

Márcia Maria Guedes Alcoforado de Moraes

Modelo Econômico-Hidrológico Integrado para
Alocação Ótima de Água em Diferentes Usos e
Vinhoto em Áreas Plantadas de Cana na
Bacia do Rio Pirapama

Recife

2003

Universidade Federal de Pernambuco
Programa de Pós-graduação em Economia

**Modelo Econômico-Hidrológico Integrado para
Alocação Ótima de Água em Diferentes Usos e
Vinhoto em Áreas Plantadas de Cana na
Bacia do Rio Pirapama**

Tese

submetida à Universidade Federal de Pernambuco
como parte dos requisitos para obtenção do grau de

Doutor em Economia

Márcia Maria Guedes Alcoforado de Moraes

Recife, julho de 2003.

Modelo Econômico-Hidrológico Integrado para Alocação Ótima de Água em Diferentes Usos e Vinhoto em Áreas Plantadas de Cana na Bacia do Rio Pirapama

Márcia Maria Guedes Alcoforado de Moraes

‘Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de Doutor em Economia, Área de Concentração em Métodos Quantitativos em Economia, e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Economia da Universidade Federal de Pernambuco’.

.....
Yony Sampaio
Orientador

.....
José Lamartine Távora
Coordenador do Programa de
Pós-graduação em Economia

Banca Examinadora:

.....
Yony Sampaio
Presidente

.....
José Almir Cirilo
Co-orientador

.....
Adiel Teixeira de Almeida

.....
Alexandre Stamford

.....
Lurdinha Florêncio

Aos meus filhos Thaís, André e Diogo,
por quem procuro aprender todos os dias.

A Olímpio,
pelo companheirismo e exemplo de ser humano e de pesquisador.

A meus pais, Moacyr e Nilza,
pelos anos de investimento na minha formação.

Água que nasce na fonte serena do mundo
E que abre o profundo grotão
Água que faz inocente riacho e deságua
Na corrente do ribeirão
Águas escuras dos rios
Que levam a fertilidade ao sertão
Águas que banham aldeias
E matam a sede da população
Águas que caem das pedras
No véu das cascatas ronco de trovão
E depois dormem tranquilas
No leito dos lagos, no leito dos lagos
Água dos igarapés onde Iara mãe d'água
É misteriosa canção
Água que o sol evapora pro céu vai embora
Virar nuvens de algodão
Gotas de água da chuva
Alegre arco-íris sobre a plantação
Gotas de água da chuva
Tão tristes são lágrimas na inundação
Águas que movem moinhos
São as mesmas águas
Que encharcam o chão
E sempre voltam humildes
Pro fundo da terra, pro fundo da terra
Terra planeta água... terra planeta água
Terra planeta água.

Guilherme Arantes, *Planeta Água*

Agradecimentos

Enfrentei muitas dificuldades na elaboração do trabalho ora apresentado. Trabalhar na área de apoio a decisão e métodos de busca do ótimo é prazeroso, estimulante, e viabiliza pesquisas que nos faz sentir participantes de um processo maior de busca pela transformação deste país. No entanto, cada nova aplicação das técnicas quantitativas existentes nesta área, pode e em geral nos leva, para contextos, ou seja, ambientes distintos que requerem toda uma adaptação, desde aos termos e equações mais básicas até às pessoas, fonte e objeto de qualquer conhecimento.

Este trabalho está inserido num projeto de pesquisa, financiado pela FINEP, que surgiu encomendado pelo Ministério do Meio Ambiente a quatro universidades brasileiras. Nós da UFPE, constituímos uma parceria envolvendo o Grupo de Recursos Hídricos (GRH) do Departamento de Engenharia Civil e o Departamento de Economia, e aceitamos o desafio de começar a trabalhar com o Pirapama.

Eu particularmente, apesar de ser oriunda dos bancos da Escola de Engenharia, não conhecia ninguém do Grupo de RH e tinha apenas uma idéia do significado de expressões tais como: balanço de massa, engolimento mínimo, etc. Estes últimos ajudados pelos anos trabalhados na CHESF.

No decorrer deste trabalho, aprendi muito. Acredito que são boas as sementes e que bons frutos podem ser colhidos. Acredito mais na simplicidade, na constância de propósitos, no equilíbrio e na vontade de fazer um Brasil e especialmente um Nordeste melhor. E sobretudo, acredito mais nas pessoas.

Dentro deste ambiente multidisciplinar em que o trabalho foi desenvolvido, seria impossível qualquer contribuição, sem a ajuda inestimável que tive de todas as pessoas que começo a relacionar, morrendo de medo de ter esquecido alguém. Me arrependo agora de não ter anotado num diário o nome de todos com que tive contato durante a pesquisa. Falarei de "estranhos", pois mantive contatos apenas pela Internet, e

não conheço sequer o som da voz, de grandes amigos que fiz, no meio do caminho, e de queridos familiares. Não considerem a ordem representativa de mais ou menos gratidão, pois ela é infinita e portanto todas as parcelas também o são. Não se pode comparar. Antes de iniciar a lista de agradecimentos aos *companheiros de viagem* que na verdade somos, quero atribuir a DEUS e ao aumento da minha espiritualidade, a força e o equilíbrio emocional exigidos para iniciar, elaborar e concluir este trabalho.

- Aos funcionários da Companhia Pernambucana de Meio-Ambiente (CPRH), que foram muitos, ao longo da pesquisa. Cito alguns nomes pois houve contatos mais frequentes, mas todos foram extremamente gentis e disponibilizaram informações essenciais para a pesquisa: Joana, Denise, Gilson Lima, Reginaldo, entre outros.
- A todos da Gerência de Qualidade da COMPESA, que também disponibilizaram relatórios técnicos e em especial a aqueles que me cederam o seu tempo, para esclarecer tantas questões: Maria Salete, Keyla Santos, Fábio Henrique e Zé Carlos de Oliveira.
- A Alexandre Moraes, querido cunhado, engenheiro da COMPESA, que foi meu guia na Companhia, me apresentando as pessoas, indicando documentos, e ainda me tirando dúvidas sobre barragens, saneamento, etc.
- Ao Prof. Yony Sampaio, pela definição do problema de tese, aceitação no projeto e confiança depositada.
- Ao Prof. Almir Cirilo, pela oportunidade de convivência com o seu grupo, e ensinamentos na área de Recursos Hídricos. Sem o seu apoio, seria impossível a realização do doutorado-sanduíche.
- A todos os pesquisadores e alunos do Laboratório de Recursos Hídricos, pela camaradagem e total apoio: Ioná e Vaneza, companheiras de agonia

na preparação para as defesas de tese e grandes amigas; Roberta, Marcelo e Margarida, juntos na busca pelo grau de doutor, esta última de malas prontas para Alemanha. Tudo de bom !

- Para todas da Secretaria do GRH do Departamento de Engenharia Civil: Suely, Walquíria, Janaína, Conceição e Eliane(do café), sempre prestimosas, educadas e amigas. Obrigada por tudo.

- Aos bolsistas do projeto, que mesmo tão novos e iniciando em pesquisa, tão bem souberam entender o faz-e-refaz de um trabalho como esse. Obrigada pela paciência, disponibilidade, responsabilidade e excelência nas tarefas:
 - A Sérgio, pela construção das macros e de toda a estrutura em Excel para tratamento dos resultados do GAMS; Pelo apoio no desenvolvimento também em Excel do modelo de simulação de qualidade e pelas alterações no programa fonte em GAMS.
 - A Breno, por toda a parte de tratamento dos mapas, desde a elaboração propriamente dita até a obtenção dos dados a partir deles.

- Aos colegas do projeto Pirapama: Simone Rosa da Silva, fundamental na obtenção da maioria das informações, e no entendimento dos problemas do Pirapama e Hildeberto Jr., pela enorme ajuda na calibração do modelo de simulação de qualidade, nas infindáveis vezes em que tentamos ajustar os parâmetros. Agradeço também pelo auxílio na obtenção de várias informações junto as agroindústrias, bem como nos conceitos tão novos para mim: curva-chave, etc.

- Ao Profs. Augusto e Rogério Petry, chefes do departamento de Economia durante o período deste trabalho, que viabilizaram tantas ausências na sala de aula, mesmo enfrentando problemas sérios de alocação.

- A todos os professores do departamento, por entenderem estas ausências e muito em especial aos Profs. Alexandre Stamford e Maurício Assuero que arcaram com elas, me substituindo ou trocando turmas sempre que pedi.
- A secretaria da Pós-Graduação em Economia, sempre eficiente resolvendo todas as *broncas*. Desde Lia, passando pela querida Manuela, e as *Patrícias*.
- Aos queridos colegas do curso, pelo companheirismo: Evaldo, Tereza, Ceres, Sílvio, Agnaldo, Davi, Rubens, Gasparini, Alexandre e tantos outros.
- Ao Prof. Adiel Teixeira de Almeida, meu orientador de mestrado que me ensinou a fazer pesquisa, e viabilizou minha incursão no doutorado de Economia.
- A Profa. Lurdinha do Grupo de Saneamento do Departamento de Engenharia Civil, que me recebeu sempre que precisei, para discutir o modelo de simulação de qualidade e os procedimentos de calibração.
- A Irene Altafin, da FINEP, que acreditou no estágio no exterior e lutou pela retirada dos entraves burocráticos, que poderiam ter inviabilizado os prazos.
- A Simone Souza, especialista em modelos de qualidade da água, que com a sua simpatia e disposição para o trabalho contagiantes, foi fundamental na estruturação do modelo de simulação de qualidade. Sem ela, este trabalho não teria sequer começado.
- A Fernando Barros, profissional brilhante e ser humano maravilhoso, que me ensinou pelo telefone, sem nem me conhecer, a calcular vazões específicas. Pela Internet, eu em Washington e ele aqui, me tirou dúvidas básicas sobre modelos de operação de reservatórios, funcionamento de PCHs, etc. Esclareceu todas

as minhas questões com bom humor e sabedoria. DEUS o conserve.

- Ao meu querido irmão Oswaldo, administrador de uma usina de beneficiamento de cana em São Paulo, que me ensinou tudo sobre lavoura de cana, processos de produção de álcool e aguardente, etc. Me deu dicas e informações que eu nunca conseguiria oficialmente. Beijão.
- Aos responsáveis pelas agroindústrias da região estudada, que me atenderam sempre com presteza por telefone e INTERNET, e durante encontro na UFRPE, pessoalmente me cederam entrevistas.
- Ao Prof. Mark Rosegrant, pesquisador senior do IFPRI, que me deu a oportunidade ímpar de estagiar com o seu grupo de pesquisa em Washington, que trabalha com modelos hidrológicos-econômicos integrados implementados através do GAMS.
- A minha sogra, Darcy e ao meu sogro, Olímpio, que foram mãe e pai para mim, fornecendo todo o suporte a minha família no período em que passei fora. Sem tamanho apoio não teria conseguido passar o tempo requerido no exterior. A vocês meu eterno reconhecimento.
- Aos pesquisadores do IFPRI: Ximing Cai, Charles Rodgers e Claudia Ringler pelas discussões, troca de experiências e seminários. Em especial a Cai pelas intervenções no programa desenvolvido para o Pirapama, e pelos ensinamentos sobre a abordagem *piece-by-piece* desenvolvida por ele, para viabilizar grandes sistemas não-lineares e usada no modelo.
- Aos seres humanos de diversas nacionalidades que conheci no IFPRI, pessoas que não trabalhavam na minha área de estudo, mas que foram extremamente

receptivas e calorosas comigo: Connie Chang-Kang, Patricia Zambarro, Olympia Icochea, Sarah Porter e Yehmi Meganasa.

- As brasileiras maravilhosas que se tornaram minha família em Washington: Andrea, Adriana e Telma. Recebi apoio total delas no exterior.
- A Nice, babá do meu caçula, que tantas vezes desempenha o papel de mãe nas minhas ausências. Me acompanhou a Washington, viabilizando a estadia dele junto a mim. Sei que o salário não justifica tamanha dedicação. Muito Obrigada pelo amor dado a todos os meus filhos nesses anos.
- A Renato Cintra, que me ajudou na editoração deste trabalho em L^AT_EX. Isto ao mesmo tempo que faz o doutorado em Engenharia Elétrica de saída para fazer o *sanduíche* no Canadá. Boa Sorte, amigo!

“Não desfrute somente o sol, aprecie também a lua. Não desfrute somente a calma, aproveite a tempestade. Tudo isso enriquece a existência. A felicidade é um jeito de viver, é uma conduta, é uma maneira de estar agradecido ao sol, à lua, a quem lhe estende a mão e também a quem o abandona, pois certamente neste abandono está a possibilidade de você descobrir a força que existe em seu interior. A felicidade não é o que as pessoas têm, mas o que elas fazem com isso.”

Roberto Shinyashiki

Universidade Federal de Pernambuco

31 de julho de 2003

Resumo da Tese apresentada à UFPE como parte dos requisitos necessários para
obtenção do grau de Doutor em Economia.

Modelo Econômico-Hidrológico Integrado para Alocação Ótima de Água em Diferentes Usos e Vinhoto em Áreas Plantadas de Cana na Bacia do Rio Pirapama

Márcia Maria Guedes Alcoforado de Moraes

julho/2003

Orientador: Yony Sampaio

Área de Concentração: Métodos Quantitativos em Economia

Palavras-chaves: Modelos Econômico-Hidrológico Integrado, Modelagem de bacias, Políticas de água, Otimização Não-Linear, Alocação Eficiente de água, Alocação de vinhoto em áreas plantadas de cana

Número de páginas: xxiv+261

A escassez de água exige que se formulem políticas para garantir uma alocação inter-setorial eficiente do recurso, ao mesmo tempo que se reverta a degradação do mesmo. Para entender melhor e avaliar os efeitos das diversas políticas, é fundamental que se utilize modelos do mundo real, aptos a analisar as consequências, tanto ambientais quanto econômicas, de decisões de políticas de alocação tanto a nível de bacia, como de usuário. Este trabalho introduz um modelo econômico-hidrológico integrado desenvolvido para apoiar a gestão de recursos hídricos na bacia do rio Pirapama no Estado de Pernambuco, Nordeste do Brasil. Utiliza os fundamentos teóricos de um modelo elaborado no *International Food Police Research Institute* (IFPRI). Integra um grande número de relações físicas, econômicas, institucionais e agrônômicas numa plataforma única para subsidiar decisões que digam respeito a alocação ótima de água entre os usos alternativos e vinhoto para fertirrigar as áreas plantadas de cana no primeiro trecho da bacia, a saber: a montante da barragem Pirapama.

O referido trecho é de crucial importância pois nele está concentrada a maioria das agroindústrias localizadas na bacia, cuja produção de efluentes é a principal fonte de carga orgânica da região. Além disso, esta área é a responsável pelo aporte afluente ao reservatório Pirapama — uma das principais fontes de abastecimento da capital do estado — cujo risco de eutrofização já é alto, mal o mesmo entra em operação. O modelo introduz a questão da qualidade não só ao incluir o uso da fertirrigação e determinar alocação de efluentes das agroindústrias nas áreas plantadas de cana ao longo da bacia, mas também ao garantir através de restrições, níveis de qualidade adequados aos usos ao longo do curso d'água, bem como o não atingimento de limites de trofia nos dois reservatórios da área estudada. Para introduzir a questão de qualidade das águas dentro da plataforma de otimização foi utilizado o clássico modelo da Engenharia Ambiental - o modelo Streeter-Phelps. Este é considerado um modelo de qualidade simplificado, pois não simula todos os fenômenos interagentes no balanço do oxigênio dissolvido, abordando unicamente os dois principais fatores, a saber: o consumo e a produção de oxigênio. A aplicação da referida versão requer o conhecimento de parâmetros do rio e implica numa série de simplificações do mundo real. Foi realizada então uma simulação externa de qualidade, fora da plataforma de otimização, para testar a adequabilidade da versão adotada ao caso em estudo, através da comparação entre os valores obtidos usando as equações representativas e os valores medidos em alguns pontos do rio em anos específicos. Além disso, dados não disponíveis referentes a maneira com que os efluentes chegam e contaminam o rio, bem como a forma com que o rio responde a esta contaminação, puderam ser calibrados e validados. O modelo integrado usou a modelagem holística com método de decomposição por temas, para determinar a solução ótima através de dois submodelos, um que considera a questão de quantidade e o outro a de qualidade das águas. Assim, uma solução ótima inicial é encontrada alocando-se água e efluentes sem se restringir os níveis de qualidade resultantes. A solução final do modelo é obtida a partir deste valor inicial, incorporando-se as restrições relativas a qualidade das águas. A função objetivo é composta pelas funções de benefício líquido agregadas por uso e penalidades são impostas de forma a garantir que o modelo respeite outorgas atuais no caso dos usos consuntivos, atenda demandas mínimas no caso de geração de energia e minimize sobre de efluentes. O modelo é aplicado para um ho-

rizonte de um ano com passos mensais, iniciando no último mês da estação chuvosa. Utiliza para simular drenagem pluvial natural de cada trecho, descargas específicas obtidas a partir de valores médios mensais de vazão de uma série gerada para a bacia. A condição inicial considera os reservatórios cheios e a cana disponível para a safra atual resultante de decisões de áreas a fertirrigar tomadas no ano anterior. Os primeiros resultados obtidos mostraram que os valores na solução ótima das retiradas anuais para cada uma das agroindústrias são praticamente iguais aos valores outorgados. No caso do abastecimento humano, a alocação ótima permite maiores desvios em relação a outorga, principalmente no caso de Recife, o maior usuário para quem se aloca bem menos do que o outorgado, e aproxima-se dos valores estabelecidos para Vitória. Além disso, pode-se verificar que o não atendimento a outorga estabelecida para Recife é um resultado econômico, pois os limites físicos não são atingidos. Com relação aos usos não-consuntivos, a solução ótima resultou em potências geradas para as duas PCH's em qualquer dos meses menor do que a demanda mínima. Este também é um resultado econômico já que há disponibilidade de água, bem como uma capacidade instalada que permitiria valores de potência gerados maiores. Com relação a alocação de efluentes, embora a quantidade simulada do vinhoto produzido pelas agroindústrias, na alocação ótima seja muito similar a atual, a distribuição definida pelo modelo como ótima é bastante diferente. Todos estes resultados são referentes ao sub-modelo 2, ou seja, é o resultado do modelo com todas as restrições incluídas. No entanto, o que se observou é que não houve mudanças perceptíveis nos resultados ao se acrescentar as restrições relativas a qualidade das águas, ou seja, os resultados do sub-modelo1 são praticamente idênticos ao sub-modelo2. Assim, estas últimas restrições na solução do modelo são inativas ou *slack*. Algumas simulações foram feitas retirando-se funções penalidade associadas ao uso da função objetivo a ser maximizada. Ao se retirar a penalidade relativa ao abastecimento humano, mantendo-se a do abastecimento industrial, independente de se aplicarem ou não penalidades relativas aos demais usos diminuem as retiradas anuais para Recife e aumentam as retiradas para Vitória. Neste caso, o resultado do sub-modelo2 é diferente do sub-modelo1, ou seja, as restrições relativas a qualidade das águas neste caso deixam de ser inativas. Mais especificamente, as mesmas reduzem as retiradas anuais para Vitória para que maiores volumes no lago de Águas Claras sejam mantidos e os limites relativos a

trofia do reservatório não sejam atingidos. A retirada da penalidade associada ao atendimento da demanda mínima dos dois usuários, independente de haver ou não penalidades para os demais usos, reduz a potência gerada em todos os meses nas duas PCH's. Finalmente, com relação a alocação de efluentes não há nenhuma alteração na configuração das áreas fertirrigadas, no caso de se retirar a penalidade referente a sobra de efluentes. Ocorre que penalizando ou não por sobras de vinhoto, a solução ótima usa todo o efluente produzido, isso também independente das penalidades pelos outros usos estarem ligadas ou desligadas.

Conteúdo

Agradecimentos	vi
Resumo	xii
Lista de Tabelas	xix
Lista de Figuras	xxi
Capítulo 1 Introdução	1
1.1 Problemática e Justificativa	1
1.1.1 Aspectos Legais no Contexto Brasileiro	5
1.1.2 A Bacia Hidrográfica como Unidade de Gestão	8
1.2 A Bacia Hidrográfica do Rio Pirapama	9
1.2.1 Localização Geográfica e Problemática da Bacia	9
1.2.2 Economia	10
1.2.3 Usos Múltiplos da Água na bacia	11
1.3 Objetivos	14
Capítulo 2 Fundamentação Teórica	19
2.1 A Questão da Alocação dos Recursos Escassos	19
2.2 A Questão da Eficiência Econômica	20
2.3 A Questão da Alocação do Recurso Água	22
2.4 Modelagem de Alocação de Água em nível de Bacia	27
2.4.1 Os Modelos Existentes	28
2.4.2 O Modelo desenvolvido no IFPRI	32

Capítulo 3	O Modelo de Simulação para Qualidade	38
3.1	Introdução	38
3.2	A problemática da Qualidade no rio Pirapama	40
3.3	Descrição Geral do Modelo de Simulação de Qualidade	44
3.4	Os Componentes do Modelo	45
3.4.1	A Representação da área estudada	45
3.4.2	A definição dos segmentos ou trechos	51
3.4.3	Dados dos trechos e dos Afluentes	53
3.4.4	Os lançamentos	73
3.4.5	As Captações	87
3.5	O Modelo de Simulação da Qualidade	88
3.5.1	A Simulação da Demanda Bioquímica de Oxigênio	90
3.5.2	A Simulação do Oxigênio Dissolvido	95
3.6	A Calibração	97
3.6.1	Calibração relacionada a contaminação do rio	99
3.6.2	Calibração Relacionada a Depuração do Rio	108
3.7	A Validação	123
3.8	Resultados	124
Capítulo 4	O Modelo de Otimização	135
4.1	Descrição Geral	135
4.2	A Modelagem	140
4.3	Formulações do Modelo	149
4.3.1	Restrições de Disponibilidade Hídrica	153
4.3.2	Equações de Simulação	167
4.3.3	Restrições de Qualidade das Águas	171
4.3.4	Função Objetivo	195
Capítulo 5	Resultados obtidos com a aplicação do modelo de Otimização	204
5.1	A Solução do Modelo	204
5.1.1	O Relatório de Saída gerado pelo GAMS	204
5.1.2	Tratamento dos Resultados	216

5.1.3	Apresentação da Solução	217
5.2	As Simulações estudadas	228
Capítulo 6 Conclusões e Continuidade da Pesquisa		234
Apêndice A Descrição dos Índices, Links, Parâmetros e Variáveis do		
	Modelo	239
A.1	Índices e Links	239
A.1.1	Parâmetros	241
A.1.2	Variáveis de Disponibilidade hídrica	245
A.1.3	Variáveis de Qualidade das Águas	252
Bibliografia		256

Lista de Tabelas

3.1	Estações Fluviométricas Consideradas	57
3.2	Vazões específicas mensais para os postos em $l/s.ha$ para o ano de 2000.	59
3.3	Vazões específicas mensais para os postos em $l/s.ha$ para o ano de 2001.	59
3.4	Associação entre os Postos Fluviométricos e os trechos/ afluente do Modelo em 2000.	60
3.5	Associação entre os Postos Fluviométricos e os trechos/afluentes do Modelo em 2001.	60
3.6	Características dos pontos onde foram geradas as descargas pelo GRH-UFPE.	61
3.7	Vazões específicas mensais para os postos em $l/s.ha$ para um ano médio.	62
3.8	Equações Ajustadas e Coeficientes de Determinação.	62
3.9	Trechos e Estações de Monitoramento de Qualidade Associados.	64
3.10	Afluentes e Trechos dos quais se usa a Concentração de Saturação.	65
3.11	Valores típicos de K_2 (base e , $20^{\circ}C$).	67
3.12	Valores do coeficiente K_2 (base e , $20^{\circ}C$) segundo modelos baseados em dados hidráulicos.	67
3.13	Medições de Descarga Considerados.	68
3.14	Associação entre os Trechos do Modelo e os Segmentos levantados no Convênio COMPESA/FADE	73
3.15	Associação entre os Trechos do Modelo e os Aportes Principais (AP 's)	74
3.16	Associação entre os Valores de OD_{alimpa} e OD_{acana} calculados	79
3.17	Composição dos efluentes das agroindústrias consideradas	84
3.18	Associação entre os Afluentes e os Aportes Afluentes(AA 's)	85
3.19	Associação entre os Trechos e as regressões associadas no Cenário 1	114

3.20	Associação entre os Trechos e as regressões associadas no Cenário 2 .	114
3.21	Faixas de vazões utilizadas para a decisão do uso da regressão em cada trecho nos dois cenários	115
3.22	Valores finais de m e n para cada trecho após a calibração usando o Cenário 1 e que foram usados na validação e otimização	116
3.23	Estimativas calibradas a serem usadas no Modelo de Otimização. . .	123
4.1	Valores obtidos da aproximação linear para a relação área x volume dos reservatórios	159
4.2	Capacidade máxima e mínima adotados como limite em cada reservatório	160
4.3	Diferentes usos dados a água nas Agroindústrias. Dados constam nas licenças de operação das Agroindústrias em m^3/dia	167
4.4	Dados dos produtores de álcool usados para estimação de parâmetros da Cobb-Douglas	168
4.5	Dados dos produtores de aguardente usados para estimação de parâmetros da Cobb-Douglas	168
4.6	Parâmetros obtidos para a função Cobb-Douglas de cada produto final	169
5.1	Valores alocados para cada usuário consuntivo pela solução do modelo	218
5.2	Valores de potência gerados possíveis pelos usuários não-consuntivos na solução do modelo	219
5.3	Alocação de efluentes nos sites de demanda por efluentes na solução do modelo	222
5.4	Produção de Álcool, Aguardente e Vinhoto simuladas pelo modelo . .	223
5.5	Alocação para Usos Consuntivos com e sem penalidade por atendimento às outorgas para uso humano	230
5.6	Potência Gerada e Benefícios Associados com e sem penalidade por atendimento a demandas mínimas	232
5.7	Situação das Penalidades por uso na Função Objetivo caracterizando as simulações estudadas	233
5.8	Benefícios e Penalidades obtidas em cada uma das simulações	233

Lista de Figuras

2.1	Plataforma para modelagem a nível de bacia — adaptado de McKinney et al(1999) [26].	31
3.1	Diagrama Unifilar com indicação de enquadramento dos trechos	41
3.2	Vista do Reservatório Pirapama	42
3.3	Vista da Barragem e das Tomadas de Água do Reservatório	43
3.4	Vista do rio com plantações de cana ribeirinhas	44
3.5	Vista Completa do Esquemático utilizado na Simulação de Qualidade	46
3.6	Parte 1 do Esquemático utilizado na Simulação de Qualidade	47
3.7	Parte 2 do Esquemático utilizado na Simulação de Qualidade	48
3.8	Parte 3 do Esquemático utilizado na Simulação de Qualidade	49
3.9	Áreas dos trechos modelados	54
3.10	Áreas fertirrigadas por cada uma das indústrias	55
3.11	Vista de uma estação fluviométrica no Pirapama	57
3.12	Varição do coeficiente de reaeração (K_2) com vazão medida (Q). . . .	69
3.13	Vazões líquidas resultantes	89
3.14	DBO exercida (oxigênio consumido) e DBO remanescente (matéria orgânica remanescente) ao longo do tempo.	92
3.15	Valores modelados e observados nos meses de safra (Janeiro, Setembro e Outubro) resultado da calibração conjunta dos coeficientes de retornos indiretos da fertirrigação e concentração de aportes naturais relativos a áreas fertirrigadas	103

3.16	Valores modelados e observados nos meses de safra (Novembro e Dezembro) resultado da calibração conjunta dos coeficientes de retornos indiretos da fertirrigação e concentração de aportes naturais relativos a áreas fertirrigadas	104
3.17	Valores modelados e observados nos meses de safra(Janeiro, Setembro e Outubro) resultado da calibração da concentração de aportes naturais relativos a áreas fertirrigadas considerando os coeficientes de retornos indiretos da fertirrigação nulos.	105
3.18	Valores modelados e observados nos meses de safra (Novembro e Dezembro)resultado da calibração da concentração de aportes naturais relativos a áreas fertirrigadas considerando os coeficientes de retornos indiretos da fertirrigação nulos.	106
3.19	Valores de DBO5 modelados e observados nos meses de entressafra(fevereiro, março e abril) ANTES do ajuste dos coeficeintes de retorno de sobras.	109
3.20	Valores de DBO5 modelados e observados nos meses de entressafra(maio, junho, julho e agosto) ANTES do ajuste dos coeficeintes de retorno de sobras.	110
3.21	Valores de DBO5 modelados e observados nos meses de entressafra(fevereiro, março e abril) DEPOIS do ajuste dos coeficeintes de retorno de sobras.	111
3.22	Valores de DBO5 modelados e observados nos meses de entressafra(maio, junho, julho e agosto) DEPOIS do ajuste dos coeficeintes de retorno de sobras.	112
3.23	Valores de OD modelados e observados DEPOIS do ajuste do coeficiente de reaeração nos meses de janeiro, fevereiro e março.	117
3.24	Valores de OD modelados e observados DEPOIS do ajuste do coeficiente de reaeração nos meses de abril, maio e junho.	118
3.25	Valores de OD modelados e observados DEPOIS do ajuste do coeficiente de reaeração nos meses de julho, agosto e setembro.	119
3.26	Valores de OD modelados e observados DEPOIS do ajuste do coeficiente de reaeração nos meses de outubro, novembro e dezembro.	120

3.27	Valores de OD modelados e observados DEPOIS do ajuste do coeficiente de reaeração ao longo dos meses em cada ponto de calibração.	122
3.28	Valores de DBO ₅ modelados e observados utilizando parâmetros calibrados e ajustando apenas coeficientes de retornos de sobras no rio e nos afluentes em 2001 nos meses de janeiro, fevereiro e março.	125
3.29	Valores de DBO ₅ modelados e observados utilizando parâmetros calibrados e ajustando apenas coeficientes de retornos de sobras no rio e nos afluentes em 2001 nos meses de abril, maio e junho.	126
3.30	Valores de DBO ₅ modelados e observados utilizando parâmetros calibrados e ajustando apenas coeficientes de retornos de sobras no rio e nos afluentes em 2001 nos meses de julho, agosto e setembro.	127
3.31	Valores de DBO ₅ modelados e observados utilizando parâmetros calibrados e ajustando apenas coeficientes de retornos de sobras no rio e nos afluentes em 2001 nos meses de outubro, novembro e dezembro.	128
3.32	Valores de OD modelados e observados ao longo do curso d'água para 2001 nos meses de janeiro, fevereiro e março.	129
3.33	Valores de OD modelados e observados ao longo do curso d'água para 2001 nos meses de abril, maio e junho.	130
3.34	Valores de OD modelados e observados ao longo do curso d'água para 2001 nos meses de julho, agosto e setembro.	131
3.35	Valores de OD modelados e observados ao longo do curso d'água para 2001 nos meses de outubro, novembro e dezembro.	132
3.36	Valores de OD modelados e observados em 2001 ao longo dos meses em cada ponto de calibração.	133
4.1	Esquemático do modelo de otimização	141
4.2	Parte 1 do Esquemático utilizado na Otimização	142
4.3	Parte 2 do Esquemático utilizado na Otimização	143
4.4	Parte 3 do Esquemático utilizado na Otimização	144
4.5	Visualização da decomposição do modelo.	152
4.6	Aproximação Linear da relação Área × Volume	157
4.7	Perfil do Oxigênio Dissolvido.	180

4.8	Tempo crítico menor que o tempo associado ao tamanho do trecho . .	181
5.1	Trecho do Equation Listing resultante do submod1	205
5.2	Column Listing da saída do submod1	206
5.3	<i>Model Statistics</i> da saída do <i>submod1</i>	206
5.4	<i>Model Statistics</i> da saída do submod2	208
5.5	Primeira parte do <i>Solve Summary</i> da saída do submod1	209
5.6	Primeira parte do <i>Solve Summary</i> da saída do submod2	210
5.7	Segunda parte do <i>Solve Summary</i> da saída do submod1	212
5.8	Segunda parte do <i>Solve Summary</i> da saída do submod2	213
5.9	Parte da Listagem da solução do sub-modelo1 mostrando a variável FLOW	214
5.10	Parte da Listagem da solução do sub-modelo1 mostrando a equação de balanço hídrico	215
5.11	Benefícios e Penalidades componentes da Função-Objetivo	219
5.12	Limite Superior de Alocação de Água para Recife	220
5.13	Limites Superiores de Aproveitamento de Água para as PCHts	221
5.14	Gráfico com a distribuição de áreas fertirrigadas atuais e recomendadas pelo modelo	224
5.15	Gráfico com valores de OD resultantes da alocação atual e da solução do modelo	227
5.16	Diferenças em milhões de metros cúbicos entre as alocações ótimas resultado do submod1 e submod2	230
5.17	Volumes no reservatório Águas Claras na solução do sub-modelo 1 e sub-modelo2	231