

XXXII ENCONTRO NACIONAL DE ECONOMIA

ÁREA 4

Microeconomia, Economia Industrial, Mudança Tecnológica e Métodos Quantitativos

ARTIGO:

INTEGRAÇÃO DOS COMPONENTES ECONÔMICO E HIDROLÓGICO NA MODELAGEM DE ALOCAÇÃO ÓTIMA DE ÁGUA PARA APOIO A GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS: UMA APLICAÇÃO NA BACIA DO RIO PIRAPAMA

AUTORES:

Márcia G. Alcoforado de Moraes

Professora Adjunta do Departamento de Economia da Universidade Federal de Pernambuco

José Almir Cirilo

Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Pernambuco

Yony Sampaio

Professor Titular do Departamento de Economia da Universidade Federal de Pernambuco

Resumo

Este artigo apresenta a aplicação de um modelo econômico-hidrológico integrado para apoio a gestão de recursos hídricos, na bacia do rio Pirapama no Estado de Pernambuco, Nordeste do Brasil. Integra um grande número de relações físicas, econômicas, institucionais e agronômicas 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 modelo assim obtido envolve um grau de não-linearidade significativo e inclui mais de 10.000 variáveis e restrições, o que permite classificá-lo dentro da categoria de sistemas não-lineares grandes e complexos. Para implementar a referida abordagem utiliza o método *piece-by-piece* apresentado em Cai *et al.* (2001), através do *General Algebraic Modeling System* (GAMS), software de alto nível utilizado para resolução de problemas de programação não-linear. A integração das relações econômicas dentro de modelos hidrológicos de bacia tornam possível a determinação simultânea da oferta e demanda da água, bem como os benefícios econômicos advindos da mesma. Dessa forma, a operação do sistema hidrológico é dirigido por múltiplos objetivos sócio-econômicos e ambientais e o uso da água, incluindo tanto a questão de quantidade como de qualidade, é diretamente simulada ou restrita pela modelagem hidrológica. Uma plataforma como a descrita tanto pode servir como uma ferramenta de auxílio na avaliação de políticas de água, como um sistema de apoio a decisão das questões operativas hidrológicas.

Palavras-chave: Alocação ótima de água; modelos econômico-hidrológicos integrados; apoio a decisão na gestão de recursos hídricos; otimização não-linear; políticas de alocação de água; modelagem em nível de bacia.

Abstract

This paper introduces an Integrated Economic-Hydrologic water modeling at the basin scale that can provide essential information for policymakers in resource allocation decisions. The model is applied to the Pirapama river basin, in Pernambuco state, Northeast of Brazil. Includes essential hydrologic, institutional, agronomic and economic relationships in a unique framework in order to identify the best allocation of the disposable water resources among their multiple uses in the first segment of the basin system: before the Pirapama reservoir. Furthermore, the best allocation of the alcohol production process's effluents is also identified. The model has a significant non-linearity level and includes more than 10 thousands variables and equations, so it can be considered a complex non-linear system. The *piece-by-piece* method (Cai *et al.* 2001) is implemented using the General Algebraic Modeling System (GAMS) to solve this system. GAMS is a high level software indicated to solve mathematical programming problems. Inclusion of the economic relationships inside hydrologic models at the basin scale allows water demand and water supply simultaneous determination. Water demand and water supply are then integrated into an endogenous system and balanced based on the economic objective of maximizing benefits from water use. Both water quantity and quality are simulated in the model. The results shows the effectiveness of the model not only for water policy analysis but also like a decision support system of the hydrologic operative questions.

Key-words: Optimal water allocation; Integrated Economic-Hydrologic water modeling, water resources management, non-linear optimization; modeling at basin scale.

JEL Classification :C60, C61, O12, O13, O21, L95, Q20, Q21, Q25, Q28.

1 - Introdução

Existem duas estratégias fundamentais para lidar com escassez de água nas bacias hidrográficas com problemas de disponibilidade hídrica: gestão de oferta e gestão de demanda. A primeira envolve atividades para localizar, desenvolver e explorar novas fontes de água e segundo Ribeiro (2000) foi até há bem pouco tempo, a única estratégia usada no Brasil. A estratégia de gestão de demanda relaciona-se com incentivos e mecanismos que promovam o uso eficiente de água. Assim, a idéia é que uma grande parte da água para atender novas demandas, deva vir de água poupada dos usos existentes, através de uma política de realocação adequada da água.(McKinney et al, 1999).

Na realidade, a definição e/ ou reforma das políticas de alocação de água são cada vez mais importantes não só para atender as demandas de água através da poupança dos usos existentes; mas também para aumentar os benefícios do uso e melhorar a qualidade da água e dos solos. No entanto, é necessário entender melhor e avaliar os efeitos das diversas políticas comparando as existentes. Para isso, 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 em nível de bacia, como de cada usuário. A identificação da alocação ótima de água entre os múltiplos usos, subsidia os tomadores de decisão a estabelecer políticas que levem à eficiência econômica.

Este trabalho apresenta as principais formulações de um modelo econômico-hidrológico integrado desenvolvido na UFPE (Moraes, 2003), numa parceria entre o Laboratório de Hidráulica e o Departamento de Economia, com recursos do CT-HIDRO / FINEP. Usa os mesmos fundamentos teóricos da modelagem desenvolvida no *International Food Policy Research Institute* (Rosegrant et al, 2000) e já utilizada em algumas bacias do mundo, a saber: Maipo, no Chile e Mekong, no Sudeste Asiático.

Inicialmente descreve-se a fundamentação teórica do modelo, tratando a questão da alocação de recursos escassos com as peculiaridades do recurso água. São apresentados alguns aspectos referentes a integração dos componentes econômico e hidrológico na modelagem de alocação ótima em nível de bacia. Os princípios básicos da modelagem são apresentados através da aplicação na bacia do Pirapama. A modelagem propriamente dita é descrita através explicitação da função-objetivo e todas as restrições. Finalmente, apresentam-se os resultados e as idéias para continuidade da pesquisa.

2 – A Fundamentação Teórica do Modelo

A questão da alocação do recurso água, quebra alguns dos pressupostos que asseguram o atendimento do Primeiro Teorema do Bem-Estar, sendo um deles: a questão de que cada agente toma decisões de consumo e produção sem se preocupar com o que os outros agentes estão fazendo. Na realidade, a poluição e o uso da água de um usuário a montante de um rio, impactam a satisfação do usuário a jusante. Diz-se que o usuário à montante do rio impõe ao usuário à jusante uma externalidade.

A característica crucial das externalidades é que há bens com os quais a pessoa se importa e que não são vendidos no mercado. Se os direitos de propriedade estão bem definidos, e existem mecanismos para permitir a alocação entre as pessoas, então as pessoas podem negociar seus direitos de produzir e consumir externalidades da mesma forma que trocam direitos de produzir e consumir bens comuns. As ineficiências podem resultar apenas de situações onde não há meio de excluir os outros de utilizar alguma coisa. (Varian, 1997)

Mesmo eliminando as externalidades no caso da água, não teríamos ainda uma solução eficiente de Pareto. O pressuposto de custos de transação zero não é verdadeiro para os mercados de água. Nestes, os custos de informação, transporte, entre outros podem ser de fato maiores que na maioria dos mercados de insumos(Rosegrant&Biswanger, 1994). Assim, o mundo que precisamos trabalhar não é perfeito. A economia dos "mercados de água" e do gerenciamento dos recursos hídricos, caracteristicamente marcada por imperfeições tais como externalidades e custos de transação diferentes de zero, não opera sob as condições padrão do bem-estar econômico. No entanto, até num mundo imperfeito, os mercados podem levar a consideráveis ganhos de eficiência e outros benefícios. Para verificar estes ganhos e benefícios, necessitamos estabelecer uma meta socialmente desejável (alvo regulador) --- economia normativa --- para um mundo imperfeito. Para viabilizar esta tarefa, serão necessárias escalas normativas para comparar diferentes estados sociais.

Basicamente, existem dois critérios utilizados para fazer a comparação de estados sociais: O critério de Pareto e a Análise Custo-Benefício. A idéia da análise Custo-Benefício baseia-se no princípio da compensação de Kaldor-Hicks, segundo o qual poderia-se aumentar o bem-estar mesmo numa situação não-paretiana, em que se melhora a situação de algumas pessoas e piora-se a de outras. ¹Na realidade, necessitamos estabelecer uma meta socialmente desejável (alvo regulador) - economia normativa - em uma situação onde o ótimo de Pareto não é alcançável. Para isso precisa-se de uma outra escala normativa: A Análise Custo-Benefício pode ser usada para gerar as informações necessárias a estipular alvos reguladores, quando o ótimo de Pareto não pode ser utilizado. Pelo menos em princípio, pode-se pensar em fazer um cálculo geral de custos e benefícios para todos os indivíduos usuários da água. A quantidade ótima alocada para cada usuário, deve ser aquela com a melhor relação custo-benefício, ou seja, a quantidade que maximiza o benefício social líquido. Este é caracterizado como a diferença entre o benefício social bruto e o custo social bruto. O benefício social bruto é obtido somando-se todas as medidas de benefícios individuais e da mesma forma a soma de todos os custos individuais é o custo social bruto (Eaton & Eaton, 1999).

Diante disso, a nossa meta reguladora, ou alocação ótima, será obtida resolvendo-se um problema de otimização de uma função que agrega os benefícios dos usuários agrupados por categorias de uso, bem como os custos sociais dados através da consideração dos custos individuais devidamente agregados. Para isso, é extremamente pertinente um modelo econômico-hidrológico integrado, desenvolvido pelo IFPRI (Rosegrant et al, 1999), e usado em diversas bacias do mundo (Ringler, 2001). O referido modelo expressa matematicamente uma função de bem-estar da sociedade, através da diferença entre os benefícios e os custos incorridos pelos múltiplos usuários da água. Ao maximizar esta função, sujeita às restrições em sua maior parte hidrológicas, pode-se estabelecer um alvo regulador - uma alocação ótima - para cada uso, que têm as características de ser uma alocação mais eficiente.

3- Aspectos da Integração dos componentes Econômico e Hidrológico na modelagem em nível de bacia

McKinney et al (1999) afirmam que a decisão de políticas de alocação de água apropriadas pode se beneficiar diretamente da melhoria ou evolução da modelagem de alocação de água em nível de bacia. Ademais, a adoção da bacia hidrográfica como unidade territorial de planejamento é um dos princípios balizadores do novo arranjo setorial dos recursos hídricos no Brasil, contidos na nova política nacional para o setor de recursos hídricos.

Em nível de bacia, mesmo os primeiros modelos de gestão de água, que eram praticamente restritos a planejamento e projeto, já reconheciam a necessidade de combinar considerações econômicas e hidrológicas a este nível de análise. A integração da questão econômica em modelos, em nível de bacia, requer a incorporação de funções de produção para agricultura que incluam água como uma entrada e funções de demanda para água nos usos doméstico e industrial, para estimar o uso e o valor da água por setor. É também recomendável que se estime o valor de outros tipos de demanda para água dentro da bacia, tais como demandas ambientais, de qualidade de água, de lazer e de geração de energia (McKinney et al, 1999).

Apesar do reconhecimento da importância da integração dos aspectos econômicos-hidrológicos, especialmente nos estudos voltados a avaliar alternativas e políticas de alocação de água, não se vêm conseguindo êxito, de acordo ainda com a revisão de literatura encontrada em McKinney et al, 1999. Normalmente, o que ocorre é que ou a componente hidrológica ou a econômica dominam. Assim, os estudos com ênfase hidrológica levam em conta componentes de controle do sistema e hidrológicos de uma forma detalhada, com a componente econômica sendo considerada num nível de agregação de benefícios muito alto. Por outro lado, a ênfase nos estudos econômicos têm sido na análise de “input/output” e na otimização de benefícios líquidos sem uma boa modelagem hidrológica.

O desafio dos novos trabalhos de modelagem em nível de bacia, é superar os obstáculos através da integração das relações econômicas dentro de modelos hidrológicos da bacia, tornando possível a

¹ Isto se os que saem ganhando puderem compensar os que saem perdendo. Assim, o critério básico da análise de custo-benefício é o de maximizar os benefícios em relação aos custos. Os benefícios englobam tudo o que provoca aumento de bem-estar e os custos aquilo que o reduz. Dessa forma, o que se consegue com este critério é a maximização do bem-estar (Winch, 1971).

determinação simultânea da oferta e demanda da água, bem como os benefícios econômicos advindos da mesma dentro da bacia. Dessa forma, a operação do sistema hidrológico é dirigido por múltiplos objetivos sócio-econômicos e ambientais e o uso da água, incluindo tanto a questão de quantidade como de qualidade, é diretamente simulada ou restrita pela modelagem hidrológica (McKinney et al,1999a).

A plataforma assim tanto pode servir como uma ferramenta de auxílio na avaliação de políticas de água, como um sistema de apoio a decisão das questões operativas hidrológicas.

No desafio de desenvolver modelos que realmente integrem as componentes econômicas e hidrológicas existem duas abordagens: A “modelagem compartimentada” e a “modelagem holística”. 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, que em geral é resolvido de uma só vez (Cai, 2001).

Cai et al (2001) acrescentam que a abordagem da “modelagem segmentada” é mais largamente usada para sistemas grandes e complexos, devido ao fato de que resolver cada segmento é muito mais fácil do que resolver o modelo inteiro. Entretanto, em geral é difícil encontrar um método de coordenação destas soluções compartimentadas para produzir a solução do modelo inteiro. Na modelagem holística os componentes do modelo são estreitamente conectados em um único modelo, de forma que a informação entre os mesmos ocorre endogenamente. A desvantagem aqui é que grandes modelos nesta abordagem nem sempre possuem solução nos softwares existentes. Assim, a princípio o grau de detalhe e complexidade deveria ser reduzido para se adotar esta última abordagem.

A utilização de métodos de decomposição para “modelagem holística” oferece em geral a saída para este dilema. Estes métodos operam de uma forma similar a “modelagem compartimentada”, decompondo o “modelo holístico” em sub-modelos, resolvendo estes sub-modelos individualmente, e encontrando uma solução para o modelo primário através de modificações das soluções de cada sub-modelo iterativamente. Assim, por exemplo, obter-se a solução do primeiro sub-modelo, que seria modificada ao se resolver o segundo e assim por diante. Salienta-se que a vantagem da técnica de decomposição em relação a “modelagem compartimentada” é que a primeira implementa as conexões entre os componentes do modelo endogenamente, enquanto a última trata as conexões exogenamente.

4- Área de estudo de caso e Princípios básicos da Modelagem

A bacia hidrográfica do Rio Pirapama localiza-se nas mesorregiões metropolitana do Recife - RMR e Mata Pernambucana. Ocupa uma área de cerca de 600km² e tem no curso d'água principal uma extensão aproximada de 80km. O Pirapama é o manancial mais importante em um raio de 40km da cidade do Recife. Os problemas no setor de recursos hídricos desta região mais sérios são: insuficiente produção de água tratada, elevadas perdas e altos desperdícios, precário atendimento dos sistemas de esgotamento sanitário e de limpeza pública e altos índices de poluentes (Ribeiro, 2000). Como consequência importante, dentre outras, aponta-se o racionamento a que vem sendo submetida a RMR há alguns anos, que tem comprometido a regularidade do atendimento à população, principalmente nas épocas de prolongada estiagem. Além disso, os sistemas de abastecimento de água dos outros municípios integrantes da bacia que não fazem parte da RMR, como Pombos, Escada e Vitória de Santo Antão, já estão enfrentando problemas para atender as crescentes demandas por água potável (Carrera-Fernandez, 1999). A questão da qualidade no Rio Pirapama é uma questão crítica. Todo o trecho do rio atualmente monitorado apresenta-se em desacordo com os objetivos de qualidade da água, ou seja, a maioria dos parâmetros utilizados na classificação do rio está fora dos padrões estabelecidos pela legislação.

Para resolver problemas relativos ao abastecimento humano, há projetos de dois reservatórios: um no afluente Águas Claras (Abastecimento de Vitória) e o outro no próprio rio Pirapama para o abastecimento de Recife (ambos foram considerados no modelo para determinação da alocação ótima). O reservatório Pirapama está iniciando sua operação e sua entrada modificará os usos atuais da água, uma vez que exigirá maior eficiência por parte dos usuários. Além disso, o problema da qualidade da água deve se agravar com o represamento das águas imposto pelo reservatório. A água do Pirapama, avaliada no

âmbito do Projeto Pirapama² no período de 1990-1996, já apresentava níveis preocupantes de fósforo total, sendo que estes níveis tendem a sofrer elevação com a implantação da barragem.

Isto leva o reservatório Pirapama, apenas iniciando sua operação, a já estar numa situação de risco com relação a uma possível eutrofização.³ A avaliação do potencial de eutrofização no reservatório e a identificação de ações que devam ser adotadas no sentido de minimizar o aporte de nutrientes se colocam como questões prioritárias, considerando-se as repercussões que podem advir sobre a qualidade da água para abastecimento público em decorrência da eutrofização (Gama, 1998).

O primeiro trecho da bacia, onde o modelo é aplicado, vai da nascente até o reservatório Pirapama, ou seja, se constitui em todo o trecho a montante da barragem. Este é um trecho 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 nesta área. Além disso, o segmento é responsável por todo o aporte de água afluente ao reservatório Pirapama. Dentre os fatores que levam à ocorrência de poluição no trecho modelado por este estudo, os mais significativos provêm da presença do vinhoto. Localizam-se no trecho modelado três destilarias de álcool: a JB, a Sibéria e a Liberdade. A produção das mesmas à época da elaboração do Diagnóstico Integrado (Gama, 1998) era de cerca de 94.000 m³/ano, ou seja, 522.000 litros/dia, possuindo o vinhoto dessas indústrias uma carga orgânica potencial de 226.335 kgDBO/dia com um equivalente populacional de 4.2 milhões de habitantes.

A única prática atualmente adotada para disposição final deste vinhoto é a de seu aproveitamento na fertirrigação. A questão que vem sendo colocada decorre das observações feitas em campo e principalmente da avaliação dos dados de monitoramento da qualidade da água do rio Pirapama: é que parte deste vinhoto lançado no solo atinge os cursos d'água, seja através do escoamento direto do vinhoto no período da irrigação, seja através do arraste superficial no período das chuvas ou mesmo através do escoamento subterrâneo.

Assim, o modelo não só trata a questão da alocação da água de forma a otimizar o bem-estar de todos os usuários no que se refere ao atendimento de disponibilidades, como também a questão da qualidade - crítica para o Pirapama, especialmente depois que foi construído o reservatório - é considerada ao se incluir o uso da fertirrigação. Busca-se ainda definir a alocação ideal do vinhoto nas áreas plantadas de cana ao longo da bacia, de forma a garantir níveis de qualidade adequados aos usos. Ao mesmo tempo, na medida em que se inclui o benefício da fertirrigação na função-objetivo e as questões da qualidade e quantidade de água são tratadas como restrições, o processo está considerando diluição de cargas orgânicas como um outro uso, e a disponibilidade será certamente afetada. Em síntese, outros usos deverão ser restringidos para que o rio possa se recuperar através do processo de autodepuração.

A inclusão do fenômeno de autodepuração dentro do modelo de otimização traz consigo a possibilidade do alcance dos seguintes objetivos (VonSperling, 1996): **Utilizar a capacidade de assimilação dos rios:** Dentro de uma visão prática, pode-se considerar que a capacidade que um corpo d'água tem de assimilar despejos, sem apresentar problemas do ponto de vista ambiental, é um recurso natural que pode ser explorado. Esta visão realista é de grande importância em nossas condições, em que a carência de recursos justifica tal utilização. **Impedir o lançamento de substâncias poluidoras acima do que possa suportar o corpo d'água:** Desta forma, a capacidade de assimilação do corpo d'água pode ser utilizada até um ponto aceitável e não prejudicial, não sendo admitido o lançamento de cargas poluidoras acima deste limite.

A idéia para obter a alocação ótima através da maximização do benefício social líquido, bem como avaliar estratégias de implementação da referida meta, foi partir de um modelo hidrológico-agronômico-econômico-institucional integrado desenvolvido por um grupo de pesquisa conjunta sendo membros:

² O Projeto Pirapama foi motivado pela importância da bacia para a Região Metropolitana do Recife (RMR). O mesmo envolveu uma estratégia multidisciplinar e interinstitucional para propor diretrizes a fim de minimizar os atuais e potenciais conflitos relativos ao crescimento econômico, gerenciamento ambiental e desenvolvimento social na bacia.

³ Eutrofização é o crescimento excessivo das plantas aquáticas, a níveis tais que sejam considerados como causadores de interferências com os usos desejáveis do corpo d'água. O principal fator de estímulo é um nível excessivo de nutrientes no corpo d'água, principalmente nitrogênio e fósforo

International Food Policy Research Institute (IFPRI); Center for Research in Water Resources (CRWR) na Universidade do Texas, em Austin e International Water Management Institute (IWMI). O modelo atendia aos objetivos estabelecidos, além de estar alinhado com as tendências atuais para a modelagem em nível de bacia.

O referido modelo representa a bacia hidrográfica como um todo, através de uma rede de nós e links. Todos os usos, tanto os consuntivos, como os não-consuntivos, são considerados. Os benefícios líquidos de cada uso são implementados numa função-objetivo única, restrita por relações hidrológicas, ambientais e institucionais. (Rosegrant et al, 2000)

Outra importante característica do modelo do IFPRI é a abordagem utilizada para combinar os diversos componentes do modelo integrado. Utiliza-se a “modelagem holística” e o método de decomposição a partir de temas, para obter dois sub-modelos que são resolvidos iterativamente. O primeiro deles é resolvido e os resultados são usados como uma “boa” condição inicial para o seguinte. Restrições adicionais surgem com o segundo sub-modelo, mas a busca da solução é simplificada desde que se tem um bom ponto de partida. A decomposição de temas neste caso foi usada para integrar modelagem de quantidade e de qualidade.

Na realidade, o modelo do IFPRI simula um constituinte de qualidade, que é muito importante para a questão da irrigação e impacta na produção de várias culturas que é a salinidade. Assim, o primeiro sub-modelo trata o balanço de quantidade e usa as funções de produção das culturas considerando fixa a condição de qualidade, ou seja, a salinidade é fixa. Então no segundo sub-modelo se introduz o balanço e o transporte de qualidade, de forma a encontrar valores razoáveis para ambos salinidade e fluxos.

O modelo desenvolvido para o Pirapama, como o do IFPRI, inclui constituintes de qualidade, sendo que diferentes de salinidade. No caso da bacia do Pirapama, o problema maior está relacionado com compostos orgânicos usados para fertirrigar as áreas de cana que existem em toda a bacia, o que vem acarretando níveis de Oxigênio Dissolvido, em vários trechos do rio, abaixo do valor estabelecido para as classes a que pertencem. Assim, os constituintes que consideramos são Demanda Bioquímica de Oxigênio(DBO) e Oxigênio Dissolvido(OD). O desafio maior aqui é que esses constituintes ao contrário da salinidade, sofrem um decaimento ao longo do rio através do processo de autodepuração do rio, e as equações que governam este processo são altamente não-lineares. A abordagem que foi usada para conseguir obter uma solução, foi da mesma forma que no modelo do IFPRI, utilizar a “modelagem holística” e o método de decomposição por temas com dois sub-modelos: o de quantidade e o de qualidade.

5 – A Modelagem

O modelo elaborado na UFPE representa a bacia hidrográfica como um todo, através de uma rede de nós e links (Rosegrant et al, 2000), nos quais os nós representam entidades físicas e os links, as conexões entre estas entidades. Os nós podem ser de dois tipos: os nós-fonte, que representam entidades físicas tais como: rios, reservatórios, águas subterrâneas, etc; e os nós-demanda, que podem ser: agroindústrias, cidades, pequenas centrais hidroelétricas-PCHs, etc. (ver figura 1)

Há também os nós de demanda por efluentes, que são as áreas plantadas de cana ao longo do curso d'água em que se lançam efluentes do processo industrial das destilarias, na chamada fertirrigação.

Os links entre os nós podem representar captações de usuário e lançamentos. Estes lançamentos representam tanto a contribuição da drenagem pluvial natural (lançamentos naturais médios), no que se refere à quantidade e à qualidade de água dos trechos e dos afluentes, como os fluxos de retorno diretos e indiretos de alguns nós-demanda.

Os retornos diretos são conhecidos e nesta área modelada constituem-se nos lançamentos pelas agroindústrias das águas usadas no processo de refrigeração e que retornam ao rio. Poderiam ter sido usados também para representar fontes de contaminação tais como esgotos ou outros tipos de descargas diretas provenientes de usuários.

Os retornos indiretos pretendiam representar as possíveis formas de chegada do efluente usado na fertirrigação ao rio, tais como: uma suposta volta de uma porção do quantitativo do efluente lançado na terra para o rio e sobras de vinhaça que poderiam, através de vazamentos ou descartes em épocas de vazões mais altas, ter uma parcela delas atingindo o rio. Deve-se salientar que na aplicação em questão

não foram usados estes retornos indiretos por falta de dados conclusivos sobre os mesmos. A contaminação por vinhoto foi considerada apenas através dos lançamentos naturais médios proporcionais às áreas fertirrigadas.

Através da figura 1 pode-se verificar que o trecho modelado se constitui num sistema em que são agregados: 8 principais afluentes, 2 reservatórios, 2 PCHs(PCHJB e PCHCIP), 25 fontes superficiais de água e 25 áreas plantadas de cana(FIR0 a FIR24) que demandam lançamentos de efluentes agroindustriais como fertilizante. As categorias de uso consideradas foram: abastecimento humano(AH), agroindustrial(AI), geração de energia(GE) e fertirrigação(FIR). Este último, como explicado, não emprega nem compromete a água no que se refere à disponibilidade hídrica (pois usa-se na fertirrigação o vinhoto, que é um efluente da produção das destilarias) e sim impacta na qualidade da mesma.

O modelo contém um grande número de relações físicas e econômicas, além de incluir algumas institucionais e outras agrônomicas. Os seguintes componentes são incluídos: (1) *Componentes de Hidrologia Qualitativa*: levam em conta o balanço hídrico com respeito à quantidade, nos nós que representam os diversos trechos do rio, bem como nos seus afluentes e reservatórios. Não foi levada em consideração nenhuma contribuição de águas subterrâneas por não se dispor de dados, mas estas fontes podem ser facilmente incluídas no modelo.(2) *Componentes de Qualidade das Águas* - inclui o balanço, bem como o processo de decaimento e transporte ao longo do rio, de dois constituintes básicos utilizados para avaliar qualidade de água: o Oxigênio Dissolvido (OD) e a Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO). São consideradas apenas as principais fontes poluidoras, que são os efluentes lançados pelas agroindústrias nas áreas plantadas de cana e demais fertilizantes/ pesticidas usados na referida lavoura. Além disso, avalia-se também indiretamente a questão do aporte de fósforo aos reservatórios, de forma a avaliar a possível eutrofização dos mesmos;(3) *Componentes Econômicos* - funções de benefício líquido para os usos consuntivo e não-consuntivo, bem como simulação de funções de produção para os principais produtos industriais da bacia levando em conta a água alocada como insumo;(4) *Componentes Institucionais* - regras e políticas institucionais tais como outorga, níveis mínimos de constituintes de qualidade permitidos, fluxos mínimos exigidos por demandas ecológicas, etc; (5) *Componentes Agrônomicos* - são consideradas diferentes produtividades da cana-de-açúcar em função do efluente aplicado no terreno como fertilizante, no processo de fertirrigação.

Decisões são tomadas em diversos níveis através do modelo. Em nível de bacia, determinam-se níveis de operação dos sistemas hidrológicos e de alocação de água entre usuários. Em nível de usuário, determina-se uma quantidade e localização ótima de aplicação de efluentes dentre as diversas áreas plantadas de cana disponíveis para colheita em cada mês. O modelo é de curto prazo, no específico horizonte de tempo de 1 ano, determinando

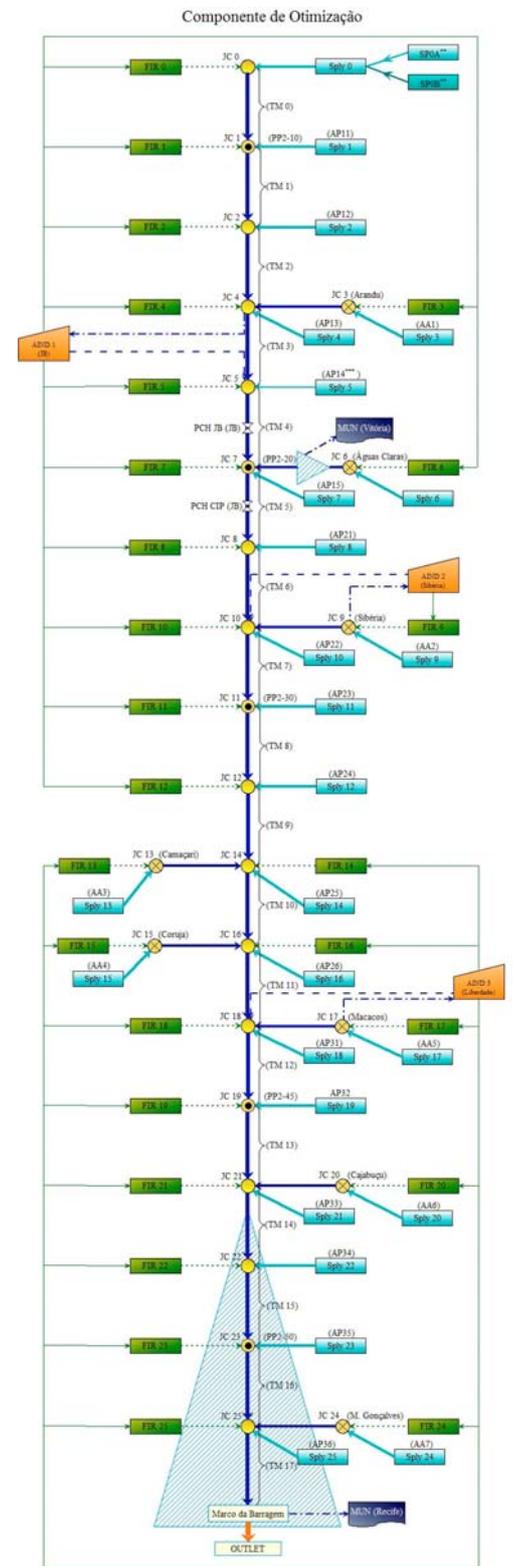


Figura 1 – Rede de Nós e Links representativo da área estudada

Símbolo	Descrição	Legenda	Descrição
●	Limite dos Segmentos Hidrológicos	JC	Trecho a Montante
○	Não Limite do segmento com PP	Sply	Aporte Pluviométrico
⊗	Não limite que representa afluente	SP A	Aporte Pluviométrico de Área sem Cana
⊗	Aporte de vazões Naturais Médias	SP B	Aporte Pluviométrico de Área com Cana
⊗	Área Fertirrigada	FIR	Demanda por Fertirrigação
▲	Usina de Beneficiamento de Cana-de-açúcar	Outlet	Trecho a Jusante
⊗	Hidroelétrica de Pequeno Porte (PCH)	AIND	Demanda de Agroindústria
▭	Marco da barragem do Rio Pirapama	PCH	Demanda por Geração de Energia
▭	Demanda Municipal	MUN	Demanda Municipal
▭	Reservatório		

Legenda	Descrição
→	Totas Por Trecho do Rio Principal
→	Lançamentos Naturais Médios
→	Lançamentos de Afluentes
→	Retorno de Efluente
→	Captação de Água
→	Retorno de Água

* Os Símbolos em Parênteses Referem-se ao Modelo de Calibração
 ** Todas as Sply's subsequentes tem como área componentes SP_A e SP_B
 ***O Sply 5 é associado a AP14 mas não possui o mínimo valor que o AP14 assume no modelo de calibração pois este Sply 5 não recebe Águas Claras ao contrário de AP14

alocações de água e vinhoto a cada mês, assumindo que as condições de oferta e demanda são relativamente estáveis. As equações do modelo incluem várias formas de não-linearidade, em especial aquelas que tratam a questão da qualidade.

Para se ter uma idéia do tamanho e do grau de não-linearidade do modelo, algumas medidas fornecidas pelo software utilizado para buscar a solução são dadas a seguir:

- Número de Restrições: 22295
- Número de Variáveis: 18885
- Número de elementos no Jacobiano não-nulos: 44636
- Número de elementos no Jacobiano não-constantes: 10828

O número de elementos da matriz Jacobiana não-nulos, bem como o número destes que não são constantes, fornece uma medida da não-linearidade do modelo. Sendo o Jacobiano a matriz de derivadas primeiras das restrições em relação a cada uma das variáveis, a proporção do número de elementos não-nulos que não são constantes dá uma idéia do grau de não-linearidade do modelo. Desde que neste caso, em torno de 25% os elementos não-nulos no Jacobiano são não-constantes, denota-se um grau razoável de não-linearidade. Além disso, tendo-se mais de 10.000 variáveis e restrições, pode-se considerar o modelo dentro da categoria de sistemas não-lineares grandes e complexos. Cai et al (2000) relatam que, a despeito de grandes melhorias nos softwares de modelagem e solução, bem como na evolução do hardware, resolver grandes modelos de otimização não-lineares continua difícil. As dificuldades crescem muito à medida que o tamanho e o grau de não-linearidade aumentam. Até o melhor software pode falhar com grandes modelos não-lineares, especialmente nas primeiras tentativas do processo de modelagem quando “boas” condições iniciais não são conhecidas.

A abordagem utilizada para buscar uma solução viável com os softwares de Programação Não-Linear disponíveis para tão complexo sistema foi a “modelagem holística” com método de decomposição por temas. Para implementar a referida abordagem utilizou-se o método *piece-by-piece* apresentado em Cai et al (2001). A mesma utiliza o *General Algebraic Modeling System* (GAMS), software de alto nível utilizado para resolução de problemas de programação matemática, e sua capacidade de reiniciar arquivos.

Assim, a solução de um sub-modelo é escrita num arquivo e usada como ponto de partida para o próximo sub-modelo. Todos os *solvers* disponibilizados através do GAMS para resolução de Programação não-linear, são baseados no método do gradiente. Os mesmos têm sua performance dependente dos valores iniciais dados às variáveis. Uma condição inicial inadequada pode levar o *solver* a demorar mais a convergir ou até mesmo a não convergir. Isto inclui o problema muito comum em sistemas não-lineares grandes e complexos de não se chegar a uma solução viável. Por isso é usada a abordagem *piece-by-piece*, que usa o fato de que grandes modelos podem ser decompostos em várias partes, que são resolvidas seqüencialmente, com cada parte sendo adicionada a cada passo. O “pedaço” ou sub-modelo é composto de restrições adicionais que vão sendo adicionadas às partes anteriores e essas restrições podem envolver novas variáveis que não existiam nos “pedaços anteriores”. No caso em estudo, tem-se dois sub-modelos e a decomposição foi feita por temas: quantidade(sub-modelo1) e qualidade de água(sub-modelo2). A estrutura do modelo pode ser mostrada de forma genérica, através da seguinte formulação:

$$(1) \quad \text{Max } f(x, y)$$

Sujeita às seguintes restrições:

$$(2) \quad g_1(x) = 0$$

$$(3) \quad g_2(x, y) = 0$$

E aos limites:

$$(4) \quad x^l \leq x \leq x^u$$

$$(5) \quad y^l \leq y \leq y^u$$

Onde x e y são vetores de variáveis de decisão, algumas das quais podendo ser variáveis de folga. As funções $g_1(x)$ e $g_2(x)$ são vetores de equações lineares e não-lineares, diferenciáveis nos retângulos

definidos pelos limites estabelecidos nas equações (4) e (5). Os termos x^l e x^u significam os limites inferiores e superiores das variáveis com definição similar para a variável y . As restrições $g_1(x)$ são representativas do sub-modelo 1, e envolvem apenas as variáveis x . Assim, a idéia é num primeiro *step* resolver este primeiro "pedaço" sem levar em conta as variáveis y , ainda não definidas. Ou seja, o problema descrito a seguir:

$$(6) \quad \text{Max } f(x)$$

Sujeita às seguintes restrições:

$$(7) \quad g_1(x) = 0$$

E aos limites:

$$(8) \quad x^l \leq x \leq x^u$$

A solução deste sub-modelo 1, que será denotada por x^* é então utilizada como condição inicial para o segundo sub-modelo, que inclui as restrições $g_2(x, y)$. A solução do sub-modelo 2 é assim a solução do modelo completo, já descrito nas equações (1) a (5). A rigor, as duas funções-objetivo, a do modelo completo e a do sub-modelo 1 são idênticas. Isto porque as variáveis y são na realidade variáveis de estado, ou seja, não aparecem explicitamente na função-objetivo. São valores resultantes da escolha das variáveis x , que no modelo completo são restritas também pelas restrições às variáveis y .

No sub-modelo 1 ressalta-se o balanço hídrico, sendo as restrições envolvidas chamadas de Restrições de Disponibilidade Hídrica. Além disso, considera-se o balanço de massa dos reservatórios, fluxos mínimos para demandas ecológicas institucionais e as restrições relativas a quantidade de efluentes lançados e consequentes valores de áreas de fertirrigação recomendadas, o que permite cálculo de estimativas de cargas provenientes do processo.

No segundo sub-modelo, que inclui as Restrições de Qualidade de águas, calcula-se a concentração e o transporte dos constituintes de qualidade modelados e a estimação a partir de um deles da quantidade de fósforo associada que será levada aos reservatórios.

Assim, no sub-modelo 1 a alocação ótima de água é encontrada sem se restringir valores de concentração dos constituintes de qualidade resultantes. Apenas a questão quantitativa é considerada. As variáveis de decisão são escolhidas de tal forma a respeitarem balanços hídricos e questões institucionais, tais como o de respeitar outorgas estabelecidas, fluxos mínimos para atender demandas ecológicas, etc. Não se considera o impacto destes lançamentos com relação a qualidade do rio. O objetivo do segundo sub-modelo é o mesmo que o primeiro - o de maximizar o benefício para a sociedade como um todo - sendo que novos valores de alocação - ainda respeitando as restrições quantitativas - devem ser encontrados de forma a resultar em constituintes de qualidade dentro dos limites estabelecidos - ou seja, que respeitem também as restrições qualitativas: os valores dos constituintes de qualidade exigidos pela legislação, de acordo com usos correntes, bem como níveis de aporte de fósforo para prevenir um futuro processo de eutrofização.

5.1 – A Função Objetivo

A Função Objetivo representa o benefício líquido para todos os usos considerados no modelo. Dessa forma, mensuram-se os benefícios sociais líquidos através da agregação dos benefícios e custos individuais líquidos agrupados por categorias de uso. Na aplicação da bacia do Pirapama, realizada em todo o trecho a montante do reservatório de mesmo nome (Moraes, 2003) consideraram-se as funções benefício de quatro usos, a saber e respectivos usuários: Abastecimento Humano (municípios de Recife e Vitória), Abastecimento Industrial (agroindústrias JB, Sibéria e Liberdade), Geração de Energia Elétrica (PCHJB e PCHCIP) e Fertirrigação.

Um dos maiores problemas para determinar os benefícios associados aos usos da água --- de outra forma, para valorar o uso da água --- é a inexistência de mercados onde direitos de uso possam ser transacionados. Isto porque sem o conhecimento de preços e consequentes quantidades demandadas em função destes preços não é uma tarefa trivial obter uma função demanda (Carrera-Fernandez, 1999).

Uma relação expressando a quantidade de água demandada como função do preço fornece uma avaliação economicamente robusta e teoricamente rigorosa do valor do uso da água. A princípio, para se obter uma função demanda seria necessário se conhecer preço, quantidade demandada naquele preço e a elasticidade-preço da demanda.

Os primeiros resultados do modelo (Moraes, 2003) foram obtidos utilizando-se as demandas por água lineares levantadas para os vários usos no Rio Pirapama no *Estudo de Cobrança pelo uso da água na bacia hidrográfica do Rio Pirapama* (Carrera-Fernandez, 1999). O benefício bruto de cada usuário era dado então pela área sob a reta representativa da demanda, até o valor de alocação escolhido. Para obter o benefício líquido de cada uso, subtraía-se do valor do benefício bruto um valor de custo médio por metro cúbico de água abastecida o que já incluía as perdas, pelo valor alocado.

Na solução do modelo assim obtida, observaram-se resultados que apontavam para uma não viabilidade econômica dos valores outorgados atualmente, bem como dos valores de demanda mínima das PCH's de ambos os usuários. Isto porque os valores obtidos na alocação ótima das duas PCH's mostraram-se sempre abaixo dos valores informados como sendo os mínimos necessários pelos usuários, mesmo havendo disponibilidade de água. No caso do uso para abastecimento humano observou-se uma alocação ótima menor do que a outorgada para Recife, mesmo havendo disponibilidade de água para atender ao que foi estabelecido.

Além disso, com relação a alocação ótima de efluentes, esta primeira solução apontava para uma distribuição de áreas fertirrigadas bem diferente da atual, mas estranhamente as restrições de qualidade das águas ficavam inativas. Isto indicava que a solução encontrada com o objetivo de maximizar o benefício da fertirrigação como um dos usos, apenas atendendo as restrições relativas ao primeiro sub-modelo (disponibilidade hídrica), já atendiam às restrições de qualidade das águas.

Diante disso, iniciou-se um estudo aprofundado para obtenção de funções de demanda inversa não-lineares para cada um dos usuários. Passamos a usar ao invés das funções lineares os valores das elasticidades-preço da demanda por água em cada modalidade de uso na bacia do Pirapama, avaliadas nos respectivos pontos previstos de demanda no estudo de Carrera-Fernandez (1999). Partiu-se do pressuposto de que essas elasticidades são constantes ao longo da curva. Embora não acurada, esta premissa é bastante razoável. Há relatos na literatura de que embora esperem-se mudanças na elasticidade à medida que os preços aumentem, não há base confiável para a realização destes ajustes. A elasticidade-preço da demanda η é definida por:

$$(9) \eta = (dQ/Q)/(dP/P)$$

onde P é o preço no qual a quantidade observada Q é a demandada. Assumindo a elasticidade constante, a equação acima pode ser rearranjada e integrada resultando na seguinte função de demanda inversa:

$$(10). |P| = \exp\{\{\ln|Q|/\eta\} + C\}$$

Esta função, dado que as elasticidades preço são negativas, é uma função exponencial no primeiro quadrante do eixo (P,Q), que assintota os eixos P e Q em direção ao infinito(ver figura 2). Assim, quando Q tende a zero o valor de P tende a infinito e tende a zero quando Q aumenta indefinidamente. Isto representa a realidade teoricamente, dado que para pequenas quantidades de água, o valor da água seria muito alto, enquanto para maiores quantidades o valor tende a diminuir. No entanto, tal função demanda impossibilitaria o cálculo dos benefícios brutos associados a uma determinada quantidade demandada, que é dado pela área sob a curva de demanda de zero até o valor alocado. Estas áreas teriam valores ilimitados.

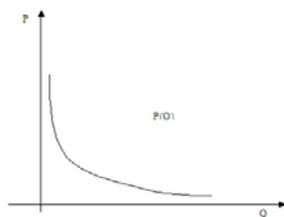


Figura 2 – Gráfico da função demanda teórica com elasticidades constante

Na prática é importante que possamos mensurar e limitar estes valores. Uma função com as mesmas características da função teórica, sendo que deslocada horizontalmente e na qual possamos usar os valores absolutos das elasticidades preço é dada por:

$$(11) |P| = \exp[\ln|Q - C_2|^{1/\eta} + C_1]$$

Tal função traria para valores finitos o valor da água para quantidades alocadas nulas (a curva assim deslocada passaria a interceptar o eixo dos Preços – no ponto $(0, P_1)$) além da quantidade alocada a partir da qual o valor (preço) tenderia a zero. Além disso, no ponto $(C_2, 0)$ a função não é definida, mas a partir dela os valores de alocação passariam a assumir novamente valores positivos, já que se trata de uma função módulo.

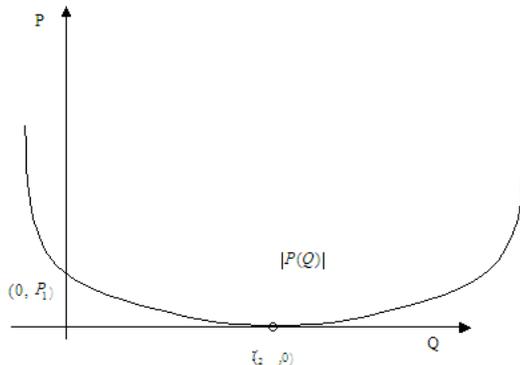


Figura 3 – Representação da função exponencial deslocada(ver equação 11)

Na realidade, espera-se que a quantidade alocada associada a um valor nulo, ou muito próximo disso, podemos chamar de consumo autônomo(C_2), seja tal que ao atender as necessidades do usuário plenamente, faça com que uma quantidade maior de água entregue leve a uma redução dos benefícios. Assim, para obter os benefícios como a área sob esta curva, deve-se atentar para o fato de que a curva é um módulo, e portanto a área associada a alocações maiores do que C_2 devem ser subtraídas da primeira. Para determinar completamente a função de demanda inversa, descrita pela equação (11), precisam-se de duas condições de contorno, para que as duas constantes (C_2 e C_1) sejam definidas. Como esta curva tem a intenção de representar valores que ocorrem na prática, tomamos para o caso dos usos consuntivos (Abastecimento Humano e Industrial) a primeira condição de contorno, como sendo o ponto de operação de cada usuário em valores atuais. Este ponto seria aquele associado aos valores outorgados atualmente cuja ordenada correspondente é o custo médio para a captação desta água.

Dessa forma, os usuários estariam solicitando outorgas até o ponto a partir do qual qualquer acréscimo na quantidade faria o benefício marginal conseguido menor do que o custo marginal para obtenção desse adicional.

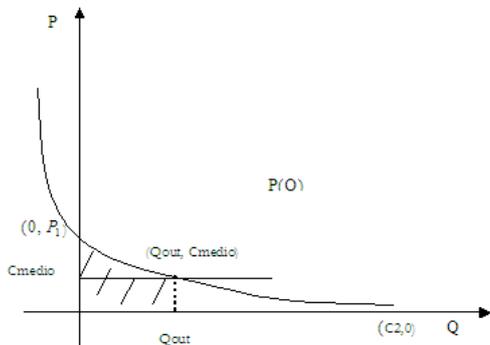


Figura 4 – Ponto de operação para os usos consuntivos

Seguem abaixo os pontos de operação considerados para cada usuário consuntivo. Os dados de outorga foram cedidos pela SECTMA (Secretaria de Tecnologia e Meio-Ambiente) e os custos operacionais com a COMPESA(Companhia Pernambucana de Saneamento) e as agroindústrias.

Usuários	Qoutorga(m3/s)	Custo médio de obtenção da água(R\$/m3)***
Recife	5,12	0,877506
Vitória	0,119	0,877506
JB	0,611	1,015154
Siberia	0,0578	1,015154
Liberdade	0,416	1,015154

A segunda condição de contorno vem de estimativas do benefício bruto obtido com os valores outorgados, que deve corresponder a área sob a curva que aparece hachureada na figura 5.

Usuários	Qoutorga(m3/s)	(1-perdas) de água bruta	Benefício estimado associado a outorga(R\$/seg)**
Recife	5,12	0,55	5,0172672
Vitória	0,119	0,55	0,116612265
JB	0,611	0,8	2,336098765
Siberia	0,0578	0,8	0,157358153
Liberdade	0,416	0,8	1,422830154

Estas estimativas de benefícios foram obtidas calculando-se os benefícios brutos com a água outorgada. As perdas no processo de captação do abastecimento humano e das agroindústrias na região foram obtidas em Carrera-Fernandez (1999). No caso do abastecimento humano, os benefícios com a água outorgada foram calculados tomando-se a quantidade de água outorgada descontadas as perdas, multiplicada por uma média ponderada das tarifas residenciais atuais, que variam em função do volume entregue, a saber: 1,7817 R\$/m3. No abastecimento industrial, a quantidade de água outorgada menos as perdas entra numa função de produção (estimada para o modelo com os dados das agroindústrias) que juntamente com a quantidade de cana moída em cada safra calcula o valor do produto final (álcool e/ou aguardente) resultante. Adotando os valores atuais de venda de 283,83 R\$/m3 para o aguardente e 473,06 R\$/m3 para o álcool chegam-se aos benefícios que constam na tabela dada.

A idéia é estimar a constante C2 e a partir daí o valor de P1 (já relacionado a C2 e C1 através da primeira condição de contorno), através da aproximação dos valores estimados(ver tabela anterior) com os valores calculados como a área sob a curva de demanda inversa até o valor outorgado.

Usuários	Benefício calculado(R\$/seg) (área sob a curva)	neto(elasticidade)	C2(m3/seg)	P1(R\$/m3)
Recife	5,017256705	0,13	184,9854757	1,08897508
Vitória	0,117414999	0,13	4,056739833	1,103348455
JB	2,335296947	0,99	0,723651517	6,64483011
Siberia	0,156916762	0,99	0,075354301	4,422293835
Liberdade	1,422799034	0,99	0,50544062	5,838006804

Os valores de elasticidade-preço de cada uso foram obtidos do estudo de Carrera-Fernandez (1999) e a formulação usada para o cálculo do benefício é obtida com a integração da função de demanda inversa para qualquer valor alocado que é dada por:

$$(12) \text{Benefício}(R\$/\text{seg}) = e^{C_1} \left[\frac{C_2^{(1/\eta)+1}}{(1/\eta)+1} - \frac{|C_2 - Q_{aloc}|^{(1/\eta)+1}}{(1/\eta)+1} \right]$$

onde:

$C_1 = \ln\left\{\frac{P_1}{|-C_2|^{1/\eta}}\right\}$ ou $e^{C_1} = \frac{P_1}{|-C_2|^{1/\eta}}$, que vem do fato de que o valor na equação (11) associado a quantidade nula é P_1 ;

Q_{aloc} = Para o cálculo do benefício em questão, este valor será o valor outorgado.

Deve-se atentar para o fato de que a formulação em (12) já dá a área líquida sob a função de demanda inversa no intervalo de integração que vai de $Q = 0$ até $Q = Q_{alocado}$, considerando áreas após o valor de indefinição da função ($Q=C_2$) como áreas negativas, pois representarão redução no benefício total bruto.

Para determinar a função de demanda para o uso não-consuntivo (geração de energia elétrica) bem como para a fertirrigação a estratégia é diferente, pois não há valores outorgados. Na verdade, o que temos nesses casos são os valores máximos que vamos considerar como sendo os próprios valores de consumo autônomo (C_2).

No caso do uso para geração de energia, as duas PCH's são a fio d'água. Isto quer dizer que o aproveitamento é feito sem regularização, não se considerando nenhuma variação na queda líquida utilizada para a geração, não impactando nas outras demandas.

Para este uso podemos considerar o consumo autônomo como sendo a capacidade máxima instalada, na realidade a vazão correspondente a essa capacidade máxima. Com este valor e estimativas do benefício obtido com o mesmo, determinamos o P_1 , que mais aproxime a área calculada sob a curva das referidas estimativas. A formulação que dá a área sob a curva até o ponto de indefinição é mais simples, pois é dada apenas pela primeira parte da equação (12), a saber:

$$(13) \text{Benefício}(R\$/\text{seg}) = e^{C_1} \left[\frac{C_2^{(1/\eta)+1}}{(1/\eta)+1} \right], \text{ com } e^{C_1} = \frac{P_1}{|-C_2|^{1/\eta}}$$

Os valores dos consumos autônomos, potências máximas associadas e as estimativas dos benefícios para as duas PCH's são dados na tabela abaixo:

Usuários	$C_2(m^3/s)^{**}$	Energia gerada no mês em MWh	Benefício associado em R\$/seg
PCHJB	1,57758683	230,4	0,006431111
PCHCIP	4,351574782	444	0,012393287

Os valores das capacidades máximas das plantas instaladas é de 0,96 e 1,85MW, respectivamente. Estes valores multiplicados por 8 horas diárias e 30 dias, dá a energia gerada em MWh no mês. Os valores de vazão associados a esta capacidade são obtidos através do modelo que contém a equação de produção de energia de cada uma delas. Para obtenção dos benefícios utilizou-se a tarifa média de suprimento do sistema Eletrobrás para a região Norte-Nordeste dada por 72,35 R\$/MWh.

Como resultado os valores de P_1 que mais aproximam os valores calculados dos estimados são dados por:

Usuários	Benefício calculado		P1
	(área sob a curva)	Neta	
	(R\$/seg)	(elasticidade)	(R\$/m3)
PCHJB	0,006431111	0,28	0,018635656
PCHCIP	0,012393287	0,28	0,013019431

Com os valores de C_2 e P_1 , fica assim completamente especificada a função de demanda inversa a ser usada para os cálculos do benefício bruto desses usuários. O valor do custo médio de geração de energia não foi necessário para este cálculo, mas será na determinação do benefício líquido. Além disso, com o

mesmo pode-se ter uma idéia do ponto de operação das PCH's, já que não há solicitação de outorga. Este será o valor de vazão associado a esse custo médio na curva de demanda inversa.

Para obtenção do custo médio, parte-se do valor de 14,47 R\$/MWh, que corresponde a 2% do Valor Normativo da geração de energia elétrica no país. Para obter o custo médio por metro cúbico de água utilizada, precisa-se de uma razão entre energia produzida e vazão necessária, que é deduzida da expressão de produção de energia de cada usuário. Quaisquer dois pares de energia produzida versus vazão requerida resulta nesta razão.

Os valores de custo médio assim obtidos para cada um dos usuários, constam na tabela abaixo e serão usados na função benefício líquido destes usuários. É dada na tabela a seguir também o ponto de operação de cada PCH, valor alocado a partir do qual qualquer acréscimo levará a benefícios marginais menores do que o custo.

Usuários	Custo médio de geração de energia (R\$/m ³)	Operação calculado(m ³ /s)	Energia gerada associada ao ponto de operação(MWh)
PCHJB	0,002445332	0,684141	100,7716
PCHCIP	0,001708649	1,887196	211,2063

Finalmente no caso da fertirrigação os valores autônomos (C2) serão dados pela carga máxima associada a cada site que demanda efluentes para fertirrigação durante os meses de safra. Esta é obtida considerando-se que toda a área plantada de cana no site recebe vinhoto. Através das vazões específicas médias de cada mês naquela localização, estima-se a carga associada máxima que a drenagem pluvial natural (proporcional a área fertirrigada) traz, considerando-se presente nela 1% da concentração de matéria orgânica do vinhoto. A média dessas cargas máximas por mês dará o valor de C2 para aquele site. As estimativas dos benefícios associados a fertirrigação de toda a área plantada de cana no site será dada pelo produto entre o número de hectares, a produtividade adicional que se espera com a aplicação do vinhoto(15 ton/ha), e o valor da tonelada de cana(46,4562R\$/ton). Estes valores serão dados em reais na safra toda, que estamos considerando 150 dias(5 meses).

Da mesma forma, com os valores de C2 e estimativas de benefício para a carga máxima, obtivemos os valores de P1 da curva de demanda inversa, minimizando a diferença entre valores de benefício estimados e os calculados. O cálculo da área sob a curva relativo a carga máxima(C2) é dado pela equação 13. Os valores constam na tabela a seguir:

Usuários	C2(kgDBO/dia)	area de cana do site (há)	Benefício calculado (Reais/dia)	neto	P1(R\$/kgDBO)
FIR0	3911,824004	1951	9063,60462	0,64	29,6862625
FIR1	793,3008639	386,84	1797,111641	0,64	29,0249185
FIR2	4229,587553	2024,11	9403,245898	0,64	28,4848313
FIR3	2392,95136	1145,17	5320,024655	0,64	28,4848313
FIR4	1284,953494	603,48	2803,538758	0,64	27,954584
FIR5	1089,399435	505,9	2350,219158	0,64	27,6410855
FIR6	1500,91205	697	3237,99714	0,64	27,6410855
FIR7	2457,568613	1107,43	5144,698957	0,64	26,8218169
FIR8	1613,287915	710,75	3301,874415	0,64	26,2230105
FIR9	3181,451435	1401,62	6511,393904	0,64	26,2230105
FIR10	3687,73537	1588,38	7379,009896	0,64	25,6372963
FIR11	1747,198128	741,3	3443,798106	0,64	25,2539552
FIR12	1407,601586	581,67	2702,217785	0,64	24,596566
FIR13	3907,971663	1614,91	7502,258194	0,64	24,596566
FIR15	2917,821684	1196,69	5559,366998	0,64	24,4118378
FIR16	1878,757862	747,64	3473,251337	0,64	23,686412
FIR17	4630,704401	1842,76	8560,762711	0,64	23,686412

FIR18	1172,046919	461,16	2142,374119	0,64	23,4198546
FIR19	435,2233798	168,68	783,6231816	0,64	23,0690089
FIR20	6032,777099	2338,13	10862,06349	0,64	23,0690089
FIR21	2645,138728	1002,22	4655,933276	0,64	22,5523692
FIR22	3163,417659	1158,53	5382,090139	0,64	21,7985854
FIR23	191,3327325	69,02	320,6406924	0,64	21,4715424
FIR24	2879,693459	1038,8	4825,870056	0,64	21,4715424

Os valores calculados utilizando-se a referida formulação com as constantes C2 e P1 conforme acima, ficaram muito próximos dos valores estimados e por isso não constam na tabela.

Os custos médios por área fertirrigada também aqui, como no caso da geração de energia elétrica, não são necessários para a obtenção das constantes, mas serão utilizados para compor o benefício líquido, como será explicitado mais adiante.

Com as funções de demanda inversa identificadas para cada usuário, o modelo obtém valores de benefício bruto para cada um deles e a cada mês, dependendo do valor alocado. O benefício líquido será resultante da subtração dos valores incorridos com a obtenção deste mesmo valor alocado, através do produto entre o custo médio de cada usuário e do valor alocado para o mesmo naquele mês. Os valores dos custos médios dos usuários já foram apresentados anteriormente e são todos dados em R\$/m³, a menos do uso da fertirrigação.

Assim, a menos da fertirrigação, para cada usuário e a cada mês será calculado o valor do benefício líquido resultante da alocação correspondente:

(14)

$$B.Liq(usuário, t) = e^{C_1} \left[\frac{C_2^{(1/\eta)+1}}{(1/\eta)+1} - \frac{|C_2 - Q_{aloc}(usuário, t)|^{(1/\eta)+1}}{(1/\eta)+1} \right] - C_{medio} * Q_{aloc}(usuário, t)$$

Onde e^{C_1} , C_2 e η assumem valores dependendo do usuário, de acordo com os valores já mostrados. O valor $Q_{aloc}(usuário, t)$ deverá ser tal que atenda a todas as restrições hidrológicas (quantidade e qualidade de águas), de controle e institucionais e ainda maximize a soma de todos esses benefícios.

Na fertirrigação, há custos com o processo de aspersão do vinhoto, mas há também economia com os fertilizantes que não precisam ser usados, bem como com os efluentes, que ao serem despejados nas lavouras, dispensam tratamento.

Para mensurar o custo médio com aspersão, usamos um valor de 6882 R\$/ha no ano, a partir de informações das agroindústrias. Dependendo do vinhoto alocado (carga alocada) num determinado site e da dose utilizada estima-se o número de hectares fertirrigados e daí imputa-se este custo no benefício bruto. Ao mesmo tempo que se gasta no processo de fertirrigação se economiza com os adubos e fertilizantes. Para reduzir o custo introduzimos então uma componente positiva, função também da área fertirrigada. Considerando o custo com adubação de 4,11 R\$/ton de cana e a produtividade de 65 ton/ha, dá uma economia de 267,15 R\$/ha. Finalmente é introduzida a última componente positiva na função benefício líquido, que é a economia feita por não se tratar a carga que é lançada. A partir de informações da COMPESA, o valor do tratamento anaeróbio (sem utilização de energia) de esgotos domésticos numa vazão de 50 l/s custa R\$ 28.080,00 no ano. Usando a concentração de 350mg/l, isto equivale a uma carga de 17.500 mgDBO/seg ou 1.512 kgDBO/dia. Isto dá um valor de R\$1,547/KGDBO/dia no mês, que será multiplicado pela carga alocada e somado ao benefício bruto.

Assim, a função benefício líquido no caso da fertirrigação é dada por:

$$B.Liq(usuário, t) = e^{C_1} \left[\frac{C_2^{(1/\eta)+1}}{(1/\eta)+1} - \frac{|C_2 - Cg_{aloc}(usuário, t)|^{(1/\eta)+1}}{(1/\eta)+1} \right] - C_{medio} * Area_{ferrig}(usuário, t) + G_{medio1} * Area_{ferrig}(usuário, t) + G_{medio2} * Cg_{aloc}(usuário, t)$$

Onde e^{C_1} , C_2 e η assumem valores para cada site de demanda por efluentes (usuário), conforme já mostrado e a $Cg_{aloc}(usuario, t)$ é a carga resultante da decisão da quantidade de vinhoto lançado naquele site e naquele mês, que tem que ser tal que atenda às restrições (quantidade de vinhoto disponível, quantidade de cana plantada e dose de aplicação utilizada, níveis de OD ao longo do rio resultantes, etc.) e ao mesmo tempo maximize os benefícios. Esta relação entre o vinhoto lançado e a carga alocada depende da dosagem de aplicação (utilizou-se para as três agroindústrias o valor de 300m³/ha), da vazão específica média, que varia com o site e com o mês, e do pressuposto já mencionado de que 1% da concentração de matéria orgânica do vinhoto está presente nos lançamentos naturais médios proporcionais a áreas fertirrigadas. O C_{medio} é o custo com aspersão por hectare, sendo a $Area_{ferrig}(usuario, t)$, obtida a partir da mesma variável de decisão de quantidade de vinhoto alocada, que resultou na $Cg_{aloc}(usuario, t)$. O ganho médio 1, G_{medio1} , representa a economia com os fertilizantes, relativo a mesma área onde se utilizou o vinhoto e o ganho médio 2, G_{medio2} representa a economia de não tratar a carga alocada.

Agregando os valores dos benefícios líquidos ao longo dos meses, obtém-se no horizonte de tempo do modelo(1ano) o benefício líquido de cada usuário. A Função-objetivo será a soma dos benefícios líquidos de todos os usuários individuais, o que representa o benefício social líquido a ser maximizado.

(16)

$$F - OBJ = \sum_{mun} B.Liq_{AH}(usuario_{mun}) + \sum_{aind} B.Liq_{AI}(usuario_{aind}) + \sum_{pch} B.Liq_{GE}(usuario_{pch}) + \sum_{ferrig} BL_{fir}(usuario_{ferrig})$$

Assim, o $B.Liq_{AH}(usuario_{mun})$ é a soma dos benefícios líquidos anuais dos municípios, o que daria um benefício resultante do uso da água para abastecimento humano(AH), e da mesma forma para as agroindústrias(aind) no abastecimento industrial(AI), pequenas centrais hidroelétricas(PCH's) na geração de energia(GE) e sites de demanda por efluentes(ferrig) na fertirrigação(FIR).

5.2 – As Restrições do Modelo

5.2.1 -Restrições de Disponibilidade Hídrica (Sub-modelo 1)

- **Equação de Balance nas Junções Principais e nas Junções Afluentes:** Representa o equilíbrio quantitativo em cada um dos nós *junção* --- que inicia trechos no rio principal e nos seus afluentes --- e em cada unidade de tempo (mês) e traduz o fato de que o fluxo de água que entra em cada junção em qualquer mês deve ser igual ao fluxo de água que a deixa.
- **Balanco de massa para os reservatórios:** Esta restrição diz respeito ao balanço hídrico para um nó *reservatório* e não para um nó *junção*. Sendo assim, o balanço hídrico passa a ser de que a variação de volume no reservatório é dada pela diferença entre o volume afluente ao mesmo e o volume efluente. Em particular, foi utilizada a abordagem para balanço de massa de reservatório, que considera como volume efluente ao reservatório não só as liberações a jusante do mesmo, que inclui as captações para abastecimento humano, como também as perdas por evaporação proporcionais a área da superfície do reservatório em média daquele mês⁴.
- **Fluxo mínimo para atender demandas ecológicas:** O valor do volume efluente a cada um dos reservatórios, que chegar ao nó seguinte, deve atender a um limite mínimo, quando houver, que se constitui numa demanda ecológica para o trecho seguinte ao lago. A demanda ecológica neste caso é a quantidade de água mínima exigida para a manutenção das condições ambientais do rio no trecho a jusante do barramento. No caso da aplicação em questão, havia sido estabelecida pela então Secretaria de Recursos Hídricos (SRH), para o reservatório Pirapama, uma demanda

⁴ A determinação desta área se deu através de uma aproximação linear da relação volume do reservatório e área do espelho, sendo considerado o volume médio naquele mês para fins de evaporação, como a média do volume ao fim do mês corrente e o volume ao fim do mês anterior. Deve-se salientar ainda que no primeiro mês simulado, o volume no mês anterior não é uma variável e sim uma condição inicial. Adota-se para cada reservatório no modelo, este valor inicial como sendo o valor de acumulação do mesmo. Para tornar isto bem provável de ocorrer, o modelo simula um período de 12 meses, iniciando-se a partir do mês de agosto. Sendo este mês, o último da estação chuvosa, muito provavelmente num ano médio o reservatório já estará cheio – no seu valor de acumulação – no mês de julho, o que faz a condição inicial ter uma margem de erro pequena

ecológica de $1,2 \text{ m}^3/\text{s}$, o que significa um volume mínimo de 3,1104 milhões de m^3 em qualquer mês que tem que ser respeitado.

- **Vazão de Restrição a jusante dos barramentos:** Para assegurar que as liberações dos barramentos não irão alagar a região a jusante do reservatório, também é acrescentado um limite máximo ao valor efluente de cada barragem que chega ao nó seguinte, ou seja, já descontando-se o valor retirado para abastecimento humano. Foram usados para simular estas vazões de cheia, o dobro do valor das vazões médias afluentes aos reservatórios que constam nos respectivos projetos básicos de cada uma das barragens.
- **Capacidades Máxima e Mínima do Reservatório:** Estas restrições são estabelecidas para as variáveis que representam o volume de cada reservatório em cada mês. Como já foi visto, a abordagem utilizada para o balanço de massas utiliza uma aproximação linear para a relação área/volume do reservatório. Esta linearidade só é adequada para um intervalo de volume que vai do “volume morto” (*dead storage*) até o volume associado a lâmina máxima.
- **Conservação do Volume Armazenado ao fim do período de análise:** Esta restrição garante que não há perdas nem ganhos de água armazenada ao fim de um ano típico adotado na modelagem. Isto é implementado igualando-se o volume do reservatório no último mês modelado, ou seja, ao fim do período de análise (1 ano), à condição inicial, que como já visto é o volume de acumulação do reservatório, já que o modelo inicia a simulação no último mês da estação chuvosa.
- **Variação de Volume do reservatório num mês:** Esta restrição assegura que a variação da água armazenada em cada um dos reservatórios entre um mês qualquer e o imediatamente anterior, não pode exceder em valor absoluto a 20% do volume anterior.
- **Capacidade máxima instalada de Pequenas Centrais Hidroelétricas-PCH's:** O uso da água para geração de energia elétrica no trecho estudado da aplicação em questão, é feito através de duas PCH's a fio d'água. O volume de água efetivamente usado para geração durante o mês num determinado trecho será limitado de um lado pela disponibilidade de água no trecho, por outro lado pela capacidade máxima da planta instalada. Introduce-se também uma condição para que a equação de produção de energia no modelo só calcule valores de potência geradas se o valor de vazão alocado for maior do que o associado ao *engolimento mínimo*⁵ de cada PCH.
- **Quantidades limite para aplicação de efluentes:** O valor a ser aplicado por cada agroindústria nas áreas plantadas de cana associadas é limitado inicialmente de duas formas. Uma delas diz respeito ao tamanho da área plantada de cana em cada mês de safra e em cada trecho, e a dosagem em que o vinhoto deve ser aplicado. A partir destes dois valores, o máximo de área demandada e a dose de aplicação obtém-se um dos limites superiores do volume a ser alocado. A outra limitação com respeito a quantidade de aplicação do efluente em cada trecho, diz respeito a soma dessas alocações em todas as áreas que são fertirrigadas por uma dada indústria. Obviamente, esta soma não poderá ser maior do que a produção de vinhoto total da agroindústria. Nos meses de entressafra a produção é nula e a alocação também.

5.2.2 -Restrições de Qualidade de Águas (Sub-modelo 2)

Von Sperling (1996) relata que em termos ecológicos, a repercussão mais nociva da poluição de um corpo d'água por matéria orgânica é a queda nos níveis de oxigênio dissolvido, causada pela respiração dos microrganismos envolvidos na depuração de carga orgânica. Os níveis de oxigênio dissolvido têm sido utilizados tradicionalmente para a determinação do grau de poluição e de autodepuração em cursos d'água. A sua medição é simples, e o seu teor pode ser expresso em concentrações, quantificáveis e passíveis de modelagem matemática.

Para representar e simular a curva de oxigênio dissolvido no modelo, utilizaram-se as equações representativas do clássico modelo dentro da Engenharia Ambiental, o modelo dos pesquisadores Streeter e Phelps (Streeter & Phelps, 1925). Nele, considera-se a situação relativamente simples em que apenas a desoxigenação e a reaeração atmosférica influem no balanço do oxigênio dissolvido.

⁵ Segundo o documento da Eletrobrás(Eletrobrás), que contém diretrizes para projetos de PCH's (Eletrobrás), as turbinas possuem um valor de engolimento mínimo, que é um valor de vazão abaixo do qual a máquina deve ser desligada. Assim, se forem alocados para a geração um valor de vazão menor que este valor de engolimento, as máquinas estariam desligadas e não haveria produção.

Diz-se simples pois uma série de outros fenômenos integram este balanço, tais como: demanda bentônica, nitrificação, fotossíntese, etc. Mas ao mesmo tempo relativamente, pois só a simulação destes dois processos, já envolve e introduz no modelo de otimização um grau de não-linearidade considerável. De acordo com revisão de literatura acerca dos modelos econômicos-hidrológicos integrados existentes (McKinney et al, 1999), não se encontra menção de nenhum deles tratando a questão da qualidade, no que diz respeito a constituintes que sofrem processo de depuração ao longo do rio. Sendo assim, acreditamos que a aplicação de uma formulação básica como o Streeter-Phelps, que serve de suporte aos modelos mais sofisticados posteriores, já se constitui num avanço à medida que introduz de forma integrada --- tanto no que diz respeito a disponibilidade hídrica como aos componentes econômicos --- constituintes de qualidade tão importantes quando se trata de contaminação por cargas orgânicas.

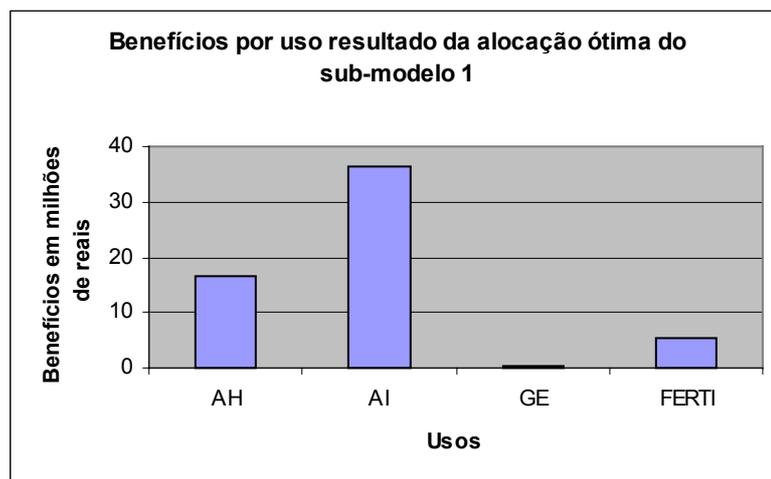
Assim, basicamente as Restrições de Qualidade de águas do modelo visam assegurar que a escolha das variáveis de decisão (alocações por uso) sejam tais que o oxigênio calculado ao longo de cada um dos trechos em cada mês, esteja sempre acima do valor permissível pela legislação. Deve-se atentar para o fato de que ao se limitar níveis de oxigênio ao longo de cada trecho, limita-se também a carga orgânica permissível de se lançar na área associada. Isto porque o oxigênio ao longo do trecho, é função da carga lançada no início do mesmo, além dos valores iniciais de oxigênio e da capacidade de depuração do rio.

O problema é que no caso dos reservatórios modelados as referidas restrições não limitam a carga lançada nos lagos. O fato é que o cálculo e a evolução do oxigênio dissolvido dentro dos reservatórios não pode ser feita através das equações do modelo Streeter-Phelps. O mesmo não é adequado para utilização em lagos. Desta forma, não se poderia limitar os níveis de OD, e portanto não se estaria restringindo as cargas referentes aos lançamentos dos trechos que contribuem para o reservatório. Assim é que procurou-se estabelecer uma outra restrição para limitar a carga independente da questão do oxigênio. Na realidade, no caso de reservatórios, a preocupação maior no que se refere a lançamentos de cargas é a questão da eutrofização. O principal fator de estímulo deste processo é um nível excessivo de nutrientes no corpo d'água, principalmente nitrogênio e fósforo. Procurou-se então estabelecer uma outra restrição para limitar a carga independente da questão do oxigênio. Usa-se uma relação para determinar o fósforo a partir da DBO. Limita-se assim a carga orgânica lançada nos reservatórios de forma que a carga máxima admissível de fósforo associada não resulte numa concentração de fósforo superior ao limite de eutrofia.

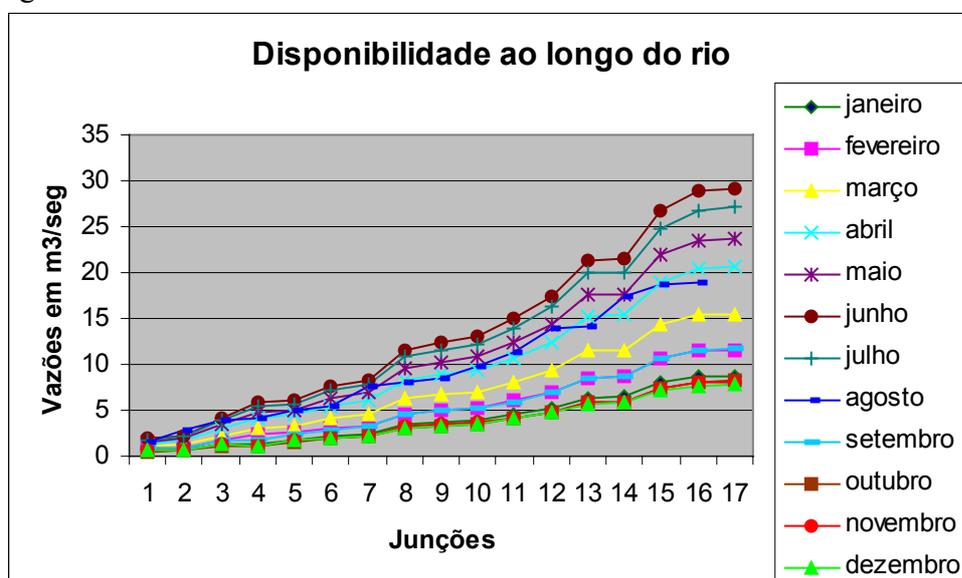
6- Resultados do Modelo

Os resultados enunciados são os primeiros obtidos com a função-objetivo não-linear. Na realidade, do modelo podem-se obter valores das variáveis em diversos níveis de agregação. Faremos aqui uma análise mais macro – num nível de agregação maior - pois é o que temos no presente estágio do estudo. Serão descritos também algumas simulações a se realizar na continuidade dos trabalhos, que vai dar uma idéia da potencialidade da ferramenta de modelagem aqui explicitada.

Inicialmente mostramos os valores dos benefícios líquidos por uso, obtidos na solução ótima do sub-modelo1, através do gráfico abaixo:

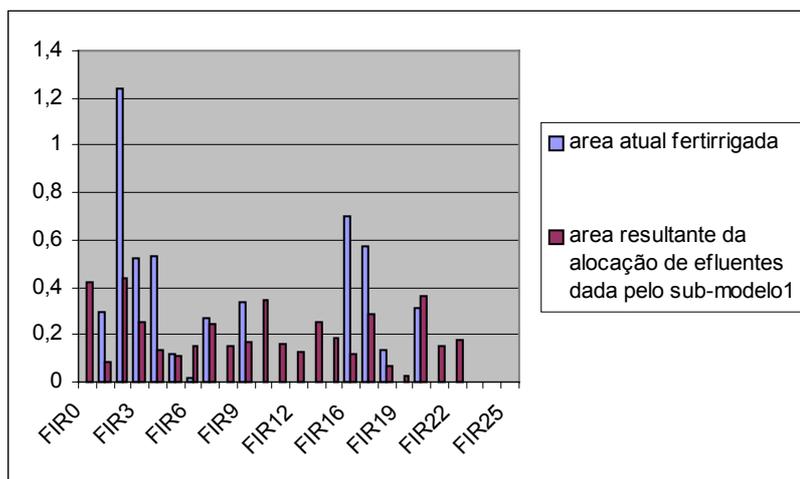


Estes valores resultam de alocações de valores praticamente iguais aos valores outorgados no caso dos usos consuntivos (AH e AI) e no caso do uso não-consuntivo (GE) igual ao valor de operação para cada PCH. Praticamente não houve alterações ao longo dos meses, mesmo havendo ofertas de água diferentes simuladas pelo modelo. O gráfico a seguir mostra a disponibilidade simulada pelo sub-modelo1 ao longo do rio em cada mês do ano.



Dos quatro usos considerados apenas o uso para abastecimento humano e o industrial são consuntivos. Enquanto o humano ocorre em todos os meses do ano, o industrial limita-se aos meses de safra, que no modelo considerou-se de setembro a janeiro. Neste período então, há a presença dos dois usos consuntivos. Pode-se observar no gráfico acima que no referido espaço de tempo a pior situação com respeito a disponibilidade é a de Dezembro, enquanto a melhor se dá em Setembro. Verificando as alocações ótimas para os usos consuntivos nestes dois meses, praticamente não se observam diferenças.

Com relação a alocação dos efluentes, o sub-modelo 1 resulta em áreas fertirrigadas bem diferentes das atuais, mostrando uma distribuição mais uniforme ao longo do rio dessas áreas. Deve-se salientar que não se consideraram diferenças de custos com a fertirrigação para sites mais distantes da agroindústria, o que implicaria talvez numa distribuição mais parecida com a atual. Esta simulação pode ser feita facilmente, já que os benefícios são calculados para cada site.



As alocações nulas para FIR23, FIR24 e FIR25 não são resultado do modelo. Na realidade, estas áreas plantadas têm a sua produção de cana voltadas para uma agroindústria fora do trecho modelado -- Usina Bom Jesus. Portanto a alocação de efluentes nas mesmas não é parte das decisões do modelo sendo fixadas nulas.

Todos esses resultados advêm do sub-modelo1, que maximiza a função-objetivo mas não restringe os valores alocados de forma a respeitar os limites de qualidade de água. Os resultados do sub-modelo2 tem o valor ótimo da função-objetivo diminuída, mas de forma bem discreta. Esta diminuição é perceptível apenas nas parcelas de benefícios líquidos relativas ao abastecimento humano e a fertirrigação. Há pequenas diminuições na alocação para Vitória em relação ao valor outorgado, nos meses mais secos (Outubro, Novembro e Dezembro), que coincide com meses de safra. No caso dos demais usuários consuntivos: Recife e as três agroindústrias, não se notam alterações na alocação. Isto já sinaliza uma alteração na disponibilidade, que foi resolvida pelo modelo retirando água do usuário consuntivo que contribui com menores parcelas do benefício líquido total. Observar que os usuários não-consuntivos (PCH's) não alteraram os seus valores de operação com a alteração da disponibilidade.

Muito interessante notar que a introdução do limite de qualidade, altera a disponibilidade quantitativa, fato este indicado pelo ajuste na alocação para os usuários consuntivos, Isto mostra que o modelo está considerando a diluição de cargas orgânicas como um outro uso, restringindo retiradas de água para que o rio possa se recuperar através do processo de autodepuração, em outras palavras usando a capacidade de assimilação dos rios.

A diferença mais significativa no entanto, ao se introduzir as restrições de qualidade de águas é na fertirrigação. Há uma redução no benefício líquido total do uso, mas que não é generalizada por site. Observam-se reduções de benefício em alguns sites, mas aumento em outros. Na verdade o que ocorre é uma redistribuição de cargas, de forma a manter o benefício total o maior possível, respeitando agora limites de qualidade. O vinhoto total produzido continua a ser totalmente alocado, não há sobras, e a distribuição das áreas fertirrigadas ao longo do rio continua uniforme. A maior diferença é a carga alocada pelo sub-modelo1 no afluente Águas Claras (junção JC6), que se reduz a praticamente metade. O fato é que o modelo introduz o reservatório Águas Claras no afluente de mesmo nome e o lançamento de cargas neste ponto é restringido para que limites de trofia não sejam alcançados. Para compensar esta redução, a carga não lançada é distribuída nos demais sites que tem a agroindústria JB como fertirrigante.

Simulações com vazões específicas médias reduzidas em 50% para representar uma disponibilidade hídrica bem menor, apresentam como resultado do sub-modelo2 (modelo completo) diminuições bem maiores das alocações para Vitória em relação aos valores de outorga nos meses de safra, e surgem bem pequenas diminuições, apenas nos meses mais secos (outubro e dezembro), nos valores alocados para a agroindústria Siberia, que deixa de ser atendida com o valor outorgado. Além disso, nos referidos meses a PCHCIP deixa de operar no seu ponto de operação., Isto significa que falta água no trecho da PCH, para que ela possa maximizar o seu benefício. É interessante observar que com a redução da disponibilidade, os usuários consuntivos responsáveis pelas menores parcelas de

benefício(Vitória e Sibéria) líquido têm os seus atendimentos reduzidos para que se possam manter as outorgas dos maiores(Recife, JB e Liberdade). No caso dos usuários não-consuntivos, apesar de produzir maiores benefícios a PCHCIP é que reduz a sua energia gerada. Isto no entanto é resultante da localização da mesma, que está a jusante de dois usuários consuntivos(Vitória e JB), enquanto a PCHJB fica a jusante de apenas um usuário.

Com relação a alocação de efluentes, há da mesma forma uma redistribuição de cargas retirando do site no afluente Águas Claras e aumentando nos outros sites da JB. No entanto, a diminuição da carga em relação a alocação do sub-modelo1 é menor, dado que ao se simular menores vazões específicas simulam-se também menores cargas lançadas, já que as mesmas, consideramos apenas advindas dos lançamentos naturais médios.

Novas simulações já estão em andamento, tais como aumentar de 1 para 5% a concentração do vinhoto nos lançamentos naturais médios referentes às áreas fertirrigadas, incluir fontes diretas de contaminação, introduzir taxaço ou cobrança nas funções de benefício líquido e avaliar as mudanças das alocações ótimas, etc.

A ferramenta possui recursos que possibilita mensurar custos das restrições, por exemplo o fato de incluirmos as restrições de qualidade reduziu em torno de R\$10.000 os benefícios líquidos totais que estavam na ordem de R\$ 58 milhões. Da mesma forma, a introdução de outras restrições tais como fluxos mínimos para fins ecológicos podem ser valoradas. A questão da eutrofização para os reservatórios da bacia é tratada pelo modelo de uma forma preventiva. Preços-sombra podem ser obtidos destes limites para cada um dos reservatórios em qualquer mês. Pode-se fazer a partir deles estimativas de custos da prevenção a serem comparados com custos de medidas corretivas.

O modelo ora desenvolvido tem como principal objetivo, estabelecer uma referência para os formuladores de políticas na definição de estratégias que mais beneficiem a sociedade como um todo. Uma vez estabelecida a meta socialmente desejável para o problema criam-se formas de avaliar os mecanismos para sua implementação.

Pode-se também avaliar além da taxaço e da cobrança, a opção de mercados de água. Poderia-se dentro da mesma estrutura, inserir algumas modificações nas funções benefício líquido de cada usuário, que agora deveria levar em conta também as possibilidades de ganhos através da comercialização de seus direitos de água, incorporando-as assim aos seus ganhos. Além disso, custos de transação deveriam ser incorporados aos seus custos. Ademais, como os preços nessa modalidade de realocação surgem do processo, ou seja da lei da procura e da oferta, poderia se usar uma relação preço-sombra/ retirada de água, de acordo com procedimento sugerido e adotado em Rosegrant et al(2000).

7 - Bibliografia

- Cai, X.; McKinney, D.C.; Lasdon, L.S., (2001), **Piece-by-piece approach to solving large nonlinear water resources management models**, Journal of Water resources Planning and Management, p.363-368.
- Cai, X.; McKinney, D.C.; Lasdon, L.S.; Watkins, D., (2000), **Solving large nonconvex water resources management models using generalized benders decomposition**, Operations Research, p.235-245, V.II.
- Carrera-Fernandez, J. (1999), **Estudo de Cobrança pelo uso da água na bacia hidrográfica do Rio Pirapama**, Relatório de Consultoria, CPRH, Agosto de 1999.
- Eaton, B. C. and Eaton, D. F.(1999), **MicroEconomia**, Sexta Edição, Editora Saraiva, São Paulo. ISBN: 85-02-02718-2.
- Eletrobras, Diretrizes para Projetos de PCH's.
- Gama, A. M. F. Coordenadora(1998), **Estudo da qualidade de água da bacia do rio Pirapama**, Companhia Pernambucana do Meio Ambiente – CPRH. Publicações Projeto Pirapama. Rua Santana, 367, Casa Forte - Recife – PE.
- McKinney, D.C.; Cai, X.; Rosegrant, M.; Ringler, C.; Scott, A. (1999), **Modeling Water Resources Management at the Basin Level: Review and Future directions**, SWIM Paper.

- Moraes, M.M.G.A., (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,** Tese de doutoramento, UFPE, Julho de 2003.
- Ribeiro, M. M. R.,(2000), Alternativas para a outorga e a cobrança pelo uso da água,** Tese de doutoramento, UFRGS, Janeiro de 2000.
- Ringler, C.(2001), Optimal Water Allocation in the Mekong River Basin,** Discussions Papers on Development Policy; ZEF - Zentrum für Entwicklungsforschung - Universität Bonn; Number 38; Bonn, May 2001.
- Rosegrant, M.W.; Ringler, C.; McKinney, D.C.; Cai, X.; Keller, A.; Donoso, G. (2000), Integrated Economic-Hydrologic Water Modeling at the basin scale: The Maipo River Basin,** Agricultural Economics, p.33-46
- Rosegrant, M. W. and Biswanger, H. P.(1994), Markets in tradable water rights: potential for efficiency gains in developing country water resource allocation,** World Development journal, number 22, pages 1613-1625.
- Streeter, H. W. and Phelps, E. B.(1925), A Study of the pollution and natural purification of the Ohio River,** Public Health Bulletin, no. 146.
- Varian, H. R.(1997), Microeconomia: Princípios Básicos,** Segunda Edição Americana, Editora Campus Ltda, Rio de Janeiro. ISBN: 85-7001-810-X.
- Von Sperling, M. (1996), Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos,** Segunda Edição, V. I.
- Winch, D. M.(1971), Analytical Welfare Economics,** Penguin Books Ltd., Harmondsworth, Middlesex, England. ISBN: 84-206-2112-9..",