disso, os aproveitamentos hidroelétricos mostram uma variação de nível não natural, na bacia hidráulica do reservatório, que podem causar danos a própria bacia hidráulica (RICHTER e THOMAS, 2007; HIRSCH, SCHILLINGER, *et al.*, 2014).

O plano da bacia (CBHSF, 2004) não se baseia em estudos mais aprofundados referentes a manutenção dos ecossistemas. A vazão ecológica mínima foi estabelecida, apenas para sobrevivência dos peixes, através da utilização do método de Tennant (Montana). Os valores estabelecidos são uma vazão mínima de 10% da vazão média de longo período, uma vazão média de 20% da vazão média de longo período e uma vazão ideal de 30% da vazão média de longo período. O plano, também, estabeleceu provisoriamente uma vazão ecológica mínima de 1.300 m³/s na foz. O comitê recomenda estudos mais aprofundados por trecho da Bacia e a adoção de um regime de vazões sazonais (periódicas) no Baixo São Francisco, para a manutenção dos ecossistemas (o enchimento das lagoas periféricas) (CBHSF, 2004).

3.3.6 Turismo e Lazer

Um aspecto interessante para ressaltar, é o fato dos benefícios econômicos advindos da proteção ambiental implementada, através de restrições ecológicas, em geral, não serem mensurados. Isto pode ser feito, através da associação da manutenção de boas condições ambientais a benefícios obtidos por setores econômicos considerados relacionados aos recursos hídricos (*water-related*), como por exemplo o turismo. Estes setores econômicos não seriam usuários diretos da água, mas se beneficiariam de uma condição ecológica favorável do recurso hídrico (MORAES, 2016).

O projeto de pesquisa do CNPq identificou *clusters*¹⁶ potenciais de turismo (IGLIORI, FINGLETON e MOORE, 2005), nas regiões do Sub-Médio e do Baixo São Francisco. Esta é

¹⁶ Clusters potenciais de turismo segundo a metodologia dos Quocientes Locacionais são localidades onde o setor de turismo tem uma participação nos empregos formais acima da média observada para o turismo no país. O cálculo do QL permite fazer comparações entre as especializações em determinado setor nas localidades selecionadas (IGLIORI, FINGLETON e MOORE, 2005)

uma forma de começar a investigar benefícios econômicos de outros usos que possam ser associados às demandas ambientais na região. Foram levantados os números de empregos formais para cada atividade que compõe o setor de turismo em cada município da região de estudo, a partir das informações da RAIS (Relação Anual de Informações Sociais) do Ministério do Trabalho do Brasil, para o ano de 2010. Por meio dessas informações, foram identificados os municípios que apresentaram os clusters. Posteriormente, para os municípios, que tiveram um indicativo de cluster potencial de turismo, foram feitos levantamentos do número de empregos nas atividades turísticas correspondentes ao período de 2010 a 2015, com o intuito de verificar se havia consistência dos clusters potenciais de turismo ao longo do tempo.

A região do Sub-Médio apresentou 9 clusters potenciais. No Sub-Médio os municípios categorizados como clusters, cujos atrativos turísticos puderam ser relacionados aos recursos hídricos do rio São Francisco –ver quadro 1 - foram cinco (ver Quadro 3): Juazeiro, Paulo Afonso, Petrolândia, Petrolina e Canindé do São Francisco. Além disso, pode-se associar aos recursos hídricos, na região de Petrolina e Juazeiro, o chamado ecoturismo, devido a produção irrigada de uvas.

Ademais, ainda em relação ao turismo, algumas atividades podem ser consideradas baseadas em água (*water-based*), como por exemplo o fato de se contar ou não com as Cachoeiras de Paulo Afonso para exploração turística. Segundo Silva (1996), a cachoeira é um atrativo natural de interesse universal, que pode ter sua exploração expandida pela inédita situação de uma operação programada para se recuperar esse espetáculo da natureza depois de décadas de sua extinção. Segundo a Folha Sertaneja (GALDINO, 2005), as cheias de fevereiro de 2004 e fevereiro e abril de 2005 levaram, num único fim de semana mais de 5 mil pessoas para ver o espetáculo da Cachoeira de Paulo Afonso.

Quadro 3 – Atrativos turísticos dos clusters potenciais de turismo no Sub-Médio do São Francisco, Extraído de Moraes (2016)

Município	Principais atrativos turísticos
Juazeiro (BA)	Vinícolas (fruticultura irrigada), ilhas fluviais, cânion, cachoeira
Paulo Afonso (BA)	Complexo hidrelétrico, passeios de catamarã, reservas ecológicas
Arcoverde (PE)	Parque ecológico, trilhas, inscrições rupestres, atrativos culturais locais
Petrolândia (PE)	Passeios de catamarã no rio São Francisco, cultura indígena
Canindé de São Francisco (SE)	Parques ecológicos, cânions, hidrelétrica de Xingó, museus, sítios

Na avaliação ao longo do tempo (2010-2015), todos os cinco municípios categorizados como clusters potenciais de turismo, no Sub-Médio, cujos atrativos turísticos puderam ser relacionados aos recursos hídricos do rio São Francisco, confirmaram-se como clusters potenciais em todos os anos analisados (QL's maiores que 1). No entanto, observou-se em todos eles, à exceção de Petrolândia, uma redução nos valores do QL em 2015 em relação a 2010. A redução mais significativa ocorreu em Canindé do São Francisco que passou de um QL de 2,99, em 2010, para 1,27, em 2015. Ademais, houve uma redução nos empregos formais do setor de 15,8% no referido município. Estes valores podem estar refletindo os efeitos da estiagem na região que iniciou-se em 2012 e dura até hoje (2017) e que pode estar ocasionando uma perda de participação do turismo, se comparado com outras atividades menos relacionadas aos recursos hídricos (MORAES, 2016).

3.3.7 Transposição do rio São Francisco

O projeto de integração do Rio São Francisco (PISF) é uma obra do Governo Federal, cuja implantação, operação e manutenção, é de responsabilidade do Ministério da Integração Nacional. O PISF é concebido com o objetivo de garantir oferta hídrica para a região semiárida dos quatro Estados do Nordeste Setentrional (Paraíba, Pernambuco, Rio Grande do Norte e Ceará). Dois sistemas hidráulicos estão sendo construídos (Eixo Norte e Eixo Leste) e serão operados e mantidos pela Companhia de Desenvolvimento dos Vales do Paraíba e São Francisco - CODEVASF (BRASIL, 2006; CASTRO, 2011).

A operação desses sistemas está condicionada pela outorga de uso de água, expedida pela Agência Nacional de Águas (ANA). Nos dois eixos, será captada uma vazão firme de 26,4 m³/s, que corresponde a demanda projetada para o ano de 2025 relativa ao consumo humano e dessedentação animal. Enquanto a demanda real for inferior a este valor, a vazão pode ser utilizada para atender o uso múltiplo dos recursos hídricos na região receptora. Excepcionalmente, será permitida a captação máxima diária de 114,3 m³/s e instantânea de 127 m³/s, quando o nível de água do Reservatório de Sobradinho estiver acima do menor valor entre: a) nível correspondente ao volume armazenado de 94% do volume útil e b) nível corresponde ao volume de espera para controle de cheias (ANA, 2005b).

O Eixo Norte tem extensão de cerca de 400 km e é composto de três sistemas de bombeamento com uma altura total de 169 m e é projetado para uma capacidade máxima de 99 m³/s. O Eixo Norte operará com uma vazão contínua de 16,4 m³/s. O Eixo Leste tem uma extensão de cerca de 220 km até o rio Paraíba e tem sua captação no reservatório de Itaparica, para uma

capacidade máxima de 28 m³/s. O Eixo Leste funcionará com uma vazão contínua de 10 m³/s (CASTRO, 2011).

O PISF pode aumentar a dificuldade da gestão de recursos hídricos na bacia hidrográfica do São Francisco, os critérios para a alocação de água nas bacias receptoras e da própria bacia do São Francisco precisam ser analisados no contexto de custos e benefícios, considerando as demandas crescentes, mudanças do uso do solo e mudanças climáticas. O *trade-off* entre demandas urbanas, irrigação e produção hidroelétrica necessita de políticas adequadas.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

Este capítulo aborda Materiais (dados) que são utilizados nesta pesquisa, a partir da coleta e procedimentos para sua aquisição até seu tratamento (métodos) por meio de análises e softwares (tratamento estatístico, modelagem matemática etc.). Os métodos para este trabalho serão divididos, de acordo com os objetivos, em: plataforma (framework) utilizada, aquisição e análise de dados, metodologia da modelagem hidro-econômica, implementação dos cenários de mudanças antrópicas, cenários de regras operacionais, investigação na alocação ótima de água e sistema de apoio à decisão.

4.1 PLATAFORMA UTILIZADA

A plataforma (*framework*) utiliza uma estrutura de modelagem desenvolvida no projeto INNOVATE, em que diferentes modelos são conectados, através de uma abordagem em que os resultados do modelo de maior escala são transferidos para modelos com uma escala menor. A transferência de dados modelados é iterada até o modelo de menor escala ser alcançado. A *Figura 12* mostra o esquema da plataforma do INNOVATE com a interação de vários modelos em diferentes escalas, sob mudanças antrópicas.

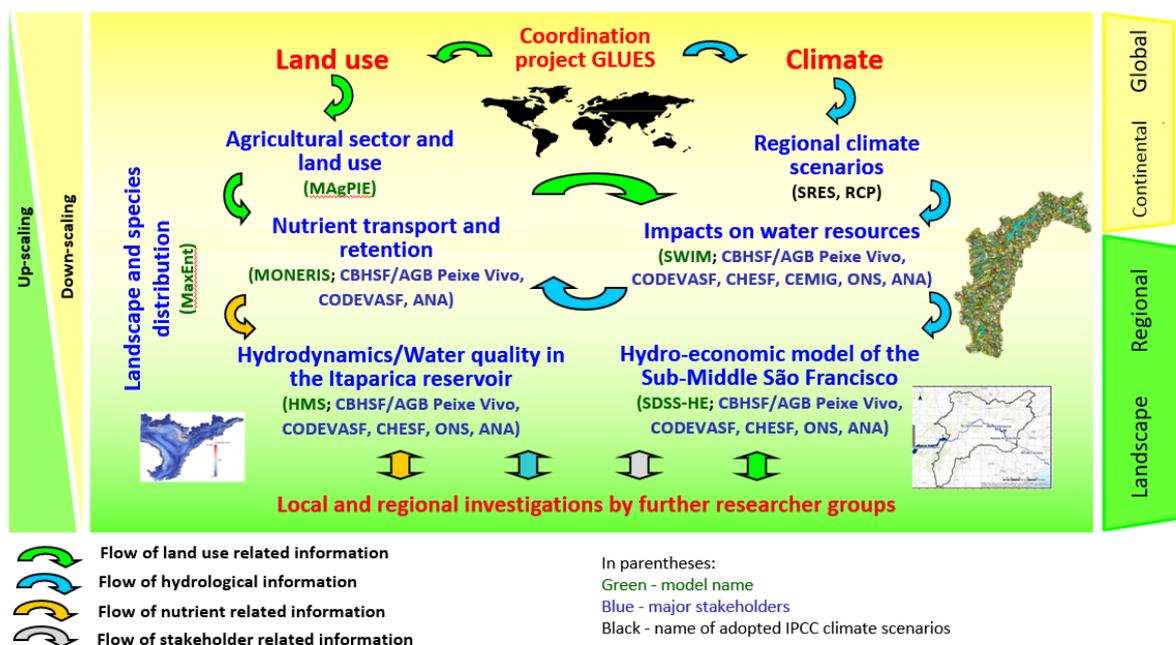


Figura 12 – INNOVATE Framework - (KOCH e SIEGMUND-SCHULTZE, 2014)

Este trabalho consiste no desenvolvimento do modelo hidro-econômico regional (*Hydro-economic model* na *Figura 12*). O mesmo utiliza os resultados de outros modelos obtidos no

projeto INNOVATE como dados de entrada, ou seja, cenários, dados climatológicos, hidrológicos, mudanças de uso de solo e clima, que são obtidos por outros pesquisadores.

Os principais dados de entrada provêm dos modelos *Model of Agricultural Production and its Impact on the Environment* - MAgPIE e *Soil and Water Integrated Model* - SWIM. O MAgPIE é um modelo global espacialmente distribuído de uso agrícola e uso de água. No âmbito do INNOVATE é usada uma versão regionalizada para a bacia do Rio São Francisco para analisar futuras alterações nos padrões de uso de solo (a produção agrícola de milho, soja, cana de açúcar e forragem animal), além dos forçantes globais: como o crescimento da população e do PIB, política e condições de mercado e mudanças climáticas (BIEWALD, LOTZE-CAMPEN, *et al.*, 2014). Os dados são baseados nos cenários desenvolvidos no projeto *Global Assessment of Land Use Dynamics, Greenhouse Gas Emissions and Ecosystem Services* - GLUES (UFZ, 2016), que por sua vez se baseiam nos cenários SRES. Os dados e o modelo MAgPIE serão detalhados no capítulo 4.5.2 na página 86. O modelo SWIM é o modelo eco-hidrológico utilizado e será introduzido em mais detalhes no capítulo 4.6, na página 96.

4.2 AQUISIÇÃO E ANÁLISE DE DADOS

Como já mencionado, os modelos hidro-econômicos exigem uma grande quantidade de informações e processamento de dados. O primeiro passo para alcançar os objetivos, como em quase todos os estudos que demandam o uso de modelagem, é a aquisição de dados referentes à área de estudo. Portanto, são reunidas e padronizadas todas as informações relativas à área de estudo necessárias à aplicação da modelagem, através da aquisição, documentação e tratamento de dados espaciais, econômicos e ambientais. Dessa forma, é montada uma ampla base de dados referentes aos elementos do ciclo hidrológico e aos usos antrópicos da água, como reservatórios, perímetros irrigados, consumo humano, lazer, geração energia e, além disso, dados referentes a impactos ambientais como a qualidade de água.

Os dados existentes, necessários ao modelo de otimização são encontrados em vários formatos, escalas e estruturas. Disponibilizados por diversos órgãos governamentais, os dados econômicos e hidrológicos não seguem um padrão e não se encontram formatados para a aplicação da modelagem. Para preparar e gerenciar os dados necessários ao modelo de otimização, foi desenvolvido um banco de dados em Microsoft Access. As vantagens do banco de dados são a formatação consistente dos dados, a diminuição de redundâncias e inconsistências, a manutenção da integridade e dos padrões.

O Quadro 4 categoriza os dados de entrada necessários para o desenvolvimento do modelo hidro-econômico, as fontes utilizadas e o tratamento empregado para processá-los.

Quadro 4 – Dados utilizados para o desenvolvimento dos modelos hidro-econômicos

Dados	Fonte	Tratamento
Uso de solo	Landsat 8 (USGS, 2013) <i>Modis Land Cover</i> MAGPIE	Classificação supervisionada das áreas irrigadas na área de estudo <i>Análise do uso de solo para mudanças antrópicas na bacia</i> Downscaling e Regionalização
Áreas agrícolas	IBGE Produção Agrícola Municipal (IBGE, 2006-2012) <i>Relatórios Perímetros Irrigados CODEVASF</i> MAGPIE	Análise Excel das áreas por cultura, produção e rendimento <i>Análise Excel das áreas por cultura, produção e rendimento</i> Downscaling e Regionalização
Hidrologia	ONS vazões naturais mensais 1931-2012 (ONS, 2014) <i>Hidroweb ANA</i> <i>SWIM - Vazão afluente sob cenários</i>	Calibração modelo hidrológico <i>Precipitação, Fluviometria (Calibração)</i> Análise estatística, Integração
Climatologia	(WATCH, 2014); GLUES; CMIP5	Cenários para mudanças climáticas
Demanda de água para a irrigação	(FUNARBE, 2011)	Banco de dados relacionado referente a demanda por cultura, integração no modelo
Custos de produção	Várias Fontes: Águas doces do Brasil (REBOUÇAS, BRAGA e TUNDISI, 2006), Artigos, Publicações, EMPRAPA	Análise, Correção
Abastecimento humano	Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento – (SNIS, 2012)	Análise estatística, Curvas de demanda, Expansão de ponto
Aproveitamento Hidroelétrico	(SIPOT, 2002); (ANEEL, 2005); (ONS, 2014)	Análise estatística, Stochastic Optimization Tools (CNPQ-CTHidro)
Irrigação	Áreas agrícolas (FUNARBE, 2011; ANA, 2001-2013)	Análise estatística, Curvas de demanda, Expansão de ponto e PMP

O principal uso consuntivo dos recursos hídricos, no SMSF, é a irrigação. Existem várias fontes referentes a produção agrícola na área de estudo, como as outorgas de uso de água concedidas pela ANA, dados do Censo Agropecuário do IBGE, relatórios das empresas nos perímetros

irrigados, relatórios da CODEVASF. A maioria dos dados são agregados e não possuem uma referência espacial, assim é necessário analisar, localizar e verificar os dados referentes a produção agrícola irrigada. Para este trabalho, são utilizadas as imagens do satélite Landsat 8 (USGS, 2013). O satélite permite a aquisição de dados de alta qualidade que atendem requisitos científicos para a observação de uso do solo e alterações dos mesmos. As imagens de satélite Landsat 8 fornecem uma cobertura de toda o planeta a cada 16 dias. A resolução das imagens é de aproximadamente 30x30m na área de estudo. As imagens utilizadas são datadas do terceiro trimestre de 2013 (SILVA, MORAES e SILVA, 2014).

Para delimitar as áreas irrigadas, foi utilizada a classificação de imagens. A Classificação de imagens refere-se à tarefa de extrair as classes de informação de uma imagem *raster* (ESRI, 2006). Dependendo da interação entre o analista e o computador, existem dois tipos de classificação: supervisionadas ou não. Para este estudo, foi utilizado o programa ArcGIS com a extensão espacial e a classificação supervisionada utilizando a máxima verossimilhança (*maximum likelihood*). São fornecidas várias amostras das áreas irrigadas identificadas nos mosaicos e também amostras para identificar os espelhos de água e o solo sem irrigação (SILVA, MORAES e SILVA, 2014).

4.3 CURVAS DE DEMANDA

Para mensurar os benefícios econômicos dos usuários associados às quantidades de água alocadas no modelo hidro-econômico, são utilizadas curvas de demanda para cada uso (irrigação, abastecimento humano, hidroeletricidade). Como cada ponto na curva de demanda mede o benefício marginal de uma dada disponibilidade, áreas sob a curva estimam os benefícios totais perdidos ou ganhos devido a uma redução ou aumento na disponibilidade respectivamente. É importante ressaltar que este tipo de análise limita-se ao cálculo do benefício econômico obtido diretamente para o usuário e não considerando efeitos indiretos, como por exemplo benefícios na cadeia produtiva dos usuários, ou outros efeitos secundários, como benefícios sociais para a região. Em seguida, são apresentados os métodos da avaliação econômica dos usos de água.

4.3.1 Elasticidade preço e Método de expansão de ponto

Na economia, a elasticidade é uma medida que indica a mudança relativa em uma variável dependente de uma mudança relativa a qualquer uma de suas variáveis independentes, por exemplo, a mudança relativa na demanda em relação a uma mudança no preço. A elasticidade-

preço da demanda é definida como a variação percentual na quantidade demandada em relação uma variação no preço (GRIFFIN, 2006; VARIAN, 2006):

$$\eta := \frac{\frac{dQ}{Q}}{\frac{dP}{P}} \quad (1)$$

Sendo: Q.....Quantidade de água alocada

P.....Preço de água

ηElasticidade-preço da demanda

Através da solução da equação diferencial acima, considerando-se a elasticidade-preço da demanda constante, obtém-se a seguinte função de demanda inversa:

$$\int \frac{1}{P} dP = \int \frac{1}{\eta} \cdot \frac{1}{Q} dQ \quad (2)$$

$$P = e^{\frac{\ln(Q)}{\eta} + C} \quad (3)$$

A *Figura 13* mostra a função de demanda inversa com uma elasticidade $\eta=-1$ e $C=0$.

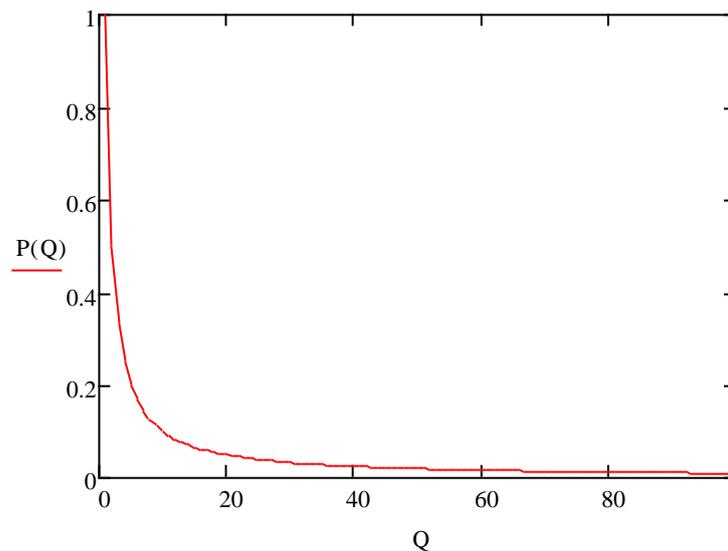


Figura 13 – Curva de demanda com elasticidade constante

É possível ver na *Figura 13*, que a função exponencial assintota os eixos $P(Q)$ e Q em direção ao infinito. Teoricamente, isso representa uma realidade em que a não disponibilidade de água resulta em um preço muito alto ou infinito para um bem essencial e econômico.

Os benefícios brutos seriam então calculados, a partir da área sob a curva de demanda de zero até o valor de água alocado. Entretanto, essa função de demanda teórica impediria a determinação dos benefícios brutos para uma determinada quantidade, porque a área seria ilimitada. Sendo assim, tornou-se necessário uma adaptação da curva de demanda, utilizando valores não infinitos, usando-se a seguinte forma (MORAES, CIRILO e SAMPAIO, 2006):

$$P(Q_{\text{aloc}}) := e^{\ln\left[\left(|Q_{\text{aloc}} - C_2|\right)^{\frac{1}{\eta}}\right]} + C_1 \quad (4)$$

Sendo: C_2 e C_1Constantes arbitrárias

O resultado da função adaptada pode ser observado na *Figura 14*. A função tem um valor finito para quantidades de água alocadas nulas representado pelo ponto $(0, P_1)$. O ponto $(C_2, 0)$ define a quantidade alocada onde o preço é igual a zero (saturação), ou seja a quantidade (consumo autônomo), a partir da qual o usuário não se dispõe mais a pagar pela água. Para valores maiores que C_2 , a função volta a ter valores positivos de preço, devido ao fato de ser uma função módulo. As alocações a partir deste valor não trariam benefícios, mas sim prejuízos.

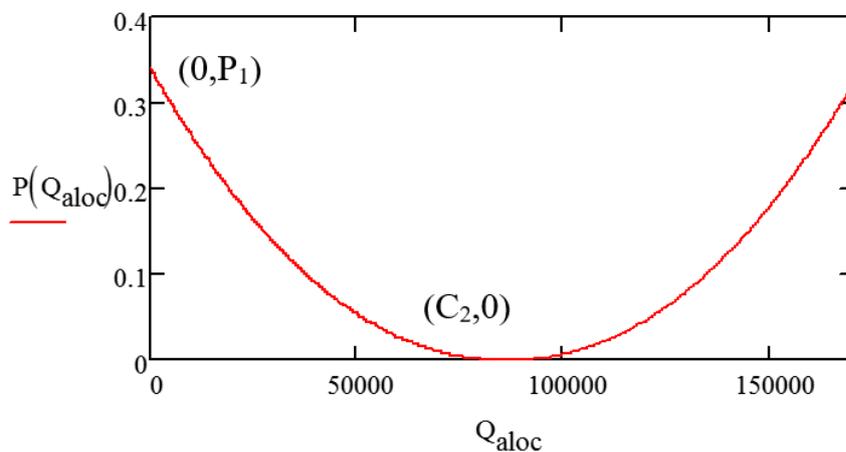


Figura 14 – Exemplo de curva de demanda adaptada

O benefício bruto é calculado com a integração da função de demanda inversa (equação (5)):

$$\int e^{\ln\left[\left(|Q_{\text{aloc}} - C_2|\right)^{\frac{1}{\eta}}\right]} + C_1 dQ_{\text{aloc}} \rightarrow \frac{\eta \cdot e^{C_1} \cdot \left(\frac{C_2 - Q_{\text{aloc}}}{\text{signum}(Q_{\text{aloc}} - C_2, 0)}\right)^{\frac{1}{\eta}} \cdot (C_2 - Q_{\text{aloc}})}{\eta + 1} \quad (5)$$

Podemos observar que o ponto $(C_2, 0)$ é indefinido na função benefício resultante, ou seja, não pode ser igual a Q_{aloc} (*signum* na função (5)).

O método de expansão de ponto (GRIFFIN, 2006) é empregado para estimar a função de demanda, utilizando uma elasticidade exogenamente estimada e um ponto conhecido na função de demanda para estimar a mesma. Um ponto conhecido pode ser facilmente obtido. Por exemplo, é possível observar que a demanda de água bruta para abastecimento do município Petrolina (SNIS, 2012), com uma população urbana de 227.709 habitantes, é de 21.362.000 m³/ano e a tarifa média praticada é de 2,66 R\$/m³, o que representa um ponto na curva de demanda para o abastecimento do município.

Para determinar a função de demanda inversa adaptada, descrita pela equação (5), utiliza-se três condições de contorno. A primeira condição requer que a elasticidade de preço (η) seja constante em toda a sua gama. A segunda condição de contorno é definida como o ponto de operação de cada usuário de água representado pelos seus valores observados. Este ponto é aquele associado às demandas e custos atualmente praticados. A terceira condição de contorno utiliza as estimativas do benefício bruto dos usuários (área sob a curva).

As estimativas dos benefícios atuais são utilizadas para calcular os benefícios brutos referentes à água. Voltando para o exemplo do abastecimento municipal, os benefícios com a água bruta foram calculados tomando-se a quantidade de água bruta menos as perdas e a tarifa média praticada para determinar o benefício bruto obtido, atualmente, pelo usuário, no ponto de operação.

Simplificando e assumindo o valor $Q_{aloc} < C_2$ para o cálculo do excedente bruto, pode-se substituir o módulo da função, e integrá-la, portanto obtendo-se:

$$\int e^{\ln\left[\left(|Q_{aloc}-C_2|\right)^{\frac{1}{\eta}}\right]+C_1} dQ_{aloc} \left| \begin{array}{l} \text{assume, } Q_{aloc} < C_2 \\ \text{simplify} \end{array} \right. \rightarrow -\frac{\eta \cdot e^{C_1} \cdot (C_2 - Q_{aloc})^{\frac{1}{\eta}+1}}{\eta + 1} \quad (6)$$

Com a equação (6) as constantes C_2 e C_1 podem ser determinadas utilizando esse excedente bruto as condições de contorno.

$$P_{agua} = e^{C_1} \cdot (Q_{aloc} - C_2)^{\frac{1}{\eta}} \text{ solve, } C_1 \rightarrow \ln \left[\frac{P_{agua}}{(Q_{aloc} - C_2)^{\frac{1}{\eta}}} \right] \quad (7)$$

A equação (8) mostra a função do benefício (Integração entre 0 e ponto de operação) com a substituição da constante C_1 utilizando a equação (7) e o valor C_2 é determinado utilizando um *solver* para a solução da equação não linear.

$$\text{Benefício} = \frac{P_{\text{agua}} \cdot \eta \cdot \left[C_2^{\frac{\eta+1}{\eta}} - (C_2 - Q)^{\frac{1}{\eta} \cdot (\eta+1)} \right]}{(\eta + 1) \cdot (C_2 - Q)^{\frac{1}{\eta}}} \quad (8)$$

A função de benefício líquido é obtida através do resultado da integração da função de demanda inversa subtraída dos custos de cada usuário. O modelo maximiza, então, os valores de benefício líquido de todos os usuários obtidos através da equação (9), também conhecida como excedente líquido do consumidor (VARIAN, 2006)

$$B_{\text{liq}}(\text{Usuário}, t) = \frac{\eta \cdot e^{C_1} \cdot \left[Q_{\text{aloc}} \cdot (C_2 - Q_{\text{aloc}})^{\frac{1}{\eta} + 1} + C_2^{\frac{1}{\eta} + 1} - C_2 \cdot (C_2 - Q_{\text{aloc}})^{\frac{1}{\eta}} \right]}{\eta + 1} - \text{Custo} \cdot Q \quad (9)$$

As curvas de demanda e as funções de benefício resultantes foram obtidas para a produção agrícola irrigada de forma difusa ao longo do rio e para todos os municípios na região do Sub-Médio do rio São Francisco. Dalhuisen et al. (2001) utilizaram uma meta-análise de variações elasticidades-preços e rendimentos da demanda de água para abastecimento humano. Scheierling et al. (2006) aplicaram uma meta-regressão para investigar fontes de variação nas estimativas empíricas da elasticidade-preço da demanda de água de irrigação. Para este trabalho é adotado o valor $\eta=0.46$ para o abastecimento humano e uma elasticidade-preço para a demanda de água para irrigação de $\eta=0.48$. Esses valores são derivados de estudos efetuados, principalmente, nos EUA. Devido à ausência de estudos de elasticidade da demanda para a região estudada, são utilizados valores médios obtidos na literatura internacional.

4.3.2 Programação Matemática Positiva - PMP

Outra metodologia para obter os valores econômicos associados a disponibilidades de água e, assim, obter as curvas de demanda é a Programação Matemática Positiva (PMP). A PMP é uma abordagem para calibrar modelos de produção agrícolas, através da introdução de termos não-lineares na função objetivo, de tal forma que condições de otimização sejam satisfeitas com relação aos valores observados das variáveis de decisão (HECKELEI, BRITZ e ZHANG, 2012). A abordagem usa a decisão da divisão entre culturas do agricultor para calibrar parâmetros relativos à produção agrícola e a utilização de recursos, consistente com a teoria microeconômica (HOWITT, 1995).

Para este trabalho, utilizou-se o modelo desenvolvido por Figueiredo (2014), que utilizou a metodologia PMP proposta por Medellín-Azuara et al. (2009), onde o programa não linear é

composto por uma função de produção com elasticidade de substituição constante (CES) e uma função de custo quadrática para o insumo terra. As curvas de demanda foram determinadas para os principais perímetros irrigados da CODEVASF, na área de estudo (FIGUEIREDO, 2014; SILVA, FIGUEIREDO e MORAES, 2015).

O PMP é um procedimento de auto-calibração, em três estágios, desenvolvido por Howitt (1995). O primeiro estágio consiste em um modelo de programação linear definido como:

$$Max \prod_{x_{gi,t} \geq 0} \sum_g \sum_i \left(v_{gi} y_{ld_{gi}} - \sum_j \omega_{gji} a_{gji} \right) x_{gi,terra} \quad (10)$$

$$\sum_i a_{gij} x_{gi,terra} \leq b_{gj} \quad \forall g, j \quad (11)$$

$$x_{gi,terra} \leq \varkappa_{gi,terra} + \varepsilon \quad (12)$$

Onde (10) é a função objetivo e $x_{gi,terra}$ (hectares plantados por região g e cultura i) as variáveis de decisão. A receita marginal é dada por v_{gi} e a produtividade média e custos variáveis médios por $y_{ld_{gi}}$ e ω_{gji} . Os parâmetros a_{gji} são definidos pela razão do total de insumos normalizados pela área plantada. A restrição dos recursos é dada pelas equações (11) e o conjunto (12) representa os limites da calibração, onde $\varkappa_{gi,terra}$ é quantidade de área plantada, atualmente, observada, e ε é um erro de tolerância.

O segundo estágio consiste na calibração de uma função custo quadrática e de uma função de produção com elasticidade constante conforme descrita abaixo:

$$TC_{gi}(x_{gi,terra}) = \alpha_{gi} x_{gi,terra} + \frac{1}{2} \gamma_{gi} x_{gi,terra}^2 \quad (13)$$

$$Y_{gi} = \tau_{gi} \left[\sum_j \beta_{gij} X_{gij}^\rho \right]^{\frac{v}{\rho}} \quad (14)$$

Y_{gi} é o produto da cultura i na região g, τ_{gi} o parâmetro de escala da função de produção CES e os parâmetros de participação de um dado recurso j são dados por β_{gij} . A elasticidade de substituição é $\sigma = \frac{1}{(1-\rho)}$ e α_{gi} e γ_{gi} são os interceptos e a inclinação da função custo marginal linear da cultura i da região irrigada g.

Por fim, o terceiro estágio consiste em resolver um programa de maximização não linear com restrição. A função objetivo pode ser escrita de forma que:

$$\begin{aligned} \text{Max}_{x \geq 0} \quad & \prod \sum_g \sum_i v_{gj} Y_{gi} \\ & - \sum_g \sum_i \left(\alpha_{gi} x_{gi,terra} + \frac{1}{2} \gamma_{gi} x_{gi,terra}^2 \right) \\ & - \sum_g \sum_i \sum_{j \neq terra} (\omega_{gji} x_{gij}) \end{aligned} \quad (15)$$

$$\sum_i a_{gij} x_{gi,terra} \leq b_{gj} \quad \forall g, j \quad (16)$$

$$\sum_i x_{gi,água} \leq Avail. b_{água,g} \quad \forall g \quad (17)$$

Onde Y_{gi} é definida pela função de produção e os parâmetros τ_{gi} e β_{gij} da equação (14). O segundo termo é a função custo quadrática calibrada (13). O conjunto de restrições (16) é o mesmo utilizado no problema de maximização linear (11). Não são utilizadas mais as restrições de calibração do modelo linear (12). Adiciona-se um novo conjunto de restrições exclusivo para o uso da água anual (17).

Os procedimentos utilizados para a calibração do problema PMP são os utilizados em Howitt et al. (2012), para a calibração da função CES, e para a calibração da função custo quadrática, dos trabalhos de Medellín-Azuara et al. (2009) e Maneta et al. (2009a). A elasticidade de substituição adotada é de 0,4, valor derivado do trabalho Maneta et al. (2009a) e Torres et al. (2012). Para a elasticidade de oferta¹⁷ das culturas são utilizados os valores de 0.2 até 2.0 para todas as culturas observadas. Os dados utilizados, nesta etapa do trabalho, consistiram em um total de onze culturas observadas (Banana, Cana-de-açúcar, Cebola, Coco, Goiaba, Manga, Maracujá, Melancia, Melão, Uva, Tomate) para quinze perímetros irrigados (Nilo Coelho,

¹⁷ A elasticidade de oferta da cultura é definida pela variação percentual na demanda da cultura determinada pela variação percentual no preço dessa cultura. No modelo, essas elasticidades irão impactar no custo do recurso terra, ou seja, quanto maior a elasticidade da oferta, mais os produtores desejarem ofertar o produto e consequentemente demandarão mais terras, aumentando o custo do fator (para cada elasticidade ter-se-á uma função custo quadrática calibrada com valores diferentes de α e γ)

Bebedouro, Salitre, Maniçoba, Tourão, Curaçá, Icó-Mandantes, Apolônio Sales, Barreiras, Caraíbas, Brígida e Pedra Branca) e quatro insumos (Terra, Água, Trabalho e Suprimentos) (FIGUEIREDO, 2014).

A abordagem utiliza a mesma distribuição das áreas irrigadas por município (ver capítulos 4.2, na página 65 e 5.1, na página 106). Sendo que, os valores necessários foram obtidos a partir dos dados municipais do Censo Agropecuário, da Produção Agrícola Municipal (IBGE, 2006-2012), do Relatório Final dos Coeficientes Técnicos de Recursos Hídricos das Atividades Industriais e Agricultura Irrigada nº 6 (FUNARBE, 2011) e o Relatório de Gestão da Companhia de Desenvolvimento dos Vales do São Francisco e do Parnaíba (CODEVASF, 2006)

O trabalho almeja de analisar a gestão sustentável de recursos hídricos no contexto de mudanças de uso de solo e clima. Em relação às mudanças de uso solo e mudanças climáticas (ver capítulo 4.5, na página 83), são utilizados dados globais do MAgPIE (BIEWALD, LOTZE-CAMPEN, *et al.*, 2014), das projeções do SRES (IPCC, 2013) e RCPs (VUUREN, EDMONDS, *et al.*, 2011b). Para obter as curvas de demanda no futuro é empregada a técnica da regionalização e *downscaling* detalhadas no capítulo 4.5, na página 83, utilizando dados regionais e globais. A *Figura 15* mostra o esquema conceitual para obter as curvas de demanda futuras.

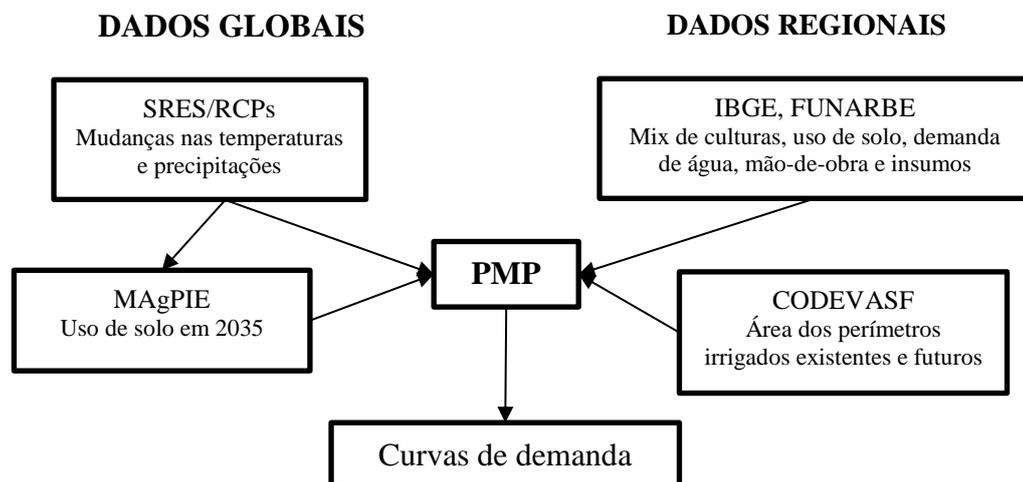


Figura 15 – Interação entre dados globais e regionais na obtenção das curvas de demanda nos cenários futuros

4.4 MODELAGEM HIDRO-ECONÔMICA

O modelo foi desenvolvido no GAMS (*General Algebraic Modeling System*), que é uma plataforma de modelagem de alto nível para problemas de programação matemática, ou seja,

de busca pelo ótimo de uma função. Nesta plataforma, é possível modelar tanto problemas de Programação Linear como Não-Linear. A linguagem de GAMS é, especialmente, útil para modelagem de problemas grandes e complexos, ou seja, aqueles que envolvem um grande número de variáveis e restrições, bem como altos graus de não-linearidade (ROSENTHAL, 2012).

O modelo é determinístico, baseando-se no “*perfect foresight*” (previsão perfeita), o que significa que os resultados são obtidos sob o conhecimento perfeito do futuro, ou seja, da disponibilidade hídrica durante os períodos de tempo estudados. Os períodos devem ser representativos das condições hidrológicas da região estudada e os resultados fornecem, assim, um limite superior de uso do sistema, que é uma limitação do modelo. O uso de modelos hidro-econômicos permite mensurar os trade-offs entre os usos, custos de escassez e benefícios, bem como preços-sombra de restrições institucionais e ambientais em discussão, tais como os estabelecidos por Koch et al. (2015b).

A partir da identificação dos principais usuários e componentes da bacia ou região hidrográfica, parte-se para a obtenção da representação da área estudada, através de uma rede de nós e links, conforme descrito em Rosegrant et al. (2000). Nesta rede, os nós representam entidades físicas e os links as ligações entre estas entidades. A representação da região hidrográfica é composta por três componentes principais: (1) mananciais, tais como rios, canais e reservatórios; (2) demanda consuntiva (perímetros irrigados, instalações industriais, e cidades) e não-consuntiva (hidrelétrica, recreação, meio ambiente) e (3) intermediários, tais como estações de tratamento e instalações de reutilização de água e reciclagem.

A *Figura 16* representa uma rede representativa de um rio simples, que inclui os afluentes resultantes do escoamento na bacia hidrográfica a montante (nó afluente), reservatórios (nó reservatório), seções de rios (nó rio) e usuários (nó usuário). O modelo é baseado na teoria dos grafos, sendo que o transporte de água é realizado através de um grafo direcionado. Para cada tipo de nó um determinado balanço de massa é realizado, dependendo de sua natureza. A vazão afluente é calculada como a soma de todos os efluentes de todos os nós a montante do nó em questão. A retirada de água para os usos consuntivos é subtraída dos nós rio ou reservatório para serem entregues aos nós de usuários. A figura mostra também a interação com outros modelos e dados utilizados neste trabalho.

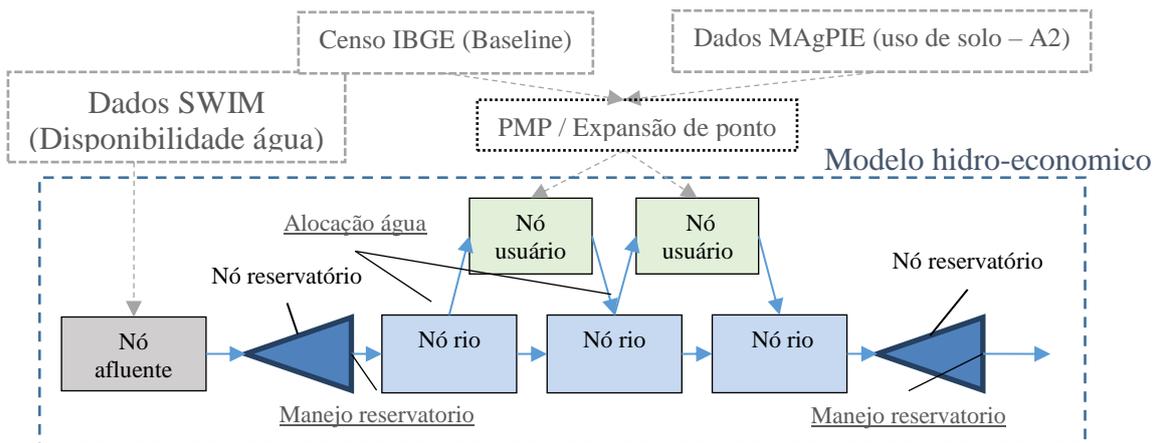


Figura 16 – Estrutura de uma rede no modelo hidro-econômico e dados de entrada

A partir dessa representação, constrói-se um modelo de programação matemática para identificar a alocação de água ótima entre diferentes usos, maximizando a função de benefício social líquido, obtida através da agregação dos benefícios líquidos individuais, sujeito a restrições físicas e institucionais. Assim, a operação do sistema hidrológico é impulsionada pelo objetivo econômico de uso da água, e as restrições ambientais, físicas e legais, incluindo tanto a questão da quantidade e qualidade podem ser incorporadas (MORAES, CAI, *et al.*, 2010).

4.4.1.1 Restrições e balanço hídrico dos nós

Aplicam-se, para diferentes tipos de nós, diferentes tipos de restrições e balanço de massa. Em seguida, são descritas as principais, separadas de acordo com o nó a que se aplicam:

4.4.1.1.1 Nó reservatório

Para os reservatórios o balanço é definido na seguinte forma:

$$RStorage(n, y, m) := \begin{cases} RStorage(n, y - 1, m - 1) & \text{if } m = \text{Jan} \\ \dots + RStorage(n, y, m - 1) & \text{if } m \neq \text{Jan} \\ \dots + Inflow(n, y, m) + Precipitation(n, y, m) \cdot RArea(n, y, m) \\ \dots - Release(n, y, m) - Evaporation(n, y, m) \cdot RArea(n, y, m) \end{cases} \quad (18)$$

Sendo: n..... Reservatório
y, m..... ano e mês
RStorage Volume armazenado no reservatório
Inflow Vazão afluente
Precipitation Precipitação no espelho de água
Release Vazão efluente
Evaporation Evaporação no espelho de água
RArea Área do espelho de água

Neste balanço hídrico, a vazão afluyente e a precipitação sobre a superfície do reservatório são contabilizadas como parte positiva. A vazão afluyente ao reservatório resulta na vazão efluente dos nós conectados a montante, enquanto a evaporação e vazão efluente do reservatório são incluídas como parte negativa do balanço hídrico do reservatório. Perdas de infiltração pelo maciço da barragem não são considerados. A vazão efluente do reservatório tem duas saídas, a primeira refere-se a vazão turbinada (PR), a segunda vazão refere-se a vazão do *by-pass*¹⁸ ou a vazão vertente (BP), no caso em que a vazão exceda a capacidade das turbinas ou o armazenamento máximo do reservatório.

$$\text{Release}(n, y, m) := \text{PR}(n, y, m) + \text{BP}(n, y, m) \quad (19)$$

A relação entre a cota e a área da superfície do reservatório é determinada utilizando-se polinômios, que representam a relação entre as duas variáveis, respectivamente. A equação (20) mostra o polinômio de grau 4 referente à relação entre o volume armazenado (RStorage) e a cota (RLevel). Os valores para obter a relação foram extraídos do banco de dados do ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico).

$$R_{\text{Level}}(R_{\text{Storage}}) := \sum_{i=0}^4 \left(a_i \cdot R_{\text{Storage}}^i \right) \quad (20)$$

A Figura 17 mostra essa relação obtida para o reservatório Sobradinho.

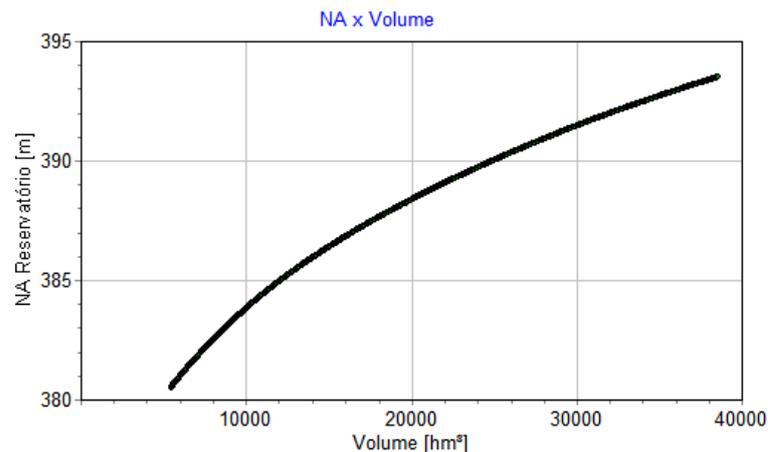


Figura 17 – Relação cota volume do reservatório Sobradinho (ONS, 2014)

O volume máximo e o volume morto são representados no modelo, através de restrições referentes ao limite superior e inferior do reservatório.

¹⁸ Vazão não turbinada

4.4.1.1.2 Nó seção rio

Para um nó simples, que representa a seção de um rio, a vazão afluyente ao mesmo é calculada como a soma de todos os efluentes (R) dos nós a montante em relação ao nó em questão. Esta vazão é, então, subtraída dos desvios de água (D), que representam a água alocada para os nós usuários. Além disso, o nó pode estar em paralelo com outros e compartilhar a água (Sh), como por exemplo, as usinas do complexo Paulo Afonso (Eq. (21)).

$$\sum_{n \in \text{in}} Q(n, y, m) := \sum_{n \in \text{out}} R(n, y, m) - \sum_{n \in \text{divert}} \text{Div}(n, y, m) - \sum_{n \in \text{share}} \text{Sh}(n, y, m) \quad (21)$$

4.4.1.1.3 Nó afluyente (tributários)

No âmbito do modelo hidro-econômico são utilizados os afluentes (ver 4.6) do modelo SWIM referente à bacia hidrográfica inteira (Eq. (22)), em que a soma dos afluentes (*Runoff*) para um nó (*Source*) é a vazão efluente (*Release*) do mesmo nó.

$$\text{Release}(n, y, m) := \sum_{n \in \text{Source}} \text{Runoff}(n, y, m) \quad (22)$$

4.4.1.1.4 Nó usuário

Dependendo do tipo de usuário, se aplicam restrições ou determinações referentes a água alocada. Por exemplo, para um nó de irrigação, o retorno de água para o rio é calculado utilizando a equação:

$$R(n, y, m) := R_n \cdot \text{Div}(n, y, m) \quad (23)$$

No modelo desenvolvido para a área de estudo, não foram considerados retornos de água dos usos para irrigação, pois além dos perímetros públicos irrigados localizarem-se muito distantes do rio São Francisco, as melhorias recentes na eficiência da irrigação vêm diminuindo os excessos de água que acarretam maiores retornos. A incerteza referente à não contabilização do retorno é menor do que as incertezas sobre as retiradas de água no caso de estudo (ver 5.1, na página 106).

A água desviada (Div), para cada uso consuntivo, pode ser fixada pela priorização de um uso por exemplo, ou se constitui numa variável de decisão que receberá uma quantidade alocada ótima de forma a maximizar os benefícios econômicos totais, calculados através das funções benefício de cada usuário (ver 4.3, na página 67).

4.4.1.2 Hidroeletricidade

A hidroeletricidade é obtida através do aproveitamento da energia potencial gravitacional da água. A produção de energia pode ser determinada pela potência nominal das turbinas instaladas e é uma função da carga hidráulica. A carga hidráulica é a energia referente à diferença da altura da queda de água. A energia disponível, a partir da água caindo, pode ser calculada através da vazão (Q), da densidade da água (ρ), da altura da queda (h), e da aceleração devido à gravidade (g). Entretanto, todas as turbinas têm perdas, referentes a fricção na tubulação e outros parâmetros que diminuem a energia potencial, tais como temperatura e pressão atmosférica. Essas perdas são consideradas, através de um coeficiente de eficiência (η):

$$P := \eta \cdot \rho \cdot Q \cdot g \cdot h^1 \quad (24)$$

As eficiências das turbinas e a potência nominal instalada estão disponíveis no banco de dados do Operador Nacional do Sistema Elétrico (ONS, 2014). A energia firme corresponde à produção máxima contínua de energia de uma usina hidrelétrica, supondo a ocorrência da sequência mais seca observada na série de vazões do rio São Francisco (ANEEL, 2005). Ela é utilizada para orientar o modelo referente à alocação de água para as usinas hidroelétricas e a produção de energia das mesmas. As capacidades instaladas correspondem ao limite superior da produção de energia. O número de turbinas e as potências nominais instaladas, no SMSF, são: Sobradinho com 6*194.000kW, Itaparica com 6*274.000kW, Moxoto com 4*122.000kW, PauloAfonso1 com 3*60.000kW, PauloAfonso2 com 433.000kW, PauloAfonso3 com 794.200kW, PauloAfonso4 com 6*410.400kW e Xingo com 6*527.000kW. A *Tabela 1* mostra os aproveitamentos hidrelétricos com os dados referente às capacidades hidroelétricas.

Tabela 1 – Aproveitamentos hidrelétricos na área de estudo (SIPOT, 2002)

Usina	Ag.	Pot [MW]	EnFirm [MWmed]	EAsseg [MWmed]	NA Max [m]	NA Min [m]	Vol max [hm3]	Vol min [hm3]
Sobradinho	Chesf	1.050	543,3	531	392,5	380,5	34.116	5.447
Itaparica	Chesf	1.500	1.004,22	959	304,0	299,0	10.782	7.234
Apolônio Sales	Chesf	400	263,63		251,5	251,5	1.226	1.226
Paulo Afonso 1	Chesf	180	118,7		230,3	230,3	26	26
Paulo Afonso 2	Chesf	445	291,94	2.225	230,3	230,3	26	26
Paulo Afonso 3	Chesf	800	527,26		230,3	230,3	26	26
Paulo Afonso 4	Chesf	2.460	1081,0		251,5	251,5	121	121
Xingo	Chesf	3.000	2.124,22	2.139	138,0	138,0	3.800	3.800

Para calcular a altura da carga hidráulica, são utilizadas: a equação (20) para determinar o nível no reservatório e a equação (25) para determinar o nível de água no canal de fuga empregando polinômios. A equação (25) mostra o polinômio de grau 4, referente ao nível

d'água no canal de fuga (*Tailrace Level*) e a vazão (*Discharge*). Os valores são extraídos do banco de dados do ONS (Operador Nacional do Sistema Elétrico).

$$R_{\text{TailraceLevel}}(Q) := \sum_{i=0}^4 \left(a_i \cdot Q^i \right) \quad (25)$$

A *Figura 18* mostra, por exemplo, essa relação para o reservatório Sobradinho.

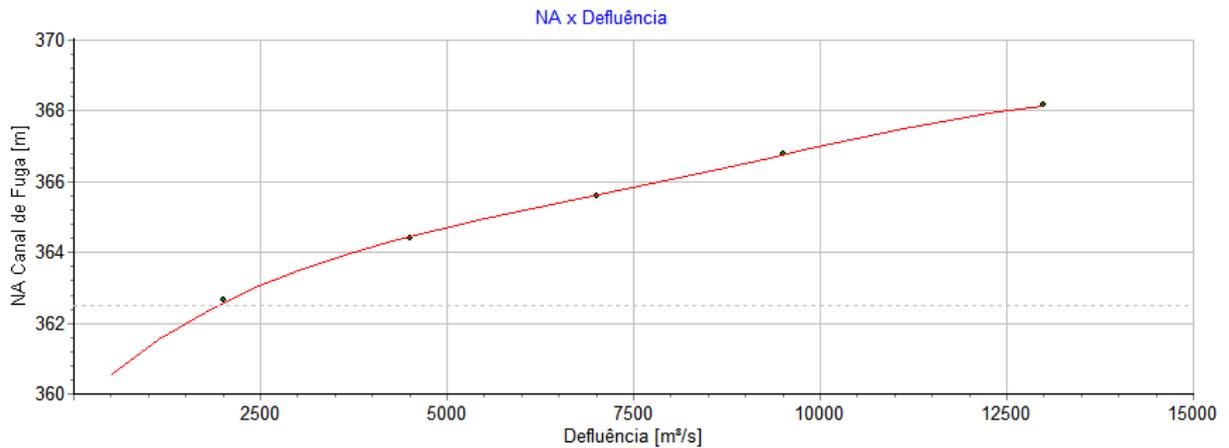


Figura 18 – Relação entre vazão e nível d'água no canal de fuga – reservatório Sobradinho (ONS, 2014)

Um outro aspecto, no caso de reservatórios de acumulação de água, é que os benefícios do armazenamento vêm, principalmente, da capacidade de mover a água no tempo, tornando-se disponível durante o período de vazão baixa, quando se torna mais valioso (TILMANT, ARJOON e MARQUES, 2012). Desta forma, a complexidade da gestão de recursos hídricos é maior, principalmente, no contexto de variabilidade e mudanças climáticas. No modelo hidro-econômico, a otimização maximiza os benefícios dos usos de água, incluindo a hidroeletricidade, durante o período simulado, ou seja, disponibiliza água durante o período de vazão baixa, com valores econômicos mais altos.

4.4.1.3 Função objetivo

O objetivo deste trabalho é maximizar os benefícios de todos os usuários de água no Sub-Médio do São Francisco e, assim, identificar a alocação econômica de água entre os usos. Para efeitos de comparação com o ótimo econômico, podem ser obtidos outros resultados, a partir da definição de diferentes funções objetivo, e incorporação de novas restrições e equações (VICUNA, DRACUP, *et al.*, 2010). Pode-se, por exemplo, analisar este problema só do ponto de vista do operador do reservatório, para maximizar a produção da energia hidroelétrica. Numa

forma geral, a função objetivo para maximizar os benefícios de todos os usos de água, pode ser definida como:

$$\text{Maximize(FO)} := \sum_{n \in \text{user}} \left[\sum_y \left(\sum_m \text{NBu}_{n,y,m} \right) \right] + \sum_{n \in \text{env_use}} \left[\sum_y \left(\sum_m \text{NBe}_{n,y,m} \right) \right] \quad (26)$$

Sendo: NBuBenefício de cada usuário (u)

NBeBenefícios ambientais (e)

y,m.....anos, meses

Os benefícios dos usuários serão determinados utilizando as curvas de demanda estabelecidas para cada usuário, que associa valores econômicos à quantidade de água alocada para os mesmos. Os benefícios (ou custos) ambientais podem ser obtidos indiretamente, através de comparações de manejos diferentes de água ou com a incorporação de novas restrições. Além disso, podem ser utilizadas outras funções, para atender objetivos ‘secundários’, como vazão ecológica ou uma demanda de produção de energia. A equação (27) mostra, por exemplo, uma possibilidade de integrar uma demanda ecológica, utilizando valores metas pré-estabelecidos (Q_{ecol}), entretanto esta função não foi utilizada neste estudo para determinar a vazão ecológica:

$$\text{Maximize(FO)} := \sum_{n \in \text{user}} \left[\sum_y \left(\sum_m \text{NBu}_{n,y,m} \right) \right] - \sum_{n \in \text{riversection}} \left[\sum_m \left(Q_{ecol}_{n,m} - Q_{n,m} \right) \right] \quad (27)$$

Caso os dados tenham ordens de grandeza significativamente diferentes, o desempenho da otimização poderá ser afetado negativamente. A normalização elimina os efeitos das influências de grandeza dos valores, utilizando valores relativos a alguma variável. A equação (28) utiliza o mínimo (minF) e máximo (maxF) de uma função (ConF) para colocar todos os valores no intervalo de 0 a 1.

$$\text{normF} := \frac{\text{ConF} - \text{minF}}{\text{maxF} - \text{minF}} \quad (28)$$

A *Figura 19* mostra, por exemplo, uma função de demanda normalizada na faixa de 0 a 1.

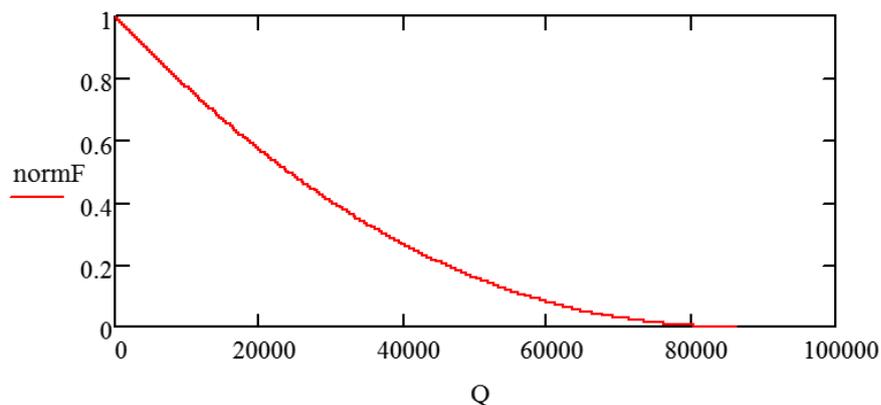


Figura 19 – Função de demanda normalizada entre 0 e 1

Segundo Rosenthal (2012), as variáveis ficam bem dimensionadas se forem medidas em unidades apropriadas. Na maioria dos casos, é necessário selecionar a unidade na forma de que seu valor esperado seja em torno da unidade. Ressaltando-se que sempre poderá haver alguma variação e, na maioria dos casos, será necessário selecionar a mesma unidade de medida para todos os componentes, por exemplo, um valor em torno da capacidade média. Os valores econômicos de água mostram valores econômicos na mesma grandeza para os usuários consuntivos de água, sendo que, os custos e benefícios para irrigação e abastecimento variam entre 0 e 10 R\$/m³. O benefício das usinas foi medido pela produção de energia hidroelétrica em MWh e o preço determinado pela disponibilidade hídrica em R\$/MWh. Os valores econômicos da produção de energia são, assim, mais elevados com um valor variando na faixa de 0-400 R\$/MWh, com unidades diferentes. O modelo utiliza (não na função objetivo) a vazão em m³/s, que pode ter uma variação maior, sendo que a vazão no rio (turbinada ou ecológica) é, normalmente, maior do que a vazão alocada para os usuários consuntivos (0-120 m³/s). Os totais mensais utilizam a quantidade de água em 1000 m³/mês, os quais são utilizados nas curvas de demanda e o cálculo dos benefícios/custos.

O GAMS possui o conceito de um fator de escala (análogo ao da normalização), tanto para variáveis quanto para equações. A opção pode ser ativada caso necessário, neste caso as variáveis são redimensionadas internamente. Os valores da solução do modelo são sempre retornados na notação estabelecida (valores originais/ não normalizados). O solver CONOPT¹⁹,

¹⁹ CONOPT é um solver para a otimização não linear em larga escala (NLP), ou seja, ele é recomendado para modelos complexos com um grau de não-linearidade elevada, em que é difícil encontrar convergência na solução

também, avalia se as variáveis e equações são bem dimensionadas para encontrar a solução ótima (DRUD, 1996).

4.5 MUDANÇAS DE USO DE SOLO E MUDANÇAS CLIMÁTICAS

4.5.1 Cenários

Como a climatologia e a hidrologia do estudo de caso (principalmente, por estar em uma região semiárida (SMSF)) é associada a uma elevada irregularidade da oferta hídrica, diferentes cenários de disponibilidade hídrica são simulados, para se obter valores ótimos em condições climáticas variadas, tendo-se focado em anos com disponibilidades abaixo da média. Os dados de series históricas e sintéticas obtidas para a área de estudo no âmbito do projeto INNOVATE foram utilizados para simular diferentes cenários e analisar os impactos nos valores ótimos. Além dos cenários presentes, projeções futuras com mudanças de uso de solo e efeitos de mudanças climáticas são incorporadas e para elas também são obtidas alocações econômicas ótimas.

Com a finalidade de analisar os cenários de mudanças antrópicas futuras, foram utilizados os cenários propostos por Siegmund-Schultze et al. (2014), no âmbito da modelagem do projeto INNOVATE. Projeções de mudanças climáticas dependem de futuros efeitos e processos antropogênicos, sendo os modelos climáticos executados usando cenários que assumam diferenças nesses processos. Para simular os efeitos das mudanças climáticas, neste estudo, foram escolhidos quatro cenários básicos (dois cenários futuros e dois cenários presentes).

O primeiro cenário, *Baseline*, é definido como uma referência, supondo que as condições (demanda, uso de solo, clima) permaneceriam constantes (ano base 2000 - 2006), na bacia hidrográfica do São Francisco e no Brasil. Em seguida, no cenário CV (*Climate Variability*), apenas as condições climáticas são alteradas para compreender os impactos da variabilidade climática (seca 2012-2016). O terceiro cenário, chamado Fragmentação, é baseado no cenário A2 do SRES (*Special Report on Emissions Scenarios*) (NAKICENOVIC e SWART, 2000), o que representa um crescimento econômico e populacional elevado combinado com pouca Consciência ambiental e mundo mais heterogêneo (fragmentação entre países pobres e ricos). O quarto cenário, Consciência Global, é baseado no cenário B1 do SRES (NAKICENOVIC e SWART, 2000) e simula a globalização com foco na consciência ambiental, que leva a um menor crescimento populacional e um crescimento econômico sustentável.

O Quadro 5 mostra as principais condições dos cenários juntamente com a fonte de dados.

Quadro 5 – Cenários e principais características

Dados de entrada	Fonte	Baseline/ Variabilidade climática (CV)	Fragmentação - A2	Consciência global – B1
Uso de solo	SIDRA, Relatórios CODEVA SF, MAgPIE	Constante 2006/2012	Forte aumento de projetos de irrigação e pequenas áreas irrigadas, mudança no uso de solo diretos e indiretos relacionados à produção de biocombustíveis	Pequeno aumento da área irrigada, capacidade total de perímetros de irrigação instalados.
População Município	IBGE	Constante 2006/2012	Forte aumento da população	Aumento da população
Vazão afluente	Modelo SWIM/ONS	Constante 2006/2012	Com mudanças climáticas - alto emissões	Com mudanças climáticas
Mix de culturas	SIDRA, (FUNARB E, 2011) Scenários: MAgPIE	Constante 2012	Aumento da produção de biocombustíveis e culturas com alta demanda de água	Pouco aumento da produção de biocombustíveis, as culturas com menor demanda de água e sustentável para a região semiárida.
A gestão da água e restrições	Cenário Normal/ Seca (Variabilidade Climática)	As restrições ambientais e institucionais atuais. Transferência de água usada para maximizar os benefícios e diminuindo os custos econômicos. Incluindo os fluxos ecológicos como restrições.	Maximizar os benefícios e diminuição dos custos econômicos de todos os usuários, incluindo aqueles que utilizam as transferências de água e atuais restrições ambientais e institucionais, Incluindo os fluxos ecológicos como restrições.	Maximização dos benefícios econômicos e diminuição dos custos econômicos de todos os usuários, incluindo os que utilizam transferências de água, e incluindo os fluxos ecológicos como restrições

Os dois cenários Fragmentação – A2 e Consciência global – B1 definem duas possibilidades principais para o desenvolvimento global, que são, posteriormente, transferidas para a região da América Latina, Brasil e a bacia hidrográfica do rio São Francisco. Para a escala da área de estudo, o SMSF, são adotadas as condições e hipóteses já mencionadas no Quadro 5. Medidas de adaptação, por exemplo, referentes à política de recursos hídricos são simuladas para os cenários listados. Desta forma, é possível avaliar o que seria a melhor solução para o respectivo cenário, ou, na melhor das hipóteses, para todos os cenários (SIEGMUND-SCHULTZE, 2014).

No contexto de cenários de RCPs, utilizados no modelo SWIM, são selecionados modelos climáticos desenvolvidos no âmbito do framework do CMIP5²⁰ do *World Climate Research Programme*. Um grande número de modelos climáticos globais são disponibilizados pelo CMIP5. A *Figura 20* mostra alguns modelos adaptados/corrigidos para a área de estudo e a projeção para o futuro referente à precipitação e a temperatura. O cenário Fragmentação (A2) pode ser enquadrado no RCP8.5. Um modelo que mostra mudanças extremas nesta classe é o MIROC (RCP8.5), que aponta uma diminuição da precipitação na área de estudo de quase 400mm, com um aumento de temperatura de cerca 6 Graus Kelvin para os próximos 100 anos. O outro cenário Consciência global (B1) tem semelhanças com o RCP2.6, neste caso os modelos projetam menores mudanças referentes a temperatura e a precipitação nos próximos 100 anos. O modelo HadCEM projeta um aumento da temperatura de cerca 1 Grau Kelvin. Os modelos climáticos mencionados acima são executados com os cenários (A2 e B1) estabelecidos.

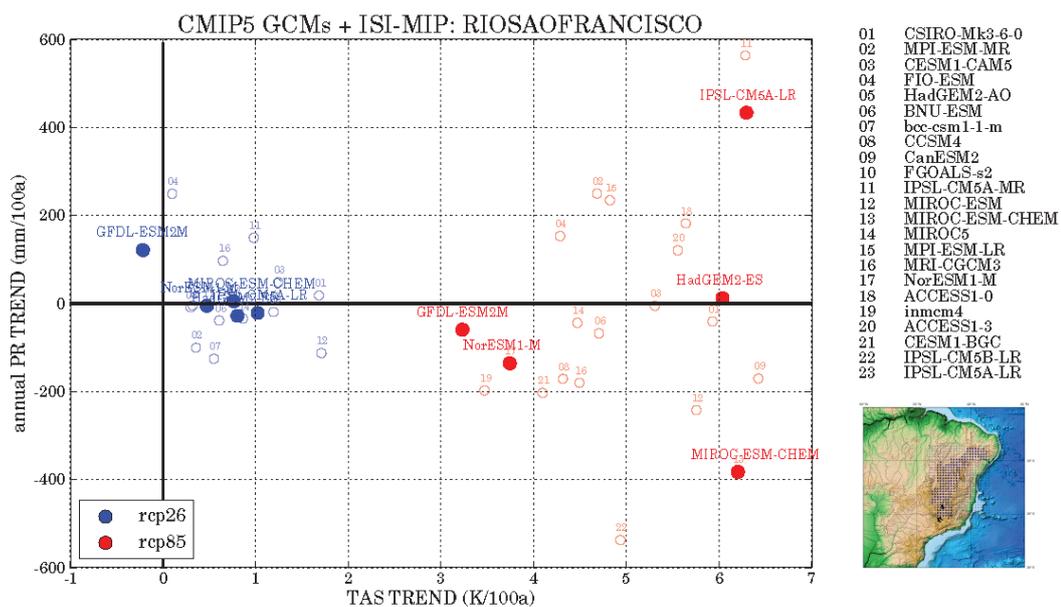


Figura 20 – Projeções de modelos climáticos – tendência da precipitação [mm/100anos] e da temperatura [K/100anos] (KOCH, 2014)

Os modelos produzem resultados até o ano 2100. Entretanto, na modelagem hidro-econômica desenvolvida no GAMS, são simulados períodos mais curtos focando no futuro mais próximo (até o ano de 2050), uma vez que este é o período mais relevante para os *stakeholders*. A *Figura 21* mostra, por exemplo, um período futuro com vários anos secos (vazão abaixo da média),

²⁰ *Coupled Model Intercomparison Project Phase 5*

colocando o sistema em stress e provável escassez hídrica. É neste contexto que são obtidos e analisados os resultados da alocação econômica ótima e os diversos impactos resultantes em todos os setores econômicos.

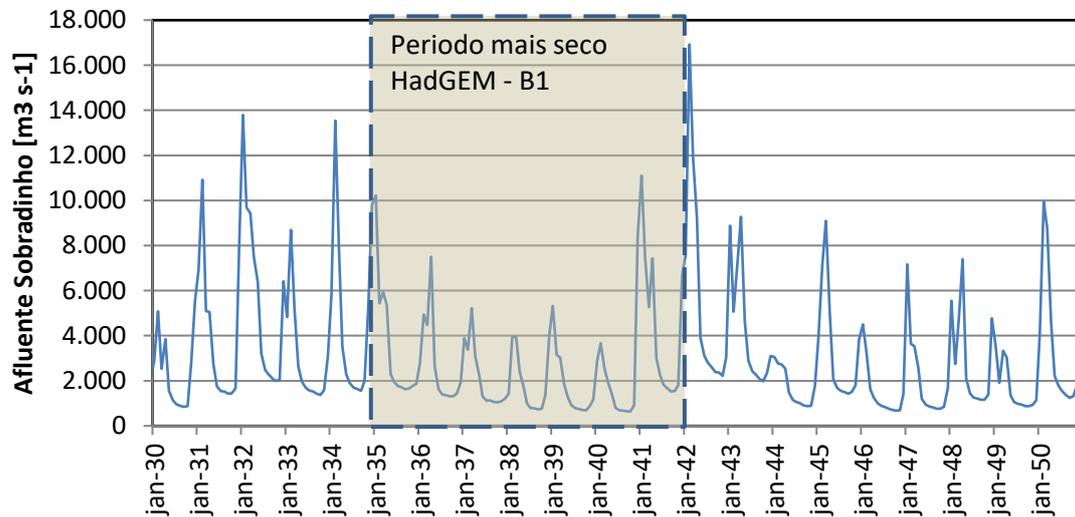


Figura 21 – Vazão afluyente Sobradinho do modelo SWIM: CMIP5: HadGEM – B1

4.5.2 Modelo de Produção Agrícola (MAGPIE)

Alterações locais dos padrões de uso do solo (a produção agrícola de milho, soja, cana-de-açúcar e forragem), induzidos por forçantes globais: como o crescimento da população e do PIB, política e condições do mercado e mudanças climáticas são obtidos para a bacia hidrográfica do São Francisco utilizando uma versão regionalizada do modelo agro-econômico MAGPIE (BIEWALD, LOTZE-CAMPEN, *et al.*, 2014). MAGPIE distingue dez regiões do mundo referentes à demanda por alimentos (energia alimentar) e utiliza dados de disponibilidade de terra e água numa resolução de 0,5 graus. Utilizando as projeções de renda e população exogenamente, a demanda por alimentos é projetada no futuro sob diversos cenários (SRES). O modelo simula passos de tempo de 10 anos e usa em cada período o padrão de uso da terra otimizado do período anterior como condição inicial. No lado biofísico, o modelo usa os resultados do modelo de vegetação dinâmica *Lund-Potsdam-Jena managed Land* - LPJmL (BONDEAU, LUCHT, *et al.*, 2007), que simula os rendimentos de grupo de culturas dependendo das condições climáticas em uma resolução de 0,5 graus. Além da produtividade das culturas, o LPJmL transfere informações sobre a disponibilidade de água e terra por célula e cultura para o MAGPIE (KRAUSE, LOTZE-CAMPEN, *et al.*, 2013). A função objetivo do MAGPIE minimiza o custo total da produção da demanda regional de alimentos e bioenergia. A expansão da área cultivada é a alternativa para aumentar o nível de produção, entretanto envolve custos adicionais (KRAUSE, LOTZE-CAMPEN, *et al.*, 2013).

Os resultados do MAgPIE mostram que as mudanças socioeconômicas globais e regionais alteram os padrões gerais de uso da terra. No cenário A2, as terras cultivadas na bacia hidrográfica do rio São Francisco aumentam fortemente em 2035 em relação a 2005. As terras cultivadas crescem de 4,4 milhões hectares em 2005 para 9,5 milhões hectares em 2035. A área de cana-de-açúcar aumenta 15 vezes, a área de milho em 23% e a área de forragem em 167%. Apenas a área de soja diminui em 31% em 2035. Já no cenário B1, a área total cultivada quase não muda, porém, as culturas cultivadas mudam na bacia hidrográfica do rio São Francisco. O cultivo de milho e soja cessa totalmente em 2035, por outro lado a área cultivada com cana-de-açúcar aumenta de 0,5 milhão hectares para 2,5 milhões hectares em 2035 (KOCH, BIEWALD, *et al.*, 2015c). A *Figura 22* mostra as mudanças nas terras agrícolas utilizadas para as diferentes culturas para a bacia hidrográfica do rio São Francisco, comparando 2005 e 2035.

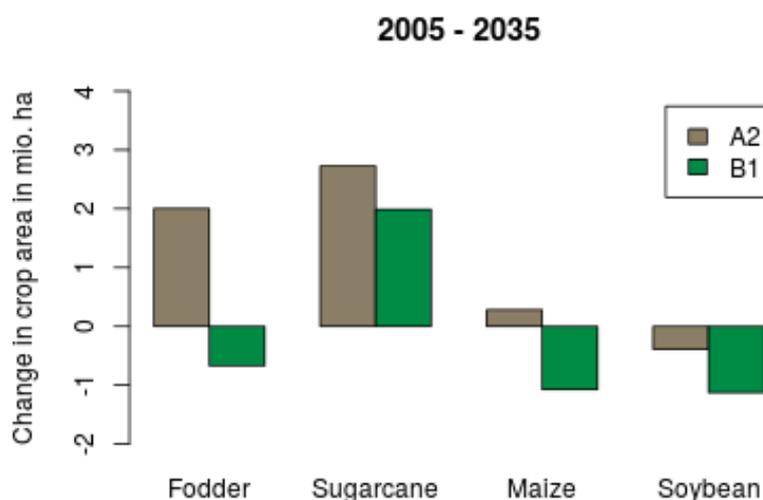


Figura 22 – Mudanças nas terras agrícolas utilizadas para as diferentes culturas em milhões de hectares na bacia do São Francisco (KOCH, BIEWALD, et al., 2015c)

Segundo Koch et al. (2015c), o aumento de terras agrícolas, no cenário A2 em 2035, pode ser explicado por três fatores: desenvolvimento socioeconômico, crescimento da população, restrição no comércio (importação) e pouca consciência ambiental. A irrigação para o cultivo de cana-de-açúcar, no Brasil, tem se expandido muito, especialmente no Nordeste. Essa região é responsável por cerca de 10% da produção nacional de cana-de-açúcar (MORAES, RIBEIRO, *et al.*, 2015; MORAES, CARNEIRO, *et al.*, 2016). Segundo Assad et al. (2008), em cenários de mudanças climáticas, o cultivo de cana-de-açúcar sob irrigação deverá expandir-se, especialmente, em áreas não-tradicionais, como na bacia do SMSF.

Na área de estudo, ou seja, para o Sub-Médio do São Francisco, os resultados do MAgPIE mostram também um aumento elevado das áreas irrigadas para cana-de-açúcar, principalmente,

no cenário A2, já no cenário B1 as mudanças não são tão drásticas. A *Figura 23* mostra as mudanças nos dois cenários A2 e B1, no cluster 9 (SMSF) do MAgPIE.

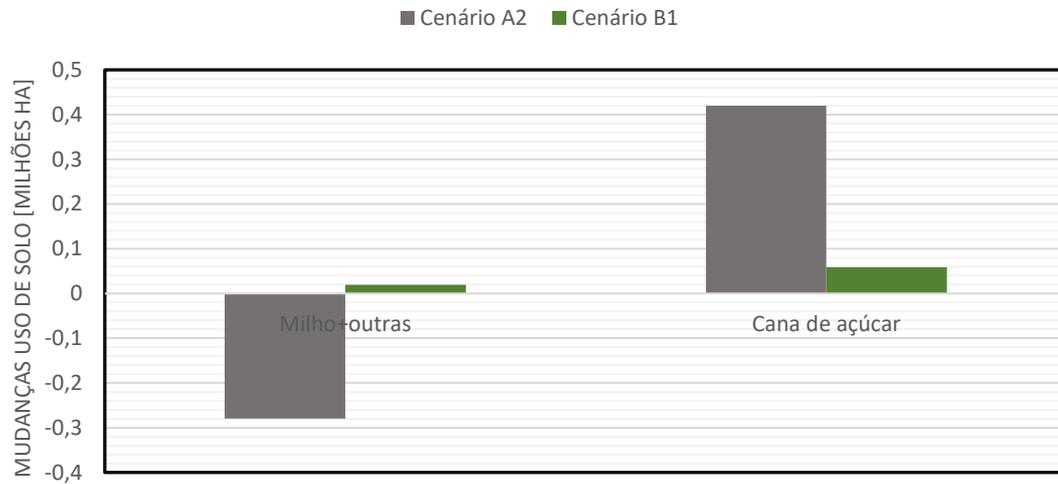


Figura 23 – Mudanças no uso de solo no cenário A2 e B1 no cluster 9 (Dados: MAgPIE)

4.5.3 Downscaling e regionalização

Neste estudo, utiliza-se uma versão regionalizada do MAgPIE para o SMSF, que é simulada em maior resolução para analisar os padrões de uso da terra. Para a regionalização do modelo global para a bacia como um todo, a região foi simulada baseando-se em 10 unidades com características climáticas semelhantes, ao invés de agrupadas em um cluster de simulação global (BECK, 2012). A *Figura 24* mostra os 3 clusters e as respectivas células na área de estudo.

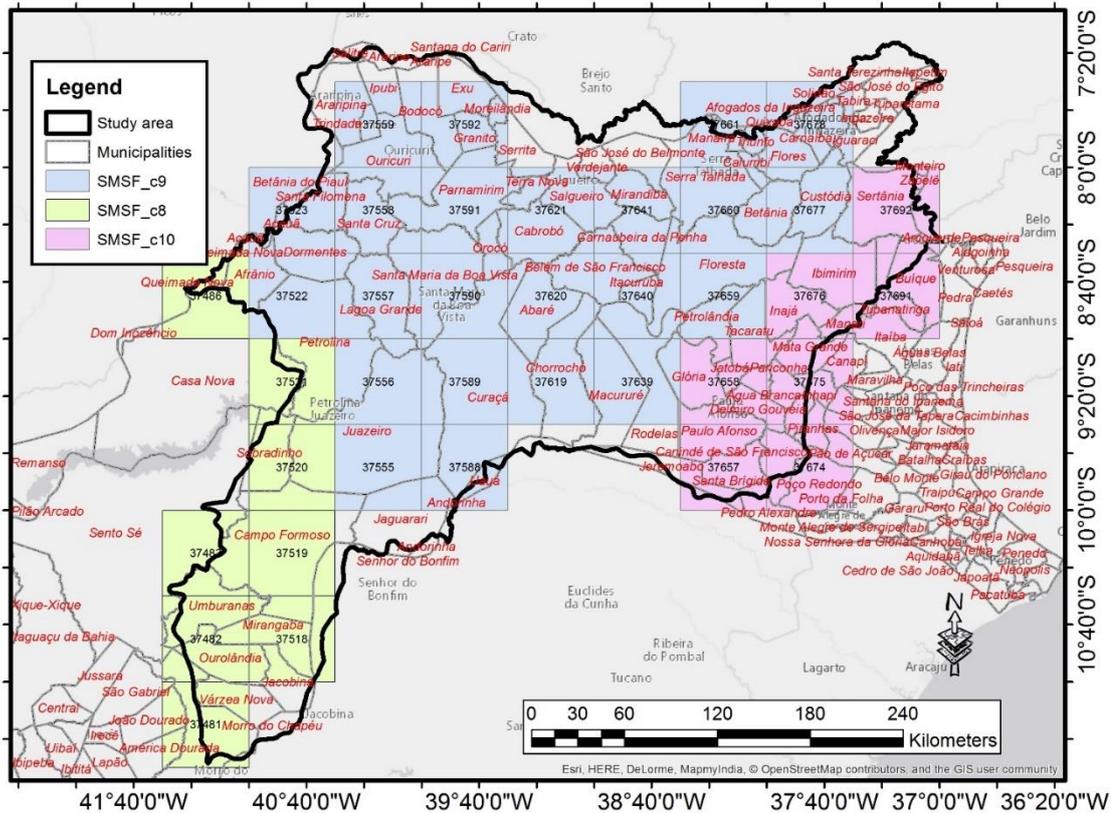


Figura 24 – Clusters 8,9 e 10 do MAGPIE regionalizado para o SMSF e os municípios da região

Como os dados referentes à produção agrícola local correntemente são dados por município (IBGE, 2006-2012), é necessário ajustar os resultados do MAGPIE dados por clusters (grupos de células). Para isso, delimitam-se a fração de cada área de município dentro de cada célula e cluster do MAGPIE, utilizando geoprocessamento. Atualmente, a produção agrícola principal no SMSF são frutos, por exemplo, banana, manga, uva, etc., além de cana-de-açúcar e milho (IBGE, 2006-2012). O modelo MAGPIE distingue apenas três grupos de culturas na área de estudo: milho, cana-de-açúcar e outras culturas²¹. A projeção futura do MAGPIE não mostra uma produção relevante de milho para o futuro. Ademais, como o MAGPIE agregava as demais categorias de frutas e vegetais num grupo único, que não incluía todas as frutas encontradas na região, a estimativa do MAGPIE utilizada foi apenas a relativa à cana-de-açúcar. O total de áreas irrigadas disponíveis a ser considerado será explicado, em seguida, e vai variar de acordo com o cenário. O complemento das áreas de cana-de-açúcar projetadas pelo MAGPIE, dentro

²¹ MAGPIE modela os 16 grupos de culturas mais importantes. Frutas e vegetais são considerados num grupo único denominado “Outras culturas”.

do total de áreas irrigáveis, será considerado como sendo ocupado pela configuração (usando a mesma proporção) de frutas atuais da região.

Para refinar a distribuição das áreas de cana-de-açúcar projetadas em clusters pelo MAgPIE, em 2005, nos municípios sob cenários A2 e B1, utiliza-se o mapa de solo (EMPRAPA, 2008). De acordo com EMPRAPA (1977/1979), no Brasil, a cana-de-açúcar é, atualmente, cultivada na maior parte do Nordeste, onde existem dois solos específicos: Argissolos (PVA) e Latossolos (LTA), principalmente, ao longo da costa. No entanto, no SMSF, a cana-de-açúcar tem sido cultivada no mesmo município (Juazeiro) há 20 anos, utilizando-se um tipo diferente de solo (VC - Vertissolos) sob irrigação intensa, duplicando a produtividade (AMARAL, COELHO, *et al.*, 2012; SILVA, RICHÉ, *et al.*, 1993). Após a correção dos resultados com a informação dos dados do solo (ver Figura 25), pôde-se validar e ajustar as estimativas da área de cana-de-açúcar do MAgPIE para os municípios, em 2005 no cenário A2 e B1 (MORAES, CARNEIRO, *et al.*, 2016).

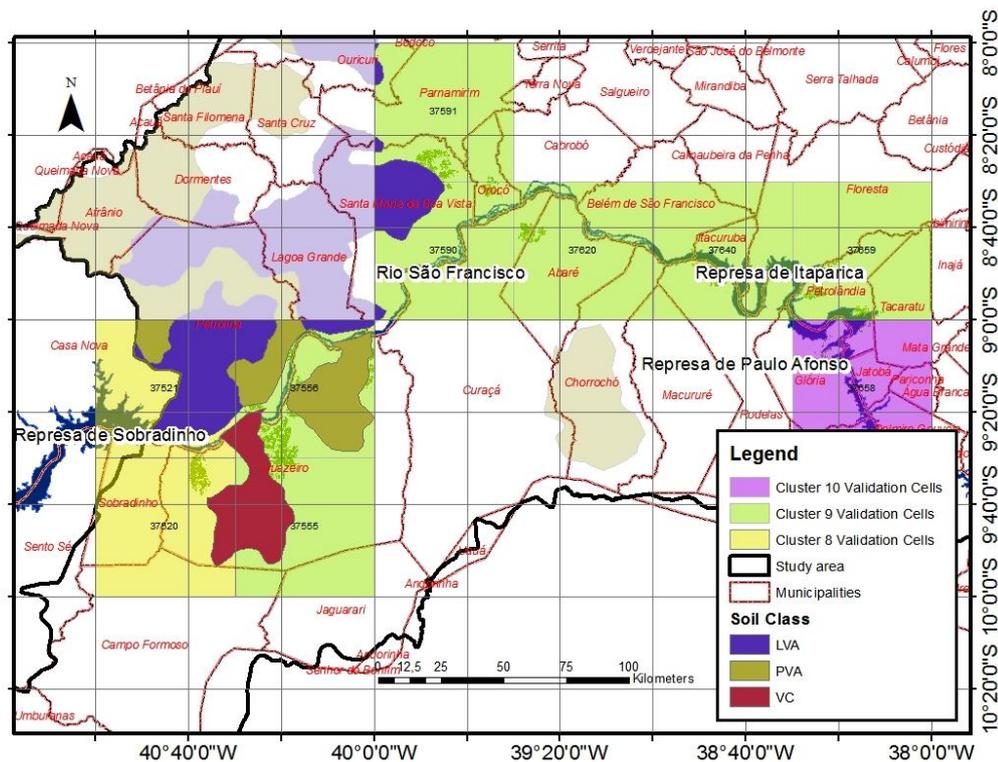


Figura 25 – MAgPIE Cluster, municípios e Classes de solo (Dados: IBGE, EMPRAPA)

De acordo com Moraes *et al.* (2016), as frações da área geográfica e tipos de solos nos municípios são, em seguida, utilizadas para distribuir as estimativas das áreas de cana-de-açúcar do MAgPIE para o futuro entre os vários projetos de irrigação existentes (com expansões) e

planejados (ANA, MMA, 2004). A *Figura 26* mostra os perímetros existentes e planejados com as células utilizadas para *downscaling*.

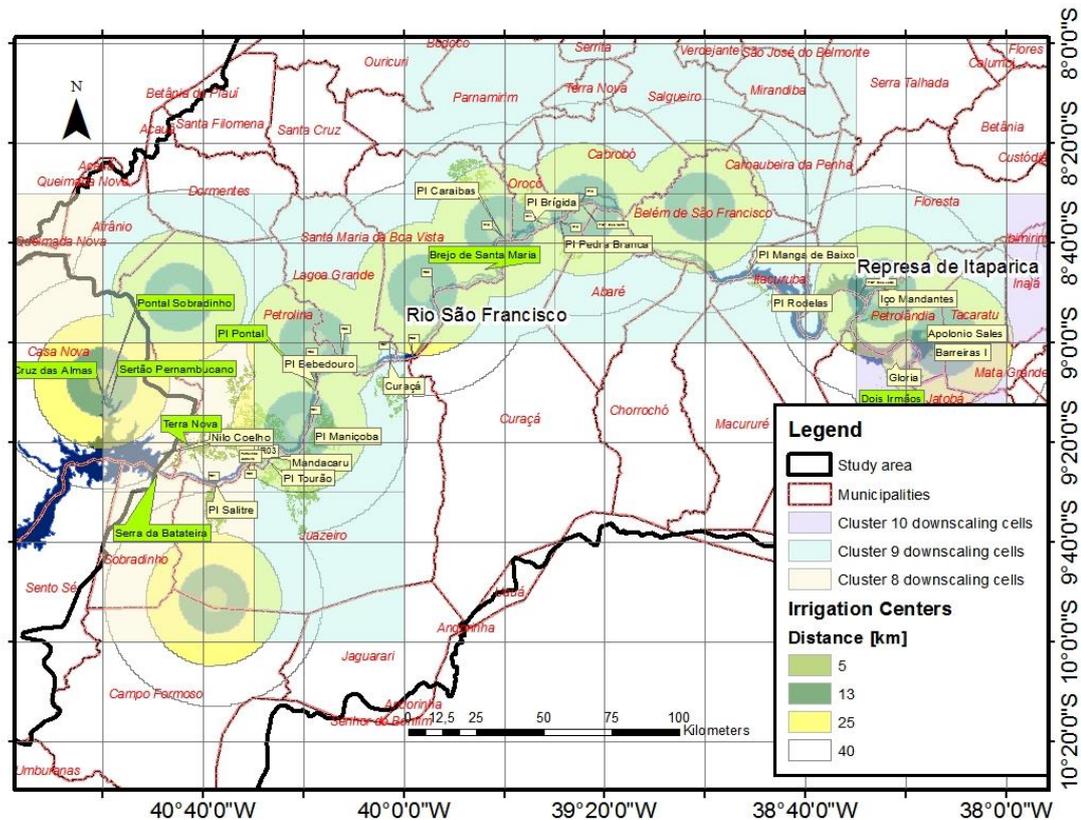


Figura 26 – Área de estudo e projetos de irrigação - existentes (amarelo) e planejados (verde)

As estimativas para o uso de solo das outras culturas, no cenário A2, utilizam as mesmas proporções das culturas atuais e são obtidas assumindo que toda a área planejada para cada projeto irrigado seria ocupada até 2035. Portanto, a área total de uso de solo ocupada por outras culturas em cada cenário e cada projeto de irrigação é obtida utilizando o valor complementar da área total do projeto de irrigação sobre a área de cana-de-açúcar estimada para o mesmo. Já, no cenário B1, apenas os projetos existentes e iniciados seriam ocupados conforme as proporções das culturas e área total de uso de solo nos perímetros.

A *Figura 27* mostra a distribuição das áreas de produção agrícola e culturas nos projetos de irrigação, para o cenário *Baseline* (2006), agrupadas nas duas classes de *MAGPIE*: *Cana-de-açúcar* e *Outras culturas*. A figura mostra, também, projetos planejados ainda sem áreas atribuídas.

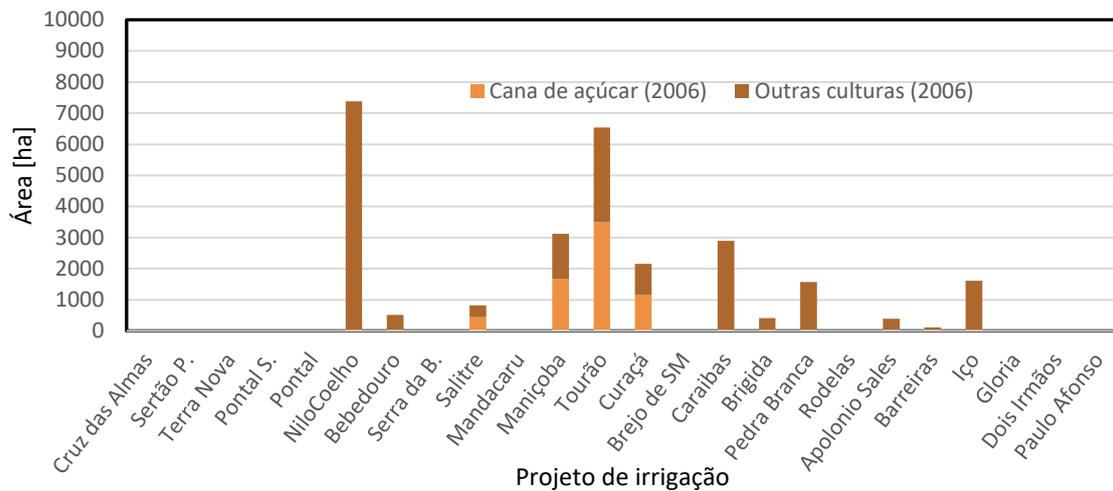


Figura 27 – Distribuição das áreas irrigadas e culturas nos projetos de irrigação para 2006

A categoria *Outras culturas* (Figura 27) representa as principais culturas presentes no cenário *Baseline* em cada município, que se baseia no Censo Agropecuário 2006 (IBGE). Nesses perímetros/municípios, os cultivos, além da cana-de-açúcar, mais representativos são: bananas, cocos, goiabas, mangas, maracujá, melancia, melão, tomate e uva. Estes frutos, junto com a cana-de-açúcar, representam 81% de toda a área irrigada no Sub-Médio São Francisco, em 2006. Existem outras culturas na região, como: milho, feijão e cebola, para as quais os dados relativos aos fatores de produção no Censo de 2006 não podem ser individualizados e, portanto, não são considerados, neste estudo.

Considerando a projeção do MAgPIE e a distribuição adotada como descrita mais acima, obtém-se a seguinte distribuição para os perímetros irrigados no SMSF (Figura 28) para o cenário de expansão A2.

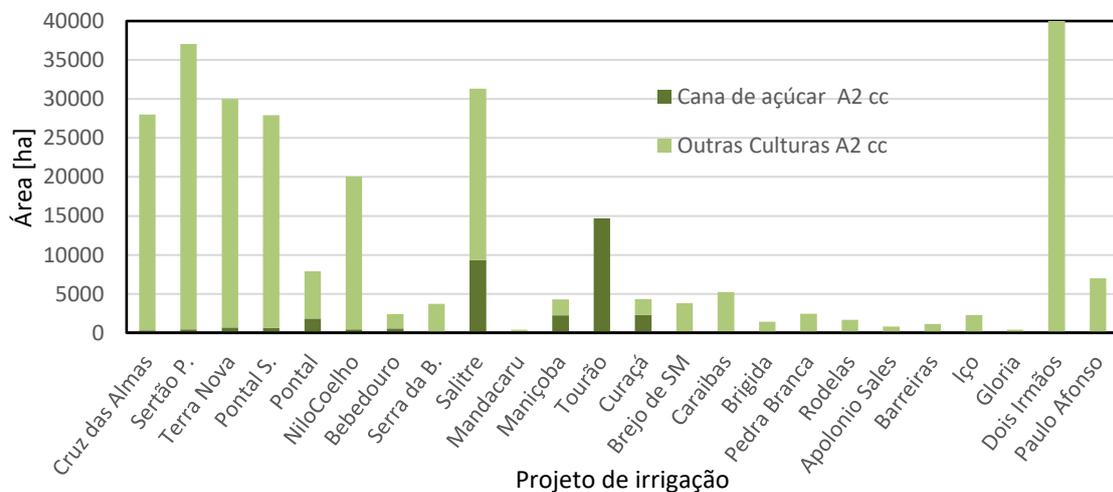


Figura 28 – Distribuição das áreas irrigadas e culturas nos projetos de irrigação para 2035 no cenário A2 com mudanças climáticas

Observa-se um grande aumento das áreas irrigadas em novos perímetros, como Cruz das Almas, Sertão Pernambucano, Terra Nova, Pontal e Dois Irmãos, no cenário A2, que representa uma alta concentração de áreas irrigadas, principalmente, na região de Sobradinho, Petrolina e Juazeiro. Os perímetros Salitre e Tourão contêm as maiores áreas para o cultivo de cana-de-açúcar. Para o cenário de Consciência global (B1), a distribuição das áreas irrigadas pode ser observada na *Figura 29*. Neste cenário, nem todos os perímetros planejados são considerados como sendo realmente explorados para a agricultura irrigada. Pode-se observar um crescimento menor em comparação ao cenário A2, entretanto também com um crescimento elevado de cana-de-açúcar no perímetro Tourão e Salitre.

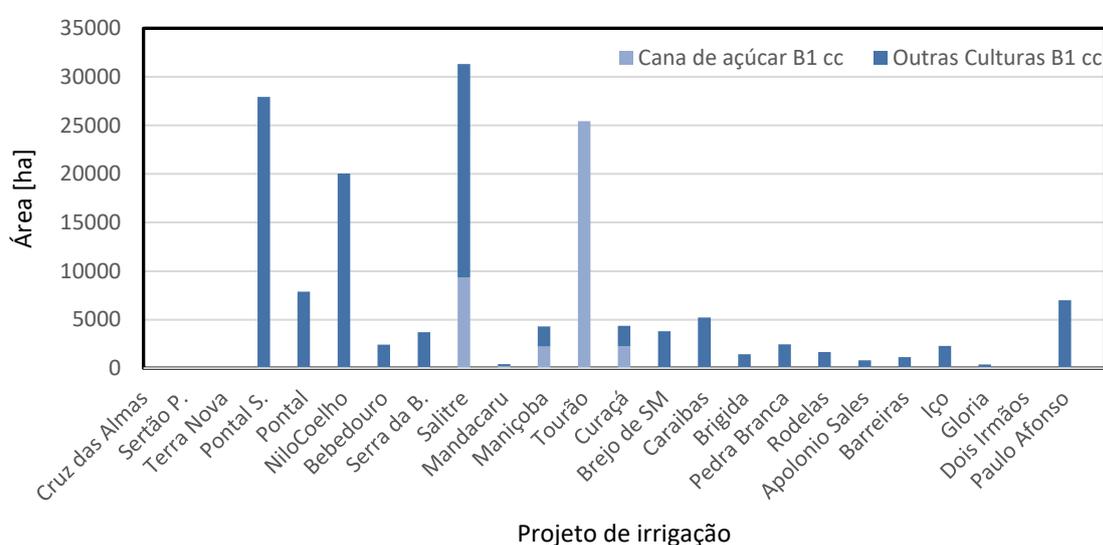


Figura 29 – Distribuição das áreas irrigadas e culturas nos projetos de irrigação para 2035 no cenário B1 com mudanças climáticas

Para construir novas curvas de demanda para os cenários futuros, são necessárias além dessa configuração de cultivos projetada, a atualização dos demais parâmetros utilizados na metodologia PMP. São eles os coeficientes de Leontief normalizados em relação ao fator terra: demanda de água (mil metros cúbicos por hectare de cultura), mão de obra (número anual de trabalhadores por hectare de cultura) e insumos / capital (em mil reais por hectare de cultivo). Além desses, os custos variáveis dos insumos: Terra (em milhares de Reais por hectare); Água (em milhares de Reais por mil metros cúbicos); Mão de obra (em milhares de Reais por trabalhador); Insumos / capital (o retorno taxa interna (taxa de juros anual)). Os valores de referência, para a maioria destes valores, são obtidos por município e associada a cada perímetro utilizando a correspondência entre eles. Dois desses custos variáveis no ano de referência foram obtidos diretamente a partir de informações dos perímetros (CODEVASF, 2006) e não por município, a saber: K1, uma componente do custo da terra, que é cobrado para os usuários de

um determinado perímetro; e os custos de água que também foram obtidos por perímetro. Por fim, ainda foram necessárias atualizar informações, tais como: a produtividade média (toneladas por hectare por cultura) e o preço médio (por cultura), a partir do ano de referência nas bases de dados regionais anuais (PAM-IBGE) por cultura e município de 2002-2012 e 2006-2104, respectivamente. Todos esses valores foram atualizados para os cenários futuros a partir dos dados atuais representados pelo *Baseline* (2006) para as duas categorias de cultivo: *Cana-de-açúcar* e *Outras culturas* (grupo das culturas mais representativas nos perímetros/municípios estudados).

Para obter as demandas hídricas anuais e mensais, para cada perímetro, foram atualizados os coeficientes técnicos para agricultura irrigada por cultura e município em litros por segundo por hectare, dados pela FUNARBE (2011) para o cenário *Baseline*. A projeção levou em conta as mudanças de temperatura e precipitação proporcionadas pelos cenários do IPCC (Carneiro, 2015). Estes coeficientes técnicos atuais e projetados foram assim associados à cultura, mês e município. No caso da categoria *Outras culturas*, os valores são agregados, utilizando as proporções de usos de solo atuais de cada município (*Tabela 2*).

Tabela 2 – Projeção da demanda hídrica para ‘Outras culturas’ nos municípios no cenário A2 (MORAES, CARNEIRO, et al., 2016)

Demanda hídrica em m³ / ha	Casa Nova	Juazeiro	Curaçá	Rodelas	Glória	Petrolina	Santa Maria da Boa Vista	Orocó	Petrolândia
janeiro	408	1016	502	721	818	1057	318	675	598
fevereiro	434	1259	524	711	790	1392	1135	738	895
março	291	607	319	416	589	747	591	526	418
abril	564	1568	812	616	681	1765	862	860	731
maio	884	2524	1589	882	604	2394	1466	1154	1509
junho	1047	2732	1598	828	552	2362	1721	1156	1976
julho	1157	2829	1873	966	497	2527	1541	1199	2062
agosto	1402	2867	2074	1306	566	2895	1883	1513	2127
setembro	1517	3511	2566	1569	961	3784	2801	1961	2523
outubro	1451	3700	2745	1742	1365	3987	3330	2192	2582
novembro	953	2287	1671	1442	1187	2747	2540	1850	1395
dezembro	620	1848	1168	1027	887	1985	1841	1204	852
Valores médios	894	2229	1453	1019	792	2303	1669	1252	1472

Os dados referentes à mão-de-obra para as áreas irrigadas, em cada município (número de trabalhadores por hectare), foram obtidos a partir do Censo Agropecuário de 2006 (IBGE) usando o número de pessoas empregadas por hectare, em cada município contendo o perímetro em estudo. Esses valores foram divididos pelas áreas irrigadas nas duas categorias de cultivo

para obter a razão por cultura. Para estimar esse coeficiente para o futuro, atualizou-se o rendimento agrícola de 2006, representado pelo rendimento médio de cada município entre 2002 e 2012²². Os rendimentos foram projetados para o futuro utilizando as projeções de rendimento futuro simulados no MAgPIE (2005 até 2035) com mudanças climáticas. A atualização dos coeficientes de Leontief para os insumos em cada município (Milhares de R\$ por hectare) seguiu o mesmo procedimento, ou seja, também foram atualizados através das projeções dos rendimentos por cultura do MAgPIE.

Os custos variáveis da terra de referência foram obtidos utilizando os dados do Censo Agropecuário de 2006 por município, somados a um valor relacionado a cada perímetro, ou seja, um valor cobrado aos agricultores em cada perímetro pela CODEVASF, denominado K1. Para estimar os valores de referência K1 para os novos perímetros (que não existiam em 2006), associaram-se os valores atuais ao tamanho dos perímetros. Para uma área de perímetros com extensões até 1.700 ha, os valores são em torno de 0,05 Milhares de R\$ / hectare. Acima deste tamanho (mais de 1.700 ha), os valores cobrados são de 0,07 a 0,08 Mil R\$ / hectare.

O custo variável de referência da mão-de-obra, que fornece a quantidade de trabalhadores e despesas com salários também foi obtido do Censo Agropecuário de 2006 por município. O custo da água (denominado K2), juntamente com o custo de K1, é o valor cobrado pela CODEVASF em alguns perímetros para o abastecimento de água e é considerado como a média ponderada dos preços cobrados em outros perímetros (CODEVASF, 2006). Estes valores foram utilizados para os perímetros existentes no cenário *Baseline*. Para os cenários futuros no cenário A2 e B1, a taxa de crescimento dos custos dos fatores foi a mesma utilizada pelo MAgPIE.

O preço médio por cultura e município (mil R\$ por tonelada) para o *Baseline* foi obtido pela razão entre o valor total da produção em Milhares de Reais e a quantidade total produzida para cada cultura em cada município e perímetro durante os anos de 2002 a 2012. Os dados foram obtidos da Produção Agrícola Municipal (PAM) fornecida anualmente pelo IBGE. Para estimar o preço no futuro, como já nos outros custos variáveis, consideraram-se as projeções do MAgPIE com mudanças climáticas. Para projetar os preços das duas categorias de culturas (cana-de-açúcar e outras culturas), foi utilizado, na primeira etapa do PMP (Programação Linear), as mesmas taxas de crescimento dos custos de produção associados a cada cenário futuro. Como MAgPIE é um modelo de equilíbrio parcial e não fornece preços endógenos como

²² Valores obtidos usando dados da Produção Agrícola Municipal (IBGE, 2006-2012)

resultado, as alterações de preços que poderiam refletir tendências de preços mundiais para a cana-de-açúcar e outras culturas devido à possíveis choques de demanda externa não estavam disponíveis a partir do modelo. Para superar isso, foi utilizado um fator de escala por cultura e região na função objetivo não-linear da terceira etapa para simular este tipo de mudanças de preços e permitir a calibração (MORAES, CARNEIRO, *et al.*, 2016).

Os dados referentes a produção agrícola utilizados na obtenção das curvas de demanda encontram-se tabelados no Apêndice B.

4.6 DISPONIBILIDADE DE ÁGUA - MODELO CHUVA-VAZÃO (SWIM)

A modelagem hidro-econômica necessita de dados referentes a afluência para a área de estudo. A área de estudo se constitui numa bacia hidrográfica da bacia do rio São Francisco. Para modelar a relação chuva-vazão considerando cenários de mudanças antrópicas, como mudanças climáticas e do uso de solo, é utilizado o *Soil and Water Integrated Model* - SWIM (KRYSAKOVA, MÜLLER-WOHLFEIL e BECKER, 1998; KRYSAKOVA, WECHSUNG, *et al.*, 2000) aplicado na bacia hidrográfica do rio São Francisco no âmbito do projeto INNOVATE. O SWIM é um modelo eco-hidrológico de fluxo permanente e espacialmente semi-distribuído. O modelo foi desenvolvido a partir de modelos SWAT (ARNOLD, ALLEN e BERNHARDT, 1993) e Matsalu (KRYSAKOVA, MEINER, *et al.*, 1989) para avaliação de impacto de mudanças no uso da terra e do clima. O SWIM simula processos hidrológicos na escala da bacia hidrográfica (KOCH, LIERSCH e HATTERMANN, 2013).

No âmbito do projeto INNOVATE, são simulados no modelo SWIM a disponibilidade, o uso e manejo de água na bacia hidrográfica do rio São Francisco (KOCH, LIERSCH, *et al.*, 2015a). O modelo é aplicado para a bacia inteira, entretanto para o modelo hidro-econômico utiliza-se apenas o uso e manejo de água simulados pelo SWIM a montante do reservatório Sobradinho e Serrinha – PE (Rio Pajeú) para representar a disponibilidade hídrica na área de estudo. Na região do SMSF o modelo hidro-econômico utiliza como entrada apenas a vazão natural dos principais afluentes dada pelo SWIM, já incorporados de volta o manejo e o uso que nesta região do SMSF serão otimizados pelo modelo hidro-econômico. Foram selecionados para a otimização, períodos representativos de 7 anos consecutivos no máximo, devido a limitações computacionais do modelo de otimização (tempo de processamento). Ressalta-se que, neste período de 7 anos, a variabilidade climática e a regularização plurianual do reservatório Sobradinho pôde ser representada de forma satisfatória.

A *Figura 30* mostra a vazão afluente do reservatório Sobradinho (principal reservatório contribuinte e regularizador do SMSF) para os períodos analisados. O primeiro é o cenário *Baseline* (2000-2006), o segundo é o modelo climático HadGEM RCP8.5 (MADEC e IMBARD, 1996) associado ao cenário A2 com a projeção para 2035-2041, o terceiro é o modelo climático MIROC RCP2.6 (WATANABE, HAJIMA, *et al.*, 2011) associado ao cenário B1 com a projeção para 2037-2043 e o último um período recente com os dados observados (CHESF, 2016; ONS, 2015; ANA, 2016g). Todos os períodos selecionados representam séries temporais com alguns anos abaixo da vazão média natural (2.812 m³/s (CBHSF 2004)) para o SMSF. A vazão afluente média no cenário *Baseline* é de 2.168 m³/s, no cenário A2 é de 2.656 m³/s, no cenário B1 é de 1.278 m³/s e nos últimos anos 1.623 m³/s (cenário CV). O modelo HadGEM mostra um futuro mais úmido para a região a montante de Sobradinho, por isso o período selecionado mostra uma maior disponibilidade de água, em comparação com o presente (*Baseline*). Por outro lado, o modelo MIROC mostra um futuro mais seco, que é semelhante a situação atual (período de seca no Nordeste de 2012-2016). Como já mencionado, o uso de solo, retiradas e manejo da bacia a montante de Sobradinho já estão incluídos nas simulações resultantes do modelo SWIM, usadas como entrada pelo modelo hidro-econômico, em ambos os períodos usando os mesmos cenários.

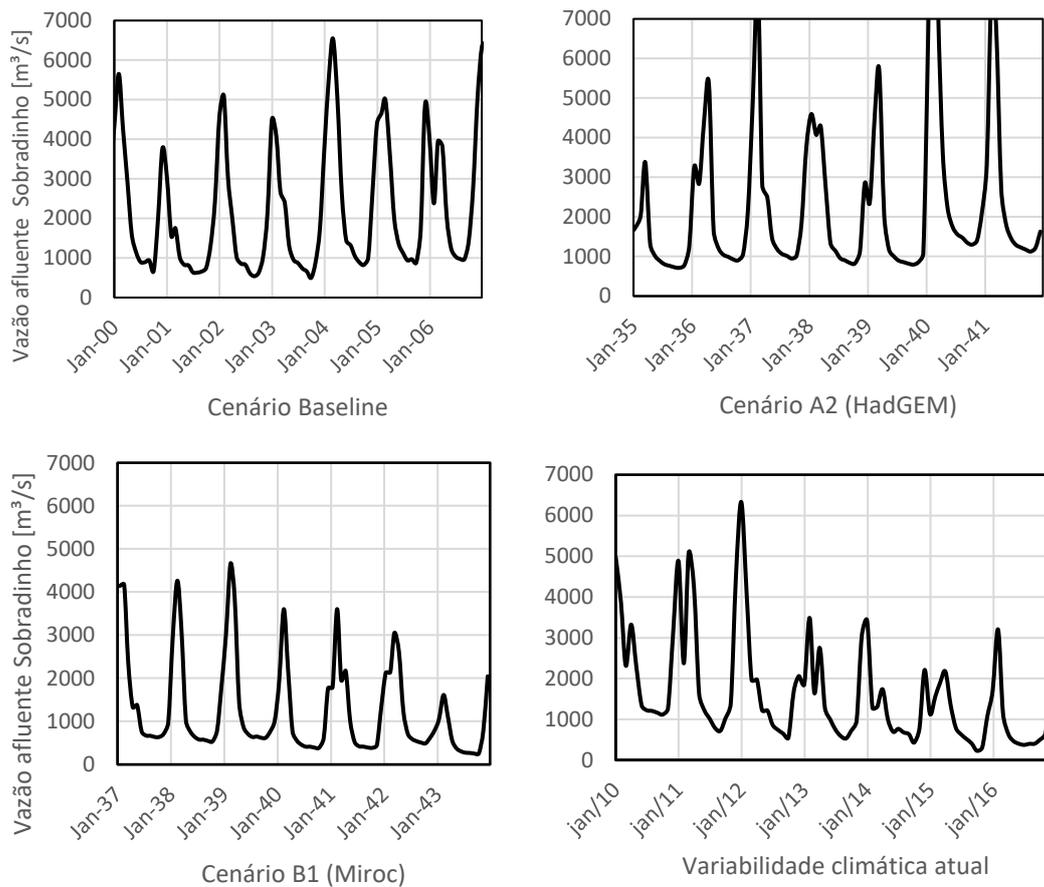


Figura 30 – Vazão afluente Sobradinho [m³/s] - 2000-2006 (Baseline), 2035-2041 (Cenário A2 -HadGEM RCP8.5), 2037-2043 (Cenário B1 – Miroc), 2010-2016 (Seca NE)

Os volumes acumulados de água nos reservatórios, no início e no fim do período de 7 anos, assumem-se iguais aos volumes obtidos no modelo chuva-vazão (SWIM) ou no caso de cenários atuais os volumes observados nos reservatórios.

4.7 CENÁRIOS DE REGRAS OPERACIONAIS

Modelos hidro-econômicos podem mensurar os efeitos econômicos de diferentes regras operacionais, restrições ambientais, manutenção de ecossistemas, restrições técnicas e restrições institucionais. Períodos representativos são selecionados para representar a oferta hidrológica, diante da qual obter-se-á a alocação econômica ótima. O modelo utiliza restrições técnicas, econômicas e ambientais, que podem ser alteradas e tem consequências para todos os usos. Os dados de oferta do período e as restrições consideradas representam uma referência utilizada para a mensuração dos impactos econômicos de alteração nas regras operacionais, institucionais e do uso de diferentes estratégias de alocação de água.

4.7.1 Referência

Inicialmente, são utilizadas apenas restrições operacionais e algumas institucionais dos reservatórios para determinar o ótimo econômico nos cenários como referência. As restrições incluídas são: as físicas da barragem, casa de força e vertedouro; o controle de cheias, e as seguintes institucionais: as vazões mínimas efluentes de Sobradinho > 1.300 m³/s e de Xingo > 1.300m³/s (CBHSF, 2004).

Apesar do modelo ter a previsão perfeita (ver capítulo 4.4, na página 74), são utilizados restrições associadas aos volumes de espera do reservatório Sobradinho e Itaparica (ONS, 2016), ou seja, o modelo pode evitar enchentes utilizando o conhecimento do futuro, entretanto o operador, anualmente, não tem este conhecimento e terá que seguir essas regras, ou seja, a disponibilidade de água será muito maior em comparação das regras reais de operação para o período simulado. Embora os volumes de espera sejam atualizados anualmente e o cálculo depender de vários fatores (ONS, 2016), a sua variação é relativamente pequena, por isso estabeleceu-se um padrão para todos os períodos simulados, como definido pelo ONS (ONS, 2016). A *Tabela 3* mostra os volumes de espera adotados no modelo-hidro-econômico.

Tabela 3 – Volume de espera (ONS, 2016) em % do volume útil

V_{útil} [%]	Sobradinho TR=17 anos	Itaparica TR=20 anos
Jan	76,91	60,74
Fev	76,91	60,74
Mar	80,43	62,10
Abr	80,73	81,39
Mai	100,00	100,00
Jun	100,00	100,00
Jul	100,00	100,00
Ago	100,00	100,00
Set	100,00	100,00
Out	100,00	100,00
Nov	79,50	73,93
Dez	77,51	60,74

Além disso, são adotadas as vazões e cotas máximas para o controle de cheias como restrições. Para Sobradinho, uma vazão defluente de 8.000 m³/s e o nível máximo de 304,00 m em Belém do São Francisco (ONS, 2014; ONS, 2016).

4.7.2 Priorizando o abastecimento humano

São utilizadas as mesmas restrições como no cenário anterior, entretanto com a prioridade para abastecimento humano como previsto na lei N° 9433 (BRASIL, 1997). Neste cenário, todas as

demandas para o abastecimento dos municípios são atendidas (a alocação é fixada igual a demanda do município e não deixada como variável de decisão). A alocação de água como variável de decisão ocorrerá apenas para os usuários irrigantes e as usinas hidroelétricas.

4.7.3 Redução de energia assegurada

A produção de energia é um fator importante para o desenvolvimento e tem muitas vezes alta prioridade. A energia assegurada de uma usina hidroelétrica é a máxima produção de energia que pode ser mantida ao longo dos anos, aceitando um certo risco de não atendimento, esse risco é atualmente 5% (ANEEL, 2005). A energia assegurada representa a “Garantia Física”, ou seja, a energia que cada usina hidrelétrica tem como seu limite inferior de contratação. O uso múltiplo dos recursos hídricos afeta a operação dos reservatórios/usinas e conseqüentemente o valor da energia assegurada. Principalmente, vazões mínimas exigidas a jusante dos reservatórios e demandas ecológicas podem afetar a energia assegurada. Neste cenário é analisado o impacto da redução da energia assegurada para os outros usos na área de estudo. Para tal, a energia assegurada de cada usina no SMSF é reduzida de 100 MW.

4.7.4 Transposição do SF (PISF)

As quantidades transferidas pelos dois eixos são simuladas, neste cenário, para avaliar os impactos econômicos para os usos na bacia doadora. O cenário utiliza curvas de demanda do eixo Norte, com a retirada no trecho do rio entre os reservatórios Sobradinho e Itaparica, e as curvas de demanda do eixo Leste, com retirada no reservatório de Itaparica. A demanda varia em função do cenário de mudanças climáticas e mudanças de uso de solo, sendo que a vazão mínima (26,4 m³/s) é assumida com finalidade para abastecimento humano e acima para irrigação, utilizando os valores médios da produção e benefícios obtidos nos municípios na área de estudo.

4.7.5 Abastecimento humano sem perdas

Os sistemas de abastecimento dos municípios mostram perdas elevadas no Sub-Médio. É simulada neste cenário, uma eliminação nas perdas dos usuários de abastecimento humano do SMSF. Pode-se, dessa forma, mensurar os impactos econômicos nos mesmos e nos demais usos, diante da diminuição dessas perdas de distribuição. Neste cenário, as curvas de demanda são alteradas considerando o abastecimento dos municípios sem perdas. São utilizadas as mesmas restrições como no cenário anterior, para comparar os custos ou a redução de benefícios dos demais usuários.

4.7.6 Hidrograma Ambiental

Com a construção de reservatórios no rio São Francisco, alterou-se o regime da vazão natural de períodos secos e úmidos, que alternavam-se. Para o Sub-Médio do São Francisco, *Hidrogramas ambientais* foram sugeridos (FERREIRA, 2014; MEDEIROS, FREITAS, *et al.*, 2013), que propunham valores-alvo mensais de vazões no rio a jusante do reservatório Xingo. O objetivo dos mesmos era tornar as condições no Baixo São Francisco ecologicamente favoráveis a processos naturais, tais como: ciclos de plantas ribeirinhas/aquáticas e animais; bem como processos sociais de *stakeholders*, como usuários e instituições. A *Tabela 4* mostra os valores do *Hidrograma ambiental* propostos.

Tabela 4 – Vazões mensais mínimas do Hidrograma ambiental

mês [m ³ /s]	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Aug	Set	Out	Nov	Dez
Ano normal	2754	3150	3097	2685	1727	1588	1448	1300	1300	1300	1647	2234
Ano seco	2020	2300	2100	1837	1271	1218	1100	1100	1100	1100	1331	1740

4.7.7 Controle de nível - INNOVATE

No âmbito do projeto INNOVATE, foram sugeridas regras operacionais alternativas para os reservatórios, com foco em aspectos ambientais (KOCH, SELGE, *et al.*, 2015b), ou seja, o ambiente fluvial ou o ambiente dos próprios reservatórios, com o objetivo de equilibrar ecossistemas e demandas de água antrópicas. Na opção de ‘Controle de nível’, as variações do nível de água são reduzidas a um máximo de 0,05 m/dia, restringindo o volume de água máximo diário a ser liberado em cada reservatório. Além disso, para reduzir a variação do nível máximo de 12 m e para reduzir a evaporação do reservatório de Sobradinho, o nível máximo do mesmo foi restrito a 390,0 m., reduzindo o seu volume útil para 19.479 hm³. Reduzir as variações diárias no nível de água dos reservatórios, aumenta a estabilidade e manutenção dos ecossistemas.

4.7.8 Capacidade reduzida - INNOVATE

No mesmo trabalho (KOCH, SELGE, *et al.*, 2015b), foram analisadas outras alterações no volume útil. Portanto, para o reservatório Itaparica, como opção de operação, foi sugerida uma restrição das variações do nível de água para valores mínimos e máximos de 303,5 e 304,0 m. Nas simulações para Sobradinho, variações do nível máximo do reservatório foram restritas aos valores mínimos e máximos de 388,5 e 389,0 m. Restringindo as variações do nível de água a essas cotas, as perdas por evaporação podem ser reduzidas significativamente, enquanto a altura

de carga hidráulica não é muito reduzida. O objetivo dessa restrição é também aumentar a estabilidade e manutenção de ecossistemas dos reservatórios.

4.7.9 Restrição de vazão mínima a jusante de Sobradinho menor do que 1.300 m³/s

O Plano de Recursos Hídricos da bacia hidrográfica do rio São Francisco, estabeleceu, provisoriamente, uma vazão ecológica mínima de 1.300 m³/s na foz. O comitê recomendou estudos mais aprofundados por trecho da Bacia e a adoção de um regime de vazões sazonais (periódicas) no Baixo São Francisco, para a manutenção dos ecossistemas (CBHSF, 2004). A redução da vazão a jusante de Sobradinho para um valor menor do que de 1.300 m³/s foi frequentemente praticada (ANA, 2013b; ANA, 2014b; ANA, 2015a; ANA, 2016a; ANA, 2016b; ANA, 2016c), devido a problemas de escassez de água, e tem impactos significativos na operação de reservatórios e nos demais usos.

4.7.10 Operação sem controle de cheias

Para comparar os custos/benefícios da manutenção dos ecossistemas (Hidrograma Ambiental, Controle de Nível e Capacidade reduzida) em relação aos custos de controle de cheias, são analisados os efeitos das regras de volumes de espera no modelo hidro-econômico nos cenários secos. Para isso, são desativados os volumes de espera adotados, como apresentados no capítulo 4.7.1 no modelo hidro-econômico. Deve-se ressaltar que, neste cenário, as vazões e cotas máximas para o controle de cheias são mantidas, representadas em Sobradinho por uma vazão defluente de 8.000 m³/s vazão e o nível máximo de 304,00 m, em Belém do São Francisco (ONS, 2014; ONS, 2016).

4.8 OTIMIZAÇÃO DE ALOCAÇÃO DE ÁGUA PARA OS VÁRIOS USOS DE ÁGUA

A otimização é o processo de seleção da melhor solução de um conjunto de alternativas viáveis. No caso da modelagem hidro-econômica, a alocação de água ótima é a que maximiza os benefícios econômicos dos usuários da bacia, atendendo as restrições hidrológicas e institucionais. A alocação de água ótima é obtida minimizando-se o custo de escassez dos usuários irrigação/ abastecimento humano e maximizando-se o benefício da produção de energia, utilizando as respectivas curvas de demanda. A função objetivo (ver equação (29)) utilizada minimiza o custo de escassez dos perímetros irrigados, dos irrigantes difusos, do PISF e do abastecimento humano, e também minimiza a diferença entre a produção de energia e a energia firme estabelecida para cada usina. Ao mesmo tempo, maximiza o benefício econômico

da produção de energia. O último termo da função-objetivo, que utiliza a energia firme²³ serve a dois objetivos. Um deles é o de induzir a produção de energia a atender a demanda constante e distribuí-la durante todo período. O outro é o de minimizar o valor que a usina terá que pagar por não atender a produção mínima.

$$FO = MIN \left(\begin{aligned} & \sum_{n \in \pi i} \sum_a \sum_m C_{n,a,m} + \sum_{n \in id} \sum_a \sum_m C_{n,a,m} + \sum_{n \in ah} \sum_a \sum_m C_{n,a,m} + \sum_{n \in ou} \sum_a \sum_m C_{n,a,m} \\ & - \sum_{n \in ener} \sum_a \sum_m B_{n,a,m} + \sum_{n \in ener} \sum_a \sum_m (E_{firme(n)} - E_{n,a,m}) \cdot PLD \end{aligned} \right) \quad (29)$$

Sendo:	n	Usuário: pi (perímetro irrigado), id (irrigação difusa), ah (abastecimento), ou (outros usos - PISF), ener (energia)
	C	Custo de escassez [R\$]
	B	Benefício usuário [R\$]
	E	Energia [MW]
	a, m	Ano, Mês
	PLD	Preço de Liquidação das Diferenças [R\$]

Os custos de escassez dos usuários consuntivos foram determinados utilizando-se as áreas sob as curvas de demanda (polinômios) de cada usuário em cada mês e ano, integrando a função no intervalo entre a quantidade de água alocada e demandada (ver equação (30)).

$$C_{n,a,m} = \int_{Q_{alocada}}^{Q_{demanda}} \left(\sum_{k=0}^4 a_k Q^k \right) dQ \quad (30)$$

O motivo pelo qual foi escolhido utilizar o custo de escassez dos usuários consuntivos, ao invés do benefício²⁴, foi a incerteza sobre os valores econômicos, obtidos abaixo de 60% da disponibilidade hídrica do usuário.

Os resultados obtidos, nos diferentes cenários descritos anteriormente, são analisados para identificar possíveis aplicações de instrumentos alocativos que incentivem o alcance do ótimo e mensurar *trade-offs* entre os usos para as várias opções de alocação de água. Essa abordagem é um processo iterativo, por exemplo, para avaliar medidas de adaptação nas mudanças climáticas.

²³ A energia firme de uma usina hidrelétrica corresponde à máxima produção contínua de energia que pode ser obtida, supondo a ocorrência da seqüência mais seca registrada no histórico de vazões do rio onde ela está instalada (SIPOT, 2002)

²⁴ Para calcular o benefício de uma dada quantidade alocada é necessário calcular a área sob a curva de demanda da origem até o valor alocado.

A modelagem hidro-econômica integrada desenvolvida é usada para avaliar diferentes opções de políticas voltadas a atender as questões ambientais, considerando a eficiência econômica e distribuição espacial e setorial de custos e benefícios. Os instrumentos de políticas a se avaliar podem incluir: mecanismos de outorga e cobrança; padrões de emissões e uso de solo, subsídios de investimentos para intervenções custo-efetivas ou pagamentos por serviços ambientais (INNOVATE, 2012). Isto facilitará a avaliação de instrumentos alocativos e a análise de *trade-offs* entre as várias opções de gestão, no que se refere às demandas dos múltiplos usuários do trecho estudado.

As políticas também poderão ser analisadas sob cenários de mudança climática a serem geradas em outros módulos do projeto INNOVATE. Estes cenários poderão incluir mudanças na extensão e intensidade no uso de solo, no tamanho da população e nos processos de transporte de nutrientes dentro da bacia.

4.9 SISTEMA DE APOIO À DECISÃO (SAD)

Os capítulos anteriores mostram que a gestão dos recursos naturais é complexa e correlacionada com um conjunto de parâmetros físicos, econômicos e sociais. O conhecimento e a aquisição desses parâmetros são fundamentais para estudos relacionados à gestão da água, como alocação de água e avaliação do impacto ambiental. A quantidade de dados disponíveis está aumentando, requerendo a organização destes dados da forma mais eficiente e confiável. Especialmente, para a gestão dos recursos naturais, onde diferentes instituições e partes interessadas obtêm dados espaciais e temporais, são necessários sistemas integrados para o acesso à informação e apoio à decisão.

Muitos estudos e modelos de alocação de água foram desenvolvidos por pesquisadores para apoiar a gestão dos recursos hídricos, entretanto poucos modelos são realmente utilizados na prática. Estudos de alocação de água precisam de muitos dados na dimensão espacial e temporal (ver capítulo 4.2., na página 65). Para aplicação do modelo na prática, interfaces são necessárias para criar, gerir e visualizar as entradas e resultados. Além do modelo, cenários precisam ser geridos por uma interface amigável, que muitas das ferramentas utilizadas pelos pesquisadores, normalmente, ainda não oferecem. Para atender a essa necessidade, os profissionais usam cada vez mais Sistemas de Apoio à Decisão (SAD) com uma interface amigável para estudos de recursos hídricos.

Os SAD's apresentam uma plataforma a partir da qual aplicações específicas podem ser constantemente adaptadas e executadas com a interação com o usuário, com pouco consumo de tempo e esforço. Portanto, o sistema necessita de recursos que facilitem uma configuração rápida e permitam modificações, em função das mudanças requeridas pelo usuário. Sendo assim, um SAD precisa possuir três capacidades técnicas, um Sistema Gerenciador de Base de Dados (SGDB), um Sistema Gerenciador de Base de Modelos (SGBM) e uma interface entre o usuário e os sistemas mencionados, que pode ser chamado de Sistema de Gestão e Geração de Diálogo (SGGD) (SPRAGUE, 1989; apud MORAES, 1997).

Um aspecto da metodologia deste trabalho é que uma ampla base de dados deve ser gerida, sendo que, além dos dados hidrológicos (séries históricas, projeções futuras, evaporação etc.), os dados econômicos (*mix* de culturas, produção, benefícios, custos, etc.) devem ser padronizados, consistidos e geridos. O SAD proposto, neste trabalho, tem o foco de gerenciar essa grande quantidade de dados numa forma amigável, automatizar o processamento de dados e visualizar os dados. A *Figura 31* mostra o esquema do SAD desenvolvido.

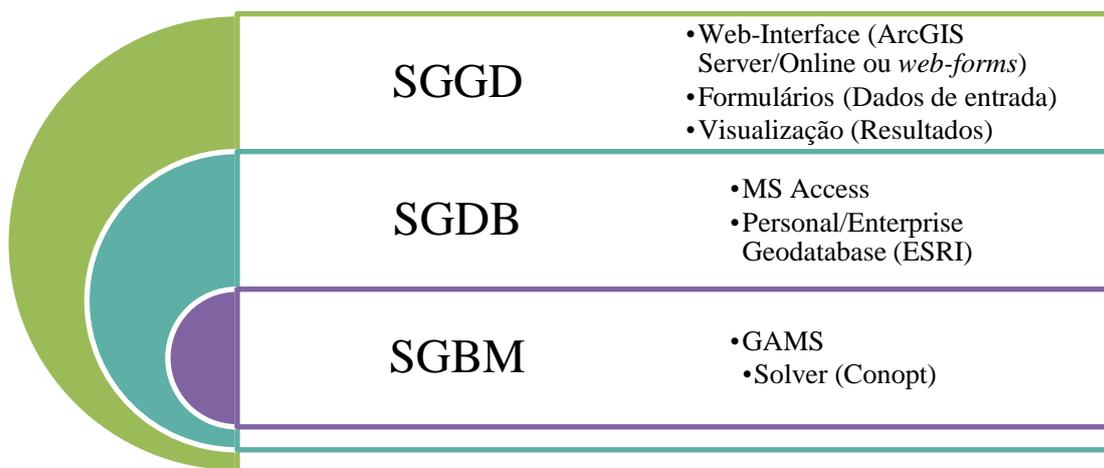


Figura 31 – Sistema de Apoio à Decisão

Moraes et al. (2013) apresentaram um Sistema de Apoio à Decisão Espacial para a Gestão de Bacias Hidrográficas (SADE-GBHidro), que tem o objetivo de fornecer uma ferramenta para usuários que apoia a decisão na gestão de bacias hidrográficas, usando a modelagem hidro-econômica. O SADE-GBHidro utiliza tecnologias de programação matemática e uma interface amigável em um sistema de informações geográficas (SIG), proporcionando uma ferramenta flexível para a solução dos problemas de alocação de água entre os múltiplos usos em diferentes condições. Uma proposta de atualização do SADE é um outro objetivo deste trabalho.

5. RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados e discutidos os resultados para o caso de estudo do SMSF. Os resultados deste trabalho são apresentados da seguinte forma: Inicialmente, é apresentada a análise dos dados, com foco na distribuição espacial dos principais usos consuntivos no SMSF. Com essa análise, em seguida, é apresentada a representação espacial da área de estudo, através de uma rede de nós e links. Posteriormente, são apresentadas as curvas de demanda, obtidas para os usos identificados e, finalmente, é apresentada a análise dos resultados do modelo hidro-econômica.

5.1 ANÁLISE DOS DADOS

Para a identificação e localização das áreas irrigadas no SMSF, foi utilizado o sensoriamento remoto, através de imagens de satélite. A Figura 32 mostra a composição das imagens em um trecho do Sub-Médio do rio São Francisco. Para uma melhor visualização do uso do solo e da vegetação, as bandas 6, 5 e 2 foram utilizadas em uma composição RGB (Red, Green e Blue são as três cores primárias). Em seguida, o contraste foi ajustado para uma melhor visualização.

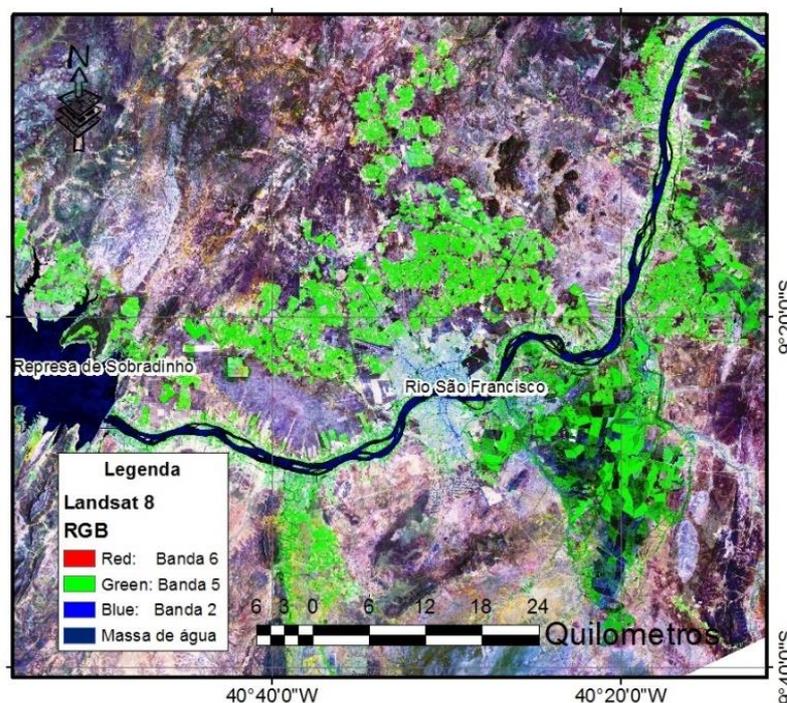


Figura 32 – Composição das imagens de Landsat 8 (bandas 6, 5, 2)

Como a área de estudo está localizada na região semiárida do Nordeste brasileiro, as áreas irrigadas foram facilmente identificadas, pois as áreas irrigadas apresentam uma vegetação

‘muito viva’ na época seca em comparação à vegetação nativa (Caatinga). A Figura 33 mostra o resultado da classificação supervisionada nos perímetros irrigados Nilo Coelho, Salitre, Tourão, Mandacaru e as irrigações ao longo do rio São Francisco a jusante do reservatório Sobradinho.

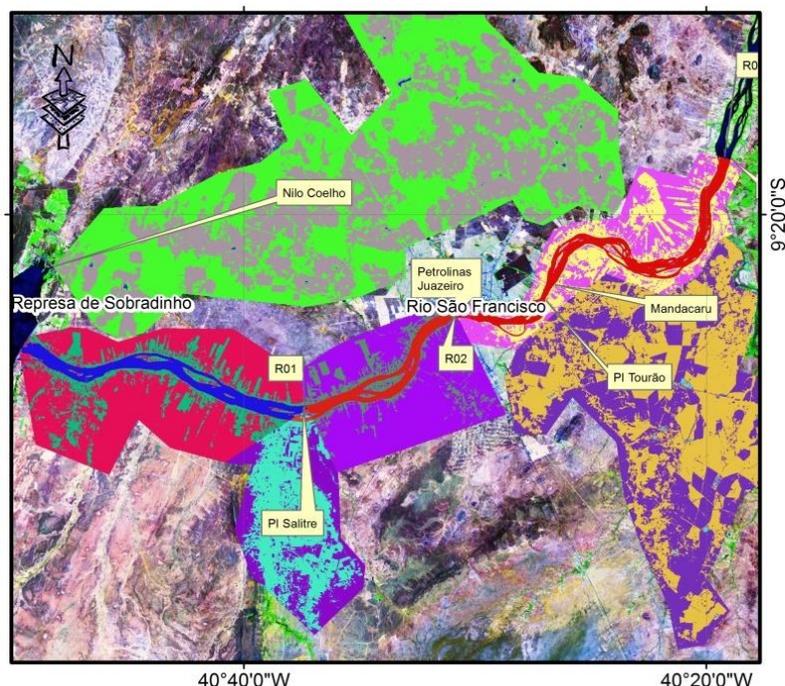


Figura 33 – Classificação da imagem de Landsat 8 em 3 classes: áreas irrigadas, espelhos d’água e outros – a jusante Sobradinho (SILVA, MORAES e SILVA, 2014)

Os resultados quantitativos da classificação das áreas irrigadas nas proximidades do rio São Francisco, principalmente áreas irrigadas por pequenos irrigantes e associações, são apresentados na Tabela 5. Pode ser observado que as áreas plantadas, segundo o levantamento do IBGE (2006-2012), são pouco diferentes das áreas delimitadas utilizando a imagem de satélite, mas bastante superiores aos valores cadastrados como outorgados e que constam no Cadastro Nacional de Usuários de Recursos Hídricos (CNARH), administrado pela Agência Nacional de Água (ANA, 2014a).

Tabela 5 – Comparação de fontes de dados referentes às áreas plantadas (irrigação difusa) em municípios (SILVA, MORAES e SILVA, 2014)

<i>Fonte</i>	<i>Petrolin a- PE</i>	<i>Lagoa Grande - PE</i>	<i>Santa Maria da Boa Vista - PE</i>	<i>Orocó - PE</i>	<i>Cabrobó - PE</i>
<i>CNARH</i>	5.595 ha	1.446 ha	1.154 ha	55 ha	539 ha
<i>IBGE</i>	7.149 ha	4.870 ha	4.174 ha	3.351 ha	3.990 ha
<i>Landsat 8</i>	6.660 ha	3.615 ha	8.839 ha	4.234 ha	6.507 ha

Nas outorgas de uso de água da ANA (2001-2013), constam uma área irrigada de 23.876 ha na área de estudo para os pequenos irrigantes. A área irrigada identificada através do sensoriamento remoto, 55.489 ha (Tabela 6), é quase duas vezes maior do que a área outorgada.

Tabela 6 – Áreas irrigadas por Município identificadas através de sensoriamento remoto (SILVA, MORAES e SILVA, 2014)

Municípios	Área irrig. difusa [ha]	Área em Perímetros [ha]	Total	Uso irrig. difusa em %
Petrolina	6.660	33.262	39.922	17%
Juazeiro	6.853	36.934	43.787	16%
Lagoa Grande	3.615	-	3.615	100%
Santa Maria da Boa	8.839	8.151	16.990	52%
Curaçá	5.106	3.649	8.756	58%
Orocó	4.234	2.390	6.625	64%
Cabrobó	6.507	-	6.507	100%
Abaré	2.396	1.579	3.975	60%
Belém de SF Francisco	7.868	131	7.999	98%
Chorrochó	849	-	849	100%
Rodelas	1.901	2.150	4.050	47%
Soma:	54.827	88.246	143.073	62%

As áreas irrigadas dos perímetros públicos de irrigação, administrados pela CODEVASF, possuem outorgas emitidas pela ANA, que seguem a Resolução N° 461, de 27 de Junho de 2011. A Figura 34 mostra as áreas irrigadas outorgadas e as áreas identificadas através de sensoriamento remoto. Pode ser observado que as áreas irrigadas totais foram maiores do que as registradas no CNARH.

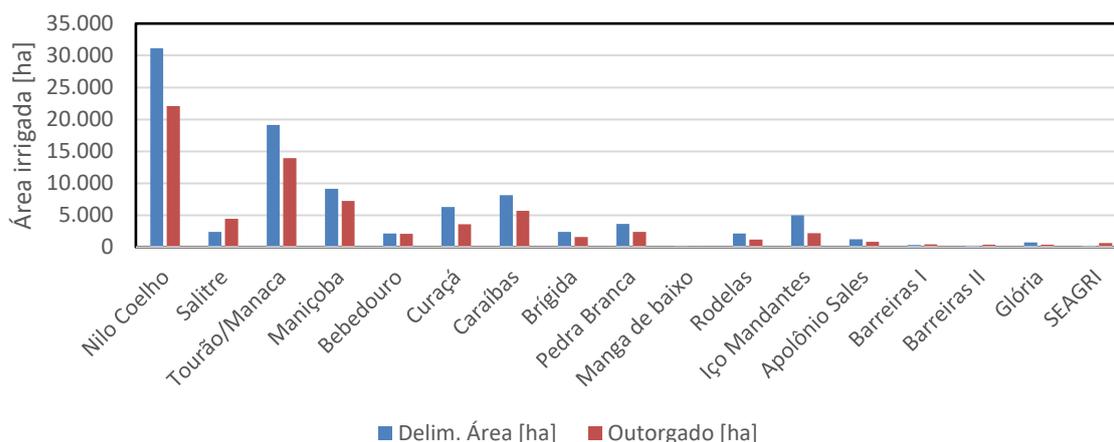


Figura 34 – Áreas outorgadas dos perímetros irrigados e identificadas através de sensoriamento remoto

Alguns perímetros, como o Salitre, estão ainda na fase de implementação, assim foram apenas reservados os direitos de uso de água e as áreas irrigadas são inferiores do que as declaradas. Uma área total de cerca de 25.000 ha está sendo irrigada, além das áreas declaradas no CNARH.

Os resultados do sensoriamento remoto mostram que muitos usuários irrigam mais áreas do que o declarado no CNARH. Isso resulta em retiradas de água em maior quantidade do que o outorgado, as quais podem provocar conflitos entre os usuários e levar a crises de água na região. A aplicação da ferramenta de sensoriamento remoto mostra-se assim uma ferramenta bastante interessante para a validação dos dados utilizados no planejamento dos Recursos Hídricos.

Os principais dados, no cenário atual, referentes a produção agrícola foram provenientes do IBGE (2006-2012) e do sensoriamento remoto, referentes ao abastecimento humano dos municípios vem do SNIS (2012) e referentes ao aproveitamento e produção de energia hidroelétrica provêm do ONS (2014). A análise destes dados é detalhada na seção 5.3.

5.2 REPRESENTAÇÃO ESPACIAL DA ÁREA DE ESTUDO ATRAVÉS DE UMA REDE DE NÓS E LINKS

Usando as informações relativas aos principais usos (ver acima na seção 5.1), foram identificados os principais usuários e a área de estudo pôde ser discretizada, considerando também os principais afluentes do SMSF. A Figura 35 mostra a área de estudo, discretizada através de uma rede de nós e links a ser utilizada na modelagem hidro-econômica, representativa da configuração atual dos usuários. O modelo parte de uma afluência ao reservatório Sobradinho, inclui afluências ao longo do trecho estudado, resultantes das

contribuições dos afluentes (tributários) e do escoamento na própria área de estudo (caixa retangular azul), reservatórios (triangulo azul), seções de rios (bola laranja) e usuários (rombos verdes). A sigla PI representa os perímetros irrigados e a sigla ID representa os irrigantes fora dos perímetros públicos de irrigação, considerados como usuários da irrigação difusa. Os hexágonos, com a letra H, são os aproveitamentos hidroelétricos tipo fio de água²⁵. Os usos de água para irrigação são divididos em perímetros e irrigação difusa, em função dos diferentes dados de produção, metodologias para obter as funções de demanda e das diferentes políticas aplicadas num período de escassez e cobrança.

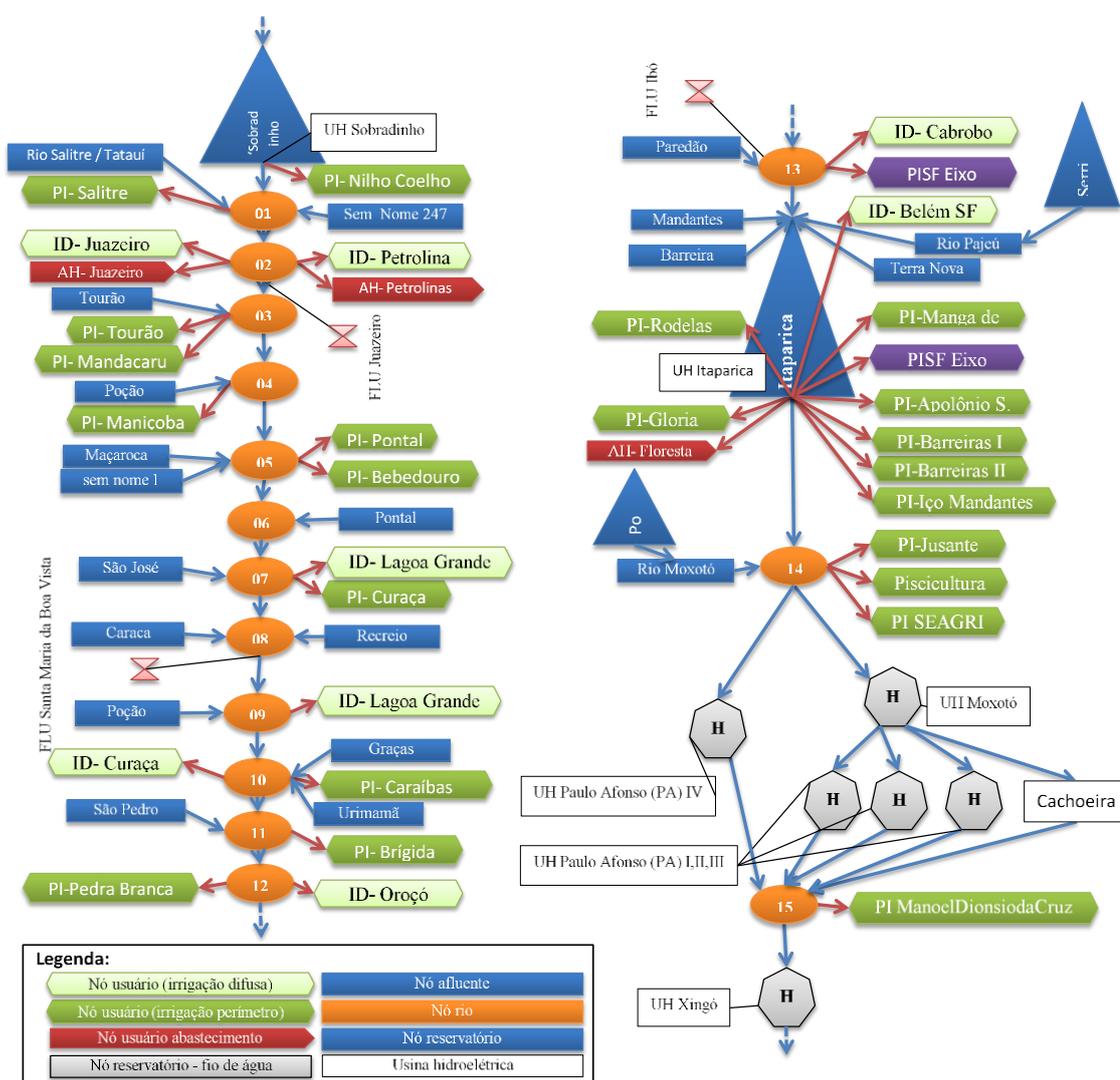


Figura 35 – Discretização da área de estudo com nós e links

²⁵ Reservatórios sem capacidade de armazenamento significativa para regularizar uma vazão

A partir dessa representação (Figura 35), foi construído um modelo de programação matemática para identificar a alocação de água ótima entre diferentes usos, maximizando a função de benefício líquido obtida através da agregação dos benefícios líquidos individuais e minimizando o custo de escassez dos usuários, sujeito a restrições físicas, institucionais e ambientais. Assim, a operação do sistema hidrológico é, na verdade, guiada pelos objetivos socioeconômicos, ao mesmo tempo assegurando restrições, físicas, ambientais e institucionais do uso da água.

5.3 CURVAS DE DEMANDA

As figuras apresentadas, a seguir, mostram as curvas de demanda obtidas para os principais usos no SMSF. As curvas apresentadas representam a demanda anual de água dos usuários para simplificar a visualização. No modelo, foram utilizadas as curvas de demandas mensais dos usuários, que são diferentes ao longo do ano, em função do período chuvoso e do ciclo das culturas.

5.3.1 Irrigação difusa

Nesta seção, buscar-se-á apresentar as etapas referentes à construção das curvas de demanda de água dos usuários da irrigação difusa na área de estudo. Em suma, o processo seguiu a seguinte sequência de atividades: (i) identificação e delimitação das áreas irrigadas utilizando técnicas de geoprocessamento; (ii) aquisição de dados da produção agrícola municipal, através do banco de dados do IBGE; (iii) identificação das culturas plantadas nos perímetros irrigados da CODEVASF usando os seus relatórios; (iv) análise e subtração dos dados dos itens (ii) e (iii) para obter estimativas específicas referentes a produção difusa; (v) cálculo da demanda de água por cultura para cada mês do ano usando os coeficientes técnicos de requerimento da água dados pela (FUNARBE, 2011); (vi) cálculo da demanda de água por ano; (vii) cálculo dos custos (insumos) de produção e custos referentes a alocação de água e tipo de irrigação (tipo de irrigação através uma amostra das outorgas ANA); (viii) cálculo dos benefícios e custos de água no ponto de operação; (ix) determinação da curva de demanda e curva de benefício utilizando a metodologia no capítulo 4.3.1, na página 67, para todos os municípios no SMSF. A tabela abaixo mostra por exemplo, a produção agrícola no município Petrolina no ano 2012, dada pelo IBGE disponibilizado através do Sistema SIDRA (Tabela 7).

Tabela 7 – Produção agrícola no Município Petrolina (ano base 2012) (IBGE, 2006-2012) e nos perímetros Nilo Coelho, Maria Tereza e Bebedouro (CODEVASF, 2006)

Produção Ano	Área colhida [ha] 2012							
	SIDRA		NILO COELHO		MARIA		BEBED.	DIFUSA
Lavoura	total	Valor (Mil Reais)	empr.	família	empr.	fam.	fam.	
Banana (cacho) (Toneladas)	1820	27835	16	725,31	22,8	623,2		432,69
Coco-da-baía (Mil frutos)	1620	13666	469,4	686,91	25,1	71,17		367,42
Goiaba (Toneladas)	2230	85648	78,6	1189,53	58,91	428,2		474,76
Limão (Toneladas)	70	1097	2,5	16,65		1,8		49,05
Mamão (Toneladas)	68	707	3	56,63		47,35	1,9	
Manga (Toneladas)	7900	129020	2431,28	3392,77	449,22	320,2	88,3	1218,23
Maracujá (Toneladas)	200	5528	12,88	16,18	8	37	16,77	109,17
Uva (Toneladas)	4650	352122	1575,55	1441,91	713,66	300,68	192,99	425,21
Acerola			14,56	1084,35	1	146,6	11,2	
Batata-doce (Toneladas)	30	293		2,5		4,50		23
Cana-de-açúcar (Toneladas)	75	372						75
Cebola (Toneladas)	80	2351		5,1		7,50	3,00	64,4
Feijão (em grão)	80	312		146,9		132,20	161,93	
Mamona (baga) (Toneladas)	0	0						0
Mandioca (Toneladas)	235	1210	2	116,64	4,00	68,79	2,00	41,57
Melancia (Toneladas)	180	1097		37,3	1,00	9,30	79,50	52,9
Melão (Toneladas)	65	1047	2	21,2	6,00	1,00		34,8
Milho (em grão) (Toneladas)	0	0	12	109,5		50,80	71,70	
Sorgo (em grão) (Toneladas)	0	0						
Tomate (Toneladas)	60	2532		12,6	4,00	3,20		40,2
Abobora				49,5	1,00	103,95		

Para calcular os custos referentes à alocação de água (bombeamento), foram utilizados os valores associados ao tipo de irrigação e a demanda de água em m³ por área irrigada (MAROUELLI e SILVA, 2011). Uma amostragem dos tipos de irrigação foi extraída das outorgas concedidas pela ANA nos últimos anos. A Tabela 8 mostra por exemplo, as percentagens dos métodos de irrigação no município de Petrolina. Deve ser considerado que muitos pequenos usuários não são obrigados a requerer outorga e utilizam métodos menos eficientes, que não foram considerados. Para as áreas irrigadas delimitadas e não outorgadas foi considerado o método de aspersão convencional.

Tabela 8 – Método de irrigação (Fonte: (ANA, 2001-2013))

Outorga 2012-2013	%
Micro-aspersão	21
Gotejamento	29
Aspersão	50
Sulco	5
Pivo central	4

Para a demanda de água, para os usuários da irrigação difusa, foi utilizada uma elasticidade-preço de $\eta=0,48$ (SCHEIERLING, LOOMIS e YOUNG, 2006). Usando os dados levantados (ver Tabela 7 (IBGE, 2006-2012)) e os custos e benefícios determinados para cada uso, foram estabelecidas as curvas de demanda (equação (4)), utilizando o *solver*, no software Mathcad, empregando o método não-linear de Levenberg-Marquardt. Esse método é uma variante do método de quase-Newton, para determinar o valor de contorno C_2 . O *solver* tenta encontrar o valor zero (critério da convergência), ou na pior das hipóteses, minimizar a soma dos erros ao quadrado nas restrições. Em seguida, o valor C_1 da função (7) foi determinado.

Nesta seção, para exemplificar o processo, apenas os resultados da irrigação difusa de Petrolina são detalhados, as outras curvas obtidas são apresentadas sem maiores detalhes.

A demanda de água anual para irrigação difusa, no município de Petrolina, é de $Q = 63.071$ Mil m^3 /ano, com um benefício de 60.031 Mil R\$/ano. A integração da função (4) com a substituição de C_1 , para obter os benefícios no ponto da operação, pode ser observada na equação (31):

$$\text{Benefício} = \frac{P_{\text{agua}} \cdot \eta \cdot \left[C_2^{\frac{\eta+1}{\eta}} - (C_2 - Q)^{\frac{1}{\eta} \cdot (\eta+1)} \right]}{(\eta + 1) \cdot (C_2 - Q)^{\frac{1}{\eta}}} \quad (31)$$

Para este problema não linear, o *solver* encontrou uma solução para C_2 igual a 74.476 Mil m^3 . Para o critério de convergência foi estabelecido um valor menor do que 0,001 Mil R\$, para todos os problemas o *solver* encontrou uma solução com esta precisão. O valor C_1 foi determinado utilizando a equação (32):

$$C_1 := \ln \left[\frac{P_{\text{agua}}}{(C_2 - Q)^{\frac{1}{\eta}}} \right] \quad (32)$$

No caso da irrigação difusa, no município Petrolina, o valor de C_1 é igual -21,753. A Figura 36 mostra a curva de demanda para a irrigação, no município Petrolina.

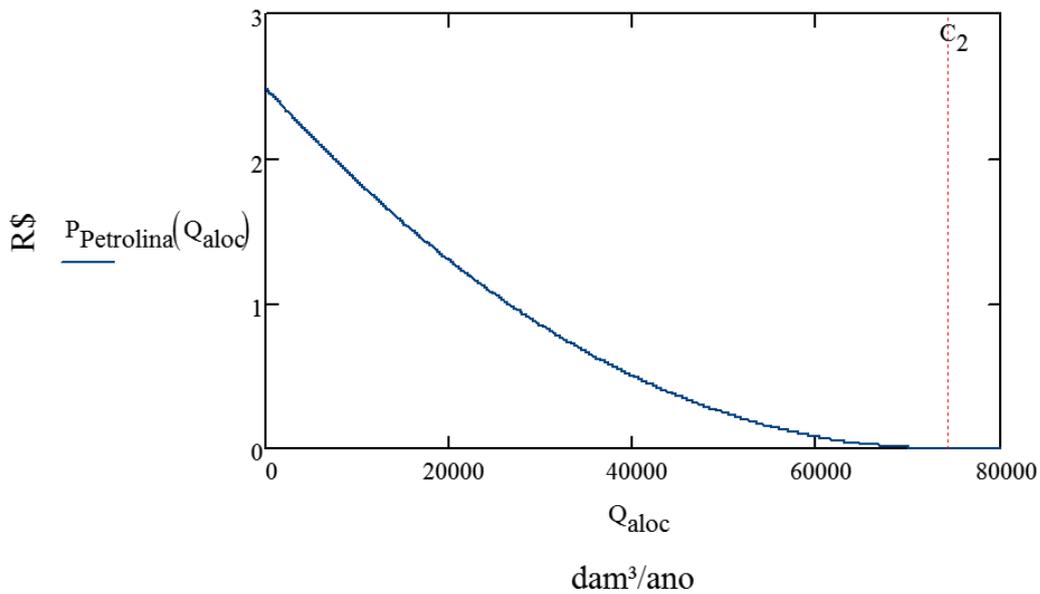


Figura 36 – Curva de demanda – irrigação difusa Petrolina

Curvas para outras elasticidades podem ser observadas na Figura 37. A figura mostra as curvas de demanda com a alteração da elasticidade-preço no intervalo de 0 a 2 para a irrigação difusa do município de Petrolina.

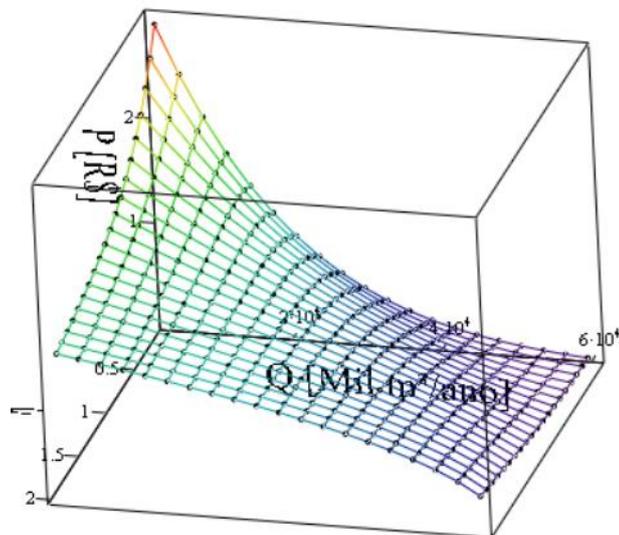


Figura 37 – Curva de demanda irrigação Petrolina para elasticidade-preço 0 a 2

O benefício bruto referente à alocação de água foi obtido através da equação (6) e a curva está apresentada na Figura 38:

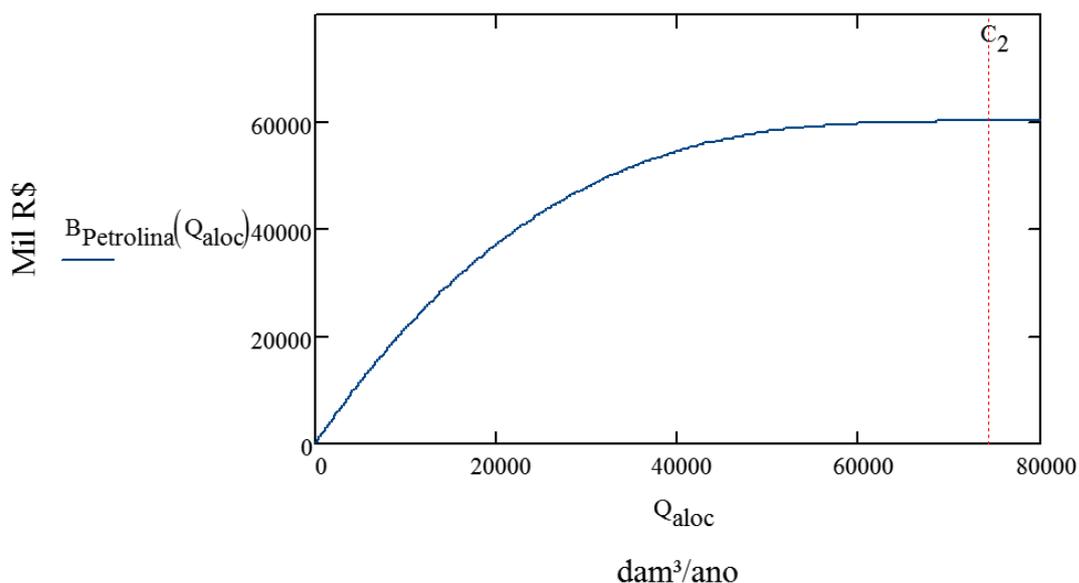


Figura 38 – Curva de benefício para irrigação difusa de Petrolina

As curvas de demanda, dos principais municípios (existem vários municípios sem atividade agrícola significativa ou sem dados), são apresentadas na Figura 39.

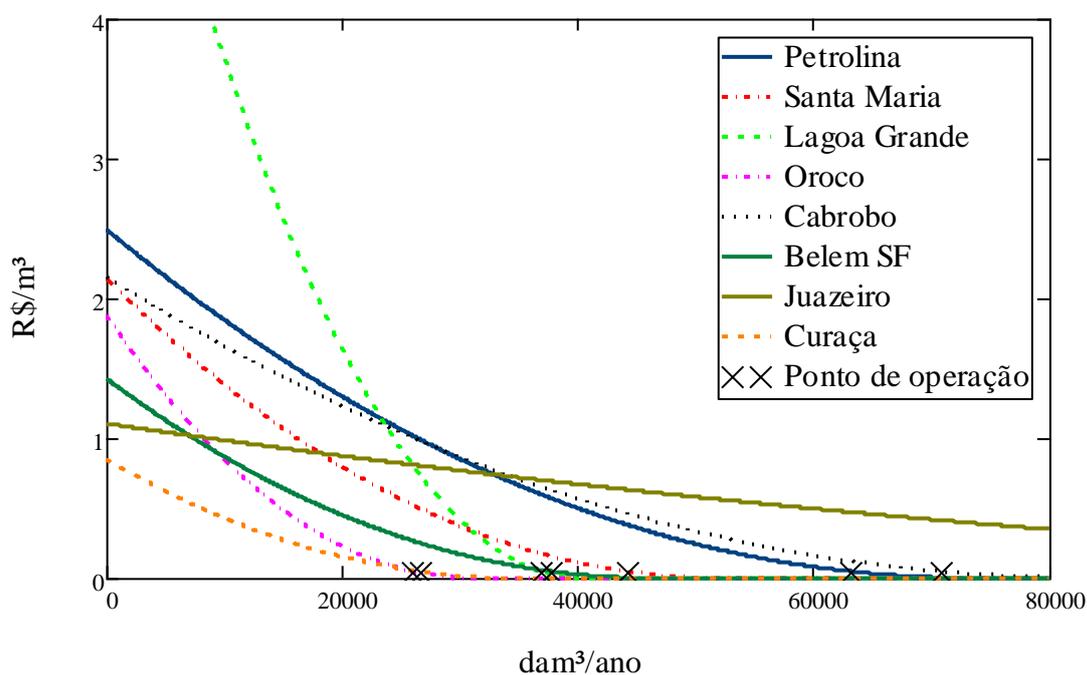


Figura 39 – Curvas de demanda para várias irrigações difusas nos municípios obtidas com o método de expansão de ponto

As diferenças nas curvas de demanda entre os municípios podem ser explicadas, principalmente, pelo *mix* de culturas diferentes. Por exemplo, no município Lagoa Grande, a cultura dominante é a Uva (1.260 ha) que tem um benefício muito mais elevado, com menos quantidade de água demandada, em comparação a outras culturas como a Manga (270 ha). No

outro extremo, no município Juazeiro, a Manga é uma das culturas mais plantadas (3.376 ha) e a uva é menos explorada (761 ha).

Os benefícios referentes à atividade agrícola difusa nos municípios, empregando a equação (6), podem ser observados na Figura 40. Valores acima do ponto C2 são assumidos constantes para uma melhor visualização.

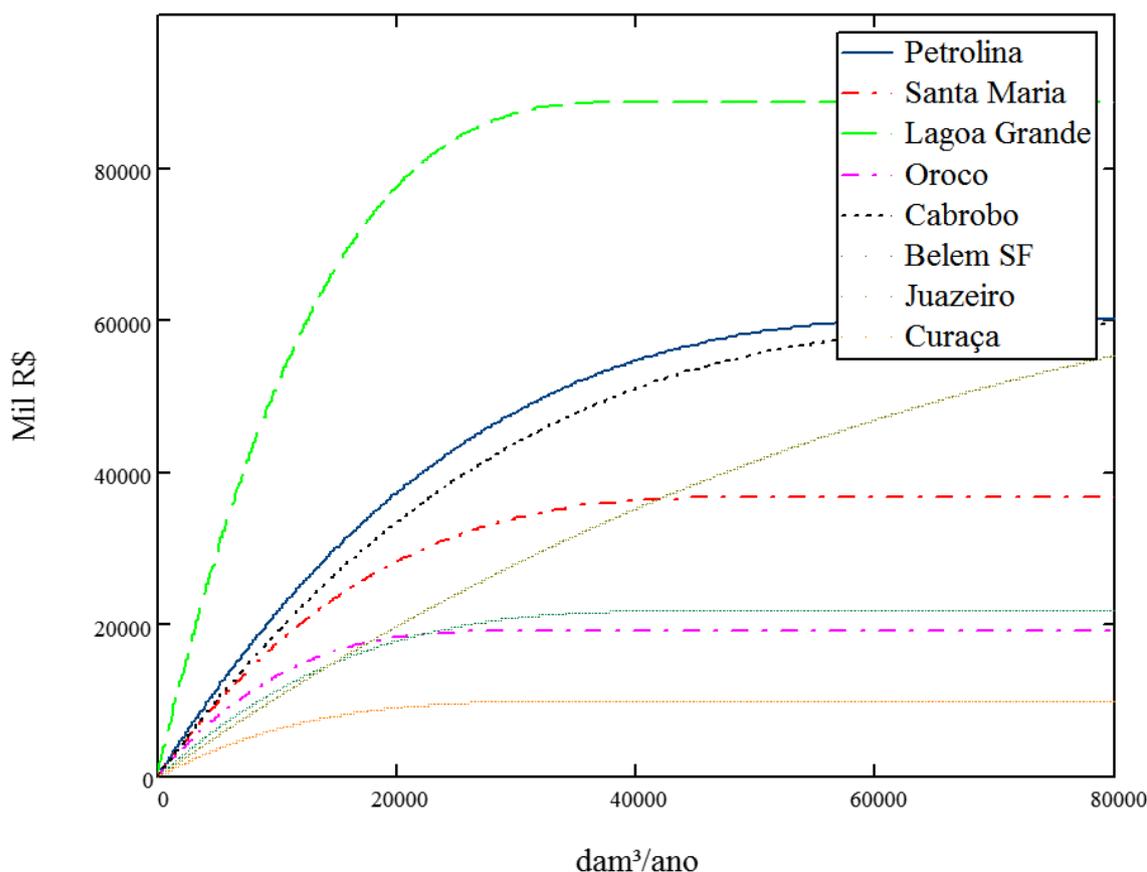


Figura 40 – Curvas de benefício da irrigação difusa

Observou-se que as curvas de demanda obtidas com o método de expansão de ponto são bem diferentes das curvas dos perímetros públicos, obtidas com o método PMP (no mesmo município) a ser descritas na seção 5.3.3, em toda a faixa de disponibilidade (de 100 a 60%). Como já mencionado, o método PMP não utiliza uma elasticidade-preço fixa como no método de expansão de ponto, o que deve distorcer a estimativa das curvas de demanda e a consequente alocação no modelo hidro-econômico, podendo favorecer ou não um usuário, numa certa quantidade alocada. Além disso, a incerteza sobre dados no ponto de operação, utilizado no método ponto-expansão, pode influenciar os resultados na modelagem hidro-econômica. Portanto, foi aplicado o PMP, também, para a irrigação difusa, utilizando os dados dos municípios e descontando os valores dos perímetros irrigados, conforme a distribuição obtida

e mostrada na (Tabela 6). A Figura 41 mostra o valor econômico da água para a irrigação difusa nos municípios, obtidas com o método PMP para as diferentes disponibilidades de água percentuais.

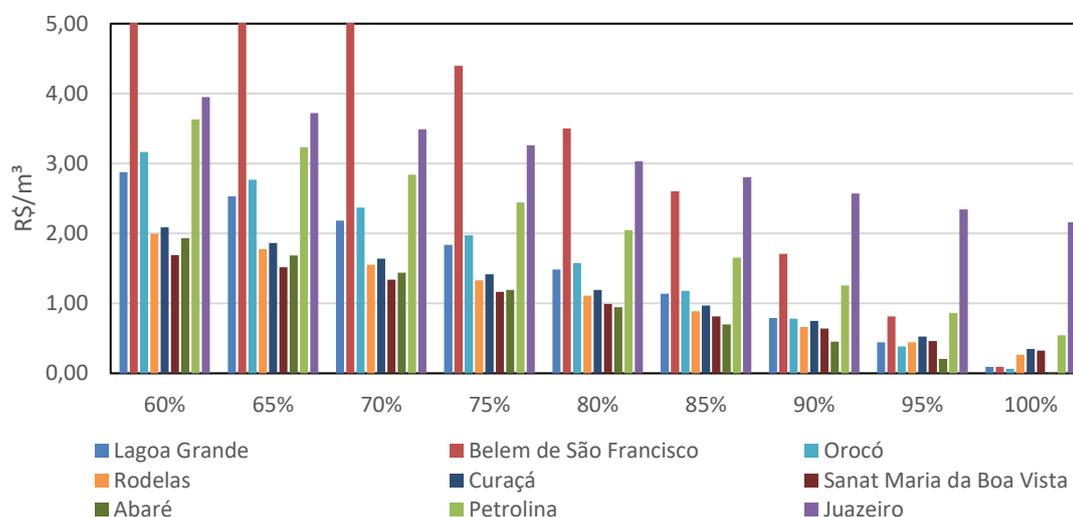


Figura 41 – Valor econômico da água para os usuários da irrigação difusa nos diversos municípios do SMSF para alocações de 60 a 100% (PMP)

Observou-se que em alguns municípios, como Juazeiro e Petrolina, o valor econômico obtido com PMP foi mais elevado no ponto de operação (100%), em relação ao método de ponto-expansão. Provavelmente, estes valores podem ter sido influenciados pela presença de grandes perímetros públicos nestes municípios. Mesmo descontando-se as áreas e as culturas dos perímetros públicos, alguns dados, como por exemplo o uso dos diversos fatores de produção requeridos pelo PMP, eram agregados por municípios, o que incluía aqueles associados aos usuários ao longo do rio ou dentro dos perímetros públicos.

Nos cenários de mudanças de uso de solo estimados pelo MAgPIE, as mesmas curvas para a irrigação difusa obtidas com o PMP foram mantidas, assumindo que as alterações nos padrões de uso de solo vão ocorrer apenas nos grandes perímetros irrigados. Nas margens do rio São Francisco, onde são localizadas, principalmente, as áreas da irrigação difusa, a expansão é limitada e o uso difere. Por exemplo, cana-de-açúcar é muitas vezes cultivada em escalas maiores pelas usinas, o que limita a aplicação dos resultados do uso de solo de MAgPIE para a irrigação difusa.

5.3.2 Abastecimento humano

5.3.2.1 *Baseline*

As curvas de demanda para abastecimento dos municípios no SMSF, foram determinadas utilizando as informações do Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2012). A Tabela 9 mostra valores referentes ao abastecimento nos municípios no estado de Pernambuco, utilizando como ano de referência 2012.

Tabela 9 – Dados abastecimento municipal no estado de Pernambuco (SNIS, 2012)

Município	G12A - População total com abastecimento de água (Habitantes)	AG007 - Volume de água tratada em ETAs (1.000 m ³ /ano)	AG011 - Volume de água faturado (1.000 m ³ /ano)	IN003_AE - Despesa total com os serviços por m ³ faturado (R\$/m ³)	IN004_AE - Tarifa média praticada (R\$/m ³)
Belém de São Francisco	20,260	1254	669	0.6	2.84
Cabrobó	31,497	2230	1104	6.57	2.5
Floresta	29,973	1999	1082	1.82	2.99
Itacuruba	4,475	330	219	0.13	0.12
Jatobá	14,087	1569	595	1.31	2.93
Lagoa Grande	23,308	1381	534	1.54	2.2
Orocó	13,536	412	233	2.08	2.36
Petrolândia	33,273	2461	1200	0.96	2.99
Petrolina	305,352	21363	11812	1.13	2.66
Santa Maria da Boa Vista	39,816	1552	712	1.15	2.4
TOTAL:	515,577	34,551.16	18,160.59		

Para o abastecimento humano, foi adotada a metodologia de expansão de ponto. A elasticidade-preço de $\eta=0.46$ foi utilizada para obter as curvas do abastecimento nos municípios (DALHUISEN, FLORAX, *et al.*, 2001). O maior município, em termos de habitantes e de demanda de água, é Petrolina, cuja curva de demanda é apresentada na Figura 42.

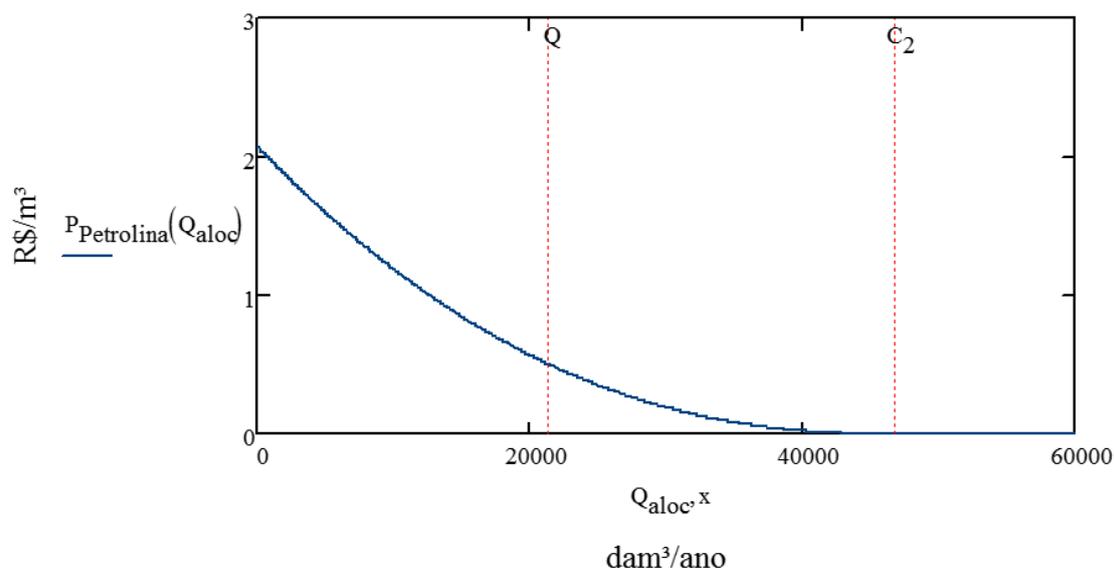


Figura 42 – Curva de demanda abastecimento humano no município Petrolina (anual)

Para visualizar o efeito da elasticidade-preço, a Figura 43 mostra a curva de demanda para elasticidades-preço, no intervalo de 0 a 2, para o abastecimento do município Petrolina.

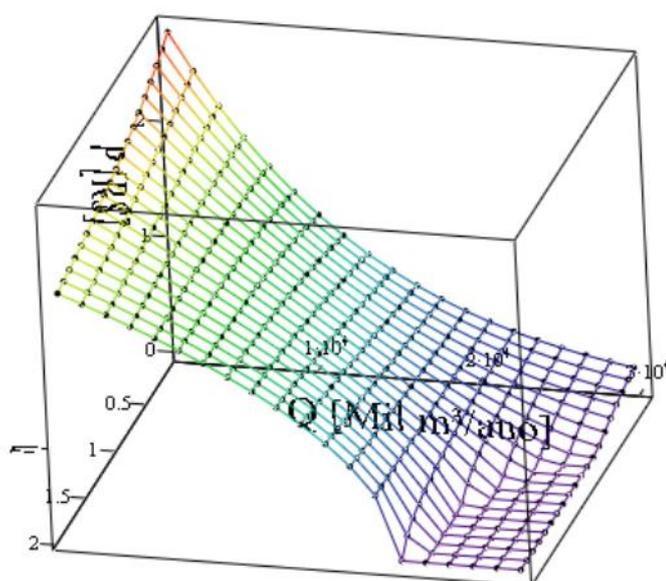


Figura 43 – Curva de demanda abastecimento de Petrolina para elasticidade-preço 0 a 2

As demais curvas de demanda, para os municípios no estado de Pernambuco, podem ser observadas na Figura 44. As curvas representam as demandas mensais dos municípios, no cenário *Baseline*, que são iguais entre os meses. O abastecimento, nos municípios Itacuruba e Cabrobó, tem despesas maiores do que os benefícios, assim nenhuma curva pode ser estabelecida.

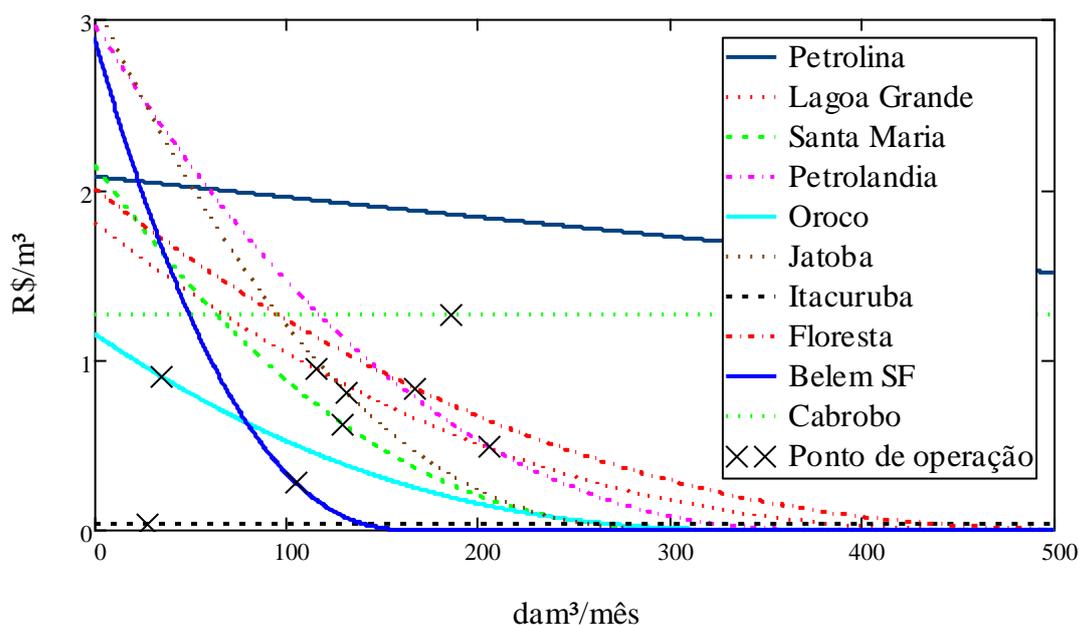


Figura 44 – Curvas de demanda mensais do abastecimento municipal no estado de Pernambuco

Os benefícios referentes à alocação de água para todos os municípios no estado de Pernambuco podem ser observados na Figura 45.

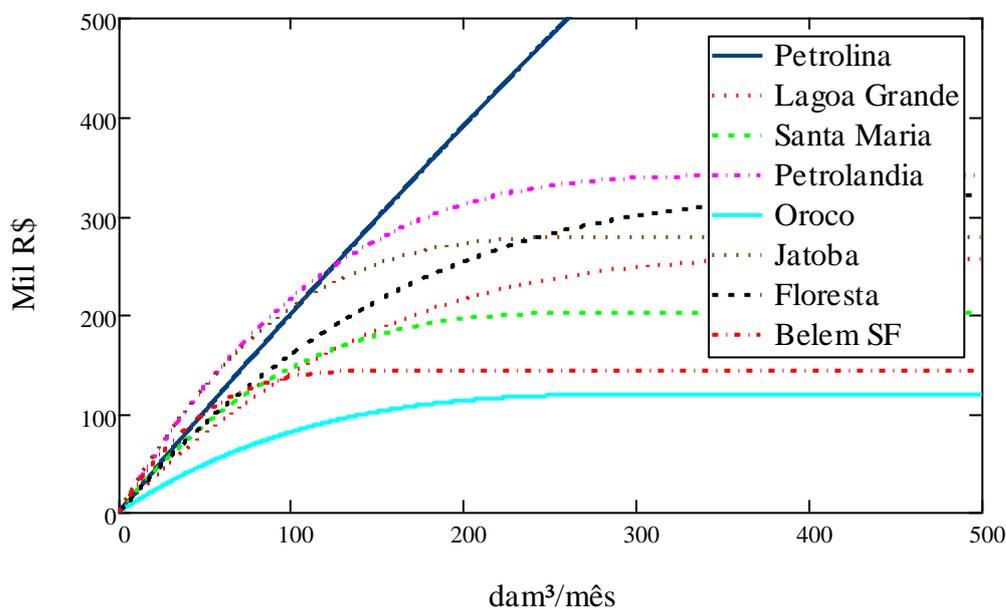


Figura 45 – Curvas de benefício mensais do abastecimento no estado Pernambuco

A Tabela 10 mostra valores referentes ao abastecimento, nos municípios do estado da Bahia, utilizando como ano de referência 2012. No estado da Bahia, poucas informações referentes ao abastecimento foram encontradas.

Tabela 10 – Dados abastecimento municipal no estado da Bahia (SNIS, 2012)

Município	G12A - População total com abastecimento de água (Habitantes)	AG007 - Volume de água tratada em ETAs (1.000 m ³ /ano)	AG011 - Volume de água faturado (1.000 m ³ /ano)	IN003 - Despesa total com os serviços por m ³ faturado (R\$/m ³)	IN004 - Tarifa média praticada (R\$/m ³)
Curaçá	32631	898.00	1004.00	0.92	0.93
Juazeiro	201499	18923.00	7786.00	1.41	1.73
Sobradinho	22109	1345.90	1260.91	0.50	0.65

Apenas o município de Juazeiro possui dados consistentes para calcular as funções de demanda. Uma inconsistência, por exemplo, pode ser observada nos dados do município Curaçá, onde a quantidade faturada (AG011) é maior do que a água tratada (AG007). A Figura 46 mostra a curva de demanda para o abastecimento do município de Juazeiro.

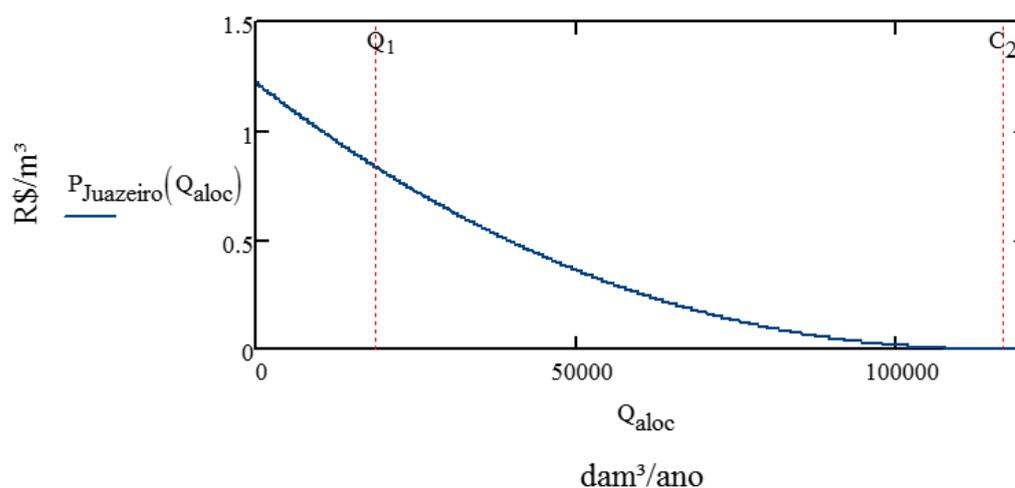


Figura 46 – Curva de demanda anual do abastecimento no município Juazeiro -BA

5.3.2.2 Abastecimento humano - Cenário A2

A família do cenário A2 baseia-se no elevado crescimento populacional (LUTZ, 1996; apud IPCC, 2013). Entre 2010 e 2030, é projetado um crescimento de 85% da população para América Latina (ALM - A2 ASF), sendo que nos países em desenvolvimento, a maior parte do crescimento ocorre nos centros urbanos (IPCC, 2013). Para obter as curvas de demanda futuras, foram utilizadas como base as mesmas proporções das características atuais (tais como despesas e receitas) dos sistemas de distribuição nos municípios, como descrito acima. Segundo ABES

(2013), uma pequena diminuição das perdas foi observada nos últimos anos²⁶. Considerando um desenvolvimento tecnológico lento e crescimento rápido da população nos municípios, foi considerada uma diminuição das perdas de 10% para o ano 2035. A Figura 47 mostra as curvas de demanda para o abastecimento nos municípios no SMSF²⁷ para o cenário A2.

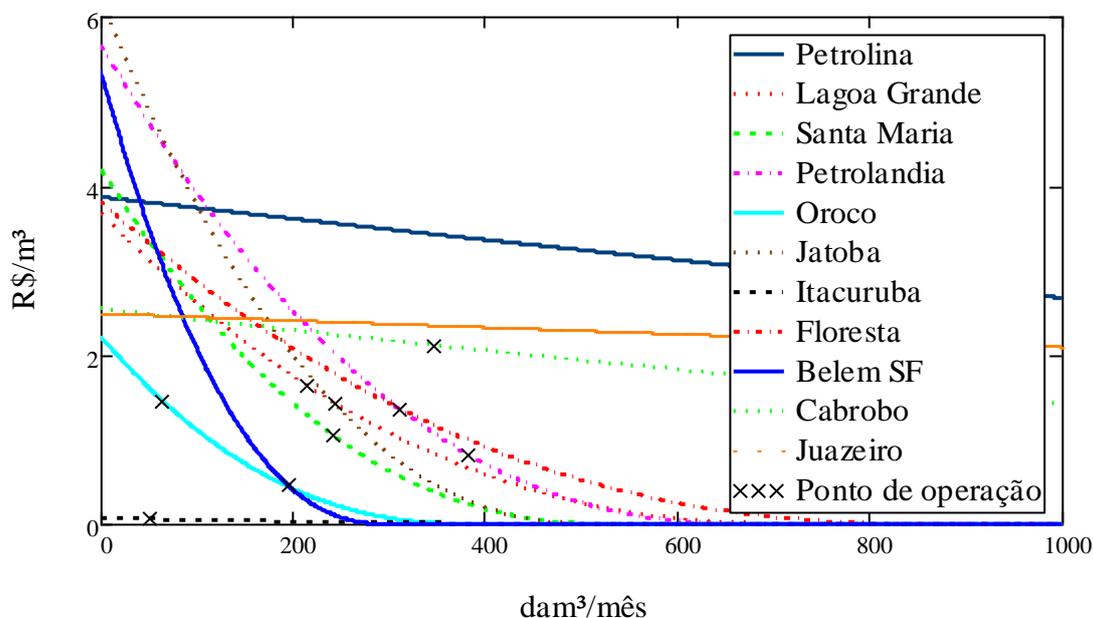


Figura 47 – Curvas de demanda abastecimento humano cenário A2

5.3.2.3 Abastecimento humano - Cenário B1

As projeções do cenário B1 mostram um crescimento menor da população em relação ao cenário A2. Segundo IPCC (2013), o crescimento para o ano 2030 é de 33,8 % para a região de América Latina (ALM - B1 ASF). Foram utilizadas as mesmas condições como adotado no cenário A2, exceto pela taxa menor do crescimento populacional. A Figura 48 mostra as curvas de demanda do abastecimento humano dos municípios no cenário B1.

²⁶ Queda de 6,8% das perdas nos sistemas de distribuição no Brasil durante o período de 2004 a 2011

²⁷ Municípios com dados disponíveis e consistentes no Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento (SNIS, 2012)

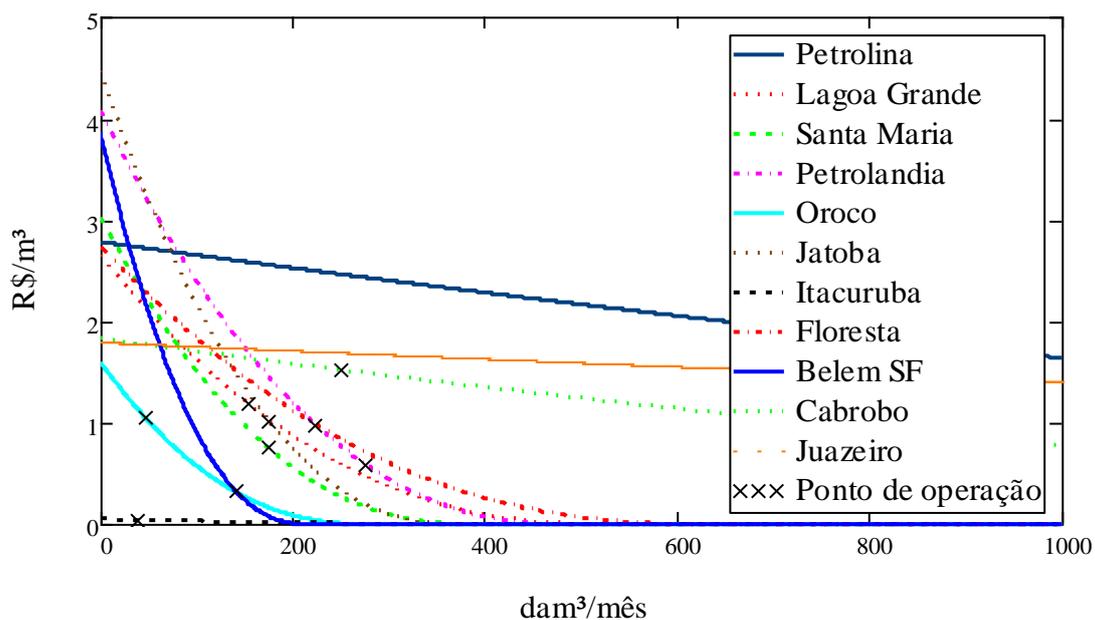


Figura 48 – Curvas de demanda abastecimento humano cenário B1

5.3.2.4 *Baseline sem perdas nos sistemas de distribuição*

Para avaliar os custos das perdas nos sistemas de abastecimento dos municípios, foram também geradas curvas de demanda, onde foram eliminadas as perdas da distribuição. É simulada neste cenário, uma eliminação nas perdas dos usuários de abastecimento humano do SMSF. Neste cenário, as curvas de demanda são alteradas considerando o abastecimento dos municípios sem perdas. A Figura 49 mostra as curvas no cenário *Baseline*, sem perdas nos sistemas de distribuição, podendo-se observar a diminuição da demanda junto com um crescimento do valor de água.

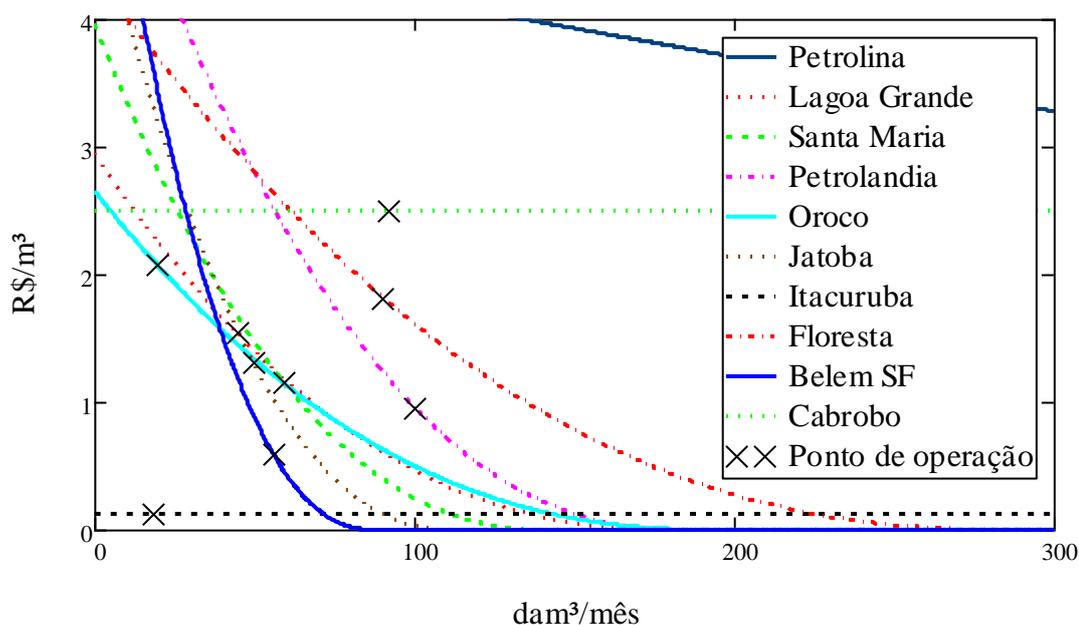


Figura 49 – Curvas de demanda mensais do abastecimento nos municípios sem perdas

5.3.3 Perímetros irrigados

Os valores econômicos da água referentes a disponibilidade de água entre 100% e 60% da disponibilidade atual foram obtidas com o método de Programação Matemática Positiva (FIGUEIREDO, 2014; SILVA, FIGUEIREDO e MORAES, 2015; MORAES, CARNEIRO, *et al.*, 2016) para os perímetros públicos de irrigação. A elaboração de curvas de demanda, no cenário *Baseline* (ano 2006) e nos cenários A2 e B1 (ano 2035), para esses usuários, utilizou, além das áreas irrigadas, estimativas de outros fatores de produção para cada tipo de cultivo irrigado. A maioria desses valores foram obtidos por município e associados a cada perímetro, utilizando a equivalência entre eles, conforme demonstrado na Tabela 6, na página 108.

5.3.3.1 Perímetros irrigados - *Baseline*

Foram obtidas as curvas de demanda, no cenário *Baseline*, utilizando os dados da produção agrícola dos perímetros irrigados, em 2006, e os custos/benefícios relacionados em cada perímetro (IBGE, 2006-2012). A Figura 50 mostra o valor econômico da água para os perímetros irrigados no cenário *Baseline* (2006). Os valores são agrupados em disponibilidades de água na faixa de 100% a 60%, num intervalo de 5%.

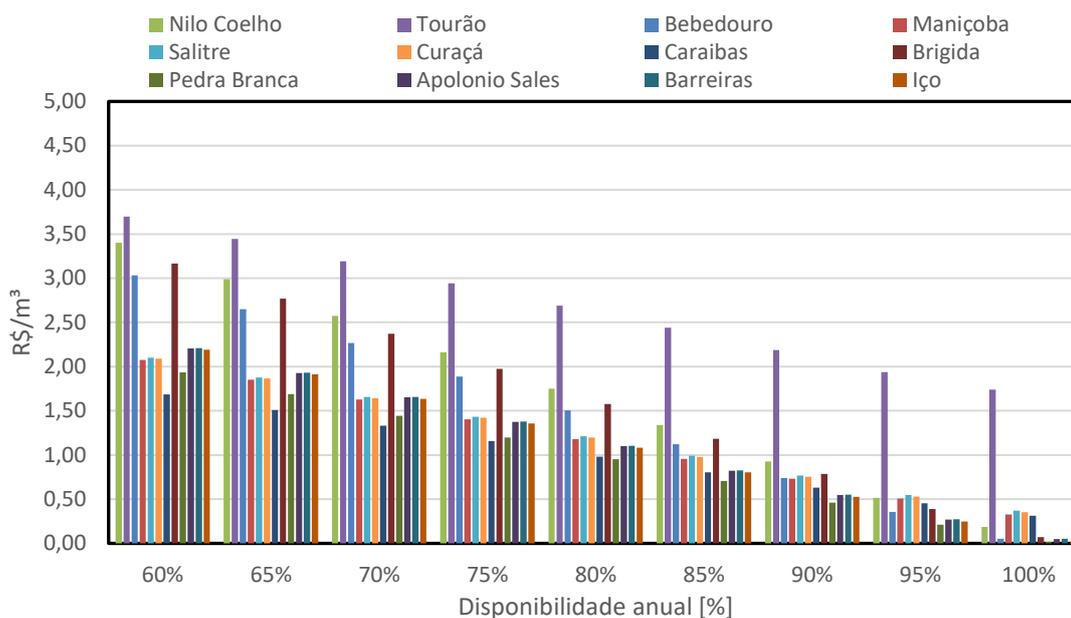


Figura 50 – Valor econômico da água para os perímetros irrigado no cenário *Baseline* (2006)

Observa-se um valor mais elevado nas disponibilidades (100% a 60%) para o perímetro irrigado de Tourão, que tem como principal cultura a cana-de-açúcar. Os menores valores econômicos foram encontrados para os perímetros localizados no complexo de Itaparica.

As curvas de demanda foram aproximadas, a partir dos valores obtidos no PMP, utilizando uma regressão polinomial (ver equação (33)), empregando o método de Levenberg-Marquardt para a minimização da soma dos quadrados dos resíduos, a partir dos valores econômicos da água, sendo Q a quantidade de água alocada em Mil m³.

$$P(Q) = \sum_{k=0}^4 a_k Q^k \quad (33)$$

Para calcular o custo de escassez dos perímetros irrigados, no modelo hidro-econômico, é utilizado o excedente bruto entre a quantidade alocada e a demanda total, através da integração das curvas de demanda, obtidas empregando regressão polinomial. Os benefícios/custos são obtidos com a equação (34), sendo Q a quantidade de água alocada em Mil m³:

$$C(Q) = \int_{Q_{aloc}}^{Q_{100}} P(Q) dQ \quad (34)$$

5.3.3.2 Perímetros irrigados - Cenário A2

A projeção do MAgPIE, no cenário A2, mostra um aumento das áreas irrigadas no SMSF e um acréscimo de cana-de-açúcar no uso de solo, o que se reflete nos valores econômicos da água

dos perímetros irrigados. A Figura 51 mostra o valor econômico da água para os perímetros irrigados existentes, no cenário A2 com mudanças climáticas²⁸. Os valores foram agrupados em disponibilidades de água na faixa de 100% a 60%.

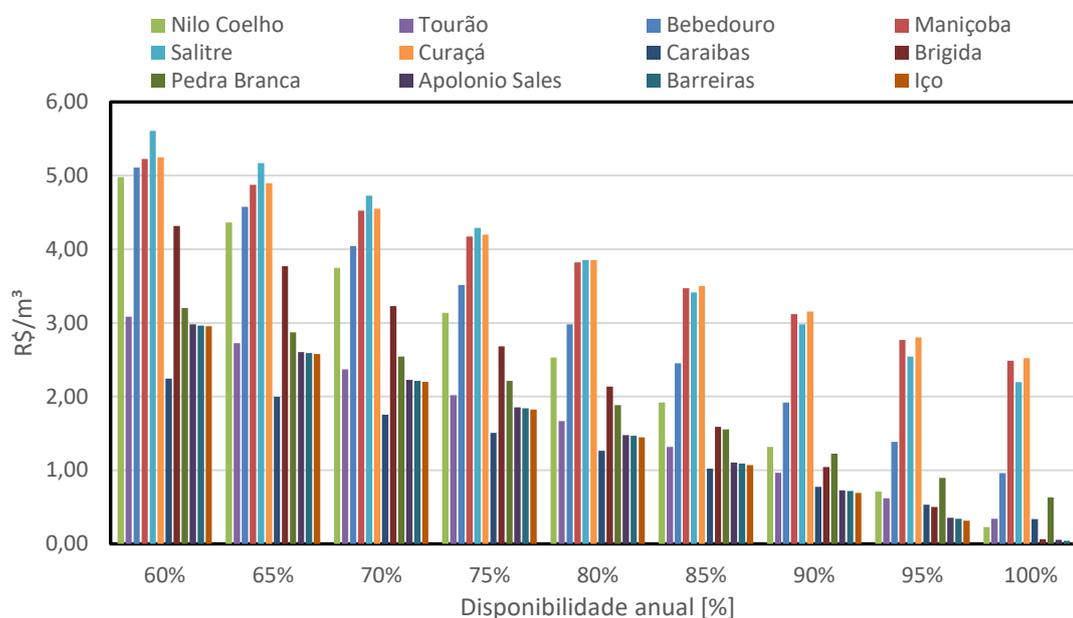


Figura 51 – Valor econômico da água para os perímetros irrigados existentes no cenário A2

Na comparação entre as curvas de demanda no cenário A2 (sob mudanças do uso de solo e clima) e no cenário *Baseline* (2006), dos perímetros existentes atualmente, observa-se que as curvas de demanda indicam maior valor econômico para todas as quantidades de água no futuro em relação ao cenário *Baseline* (ver, por exemplo, o perímetro Maniçoba e Curaçá na Figura 50 e Figura 51).

Os valores econômicos, obtidos para os novos perímetros no cenário A2, podem ser observados na Figura 52. Observa-se valores mais elevados, principalmente, para o perímetro Sertão Pernambucano para todas quantidades de água alocadas, provavelmente, devido à taxa de crescimento dos custos de produção no futuro.

²⁸ Modelos de Circulação Geral: MPI ECHAM5, MIUB ECHO-G e UKMO HADCM3, utilizado no MAGPIE

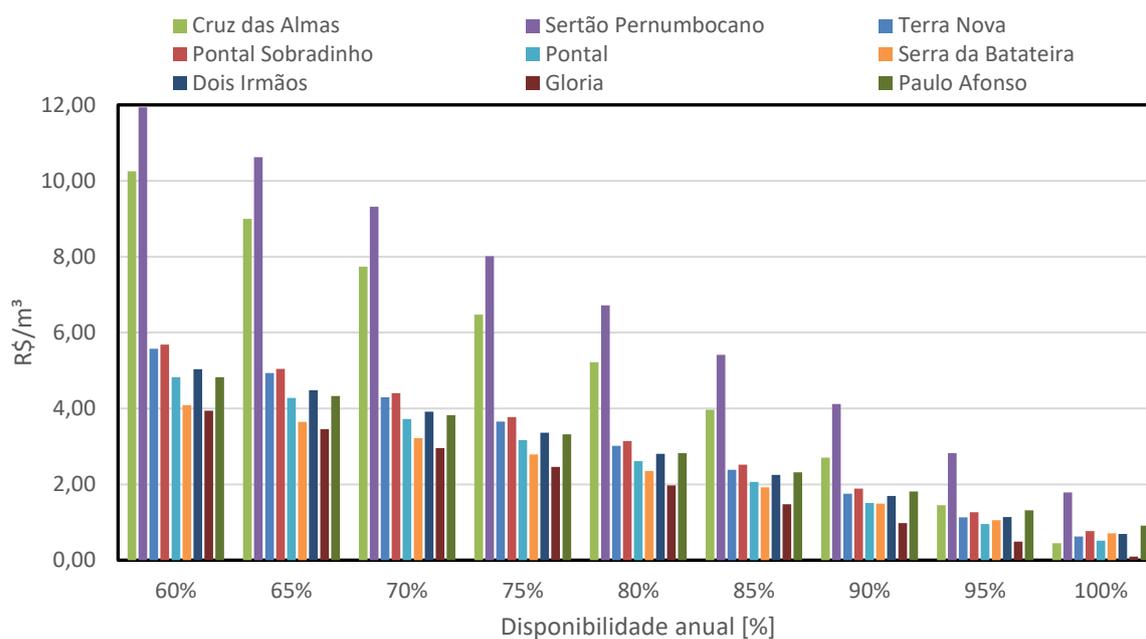


Figura 52 – Valor econômico da água para os perímetros irrigados futuros no cenário A2

5.3.3.3 Perímetros irrigados - Cenário B1

A projeção do cenário B1, que representa a Consciência global, possui menos expansão das áreas para irrigação e menos cana-de-açúcar em relação ao cenário A2. Os valores econômicos de água dos perímetros irrigados, sob o cenário B1, podem ser observados, na Figura 53, para várias disponibilidades de água.

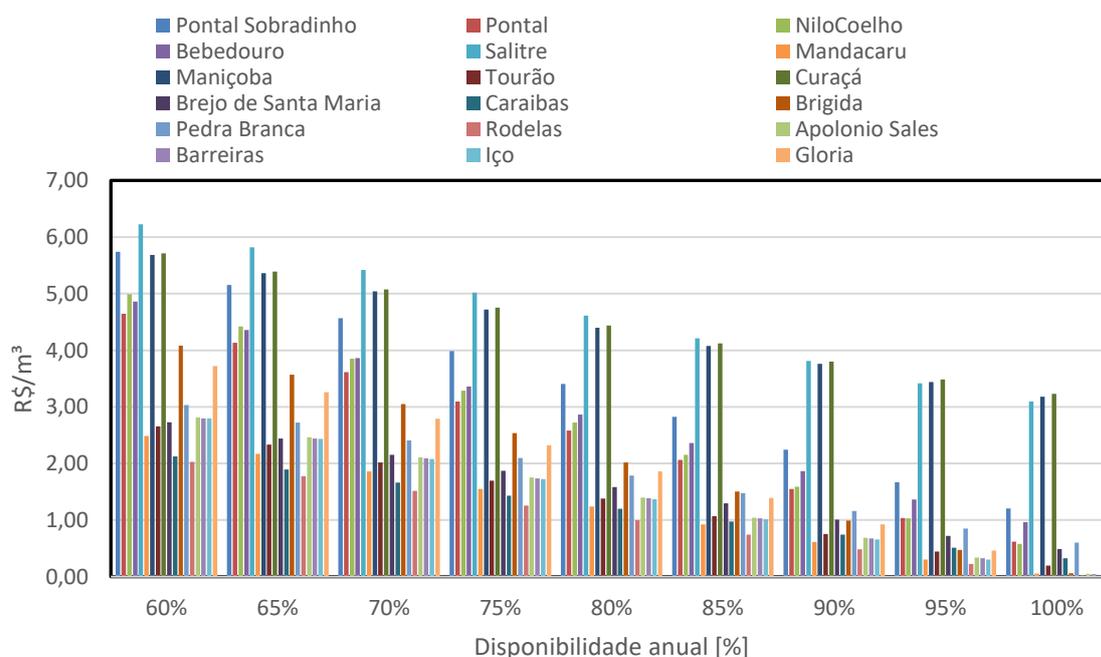


Figura 53 – Valor econômico da água para os perímetros irrigados no cenário B1 com mudanças climáticas

5.3.4 Hidroeletricidade

A produção de energia nas hidroelétricas é um uso não consuntivo de água; no entanto, os custos/ benefícios são obtidos com o manejo do reservatório (perdas por evaporação do reservatório, altura de água, vazão efluente e disponibilidade de água a jusante). A demanda, os benefícios e os preços estão diretamente relacionados à produção de energia e ao mercado de energia. Os preços da energia tendem a ser um reflexo do período de tempo e reagem a fatores como períodos de seca, um cenário geopolítico global que afeta o preço do petróleo, ou mesmo a política econômica interna do país. Atualmente, não existe um mercado competitivo para a produção de energia nas barragens hidrelétricas no SMSF, porque os contratos e leis governamentais asseguram pagamentos, simplesmente, por fornecer a capacidade de produção de energia das barragens hidrelétricas geridas pela CHESF (BRASIL, 2013; BRASIL, 2015). Portanto, neste estudo foram utilizados valores de PLD (Preço de Liquidação das Diferenças), que representam o montante a ser pago por energia de curto prazo. Por exemplo, a parcela que a empresa não produziu, conforme estabelecido no contrato, deve ser obtida no mercado SPOT, ou gerada como excesso para ser vendido no referido mercado para outras empresas, que talvez tenham gerado um montante abaixo do que foi fixado em seus contratos. No entanto, estes preços não incluem excedentes / déficits ao longo dos anos para a empresa (CHESF). A Figura 54 mostra um diagrama de dispersão comparando o volume armazenado no reservatório de Sobradinho e os valores PLD de 2003 a 2016 para o Nordeste do Brasil. O armazenamento do reservatório de Sobradinho apresenta uma aproximação razoável para os períodos de seca e os correspondentes aumentos dos preços da energia no Nordeste. Os preços tendem a aumentar com o menor armazenamento de água no reservatório.

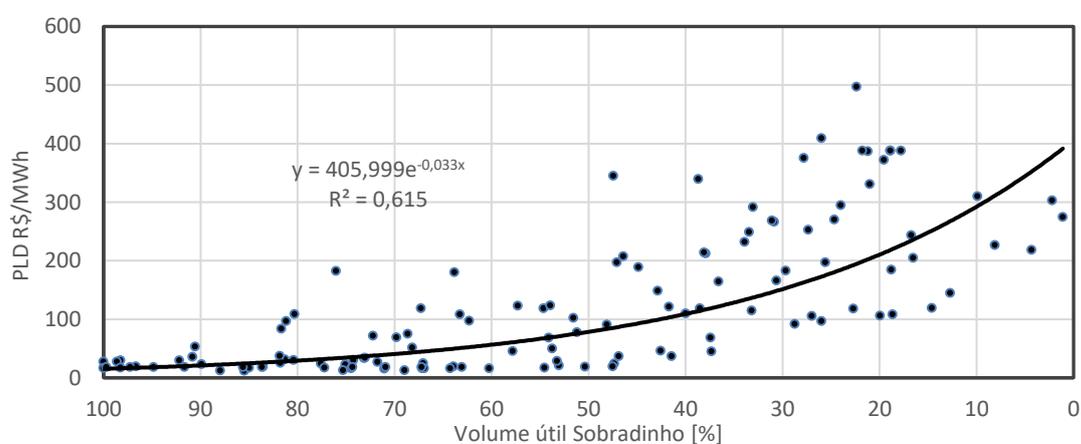


Figura 54 – Valores PLD para o Nordeste do Brasil e regressão exponencial

Foram utilizados, também, valores econômicos de armazenamento nos reservatórios obtidos com modelos de otimização, estocásticas segundo a metodologia descrita na seção 2.2.3. Os resultados do modelo hidro-econômico com esses valores mostraram que a inclusão de um valor econômico de armazenamento na função objetivo resulta em um aumento constante do nível dos reservatórios. Ou seja, além da elevação da produção de energia, através do aumento da carga hidráulica, um benefício adicional é gerado com um volume maior armazenado, atuando como um incentivo ao uso das hidrelétricas. O volume armazenado no reservatório é uma variável de decisão no modelo de otimização, que é operado dentro do modelo. O mesmo é otimizado durante o período de simulação, considerando a distribuição estocástica da vazão afluente e os usos. Por isso, ele não pode ser diretamente utilizado para determinar valores econômicos de armazenamento e/ou o valor PLD, por exemplo, para maximizar o benefício das hidroelétricas, o sistema poderia criar uma seca artificialmente (esvaziar reservatório) para aumentar o preço de energia. Dessa forma, foi utilizada a vazão afluente para o reservatório Sobradinho, calculada através do modelo SWIM para determinar o PLD.

A vazão afluente representa uma função sazonal estocástica, com as flutuações mensais aleatórias e atraso da resposta do PLD. Uma Análise de Defasagens Distribuídas (*Distributed Lags Analysis*) do PLD e a vazão mostra um coeficiente de determinação (R^2) igual ao 0,5769 utilizando os últimos 3 anos da vazão afluente ($N=36$), confirmando a existência de uma correlação linear entre a vazão afluente e o PLD. Entretanto, a regressão linear não foi muito útil, na prática, para o modelo de otimização, pois a função pode gerar valores negativos para valores elevados de vazão e inconsistentes nos primeiros 3 anos. Por isso, foi utilizada uma função exponencial para a regressão, utilizando a média móvel dos últimos 12 meses da vazão e o PLD. Além disso, foram excluídos casos extremos, como valores de PLD muito baixos, durante períodos com afluência baixa. A Figura 55 mostra a distribuição da vazão afluente e o PLD. A regressão dos dados suavizados, utilizando uma função exponencial, mostra um coeficiente de determinação razoável ($R^2=0,56$).

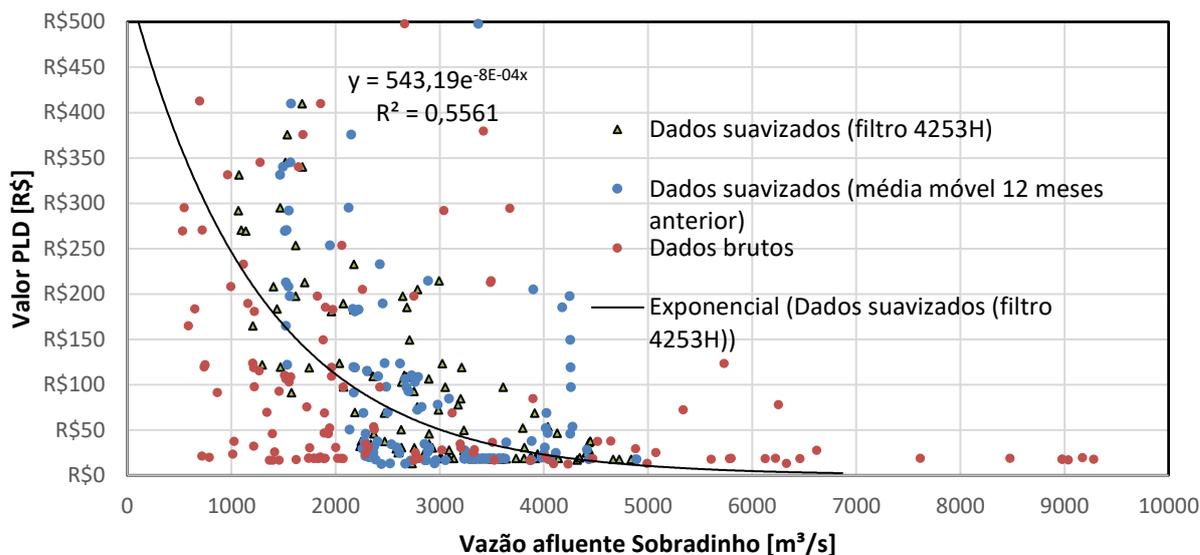


Figura 55 – Gráfico de dispersão com processamento de dados e regressão exponencial Vazão/PLD

Assim, o valor econômico, em função da disponibilidade, é indiretamente considerado no modelo hidro-econômico, ou seja, o valor da água aumenta durante períodos de menor disponibilidade e diminui durante períodos com maior disponibilidade, dando um valor econômico para a transferência da água no tempo, utilizando o armazenamento dos reservatórios no SMSF. Apesar disso não apresenta diretamente uma curva de demanda (como nos usos consuntivos), que pode ser utilizado como uma variável de decisão para a alocação de água para o uso de hidroeletricidade. O modelo hidro-econômico maximiza os benefícios deste uso durante o período de simulação, dando um valor de água maior durante períodos de escassez.

5.3.5 Projeto de integração do Rio São Francisco Projeto (PISF)

As obras do projeto de integração do Rio São Francisco (PISF) estão, atualmente, na fase final. Para obter as curvas de demanda relativas a este uso, foi utilizado o método de expansão de ponto, com estimativas aproximadas dos custos e benefícios associados. Para o cenário *Baseline*, que representa a situação atual, a vazão mínima estabelecida na outorga dada pela ANA (ANA, 2005a) foi utilizada como demanda hídrica apenas para o abastecimento humano. No cenário A2 (fragmentação), a capacidade máxima admissível no mesmo documento de outorga para os dois eixos foi utilizada com benefícios resultantes associados ao abastecimento humano e a agricultura irrigada. E no cenário B1, a vazão média dos dois eixos foi utilizada com benefícios também associados a esses dois usos. Para os cálculos dos benefícios, foram usadas estimativas, baseadas em dados da bacia doadora (IBGE, 2006-2012), tais como mix de

culturas e valor da produção. Estes valores para os usuários irrigantes observados na bacia hidrográfica do São Francisco, são dados na Tabela 7. A partir desses dados e também dos relativos ao uso da água, associada a produção, obteve-se a razão dada na Tabela 11, para alguns municípios no SMSF.

Tabela 11 – Benefícios líquidos usuários irrigação

Município	Benefício líquido/m³
Petrolina	0,95 R\$/m ³
Cabrobó	0,83 R\$/m ³
Santa Maria	0,83 R\$/m ³
Oroço	0,69 R\$/m ³

Assim, para os usos da agricultura irrigada na bacia receptora, adotou-se um valor médio de 0,86 R\$/m³ como benefício. Para os usos de abastecimento, foram utilizados os valores do SNIS (2012) dos municípios nas bacias receptoras com uma receita positiva. A média encontrada foi de 0,91 R\$/m³.

Referente aos custos, foram consideradas as tarifas de referência (disponibilidade e consumo) para a prestação do serviço de adução de água bruta do PISF (ANA, 2016e). A estimativa da ANA/CODEVASF utiliza um valor de R\$ 174,82/MWh de energia elétrica, proveniente de projeções para 2017 para o submercado Nordeste, que resultou numa tarifa de 0,204 R\$/m³ para a disponibilidade (custo fixo) e 0,303 R\$/m³ para o consumo (custo variável). As perdas do PISF já foram consideradas nestes valores acima. Entretanto, os valores não contêm os custos da adução para o abastecimento dos municípios na bacia receptora. Neste trabalho, foi utilizado um valor de 0,05 R\$/m³ para adução de água bruta, igual ao valor adotado para abastecimento humano. Esse valor é próximo do valor de 0,03 R\$/m³ proposto por Kelman e Ramos (2005), utilizando a operação dos sistemas da COGERH no Ceará.

5.3.5.1 PISF - Baseline

Os custos da transposição utilizam a retirada contínua de 26,4 m³/s, ou seja, 10 m³/s para eixo o leste e 16,4 m³/s para o eixo norte. Neste caso, o benefício de água para o Eixo Leste é de 0,91 R\$/m³ x 10 m³/s = 286.977.600 R\$/ano, com custos iguais a 0,557 R\$/m³. Para o Eixo Norte, o benefício adotado foi de 0,91 R\$/m³ x 16,4 m³/s = 470.643.264 R\$/ano, com os mesmos custos, como no Eixo Leste. A Figura 56 mostra as curvas de demanda para os dois eixos no cenário *Baseline*.

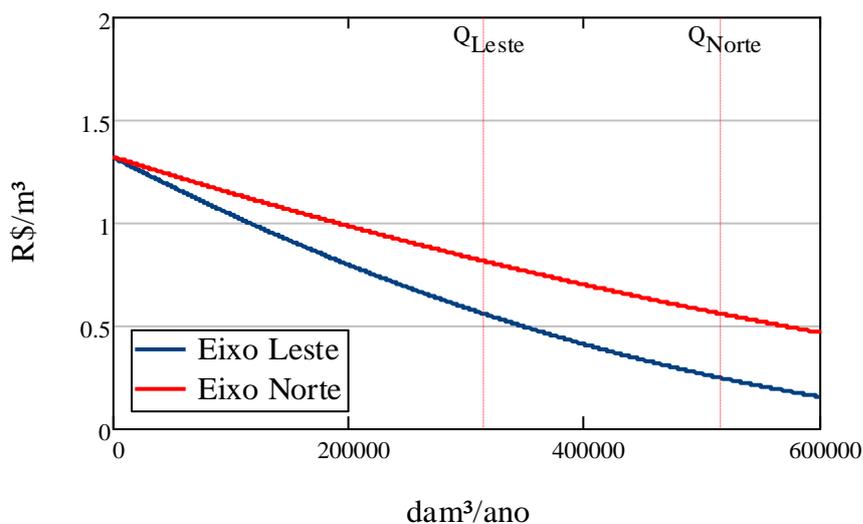


Figura 56 – Curva de demanda PISF no cenário Baseline

5.3.5.2 PISF - Cenário A2

A vazão máxima do Eixo Norte é de 99 m³/s, considerando que todas as bombas ficam ligadas 21 horas por dia (fora do horário de pico do consumo energético e máximo operacional admissível²⁹), resultando num bombeamento médio diário de 86 m³/s. Para o Eixo Leste, a vazão máxima prevista é de 28 m³/s, considerando as mesmas limitações, resultando num bombeamento médio diário de 24 m³/s. Ressaltando que, os limites estabelecidos na outorga da ANA podem ser alterados no futuro, principalmente, no contexto das premissas adotadas no cenário A2. A Figura 57 mostra as curvas de demanda do PISF, no cenário A2.

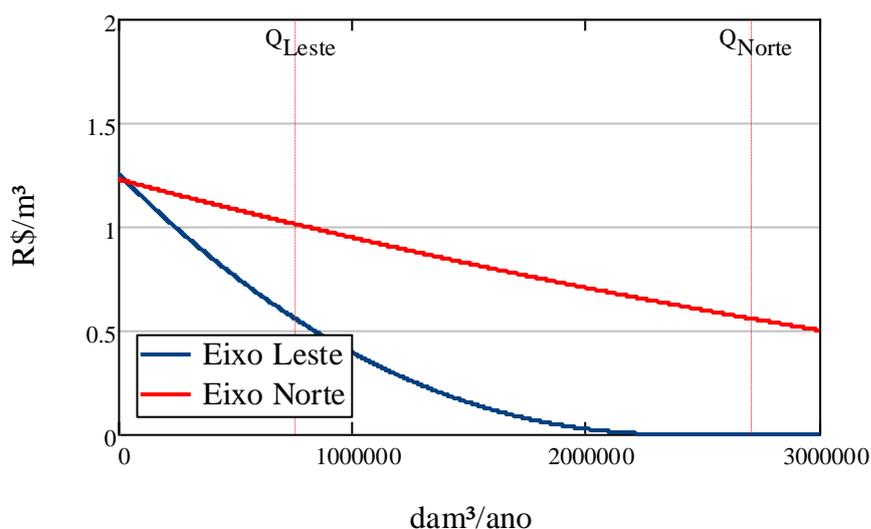


Figura 57 – Curva de demanda PISF no cenário A2

²⁹ Vazão máxima só será acionada quando o reservatório de Sobradinho estiver acima do armazenamento de 94% do volume útil ou acima do volume de espera para controle de cheia (ANA, 2005a).

5.3.5.3 PISF - Cenário B1

No cenário B1, uma vazão média mensal de 57,5 m³/s foi adotada para o Eixo Norte e uma vazão média mensal de 19 m³/s foi adotada para o Eixo Leste. Sendo as vazões mínimas usadas para abastecimento humano e o restante para irrigação. Considerando esses custos e benefícios, o método de expansão de ponto resultou na seguinte curva de demanda (Figura 58).

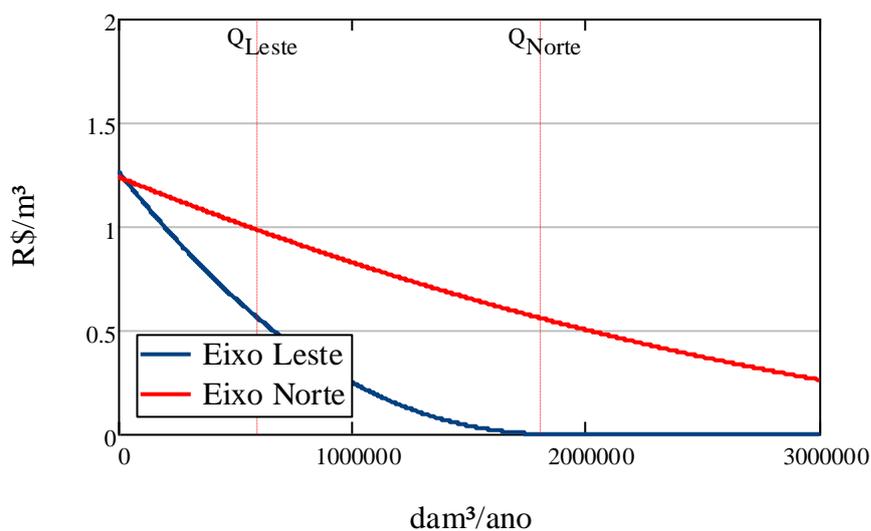


Figura 58 – Curva de demanda PISF no cenário B1

Todas as curvas obtidas nesta seção, foram, em seguida, utilizadas no modelo hidro-econômico desenvolvido para a região hidrográfica do SMSF. Análises de sensibilidade relativas aos parâmetros dessas curvas utilizadas, quando da obtenção da solução ótima, são importantes para a tomada de decisões e avaliação de políticas de água, e, portanto, recomenda-se em estudos futuros a análise detalhada, por exemplo, da alteração da tarifa para o PISF e os impactos no modelo hidro-econômico.

5.4 ANÁLISE HIDRO-ECONÔMICA

O modelo hidro-econômico integrado foi aplicado para cenários presentes e futuros. O problema não-linear foi resolvido usando o software GAMS e empregando o solver Conopt3. Toda estrutura do modelo em GAMS foi criada a partir de uma representação no banco de dados, por exemplo, a alteração de um nó no banco de dados cria um novo modelo automaticamente, sem necessidade de alterar o código em GAMS. Alguns parâmetros podem ser modificados dentro do modelo, dentre eles o intervalo a ser simulado e algumas restrições (limites superiores e inferiores) tais como valores iniciais ou finais dos reservatórios. Não foram adicionados pesos ou fator de escala para diferenciar os benefícios ou custos dos usos.

menor disponibilidade hídrica. O benefício bruto da produção de energia no período de 7 anos foi de R\$ 17,263 bilhões (Sobradinho e Itaparica) e R\$ 52,119 bilhões de Moxotó, Paulo Afonso e do complexo Xingó. A energia média gerada no modelo de otimização, em todas as usinas no SMSF, foi de 4082 MW neste período.

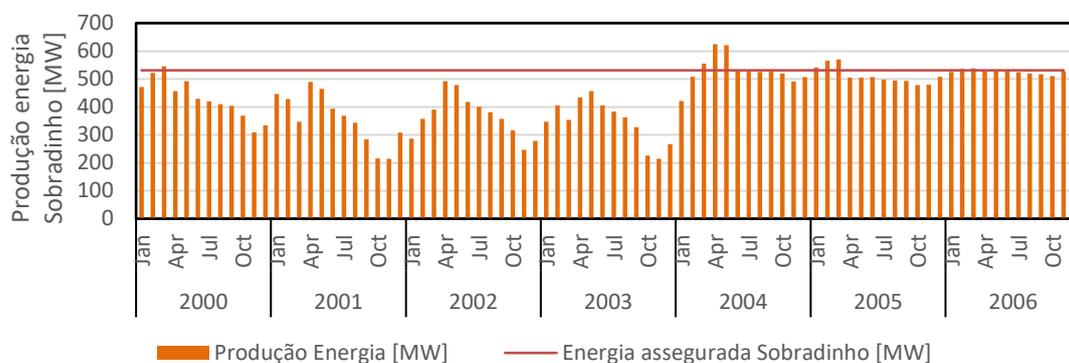


Figura 60 – Produção de energia e energia assegurada usina Sobradinho

A Figura 61 mostra a alocação de água para os usos consuntivos, onde pode-se observar uma diminuição da alocação da água para o abastecimento humano de Belém de São Francisco, dado que restrições de prioridade no abastecimento humano não foram consideradas nesse cenário de referência. Entretanto, os outros municípios têm quase 100% alocada durante o período. Os custos de escassez do abastecimento para os municípios são neste cenário apenas R\$ 236 Mil.

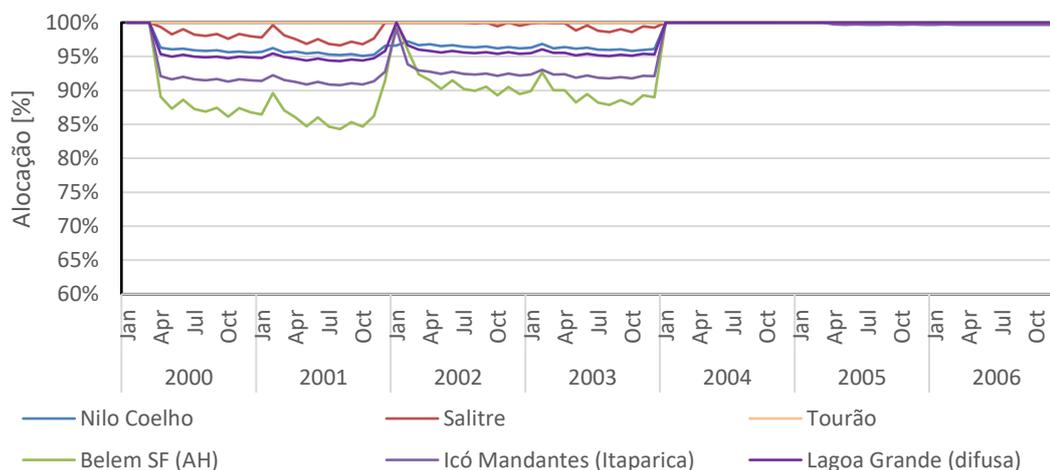


Figura 61 – Resultado otimização - Alocação de água durante o período de 2000 - 2006 – perímetros irrigados, irrigação difusa, abastecimento humano

A Figura 61 mostra também a alocação de água para os perímetros de irrigação Nilo Coelho, Salitre, Tourão e Icó Mandantes, que também é reduzida no período de menor disponibilidade hídrica. Em períodos com maior disponibilidade de água, a alocação foi aumentada para os perímetros de irrigação. O custo total de escassez dos projetos públicos de irrigação foi de R\$

27,158 milhões. Alguns irrigantes difusos, nas margens do rio agregados por município, também receberam menos água durante períodos mais secos, os custos de escassez são de R\$ 3,508 milhões. A alocação média para todos os perímetros foi 33,3 m³/s, para irrigação difusa 18,64 m³/s no SMSF e para o abastecimento 1,68 m³/s. No modelo SWIM, foi considerada uma demanda média anual de 65,41 m³/s a montante de Sobradinho. A Figura 62 mostra a alocação da água ranqueada de maior para menor valor, observa-se que muitos perímetros (PI), irrigação (IDif) e abastecimento (sem prefixo) obtiveram em geral toda água demandada alocada.

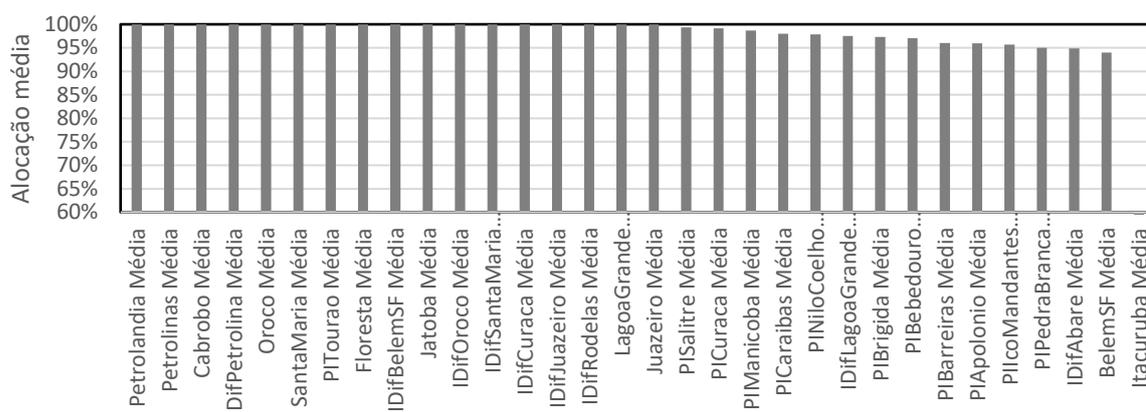


Figura 62 – Alocação média para os usos consuntivos no cenário Baseline (Referência)

5.4.1.2 Baseline - Regras operacionais/ restrições ambientais

Os resultados, a seguir, mostram o efeito das alterações de regras operacionais ou restrições na alocação econômica ótima, comparando os resultados com a referência descrita no item anterior. Nos cenários do abastecimento sem perdas e com prioridade do abastecimento humano, não foi incluído o usuário PISF. Nos demais cenários, foi incluído o usuário PISF utilizando a curva de demanda estimada para a transposição. Deve-se ressaltar que os cenários que incluíram o PISF, são comparados com o cenário de referência também com PISF. Ressalta-se também que custos de escassez baixos no cenário de referência podem resultar em variações altas. Por exemplo, neste cenário onde o custo de escassez para transposição foi zero (100% alocação para o PISF), a mudança em relação à referência não pode ser expressa em percentuais.

A restrição que prioriza o abastecimento humano, quando introduzida, alterou pouco a alocação para os outros usos (menor do que 1%), lembrando que na referência a maioria dos municípios já tinha quase 100% da sua demanda atendida (ver Figura 63). O impacto também é, relativamente, pequeno porque a demanda de água para abastecimento humano é menor em ordem de grandeza em relação aos outros usos.

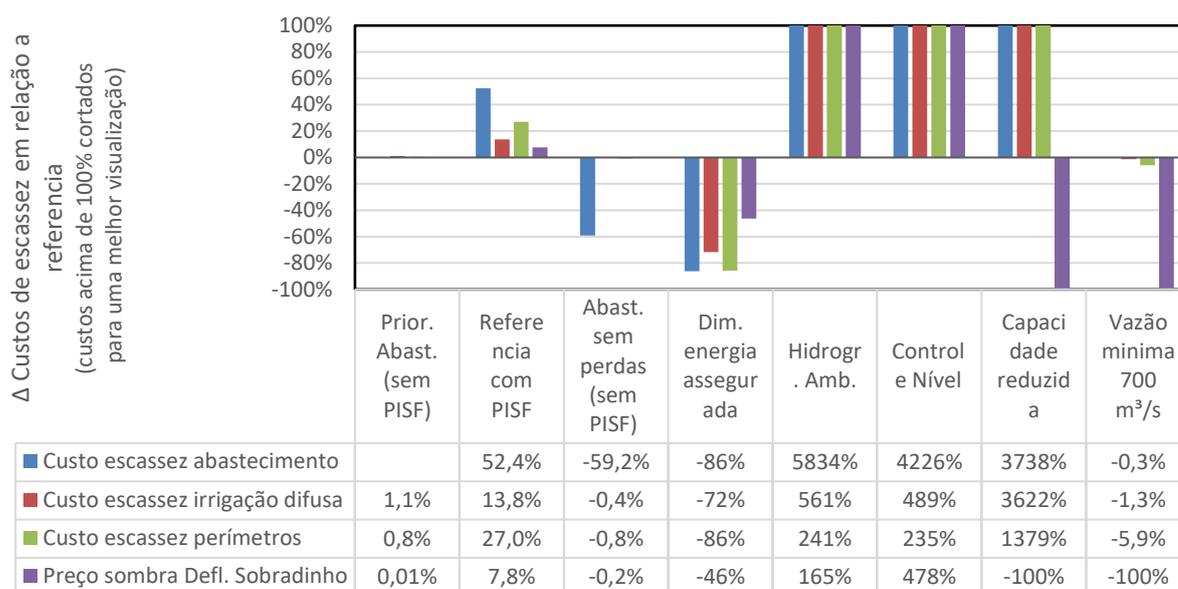


Figura 63 – Diferenças de custos de escassez na alocação econômica ótima em relação a referência das regras operacionais no cenário *Baseline* (2000-2006)

Quando foi incluído o projeto de transposição do São Francisco (PISF), para ambos os eixos como usuários, os custos de escassez na solução ótima aumentaram para os usuários de irrigação, de 13,8% para os irrigantes difusos e de 27% para os perímetros irrigados na bacia doadora, em relação ao cenário de referência. Os custos de escassez dos municípios também aumentaram de 52,4%, pois os municípios receberam menos água (ver Figura 63). Os benefícios das usinas caíram em relação a referência e também em relação aos valores anteriores, com prioridade para abastecimento humano: mais 0,63% para usinas Sobradinho/Itaparica e 0,97% para as usinas do complexo Paulo Afonso e Moxoto (ver Figura 64). Ressalta-se que, neste cenário referência incluindo o PISF, a alocação econômica ótima encontrada foi de 100% ou 26,4m³/s para o PISF. O preço sombra da vazão (defluência de Sobradinho) no rio SF aumentou quase 8% em relação ao *Baseline* (Referência), descrito na seção anterior (Figura 63 e Figura 64).

No cenário sem perdas para os sistemas de abastecimento humano, mas sem prioridade, 100% da água demandada foi alocada para os municípios e os seus custos de escassez diminuiriam fortemente em relação a referência. Neste caso, será menos água alocada para o uso irrigação, que apresenta um custo de escassez aumentado de cerca de 1,6%. Na verdade, este resultado mostra que neste cenário sem perdas, os resultados do abastecimento humano passam a ser melhores economicamente do que os de irrigação (ver Figura 63).

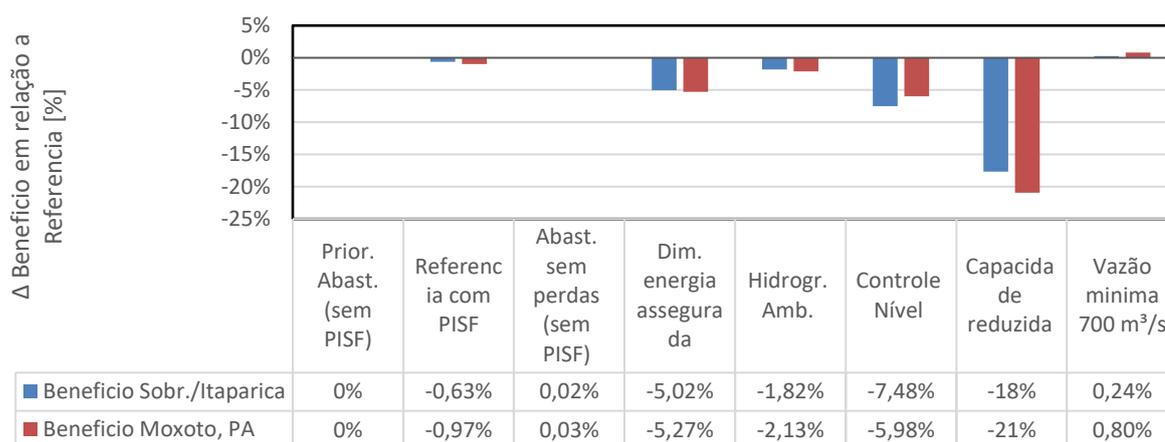


Figura 64 – Diferenças de benefícios da produção hidroelétrica em relação a referência das regras operacionais no cenário Baseline (2000-2006)

Reduzir a energia assegurada das usinas no SMSF, diminuiu o custo de escassez de todos os usuários em média de 32,75 milhões (81%). Porém, os benefícios das usinas diminuíram R\$ 3,546 bilhões (5,1%), durante o mesmo período, com uma produção média de 3.800 MW. Também o preço sombra da vazão efluente de Sobradinho diminuiu 46%, em comparação a referência (com PISF).

Utilizando as vazões estabelecidas, no *Hidrograma Ambiental*, os custos de escassez dos perímetros e da irrigação difusa aumentaram em cerca de 400%. Os benefícios das usinas hidroelétricas diminuíram de 1,82% para as usinas Sobradinho/Itaparica e 2,13% para as usinas do complexo Paulo Afonso/Moxotó. Pode ser observado que, principalmente, a alocação de água para a irrigação é reduzida para fornecer água para a vazão ecológica do *Hidrograma ambiental*. Os custos de escassez para os demais usos, devido à introdução do *Hidrograma ambiental*, totalizam R\$ 829 milhões para uso consuntivo e 2,2 bilhões para as usinas hidroelétricas (Figura 63 e Figura 64). Ressaltando que, os valores são os totais do período de 7 anos. O custo médio, neste cenário, para a manutenção dos ecossistemas é de R\$ 0,006 / m³, valor obtido considerando apenas os custos para os usos (em relação a referência) e a disponibilidade de água no SMSF.

As restrições ambientais, chamadas *Controle de nível*, aumentam ainda mais os custos de escassez dos usuários de irrigação, reduzindo-se ainda mais as alocações de água para os perímetros irrigados do que a quantidade reduzida para o *Hidrograma ambiental*. Para os perímetros irrigados, os custos de escassez aumentaram com essas restrições 489% e de 235% para a irrigação difusa. Os benefícios da produção de energia diminuíram 7,48% nas usinas Sobradinho/Itaparica e 5,98% para as usinas do complexo Paulo Afonso e Moxotó. No período

de 7 anos, os custos totais para a manutenção dos ecossistemas usando esta proposta de *Controle de nível*, são de R\$ 700 milhões para irrigação/abastecimento e 5 bilhões para produção hidroelétrica, neste cenário. O valor médio dos custos para os usos no SMSF resulta em R\$ 0,012/m³.

Os maiores impactos na alocação econômica ótima aparecem sob a restrição ambiental *Capacidade reduzida – Innovate*. Os custos de escassez para todos os usuários são mais elevados em comparação aos custos obtidos em todos os outros cenários. A vazão mínima na foz de 1300 m³/s não pôde mais ser mantida, no período estudado. Os custos de escassez para os perímetros irrigados aumentam 63,52% e para a irrigação difusa de 58,78%. O setor de produção de energia tem perdas acrescidas de 7,79% para as usinas Sobradinho/Itaparica e 8,98% para as usinas do complexo Paulo Afonso e Moxotó. Os totais de custos para a manutenção dos ecossistemas são de R\$ 13,8 bilhões ou um valor médio de R\$ 0,04/m³, neste cenário (Figura 63 e Figura 64).

A redução da restrição institucional da vazão mínima a jusante de Sobradinho, com o fim de assegurar o volume do reservatório durante períodos secos, vem levando a conflitos com os usuários a jusante, atualmente, na bacia. De acordo com a resolução da Agência Nacional de Águas, a vazão mínima de 1.300 m³/s foi reduzida para 1.100 m³/s (ANA, 2013c), 900 m³/s (ANA, 2015) e mais recentemente para 800/700 m³/s (ANA, 2016f). Para o modelo de alocação ótima, a alteração da restrição mínima na defluência de Sobradinho para 700 m³/s defluente aumentou os custos de escassez para os usuários da irrigação difusa de 1,3% e para os perímetros irrigados de 5,9%. A alteração para o setor de produção de energia foi relativamente pequena com um aumento de benefícios de 0,52% (média todas as usinas 4080 MW) durante o período.

5.4.2 Cenário CV (variabilidade climática)

Com o cenário CV, foi obtida a alocação econômica ótima simulando uma disponibilidade hídrica como a do período de estiagem prolongada atual (2012-2016). As demandas utilizadas são as mesmas do cenário *Baseline*. Este cenário representa uma disponibilidade de água muito abaixo da média.

5.4.2.1 CV - Referência

A análise dos resultados do período de estiagem prolongado mostra que a vazão mínima na foz não pôde ser mantida durante todo período, ou seja, o modelo não encontrou uma solução viável com a restrição mínima de 1300 m³/s (Xingo/Sobradinho). A menor vazão mínima viável

encontrada foi de 700 m³/s para Sobradinho e Xingo, tendo sido a restrição da vazão mínima reduzida, então, para este valor. Ressalta-se que esta vazão é insuficiente para atender a navegação no trecho a jusante da barragem Sobradinho. A comparação dos resultados do modelo de otimização com os dados observados no período mostrou resultados semelhantes, ou seja, a operação real é, relativamente, próxima do ótimo econômico. A Figura 65 mostra o reservatório Sobradinho durante o período de 2010 a 2016, com os valores da simulação de volume armazenado e vazão efluente.

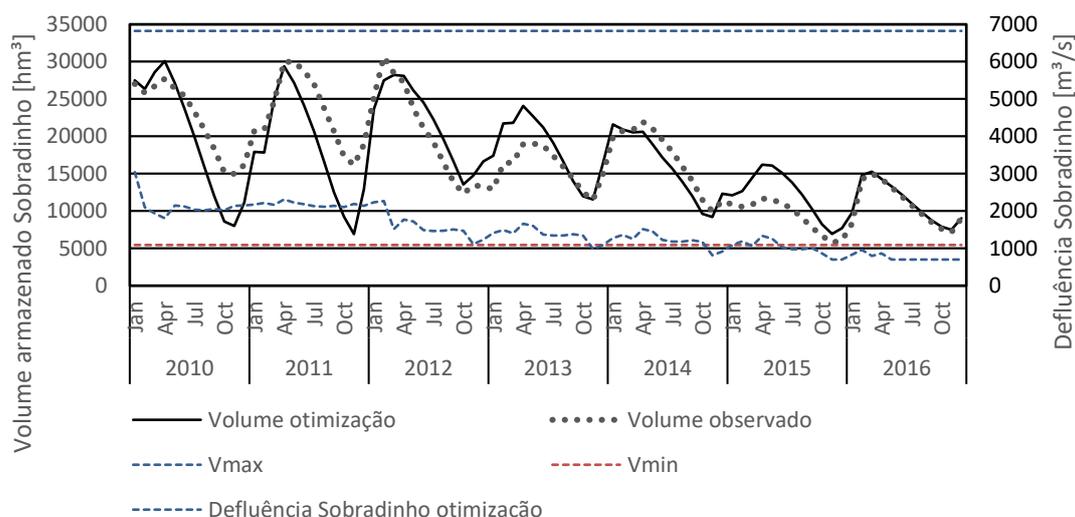


Figura 65 – Resultado otimização - Reservatório Sobradinho – período 2010 a 2016 –volume armazenado e vazão efluente

As vazões otimizadas acompanham bem as vazões praticadas no rio São Francisco, nos últimos anos. O período mostrou, a partir de 2012, escassez de água elevada, observando-se redução da alocação para todos os usos de água. Os sistemas de abastecimento, nos municípios, recebem as menores percentuais de água alocadas. A alocação média para todos os perímetros irrigados foi de 30,75 m³/s e para irrigação difusa 17,94 m³/s. O perímetro Tourão (93% de cana-de-açúcar) obteve a maior quantidade de água alocada (em termos percentuais) durante todo período.

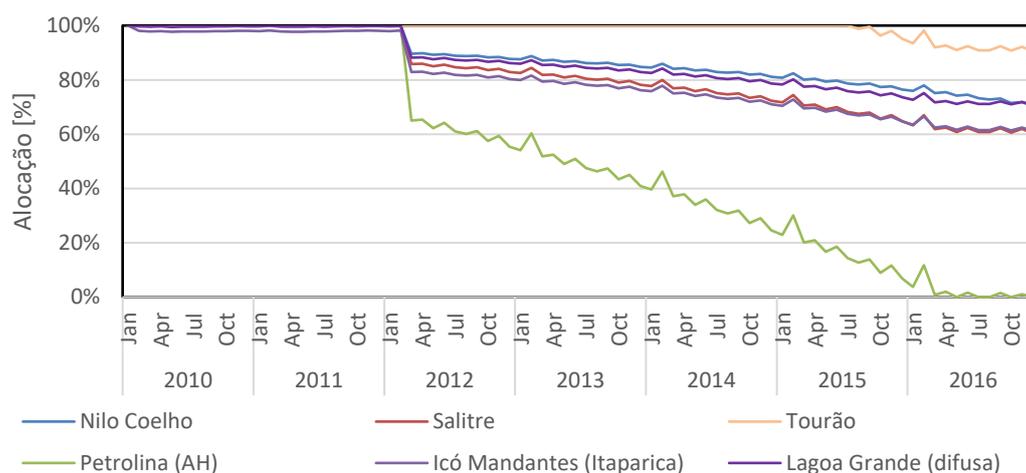


Figura 66 – Resultado otimização - Alocação de água durante o período 2010-2016 – perímetros irrigados, irrigação difusa, abastecimento humano

Com a diminuição da disponibilidade nos reservatórios, a alocação para os usos consuntivos diminui progressivamente. A alocação de água para os diversos usuários, ranqueada de maior para menor atendimento, devido a sua eficiência econômica pode ser observada na Figura 67. A irrigação difusa, nos municípios (IDif), apresenta a maior eficiência e tem mais água alocada, principalmente devido aos menores custos marginais de água, em comparação aos perímetros (PI). Nos últimos lugares, ficaram os sistemas de abastecimento humano dos municípios.

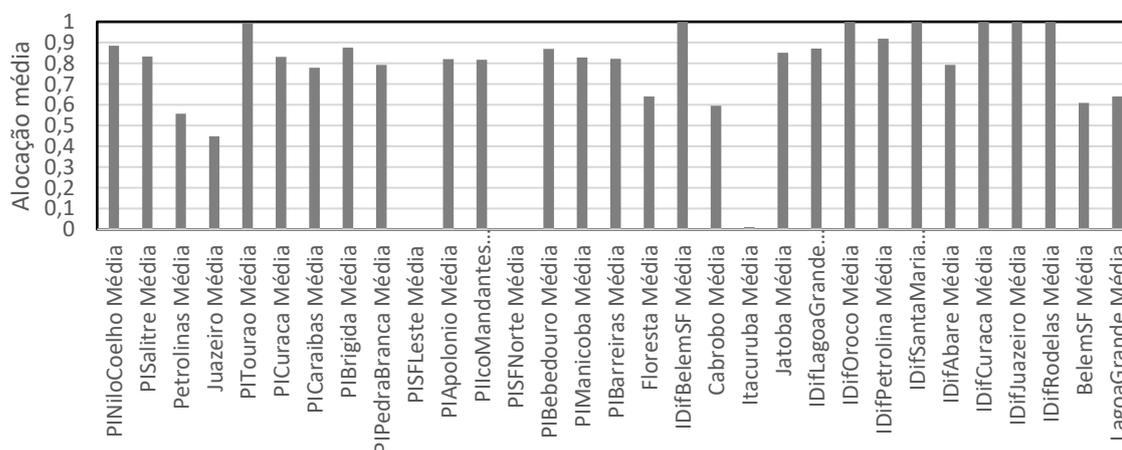


Figura 67 – Alocação média ótima para os usos consuntivos no cenário CV (Referencia)

A produção de energia nas usinas não pôde alcançar a energia assegurada (5.797 MW), durante o período de estiagem. A Figura 68 mostra a produção de energia das usinas hidroelétricas, durante o período de 2010-2016, obtida através da otimização hidro-econômica.

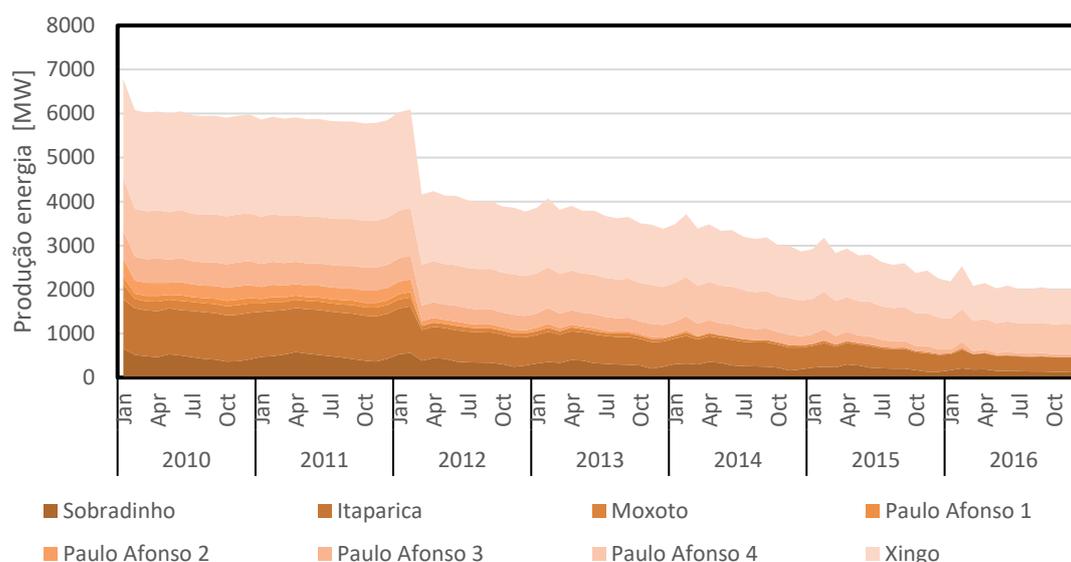


Figura 68 – Resultado otimização - Produção de energia das usinas hidroelétricas durante o período 2010-2016

Foi observada uma redução significativa dos benefícios econômicos da produção de energia e um aumento significativo dos custos de escassez dos usuários consuntivos, em comparação ao cenário *Baseline*. O benefício bruto da produção de energia, no período de sete anos, foi de R\$ 15,53 bilhões (Sobradinho e Itaparica) e R\$ 46,02 bilhões de Moxotó, Paulo Afonso e do complexo Xingó. Os custos de escassez dos perímetros irrigados foram de R\$ 580,96 milhões, irrigação difusa R\$ 158,33 milhões e do abastecimento R\$ 171,4 milhões.

5.4.2.2 CV - Regras operacionais/restrições ambientais

No cenário mais seco (CV), os custos de escassez são muito mais elevados em comparação ao cenário *Baseline*. Isto permitiu uma avaliação melhor das regras num contexto de forte escassez hídrica no sistema. A prioridade dada ao abastecimento humano obteve maior impacto para os demais usos, neste cenário de seca, em comparação ao cenário *Baseline*. Os custos de escassez para irrigação aumentaram 0,37% e os benefícios da produção hidroelétrica diminuíram 0,06%, com a introdução da prioridade. Com água alocada para o PISF, com uma alocação média de 40% da vazão demandada de 26,4 m³/s durante o período simulado (Eixo Leste e Norte), os custos de escassez para irrigação e abastecimento aumentaram cerca de 0,6% e os benefícios das usinas diminuíram cerca de 0,4% (ver Figura 69) em relação à referência.

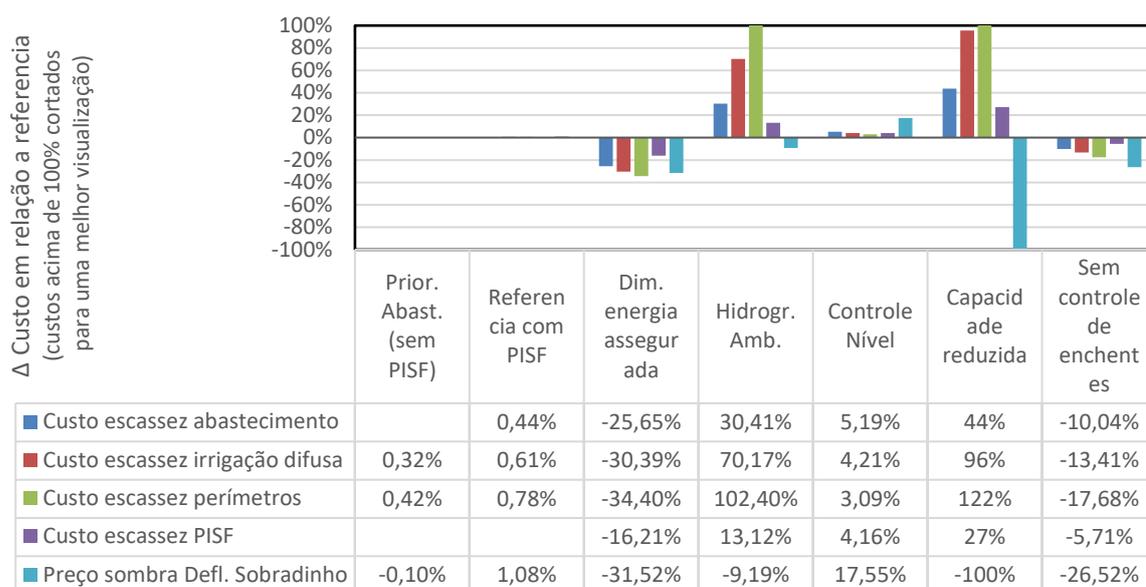


Figura 69 – Diferenças de custos de alocação em relação à referência das regras operacionais no cenário CV

A diminuição da energia assegurada foi menos significativa, em comparação ao cenário *Baseline*, já que a energia não tinha sido atendida na maior parte do tempo, na referência deste cenário seco. Os custos de escassez para os usos consuntivos diminuíram cerca de 30% (R\$ 785 milhões) e os custos das usinas aumentaram 2,9% (R\$ 807 milhões), em relação à referência CV (com PISF).

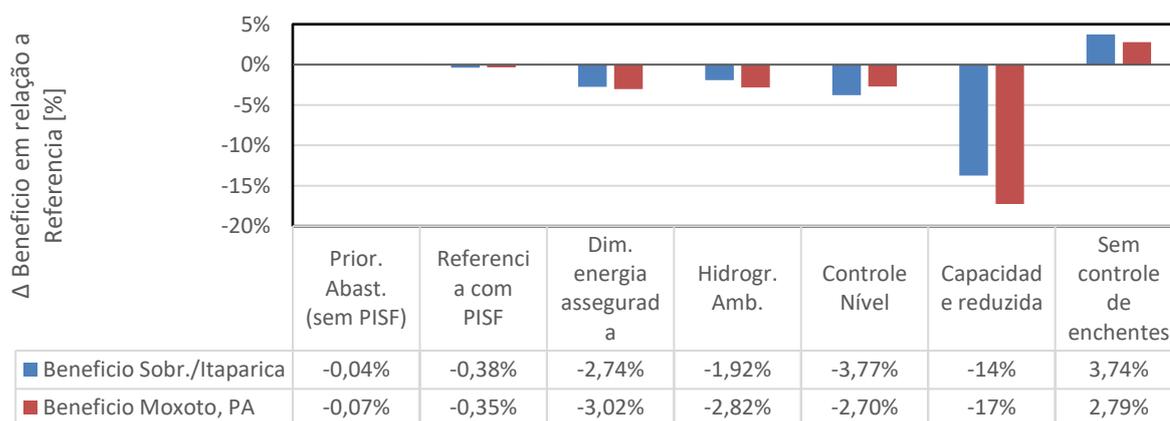


Figura 70 – Diferenças de benefícios da produção hidrelétrica em relação à referência das regras operacionais no cenário CV

Utilizando o *Hidrograma ambiental*, o solver não encontrou uma solução viável, durante o período de estiagem, pois o reservatório Sobradinho ficou sem água para atender as demandas do *Hidrograma ambiental*, no ano de 2016 (agosto – dezembro). Por isso foram reduzidas as vazões requeridas pelo *Hidrograma ambiental* para o período seco. A Figura 71 mostra as

vazões viáveis no cenário CV. A Figura mostra também vazões viáveis no cenário B1, analisado na seção 5.4.4.2, na página 151. Os custos de escassez para os usos na região do SMSF para a manutenção dos ecossistemas, utilizando esses novos Hidrogramas foram de R\$ 0,01/m³, neste cenário CV.

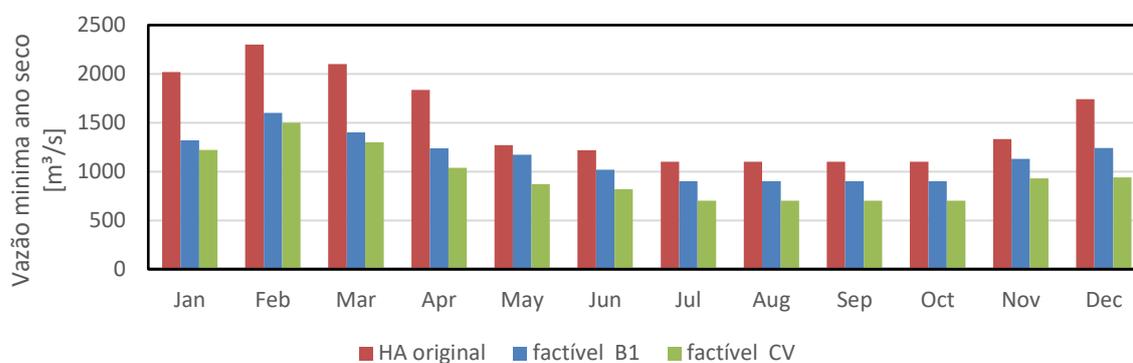


Figura 71 – Vazão mínima Hidrograma ambiental e vazões factíveis nos cenários CV e B1

Nas regras adotadas para o *Controle de Nível*, os custos de escassez dos usuários consuntivos aumentaram 4,2 % (R\$ 159 milhões) e os benefícios das usinas diminuíram 3,2% (R\$ 1,98 bilhões), o que representa um custo de R\$ 0,006/m³. Ressaltando-se que os custos foram já mais elevados na referência deste cenário seco e, por isso, o crescimento dos custos da regra *Controle de Nivel* foi menor do que no cenário *Baseline*. O preço sombra da restrição da vazão mínima no rio (700 m³/s) aumentou 17,6% (R\$ 4,2 milhões). Já a regra operativa *Capacidade Reduzida*, resultou num impacto maior para todos os usuários. Com esta regra, a restrição vazão mínima da referência (700m³/s) não pôde ser mantida durante a seca, e por isso o preço sombra da restrição não pôde ser comparado com a referência. As restrições da capacidade no reservatório limitam o fluxo a jusante e tem preços marginais mais elevados. Os custos para os usos consuntivos tiveram um acréscimo de 87,3% (R\$ 1,75 bilhões) e os custos (em relação à referência CV) para as usinas aumentaram de 15,5% (11,61 bilhões), o que representou um valor médio de R\$ 0,037/m³, considerando os custos dos usos e a disponibilidade no período.

A regra da redução da vazão mínima não pôde ser analisada, por não resultar em solução viável. Ressalta-se que, a vazão mínima já tinha sido reduzida na referência do cenário CV, por isso ao invés desta, foram simulados o efeito das regras do controle de enchente. Obteve-se a solução econômica ótima com as regras do controle de enchente desativadas. Os resultados mostram custos de escassez mais baixos para os usos consuntivos. Os mesmos (abastecimento e irrigação) diminuíram cerca de 13,7% e os custos de escassez para o PISF diminuíram 5,7%.

Os benefícios das usinas aumentaram 3,3%, em comparação à referência CV, com o controle de enchentes.

5.4.3 Cenário A2

5.4.3.1 A2 - Referência

Os resultados do cenário futuro A2, incluindo as projeções de mudança de uso do solo do MAGPIE e as mudanças climáticas representadas pelas novas curvas de demanda, mostraram alterações substanciais nos projetos de irrigação, representados por um aumento significativo das áreas para irrigação e culturas (especialmente cana-de-açúcar). A Figura 72 mostra o comportamento do reservatório Sobradinho, neste cenário. Pode ser observado uma disponibilidade hídrica relativamente alta durante todo período. A alocação para abastecimento nos municípios foi de 3,14 m³/s, ou 94%, da água demandada durante o período.

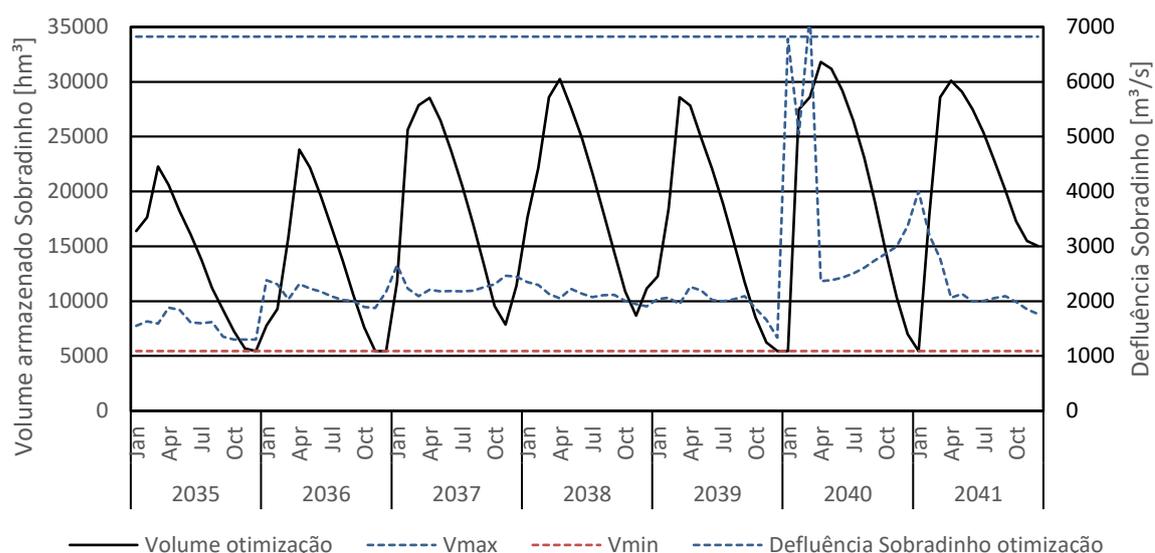


Figura 72 – Resultado otimização – Reservatório Sobradinho – cenário A2 período 2035 a 2041 –volume armazenado e vazão efluente

A alocação média foi de 175,9 m³/s para todos os perímetros irrigados (novos e antigos) e 18,6 m³/s para a irrigação difusa. As retiradas médias anuais consideradas (pelo modelo SWIM), a montante de Sobradinho, foram de 141,4 m³/s, resultando numa retirada total para a bacia hidrográfica do SF de 339 m³/s, um valor próximo ao da vazão outorgável de 360m³/s. Apesar da alocação de água ter aumentado neste cenário, os custos totais de escassez para projetos de irrigação também aumentaram em comparação ao cenário *Baseline*, devido à maior demanda de água, para um total de R\$ 61,95 milhões durante o período simulado. A Figura 73 mostra a alocação de água para os projetos de irrigação, já mostrados no cenário *Baseline* (Nilo Coelho,

Salitre, Icó Mandantes e Tourão), irrigação difusa no município Lagoa Grande e o abastecimento de Petrolina.

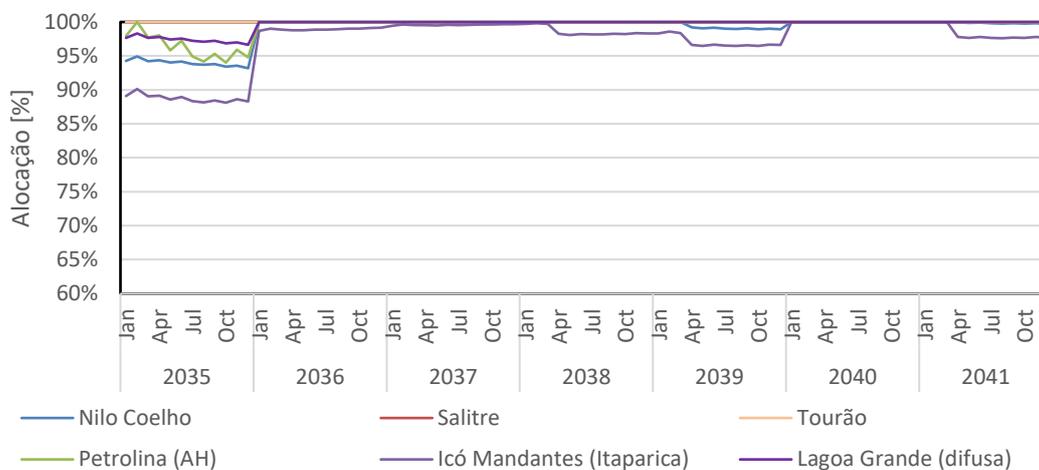


Figura 73 – Resultado otimização – Alocação de água no cenário A2 – período 2035 -2041 – perímetros irrigados, irrigação difusa, abastecimento humano

Salitre e Tourão tiveram 100% da sua demanda alocada na solução econômica ótima. Pode-se explicar uma maior alocação para o projeto de irrigação de Salitre em relação ao Nilo Coelho, por causa de sua localização (Nilo Coelho). Este perímetro capta água no reservatório de Sobradinho, e logo a montante da usina hidrelétrica de Sobradinho. Portanto, este projeto de irrigação de Nilo Coelho concorre, na verdade, mais com a produção de energia do que com o projeto de irrigação Salitre. Ademais, os valores econômicos dos projetos são diferenciados, devido ao mix diferenciado, principalmente, em relação à quantidade de cana-de-açúcar. Os novos perímetros como Pontal, Dois Irmãos, Serra da Batateira, Sertão Pernambucano obtiveram também quase 100% de água alocada na otimização (Figura 74).

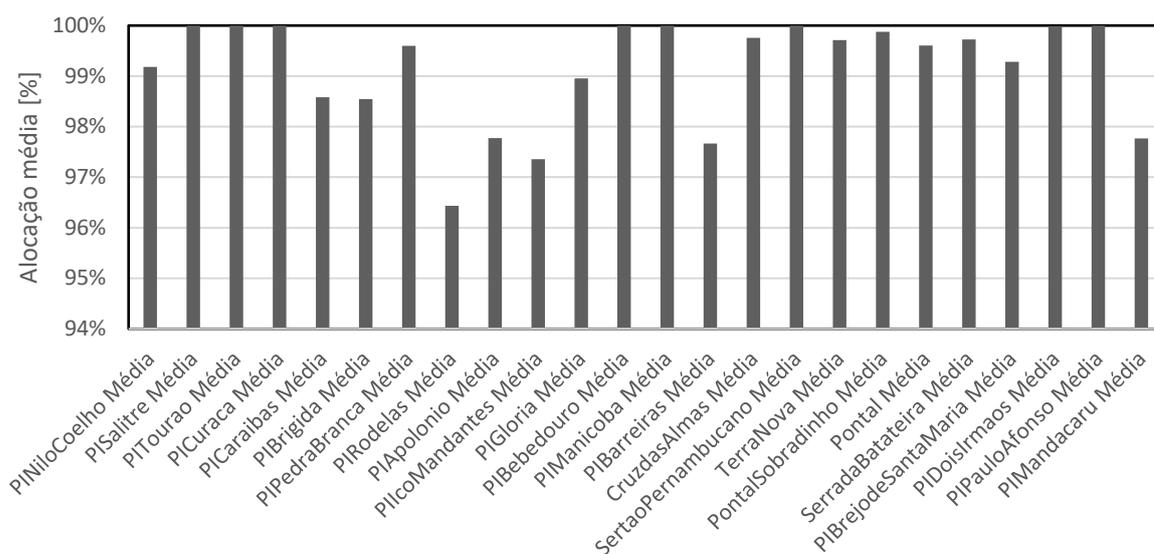


Figura 74 – Alocação média de água para os perímetros irrigados no cenário A2

Apesar deste cenário ser mais úmido do que o cenário *Baseline*, os benefícios das usinas hidrelétricas de Sobradinho / Itaparica foram de R\$ 15,703 bilhões (1,56 bilhões menores do que no cenário *Baseline*). Isso ocorreu, principalmente, por causa do aumento da demanda por água para a irrigação, na região do SMSF, em relação ao cenário *Baseline*. Isto representou uma diminuição de 7% na produção de energia hidrelétrica, sendo a média total dada por 4.076 MW neste cenário A2. Para os reservatórios hidrelétricos do complexo Moxoto, Paulo Afonso e Xingo os benefícios brutos foram de R\$ 46,5 bilhões (5,62 bilhões menos do que no cenário *Baseline*). A produção média global de energia também não conseguiu garantir as demandas de energia assegurada neste período.

5.4.3.2 A2 - Regras operacionais/ restrições ambientais

Devido à maior disponibilidade de água neste cenário, os custos para as demandas ambientais diminuíram levemente, em comparação com o cenário *Baseline*. A regra de prioridade para o abastecimento dos municípios teve pouca influência neste cenário. O crescimento da demanda de água para irrigação foi muito maior do que a demanda para o abastecimento, o que diminuiu a influência da prioridade para o abastecimento humano nos outros usos. Quando foi adicionada a demanda para o PISF de 110m³/s, a alocação média para o PISF foi de 92%, resultando em um aumento dos custos de escassez dos usuários consuntivos na bacia doadora de 34,3% (R\$ 8,89 milhões para R\$ 11,94 milhões) para irrigação difusa e 40,2% (R\$ 61,95 milhões para R\$ 86,83 milhões) nos perímetros e 184% (R\$ 0,62 milhões para R\$ 1,76 milhões) para o abastecimento humano em relação à referência do cenário A2 sem PISF. Os benefícios das hidroelétricas diminuíram cerca de 3% (ver Figura 75 e Figura 76). A alocação total para os

usos consuntivos (com PISF) foi de 299,1 m³/s, que juntamente com as demandas a montante de Sobradinho, 141,37m³/s, ficou acima da vazão outorgável de 360 m³/s.

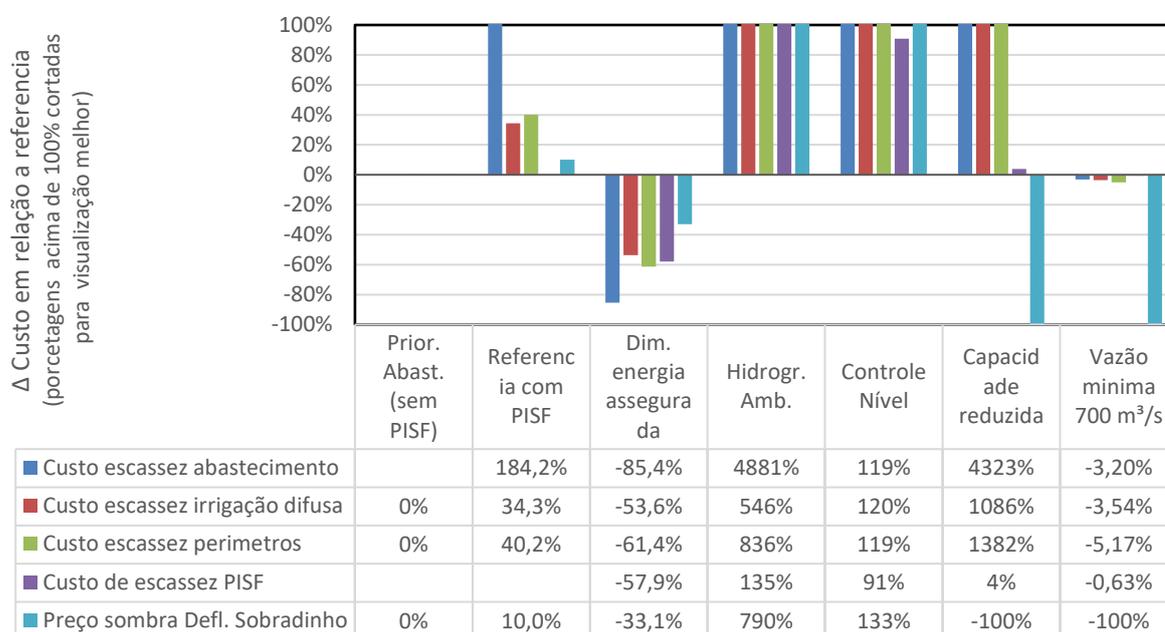


Figura 75 – Diferenças de custos de escassez na alocação econômica em relação à referência do cenário A2 para as regras operacionais

Para a regra *Hidrograma Ambiental*, os custos de escassez dos usos de irrigação aumentaram em relação ao cenário de referência A2, acima de 500% (R\$ 790,87 milhões) e quase 5.000% (R\$ 85,88 milhões) para os usos para abastecimento humano. Ressalta-se que os custos da referência foram relativamente baixos neste cenário. A alteração para as usinas hidrelétricas não foi muito notável, cerca de +0,1% de benefícios para todas as hidrelétricas. O preço sombra da vazão mínima de defluência de Sobradinho aumentou muito (+790%), em comparação aos outros cenários, ressaltando que a vazão defluente de 1.300m³/s, no trecho entre Sobradinho e Itaparica, foi mantida para o uso de navegação. O custo de escassez para o PISF aumentou pouco em comparação à referência deste cenário, entretanto permanecem mais altos em relação aos demais cenários, a saber: R\$ 3,1 bilhões, durante os 7 anos da simulação. Os usuários de irrigação tiveram um aumento substancial nos custos de escassez, embora este custo tenha sido inferior ao cenário *Baseline*. Os usuários de irrigação são os que pagam principalmente para a manutenção dos ecossistemas no SMSF (R\$ 889,65 milhões). O custo médio em relação a referência A2 da restrição *Hidrograma Ambiental* é de R\$ 0,004/m³.

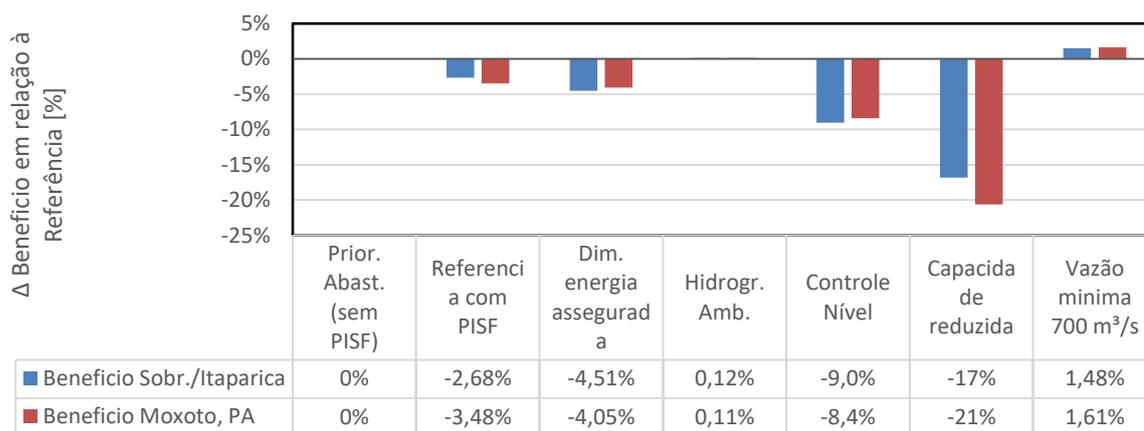


Figura 76 - Diferenças de benefícios da produção hidroelétrica em relação à referência das regras operacionais no cenário A2

A opção *Controle de Nível* verteu grandes quantidades de água pelo *by-pass* para manter o nível no reservatório, na época chuvosa. Por isso, a água não pôde ser turbinada resultando numa redução do benefício da hidrelétrica (-9,0% Sobradinho/Itaparica e -8,4% Moxotó/Paulo Afonso). Os custos de escassez da irrigação aumentaram + 120%. Além disso, os limites de proteção de enchentes não puderam ser sustentados no mês de fevereiro de 2040. Os resultados para o cenário *Capacidade reduzida*, mostraram uma redução de -17% nos benefícios de produção de energia para Sobradinho/Itaparica e de -21% para Moxotó/Paulo Afonso. O custo de escassez para irrigação aumentou drasticamente (> 10 vezes em relação ao cenário de referência A2) devido à diminuição da disponibilidade de água nos reservatórios, que resultou em escassez de água maior em certos anos, em comparação a operação de *Controle de Nível*.

5.4.4 Cenário B1

5.4.4.1 B1 - Referência

O cenário B1 (Consciência global) mostra um cenário seco com relativamente pouca expansão dos usos para irrigação no SMSF. Como já visto no cenário CV, a análise dos resultados do cenário B1 mostrou que a vazão mínima a jusante de Sobradinho e Xingo não pôde ser mantida durante todo período, ou seja, o solver não convergiu para uma solução viável com a restrição mínima de 1300 m³/s (Xingo/Sobradinho). Apesar da disponibilidade de água ter sido inferior ao cenário CV, uma restrição da vazão mínima de 900 m³/s pôde ser mantida, devido a melhor distribuição da disponibilidade hídrica neste cenário em relação ao CV. A Figura 77 mostra o volume armazenado do reservatório Sobradinho e a vazão efluente do mesmo durante o período estudado.

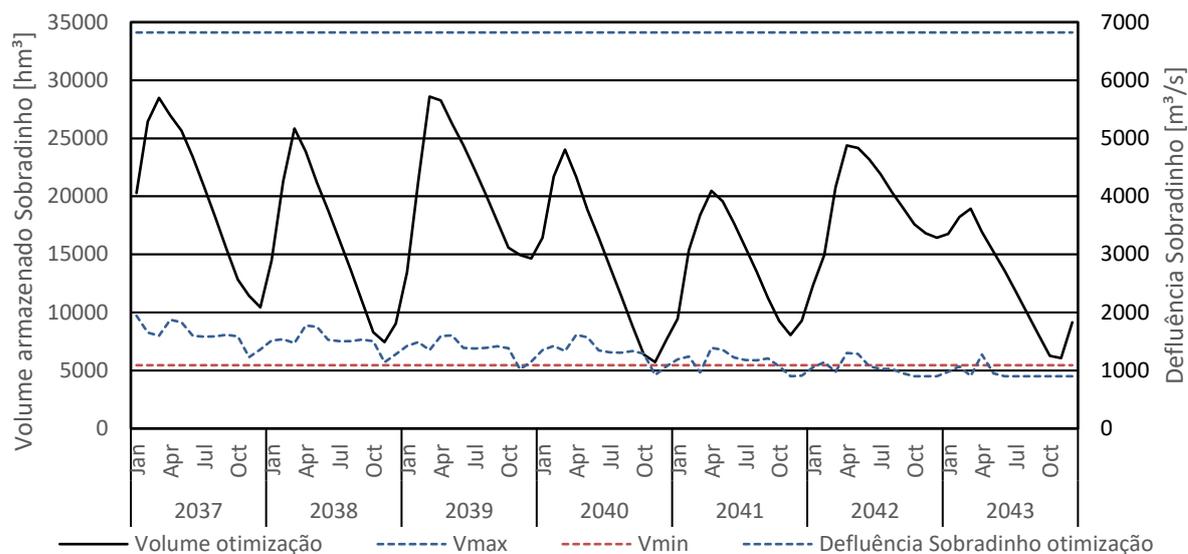


Figura 77 – Resultado otimização – Reservatório Sobradinho – cenário B1 período 2037 a 2043 – volume armazenado e vazão efluente

O benefício bruto da produção de energia nesse período simulado foi de R\$ 15,41 bilhões (Sobradinho e Itaparica) e R\$ 46,81 bilhões de Moxotó, Paulo Afonso e do complexo Xingó. A energia média gerada, em todas as usinas no SMSF, foi apenas de 2.667 MW neste período, quase a metade da energia assegurada atualmente e menor do que no cenário CV. A Figura 78 mostra a produção de energia no período simulado.

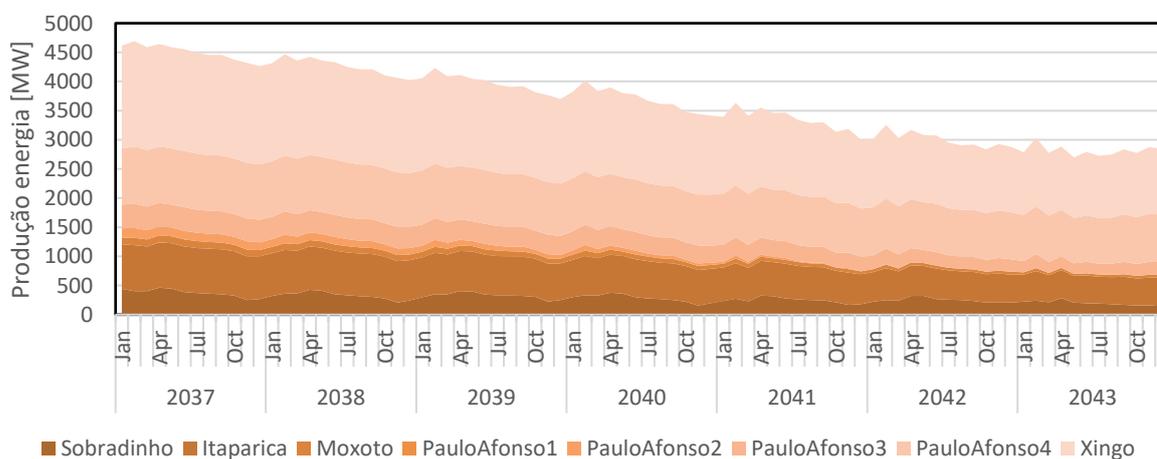


Figura 78 – Produção de energia das usinas hidroelétricas durante o período 2037 – 2043 no cenário B1

A alocação econômica ótima de água, para alguns usuários, no cenário B1, pode ser observada na Figura 79. A alocação ótima para os perímetros foi mais equilibrada, exceto para os perímetros localizados no complexo Itaparica, os quais receberam menos água durante o período modelado. A alocação média foi de 34,64 m³/s para todos os perímetros irrigados

(novos e antigos) e 17,9 m³/s para a irrigação difusa. A alocação média para todos os usos consuntivos foi de 81,2% neste cenário B1, que é maior do que a alocação no outro cenário seco (CV) com 72,9%.

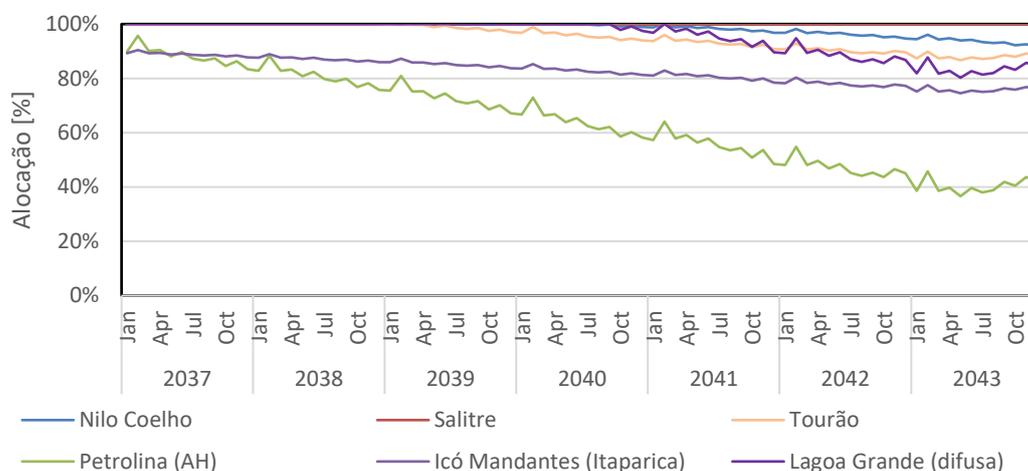


Figura 79 – Resultado otimização - Alocação de água no cenário B1 - período 2037 a 2043 – perímetros irrigados, irrigação difusa, abastecimento humano

Na solução ótima, o custo total de escassez dos projetos públicos de irrigação foi de R\$ 329,3 milhões. Os irrigantes difusos nas margens do rio agregados por município também receberam menos água durante os períodos mais secos, tendo custos de escassez de R\$ 138,4 milhões. A Figura 80 mostra os resultados da alocação (ou eficiência) dos usos consuntivos no cenário B1. Observa-se resultados semelhantes aos do cenário CV.

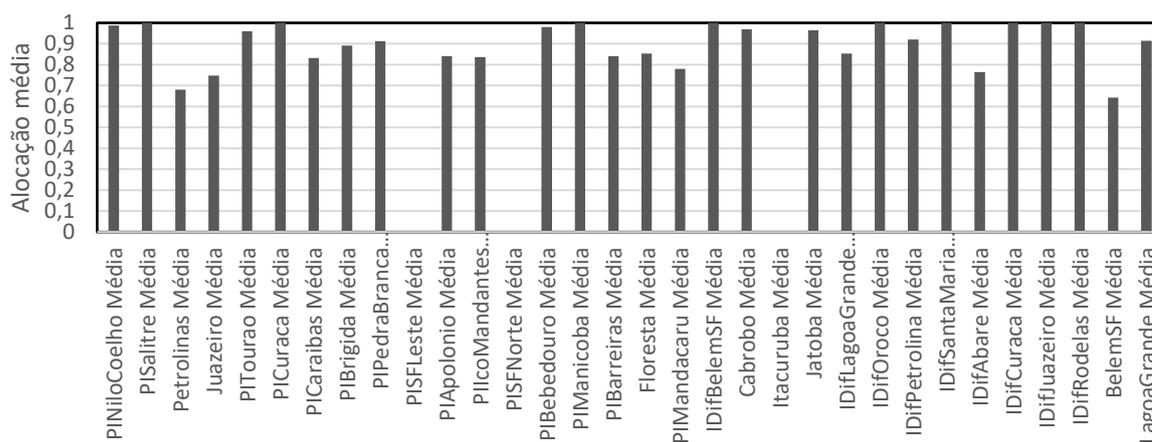


Figura 80 – Alocação média para os usos consuntivos no cenário B1 (Referência)

5.4.4.2 B1 - Regras operacionais/restrições ambientais

O aumento populacional, no cenário B1, aumentou os custos de escassez para os outros usos na regra *Prioridade abastecimento*. Os custos de escassez para os irrigantes difusos aumentaram

0,19% e dos perímetros 0,32% em relação aos valores obtidos na *Referência*. Os benefícios econômicos da produção de energia foram reduzidos 0,03% para as usinas Sobradinho/Itaparica e 0,05% para as usinas Paulo Afonso/Moxotó/Xingó. Com aumento da água demandada para o PISF, no cenário B1, a alocação ótima para o PISF foi reduzida numa média de 25% da água demandada. A vazão média do Eixo Norte foi de 14,1 m³/s (máxima demandada foi de 49 m³/s) e a vazão média para o Eixo Leste foi de 4,9 m³/s (máxima demandada foi de 16,44 m³/s), o que representa um custo de R\$ 10,46 bilhões para as bacias receptoras (em comparação a alocação de 100%). A diminuição do benefício para as usinas hidroelétricas foi de R\$ 11,795 bilhões e os custos para os usos irrigantes foram de R\$ 20,653 milhões em relação à Referência sem PISF. Os custos e benefícios para essas regras podem ser observados na Figura 81 e Figura 82, respectivamente.

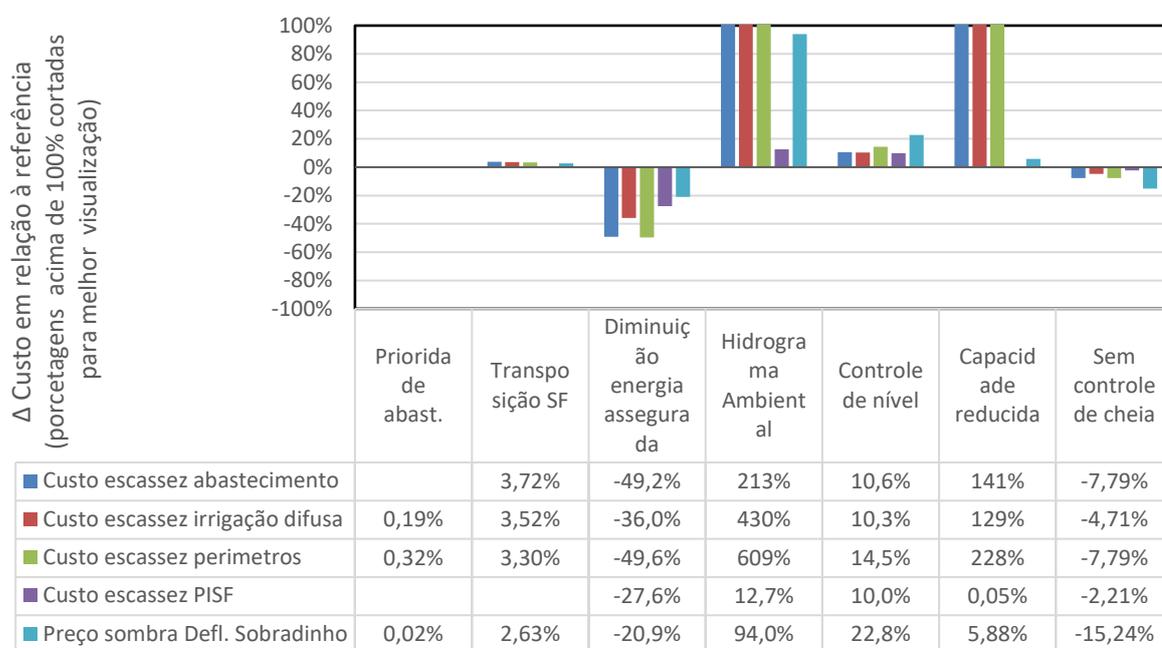


Figura 81 – Diferenças de custos de alocação em relação à referência das regras operacionais no cenário B1

Como já visto nos outros cenários, a diminuição da energia garantida retirou “a pressão” sobre os outros usos no período de escassez. Os custos dos outros usos diminuíram cerca de 43% (R\$ 3,8 bilhões). Por outro lado, os custos para as hidroelétricas foram elevados, pois os benefícios das hidroelétricas diminuíram -1,06% ou -R\$ R\$ 767,49 milhões. Com esses resultados, o preço sombra da vazão no SMSF caiu 94% em relação à referência do cenário B1.

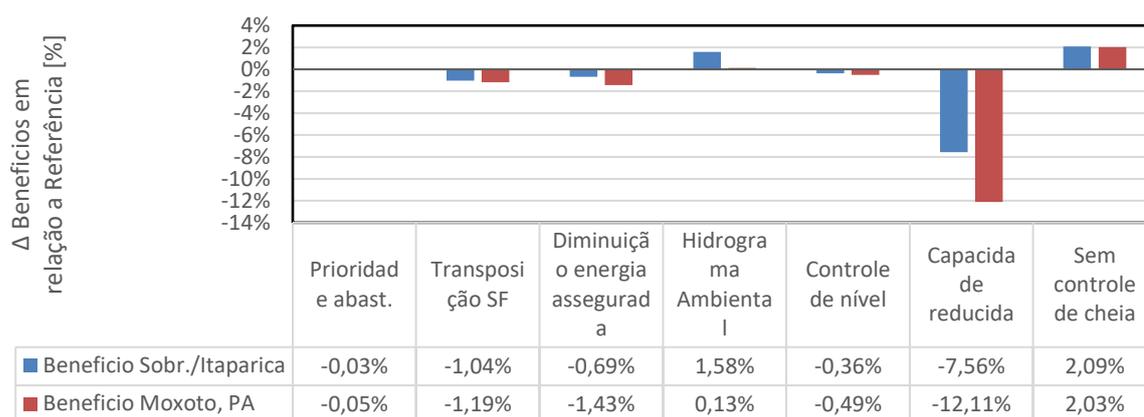


Figura 82 – Diferenças de benefícios da produção hidroelétrica em relação à referência das regras operacionais no cenário B1

Como já ocorreu no cenário seco CV, no cenário B1 o solver não encontrou uma solução viável durante o período de estiagem, por isso foram reduzidas as vazões do *Hidrograma ambiental* para o período seco, a Figura 71, na página 144, mostrou as vazões viáveis no cenário B1. Mesmo assim, os custos para os usos consuntivos aumentaram de R\$ 4,31 bilhões (39%) e os benefícios das usinas aumentaram R\$ 300,54 milhões (0,86%). As regras *Controle de Nível* resultaram em um aumento dos custos dos usuários consuntivos de 10,1 % (R\$ 1,12 bilhões) e os benefícios das usinas diminuíram de 0,43% (R\$ 283,9 milhões), o que representou um custo médio de R\$ 0,005/m³. O preço sombra da restrição da vazão mínima no rio (900 m³/s) aumentou 19,6%. Utilizando a regra operativa *Capacidade Reduzida*, a restrição da vazão mínima da referência (900m³/s) não pôde ser mantida durante o período seco. Assim, o preço sombra da restrição não pôde ser comparada com a referência deste cenário. As restrições da capacidade no reservatório limitam o fluxo a jusante do mesmo e têm preços marginais mais elevadas. Os custos para usos consuntivos obtiveram um acréscimo na média de 124% (R\$ 1,16 bilhões) e para as usinas 9,84% (7,76 bilhões), o que representou uma média de R\$ 0,028/m³.

Como já ocorreu no cenário CV, a regra da redução da vazão mínima não pode ser analisada, sendo que a vazão mínima, também, foi reduzida na referência. Por isso, foi simulado o efeito da desativação das regras do controle de cheias. Os resultados econômicos ótimos mostraram custos de escassez menores para os usos consuntivos. Os custos de escassez para abastecimento e irrigação diminuíram cerca de 6,76% e os custos de escassez para o PISF diminuíram 2,12%. Os benefícios das usinas aumentaram 2,06%, em comparação à referência com controle de cheia.

5.4.5 Comparativo dos cenários/ usos

O comparativo dos usos, nos diferentes cenários, mostra que a irrigação difusa consegue manter valores percentuais de atendimento em relação à demanda mais elevados em relação aos outros usos. Ressalta-se que, a quantidade e o mix das culturas consideradas na irrigação difusa não foi alterada nos cenários estudados, ou seja, não foram consideradas mudanças no uso de solo para a irrigação difusa. Isto significa que, para este uso, o esquema de irrigação considerou-se como o praticado atualmente. Perímetros irrigados com valores econômicos baixos diminuíram a alocação total para este uso (irrigação para os perímetros). Sabe-se que cada setor de uso de água aqui considerado é composto por diversos agentes que utilizam água com diferentes manejos e eficiência. No entanto, muitos dos valores analisados e calculados neste trabalho foram sobre a média de cada setor/uso. Análises agregadas por uso são necessárias, principalmente, na política de gestão de recursos hídricos adotada no Brasil, mas podem dificultar a aplicação e a efetividade dos instrumentos/ incentivos de gestão a ser propostos, no objetivo de levar à eficiência econômica. A Figura 83 mostra o comparativo dos usos nos cenários. A análise dos principais usos é detalhada nos próximos capítulos.

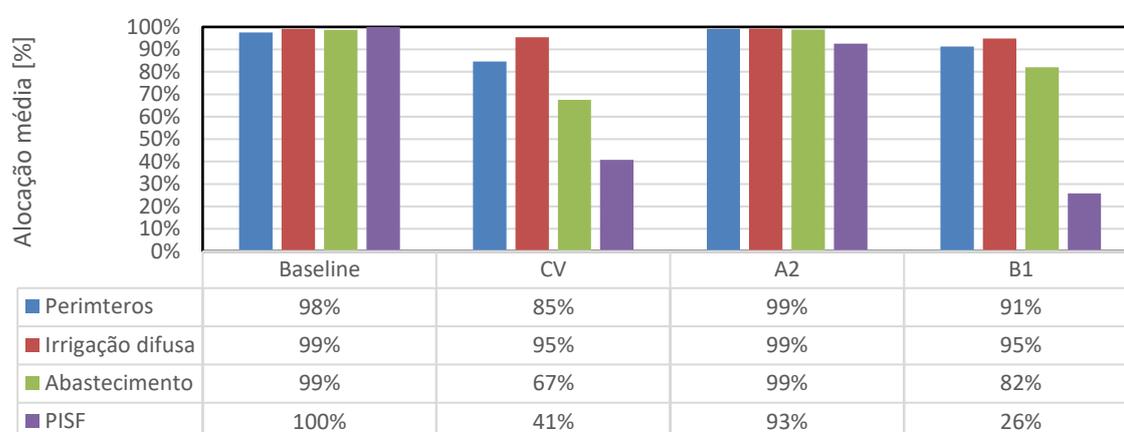


Figura 83 – Comparativo da alocação de água dos usos consuntivos de água nos cenários

Pode ser observado, que a escassez de água (cenário CV e B1) foi, na sua maior parte, imposta ao PISF e, em segundo lugar, ao abastecimento dos municípios. Na medida em que a disponibilidade de água diminui, as alocações ótimas para irrigação reduzem-se, mas são o PISF e o abastecimento humano os usos a quem são impostas as maiores reduções.

5.4.5.1 Irrigação

Os resultados dos principais perímetros públicos de irrigação são apresentados na Figura 84. Essa figura mostra a água alocada para perímetros públicos de irrigação nos diferentes cenários analisados. Pode-se observar que a alocação de água aumenta com a disponibilidade hídrica de

forma diferente, dependendo do projeto de irrigação. Principalmente, perímetros com cana-de-açúcar (Tourão) recebem maiores percentuais de água alocada, mesmo representando demandas de água mais elevadas do que os perímetros que têm frutas como cultivo principal.

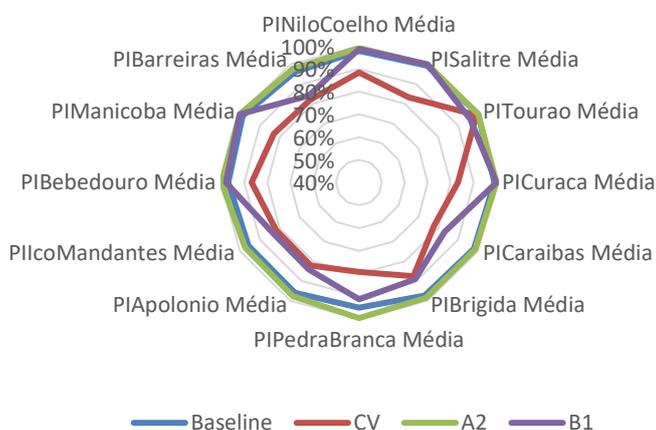


Figura 84 – Alocação média de água para perímetros irrigados nos cenários

A comparação entre as regiões de Petrolina, Juazeiro e Itaparica³⁰ mostra como as diferentes regiões de irrigação, representadas pelos perímetros públicos que as mesmas contêm, apresentam diferentes valores na alocação ótima. A Figura 85 mostra a comparação das alocações de água para as regiões de irrigação Petrolina, Juazeiro e Itaparica. A região de Petrolina teve a maior alocação de água, devido aos maiores benefícios econômicos nos cenários futuros. No cenário de *Baseline*, Juazeiro tem maior produtividade e custos relativamente baixos, incluindo o custo da água, em relação à Petrolina. Portanto, o valor econômico da água (benefício marginal) é maior e mais água é alocada. Os projetos de irrigação, na região de Itaparica, têm valores econômicos menores e, portanto, recebem menos água na solução ótima, em todos os cenários.

³⁰ Perímetros públicos na Região Petrolina: Nilo Coelho e Bebedouro; Região Juazeiro: Salitre, Tourão, Curaçá, Manicoba, Mandacaru; Região Itaparica: Brígida, Pedra Branca, Caraíbas, Apolônio Sales, Iço Mandantes, Barreiras

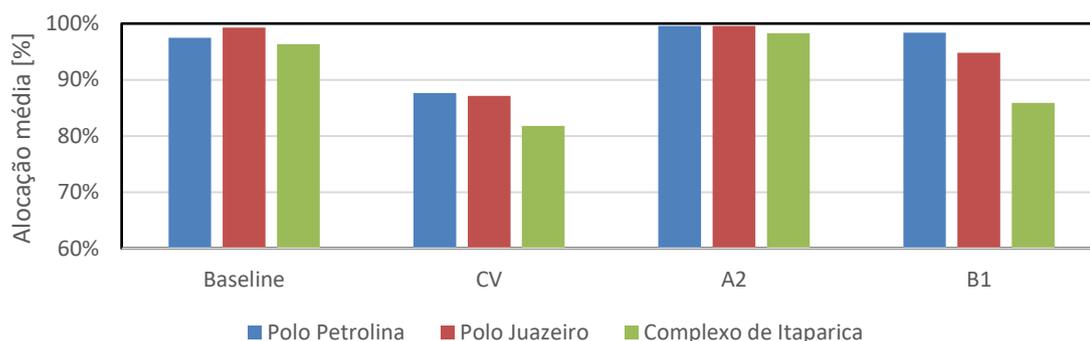


Figura 85 – Alocação média de água por região e cenários

No caso da irrigação difusa, não houve alterações no mix de culturas ou das áreas irrigadas nos cenários futuros. Por isso, a alocação diferencia-se entre os cenários principalmente, devido à disponibilidade hídrica e o trade-off entre os outros usos. A Figura 86 mostra a alocação média durante os períodos simulados. Pode ser observado que, nos cenários secos (CV/B1), três municípios Lagoa Grande, Abaré e Petrolina obtiveram menos água alocada.

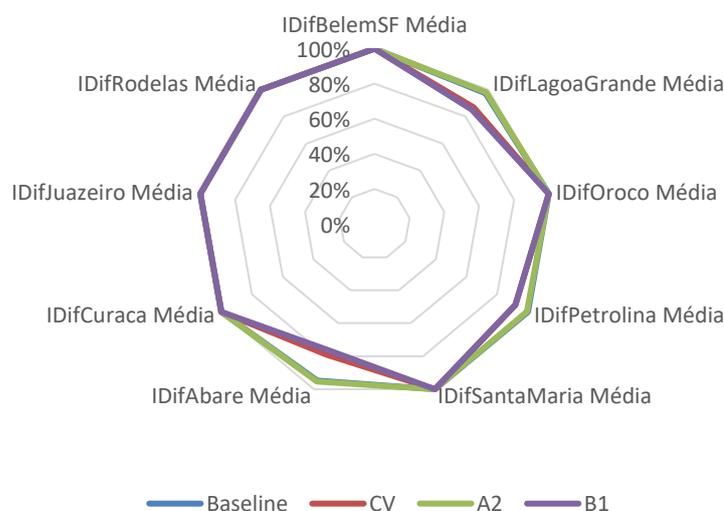


Figura 86 – Alocação média de água para irrigação difusa (por município) nos cenários

No caso de Lagoa Grande e Abaré menores valores econômicos resultaram em uma alocação menor para a irrigação difusa durante períodos secos, nesses dois municípios.

5.4.5.2 PISF

No cenário *Baseline* (Referencia), o PISF (com apenas as demandas para abastecimento humano) obteve 100% de água alocada durante todo período, já nos cenários secos (CV, B1) a média alocada para os eixos foi menor do que 50%. O cenário úmido (A2), com expansão na

bacia doadora e receptora, mostrou uma alocação elevada (>90%) durante o período. A Figura 87 mostra alocação para o PISF nos cenários simulados.

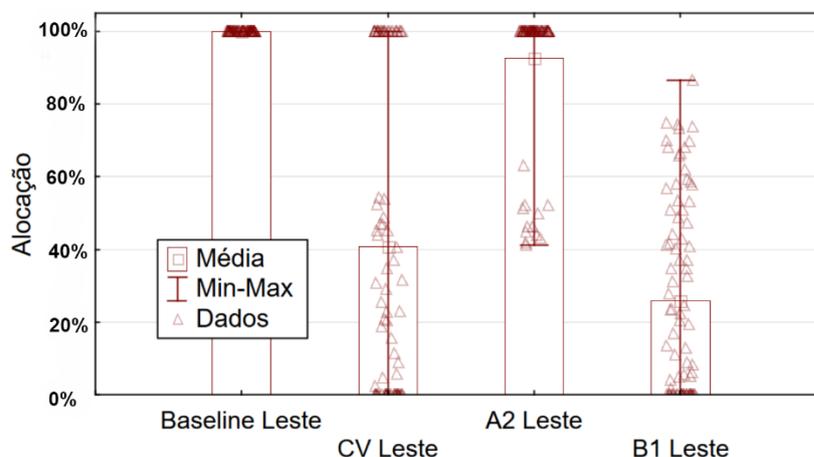


Figura 87 – Alocação de água PISF nos cenários (Box Plot)

A curva de demanda para o PISF teve um valor econômico relativamente alto na alocação de 100%, porém os valores para as menores quantidades alocadas cresceram pouco. Isto resultou em *trade-off* entre os usos na bacia doadora e receptora, acontecendo numa forma mais intensa em cenários secos, sendo a favor dos demais usos consuntivos (além do PISF), na própria bacia doadora. A alocação média para os usos consuntivos, na bacia doadora, foi de 82% e 89%, no cenário CV e B1, respectivamente (ver Figura 83, na página 154). As alocações para o PISF afetam todos os usuários na bacia doadora, principalmente, em cenários secos. Além das usinas hidroelétricas, os perímetros irrigados têm custos de escassez elevados com o PISF. A Figura 88 mostra a diferença dos custos em relação à referência em cada cenário.

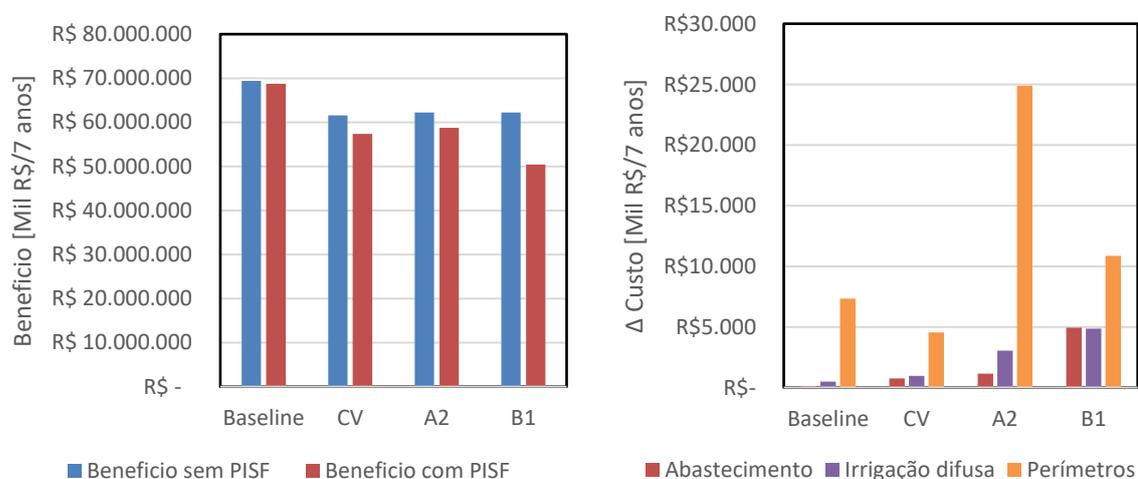


Figura 88 – Diferença nos benefícios das hidroelétricas e dos custos de usos consuntivos na bacia doadora com e sem PISF nos cenários na solução ótima

Observa-se que o *trade-off* principal da alocação de água para o PISF, em valores absolutos, está entre os perímetros irrigados e a produção hidroelétrica. No caso do cenário A2, que representa uma expansão das áreas irrigadas na bacia doadora e receptora, os custos de escassez aumentaram para ambas as bacias, 1,32 bilhões para a bacia receptora e 100,5 milhões para as bacias receptoras (custos usos consuntivos) com a introdução do PISF.

5.4.5.3 Abastecimento

A alocação para o abastecimento dos municípios foi mais reduzida do que a quantidade alocada para o uso da irrigação, durante períodos secos. A Figura 89 mostra a alocação de água, em todos os cenários, para o abastecimento nos municípios no SMSF.

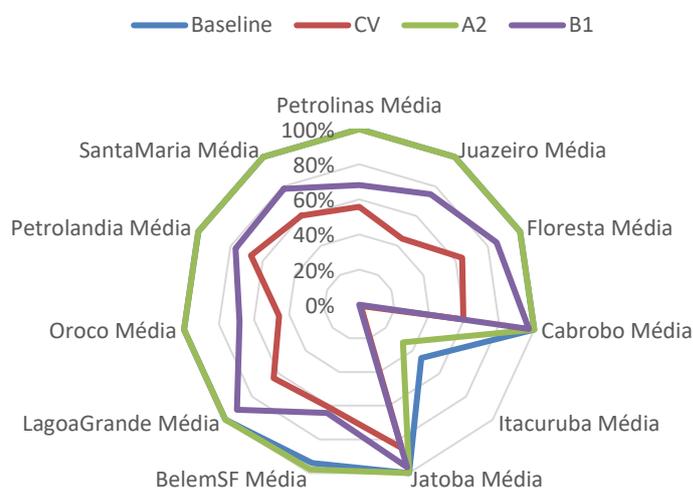


Figura 89 – Alocação média de água para abastecimento municipal nos cenários

No caso de prioridade para abastecimento humano, que utiliza, ao invés das curvas de demanda, uma demanda fixa (100%), pôde ser observado que o uso para irrigação é o principal ‘pagador’ da política que prioriza o abastecimento humano. Esse aspecto tende a se agravar em cenários secos. A Figura 90 mostra os custos de escassez para os outros usos quando a prioridade para abastecimento humano é estabelecida em relação a cada referência associada.

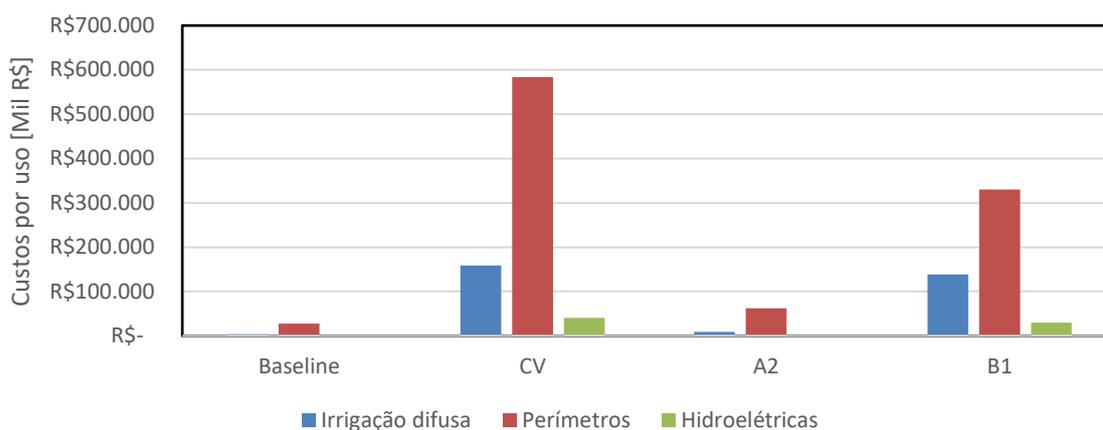


Figura 90 – Custos para os outros usos de água da regra prioridade abastecimento nos cenários

5.4.5.4 Hidroelétrica

A principal competição entre a produção elétrica e os usos consuntivos (abastecimento humano e irrigação) pode ser observada na Figura 91, que mostra as diferenças dos custos e benefícios para os dois usos em relação à redução da energia assegurada. É importante lembrar, que a energia assegurada entrou na função objetivo, que é uma minimização dos custos, associada a um valor que as usinas têm que pagar caso elas não atendam com a produção da energia assegurada. Além disso, as vazões afluentes e as vazões mínimas defluentes dos reservatórios são diferentes, nos cenários analisados, e influenciam nos custos e benefícios em cada um deles.

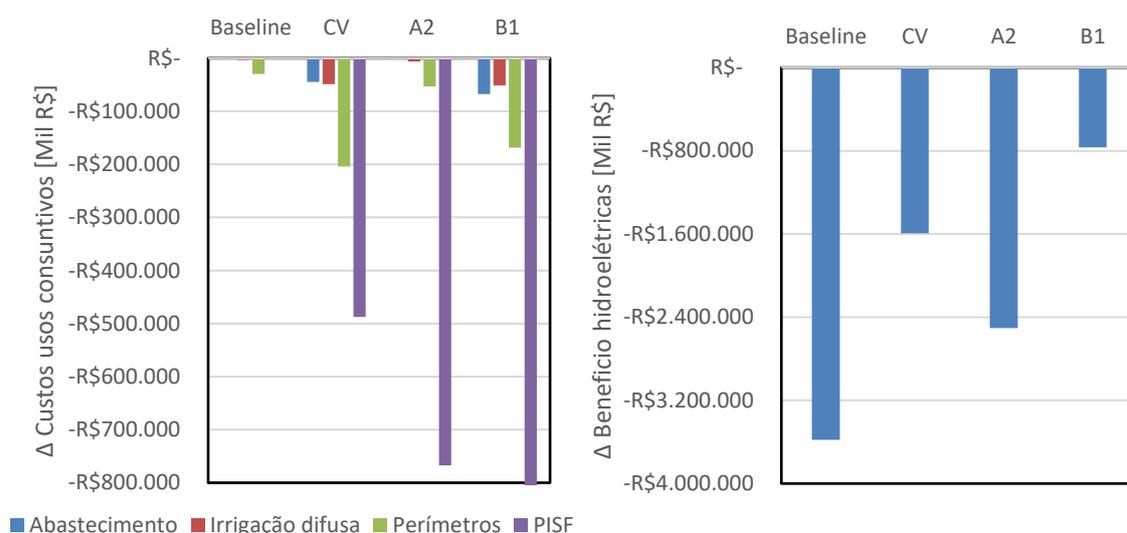


Figura 91 – Diferença nos custos dos usos consuntivos e benefícios das hidroelétricas em relação à alteração de energia assegurada nos cenários simulados

Principalmente, o PISF mostrou/ mostrará uma intensa competição com a produção hidrelétrica, ressaltando-se que a demanda de água do PISF, em cada cenário, foi diferente. O *trade-off* foi,

principalmente, entre a energia assegurada e o PISF, apesar dos demais usos consuntivos, e suas respectivas demandas, terem obtido menos alocação em função da energia assegurada.

5.4.5.5 Manutenção dos ecossistemas

Os custos das regras ambientais: *Hidrograma Ambiental*, *Controle de Nível* e *Capacidade reduzida*, podem ser observados na Figura 92. Os valores mostram os custos para todos os usos agregados, no SMSF, em relação à referência (sem regra ambiental) e a disponibilidade de água durante o período estudado, em cada um dos cenários. Pode ser observado que o *Hidrograma Ambiental* obteve um custo mais elevado durante períodos mais secos (cenários CV e B1), sendo o custo médio de R\$ 0,008/m³. Ao contrário, a opção *Controle de nível* gerou mais custos para os demais usos durante os períodos com maior disponibilidade, também com um custo médio de R\$ 0,008/m³. Já a regra da *Capacidade reduzida* obteve um custo bem mais elevado em comparação aos demais cenários, sendo o custo médio de R\$0,03/m³.

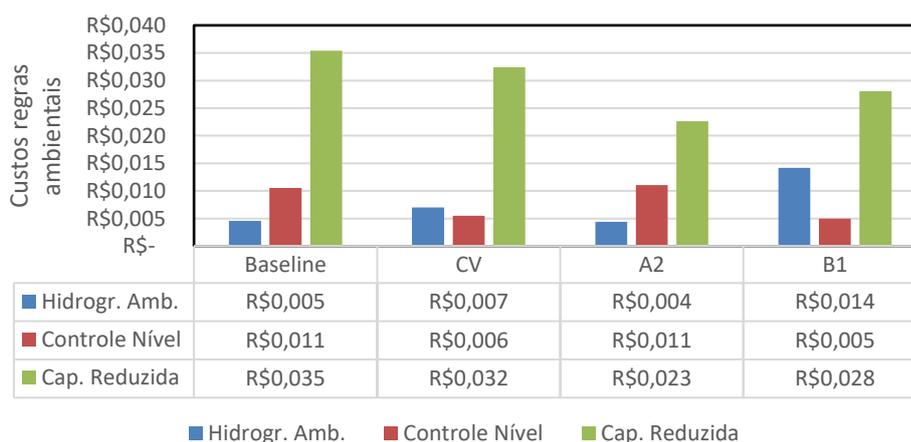


Figura 92 – Custos das regras ambientais em relação à disponibilidade hídrica nos cenários simulados

A restrição da vazão mínima de 1.300m³/s, a jusante de Sobradinho e na foz, também tem um custo para os usos no SMSF. No caso do cenário *Baseline*, esse custo foi de R\$ 0,001/m³, em comparação com a vazão mínima de 700 m³/s e no cenário A2, esse custo³¹ foi de R\$ 0,002/m³. Em comparação, os custos para o controle de cheia foi de R\$ 0,006/m³, no cenário CV, e R\$ 0,005 /m³, no cenário B1³². É possível entender que, a admissão da redução da vazão mínima é

³¹ Considerando os custos para os usos no SMSF e a disponibilidade média de água durante o período (diferença custos com a restrição da vazão mínima de 700m³/s e 1.300m³/s)

³² Diferencia dos custos para os usos sem e com a restrição do controle de cheia

pelo custo mais admissível. Entretanto, a demanda ecológica não foi considerada com uma curva de demanda, ou um valor econômico que pode beneficiar o sistema.

5.4.5.6 Preço sombra - vazão efluente Sobradinho

O preço sombra da vazão efluente, a jusante do reservatório de Sobradinho, mostra o efeito nos custos e benefícios da função objetivo, de uma unidade adicional (1 m^3) liberada a jusante da barragem (Figura 93). Os resultados mostram que o principal impacto neste preço-sombra é o da disponibilidade hídrica durante o período. Nos cenários secos (CV e B1), o preço sombra desta defluência de Sobradinho, sob todas as regras operacionais é elevado. Já, nos períodos mais úmidos, o maior impacto é o das próprias regras ambientais (*Hidrograma ambiental, Controle de Nível e Capacidade reduzida*). Ressalta-se que, nos cenários secos, a vazão mínima foi reduzida para encontrar uma solução viável, tendo o preço sombra apresentado um valor muito mais elevado quando foi usada a restrição de $1.300 \text{ m}^3/\text{s}$.

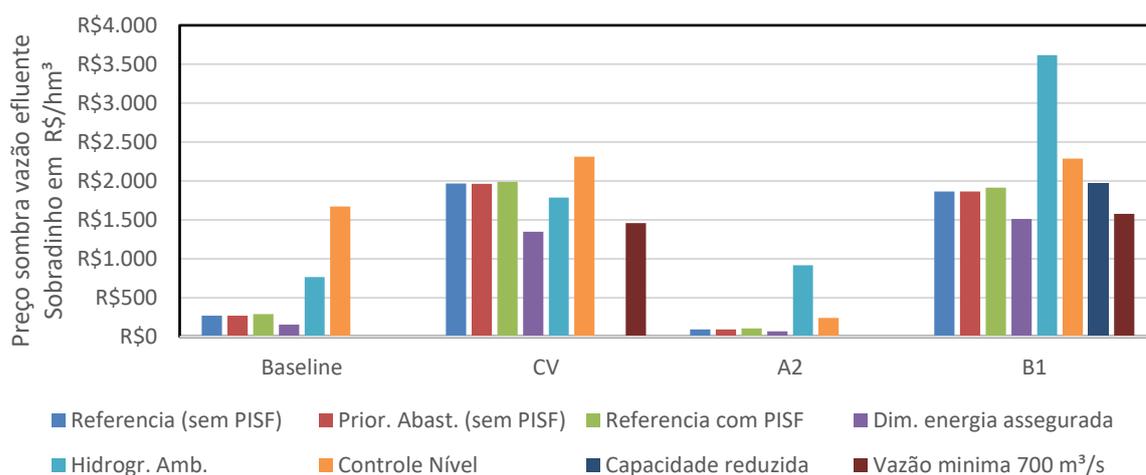


Figura 93 – Preço sombra vazão efluente reservatório Sobradinho

5.5 SISTEMA DE APOIO À DECISÃO (SADE)

O SADE (Sistema de apoio à decisão) é desenvolvido dentro da estrutura selecionada usando a ArcGIS JavaScript API³³ e ArcGIS for Server (ESRI, 2015). A Figura 94 apresenta o estado atual do esquema conceitual do SADE em desenvolvimento.

³³ API (do inglês: "Application Programming Interface") são um conjunto de classes da programação para acesso da plataforma (ArcGIS Server) baseado na Web

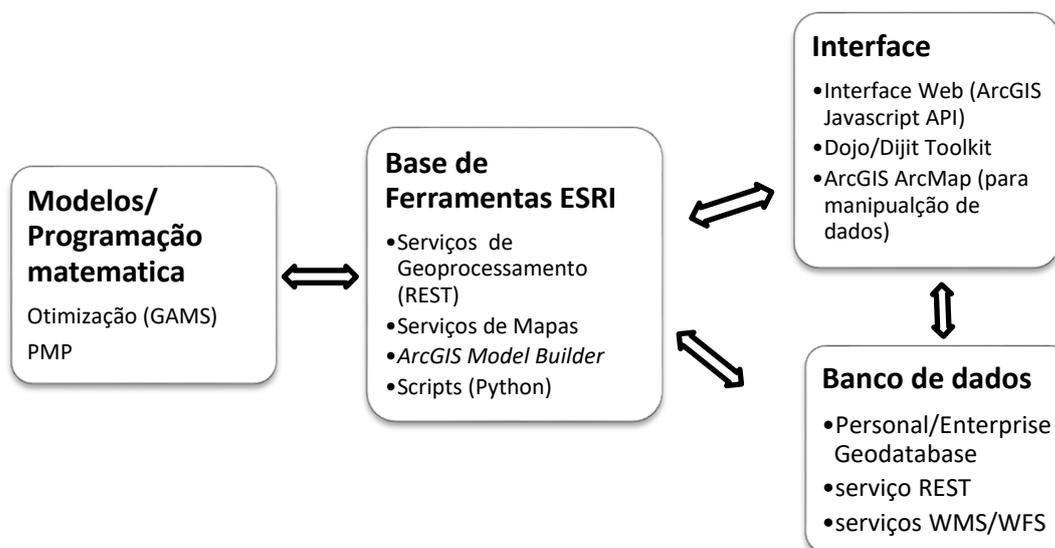


Figura 94 – Esquema conceitual do SADE em desenvolvimento

A interface (Aplicativo Web) fornece os dados de entrada para a base de ferramentas/modelos, bem como apresenta os resultados dos modelos/programação matemática. A base de ferramentas ESRI contém, principalmente, serviços de geoprocessamento, que são essenciais para apoiar a modelagem hidro-econômica. Para gerenciar os dados e preparar os mesmos para o modelo de otimização, foi desenvolvido, inicialmente, um banco de dados relacional em Microsoft Access. Um banco de dados relacional consiste de uma coleção de estruturas de dados com relações entre as tabelas. As relações são utilizadas para estruturar o banco de dados, relacionando as tabelas e fornecendo restrições da integridade entre as mesmas. As vantagens do banco de dados são a formatação consistente dos dados, a redução da redundância, evitar a inconsistência, manter a integridade dos dados e reforçar os padrões.

O esquema, a seguir, mostra as tabelas e relações utilizadas no banco de dados desenvolvido (Figura 95).

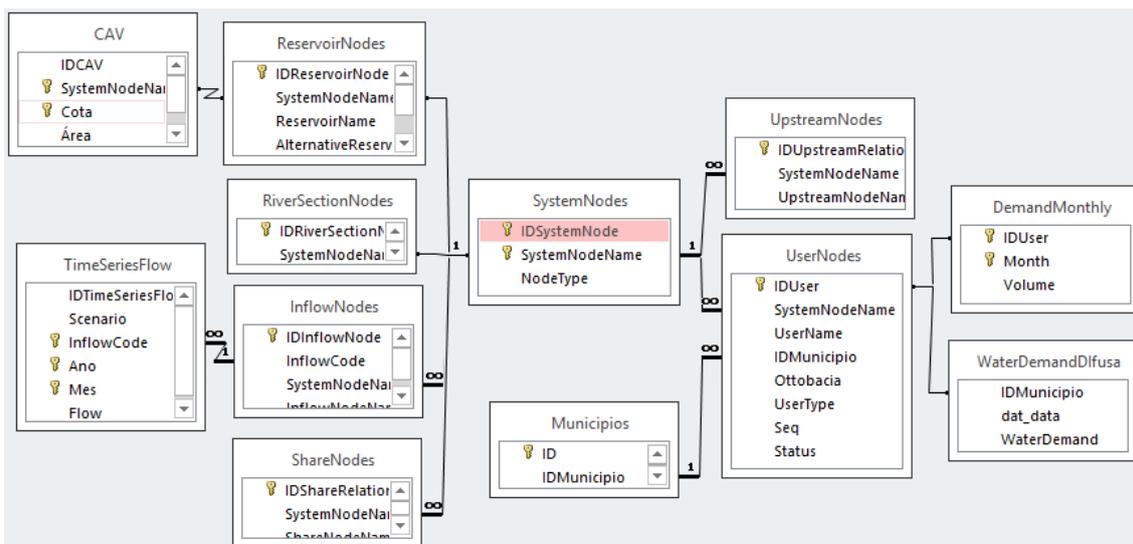


Figura 95 – Retrato -Relações banco de dados – Nós e links no banco de dados

As informações salvas no banco de dados são diretamente acessadas pelo modelo GAMS. O modelo é gerado a partir dos registros no banco de dados. Desta forma, o SADE é integrado a base de modelos com uma interface baseada num aplicativo web, neste caso, o ArcGIS Javascript API com o ‘Personal Geodatabase’ ou ‘Enterprise Geodatabase’ (ESRI, 2006).

Além da possibilidade de criar toda estrutura do modelo (nós e links), no aplicativo web (Figura 98), podem também ser utilizados formulários para a descrição dos dados em função do tipo de nó. A Figura 96 mostra formulários para a definição e gerenciamento de nós.

F-Nós

ID Nó	Nome Nó	Tipo Nó
1	Sobradinho	ReservoirNode
2	R01	RiverSectionNode
3	R02	RiverSectionNode
4	R03	RiverSectionNode
5	R04	RiverSectionNode
6	R05	RiverSectionNode
7	R06	RiverSectionNode

F-Usuários

IDUsuário	Nome	IDMunicipio	Ottobacia	IDNó
1	PINiloCoelho	2611101		Sobradi
2	PISalitre	2918407		R01
3	Petrolinas			R02
4	Juazeiro			R02
8	PITourao	2918407		R03
9	PIPontal	2611101		R05
10	PIMandacarú	2918407		R03

Figura 96 – Formulários de nós no SGDB (Access)

Através de consultas (SQL), são obtidos os valores econômicos e hidrológicos, como dados de entrada para o modelo de otimização ou PMP. A consulta a seguir, por exemplo, calcula os benefícios e custos da atividade agrícola nos municípios. A Figura 97 mostra o resultado da consulta. Esses dados são, por exemplo, utilizados para criar as curvas de demanda.

IDMunicipio	SomaDeid_c	Costs	Benefit	LiqBenefit
2601607	1279273	R\$ 9,590,957	R\$ 31,260	R\$ 21,669
2603009	1266579	R\$ 13,503,637	R\$ 67,022	R\$ 53,518
2608750	1746813	R\$ 47,730,051	R\$ 138,370	R\$ 90,640
2609808	1859793	R\$ 9,362,415	R\$ 27,096	R\$ 17,734
2611101	1979738	R\$ 28,844,732	R\$ 88,876	R\$ 60,031
2612604	1859810	R\$ 19,769,908	R\$ 55,152	R\$ 35,382
2909901	1630407	R\$ 11,913,966	R\$ 21,658	R\$ 9,744
2918407	1743407	R\$ 52,912,249	R\$ 116,870	R\$ 63,958

Figura 97 – Consulta no SGDB (Access)

A Figura 98 mostra a interface do aplicativo no Web em desenvolvimento. O usuário pode criar a rede de nós e links na forma interativa e alimentar o banco de dados. Além disso os usuários podem executar tarefas de geoprocessamento, como delimitar áreas ou bacias hidrográficas.

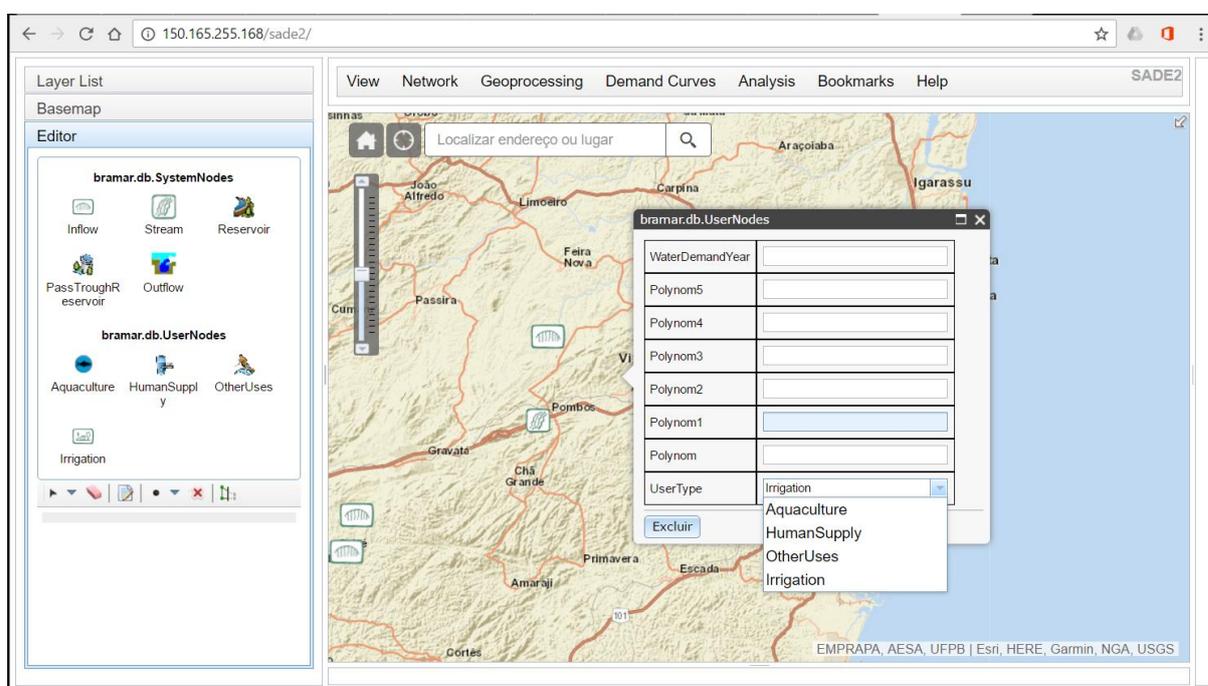


Figura 98 – Interface SADE 2.0 – ArcGIS Javascript API

6. CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

Ao longo deste estudo, foi desenvolvido um modelo hidro-econômico de otimização e o mesmo foi utilizado na identificação e análise de uma alocação econômica ótima dos recursos hídricos para a área de estudo do Sub-Médio do rio São Francisco. Com o uso desse modelo, foram simulados e analisados vários cenários climáticos e mudanças de uso de solo, no contexto do uso de diversas alternativas operacionais, regras institucionais e ambientais dos manejos dos reservatórios no SMSF, para atender os principais usos da água. As principais conclusões deste estudo são apresentadas, a seguir.

O SADE, apesar de não concluído, apoiou a análise de cenários e de regras operacionais no modelo hidro-econômico. Entretanto, com os recursos atualmente implementados, o tempo para analisar efeitos que precisavam de muitas iterações, como por exemplo a análise de sensibilidade de um parâmetro, ainda era grande e impeditivo. Espera-se, que no futuro o SADE represente uma ferramenta importante para o gestor, decisor ou *stakeholder*, ao facilitar a análise de vários aspectos da gestão das águas.

6.1 ANÁLISE E DIAGNÓSTICO DO MODELO HIDRO-ECONÔMICO

O trabalho identificou a alocação econômica ótima de água, sob regras operacionais de reservatórios, em diferentes cenários de uso do solo e de clima, utilizando curvas de demanda, ao invés de requerimentos ou demandas fixas para os usos consuntivos. Esta seria a melhor alocação dos recursos hídricos escassos entre os setores econômicos, de forma que a água seria realocada de usos com menor valor para aqueles com maior valor. O método proposto consiste na resolução de um problema de otimização, que maximiza os benefícios econômicos advindos do uso da água e minimiza os seus custos de escassez. O modelo hidro-econômico desenvolvido conseguiu representar bem as decisões tomadas (observadas) recentemente e no passado (cenário *Baseline* e CV), considerando que não foram introduzidas políticas ou regras para tais, como regras operacionais dos reservatórios operados pela ONS/CHESF/ANEEL. Neste trabalho, foram obtidos numa escala de tempo adequada, os impactos da escassez de recursos hídricos, diante de diferentes cenários de ofertas e demandas de água. Com essa abordagem, foi possível identificar os custos econômicos das regras para os usos múltiplos e identificar *trade-offs* entre objetivos considerados conflitantes, como demandas ambientais, irrigação e geração de energia.

As curvas de demanda de água obtidas neste trabalho, mostraram-se diferentes, em função das características dos usuários e das mudanças nas condições impostas (alterações na demanda e parâmetros de produção). O PMP se adaptou bem aos dados obtidos para os perímetros localizados no SMSF. Os resultados do método de expansão de ponto mostraram algumas semelhanças nas ordens de grandeza dos valores das curvas de demanda obtidas para a mesma área de estudo, utilizando o PMP.

O método de expansão de ponto é bem mais simples de se aplicar do que o PMP e ainda menos intensivo em dados. Porém deve-se ter clareza acerca de suas limitações. Por exemplo, o uso de uma elasticidade-preço constante e o uso do custo médio no ponto de operação como uma proxy do custo marginal. Para esta última limitação, ressalta-se ser o caso da irrigação difusa uma exceção. Como, em geral, a irrigação difusa é desenvolvida por iniciativas privadas (grandes e pequenos irrigantes), espera-se mesmo que esses agentes estejam operando num ponto em que o custo médio seja igual ao marginal. Em relação à limitação do uso de valores de elasticidade-preço constantes, ressalta-se a possibilidade de verificação dos valores de elasticidade-preço, que no caso do PMP são variáveis e podem ser facilmente obtidos. Estes valores podem auxiliar na verificação de consistência dos valores ora utilizados. Ademais ressalta-se a maior confiabilidade nos resultados, que impõem aos usuários reduções na alocação de água não muito distantes do ponto de operação utilizado na obtenção da curva de demanda respectiva.

Os resultados mostram que os perímetros irrigados, localizados no SMSF (principalmente na região Petrolina e Juazeiro), apresentam valores de receita bruta por hectare cultivado elevados, estando de acordo com estudos feitos para a cobrança pelo uso dos recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio São Francisco (ANA, 2008). Entretanto, os perímetros irrigados no Complexo Itaparica mostraram valores econômicos constantemente menores, que os outros usos têm que subsidiar. A melhoria do valor econômico destes perímetros deve ser estimulada, e pode ser alcançada através de incentivos ou instrumentos de regulação.

Apesar dos sistemas de saneamento dos municípios terem maiores valores de água cobrados em relação à irrigação, muitos municípios mostraram ainda um benefício marginal relativamente baixo referente ao valor econômico de água de outros usos. Os municípios ainda podem melhorar o faturamento e tecnologias (para reduzir as perdas) dos sistemas de abastecimento. Embora as quantidades de água utilizadas sejam relativamente pequenas em comparação aos outros usos, as melhorias também devem ser buscadas, principalmente no contexto do PISF, que aumenta a concorrência ou *trade-off* para este uso.

A hidroeletricidade apresenta o principal *trade-off*, com os maiores demandantes de águas, que no futuro deverá ser o PISF junto aos grandes perímetros irrigados. A produção de energia é impactada diretamente pelas retiradas destes usos. Estudos de energia assegurada devem levar em conta as mudanças do uso de solo e clima, num contexto das demandas externas (PISF), o que aumentará a complexidade da operação e alocação entre os usos.

6.1.1 Cenários

A utilização de cenários permitiu a incorporação da incerteza, no contexto de mudanças climáticas e do uso do solo. A disponibilidade de água teve uma variação grande entre esses cenários, induzida por vezes pelo crescimento da demanda ou pela diminuição dos valores de oferta. Os resultados mostraram um aumento na competição entre os principais usos preponderantes no SMSF: a produção hidroelétrica e a irrigação. Além disso, um aumento na competição entre diferentes projetos de irrigação, com um crescimento na alocação de água para perímetros com áreas significativas de cana-de-açúcar. Os cenários futuros utilizados na região, com aumentos na demanda para agricultura irrigada, mostraram também valores econômicos (benefícios marginais) maiores da água, que junto com uma menor disponibilidade hídrica, resultaram em maiores custos de escassez para a agricultura, especialmente quando introduzidas as demandas ecológicas.

O cenário A2 representou um grande aumento das áreas irrigadas e do cultivo de cana de açúcar na área de estudo, juntamente com uma maior disponibilidade hídrica, que de uma certa forma conseguiu equilibrar o balanço hídrico, ou seja, o cenário não se mostrou tão crítico e pode ser entendido como relativamente otimista. Essa condição de maior disponibilidade hídrica, introduzida através do MAgPIE, resultando em aumento de áreas irrigadas, tem uma grande incerteza associada, no contexto do SMSF. A região tem uma variabilidade climática elevada e muitas incertezas na demanda hídrica real das culturas irrigadas, que normalmente crescem durante períodos de estiagem, podendo colocar o sistema em níveis de stress elevado. Isto ocorreu no cenário B1, que apesar de simular um crescimento menor na demanda para irrigação, também simulou pouca oferta de água.

Com o crescimento das áreas irrigadas, os valores econômicos da produção de energia deixaram de ser significativamente maiores do que os valores associados a irrigação. Por outro lado, não há incentivos para a eficiência no uso da água para a irrigação. Por exemplo, a expansão dos perímetros irrigados e o crescimento da alocação econômica ótima de água para os perímetros, cujo cultivo principal é a cana-de-açúcar no cenário A2, mostra que os incentivos econômicos

atuais (custos da água baixos, produtividades e retornos econômicos altos de culturas com elevados requerimentos de água) devem levar a aumentos significativos na demanda por água para a irrigação. Caso não se apliquem políticas que levem a eficiência econômica, o crescimento das áreas irrigadas e o cultivo de culturas intensivas em água pode ocorrer rapidamente nesta região, especialmente nas duas próximas décadas do século (até 2035). Este caso é mais grave, quando se considera que a área de estudo, frequentemente, apresenta problemas de escassez hídrica em usos prioritários e um desenvolvimento da irrigação dessa forma pode aumentar, ainda mais, os conflitos ao longo prazo. Deve ser considerado, também, que as projeções das mudanças climáticas mostram reduções de disponibilidade hídrica na região, mais significativas, no médio e longo prazo (entre 2050 e 2100), principalmente, no cenário A2.

Os cenários B1 e CV mostraram períodos mais críticos, em termos de disponibilidade hídrica, em um contexto de demandas moderadas (em comparação ao cenário A2). O principal trade-off, nestes cenários, foi entre os usos consuntivos e a vazão ecológica. A vazão mínima ecológica em Xingó (do plano atual, igual 1.300 m³/s) não pôde ser atendida em ambos os cenários, mesmo sem alocar água para os usos consuntivos do SMSF. Como o modelo de alocação restringiu-se aos usos do Sub-Médio e não da bacia do São Francisco toda, isso significou, que os usos antrópicos não causaram o problema. Pode-se observar, através da análise das vazões naturais (ONS, 2015), que essa vazão mínima na foz, foi também, frequentemente, menor do que o valor estabelecido. Talvez, seja possível dizer que a capacidade do reservatório é insuficiente para regularizar uma vazão mínima de 1.300 m³/s, em períodos de estiagem prolongados. Devem ser consideradas, também, as perdas por evaporação nos reservatórios, mesmo no volume morto, as quais são muito elevadas, principalmente, no reservatório Sobradinho. Os custos/perdas do controle de cheias utilizado influenciam também nesta disponibilidade hídrica.

Os resultados mostraram que a variabilidade climática (cenário CV) apresentaram um maior impacto do que as projeções das mudanças climáticas e do uso de solo, no SMSF. Mesmo com crescimento das áreas irrigadas no cenário A2 e B1, juntamente com uma menor disponibilidade no cenário B1, o cenário CV (seca atual) foi o mais crítico.

Os cenários de mudança climática utilizados não mostraram períodos prolongados de seca no futuro próximo, diminuindo, assim, o estresse para os usuários em relação a seca atual (CV), mesmo com a mudança no uso do solo aumentando a demanda hídrica. Os resultados dos cenários de mudanças climáticas (A2 e B1) mostraram que com mais projetos de irrigação

instalados e com o mix de cultivos como projetado pelo MAgPIE, os benefícios econômicos associados à irrigação tornam-se mais competitivos em relação à produção de energia hidroelétrica. A concorrência por água entre os projetos públicos de irrigação nestes cenários (A2 e B1) aumenta. A alocação econômica ótima de água beneficia os usuários com maiores valores econômicos da água. Altos rendimentos e baixos custos fazem com que a solução ótima favoreça os usuários de irrigação.

Particularmente, o uso para a produção de energia hidrelétrica, com seus altos benefícios e baixos custos, é favorecido na alocação econômica e, portanto, tem um impacto maior para alocação de água dos outros usos, em todos os cenários, mas também depende do preço da energia. Mesmo com alterações significativas das vazões mínimas e vazões ecológicas, crescentes usos de água, mudanças de clima e mudanças do uso do solo, as usinas hidroelétricas conseguem manter um benefício, relativamente, elevado em comparação aos outros setores. Principalmente, a energia assegurada aumenta o stress para os outros usos. Com crescimento de energia eólica (KOCH, SILVA, *et al.*, 2017), esse stress pode diminuir para os recursos hídricos, principalmente, no contexto das energias asseguradas e a vazão ecológica no SMSF. É necessário levar em conta, também, que o benefício calculado para a energia não usa uma curva de demanda, ou seja, o valor do PLD muda apenas com mudanças na disponibilidade de água e independente da alocação para a produção de energia.

As curvas de demanda de água para a irrigação utilizadas nos cenários futuros foram estabelecidas utilizando os parâmetros atuais da produção agrícola (custos de produção, demanda hídrica da cultura) atualizados, com taxas de crescimento do modelo global e projeções futuras de mudança do uso da terra devido às mudanças climáticas. A variação nos custos relacionados à água (por exemplo, preços mais altos de água) podem ser simulados para obter novas curvas de demanda e avaliar as mudanças na alocação econômica ótima. Estudos como esses devem apoiar o desenho e a gestão de políticas públicas de recursos hídricos na região, bem como a avaliação das mesmas em relação a sua efetividade, diante de novas condições climáticas. Os impactos econômicos das restrições ambientais e institucionais, nos cenários atuais e futuros, mensurados como resultado da modelagem hidro-econômica, devem também auxiliar na decisão de implementação de restrições institucionais e auxiliar na mediação de conflitos na região.

6.1.2 Regras de gestão de reservatórios

A maioria das regras operacionais dos reservatórios da região analisadas mostraram grandes impactos para os usos múltiplos na bacia. Os custos de escassez para a manutenção dos ecossistemas e restrições ambientais são, relativamente, altos e são impostos, principalmente, aos usuários de irrigação. Além disso, as restrições institucionais, como as prioridades para o consumo humano, os limites mínimos de vazão a jusante de reservatórios e quantidade de água outorgada para o PISF, mostraram impactos significativos sobre os custos e benefícios dos dois principais setores econômicos (irrigação e geração de energia) do SMSF. Em termos absolutos e percentuais, os custos de escassez para os usuários de irrigação aumentam mais do que para os demais usuários, também em relação às restrições institucionais e ambientais.

Para definir planos, regulamentações ou iniciativas, todas as restrições aqui analisadas podem ser refinadas. Por exemplo, as propostas para restrições ambientais, tais como o *Hidrograma ambiental*, podem ser discutidas considerando ainda os aspectos ecológicos, mas introduzindo os valores dos custos econômicos para os diferentes usuários, em diversos cenários climáticos (úmido, normal, seco), utilizando a modelagem hidro-econômica. Ressalta-se que, no modelo hidro-econômico, a restrição do *Hidrograma ambiental* mostrou-se inviável durante os períodos secos em termos hidrológicos, e foi usado um ajuste das curvas do *Hidrograma ambiental* (seção 5.4.2.2 Figura 71, na página 144)

Às restrições ambientais ainda se dão, na prática, pouca prioridade. Por exemplo, durante o período seco (2012-2016) atual, nenhuma alocação de água para os usos consuntivos foi praticada pela ANA. Ocorreu redução da vazão ecológica mínima estabelecida pelo plano da bacia (CBHSF, 2004), para manter a operação do sistema e atender os usos consuntivos. O resultado do modelo hidro-econômico mostrou também a manutenção da vazão mínima de 1.300 m³/s como sendo inviável no cenário CV e B1. Deve-se ressaltar mais uma vez que usos ambientais e ecológicos podem ser valorados economicamente usando técnicas de mensuração de benefícios intangíveis. Ademais, podem-se associar setores econômicos como o de turismo e lazer a condições ambientais favoráveis e mantidas. A flexibilização da vazão ecológica é almejavável, na melhor hipótese usando uma função de demanda mensal. No modelo hidro-econômico, não foram implementados benefícios econômicos da proteção ambiental. A proteção ambiental foi considerada apenas através das restrições ecológicas.

Os custos da prioridade dada ao abastecimento humano impostos aos demais usos, foram, relativamente, pequenos. Entretanto desempenham um papel importante nos cenários futuros,

diante do desenvolvimento econômico e crescimento populacional simulados. Priorizar um uso pode prejudicar os outros. Na economia, normalmente, rejeita-se a ideia de priorizar ou ranquear usos de água alternativos. Não se pode dizer que o uso de água para abastecimento é sempre mais desejável (ou mais valioso) do que a irrigação, por exemplo. Mesmo tendo o seu abastecimento doméstico garantido, a população precisa de uma fonte de renda ou alimentação. Por exemplo, Griffin (2006) ressalta que protagonistas em debates públicos sobre a água podem proteger a ideia de que a água é universalmente mais desejável em um setor do que outro, mas a evidência econômica não apoia esse pensamento. Ademais a prioridade não incentiva o uso eficiente, por exemplo, no Brasil, o abastecimento humano é prioritário e as perdas no setor são muito elevadas, na média de cerca 50% (SNIS, 2012).

Os benefícios econômicos associados ao abastecimento humano no modelo aqui desenvolvido, considerou apenas os retornos econômicos obtidos com a tarifação de água nos municípios. Retornos de setores econômicos pouco intensivos em água e com multiplicadores de renda e emprego razoáveis, tais como comércio e serviços podem ser incorporados no cálculo de benefícios do abastecimento humano. Isto pode alterar as alocações para o uso doméstico mesmo sem necessidade de prioridades, especialmente se setores mais rentáveis e produtivos, tais como setores de serviços de tecnologia, se desenvolverem nos municípios.

Regras ambientais podem ser integradas na operação dos reservatórios, mas têm um custo elevado para os demais usuários. As regras foram analisadas no contexto de custos e benefícios impostos ou perdidos pelos outros usuários. As restrições propostas das regras ambientais *Controle de Nivel*, *Capacidade reduzida* e *Hidrograma Ambiental* têm impactos muito grandes e não são viáveis em períodos secos. Em períodos úmidos, eles geram um custo muito elevado para os demais usos. Algumas adaptações são requeridas para torna-las viáveis.

Para o PISF, foi adotado uma tarifa relativamente alta, 0,56 R\$/m³, para ser cobrado pela adução às bacias receptoras. A disposição a pagar por esta água, ainda, está na fase de avaliação pelos estados (ANA, 2016d). Os benefícios marginais calculados, neste estudo, obtidos com o uso dessa água mostraram-se apenas pouco acima desse valor a ser cobrado. Igualmente, o valor adotado para a obtenção da curva de demanda deste estudo, para o PISF, para a energia foi bem elevado. Espera-se, que na prática, este valor pago pela energia deva ser inferior, pois deverá ser garantido através de contratos estabelecidos de longo prazo. Da mesma forma, dependendo do uso econômico que se dê a água nas bacias receptoras estes benefícios poderão se elevar sobremaneira e alterar os valores de alocação ótimos mesmo em situações de escassez. Usando os valores mencionados anteriormente, as curvas de demanda resultantes para o PISF usadas

no modelo hidro-econômico, resultaram em alocações ótimas que, durante períodos normais, resultavam em 100% do valor requerido alocado para outras bacias. Já durante os períodos secos e em períodos críticos a quantidade alocada era reduzida. A Figura 99 apresenta a alocação reduzida para o PISF durante um ano seco no cenário A2 e normalizada para 100% da demanda alocada em anos normais. A alocação econômica ótima mostra assim um uso racional de água nas bacias receptoras.

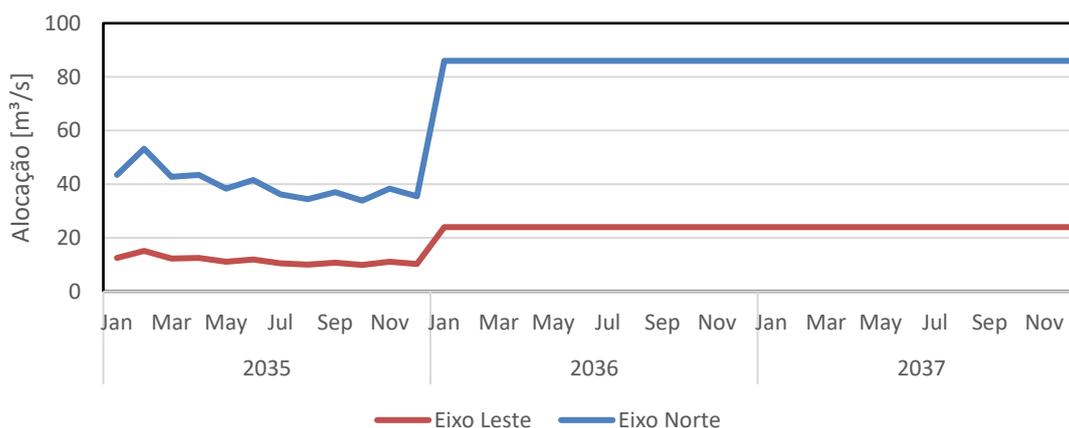


Figura 99 – Alocação de água para o PISF no cenário A2

Com o crescimento das áreas irrigadas e demandas externas (PISF), como projetados pelo cenário A2, mecanismos efetivos de alocação de água devem ser implementados. O *trade-off* entre a vazão ecológica e o uso consuntivo aumenta ainda mais ao se considerar o usuário PISF. A demanda de recursos hídricos na bacia hidrográfica como um todo -a montante de Sobradinho 141,37m³/s e com o aumento no SMSF que resulta em 299,1 m³/s – deve somar 440,5 m³ ou seja, 80,5m³/s mais que a vazão outorgável atual de 360 m³/s, neste cenário (A2). Faz-se necessário, portanto, planejar a alocação de água em nível da bacia hidrográfica de São Francisco. A alocação de água para o PISF, utilizando uma função de demanda, pode apresentar uma alternativa para a operação da transposição durante períodos de escassez. Através de uma curva, consideram-se os custos e benefícios na bacia doadora e nas bacias receptoras, o que deve estimular a racionalidade econômica e evitar o uso não sustentável dos recursos hídricos.

A variação do preço sombra³⁴ da vazão efluente a jusante do reservatório de Sobradinho, apesar de depender muito da disponibilidade hídrica, mostrou que o impacto institucional de restrições ambientais pode ser elevado. As demandas ambientais (*Hidrograma ambiental, Controle de Nível e Capacidade reduzida*), elevaram os preços sombra da liberação de Sobradinho o que

³⁴ Valor marginal da liberação adicional de uma unidade a mais do recurso hídrico pelo reservatório Sobradinho.

resultou em aumentos nos custos de escassez e reduções de benefícios econômicos dos dois principais setores econômicos (irrigação e produção de energia hidrelétrica).

Como já mencionado no parágrafo anterior, os preços sombra da água liberada de Sobradinho tendem a aumentar em situações de maior escassez, e refletem o aumento do valor econômico das vazões efluentes. É importante notar que esse aumento ocorre de uma forma agregada na soma dos custos de todos os usos representados na função objetivo. Isto não impede que alguns dos usos tenham seus custos de escassez reduzidos com a liberação, dependendo da posição em relação ao reservatório. Além disso, mais uma vez ressalta-se que os benefícios econômicos dos usos ambientais não tiveram mensuração na função objetivo, bem como os benefícios dos setores econômicos que podem ser associados ao abastecimento municipal (comércio e serviços).

Quando se garantiu prioridade ao suprimento humano, as liberações adicionais de Sobradinho apresentaram menor valor econômico em relação à referência, pois foram excluídos os custos de escassez do abastecimento humano. Diminuir o limite mínimo da vazão efluente de Sobradinho, mostrou que o preço sombra também é reduzido em relação à referência, confirmando que a partir do nível de liberação de referência (limite inferior de 1.300 m³/s), vazões efluentes adicionais diminuiriam os custos de escassez total na região.

6.2 POLÍTICAS, ESTRUTURAS DE INCENTIVOS E TRADE-OFF

Com o objetivo da Agenda 2030 (PNUD, 2016) em aumentar substancialmente a eficiência do uso da água e garantir retiradas sustentáveis para enfrentar a escassez do recurso, faz-se necessário criar políticas em relação aos perímetros irrigados e outros usuários com menor eficiência econômica, como, por exemplo, os perímetros localizados no complexo de Itaparica. Os mesmos mostraram, atualmente e nos cenários futuros, índices de eficiência mais baixos do que os demais perímetros. Uma possibilidade de política seria incluir na cobrança um coeficiente que leve em conta a eficiência econômica ou o valor econômico da água para o usuário, semelhante ao fator K_t (ANA, 2015b), que leva em conta boas práticas na irrigação e conservação de água. Assim, valores mais altos seriam cobrados para usuários com menores valores econômicos de água.

A escassez de água é, muitas vezes, uma responsabilidade institucional, devido as deficiências na aplicação de instrumentos regulatórios e econômicos. A disponibilidade de água, apesar de ter uma distribuição estocástica, com uma variação e incerteza elevadas sobre os dados, é,

relativamente, bem conhecida. A gestão de oferta (com ampliação de infraestrutura de armazenamento e distribuição), não, necessariamente, assegura e aumenta a disponibilidade. Ela apenas pode transferir a água no espaço e tempo. E ainda mais, leva a um aumento de perdas de água por evaporação. Apesar da importância da gestão de oferta, em regiões com alto índice de aridez, que necessitam de mecanismos para regularizar a quantidade de água ofertada, tem na gestão de demanda através de seus instrumentos regulatórios e econômicos (tais como cobrança, outorgas, enquadramento e restrições institucionais), uma estratégia fundamental. Atualmente, o instrumento de outorgas limita a vazão outorgável em 360 m³/s para a bacia hidrográfica de São Francisco.

A função da demanda de água elaborada para o PISF, como um usuário de água da bacia do SF, com custos elevados de água mostrou, que a quantidade alocada na solução econômica ótima, diminui, drasticamente, em períodos secos. Ao contrário aos usos de irrigação na própria bacia, a solução ótima mantém uma quantidade alocada, relativamente, alta. Neste contexto, uma possível ação na gestão da demanda, durante períodos de escassez, pode ser um aumento da cobrança durante períodos de estiagem para estes usos na bacia. Os valores da cobrança pelo uso da água atual têm pouco impacto para os usos, principalmente os usos para irrigação (ANA, 2008; KELMAN e RAMOS, 2005; VERA, 2014). Para incentivar o uso racional da água, conforme o art. 19º da Lei das Águas, nas regiões de maior aridez da Bacia, onde a água é mais escassa, o seu preço deveria refletir esta escassez. Isto foi representado no modelo para o usuário PISF, ao se considerar os custos elevados para operação do mesmo nas suas curvas de demanda, o que resultou em uma alocação econômica ótima menor para o referido uso. Esse mesmo mecanismo alocativo (cobrança) pode ser aproveitado pelo gestor para diminuir as demandas externas e levar a um uso racional e eficiente da água transferida.

A restrição de quantidade faz-se necessária também nos cenários futuros de expansão, que mostraram uma demanda dos usos consuntivos muito elevada. Atualmente, a outorga limita a vazão outorgável em 360 m³/s para a bacia hidrográfica de São Francisco. Os resultados mostraram, que mesmo com uma disponibilidade de água maior no cenário A2 em comparação aos cenários B1/CV, a demanda excede a vazão outorgável, o que traz a necessidade de restringir a alocação de água. Para limitar os usos, em um contexto de sustentabilidade, é necessário utilizar instrumentos de gestão que sinalizem a escassez aos diversos agentes econômicos/ usuários de água.

Como a água não significa, necessariamente, um vetor que leve ao desenvolvimento e melhoria da vida das pessoas, mas com certeza é um fator limitante para o mesmo, a busca pelo ótimo

econômico deve ser acompanhada de preocupações como equidade e justiça social, assegurando os direitos dos menos favorecidos e, ao mesmo tempo, considerando as restrições ambientais. Isso não significa, necessariamente, em limites/restrições fixas para a alocação de água, por exemplo, um único e constante valor para a vazão mínima na foz de 1.300 m³/s. As restrições e outorgas concedidas têm que representar o regime hidrológico, mas tem de ser acompanhadas de mensurações de retornos e perdas socioeconômicas. Por exemplo, em vez de utilizar valores mínimos para essas vazões de restrição, deveriam se utilizar faixas que respeitassem períodos de estiagem e demandas ambientais. Resultados econômicos e sociais teriam que ser avaliados e serem parte dessas decisões.

Neste trabalho, não foram simuladas diferentes tarifas de cobrança para os usos. Como já mencionado, os valores de cobrança praticados atualmente são, relativamente baixos em relação aos demais custos, ou seja, mudança nesses valores não teriam um impacto elevado nas curvas de demanda. Como são normalmente uniformes para o setor, isto aumentaria o valor econômico para todos os usuários do mesmo setor, pois a cobrança atual não tem um coeficiente que representa a eficiência econômica para diferentes usuários. De qualquer forma, a cobrança pode ser indutora para melhorias de eficiência, como, por exemplo, levar à mudança no mix de cultivos ou melhorias nas tecnologias usadas para a irrigação de água. A cobrança é mais elevada para o uso de saneamento nos municípios, mas, mesmo assim, o setor precisa melhorar o benefício marginal de água, por exemplo com a diminuição das perdas.

Por fim, as análises realizadas demonstraram que o modelo pode fornecer importantes elementos para apoiar a gestão de recursos hídricos: ao mensurar benefícios e custos econômicos para os usuários resultantes de diferentes políticas de água; ao identificar a alocação econômica ótima de água em diferentes cenários e ao permitir a comparação de diferentes estruturas de incentivos (instrumentos de regulação) levando em conta múltiplas demandas.

6.3 RECOMENDAÇÕES PARA CONTINUIDADE DA PESQUISA

Os resultados apresentados, neste trabalho, podem ser entendidos como um ponto de partida, pois estabelece uma plataforma de modelagem a partir do qual outros resultados podem ser obtidos. Recomenda-se refinamentos, para encontrar soluções econômicas ótimas em outros contextos, tais como vazões ambientais que minimizem perdas econômicas para todos os usos. Mesmo com diversos resultados importantes já encontrados neste trabalho, muitas questões

ainda podem ser exploradas para apoiar a gestão. Nesse sentido, os esforços direcionados às aplicações futuras poderiam levar em consideração as seguintes recomendações:

1. Estabelecer curvas de demanda e resultantes curvas de custos e benefícios econômicos para outros usos/ setores como lazer, turismo, demandas ambientais;
2. Estender o modelo para toda bacia de São Francisco, para identificar trade-off e políticas na gestão dos recursos hídricos, incorporando as várias regiões hidrográficas a montante e a jusante do Sub-Médio;
3. Incluir e analisar novos elementos da gestão da oferta no modelo hidro-econômico, através de novos reservatórios planejados, como Riacho Seco (MME, 2010);
4. Integrar ao modelo outros parâmetros, tais como a qualidade de água;
5. Melhorar a consistência de dados dos fatores de produção agrícola (produção de alguns municípios, culturas, custos etc.) e dos sistemas de saneamento (e.g. a consistência dos dados de saneamento da Bahia). As falhas aumentaram a incerteza e diminuíram a precisão nas curvas de demanda utilizadas;
6. Empregar o modelo desenvolvido em nível da bacia hidrográfica, para subsidiar a elaboração de um plano integrado de operação dos reservatórios, de forma a maximizar os benefícios econômicos de todos esses usos;
7. A aplicação do modelo integrando as bacias receptoras do PISF, pode melhorar a gestão integrada da transposição, no contexto de custos e benefícios para o lado doador e receptor. Para isso, é necessário o levantamento e uma caracterização mais fidedigna das curvas de demandas nas bacias receptoras, que dependerá da definição de uso por setor econômico.
8. Realização de análise de sensibilidades dos parâmetros econômicos com maior grau de incerteza utilizados para a obtenção das curvas de demanda utilizadas nesta pesquisa.

7. REFERÊNCIAS

- ABES – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. **Perdas em sistemas de abastecimento de água:** diagnóstico, potencial de ganhos com sua redução e propostas de medidas para o efetivo combate. [S.l.]: [s.n.], 2013.
- AGB PEIXE VIVO & CBHSF. **Guardiões do Velho Chico, 2001-2011.** [S.l.]: CBHSF, 2011.
- AGB PEIXE VIVO. AGB Peixe Vivo. **Apresentação AGB Peixe Vivo,** 2014. Disponível em: <<http://www.agbpeixevivo.org.br/>>. Acesso em: 23 mar. 2014.
- ALVES, R. N. B. et al. **SISTEMAS E CUSTOS DE PRODUÇÃO DE RAIZ DE MANDIOCA DESENVOLVIDOS POR AGRICULTORES DE CASTANHAL – PARÁ.** [S.l.]: [s.n.], 2011.
- AMARAL, F. S. et al. **Avaliação do sistema radicular de cana-de-açúcar cultivada em vertissolos no município de Juazeiro - BA.** Rio de Janeiro: [s.n.], v. 151, 2012. 31 p. ISBN ISSN 1517-2627.
- ANA. www.ana.gov.br. **Outorga Emitidas pela ANA, 2001-2013.** Disponível em: <<http://www2.ana.gov.br/Paginas/institucional/SobreaAna/uorgs/sof/geout.aspx>>. Acesso em: 2013.
- ANA. **Resolução 411 - Outorga PISF de 22 de Setembro de 2005.** Brasília: ANA, 2005a.
- ANA. **Resolução nº 29 de 24 de janeiro de 2005.** Brasília: [s.n.], 2005b.
- ANA. **Nota Técnica nº 042 /2008/SAG-ANA.** Brasília: [s.n.], 2008.
- ANA. **Reunião “Redução das Vazões Defluentes dos Reservatórios de Sobradinho e Xingó”.** Brasília/ DF: [s.n.], v. AJUDA-MEMÓRIA, 2013a.
- ANA. **Resolução 442 - Dispõe sobre a redução temporária da descarga mínima defluente dos reservatórios de Sobradinho e Xingó, no rio São Francisco.** Brasília: ANA, 2013b.
- ANA. **Resolução 442 de 2013.** Brasília: [s.n.], 2013c.
- ANA. CNARH – Cadastro Nacional de Usuários de Recursos Hídricos, 2014a. Disponível em: <<http://cnarh.ana.gov.br/>>. Acesso em: 1 jun. 2014.
- ANA. **Resolução 2050 - Dispõe sobre a redução temporária da descarga mínima defluente dos reservatórios de Sobradinho e Xingó, no rio São Francisco.** Brasília: ANA, 2014b.
- ANA. http://www2.ana.gov.br/Paginas/servicos/cobrancaearrecadacao/BaciaSF_Inicial.aspx. ANA, 2014c. Disponível em: <http://www2.ana.gov.br/Paginas/servicos/cobrancaearrecadacao/BaciaSF_Inicial.aspx>. Acesso em: 20 dez. 2014.
- ANA. **Resolução 641, de 14 de Abril de 2014.** Brasília: [s.n.], 2014d.
- ANA. **Resolução 1208 de 2015.** Brasília: [s.n.], 2015.
- ANA. **Resolução 1208 - Dispõe sobre a redução temporária da descarga mínima defluente dos reservatórios de Sobradinho e Xingó, no rio São Francisco.** Brasília: [s.n.], 2015a.
- ANA. **Subsídios ao CNRH para definição dos valores a serem cobrados pelo uso de recursos.** ANA. Brasília. 2015b.
- ANA. **Resolução 287 - Dispõe sobre a redução temporária da descarga mínima defluente dos reservatórios de Sobradinho e Xingó, no rio São Francisco.** Brasília: ANA, 2016a.
- ANA. **Resolução 1.283 - Dispõe sobre a redução temporária da descarga mínima defluente dos reservatórios de Sobradinho e Xingó, no rio São Francisco.** Brasília: ANA, 2016b.
- ANA. **Resolução 1161 - Dispõe sobre a redução temporária da descarga mínima defluente dos reservatórios de Sobradinho e Xingó, no rio São Francisco.** Brasília: ANA, 2016c.

- ANA. Audiência Pública. **Audiência Pública nº 002/2016**, 2016d. Disponível em: <http://audienciapublica.ana.gov.br/te_audiencia.php?id_audiencia=58>. Acesso em: 01 fev. 2017.
- ANA. **Nota Técnica Conjunta nº 1/2016/COSER/SRE/SAS**. Brasília: ANA, 2016e.
- ANA. **Resolução 287 de 2016**. Brasília: [s.n.], 2016f.
- ANA. **Sala de Situação - Bacia hidrográfica São Francisco**. Brasília: ANA, 2016g.
- ANA, MMA. **BHSF - Caracterização dos Recursos Hídricos - Irrigação**. Brasília: [s.n.], 2004.
- ANEEL. **Energia Assegurada**. Brasília: Agência Nacional de Energia Elétrica, 2005.
- ARAÚJO, J. L. P.; CORREIA, R. C. **ANÁLISE DO CUSTO DE PRODUÇÃO E RENTABILIDADE DO CULTIVO DA UVA FINA DE MESA SEM SEMENTES PRODUZIDA NA REGIÃO DO SUBMÉDIO SÃO FRANCISCO**. [S.l.]: [s.n.], 2007.
- ARAÚJO, J. L. P.; CORREIA, R. C.; RAMALHO, P. J. P. **Análise dos custos de produção e rentabilidade da cultura do tomateiro na região do Submédio São Francisco**. XLVI Congresso Brasileiro de Olericultura. Goiânia: [s.n.]. 2006.
- ARNOLD, J. G.; ALLEN, P. M.; BERNHARDT, G. A comprehensive surface groundwater flow model. **Journal of Hydrology** **142**, 1993. 47–69.
- ASSAD, E.; PINTO, H. S. **Aquecimento Global e Cenários Futuros da Agricultura**. São Paulo: EMPRAPA, 2008.
- BEAR, J.; LEVIN, O.; BURAS, N. **Optimal utilization of aquifers as elements of water-resources systems. Progress Report No. 1: Basic Concepts and Program of Research**. Haifa: Technion – Israel Institute of Technology, Hydraulic Laboratory, 1964.
- BECK, F. **Modelling Land Use Change in the Catchment Area of the São Francisco River in Brazil (Masterthesis)**. Berlin: Humboldt University, 2012.
- BIEWALD, A. et al. **The impact of future climate and socioeconomic changes on landuse in the catchment area of the Rio São Francisco**. Proceedings INNOVATE Status Conference. Recife: [s.n.]. 2014.
- BONDEAU, A. . S. P. . Z. S. . S. et al. Modelling the role of agriculture for the 20th century global terrestrial carbon balance. **Global Change Biology** **13**, 2007. 679–706.
- BOOKER, J. F. et al. Economics and the Modeling of Water Resources and Policies. **Natural Resource Modeling Journal**, 2012.
- BRAAT, L. C.; LIEROP, W. F. J. **Integrated economic-ecological modeling**. Amsterdam: North-Holland, 1987.
- BRASIL. **Lei No 2.597, de 5 de Julho de 1955**. [S.l.]: [s.n.], 1955.
- BRASIL. **Lei Nº 9.433, de 8 de Janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos**. [S.l.]: [s.n.], 1997.
- BRASIL. **DECRETO DE 5 DE JUNHO DE 2001**. Brasília: [s.n.], 2001.
- BRASIL. **DECRETO Nº 5.995 Institui o Sistema de Gestão do Projeto de Integração do Rio São Francisco com as Bacias Hidrográficas do Nordeste Setentrional, e dá outras providências**. Brasília: Presidência da República, 2006.
- BRASIL. **Lei Federal Nº 12.783, de 11 de janeiro de 2013**. Brasília: [s.n.], 2013.
- BRASIL. **Lei federal Nº 13.182, de 3 de novembro de 2015**. Brasília: [s.n.], 2015.
- BRINEGAR, H. R.; WARD, F. A. Basin impacts of irrigation water conservation policy. **Ecological Economics**, v. 69 (2), p. 414–426, 2009.

- CAI, X. M. Implementation of holistic water resources–economic optimization models for river basin management – Reflective experiences. **Environmental Modelling and Software** **23** (1), 2008. 2-18.
- CAMPOS, N. **Gestão de Águas: princípios e práticas**. Fortaleza: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2001.
- CASTRO, C. N. D. **Transposição do rio São Francisco: Análise de oportunidade do projeto**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2011.
- CBHSF. **Plano Decenal de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco**. Versão preliminar. ed. São José: CBHSF, 2004.
- CBHSF. O Comitê da Bacia do Rio São Francisco, 2014. Disponível em: <<http://cbhsaofrancisco.org.br/>>. Acesso em: 9 set. 2014.
- CEPEL. Eletrobras Cepel. **Planejamento da Operação Energética**, 2015. Disponível em: <<http://www.cepel.br/produtos/programas-computacionais/planejamento-da-operacao-energetica.htm>>. Acesso em: 02 fev. 2017.
- CHESF. **Relatório mensal de Acompanhamento**. Brasília: CHESF, 2016.
- CHOW, V. T.; MAIDMENT, D. R. **Applied hydrology**. New York: McGraw-Hill, 1988.
- CNRH. **Resolução CNRH N° 108, de 13 de Abril de 2010**. Brasília: [s.n.], 2010.
- CODEVASF. **Relatório de Gestão. Companhia de Desenvolvimento do Vale do São Francisco**. [S.l.]: [s.n.], 2006.
- DALHUISEN, J. M. et al. Price and Income Elasticities of Residential Water Demand: Why Empirical Estimates Differ. **Tinbergen Institute Discussion Paper, No. 01-057/3**, Amsterdam - Rotterdam, 2001.
- DALHUISEN, J. M. et al. Price and Income Elasticities of Residential Water Demand: A Meta-Analysis. **Land Economics Vol. 79, No. 2**, 2003. 292-308.
- DRAPER, A. J. et al. Economic engineering optimization for California water management. **Journal of Water Resources Planning and Management** **129**, 2003. 155–164.
- DRUD, A. S. **CONOPT: A System for Large Scale Nonlinear Optimization**, Reference Manual for CONOPT. Bagsvaerd, Denmark: ARKI Consulting and Development A/S, 1996.
- ECKSTEIN, O. **Water Resources Development: the Economics of Project Evaluation**. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1958.
- EMBRAPA. **Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos. Levantamento exploratório-reconhecimento de solos da margem direita do rio São Francisco, Estado da Bahia**. EMBRAPA-SNLCS. Recife. 1977/1979.
- EMPRAPA. **Solos do submédio do vale do São Francisco**. Petrolina - PE: Embrapa Semi-árido, 2008.
- ESRI. **ArcGIS® 9 Geoprocessing Commands Quick Reference Guide**. [S.l.]: ESRI, 2006.
- ESRI. ArcGIS. **ArcGIS for Server**, 1 maio 2015. Disponível em: <<http://www.esri.com/software/arcgis/arcgisserver>>.
- FARIAS, S. A. R. **AVALIAÇÃO DE CUSTOS DE ÁGUA E ENERGIA ELÉTRICA PARA FRUTÍFERAS IRRIGADAS NO NORDESTE BRASILEIRO**. Tese de Doutorado. ed. Campina Grande: [s.n.], 2006.
- FERREIRA, C. K. L. **Privatização do setor elétrico no Brasil**. [S.l.]: BNDES, 2006.
- FERREIRA, T. V. B. **Hidrogramas ambientais para o Baixo Rio São Francisco: avaliação de impactos sobre a geração hidrelétrica**. Rio de Janeiro: UFRJ/COPPE., 2014.

FIGUEIREDO, L. **A DEMANDA DA ÁGUA PARA IRRIGAÇÃO: UMA APLICAÇÃO DA PROGRAMAÇÃO MATEMÁTICA POSITIVA PARA A ESTIMAÇÃO DA CURVA DE DEMANDA DA ÁGUA PARA OS PERÍMETROS IRRIGADOS DO SUBMÉDIO DO RIO SÃO FRANCISCO**. Recife: [s.n.], v. Dissertação Mestrado, 2014.

FINEP. **Relatório Técnico Final. Convenio FINEP 01.04.0761.00**. FINEP. Recife. 2007.

FUNARBE. **Desenvolvimento da Matriz de Coeficientes técnicos para recursos hídricos no Brasil**. Viçosa: FUNDAÇÃO DE APOIO A UNIVERSIDADE DE VIÇOSA, 2011.

GALDINO, A. A Cachoeira de Paulo Afonso e sua importância para o turismo regional. **Folha Sertaneja Online**, Bahia, 2005. Disponível em: <<http://www.folhasertaneja.com.br>>. Acesso em: 27 Jul 2006.

GISSER, M.; MERCADO, A.. Integration of the agricultural demand function for water and the hydrologic model of the Pecos basin. **Water Resources Research** **8** (6), 1972. 1373–1384.

GOETZ, R. U.; MARTINEZ, Y.; RODRIGO, J. Water allocation by social choice rules: The case of sequential rules. **Ecological Economics**, v. 65, n. 2, p. 304-314, April 2008. ISSN 0921-8009.

GOHAR, A. A.; WARD, F. A. Gains from expanded irrigation water trading in Egypt: an integrated basin approach. **Ecological Economics**, v. 69 (12), p. 2535–2548, 2010.

GRIFFIN, R. C. **Water resource economics: the analysis of scarcity, policies, and projects**. Cambridge: MIT Press, 2006.

GRIGG, N. S. **Water resources development; Water-supply; Economic aspects; Management**. New York: McGraw-Hill, 1996.

GUNKEL, G.; STEEMANN, J.; SOBRAL, M. C. Carrying capacity limits in net cage fish production in water reservoirs. In: GUNKEL, G.; SILVA, J. A.; SOBRAL, M. C. **Sustainable Management of Water and Land in Semiarid Areas**. Recife: Editora Universitária UFPE, 2013. p. 99-117.

GÜRLÜK, S.; WARD, F. A. Integrated Basin Management: Water And Food Policy Options For Turkey. **Ecological Economics**, v. 68, p. 2666–2678, 2009.

HAROU, J. J. et al. Hydro-economic models: Concepts, design, applications, and future prospects. **Journal of Hydrology**, 2009. 627–643.

HECKELEI, T.; BRITZ, W.; ZHANG, Y. Positive Mathematical Programming Approaches – Recent Developments in Literature and Applied Modelling. **Bio-based and Applied Economics** **1**, 2012. 109-124.

HIRSCH, P. E. et al. A Hydro-Economic Model for Water Level Fluctuations: Combining Limnology with Economics for Sustainable Development of Hydropower. **PLoS One**, 2014.

HOWITT, R. E. Positive Mathematical Programming. **American Journal of Agricultural Economics** Vol. **77**, No. **2** , 1995. 329-342.

HOWITT, R.; MEDELLÍN-AZUARA, J.; MACEWAN, D. L. J. R. Calibrating disaggregate economic models of agricultural production and water management. **Environmental Modelling & Software**, 2012. 244 – 258.

IBGE. Produção Agrícola Municipal. **Sistema IBGE de Recuperação Automática - SIDRA**, 2006-2012. Disponível em: <<http://www.sidra.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 12 jun. 2014.

IBGE. **Census**. Brasília. 2010.

ICWE. **The Dublin Statement and Report of the Conference**. International Conference on Water and the Environment: Development Issues for the 21st century. Dublin: [s.n.]. 1992.

- IGLIORI, D. C.; FINGLETON, B.; MOORE, B. Clusters Dynamics: New Evidence and Projections for Computing Services in Great Britain. **Journal of Regional Science** v. 45, n. 2, EUA, 2005. 283-311.
- INNOVATE. Projeto Innovate. **Innovate Tu-Berlin**, 2012. Disponível em: <<http://www.innovate.tu-berlin.de/>>. Acesso em: 10 dez. 2012.
- IPCC. **Climate Change 2013**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2013.
- IPCC. **Climate Change 2013: Technical Summary**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2014.
- JIMÉNEZ CISNEROS, B. E. et al. Freshwater resources. In: FIELD, C. B., et al. **Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects**. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, 2014. p. 229-269.
- JONKER, L. Integrated water resources management: the theory-praxis-nexus, a South African perspective. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. Parts A/B/C 32 (15–18), p. 1257–1263, 2007.
- JÚNIOR, A. C. C. **SUPORTE À DECISÃO PARA O PLANEJAMENTO AGRÍCOLA UTILIZANDO ALGORITMOS GENÉTICOS**. Dissertação. ed. Belo Horizonte: [s.n.], 2005.
- KELMAN, J.; RAMOS, M. Custo, valor e preço da água utilizada na agricultura. **REGA**, 2005. 39-48.
- KIM, J. W. et al. mpacts of changes in climate and land use/land cover under IPCC RCP scenarios on streamflow in the Hoeya River Basin, Korea. **Science of The Total Environment**, 2013. 181–195.
- KOCH, H. **Innovate Workshops**. Recife: [s.n.], 2014.
- KOCH, H. et al. **Modelagem da disponibilidade e do manejo da água na bacia hidrográfica do rio São Francisco**. XXI SIMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRICOS. Brasília/Brazil: ABRH. 2015a.
- KOCH, H. et al. **Incluindo aspectos ecológicos na gestão de ecológicos na gestão de reservatórios: opções de gestão no Sub-médio e Baixo do rio São Francisco**. XXI SIMPOSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HIDRICOS. Brasília/Brazil: [s.n.]. 2015b.
- KOCH, H. et al. Scenarios of climate and land-use change, water demand and water availability for the São Francisco River Basin. **Revista Brasileira de Ciências Ambientais**, 2015c. 96-114.
- KOCH, H. et al. Integrated hydro- and wind power generation: a game changer towards environmental flow in the Sub-Middle and Lower São Francisco river basin? **Regional Environmental Change (submitted)**, 2017.
- KOCH, H.; LIERSCH, S.; HATTERMANN, F. F. Integrating water resources management in eco-hydrological modelling. **Water Science & Technology**, 2013.
- KOCH, H.; SIEGMUND-SCHULTZE, M. **Introduction to applying scenarios: A basis for INNOVATE's scenario approach**. Recife: [s.n.], 2014.
- KRAUSE, M. et al. Conservation of undisturbed natural forests and economic impacts on agriculture. **Land Use Policy**, 30, 2013. 344–354.
- KRYSANOVA, V. et al. Simulation modelling of the coastal waters pollution from agricultural watershed. **Ecological Modelling** 49, 1989. 7–29.
- KRYSANOVA, V. et al. **SWIM (Soil and Water Integrated Model) User Manual**. Potsdam, Germany: Potsdam Institute for Climate Impact Research, 2000.

- KRYSANOVA, V.; MÜLLER-WOHLFEIL, D. I.; BECKER, A. Development and test of a spatially distributed hydrological/water quality model for mesoscale watersheds. **Ecological Modelling** **106**, 1998. 261–289.
- LABADIE, J. W. Optimal operation of multireservoir systems: state-of-the-art review. **Journal of Water Resources Planning and Management** **130** (2), 2004. 93–111.
- LANINI, S. et al. Socio-hydrosystem modelling for integrated water-resources management – the Hérault catchment case study, southern France. **Environmental Modelling & Software**, v. 19 (11), p. 1011–1019, 2004.
- LEITE, L. L. L. **Modelo matemático de otimização para apoio à decisão na operação dos reservatórios de Três Marias e Sobradinho**. Recife: UFPE, v. Dissertação, 2013.
- LIPSEY, R. G. **First Principles of Economics**. Oxford: Colin Harbury, 1988.
- LOUCKS, D. P. Water Resource Management Models. **Technologies for Clean Water**, 2008.
- LOUCKS, D. P.; BEEK, E. V. **Water Resources Systems Planning and Management – An Introduction to Methods, Models and Applications**. Paris: UNESCO, 2005.
- LOUCKS, D. P.; STEDINGER, J. R.; HAITH, D. A. **Water Resources Systems Planning and Analysis**. Englewood Cliffs, N.J. : Prentice-Hal, 1981.
- LUTZ, W. **The Future Population of the World: What can we assume today?** 2a. ed. London: Earthscan, 1996.
- MAASS, A. et al. **Design of Water Resource Systems**. Cambridge, MA: Harvard University Press, 1962.
- MACHADO, É. C. M.; GALVÃO, C. O.; SOUZA FILHO, F. A.. Alocação quali-quantitativa de águas em bacias hidrográficas: metodologia multiobjetivo inserida no contexto da gestão dos recursos hídricos. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 17, p. 1-10, 2012.
- MADEC, G.; IMBARD, M. A global ocean mesh to overcome the north pole singularity. Vol 12. **Climate Dynamics**, 1996. 381-388.
- MANETA, M. et al. A spatially distributed hydro-economic model to assess the effects of drought on land use, farm profits, and agricultural employment. **Water Resources Research**, **45**, 2009.
- MANETA, M. et al. A spatially distributed hydro-economic model to assess the effects of drought on land use, farm profits, and agricultural employment. **Water Resources Research**, **45**, 2009a.
- MARQUELLI, W. A.; SILVA, W. L. C. **Seleção de sistemas de Irrigação para Hortaliças**. 2. ed. Brasília: Emprapa, 2011.
- MARQUES, G. F. et al. Economically driven simulation of regional water systems: Friant-Kern, California. **Journal of Water Resources Planning and Management**, 2006.
- MATROSOV, E. S.; HAROU, J. J.; LOUCKS, D. P. A computationally efficient open-source water resource system simulator - Application to London and the Thames Basin. **Environ. Modell. Software**, **26** (12), 2011. 1599–1610.
- MATTA, E. et al. Simulations of nutrient emissions from a net cage aquaculture in a Brazilian bay. **Water Science and Technology** **73**(10), 2016. 2430-2435.
- MAYER, A.; MUÑOZ-HERNANDEZ, A. Integrated Water Resources Optimization Models: An Assessment of a Multidisciplinary Tool for Sustainable Water Resources Management Strategies. **Geography Compass**, 2009. 1176–1195.
- MCKINNEY, C. D. et al. **Integrated basin-scale water resources management modeling: Review and future directions**. Sri Lanka: [s.n.], 1999.

- MCKINNEY, D. C. et al. **Integrated basin-scale water resources management modeling: Review and future directions**. Sri Lanka: International Water Management Institute.: Colombo, v. SWIM Paper 6, 1999.
- MCKINNEY, D. C.; SAVITSKY, A. G. **Basic optimization models for water and energy management**. [S.l.]: [s.n.], 2006.
- MCLAUGHLIN, D. 1.731 Water Resource Systems. **MIT OpenCourseWare: Massachusetts Institute of Technology, Massachusetts, 2006**. Disponível em: <<http://ocw.mit.edu/courses/civil-and-environmental-engineering/1-731-water-resource-systems-fall-2006>>. Acesso em: 14 dez. 2014.
- MEDEIROS, Y. D. P. et al. Social Participation In The Environmental Flow Assessment: The São Francisco River Case Study. **Revista Eletrônica de Gestão e Tecnologias Ambientais**, v. v.1, 2013.
- MEDELLIN-AZUARA, J. et al. A Calibrated Agricultural Water Demand Model for Three Regions in Northern Baja California. **Agrociência**, 43, 2009. 83 – 96.
- MIN. **Plano Estratégico de Desenvolvimento Sustentável do Semi-Árido**. Brasília: MINISTÉRIO DA INTEGRAÇÃO NACIONAL, 2005.
- MME. **ESTUDOS PARA LICITAÇÃO DA EXPANSÃO DA GERAÇÃO**. Brasília: EPE, 2010.
- MORAES, A. M. **Projeto de pesquisa: Sistema de Apoio a Decisão Hidro-Econômico para usos múltiplos da Água no Sub-Médio do São Francisco**. Cnpq. Recife. 2016.
- MORAES, A. M.; SILVA, G. S. D. O Papel da Economia na Gestão Sustentável de Bacias Hidrográficas. In: SOBRAL, M. D. C.; JR, A. P. **Gestão Sustentável de Bacias Hidrográficas (in press)**. Recife: [s.n.], 2017.
- MORAES, E. A. **Modelos e Sistemas de Apoio a Decisão (SAD) para subsidiar a escolha de políticas de alocação sustentáveis de água: uma revisão e proposta de classificação**. [S.l.]: [s.n.], 2012.
- MORAES, M. G. A. D.; MARQUES, G. F. **A Economia da Alocação de Água**. Relatório técnico final de consultoria ao Banco Mundial. [S.l.]. 2012.
- MORAES, M. M. G. A. **Sistema de Apoio a Decisão para priorização de Sistemas de Informação**. Dissertação de Mestrado. ed. Recife: [s.n.], 1997.
- MORAES, M. M. G. A. D. et al. SSD espacial para la gestión óptima de sistemas de recursos hídricos incorporando modelos hidro-económicos. In: SOLERA, B. S., et al. **Aplicaciones de Sistemas Soporte a la Decisión en Planificación y Gestión Integradas de Cuencas Hidrográficas**. Barcelona: Marcombo, 2013.
- MORAES, M. M. G. A. D. et al. Integrated economic models to support decisions on water pricing in biofuel production river basins: three case studies from Brazil. **Biofuels, Bioproducts & Biorefining**, n. 10, p. 255–269, 2015. ISSN 10.1002/bbb.1581.
- MORAES, M. M. G. A. D.. et al. The impact of global socio-economic changes on future water demand curves for irrigation at Sub-Middle SFRB in Brazil. **Regional Environmental Change**, 2016.
- MORAES, M. M. G. A. et al. Joint Water Quantity-Quality Management in a Biofuel Production Area—Integrated Economic-Hydrologic Modeling Analysis. **Water Resour. Plng. and Mgmt. Vol Volume 136, Issue 4**, 2010. 502-511.
- MORAES, M. M. G. A.; CIRILO, J. A.; SAMPAIO, Y. Integração dos Componentes Econômico e Hidrológico na Modelagem de Alocação Ótima de Água para Apoio a Gestão de Recursos: Uma Aplicação na bacia do Pirapama. **Revista Economia**, vol. 7, n° 2, 2006.

- NAKICENOVIC, N.; SWART, R. **Special Report on Emissions Scenarios (SRES)**. Cambridge: Cambridge University Press, 2000.
- NIKOU EI, A.; ZIBAEI, M.; WARD, F. A. Incentives to adopt irrigation water saving measures for wetlands preservation: An integrated basin scale analysis. **Journal of Hydrology**, v. 464–465, n. 25 September, Pages 216-232, ISSN 0022-1694, p. 216-232, September 2012. ISSN 0022-1694.
- NOEL, J. E.; GARDNER, B. D.; MOORE, C. V. Optimal regional conjunctive water management. **American Journal of Agricultural Economics** **62** (3), 1980. 489– 498.
- NORDLUND, G. Futures research and the IPCC assessment study on the effects of climate change. **Futures**, 2008. 873–876.
- NULL, S. E. et al. Optimizing the Dammed: Water Supply Losses and Fish Habitat Gains from Dam Removal in California. **Journal of Environmental Management**, v. 136, p. 121-131, 2014. ISSN DOI: 10.1016/j.jenvman.2014.01.024.
- ONS. **HydroData**. Operador Nacional do Sistema Eléctrico. Brasília. 2014.
- ONS. **Atualização de séries históricas de vazões – Período 1931 a 2015**. Rio de Janeiro: [s.n.], 2015.
- ONS. **DIRETRIZES PARA AS REGRAS DE OPERAÇÃO DE CONTROLE DE CHEIAS - BACIA DO RIO SÃO FRANCISCO**. Rio de Janeiro: ONS, 2016.
- PEREIRA, M. V. F. **OPTIMAL SCHEDULING OF HYDROTHERMAL SYSTEMS- AN OVERVIEW**. Rio de Janeiro: Electric Energy Systems, 1985.
- PEREIRA, M.; CAMPODÓNICO, N.; KELMAN, R. Long-term Hydro Scheduling based on Stochastic Models. **EPSOM'98**, Zurich, 1998.
- PEREIRA, S. B. et al. Evaporação líquida no lago de Sobradinho e impactos no escoamento devido à construção do reservatório. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** **v.13, n.3**, Campina Grande, PB, 2009. 346–352.
- PERH-PB. **Plano Estadual de Recursos Hídricos**. João Pessoa: [s.n.], 2006.
- PNUD. **Transformando Nosso Mundo: A Agenda 2030 para o Desenvolvimento Sustentável**. [S.l.]: [s.n.], 2016.
- PULIDO-VELAZQUEZ, M. et al. Hydro-economic river basin modelling: The application of a holistic surface–groundwater model to assess opportunity costs of water use in Spain. **Ecological Economics** **66**, 2008. 51 – 65.
- PULIDO-VELAZQUEZ, M.; ANDREU, J.; SAHUQUILLO, A. Economic optimization of conjunctive use of surface water and groundwater at the basin scale. **J. Water Resour. Plann. Manage.**, n. 132 (6), p. 454–467, 2006.
- QI, S. et al. Streamflow response to climate and landuse changes in a coastal watershed in North Carolina. **Trans ASABE**, **52**, 2009. 739–749.
- REBOUÇAS, A. D. C.; BRAGA, B.; TUNDISI, J. G. **Águas doces no Brasil**. São Paulo: escrituras, 2006.
- RICHTER, B. D.; THOMAS, G. A. Restoring environmental flows by modifying dam operations. **Ecology and Society** **12**(1), 2007.
- ROCHA, P. K.; PEREIRA, E. R.; COELHO, R. D. **Custo do bombeamento de água para irrigação no Brasil**. [S.l.]: Bahia Agríc. v.6, n.1, nov 2003, 2003.
- RODORFF, V. et al. **Effectiveness of Follow-up Programs – 25 Years after Completion of the Itaparica Dam in Northeast Brazil**. UVP-report 27. ed. [S.l.]: [s.n.], 2013.

- ROGERS, P.; BHATIA, R.; HUBER, A. **Water as a Social and Economic Good: How to Put the Principle into Practice**. Stockholm, Sweden: Global Water Partnership/Swedish International, 1998.
- ROSEGRANT, M. W. et al. Integrated Economic-Hydrologic Water Modeling at the basin scale: The Maipo River Basin, . **Agricultural Economics**, p.33-46, 2000.
- ROSENTHAL, R. E. **GAMS User's Guide**. Washington, DC, USA: GAMS Development Corporation, 2012.
- SCHEIERLING, S. M.; LOOMIS, J. B.; YOUNG, R. A. Irrigation water demand: A meta-analysis of price elasticities. **Water Resources Research Vol 42 Issue 1** , 2006.
- SCUDDER, T. **The Future of Large Dams**. London: Earthscan, 2005.
- SICKE, W. S.; LUND, J. R.; MEDELLIN-AZUARA, J. Climate Change Adaptations for California's San Francisco Bay Area Water Supplies. **British Journal of Environmental and Climate Change**, v. 3, n. 3, p. 292-315, 2013.
- SIEGMUND-SCHULTZE, E. A. **Proceedings Innovate Conference**. Recife: [s.n.], 2014.
- SILVA, A. C. S. D.; SILVA, G. N. S. D.; GALVÃO, C. D. O. **Relação entre a disponibilidade hídrica e a gestão de recursos hídricos no semiárido paraibano**. XII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste. Natal: [s.n.]. 2014.
- SILVA, A. L. P. **Potencialidade Turística & Diretrizes Metodológicas**. Maceió - AL: Fundação Teotônio Vilela, 1996.
- SILVA, F. B. R. et al. **Zoneamento Agroecológico do Nordeste: diagnóstico do quadro natural e agrossocioeconômico**. Petrolina: EMBRAPA-CPATSA; Recife: EMBRAPA-CNPS. Recife. 1993.
- SILVA, G. S. D.; FIGUEIREDO, L. E.; MORAES, M. M. G. A. D. Demand Curves for Water Resources of the main water users in sub-middle São Francisco basin. **RBCIAMB**, 2015.
- SILVA, G. S. D.; MORAES, M. M. G. A. D.; SILVA, A. C. S. D. **Delimitação das áreas irrigadas no trecho do sub-médio do rio São Francisco**. Simposio de recursos hídricos de Nordeste XII. Natal: [s.n.]. 2014.
- SILVA, L. M. C.; MONTEIRO, R. A. Outorga de direito de uso de recursos hídricos: uma das possíveis abordagens. In: MACHADO, C. J. S. **Gestão de águas doces: usos múltiplos, políticas públicas e exercício da cidadania no Brasil**. Rio de Janeiro: Interciência, 2004. Cap. 5, p. 135-178.
- SILVA, S. R.; CIRILO, J. A. O planejamento de recursos hídricos na bacia hidrográfica do rio São Francisco. **REGA. Revista de Gestão de Águas da América Latina**, v. 8, p. 47-64, 2011.
- SIPOT. **Sistema de Informações do Potencial Hidrelétrico Brasileiro**. [S.l.]: [s.n.], 2002.
- SMITH, P. et al. Competition for land. **Phil Trans R Soc B: Biol Sci** **365**, 2010. 2941–2957.
- SNIS. **Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento**. PMSS. Brasília. 2012.
- SOHNGEN, B. . T. C. . A. H. M. **Global Forestry Data for the economic modeling of land use. Economic analysis of and use in global climate change policy**. (. New York. 2009.
- SPRAGUE, R. H. A framework for the development of decision support systems. In: SPRAGUE, R. H.; WATSON, H. J. **Decision Support Systems**. [S.l.]: [s.n.], 1989.
- SUM. **Estudo Técnico de Apoio ao PBHSF – N° 08 (Navegação)**.. Subprojeto 4.5C– Plano Decenal de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio São Francisco-PBHSF (2004-2013). [S.l.]. 2004.
- TAYLOR, K. E.; STOUFFER, R. J.; MEEHL, G. A. An Overview of CMIP5 and the Experiment Design. **Bull. Amer. Meteor. Soc.** **93**, 2012. 485–498.

- THOMAS, J. M.; CALLAN, S. J. **Environmental Economics; applications, policy and theory**. [S.l.]: Cengage Learning, 2010. ISBN ISBN: 978-85-221-0652-3.
- TILMANT, A.; ARJOON, D.; MARQUES, G. F. THE ECONOMIC VALUE OF STORAGE IN MULTIRESERVOIR SYSTEMS. **Journal of Water Resources Planning and Management**, 2012.
- TORRES, M. O. et al. Economic impacts of regional water scarcity in the São Francisco River Basin, Brazil: an application of a linked hydro-economic model. **Environment and Development Economics**, 17, 2011. 227–248.
- UFZ. HELMHOLTZ. **Centre for environmental research**, 2016. Disponível em: <<https://www.ufz.de/index.php?en=37902>>. Acesso em: 4 fev. 2016.
- UNEP DTIE. **Zooming in on the Bioenergy and Water Nexus, Oeko-Institut and IEA Bioenergy Task 43**. [S.l.]: [s.n.], 2011. ISBN ISBN 978-92-807-3157-6.
- USGS. U.S. Geological Survey. **Earth Explorer**, 2013. Disponível em: <<http://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: fev. 2014.
- VARIAN, H. R. **Microeconomia: conceitos básicos**. 7. ed. Rio de Janeiro: Elsevier, 2006.
- VEIGA, J. E. D. **Desenvolvimento sustentável - desafio de século XXI**. Rio de Janeiro: Garamond, 2005.
- VERA, L. H. A. **ATUAÇÃO DA COBRANÇA PELO USO DA ÁGUA DE DOMÍNIO DA UNIÃO COMO INSTRUMENTO DE GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS NA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO SÃO FRANCISCO**. Recife: UFPE, 2014.
- VICUNA, S. et al. Basin-scale water system operations with uncertain future climate conditions: Methodology and case studies. **WATER RESOURCES RESEARCH, VOL. 46**, 2010.
- VISSMAN, W. J.; WELTY, C. Economics and Financing. In: NORTH, R. M. **Water Management: Technology and Institutions**. New York: Harper & Row, 1985.
- VUUREN, D. P. V. et al. The representative concentration pathways: an overview. **Climatic Change 109**, 2011a. 5–31.
- VUUREN, D. P. V. et al. A special issue on the RCPs. **Climatic Change 109**, 2011b. 1-4.
- WATANABE, S. et al. MIROC-ESM 2010: model description and basic results of CMIP5-20c3m experiments. **Geoscientific Model Development**, 2011. 845–872.
- WATCH. Water and Global Change, 2014. Disponível em: <http://www.eu-watch.org/data_availability>. Acesso em: 12 set. 2014.
- WORLD BANK GROUP. **High and Dry: Climate Change, Water, and the Economy**. Executive Summary. ed. Washington: The World Bank, 2016.
- WURBS, R. A. **Comparative Evaluation of Generalized River/Reservoir System Models**. College Station, Texas: Texas Water Resources Institute, 2005.
- XAVIER, L. F.; COSTA, R. D. F.; COSTA, E. D. F. **ESTIMANDO TAXAS DE ADOÇÃO DE TECNOLOGIAS POUPADORAS DE ÁGUA NA FRUTICULTURA IRRIGADA DO VALE DO SÃO FRANCISCO: O CASO DAS PEQUENAS, MÉDIAS E GRANDES EMPRESAS PRODUTORAS**. Recife: [s.n.], 2005.
- XAVIER, L. F.; COSTA, R. F.; COSTA, E. F. Adoção de tecnologias poupadoras de água na fruticultura irrigada do Vale do São Francisco: uma comparação entre percepções de colonos e empresas. **Rev. Econ. Sociol. Rural.**, Brasília, 2006.
- YIN, X. A.; YANG, Z. F.; PETTS, G. E. Reservoir operating rules to sustain environmental flows in regulated rivers. **Water Resources Research**, 2011.

YOUNG, R. A. Determining the economic value of water: concepts and methods. **Ed. Resources for the future**, Washintong D.C., 2005.

APÊNDICE A

Produção agrícola nos municípios (IBGE, 2006-2012)

Tabela 12 – Lavoura Juazeiro (IBGE, 2006-2012)

Juazeiro - BA	Área plantada (Hectares)	Área colhida (Hectares)	Quantidade produzida	Valor da produção (Mil Reais)
Cana-de-açúcar (Toneladas)	14.971	14.971	1.287.506	67.143
Cebola (Toneladas)	1.098	1.098	20.118	16.094
Feijão (em grão) (Toneladas)	1.450	465	791	1.248
Mandioca (Toneladas)	768	68	816	286
Melancia (Toneladas)	1.350	1.350	20.250	5.670
Melão (Toneladas)	498	498	12.450	7.719
Milho (em grão) (Toneladas)	904	129	232	128
Tomate (Toneladas)	182	182	4.550	3.890
Banana (cacho) (Toneladas)	229	229	5.496	3.589
Coco-da-baía (Mil frutos)	1.776	1.776	42.624	18.414
Goiaba (Toneladas)	70	70	742	552
Limão (Toneladas)	181	181	2.806	1.564
Mamão (Toneladas)	141	141	2.961	1.777
Manga (Toneladas)	8.210	8.210	205.250	92.363
Maracujá (Toneladas)	953	953	15.248	14.440
Uva (Toneladas)	1.446	1.446	37.596	101.509

Tabela 13 – Lavoura Lagoa Grande (IBGE, 2006-2012)

Lagoa Grande - PE	Área plantada (Hectares)	Área colhida (Hectares)	Quantidade produzida	Valor da produção (Mil Reais)
Cebola (Toneladas)	250	250	5.500	7.133
Feijão (em grão) (Toneladas)	610	60	72	217
Mamona (baga) (Toneladas)	150	15	3	3
Mandioca (Toneladas)	75	35	237	81
Melancia (Toneladas)	120	80	1.440	469
Melão (Toneladas)	60	60	1.110	792
Milho (em grão) (Toneladas)	1.600	-	-	-
Sorgo (em grão) (Toneladas)	10	-	-	-
Tomate (Toneladas)	55	55	2.800	2.759
Banana (cacho) (Toneladas)	160	160	2.960	2.111
Coco-da-baía (Mil frutos)	30	30	840	230
Goiaba (Toneladas)	70	70	2.240	2.489
Mamão (Toneladas)	60	60	918	523
Manga (Toneladas)	270	270	5.400	3.832
Maracujá (Toneladas)	90	90	1.260	2.164
Uva (Toneladas)	1.260	1.260	50.400	115.965

Tabela 14 – Lavoura Santa Maria da Boa Vista (IBGE, 2006-2012)

Santa Maria da Boa Vista - PE	Área destinada à colheita (Hectares)	Área colhida (Hectares)	Quantidade produzida	Valor da produção (Mil Reais)
Banana (cacho) (Toneladas)	2820	2820	53580	38658
Coco-da-baía (Mil frutos)	70	70	2100	571
Goiaba (Toneladas)	520	520	15600	18161
Limão (Toneladas)	14	14	224	205
Mamão (Toneladas)	60	60	1080	616
Manga (Toneladas)	1300	1300	24700	17542
Maracujá (Toneladas)	140	140	1960	3274
Uva (Toneladas)	280	280	9800	22299
Amendoim (em casca) (Toneladas)	8	8	52	187
Arroz (em casca) (Toneladas)	10	10	52	33
Cana-de-açúcar (Toneladas)	25	15	330	51
Cebola (Toneladas)	230	230	4600	5821
Feijão (em grão) (Toneladas)	1200	300	360	1138
Mamona (baga) (Toneladas)	560	0	0	0
Mandioca (Toneladas)	150	70	628	190
Melancia (Toneladas)	530	450	8550	2707
Melão (Toneladas)	60	60	1200	870
Milho (em grão) (Toneladas)	700	0	0	0
Tomate (Toneladas)	80	80	4560	4488

Tabela 15 – Lavoura Orocó (IBGE, 2006-2012)

Orocó - PE	Área destinada à colheita (Hectares)	Área colhida (Hectares)	Quantidade produzida	Valor da produção (Mil Reais)
Banana (cacho) (Toneladas)	830	830	14940	10890
Coco-da-baía (Mil frutos)	15	15	450	125
Goiaba (Toneladas)	95	95	2584	2750
Mamão (Toneladas)	115	115	1840	1062
Manga (Toneladas)	140	140	2800	2018
Maracujá (Toneladas)	130	130	1820	3027
Uva (Toneladas)	4	4	140	245
Arroz (em casca) (Toneladas)	5	5	26	17
Cana-de-açúcar (Toneladas)	7	7	210	31
Cebola (Toneladas)	480	480	12000	14316
Feijão (em grão) (Toneladas)	570	210	252	852
Mamona (baga) (Toneladas)	20	0	0	0
Mandioca (Toneladas)	240	228	2116	792
Melancia (Toneladas)	190	140	2660	877
Melão (Toneladas)	80	80	1464	1057
Milho (em grão) (Toneladas)	370	0	0	0
Tomate (Toneladas)	60	60	2100	1886

Tabela 16 – Lavoura Cabrobó (IBGE, 2006-2012)

Cabrobó - PE	Área plantada (Hectares)	Área colhida (Hectares)	Quantidade produzida	Valor da produção (Mil Reais)
Banana (cacho) (Toneladas)	60	60	980	681
Coco-da-baía (Mil frutos)	60	60	930	465
Goiaba (Toneladas)	10	10	300	411
Laranja (Toneladas)	5	5	30	15
Mamão (Toneladas)	5	5	125	100
Manga (Toneladas)	40	40	800	800
Maracujá (Toneladas)	55	55	825	825
Arroz (em casca) (Toneladas)	2000	2000	12000	8700
Batata-doce (Toneladas)	5	5	40	40
Cebola (Toneladas)	1500	1500	30000	60000
Mandioca (Toneladas)	0	-	-	-
Melancia (Toneladas)	200	200	3000	1800
Tomate (Toneladas)	50	50	2000	1900

Tabela 17 – Lavoura Belém do São Francisco (IBGE, 2006-2012)

Belém do São Francisco - PE	Área plantada (Hectares)	Área colhida (Hectares)	Quantidade produzida	Valor da produção (Mil Reais)
Banana (cacho) (Toneladas)	15	15	180	126
Coco-da-baía (Mil frutos)	27	27	378	189
Goiaba (Toneladas)	16	16	480	677
Mamão (Toneladas)	9	9	180	144
Manga (Toneladas)	600	600	12000	12000
Maracujá (Toneladas)	3	3	45	45
Uva (Toneladas)	8	8	200	408
Arroz (em casca) (Toneladas)	600	600	2340	1697
Cebola (Toneladas)	700	700	14000	14560
Feijão (em grão) (Toneladas)	620	620	930	2546
Mandioca (Toneladas)	15	15	1	1
Tomate (Toneladas)	20	20	600	564

Tabela 18 – Lavoura Curaça (IBGE, 2006-2012)

	Área plantada (Hectares)	Área colhida (Hectares)	Quantidade produzida	Valor da produção (Mil Reais)
Cebola (Toneladas)	350	350	7000	6860
Feijão (em grão) (Toneladas)	849	111	185	344
Mandioca (Toneladas)	658	0	0	0
Melancia (Toneladas)	775	385	9625	3850
Melão (Toneladas)	325	325	4875	3169
Milho (em grão) (Toneladas)	348	104	179	103
Tomate (Toneladas)	10	10	220	183
Banana (cacho) (Toneladas)	768	768	17664	12515
Coco-da-baía (Mil frutos)	70	70	1260	575
Goiaba (Toneladas)	56	56	840	630
Limão (Toneladas)	5	5	50	30
Mamão (Toneladas)	90	90	1800	945
Manga (Toneladas)	452	452	10396	4158
Maracujá (Toneladas)	100	100	2500	2375
Uva (Toneladas)	27	27	729	1707

Tabela 19 – Lavoura Abaré (IBGE, 2006-2012)

	Área plantada (Hectares)	Área colhida (Hectares)	Quantidade produzida	Valor da produção (Mil Reais)
Feijão (em grão) (Toneladas)	300	0	0	0
Mandioca (Toneladas)	30	0	0	0
Milho (em grão) (Toneladas)	300	0	0	0
Banana (cacho) (Toneladas)	70	77,78	70	77,78
Manga (Toneladas)	20	22,22	20	22,22

Tabela 21 – Demanda de água anual e mensal de cana-de-açúcar atualizados para 2035 em metros cúbicos por mês por hectare em cada município (cenário A2)

Município / Mês	Casa Nova	Juazeiro	Curaçá *	Rodelas *	Glória *	Petro-lina	Santa M. da BV *	Orocó	Petro-lândia
Janeiro	899	1561	1233	1233	1233	1572	1233	1233	899
Fevereiro	929	1663	1295	1295	1295	1661	1295	1295	929
Março	695	1071	885	885	885	1077	885	885	695
Abril	1101	1806	1454	1454	1454	1808	1454	1454	1101
Maió	1430	2152	1784	1784	1784	2126	1784	1784	1430
Junho	1584	2177	1863	1863	1863	2106	1863	1863	1584
Julho	1722	2313	1999	1999	1999	2239	1999	1999	1722
Agosto	2111	2712	2401	2401	2401	2671	2401	2401	2111
Setembro	2361	3107	2733	2733	2733	3105	2733	2733	2361
Outubro	2291	3188	2740	2740	2740	3192	2740	2740	2291
Novembro	1668	2544	2107	2107	2107	2549	2107	2107	1668
Dezembro	1177	1927	1552	1552	1552	1928	1552	1552	1177
Média anual	1497	2185	1837	1837	1837	2169	1837	1837	1497

* Esses municípios não tiveram cultivo de cana-de-açúcar em 2006 de acordo com os dados regionais e por isso foram utilizados valores médios dos demais municípios estudados.

Tabela 22 – Demanda média ponderada de água anual e mensal para Outras culturas em metros cúbicos por mês por hectare em cada município para 2035 (cenário A2)

Município / Mês	Casa Nova	Juazeiro	Curaçá	Rodelas	Glória	Petrolina	Santa M. da BV	Orocó	Petro-lândia
Janeiro	408	1016	502.	721	818	1057	318	675	598
Fevereiro	434	1259	524	711	790	1392	1 135	738	895
Março	291	607	319	416	589	747	591	526	418
Abril	564	1568	812	616	681	1765	862	860	731
Maió	884	2524	1589	882	604	2394	1466	1154	1509
Junho	1047	2732	1598	828	552	2362	1721	1156	1976
Julho	1157	2829	1873	966	497	2527	1541	1199	2062
Agosto	1402	2867	2074	1306	566	2895	1883	1513	2127
Setembro	1517	3511	2566	1569	961	3784	2801	1961	2523
Outubro	1451	3700	2745	1742	1365	3987	3330	2192	2582
Novembro	953	2287	1671	1442	1187	2747	2540	1850	1395
Dezembro	620	1848	1168	1027	887	1985	1841	1204	852
Média anual	894	2229	1453	1019	792	2303	1669	1252	1472

Tabela 23 – Número de trabalhadores por tonelada produzida no ano de referência (2006) e no cenário A2 por safra e município

Município	Rendimento (toneladas / ha) * 2006		Número de trabalhadores por hectare ** (2006 e 2035 A2)		Número de trabalhadores por tonelada produzida (2006)	
	Cana	De outros	Cana	De outros	Cana	De outros
Petrolina	29	25	0,1344	1,3453	0,005	0,054
Juazeiro	90	24	0,1344	1,0797	0,002	0,045
Petrolândia	41	24	0,1344	0,7551	0,003	0,032
Santa Maria da Boa Vista	26	17	0,1344	1,3441	0,005	0,078
Oroco	15	20	0,1344	1,7341	0,009	0,088
Curaça	39	20	0,1344	1,6211	0,003	0,080
Casa Nova	39	24	0,1344	1,5173	0,003	0,064
Rodelas	41	16	0,1344	0,8837	0,003	0,056
Gloria	41	21	0,1344	1,1523	0,003	0,054

* Rendimento médio de cultura em cada município entre 2002 e 2012, obtido utilizando a Produção Agrícola Municipal; ** Censo Agrícola 2006

Tabela 24 – Requisitos de mão-de-obra para área irrigada em cada município para 2035 sob cenário A2

Perímetro	Município	Rendimento os da colheita (Toneladas)		Taxa de crescimento entre 2005 e 2035 dada por MagPIE no cenário A2		Rendimento os da colheita (Toneladas)		Número de trabalhadores por tonelada produzida em 2006		Número de trabalhadores por hectare 2035 (A2)	
		Cana	Outras	Cana	Outras	Cana	Outras	Cana	Outras	Cana	Outras
Nilo coelho	Petrolina	29	25	1,07957	0,95883	31	24	0,0047	0,0544	0,15	1,29
Bebedouro	Petrolina	29	25	1,03288	0,95974	30	24	0,0047	0,0544	0,14	1,29
Salitre	Juazeiro	90	24	1,07957	0,95883	97	23	0,0015	0,0452	0,15	1,04
Mandacaru	Juazeiro	90	24	1,03288	0,95974	92	23	0,0015	0,0452	0,14	1,04
Tourão	Juazeiro	90	24	1,03288	0,95974	92	23	0,0015	0,0452	0,14	1,04
Maniçoba	Juazeiro	90	24	1,03288	0,95974	92	23	0,0015	0,0452	0,14	1,04
Curaçá	Juazeiro	90	24	1,03288	0,95974	92	23	0,0015	0,0452	0,14	1,04
Iço	Petrolândia	41	24	1,03288	0,95974	42	23	0,0033	0,0321	0,14	0,72
A. Sales	Petrolândia	41	24	1,03288	0,95974	42	23	0,0033	0,0321	0,14	0,72
Barreiras	Petrolândia	41	24	1,02612	0,95681	42	23	0,0033	0,0321	0,14	0,72
Caraibas	Santa Maria da Boa Vista	26	17	1,03288	0,95974	27	17	0,0051	0,0780	0,14	1,29
Brígida	Oroco	15	20	1,03288	0,95974	15	19	0,0090	0,0880	0,14	1,66
P Branca	Curaçao	39	20	1,03288	0,95974	41	19	0,0034	0,0801	0,14	1,56
Terra Nova	Petrolina	29	25	1,07957	0,95883	31	24	0,0047	0,0544	0,15	1,29
Pontal Sobradinho	Petrolina	29	25	1,07957	0,95883	31	24	0,0047	0,0544	0,15	1,29
Pontal	Petrolina	29	25	1,03288	0,95974	30	24	0,0047	0,0544	0,14	1,29
Serra da Bateira	Juazeiro	90	24	1,07957	0,95883	97	23	0,0015	0,0452	0,15	1,04
Brejo de Santa Maria	Santa Maria da Boa Vista	26	17	1,03288	0,95974	27	17	0,0051	0,0780	0,14	1,29
Cruz das Almas	Casa Nova	39	24	1,07957	0,95883	42	23	0,0035	0,0640	0,15	1,45
Sertão Pernambucano	Casa Nova	39	24	1,07957	0,95883	42	23	0,0035	0,0640	0,15	1,45
Rodelas	Rodelas	41	16	1,03288	0,95974	42	15	0,0033	0,0557	0,14	0,85
Gloria	Gloria	41	21	1,02612	0,95681	42	20	0,0033	0,0545	0,14	1,10
Dois Irmãos	Gloria	41	21	1,02612	0,95681	42	20	0,0033	0,0545	0,14	1,10
Paulo Afonso	Gloria	41	21	1,02612	0,95681	42	20	0,0033	0,0545	0,14	1,10

Tabela 25 – Valor de suprimentos por unidade de produção (Mil Reais por tonelada produzida) em 2006, obtido a partir do valor do suprimento por área irrigada e dos rendimentos das culturas

Município	Suprimentos por hectare em Milhares de Reais * (2006 e 2035 A2)		Milhares de reais por TON 2006 **	
	Cana	Outras	Cana	Outras
Petrolina	0,86	6,14	0,0302	0,2485
Juazeiro	0,86	3,94	0,0097	0,1651
Petrolândia	0,86	1,16	0,0211	0,0495
Santa Maria da Boa Vista	0,86	1,37	0,0328	0,0793
Oroco	0,86	0,99	0,0402	0,0481
Curaçao	0,86	2,10	0,0211	0,0961
Santa Maria da Boa Vista	0,86	1,37	0,0328	0,0793
Casa Nova	0,86	4,71	0,0225	0,1989
Rodelas	0,86	1,48	0,0211	0,0933
Gloria	0,86	0,98	0,0211	0,0465

* Censo Agrícola 2006; ** Obtido a partir da relação entre as primeiras colunas e os rendimentos das culturas para 2006,

Tabela 26 – Custos variáveis da terra em 2006 e atualizado para 2035 no perímetros atuais e cenário A2, utilizando a taxa de crescimento dos custos de produção dada por MagPIE entre 2005 e 2035

Perímetro	Município	Custos variáveis de terra em 2006 em Milhares de Reais por hectare	K1 cobrado em 2006 ** (Mil Reais por hectare)	A2_ (2035)	
				Custos variáveis de terra (Milhares de reais por hectare)	K1 (Milhares de reais por hectare)
Nilo coelho	Petrolina	0,509	0,084	0,784	0,130
Bebedouro	Petrolina	0,509	0,075	0,784	0,115
Salitre	Juazeiro	0,532	0,075	0,818	0,115
Mandacaru **	Juazeiro	0,532	0,045	0,818	0,069
Tourão	Juazeiro	0,532	0,075	0,818	0,115
Maniçoba	Juazeiro	0,532	0,048	0,818	0,074
Curaçá **	Juazeiro	0,532	0,075	0,818	0,115
I Mandantes	Petrolândia	0,098	0,075	0,151	0,115
A Sales	Petrolândia	0,098	0,054	0,151	0,083
Barreiras	Petrolândia	0,098	0,054	0,151	0,083
Caraíbas	Santa Maria da Boa V	0,172	0,075	0,264	0,115
Brígida	Oroco	0,130	0,054	0,200	0,083
P Branca	Curaçao	0,140	0,075	0,216	0,115
Terra Nova **	Petrolina	0,509	0,075	0,784	0,115
Pontal Sobradinho **	Petrolina	0,509	0,075	0,784	0,115
Pontal **	Petrolina	0,509	0,075	0,784	0,115
Serra da Batateira **	Juazeiro	0,532	0,075	0,818	0,115

Brejo de Santa Maria **	Santa Maria da Boa V	0,172	0,075	0,264	0,115
Cruz das Almas **	Casa Nova *	0,520	0,075	0,801	0,115
Sertão Pernambucano **	Casa Nova *	0,520	0,075	0,801	0,115
Rodelas **	Rodelas *	0,098	0,045	0,151	0,069
Gloria **	Gloria *	0,098	0,045	0,151	0,069
Dois Irmãos **	Gloria *	0,098	0,075	0,151	0,115
Paulo Afonso **	Gloria *	0,098	0,075	0,151	0,115

* Para esses municípios os custos variáveis, em 2006, são valores médios ou proxies; ** perímetros não existente em 2006 tem seu K1 na Baseline relacionado ao tamanho,

Tabela 27 – Custos variáveis dos trabalhadores em Milhares de Reais / Trabalhador em cada município (Dados do Censo 2006) projetados para o futuro usando MagPIE taxa de crescimento dos custos de produção e mudanças nos rendimentos das culturas no cenário A2

Perímetro	Município	Baseline (2006)	A2_ (2035)	
			CANA	OUTROS
Nilo Coelho	Petrolina	1,892	2,863	2,850
Bebedouro	Petrolina	1,892	2,993	2,848
Salitre	Juazeiro	2,416	3,657	3,640
Mandacaru	Juazeiro	2,416	3,822	3,637
Tourão	Juazeiro	2,416	3,822	3,637
Maniçoba	Juazeiro	2,416	3,822	3,637
Curaçá	Juazeiro	2,416	3,822	3,637
I Mandantes	Petrolândia	0,288	0,456	0,434
A Sales	Petrolândia	0,288	0,456	0,434
Barreiras	Petrolândia	0,288	0,459	0,435
Caraíbas	Santa Maria da Boa V	0,193	0,306	0,291
Brígida	Oroco	0,060	0,095	0,090
P Branca	Curaçao	0,288	0,456	0,434
Terra Nova	Petrolina	1,892	2,863	2,850
Pontal Sobradinho	Petrolina	1,892	2,863	2,850
Pontal	Petrolina	1,892	2,993	2,848
Serra da Batateira	Juazeiro	2,416	3,657	3,640
Brejo de Santa Maria	Santa Maria da Boa V	0,193	0,306	0,291
Cruz das Almas	Casa Nova	0,461	0,698	0,695
Sertão Pernambucano	Casa Nova	0,461	0,698	0,695
Rodelas	Rodelas	0,160	0,254	0,241
Gloria	Gloria	0,095	0,152	0,144
Dois Irmãos	Gloria	0,095	0,152	0,144
Paulo Afonso	Gloria	0,095	0,152	0,144

Tabela 28 – Preços médios em Milhares de Reais por Tonelada produzidos nos cenários Baseline e A2, utilizando a taxa de crescimento dos custos de produção pelas lavouras

Perímetro	Município	Preço médio (2006)		Preço médio A2 (2035)	
		Cana	Outras	Cana	Outras
Nilo Coelho	Petrolina	0,097	0,842	0,158	1,217
Bebedouro	Petrolina	0,097	0,842	0,158	1,217
Salitre	Juazeiro	0,101	0,689	0,164	0,996
Mandacaru	Juazeiro	0,101	0,689	0,164	0,996
Tourão	Juazeiro	0,101	0,689	0,164	0,996
Maniçoba	Juazeiro	0,101	0,689	0,164	0,996
Curaçá	Juazeiro	0,101	0,689	0,164	0,996
I Mandantes	Petrolândia	0,090 *	0,371	0,147	0,536
A Sales	Petrolândia	0,090 *	0,371	0,147	0,536
Barreiras	Petrolândia	0,090 *	0,371	0,147	0,536
Caraíbas	Santa Maria da Boa V	0,088	0,394	0,145	0,570
Brigida	Oroco	0,085	0,597	0,138	0,863
P Branca	Curaçao	0,090 *	0,405	0,147	0,584
Terra Nova	Petrolina	0,097	0,842	0,158	1,217
Pontal Sobradinho	Petrolina	0,097	0,842	0,158	1,217
Pontal	Petrolina	0,097	0,842	0,158	1,217
Serra da Batateira	Juazeiro	0,101	0,689	0,164	0,996
Brejo de Santa Maria	Santa Maria da Boa V	0,090	0,498	0,147	0,719
Cruz das Almas	Casa Nova	0,079	0,756	0,129	1,093
Sertão Pernambucano	Casa Nova	0,079	0,756	0,129	1,093
Rodelas	Rodelas	0,090 *	0,301	0,147	0,435
Gloria	Gloria	0,090 *	0,321	0,147	0,435
Dois Irmãos	Gloria	0,090 *	0,321	0,147	0,463
Paulo Afonso	Gloria	0,090 *	0,321	0,147	0,463

APÊNDICE C

GAMS Model Code – o código em GAMS a seguir mostra o modelo implementado em GAMS, a extração de dados, manipulação dos dados (limites, restrições), solução, exportação dos resultados não foram incluídos devido o espaço

```

EQUATIONS
R_no(n,y,m)    River section node
R_ns(n,y,m)    In node
Divert_nr(n,y,m)  Divert irrigation node
Divert_nh(n,y,m)  Divert human supply node
Divert_nd(n,y,m)  Divert other uses node
R_nl(n,y,m)    Reservoir node
R_np(n,y,m)    Power Reservoir node
R_nn(n,y,m)    River section node
Hpower(n,y,m)  Hydro Power
HPpower(n,y,m) Hydro Power pass trough reservoirs
R_level(n,y,m) Reservoir Level
R_Area(n,y,m)  Reservoir Area
Tailrace(n,y,m) Tailrace Level
PowerWaterDivision(n,y,m) Release for Turbine
PowerWaterDivisionFT(n,y,m) Release for Turbine
TotalHydro(y,m) Total Hydro Power per Month
CostsIrrigation(n,y,m) Costs for the irrigation users
CostsTransposition(n,y,m) Costs for PISF
CostsHumanSupply(n,y,m) Costs for the human supply users
BenefitHydroPower(n,y,m) Net Benefit for the hydropower users
BenefitHydroPowerPassTrough(n,y,m) Net Benefit for the hydropower pass trough users
*HPOverFirmEnergyNetBenefit(n,y,m) Net Benefit for the hydropower users above firm energy
*HPPoverFirmEnergyNetBenefit(n,y,m) Net Benefit for the hydropower pass trough users above
firm energy
Waterlimit(n,y,m) Allocation Limit
WaterlimitPISF(n,y,m) Allocation Limit PISF
WaterlimitHS(n,y,m) Allocation Limit Human Supply
ReleaseLowSobradinho(n,y,m) Release Threshold Sobradinho
ReleaseLowXingo(n,y,m) Release Threshold Xingo
*MonthlyWaterAllocation(n,y,m) Allocation monthly
*YearlyWaterAllocation(n,y) Allocation yearly
*TotalIrrBenefit(y) Total
*BenefitStorage(y,m) Benefit Storage
*DeltaR(n,y,m) Delta Volume Reservatorio
*FirmEnergyReservoirs(n) Provides Firm Energy
*FirmEnergyPowerReservoirs(n) Provides Firm Energy
*DeltaLevel(n,y,m) Level Variation Reservoir
*DeltaLevelYear(n,y) Yearly Level Variation
PLDFunction(y,m) PLD
CostsHydroPower Cost Hydro Power
CostsHydroPowerPassTrough Costs HPP
AllocatedWaterInPercent(n,y,m) Allocated Water in Percent
Objective    OF;

* -----WATER BALANCE-----
* River section node: Release = Inflow [m3/s]
R_no(n,y,m)$ (n_riversection(n)).. Release(n,y,m) =e= Inflow(n,y,m);
* Source node: Release = Supply [m3/s]
R_ns(n,y,m)$ (n_inflow(n)).. Release(n,y,m) =e= Runoff(n,y,m);
* Irrigation node: Divert = Alocated Water [m3/s]
Divert_nr(n,y,m)$ (n_irrigation(n)).. Divert(n,y,m) =e= WaterAllocation(n,y,m);
* Human supply node: Divert = Demanda *Days(m) Water demand in 1000m³!
Divert_nh(n,y,m)$ (n_humansupply(n)).. Divert(n,y,m) =e= WaterAllocation(n,y,m);
* Other user node: Divert = Demanda PISF in 1000m³
Divert_nd(n,y,m)$ (n_otherusers(n)).. Divert(n,y,m) =e= WaterAllocation(n,y,m);

Waterlimit(n,y,m)$ (n_irrigation(n)).. WaterAllocation(n,y,m)*Days(m)*24*60*60/1000 =l=
Demand(n,m);
WaterlimitPISF(n,y,m)$ (n_otherusers(n)).. WaterAllocation(n,y,m)*Days(m)*24*60*60/1000 =l=
Demand(n,m);
WaterlimitHS(n,y,m)$ (n_humansupply(n)).. WaterAllocation(n,y,m)*Days(m)*24*60*60/1000 =l=
Demand(n,m);

*Relation storage level area
R_level(n,y,m)$ (n_reservoirs(n)).. RLevel(n,y,m) =e= PolyLevelStorage(n,'1')

```

```

+PolyLevelStorage(n,'2')*RStorage(n,y,m)
+PolyLevelStorage(n,'3')*power(RStorage(n,y,m),2)
+PolyLevelStorage(n,'4')*power(RStorage(n,y,m),3)
+PolyLevelStorage(n,'5')*power(RStorage(n,y,m),4);
R_area(n,y,m)$(n_reservoirs(n)).. RArea(n,y,m) =e= PolyAreaLevel(n,'1')
+PolyAreaLevel(n,'2')*RLevel(n,y,m)
+PolyAreaLevel(n,'3')*power(RLevel(n,y,m),2)
+PolyAreaLevel(n,'4')*power(RLevel(n,y,m),3)
+PolyAreaLevel(n,'5')*power(RLevel(n,y,m),4);
Tailrace(n,y,m)$(n_reservoirs(n)).. TailLevel(n,y,m) =e= TailraceLevel(n,'1')
+TailraceLevel(n,'2')*Release(n,y,m)
+TailraceLevel(n,'3')*power(Release(n,y,m),2)
+TailraceLevel(n,'4')*power(Release(n,y,m),3)
+TailraceLevel(n,'5')*power(Release(n,y,m),4);

* Reservoir node: Release = Mass Balance
R_nl(n,y,m)$(n_reservoirs(n)).. RStorage(n,y,m) =e=
*first year
beg_S(n)$(ord(m) EQ 1 and ord(y) EQ 1)
+ RStorage(n,y-1,m-1)$(ord(m) EQ 1)
+ RStorage(n,y,m-1)$(ord(m) NE 1)
+ Inflow(n,y,m)*Days(m)*24*60*60/1000000
-Release(n,y,m)*Days(m)*24*60*60/1000000
-Evaporation(n,y,m)/1000*RArea(n,y,m)
+pluviometria(n,y,m)/1000*RArea(n,y,m) ;

* Power Reservoir node: Release = Inflow
R_np(n,y,m)$(n_powerreservoirs(n)).. Release(n,y,m) =e= Inflow(n,y,m);

* All nodes: Inflow = Sum of Releases from Upstream-Sum of Diversions- Sum of Share
R_nn(n,y,m).. Inflow(n,y,m) =e= sum(n1$(n_from_n(n,n1)),Release(n1,y,m))
- sum(n1$(n_to_nr(n,n1)),Divert(n1,y,m))
- sum(n1$(n_share_nr(n,n1)),Inflow(n1,y,m));

*Limits
ReleaseLowSobradinho(n,y,m)$(n_reservoirs('Sobradinho')).. Release('Sobradinho',y,m) =g= 1300;
ReleaseLowXingo(n,y,m)$(n_powerreservoirs('Xingo')).. Release('Xingo',y,m) =g= 1300;

*-----
*-----HYDROPOWER-----
* Adding a degree of freedom for Release on power turbines and to bypass
PowerWaterDivision(n,y,m)$(n_reservoirs(n)).. Release(n,y,m) =e= PR(n,y,m) + BP(n,y,m);
PowerWaterDivisionFT(n,y,m)$(n_powerreservoirs(n)).. Release(n,y,m) =e= PR(n,y,m) +
BP(n,y,m);

* Generated Hydropower (MW)
Hpower(n,y,m)$(n_reservoirs(n)).. HP(n,y,m) =e= eff(n) * 998 * PR(n,y,m)
* 9.8 * (RLevel(n,y,m)-TailLevel(n,y,m))/1000000;
HPpower(n,y,m)$(n_powerreservoirs(n)).. HP(n,y,m) =e= (eff(n) * 998 * PR(n,y,m)
* 9.8 * head(n))/1000000;

*Hydropower in GWh
TotalHydro(y,m).. Phydro(y,m) =e= sum(n$n_reservoirs(n),HP(n,y,m)*Days(m)*24)/1000
+sum(n$n_powerreservoirs(n),HP(n,y,m)*Days(m)*24)/1000;

*-----
*-----COSTS/BENEFITS USES-----
---
*Integration polynomial Demand Curve (Irrigation Costs)
CostsIrrigation(n,y,m)$(n_irrigation(n)).. CostsIRR(n,y,m) =e= -FunDemPolyMonth(n,
m,'A')*POWER(WaterAllocation(n,y,m)*Days(m)*24*60*60/1000,5)/5
-FunDemPolyMonth(n,m,'B')*POWER(WaterAllocation(n,y,m)*Days(m)*24*60*60/1000,4)/4
-FunDemPolyMonth(n,m,'C')*POWER(WaterAllocation(n,y,m)*Days(m)*24*60*60/1000,3)/3
-FunDemPolyMonth(n,m,'D')*POWER(WaterAllocation(n,y,m)*Days(m)*24*60*60/1000,2)/2
-FunDemPolyMonth(n,m,'E')*WaterAllocation(n,y,m)*Days(m)*24*60*60/1000
+FunDemPolyMonth(n,m,'A')*POWER(Demand(n,m),5)/5
+FunDemPolyMonth(n,m,'B')*POWER(Demand(n,m),4)/4
+FunDemPolyMonth(n,m,'C')*POWER(Demand(n,m),3)/3
+FunDemPolyMonth(n,m,'D')*POWER(Demand(n,m),2)/2
+FunDemPolyMonth(n,m,'E')*Demand(n,m);
*PISF polynomial Demand Curve (PISF Costs)
CostsTransposition(n,y,m)$(n_otherusers(n)).. CostsPISF(n,y,m) =e= -FunDemPolyMonth(n,
m,'A')*POWER(WaterAllocation(n,y,m)*Days(m)*24*60*60/1000,5)/5
-FunDemPolyMonth(n,m,'B')*POWER(WaterAllocation(n,y,m)*Days(m)*24*60*60/1000,4)/4
-FunDemPolyMonth(n,m,'C')*POWER(WaterAllocation(n,y,m)*Days(m)*24*60*60/1000,3)/3
-FunDemPolyMonth(n,m,'D')*POWER(WaterAllocation(n,y,m)*Days(m)*24*60*60/1000,2)/2
-FunDemPolyMonth(n,m,'E')*WaterAllocation(n,y,m)*Days(m)*24*60*60/1000

```

```

+FunDemPolyMonth(n, m, 'A') * POWER(Demand(n, m), 5) / 5
+FunDemPolyMonth(n, m, 'B') * POWER(Demand(n, m), 4) / 4
+FunDemPolyMonth(n, m, 'C') * POWER(Demand(n, m), 3) / 3
+FunDemPolyMonth(n, m, 'D') * POWER(Demand(n, m), 2) / 2
+FunDemPolyMonth(n, m, 'E') * Demand(n, m);

*Integration polynomial Demand Curve (human consumption)
CostsHumanSupply(n, y, m) $(n_humansupply(n)).. CostsHS(n, y, m) =e= -FunDemPolyMonth(n,
m, 'A') * POWER(WaterAllocation(n, y, m) * Days(m) * 24 * 60 * 60 / 1000, 5) / 5
-FunDemPolyMonth(n, m, 'B') * POWER(WaterAllocation(n, y, m) * Days(m) * 24 * 60 * 60 / 1000, 4) / 4
-FunDemPolyMonth(n, m, 'C') * POWER(WaterAllocation(n, y, m) * Days(m) * 24 * 60 * 60 / 1000, 3) / 3
-FunDemPolyMonth(n, m, 'D') * POWER(WaterAllocation(n, y, m) * Days(m) * 24 * 60 * 60 / 1000, 2) / 2
-FunDemPolyMonth(n, m, 'E') * WaterAllocation(n, y, m) * Days(m) * 24 * 60 * 60 / 1000
+FunDemPolyMonth(n, m, 'A') * POWER(Demand(n, m), 5) / 5
+FunDemPolyMonth(n, m, 'B') * POWER(Demand(n, m), 4) / 4
+FunDemPolyMonth(n, m, 'C') * POWER(Demand(n, m), 3) / 3
+FunDemPolyMonth(n, m, 'D') * POWER(Demand(n, m), 2) / 2
+FunDemPolyMonth(n, m, 'E') * Demand(n, m);

AllocatedWaterInPercent(n, y, m) $(Demand(n, m) <> 0).. AllocationPercent(n, y, m) =e=
WaterAllocation(n, y, m) * Days(m) * 24 * 60 * 60 / 1000 / Demand(n, m);

*Benefits energy production em Mil R$ utilizando MWh
CostsHydroPower(n, y, m) $(n_reservoirs(n)).. CostHP(n, y, m) =e= (HP(n, y, m) -
EnergyAsseg(n)) * PLD(y, m);
CostsHydroPowerPassTrough(n, y, m) $(n_powerreservoirs(n)).. CostHPP(n, y, m) =e= (HP(n, y, m) -
EnergyAsseg(n)) * PLD(y, m);
BenefitHydroPower(n, y, m) $(n_reservoirs(n)).. BenefitHP(n, y, m) =e= HP(n, y, m) * Days(m) * 24 *
PLD(y, m) / 1000;
BenefitHydroPowerPassTrough(n, y, m) $(n_powerreservoirs(n)).. BenefitHPP(n, y, m) =e=
HP(n, y, m) * Days(m) * 24 * PLD(y, m) / 1000;

*Energy price 12 month average
alias(m, am);
PLDFunction(y, m).. PLD(y, m) =e= 543.189192906309 * exp(-
0.00079183246142 * (sum(am, runoff('SaoFrancisco', y, am)) / 12));

*OF
objective..
obj=e=sum(n_humansupply(n), (sum(y, sum(m, CostsHS(n, y, m)))) + sum(n_otherusers(n), (sum(y, sum(m, Co
stsPISF(n, y, m)))) + sum(n$n_irrigation(n), (sum(y, sum(m, CostsIRR(n, y, m)))) -
sum(n$n_reservoirs(n), (sum(y, sum(m, BenefitHP(n, y, m)))) -
sum(n$n_powerreservoirs(n), (sum(y, sum(m, BenefitHPP(n, y, m)))) + sum(n$n_reservoirs(n), (sum(y, su
m(m, CostHP(n, y, m)))) + sum(n$n_powerreservoirs(n), (sum(y, (sum(m, CostHPP(n, y, m))))));

```

APÊNDICE D

Resultados tabulados do modelo hidro-econômico

Tabela 29 – Resumo resultados simulação modelo - Cenário: Baseline

Custos/Benefícios em Mil R\$	Referencia (sem PISF)	Prior. Abast. (sem PISF)	Referencia com PISF	Abast. sem perdas (sem PISF)	Dim. energia assegurada	Hidrogr. Amb	Controle Nív	Capacidade reduzida
Custo escassez aba:	236,27	-	360,16	96,36	49,71	21.372,80	15.580,18	134.997,27
Custo escassez irrig	3.508,89	3.396,79	3.992,93	3.493,29	1.128,15	26.410,87	23.510,92	148.615,68
Custo escassez perí	27.158,48	27.163,81	34.481,45	26.954,07	4.906,90	117.723,61	115.462,84	510.049,51
PISF			-		-	664.080,55	545.434,74	2.368.174,08
Beneficio Sobr./Ita	17.263.895,84	17.263.818,37	17.155.379,87	17.266.810,64	16.294.206,74	16.842.706,74	15.871.565,46	14.121.802,71
Beneficio Moxoto, l	52.119.377,18	52.119.066,20	51.612.704,95	52.133.929,63	48.894.716,23	50.511.754,70	48.525.706,92	40.816.287,96
Preço sombra rio SF	904,18	904,23	974,37	902,27	523,47	2.579,16	5.628,08	
Benefícios	69.383.273,03	69.352.323,99	68.729.250,28	69.370.196,55	65.182.838,21	66.524.873,62	63.697.283,69	51.776.254,12
Custos	30.903,65	30.560,59	38.834,54	30.543,72	6.084,76	829.587,83	699.988,68	3.161.836,54

Tabela 30 – Resumo resultados simulação modelo - Cenário: CV (*Hidrograma ambiental adaptado e redução vazão mínima para 700m³/s)

Custos/Benefícios em Mil R\$	Referencia (sem PISF)	Prior. Abast. (sem PISF)	Referencia com PISF	Abast. sem perdas	Dim. energia assegurada	Hidrogr. Amb	Controle Nív	Capacidade reduzida
Custo escassez ab	171.395,12	-	172.142,99		127.433,54	223.523,05	181.079,29	246.293,97
Custo escassez irr	158.327,79	158.828,22	159.300,03		110.205,14	269.420,03	166.009,36	309.739,61
Custo escassez pe	580.963,22	583.383,70	585.498,96		381.136,50	1.175.891,96	603.563,07	1.292.570,75
PISF			3.008.168,03		2.520.599,40	3.402.698,26	3.133.457,03	3.829.484,55
Beneficio Sobr./It	15.528.024,90	15.521.081,86	15.468.535,10		15.103.106,88	15.229.503,80	14.885.685,99	13.396.782,08
Beneficio Moxoto	46.022.377,17	45.988.864,54	45.859.058,40		44.631.507,02	44.724.140,43	44.619.601,72	38.075.992,62
Preço sombra rio	3.568,82	3.565,22	3.607,37		2.444,10	3.240,93	4.195,29	
Benefícios	61.550.402,07	60.767.734,49	57.402.483,50	-	56.595.239,33	54.882.110,93	55.421.178,95	45.794.685,83
Custos	910.686,14	742.211,92	3.925.110,00	-	3.139.374,58	5.071.533,30	4.084.108,76	5.678.088,88

Tabela 31 – Resumo resultados simulação modelo - Cenário: A2

Custos/Benefícios em Mil R\$	Referencia (sem PISF)	Prior. Abast. (sem PISF)	Referencia com PISF	Abast. sem perdas	Dim. energia assegurada	Hidrogr. Amb	Controle Nív	Capacidade reduzida
Human Supply Sc	619,23	-	1.759,56		256,47	87.647,08	3.848,99	77.823,42
Small Famers Sca	8.889,90	8.887,80	11.943,40		5.538,72	77.128,63	26.259,24	141.707,19
Irrigation Sites sca	61.947,40	61.961,03	86.829,91		33.530,55	812.519,95	190.565,74	1.286.658,46
PISF	-	-	1.324.502,56		557.106,49	3.108.870,74	2.529.157,75	1.377.017,73
Benefits Sobradin	15.703.127,46	15.703.028,57	15.281.944,88		14.593.123,94	15.300.106,89	13.900.676,69	12.712.843,56
Benefits Moxoto,	46.499.872,91	46.499.488,92	44.879.533,63		43.063.897,95	44.930.952,34	41.098.430,96	35.626.064,77
Shadow Price Relk	315,99	316,00	347,49			3.091,49	810,94	196.587,24
Benefícios	62.203.000,37	62.131.668,66	58.736.443,08	-	57.060.589,66	56.144.892,82	52.249.275,93	45.455.701,54
Custos	71.456,54	70.848,84	1.425.035,42	-	596.432,23	4.086.166,41	2.749.831,71	2.883.206,80

Tabela 32 – Resumo resultados simulação modelo - Cenário: B1 (*Hidrograma ambiental adaptado e redução vazão mínima para 900m³/s)

Custos/Benefícios em Mil R\$	Referencia (sem PISF)	Prior. Abast. (sem PISF)	Referencia com PISF	Abast. sem perdas	Dim. energia assegurada	Hidrogr. Amb	Controle Nív	Capacidade reduzida
Human Supply Sc	132.342,33	-	137.269,88		69.779,12	430.169,88	151.797,26	138.936,06
Small Famers Sca	138.375,71	138.642,97	143.247,50		91.736,61	758.807,76	158.004,51	144.066,69
Irrigation Sites sca	329.306,91	330.360,30	340.161,16		171.415,16	2.411.924,14	389.393,76	347.917,24
Custo de escassez	-	-	10.458.852,28		7.568.925,04	11.787.092,45	11.500.649,26	10.464.201,20
Benefícios Sobraa	15.413.652,26	15.408.446,05	15.253.296,63		15.147.291,66	15.494.596,34	15.197.878,60	15.320.366,69
Benefícios Moxot	46.812.787,15	46.788.174,35	46.256.874,86		45.595.394,43	46.316.118,57	46.028.396,78	46.461.238,65
Preço sombra SF	4.347,16	4.347,93	4.461,63		3.527,14	8.434,59	5.336,94	4.602,94
Benefícios	62.226.439,41	61.727.617,12	50.430.640,67	-	52.840.830,16	46.422.720,67	49.026.430,58	50.686.484,15
Custos	600.024,95	469.003,28	620.678,54	-	7.901.855,93	15.387.994,23	12.199.844,80	11.095.121,19