

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ECONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA – PIMES

BRUNA DA NÓBREGA GERMANO

**PRODUÇÃO DO BIOGÁS A PARTIR DA VINHAÇA: UMA ANÁLISE
DE BEM-ESTAR SOCIAL USANDO MODELAGEM ECONÔMICO-
HIDROLÓGICA INTEGRADA**

Recife, PE

2011

BRUNA DA NÓBREGA GERMANO

**PRODUÇÃO DO BIOGÁS A PARTIR DA VINHAÇA: UMA ANÁLISE
DE BEM-ESTAR SOCIAL USANDO MODELAGEM ECONÔMICO-
HIDROLÓGICA INTEGRADA**

Orientador(a): Márcia Maria Guedes Alcoforado de Moraes

Dissertação submetida ao Programa de Pós-Graduação em Economia da Universidade Federal de Pernambuco (PIMES/UFPE), como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Economia.

Recife, PE
PIMES/UFPE

2011

Germano, Bruna da Nóbrega

Produção de biogás a partir da vinhaça : uma análise de bem-estar social usando modelagem econômico-hidrológica integrada / Bruna da Nóbrega Germano. - Recife : O Autor, 2011.

65 folhas : fig. e tab.

Orientadora: Prof^a. Dr^a Márcia Maria Guedes Alcoforado de Moraes.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Pernambuco. CCSA. Economia, 2011.

Inclui bibliografia.

1. Fertirrigação. 2. Biodigestão anaeróbia. 3. Desenvolvimento sustentável. I. Moraes, Márcia Maria Guedes Alcoforado de (Orientadora). II. Título.

338.16 CDD (22.ed.) UFPE/CSA 2011- 055

UNIVERSIDADE FEDERAL DE PERNAMBUCO
CENTRO DE CIÊNCIAS SOCIAIS APLICADAS
DEPARTAMENTO DE ECONOMIA
PIMES/PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ECONOMIA

PARECER DA COMISSÃO EXAMINADORA DE DEFESA DE DISSERTAÇÃO DO
MESTRADO EM ECONOMIA DE

BRUNA DA NÓBREGA GERMANO

A Comissão Examinadora composta pelos professores abaixo, sob a presidência do primeiro, considera a Candidata Bruna da Nóbrega Germano **APROVADA**.

Recife, 02/03/2011.

Prof. Dr. Márcia Maria Guedes Alcoforado de Moraes
Orientador

Prof. Dr. Yony de Sá Barreto Sampaio
Examinador Interno

Prof. Dr. Ignácio Tavares de Araújo Júnior
Examinador Externo/UFPB

AGRADECIMENTOS

A Deus pelo dom da vida, pela família linda e os amigos que me deu.

Aos meus pais, Mário Germano e Maria do Carmo, que não pouparam esforços para me educar e apoiar.

A minha irmã, Moisseta, e a minha prima, Emanuella, pela cumplicidade, confiança e carinho que sempre me dedicaram.

As minhas amigas, Stella, Gabriela, Mariana, Taís e Janaína, pela amizade, pelo apoio incondicional e pelos momentos de alegria e descontração que passamos juntas.

Ao meu companheiro e amigo, Paulo Ricardo, pela paciência e apoio durante o desenvolvimnto deste trabalho.

A grande companheira de sala, Ioná Rameh, e novamente a Stella, pela disponibilidade em ajudar, sempre que possível, na obtenção dos dados e informações relevantes para o desenvolvimento do presente trabalho.

Aos professores do Curso de Ciências Econômicas da UFPE, com os quais tive a oportunidade e o prazer de aprender, por serem os nossos estímulos e exemplos a serem seguidos.

Agradeço especialmente a minha orientadora, Márcia Maria Guedes Alcoforado de Moraes, pela disponibilidade e dedicação.

Agradeço a todos que direta ou indiretamente me apoiaram durante o período do mestrado e contribuíram para mais esta conquista.

RESUMO

O presente estudo tem como objetivo obter uma plataforma para mensurar o valor do ganho social líquido da adoção, pela indústria do bioetanol no primeiro trecho da bacia do rio Pirapama, de mais uma opção para uso econômico da vinhaça, utilizando um modelo econômico-hidrológico integrado já desenvolvido para o mesmo. Essa modelagem maximiza os benefícios dos produtores do bioetanol agregados aos benefícios dos demais consumidores de água do trecho, para diferentes cenários (com e sem produção do biogás), sem impactos ambientais na qualidade das águas. Comparando essas medidas de bem-estar social tem-se uma medida do benefício social líquido da opção do biogás ou o valor econômico social desta alternativa. Além disso, podem ser calculadas as perdas de bem-estar social (*deadweight loss*) de mudanças no nível de qualidade ambiental nos dois cenários. Estes serão obtidos através da diferença entre os benefícios sociais líquidos máximos diante da mudança nas restrições, admitindo a ocorrência de externalidades ambientais. Estas medidas podem ser usadas para analisar a introdução da opção do biogás tanto sob a ótica dos produtores e consumidores individualmente como da sociedade como um todo. Dessa forma, é possível subsidiar decisões na esfera pública e privada que levem ao desenvolvimento sustentável na região. Os resultados mostraram que, num contexto sem impactos ambientais, os ganhos líquidos obtidos pelos usuários são maiores quando a alternativa da produção biogás é considerada. Além disso, os custos sociais são menores se esta opção estiver disponível. Finalmente, pôde-se observar que prazos viáveis de retorno do investimento num biodigestor são obtidos, para duas das três agroindústrias analisadas, quando se considera os benefícios potenciais da adoção da tecnologia de biodigestão anaeróbia.

Palavras-chave: fertirrigação, biodigestão anaeróbia, desenvolvimento sustentável.

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

ABSTRACT

This study aimed to create a platform to measure the net social gain of adopting a new economic use of vinasse by the bioethanol industry in the first section of the Pirapama river basin. An integrated economic-hydrologic model previously developed for that purpose was used. This model maximizes bioethanol producers' benefits aggregated to the benefits of the other water consumers of that portion of the river (which are subject to restrictions on water availability and quality) and analyzes two different scenarios (with and without biogas production). Comparing these measures of social welfare has been a measure of net social benefit option for biogas or social economic value of this alternative. Furthermore, the losses can be calculated from welfare from changes in the level of environmental quality in both scenarios. These will be obtained through the difference between the maximum net social benefits in terms of changes in the constraints, assuming the occurrence of environmental externalities. These measures can be used to analyze the introduction of the biogas option from the perspective of both producers and consumers individually and society as a whole. Thus, it is possible to support decisions in public and private that lead to sustainable development in the region. The results showed that in a situation without environmental impacts, the net gains achieved by users are greater when the alternative of biogas production is considered. In addition, social costs are reduced if this option is available. Finally, it was observed that deadlines viable return on investment in a digester are obtained for two of the three agro-industries examined when considering the potential benefits of technology adoption of anaerobic digestion.

Keywords: fertirrigation, anaerobic digestion, sustainable development.

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

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Representação dos excedentes do consumidor e do produtor.....	15
Figura 2 – Máximo de bem-estar social diante de uma externalidade.	16
Figura 3 – Grupos de opções tecnológicas para destinação da vinhaça.	25
Figura 4 – Rede de nós e links representativa da bacia do Pirapama.	29
Figura 5 – Etapas da produção e utilização do biogás.....	34
 Quadro 1 – Situações analisadas em cada cenário.	 52
 Tabela 1 – Parâmetros da Equação 1.....	 21
Tabela 2 – Comparação entre vinhaça <i>in natura</i> e tratada.	32
Tabela 3 – Parâmetros necessários para obtenção das equações 2, 3, 4 e 5.....	36
Tabela 4 – Estimativas de custos relativos à aquisição do Biodigestor.....	46
Tabela 5 – Parâmetros da Equação 17.....	47
Tabela 6 – Benefícios líquidos associados a cada usuário nos cenários 1 e 2, em milhões de reais no ano.....	49
Tabela 7 – Resultados dos componentes do benefício líquido dos agroindustriais, relativos aos cenários 1 e 2, em milhões de reais por ano (safra).....	50
Tabela 8 – Benefícios líquidos (BL's) associados a cada usuário no Cenário 1, em milhões de reais no ano.....	52
Tabela 9 – Resultados dos componentes do benefício líquido dos agroindustriais, relativos ao Cenário 1, em milhões de reais por ano (safra).	53
Tabela 10 – Benefícios líquidos (BL's) associados a cada usuário no Cenário 2, em milhões de reais no ano.	55
Tabela 11 – Diferença entre as variações de benefício líquido nos cenários 1 e 2, em milhões de reais no ano.	55
Tabela 12 – Resultados dos componentes do benefício líquido dos agroindustriais, relativos ao Cenário 2, em milhões de reais por ano (safra).	56
Tabela 13 – Cálculo do retorno do investimento no biodigestor.....	58
Tabela 14 – Cálculo do retorno do investimento no biodigestor considerando reduções nas perdas de excedentes.	59

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	10
1.1. Objetivo	14
1.2. Estrutura da dissertação	14
2. REVISÃO DA LITERATURA	15
2.1. Medidas de bem-estar social.....	15
2.2. Aspectos legais e institucionais associados a qualidade dos recursos hídricos no que se refere a fertirrigação no Brasil	18
2.3. Aspectos econômicos da qualidade das águas (bem público e externalidade).....	21
2.4. A vinhaça e suas formas de disposição utilizadas pelo setor sucro-alcooleiro no Brasil	23
3. ESTUDO DE CASO: BACIA DO RIO PIRAPAMA.....	27
4. METODOLOGIA.....	30
4.1. As formas de disposição da vinhaça utilizadas neste estudo	30
4.1.1. Fertirrigação	30
4.1.2. Biodigestão Anaeróbia da Vinhaça e o Biogás	31
4.2. Procedimento para obtenção da quantidade de energia elétrica gerada através do biogás	34
4.3. Modelagem Econômico-Hidrológica Integrada.....	36
4.3.1. Descrição da Modelagem Econômico-Hidrologica Integrada	38
4.4. Atualizações e adaptações no modelo	40
4.4.1. Atualização de parâmetros do modelo	41
4.4.2. Modificação de equações da modelagem original.....	43
4.4.2.1. Modificação na função-objetivo (a ser usado em ambos os cenários).....	43
4.4.2.2. Modificação para incluir a alternativa de Biodigestão Anaeróbia da Vinhaça e introdução de novos parâmetros (a ser usada apenas no Cenário 2).....	46
4.5. Método utilizado para cálculo do retorno do investimento	48
5. OBTENÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS.....	49
5.1. Benefícios sociais líquidos da produção do biogás	49
5.2. Custos sociais associados a mudanças nos níveis de qualidade da água nos dois cenários	51

5.3. Análise das alternativas de uso econômico da vinhaça a partir das medidas de benefícios e custos sociais obtidas.....	57
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	60
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	62

1. INTRODUÇÃO

O maior desafio ambiental relacionado aos recursos hídricos no processo de conversão de energia, na atual indústria do bioetanol, está relacionado a poluição potencial produzida como efluente, resíduo ou co-produto na mesma (BERNDES, 2008).

Esses componentes podem ser vistos de uma forma geral como *by-products* do processo de conversão de energia, no sentido de que seria o biocombustível líquido a saída primária do sistema. Sendo também saídas do processo produtivo, esses *by-products* exigem alguma forma de disposição e resultam em impactos ambientais não apenas associados aos recursos hídricos (UNEP, 2011).

No processo de produção de etanol atual, independente da biomassa utilizada, não há, em termos de quantidade (massa e volume), nenhuma “perda” no processo de conversão da biomassa em combustível maior do que o efluente líquido que sai do processo de destilação, conhecido como *stillage* e, por isso, a minimização das perdas na conversão de energia deve focar necessariamente num aproveitamento econômico do mesmo (WILKIE; RIEDESEL; OWENS, 2010).

Além disso, independente da biomassa utilizada bem como de outros aspectos do processo produtivo, este resíduo apresenta alta concentração de carga orgânica (DBO) e pode resultar em grandes prejuízos ambientais, especialmente se não adequadamente disposto e em contato com os recursos hídricos (UNEP, 2011).

De acordo com Willington e Marten (1982), existem diversas soluções para o tratamento, utilização e disposição final da *stillage* e cada uma apresenta diferentes graus de comercialização, consomem ou produzem energia, resultam em subprodutos úteis e levam a custos ou ganhos financeiros, além de apresentarem diferentes impactos na qualidade das águas.

No Brasil, que produz etanol a partir da cana-de açúcar, o *stillage*, nacionalmente conhecido como vinhaça ou vinhoto, é gerado em enormes volumes líquidos¹ com grandes quantidades de potássio, mas pouco valor nutricional para ser aproveitado como ração animal, subproduto resultante de uma das formas de disposição do efluente da destilação, que é um processo conhecido como evaporação industrial².

¹ Dados da safra de 2009/2010, estimou como um dos subprodutos da produção de etanol, no Brasil, cerca de 385,5 bilhões de litros de vinhaça (ver www.mdic.gov.br/sitio/interna/interna.php?area=2&menu=999).

² O etanol americano, por exemplo, produzido a partir do milho, tem na evaporação industrial a sua mais comum forma de disposição do *stillage*, resultando em enormes volumes da ração animal conhecida como DDGs (Dried Distillers Grains with Solubles) e, praticamente, nenhum impacto na qualidade das águas (UNEP, 2011).

Opções como esta última reduzem significativamente o volume do efluente e eliminam os problemas de qualidade das águas mas, no caso brasileiro, não é viável economicamente devido ao baixo valor do produto final obtido a partir da fermentação do açúcar comparado aos altos custos de capital e energia. Outros métodos utilizados (WILLINGTON; MARTEN, 1982), que diminuem volume tendo como *by-products* ração animal, e eliminam problemas na qualidade das águas, esbarram também, no caso do efluente proveniente da fermentação do açúcar da cana, na questão do baixo valor do produto (UNEP, 2011).

Devido a isso, a opção que vem sendo frequentemente usada em todo o Brasil é a disposição deste resíduo *in natura* como fertilizante nas lavouras de cana, prática conhecida como fertirrigação – denominação resultante da junção entre as palavras fertilização e irrigação (GUNKEL et al, 2007).

De acordo com Pinto (1999), a fertirrigação substitui, em parte, o uso de fertilizantes, mantém a fertilidade do solo após anos de cultivo de cana-de-açúcar, e a matéria orgânica é rapidamente mineralizada elevando o conteúdo de cálcio, potássio, nitrogênio e fósforo do solo. Essa prática representa um perigo para a qualidade das águas superficiais quando os nutrientes e matéria orgânica atingem as mesmas por vias difusas ou acidentalmente através de vias diretas de instalações de armazenamento e transporte de vinhaça. Elevadas taxas de DBO na vinhaça levam ao esgotamento do oxigênio dissolvido (OD) na água, e as altas concentrações de nutrientes na mesma provocam a proliferação de algas, o que promove a eutrofização³ (GUNKEL et al, 2007).

A fertirrigação tem sido praticada em Pernambuco, Nordeste do Brasil, desde 1981, quando uma lei estadual, que proíbe a eliminação direta de águas residuais de cana nas águas de superfície, foi introduzida. Provavelmente, a ausência de uma regulação eficaz aliada a dificuldade de uma fiscalização característica de poluição difusa (poluição não pontual), que a vinhaça assume nesta opção, vem levando a problemas na qualidade das águas. Segundo Gunkel et al. (2007), todos os rios na região costeira do estado de Pernambuco são influenciados pela cultura da cana, e os efeitos são frequentemente amplificados, pois esses mesmos rios abastecem as cidades e, geralmente, são represados para o abastecimento

³ Enriquecimento das águas superficiais por alguns nutrientes, em particular fósforo e nitrogênio, que levam a um grande crescimento de algas e outras espécies vegetais aquáticas. A morte e apodrecimento desta flora aquática provocam um grande consumo do oxigênio dissolvido no corpo d'água, levando os animais à morte por asfixia (ver www.dicionario.pro.br/dicionario/index.php/Eutrofiza%C3%A7%C3%A3o).

humano e geração de energia elétrica. Esses reservatórios contribuem para uma maior deterioração da qualidade da água através do processo de eutrofização (UNEP, 2011).

Esse é exatamente o caso da bacia do rio Pirapama, cujos dados e modelagem econômica-hidrológica, a qual integra os componentes econômicos e hidrológicos num só modelo, já desenvolvida para o primeiro trecho da mesma (MORAES et al, 2010) são utilizados neste estudo. O primeiro trecho da bacia vai da nascente até o reservatório Pirapama, recentemente construído e cujo sistema de distribuição tem por objetivo resolver os problemas de abastecimento de várias cidades da Região Metropolitana do Recife (RMR), como Cabo de Santo Agostinho e Jaboatão dos Guararapes e, indiretamente, as cidades de Camaragibe e São Lourenço da Mata, contemplando mais de 3,5 milhões de pessoas da região. Este empreendimento deve custar aos cofres públicos cerca de R\$ 500 milhões e será descrito em maiores detalhes no Capítulo 3.

Neste trecho localiza-se a maioria dos produtores de etanol da bacia (JB, Sibéria e INEXPORT), cuja poluição potencial equivale a uma população de 4,2 milhões de habitantes. O efluente, que atualmente fertirriga as lavouras de cana, se constitui no principal responsável pelos limites de qualidade não atendidos em todo o segmento, e sua carga orgânica associada deverá ser aportada ao reservatório recentemente construído se as condições atuais não se modificarem.

A melhor utilização dos *by-products*, com consequentes menores impactos na qualidade das águas, em geral, respondem a uma regulação mais estrita bem como a existência de mercado e retornos para os mesmos. Questões estratégicas do negócio, associadas a sua competitividade, especialmente nas economias mais desenvolvidas, diante da indústria petroquímica, vêm incentivando a pesquisa na busca de outros usos para essas enormes “perdas” da conversão da bioenergia (UNEP, 2011).

No caso brasileiro, problemas na qualidade das águas relacionados a fertirrigação, bem como a inviabilidade econômica da evaporação industrial, fazem com que outras opções devam ser consideradas para aproveitamento da vinhaça. Alguns resultados encontrados (GERMANO; MORAES; RAMOS, 2010) mostram que mesmo diante de altos custos de tratamento, a alocação ótima encontrada, se as restrições de qualidade são atendidas, não aloca todos o efluente na fertirrigação, o que mostra a existência de custos de oportunidade para outras formas de disposição da vinhaça. A alternativa escolhida foi a que já vem sendo considerada pelo maior produtor de etanol do primeiro trecho da bacia, o Grupo JB, que é a

exploração da energia residual contida na vinhaça através da biodigestão ou produção de biogás.

A opção do metano (biogás) é atrativa pois pode remover até 95% da DBO e, além disso, não retira os nutrientes do mesmo, o que significa que o resíduo pode continuar sendo usado na fertirrigação com menores ou nenhum impacto na qualidade do recurso hídrico. Além disso, a co-produção de eletricidade evita emissões dos gases que provocam o efeito estufa (GHG), o que aumenta a eficiência energética do etanol da cana e pode substituir ou suplementar as necessidades da destilaria, além de ainda ser vendida à rede (UNEP, 2011).

A modelagem econômico-hidrológica integrada desenvolvida para o primeiro trecho do Pirapama identifica a alocação ótima de água entre os usuários bem como a disposição ótima de vinhoto (ótimo social) entre as áreas plantadas de cana de forma a maximizar uma função de benefício social líquido, sujeita às restrições de quantidade e qualidade de águas, agronômicas e institucionais, incorporando nestas últimas a preocupação com os possíveis danos ao bem público e simulando assim a internalização dos custos externos, eliminando as externalidades ambientais (MORAES et al, 2010).

A função de benefício social líquido utiliza a abordagem mencionada em (BOARDMAN et al, 2001) para estimar ganhos e perdas quando os impactos ambientais ocorrem. A mesma consiste em calcular os benefícios sociais líquidos como sendo excedentes dos produtores adicionados aos excedentes dos consumidores, subtraindo-se os prejuízos ambientais. Na medida em que o modelo, ao resolver o problema de otimização, garante o atendimento das restrições institucionais de quantidade e qualidade de água, ele simula a situação de prejuízos ambientais nulos.

O modelo foi atualizado e adaptado para que fossem simulados dois cenários. No primeiro, que corresponde ao modelo original, existem para os produtores de bioetanol duas alternativas de disposição da vinhaça, tratamento e/ou fertirrigação e, no segundo, é adicionada a alternativa de produção do biogás a partir deste efluente.

A diferença nos valores de benefício social líquido (máximo do problema de otimização), obtidos nos dois cenários, fornece uma medida do ganho social líquido da inclusão da alternativa de produção do biogás ou o valor econômico social desta opção. Além disso, podem ser calculadas as perdas de bem-estar social (*deadweight loss*) ou os custos sociais de mudanças no nível de qualidade ambiental em cada um dos cenários. Estes serão obtidos através da diferença entre os benefícios sociais líquidos máximos, obtidos tanto sob a ótica dos produtores e consumidores individualmente como da sociedade como um todo,

diante da mudança nas restrições, simulando a ocorrência de externalidades ambientais em ambos os cenários. Dessa forma, pode-se subsidiar decisões na esfera pública e privada que levem ao desenvolvimento sustentável na região.

1.1. Objetivo

O objetivo deste trabalho é obter uma plataforma - a partir de um modelo econômico-hidroológico integrado, já desenvolvido para o primeiro trecho da bacia do Pirapama - para mensurar o valor do ganho social líquido da adoção, pelas agroindústrias da região, de mais uma opção para uso econômico da vinhaça, além de permitir o cálculo dos custos sociais, que deverão ser internalizados pelos agentes no caso em que se requeira, de forma eficaz, o atendimento de todas as restrições, a partir de um nível ambiental de menor qualidade nos dois cenários analisados.

1.2. Estrutura da dissertação

Este primeiro capítulo contém a introdução, onde constam também o objetivo e a estrutura do trabalho. No segundo capítulo, encontra-se uma revisão da literatura, incluindo o referencial teórico associado a medidas de bem-estar social, os aspectos legais e institucionais associados a qualidade dos recursos hídricos no que se refere a fertirrigação no Brasil, os aspectos econômicos da qualidade das águas (bem público e externalidade), o problema da vinhaça e as formas de disposição da mesma utilizadas no Brasil.

O terceiro capítulo mostra o estudo de caso, com uma breve apresentação dos problemas de qualidade de águas do primeiro trecho da bacia do rio Pirapama, que são associados principalmente a fertirrigação. No quarto capítulo, é apresentada a metodologia para realização do trabalho com as opções de disposição analisadas neste estudo, além de uma descrição da modelagem econômico-hidrológica integrada com a idéia da sua aplicação neste trabalho. O capítulo abrange também a atualização e coleta dos dados, alterações nas equações do modelo original, e a construção dos cenários incluindo diferentes opções de formas de disposição da vinhaça utilizadas pelos agroindustriais.

O capítulo cinco apresenta os resultados obtidos com uma análise da introdução da opção do biogás tanto sob a ótica dos produtores do bioetanol como dos demais consumidores de água da bacia, de uma forma individual e agregada. As considerações finais do trabalho são discutidas no sexto e último capítulo.

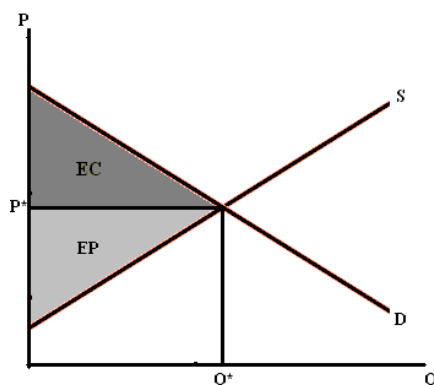
2. REVISÃO DA LITERATURA

2.1. Medidas de bem-estar social

Uma das grandes preocupações da ciência econômica é avaliar ganhos e perdas de bem-estar social decorrentes de alterações nos preços de mercado. Os dois conceitos mais utilizados para realizar esse tipo de avaliação são: excedente do consumidor (EC) e excedente do produto (EP), que devem ser mensurados antes e depois de qualquer mudança no mercado. O resultado dessa diferença mostra e quantifica o impacto causado pela alteração no mercado no bem-estar da sociedade (THOMAS; CALLAN, 2009).

O cálculo dos excedentes é feito através do modelo de oferta e demanda. Matematicamente, o EC é a área abaixo da curva de demanda e acima da linha de preço. O EP, por sua vez, é a área acima da curva de oferta e abaixo da linha de preço (ver Figura 1). Economicamente, esses conceitos dizem respeito ao benefício líquido dos compradores e vendedores no mercado. Ou seja, o EC é o benefício líquido que os demandantes obtêm resultante do produto da diferença entre o que eles estariam dispostos a pagar e o que efetivamente pagam pelo bem (preço de equilíbrio determinado pelas forças de mercado) com a quantidade consumida (THOMAS; CALLAN, 2009). E o EP é o benefício líquido adquirido pelos vendedores estimado pelo produto da diferença entre o preço que eles aceitariam vender o produto e o valor que de fato é recebido pelo bem com a quantidade vendida. A soma dos dois excedentes (EC+EP) representa o excedente social, que é máximo no equilíbrio de mercado.

Figura 1 – Representação dos excedentes do consumidor e do produtor.



Fonte: Elaboração própria.

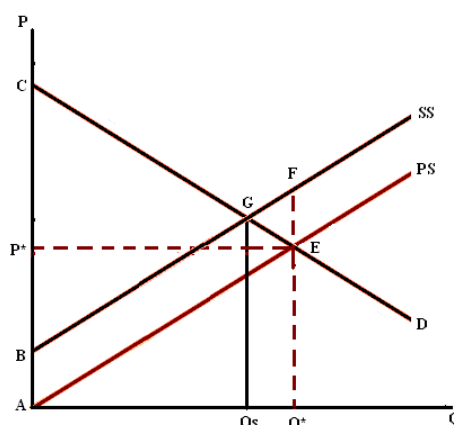
É importante destacar que este tipo de análise utiliza a estrutura de mercado competitivo como referência para avaliar o bem-estar da sociedade. Portanto, qualquer outra estrutura que não atinja o objetivo da eficiência alocativa, segundo a qual o valor adicional

que a sociedade atribui a uma unidade a mais do produto deve ser igual ao valor dos recursos empregados para produzi-lo (THOMAS; CALLAN, 2009), característica do mercado competitivo, gera perda de bem-estar social (*deadweight loss*). Estas perdas são mensuradas através da diferença entre o excedente social desta outra estrutura de mercado com o que se teria diante do mercado competitivo.

O fato de não se atingir a eficiência alocativa e a consequente perda de bem-estar do equilíbrio competitivo decorre de falhas de mercado. Esta perda pode ser calculada, usando como padrão o equilíbrio competitivo, através da queda nos excedentes do consumidor e do produto resultantes destas imperfeições. A Figura 2 ilustra a situação em que o mercado se depara com uma falha de mercado conhecida como externalidade negativa. Este tipo de externalidade é verificada quando efeitos externos ao mercado geram custos a terceiros, mas estes custos não são considerados no mercado (THOMAS; CALLAN, 2009). O equilíbrio competitivo, dessa forma, é atingido quando as curvas de oferta (PS) e demanda (D) se cruzam (ponto E). O excedente social é dado pela área ACE (soma das áreas AP*E e CP*E).

Com a presença da externalidade o mercado falha em maximizar o bem-estar social, pois o equilíbrio competitivo desconsidera os custos externos impostos pela mesma à sociedade. Devido a isso, o nível de produção é bastante elevado (THOMAS; CALLAN, 2009) comparado ao que se teria caso os custos externos fossem incorporados. Este fato pode ser percebido através da análise da figura abaixo.

Figura 2 – Máximo de bem-estar social diante de uma externalidade.



Fonte: Elaboração própria.

Ao incorporar os danos causados pelas externalidades tem-se a curva de custo marginal social (SS), que é resultante da soma dos custos externos com o custo marginal privado (curva de oferta). Percebe-se que há uma redução na quantidade transacionada quando SS cruza D (novo equilíbrio), ponto G. Os danos ambientais causados pela não

incorporação dos impactos da externalidade no mercado são dados pela área AEFB, assim, o excedente social líquido do equilíbrio competitivo (ponto E) é, na realidade, a diferença entre o excedente social, dado pela área ACE, e a área AEFB, que é igual a BCG – EFG. Observar que, caso os produtores internalizassem os seus custos externos, não haveriam prejuízos ambientais, o mercado competitivo levaria ao ponto G e o bem-estar social seria maior, dado por BCG. A diferença entre os valores de bem-estar social nesses dois pontos (E e G) é exatamente a perda de bem-estar social (*deadweight loss*), representada por EFG num mercado competitivo resultante da externalidade ambiental.

O modelo simula o mercado de águas que possui externalidades e, além disso, tem características de bem público em diferentes níveis, dependendo do uso, bem como no aspecto referente a sua qualidade (ver seção 2.3). Não há um preço de mercado para a água, o que se verifica é um valor de alocação, que determina um valor representado pelo custo de obtenção dessa água e, ademais, as alocações são tais que não resultam em prejuízos ambientais. Associado a esses valores de alocação, identificados pelo problema de otimização, calculam-se os excedentes dos produtores e consumidores, que são agregados, representando o benefício social. Esta situação representa o ótimo de um planejador social, que é um ótimo de Pareto (simula-se o ponto G).

Inicialmente, a partir desta plataforma, procura-se obter uma medida de benefício social da adoção de uma nova opção de disposição da vinhaça, através da comparação do benefício líquido social (excedente social) obtido com a modelagem nos dois cenários (sem e com a nova opção de tecnologia). Esta medida fornece a soma da variação dos excedentes dos consumidores e produtores entre os cenários considerados. O modelo permite a obtenção desse excedente tanto de forma individual, consumidor ou produtor, como agregada (excedente social).

Ademais, usando a mesma plataforma, pode-se obter uma estimativa dos custos sociais ou perdas de bem-estar social (*deadweight loss*) numa situação de alocação em que normas menos restritivas são impostas, simulando algum prejuízo ambiental. Comparando os valores do benefício social líquido das alocações (função objetivo), sem prejuízo e com prejuízo ambiental, em cada um dos cenários, estaria sendo simulada a diferença mencionada acima, entre BCG-EFG e BCG, que representa a perda de bem-estar social (*deadweight loss*) da externalidade ambiental (área EFG da Figura 2). As diferenças individuais, por produtor ou consumidor, podem ser vistas como variações nos excedentes.

2.2. Aspectos legais e institucionais associados a qualidade dos recursos hídricos no que se refere a fertirrigação no Brasil

Quando lançada *in natura* no solo, a vinhaça irriga e, ao mesmo tempo, fertiliza a lavoura, razão pela qual ela traz o duplo benefício da disposição da vinhaça e da economia de custos com insumos, ao reduzir as despesas com fertilizantes químicos (CORAZZA, 2006).

A prática da fertirrigação, no entanto, representa um perigo para a qualidade das águas superficiais quando os nutrientes e matéria orgânica atingem as mesmas por vias difusas ou acidentalmente através de vias diretas de instalações de armazenamento e transporte de vinhaça. Elevadas taxas de DBO levam ao esgotamento do oxigênio dissolvido (OD) na água e altas concentrações de nutrientes neste efluente provocam a proliferação de algas, promovendo a eutrofização das águas superficiais (GUNKEL et al, 2007). Assim, apesar de doses excessivas de vinhaça pouparem gastos importantes com transporte, geram alguns problemas, como: muita matéria orgânica com acidificação e desestruturação do solo, proliferação de microorganismos que competem com as plantas pelo nitrogênio mineral e outros nutrientes (PINTO, 1999).

No estado de Pernambuco existe uma legislação que proíbe o descarte de vinhoto em cursos d'água desde 1981. No entanto, a ausência de uma regulação eficaz, aliada a dificuldade de uma fiscalização característica de poluição difusa, que a vinhaça assume na fertirrigação, vem levando a problemas na qualidade das águas. De acordo com Gunkel et al. (2007), todos os rios na região costeira do estado de Pernambuco são influenciados pela cultura da cana, e os efeitos são frequentemente amplificados porque esses mesmos rios abastecem as cidades e, geralmente, são represados para o abastecimento humano e geração de energia elétrica. Devido a isso, a criação de novas legislações mais específicas deve ser exigida.

No estado de São Paulo, o maior produtor de etanol do Brasil, segundo Smeets et al. (2008), o impacto total da fertirrigação é desconhecido, pois o que existe são estudos pontuais. Alguns destes mostraram impactos significativos (OMETTO et al, 2000). Outros usaram técnicas para determinar a origem da matéria orgânica encontrada nos rios, cujas bacias são predominantemente cobertas por cana-de-açúcar e, em amostras, identificaram carbono proveniente da mesma (SIMPSON et al, 1999). Segundo alguns autores, os resultados sugerem um cenário provável em que a vinhaça lançada nos rios, prática proibida

pela legislação, como ocorre com a erosão do solo, é significativa na região, explicando o transporte de matéria orgânica na água (UNEP, 2011).

Muito recentemente, em São Paulo, uma nova legislação foi implementada relativa a fertirrigação (SMEETS et al, 2008). Trata-se da Norma Técnica 4.231 “Vinhaça - Critérios e Procedimentos para Aplicação no Solo Agrícola” de março de 2005, estabelecida pela Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (CETESB). Esta norma tem como objetivo dispor sobre os critérios e procedimentos para a aplicação da vinhaça, gerada pela atividade sucroalcooleira no processamento de cana de açúcar, no solo do Estado de São Paulo.

Segundo a Norma, antes da aplicação da vinhaça no solo, o empreendedor deve consultar a legislação federal e estadual, de acordo com o disposto nos itens 2.1 e 2.2, respectivamente. Essa norma também altera e acrescenta diversos pontos colocados pelas legislações anteriores e possui um conjunto de critérios e procedimentos para armazenamento, transporte e aplicação no solo. Assim, a área a ser fertirrigada deve atender as seguintes condições (CETESB, 2005):

5.1.1. Não estar contida no domínio das Áreas de Preservação Permanente – APP ou de reserva legal, definidas no Código Florestal - Lei Federal nº 4.771, de 15 de setembro de 1965, modificada pela Lei Federal nº 7.803, de julho de 1989, nem nos limites da zona de amortecimento definidos para as unidades de conservação de proteção integral.

5.1.2. No caso de a área estar localizada no domínio de Área de Proteção Ambiental - APA, a aplicação de vinhaça não poderá estar em desacordo com os seus regulamentos.

5.1.3. No caso de a área estar localizada no domínio de APA estadual não regulamentada, a aplicação de vinhaça deverá ser aprovada pelo seu órgão gestor.

5.1.4. Não estar contida no domínio de área de proteção de poços.

5.1.5. Estar afastada, no mínimo, 15 (quinze) metros da área de domínio das ferrovias e rodovias federais ou estaduais.

5.1.6. Estar afastada, no mínimo, 1.000 (um mil) metros dos núcleos populacionais compreendidos na área do perímetro urbano. Essa distância de afastamento poderá, a critério da CETESB, ser ampliada quando as condições ambientais, incluindo as climáticas, exigirem tal ampliação.

5.1.7. Estar afastada, no mínimo, 50 (cinquenta) metros das Áreas de Proteção Permanente - APP, e com proteção por terraços de segurança.

5.1.8. A profundidade do nível d'água do aquífero livre, no momento de aplicação de vinhaça deve ser, no mínimo, de 1,50m (um metro e cinquenta centímetros) conforme a Norma NBR 7229 - Projeto, Construção e Operação de Sistemas de Tanques Sépticos, da ABNT- Associação Brasileira de Normas Técnicas.

5.1.9. No caso de áreas com declividade superior a 15%, deverão ser adotadas medidas de segurança adequadas à preservação de erosão.

5.1.10. Nas áreas com declividade superior a 15%, além das práticas conservacionistas, deverá ser efetuada a escarificação do solo. Se, após a escarificação, a dosagem de aplicação de vinhaça for superior à capacidade de infiltração do solo, a aplicação deverá ser parcelada.

No que concerne ao plano de aplicação no uso da vinhaça, a Norma define que o mesmo será constituído com base numa planta de escala 1:20.000, ou superior, contendo as taxas indicativas de dosagem a serem aplicadas, em m³/ha, diferenciadas em cores, com intervalos de aplicação a cada 150 m³. Em tal planta deverá constar, entre outros atributos, a localização dos tanques de armazenamento e dos canais mestres ou primários de uso permanente de distribuição; a localização dos cursos d'água; poços utilizados para abastecimento; dados de geologia e hidrogeologia local; resultados analíticos dos solos; as áreas de interesse ambiental; e forma e dosagem de aplicação de vinhaça, conforme disposto no item 6 da Norma.

Nota-se que tal plano de aplicação ou manejo é bem abrangente e inclui diversos critérios que até então não eram considerados pelos produtores de cana-de-açúcar. Uma das maiores inovações dessa Norma trata-se do uso da equação citada no item 6.1.3, a qual permite determinar a dosagem da vinhaça a ser aplicada no solo:

$$V = [((pc)*CTC - ks)*(raf) + (ec)] / kvi \quad (1)$$

onde:

V = quantidade de vinhaça em m³/ha;

pc = percentual da CTC;

CTC = Capacidade de Troca Catiônica, expressa em cmolc/dm³ a pH 7,0, dada pela análise de fertilidade do solo realizada por laboratório de análise de solo e utilizando metodologia do Instituto Agronômico de Campinas de Análise de Solo, devidamente assinado por responsável técnico;

ks = concentração de potássio no solo, em cmolc/dm³, à profundidade de 0,80 metros, dada pela análise de fertilidade do solo realizada por laboratório de análise de solo utilizando metodologia de Análise de Solo do Instituto Agronômico de Campinas, devidamente assinado por responsável técnico;

raf = constante que serve para transformar os resultados da análise de fertilidade, expressos em cmolc/dm³ ou meq/100cm³, para kg de potássio em volume de hectare por 0,80 metros de profundidade;

ec = constante que representa a quantidade (kg) de K₂O extraído pela cultura por hectare, por corte;

kvi = concentração de potássio na vinhaça, expressa em kg de K₂O/m³, apresentada em boletim de resultado analítico, assinado por responsável técnico.

Tabela 1 – Parâmetros da Equação 1.

	Valor
pc	0,05
raf	3744
ec	185

Fonte: Elaboração própria.

Assim, a dosagem para a aplicação do efluente para enriquecimento do solo agrícola passa a ser calculada levando-se em consideração a profundidade e a fertilidade do solo, a concentração de potássio na vinhaça e a extração média desse elemento pela cultura, conforme item 5.8 da Norma. Por fim, o último item desta Norma (item 7) estabelece a caracterização do solo que será fertirrigado, onde se define a quantidade e como as amostras deverão ser coletadas (item 7.1.1), além de apresentar os parâmetros a serem avaliados, como o potássio e a CTC (item 7.1.2).

Destaca-se que, no modelo utilizado, devido a prática da fertirrigação, simula-se uma situação em que não há vazamentos na aplicação de vinhaça (nos tanques e canais de distribuição) e a aplicação é feita em taxas apropriadas. Por isso, é utilizada no modelo a estimativa da contaminação verificada em estudos com usinas do Estado de São Paulo (BNDES; CGEE, 2008), que considera a vazão natural associada as áreas que recebem efluente com uma carga orgânica de 1% da vinhaça *in natura*.

2.3. Aspectos econômicos da qualidade das águas (bem público e externalidade)

De acordo com Von Sperling (2005), a qualidade da água é definida pela capacidade da mesma de incorporar diversas impurezas a si, devido a sua característica de solvente e capacidade de transportar partículas. Os fenômenos naturais e a atuação do homem impactam na qualidade da água, sendo esta, portanto, função das causas naturais e do uso e ocupação do solo na bacia hidrográfica.

As causas naturais afetam a qualidade do recurso hídrico através do escoamento superficial e pela infiltração no solo resultante das chuvas, o que mostra que mesmo nos casos em que a bacia hidrográfica se encontra intacta com relação as suas condições naturais, a qualidade do recurso pode ser prejudicada. Com relação a ação do homem, esta contribui de diversas formas para a introdução de compostos na água, entre elas, o despejo de efluentes domésticos e industriais e aplicação de defensivos agrícolas (VON SPERLING, 2005).

Assim, o controle da qualidade da água deve fazer parte de um planejamento conjunto, no âmbito de toda a bacia hidrográfica, e não de uma decisão individual.

A qualidade da água, assim como a qualidade ambiental, é considerada um bem público, pois apresenta características peculiares a este tipo de bem, como a não-excludência e não-rivalidade. Ou seja, um indivíduo ao consumir um bem público não impede que os demais agentes econômicos também o façam. Além disso, o bem em questão pode ser utilizado por várias pessoas ao mesmo tempo (THOMAS; CALLAN, 2009). Se o mercado for definido como sendo a qualidade, é o fato da mesma ser um bem público que se constitui na fonte de falha, ou seja, uma das condições que impedem que as forças de mercado livremente levem a um resultado alocativamente eficiente, conforme o conceito dado na seção 2.1.

Assim, as características do bem público, mencionadas acima, impedem a eficiência alocativa devido a não existência de uma demanda de mercado bem definida, resultante da dificuldade de se obter a disposição a pagar (DAP) dos consumidores por este bem, o que gera resultados ineficientes. Este problema, mais conhecido como não-revelação das preferências, surge da falta de incentivo, por parte do indivíduo, em atribuir valor a um bem que possui gratuitamente e, diante da percepção de que os benefícios provenientes deste bem são acessíveis, mesmo que um outro indivíduo pague por ele, ou seja, o consumidor passa a ser um free-rider (carona). O consumidor assim não revelaria suas preferências por este tipo de bem, o que faz com que a demanda de mercado permaneça indefinida (THOMAS; CALLAN, 2009).

A qualidade das águas também pode ser caracterizada como uma externalidade ambiental, na medida em que se define o mercado como um bem qualquer que ao ser produzido leva a impactos na mesma. As externalidades são, portanto, efeitos externos ao mercado, relacionados a produção ou consumo, que podem causar benéficos (externalidade positiva) ou custos (externalidade negativa) a terceiros.

No presente estudo, o mercado de etanol usa a água (quantidade de água) como insumo de produção e provoca impactos na qualidade da mesma como uma externalidade, já que estes custos da contaminação das águas não são considerados neste mercado. Sendo assim, o impacto ambiental não é capturado pelo preço do bem que está sendo negociado. Consequentemente, o preço não irá refletir todos os custos e benefícios decorrentes da produção e consumo desse bem, impedindo seu funcionamento como mecanismo de sinalização e, devido a isso, o mercado irá falhar (THOMAS; CALLAN, 2009).

As externalidades que afetam bens não-rivais e não-excludentes como a água, terra ou ar, são conhecidas como externalidades ambientais. Se, no entanto, uma externalidade ambiental impactar um amplo segmento da sociedade com efeitos característicos de bens públicos, ela própria será definida como um bem público. Sendo assim, apesar de apresentarem diferentes definições, bem público e externalidade estão intimamente relacionados (THOMAS; CALLAN, 2009). Por isso, alguns autores enquadram a “qualidade da água” como um bem definido por estes dois conceitos (RAMOS, 1996).

Políticas para eliminarem as falhas do mercado de qualidade de águas estão sendo utilizadas e incluem instrumentos econômicos utilizando abordagens de comando e controle, bem como abordagem de mercado, tais como: normas; tratamento dos resíduos através da iniciativa privada; taxas sobre emissão; subsídios; certificados de poluição negociáveis; e persuasão moral⁴.

É muito importante que, na decisão do instrumento econômico a se utilizar para a correção do mercado, sejam consideradas medidas de benefícios e custos sociais associados a diversas políticas. Assim, o presente trabalho, na medida em que apresenta uma plataforma para obter medidas de bem-estar social vinculadas a diferentes tecnologias utilizadas pelos agroindustriais para o uso econômico da vinhaça, pode auxiliar na comparação de políticas e estratégias voltadas a reduzir a poluição dos rios influenciados pela produção de etanol.

2.4. A vinhaça e suas formas de disposição utilizadas pelo setor sucro-alcooleiro no Brasil

Os líquidos que são passíveis de sofrer uma fermentação são conhecidos como mostos. Após fermentado, o mosto de cana passa a ser chamado de vinho, ou como é mais comumente conhecido, vinhoto, o qual pode ser destilado possibilitando a recuperação de álcool. Como resultado desse processo surge a vinhaça.

Dentre os resíduos da fabricação do álcool, a vinhaça é considerada o mais importante, não só no que diz respeito ao volume gerado, mas também ao seu enorme potencial poluidor (PINTO, 1999). Durante décadas, mesmo quando o volume gerado desse efluente não era tão grande, a vinhaça já provocava nos órgãos de controle ambiental e na comunidade científica alguma preocupação no que se refere a seus impactos sobre a qualidade dos recursos naturais, uma vez que era lançada nos corpos d'água, o que gerava um grande prejuízo ambiental, pois

⁴ Para maiores detalhes ver Ramos (1996).

a vinhaça é rica em Demanda Química e Bioquímica de Oxigênio (DQO e DBO), componentes esses que levam a queda dos níveis de oxigênio na água, eliminando a fauna e a flora das mesmas.

De acordo com Pinto (1999), a composição da vinhaça depende de uma série de fatores, os quais estão listados abaixo:

- natureza e composição da matéria-prima, ou seja, se o mosto é proveniente de melaço obtido da fabricação de açúcar, se este é diluído em água ou caldo das últimas moendas, ou ainda se o mosto é proveniente de caldo puro;
- natureza e composição dos vinhos;
- sistema de fermentação;
- aditivos utilizados na fermentação, produtos químicos, ácidos, antibióticos e nutrientes à base de nitrogênio e fósforo;
- tipos de aparelhos utilizados na destilação;
- raça de levedura utilizada;
- qualidade da água usada;
- sistema de trabalho e influência dos operadores.

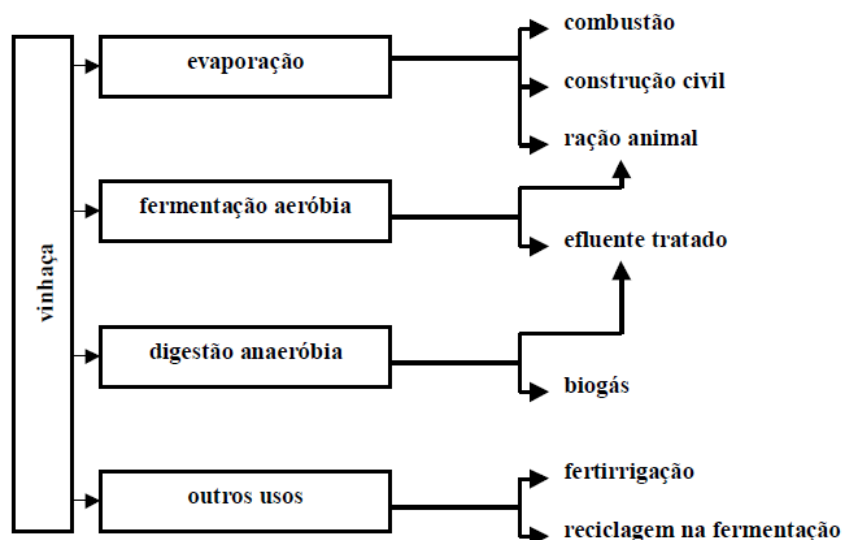
Dessa forma, o autor conclui que a composição química da vinhaça pode variar de acordo com o processo de fabricação do álcool. O que é consenso, de acordo com pesquisas desenvolvidas, é que a vinhaça pode ser caracterizada como um resíduo rico em matéria orgânica e potássio, relativamente pobre em nitrogênio e com carência de fósforo.

Com a instituição do Programa Nacional do Álcool (ProÁlcool), houve um forte crescimento da indústria canavieira no país⁵ - uma vez que a cana-de-açúcar é a principal matéria-prima do álcool -, o que resultou numa elevada produção da vinhaça. Estimativas mostram que para cada litro de álcool produzido são gerados em torno de 10 a 15 litros desse resíduo. Além disso, houve também a proibição legal do despejo desse efluente nos cursos d'água, o que fez com que novas alternativas para reaproveitamento/tratamento da vinhaça passassem a ser discutidas e avaliadas.

As principais alternativas tecnológicas para o destino da vinhaça são: aerobiose, reciclagem na fermentação, fertirrigação, combustão, produção de levedura, uso na construção civil e na fabricação de ração animal, assim como a digestão anaeróbia. Segundo Corazza e Salles-Filho (2000), as três primeiras opções já eram bastante desenvolvidas e difundidas na década de 1980, o que não era o caso das demais, pois se encontravam em desenvolvimento, e com diferentes níveis de amadurecimento.

⁵ O Estado de São Paulo, em particular, já ocupava o lugar de maior produtor nacional de cana-de-açúcar antes mesmo da institucionalização do ProÁlcool em 1975 (CORAZZA; SALLES-FILHO, 2000).

Figura 3 – Grupos de opções tecnológicas para destinação da vinhaça.



Fonte: Corazza (2006).

A indústria da cana responsável pela produção do etanol, no Brasil, influi de forma marcante o cenário energético, econômico e social do país, tornando-o o maior produtor de cana-de-açúcar do mundo, com aproximadamente 602 milhões de toneladas na safra 2009/2010 e 25,7 bilhões de litros de álcool (7 bilhões de litros de anidro e 18,7 de hidratado)⁶. Como para cada litro de álcool estima-se que sejam produzidos cerca de 15 litros de vinhaça, foram gerados nessa safra em torno de 385,5 bilhões de litros desse efluente.

Verificou-se que a vinhaça apresenta grande concentração de nutrientes, tais como potássio, matéria orgânica e nitrogênio, o que estimulou o aproveitamento desse resíduo nas lavouras de cana⁷ com o intuito de elevar a produtividade dos canaviais, e assim, gerar benefícios tanto econômicos, uma vez que a aplicação da vinhaça *in natura* tem baixo custo de manutenção e não envolve o uso de tecnologia complexa, quanto ambientais, já que esse resíduo não mais estaria sendo lançado nos corpos d'água.

No entanto, a utilização desse resíduo nas plantações de cana deve ser feita com cautela, devido, dentre outras coisas, ao pH muito ácido da vinhaça e ao fato de que nitrogênio na forma de nitrato pode, se não forem tomados os devidos cuidados, infiltrar e atingir camadas mais profundas do solo e o lençol freático, representando um risco para a saúde humana, principalmente nos casos em que uma única área, conhecida como área de sacrifício, recebe grandes concentrações do efluente.

⁶ Ver <http://www.mdic.gov.br/sitio/interna/interna.php?area=2&menu=999>.

⁷ Prática conhecida como fertilirrigação, que consiste na aplicação do vinhoto nas lavouras de cana-de-açúcar com o objetivo de fertilização.

Além disso, dependendo do manejo, pode haver escoamento superficial, assim como vazamentos que acabam por contaminar os mananciais de superfícies. De acordo com Moreira (2007 *apud* BNDES; CGEE, 2008), um estudo feito pela CETESB em 16 bacias hidrográficas do Estado de São Paulo, onde existe produção de bioetanol, estimou um abatimento de 99% do potencial poluidor, avaliado pela carga orgânica do vinhoto, o que significa uma contaminação das águas superficiais de 1%.

Assim, o lançamento da vinhaça nos solos tem efeitos benéficos, pois aumenta a disponibilidade de alguns nutrientes, eleva o pH do solo, melhora a estrutura dos mesmos, aumenta a retenção de água, etc. No entanto, se usada em excesso e de forma inadequada, a vinhaça pode trazer efeitos prejudiciais aos solos (características físicas e químicas), plantas e águas, tanto superficiais quanto subterrâneas. O problema ambiental ocasionado pela geração de grandes volumes da vinhaça, tem uma dimensão considerável, apresenta controvérsias a respeito da prática da fertirrigação, alternativa (de curto prazo) para disposição final desse efluente que acabou prevalecendo dentre as demais, baixo dinamismo tecnológico do setor, além da evolução de um controle legal desse problema.

Existem outras alternativas (menos utilizadas), além do uso da vinhaça como fertilizante, para o aproveitamento/tratamento desse efluente, tais como: aerobiose, reciclagem na fermentação, combustão, produção de levedura, construção civil, ração animal, digestão anaeróbia, incineração, e, mais recentemente, concentração de vinhaça através de equipamento desenvolvido pela Citrotec, Evaporador de Concentração de Vinhaça (Ecovin), que pode reduzir em até 10 vezes o volume de vinhaça gerado (JORNALCANA, 2008).

Apesar das várias iniciativas de pesquisa e desenvolvimento de alternativas para solucionar o problema da disposição da vinhaça, a que mais tem se destacado atualmente é a biodigestão anaeróbia. Essa alternativa, ainda pouco utilizada, uma vez que o interesse em usar o biogás⁸ para geração de energia elétrica só surgiu recentemente, consiste na redução da carga de DBO desse efluente através do tratamento em reatores anaeróbios. Tem como vantagens: baixo consumo de energia, pequena produção de lodo, eficiência na diminuição da carga orgânica, a produção de etanol pode ser capturada e convertida em energia, além de que, a vinhaça tratada nesse sistema apresenta reduzido potencial poluidor quando reutilizada no processo de fertirrigação (FREIRE; CORTEZ, 2000).

⁸ Composição de gases, principalmente metano e gás carbônico. Pode ser empregado nas aplicações termodinâmicas: geração de frio, calor e potência, e diretamente em equipamentos estacionários como fogões, lâmpadas, conjuntos moto-bomba e conjuntos geradores, entre outros (PINTO, 1999).

3. ESTUDO DE CASO: BACIA DO RIO PIRAPAMA

O Rio Pirapama nasce no município de Pombos (Agreste Pernambucano), a cerca de 450 m de altitude, e percorre aproximadamente 80 km até a sua foz. Localizada na porção centro-sul da Zona da Mata Pernambucana, a bacia do rio Pirapama ocupa uma área de cerca de 600 km², abrangendo parte dos municípios de Jaboatão dos Guararapes, Cabo de Santo Agostinho, Ipojuca, Moreno, Escada, Vitória de Santo Antão e Pombos, os quatro primeiros situados na Região Metropolitana do Recife.

É formada por vários afluentes, dos quais se destacam o rio Gurjaú e os riachos dos Macacos, Cajabuçu e Arandu, na margem esquerda, e os riachos Santa Amélia, Utinga de Cima e Camaçari, na margem direita. No final de 2001, essa bacia foi contemplada com um reservatório de mesmo nome, com capacidade de 61 milhões de metros cúbicos com o objetivo de complementar o abastecimento de água da RMR (SILVA; RIBEIRO, 2006). Atualmente a barragem de Gurjaú, primeira adutora para o Recife, contribui para o abastecimento público da RMR com uma vazão de 1,0 m³/s, enquanto que o Sistema Pirapama, depois de construído, irá contribuir com uma vazão máxima de 5,13 m³/s (DFID; CPRH, 1999).

O referido sistema abrange os municípios do Cabo de Santo Agostinho, Jaboatão dos Guararapes e Recife. A obra envolve a construção de uma captação na Barragem de Pirapama, uma estação elevatória de água bruta, uma adutora de água bruta de 3,5 km, uma Estação de Tratamento de Água (ETA), uma adutora de água tratada com 19 km de extensão, três subadutoras (Cabo, Ponte dos Carvalhos e Jordão) e a construção de três reservatórios (Cabo, Ponte dos Carvalhos e Jordão), com capacidade total de acumulação de 120.500 m³ de água. Além disso, serão executadas obras e serviços de ampliação dos grandes anéis de distribuição⁹ das cidades do Recife e Jaboatão dos Guararapes. No total serão implantados 42 km de rede de distribuição¹⁰.

O Sistema Pirapama é uma obra de responsabilidade do governo do estado e que recebeu recursos do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC). No total, serão cerca de R\$ 500 milhões investidos para que 3,5 milhões de pernambucanos deixem de sofrer com a falta de água. A conclusão desse empreendimento estava prevista para dezembro de 2010. No entanto, esse sistema está sendo construído em etapas, e apenas 2 foram concluídas neste

⁹ Tubulações principais que levam água para as secundárias de menor diâmetro.

¹⁰ Ver <http://tribunapopular.wordpress.com/2007/09/20/convenio-libera-r-284-milhoes-para-o-sistema-pirapama/>.

prazo. A terceira etapa de conclusão do Sistema Pirapama deverá ocorrer ainda no primeiro semestre de 2011¹¹.

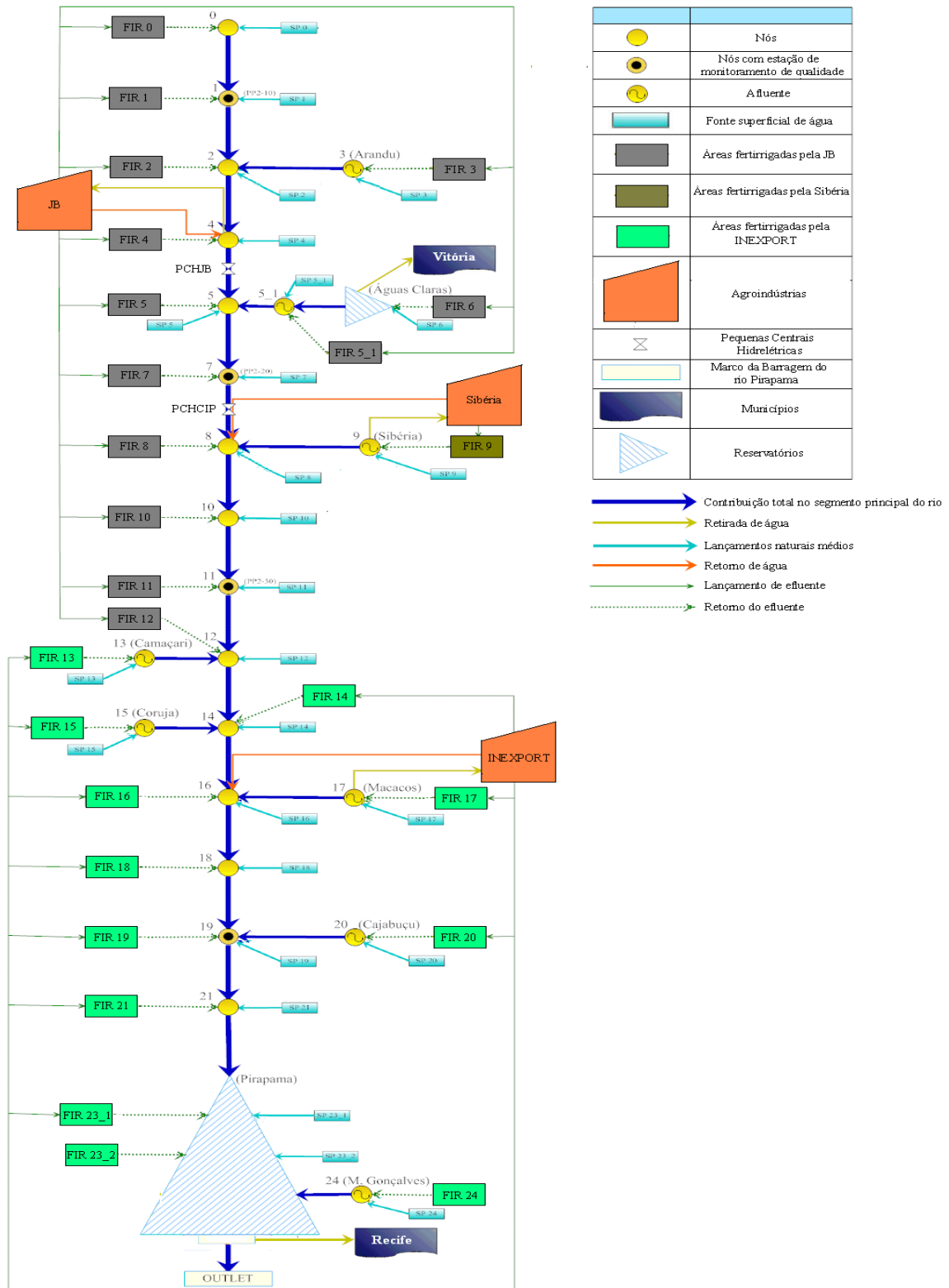
Após concluído, o Sistema Pirapama deve acabar com o racionamento a que vem sendo submetida a RMR há alguns anos, o que compromete a regularidade do atendimento à população, principalmente em épocas de prolongada estiagem (MORAES; CIRILO; SAMPAIO, 2006). Ao mesmo tempo, no entanto, o represamento do rio através da barragem do reservatório deve piorar o problema de qualidade do mesmo, que apresenta há algum tempo altos índices de poluentes (RIBEIRO, 2000), especialmente relacionados a nutrientes e cargas orgânicas, e que podem levar a eutrofização do reservatório.

O modelo econômico-hidrológico integrado foi aplicado no primeiro trecho da bacia, que vai da nascente até o reservatório Pirapama. Este trecho é importante pois é onde a maioria das agroindústrias da bacia se localiza (JB, Sibéria e INEXPORT), e a contaminação importante provém do vinhoto utilizado nas lavouras de cana. Além disso, a poluição proveniente destas indústrias deve ser aportada ao reservatório Pirapama, recentemente construído, o que pode comprometer os altos recursos nele investidos.

A Figura 4 abaixo apresenta a rede de nós e links, representativa da configuração atual dos usuários da bacia do Pirapama ao longo do rio no trecho modelado. Pode-se identificar, através dessa figura, as áreas (FIR) fertirrigadas por cada agroindústria. No caso da JB, fertirriga-se: FIR0 a FIR8, FIR5_1 e FIR10 a FIR12. Destas, não incorrem em custos de transporte: FIR3 a FIR7 e FIR5_1. A Sibéria aloca o efluente para aplicação no solo de uma única área, FIR9, que fica próxima a referida agroindústria e, portanto, não há gastos com transporte da vinhaça. Com relação a INEXPORT, fertirriga-se as seguintes áreas: FIR13 a FIR21, FIR23_1, FIR23_2 e FIR24, das quais apenas FIR17, FIR18 e FIR19 estão localizadas próximas desta unidade industrial e, portanto, o agroindustrial não arca com o ônus do transporte do efluente para as mesmas.

¹¹ Ver <http://www.diariodepernambuco.com.br/vidaurbana/nota.asp?materia=20110110094751>.

Figura 4 – Rede de nós e links representativa da bacia do Pirapama.



Fonte: Adaptado de Moraes et al. (2008).

4. METODOLOGIA

O modelo econômico-hidrológico integrado original será atualizado com valores econômicos do ano de 2010 (modelo original ou atualizado – Cenário 1) e adaptado (novas equações – Cenário 2). Este último representa a situação em que as agroindústrias do trecho modelado dispõem de mais uma alternativa de aproveitamento da vinhaça, além da fertirrigação e tratamento do efluente, que é a produção de biogás a partir da vinhaça.

Para a adaptação serão introduzidos, nas equações originais de benefício líquido dos agroindustriais, os custos operacionais desta opção de disposição da vinhaça e os benefícios associados a mesma. Os custos de investimento desta alternativa não serão incluídos no modelo, já que os valores de benefícios e custos obtidos são anuais, representando um ano qualquer. Espera-se que estes custos sejam recuperados em alguns anos e, portanto, ao invés de incluí-lo neste ano médio, será calculado o tempo de retorno do investimento em função dos benefícios sociais líquidos obtidos para esta opção.

4.1. As formas de disposição da vinhaça utilizadas neste estudo

4.1.1. Fertirrigação

Dentre as várias alternativas apresentadas para o uso da vinhaça, a que mais se mostrou econômica e eficiente do ponto de vista agrícola, e que, portanto, passou a ser difundida e adotada pela maioria das usinas, foi o uso na fertirrigação dos canaviais (UNESP, 2007). Essa prática consiste na infiltração da vinhaça *in natura* (não tratada) no solo, com objetivo de fertilizá-lo e, ao mesmo tempo, irrigar a cultura da cana-de-açúcar. Ou seja, a aplicação de vinhaça no solo é um procedimento que substitui o uso da fertilização química, constituindo uma fonte de nutrientes minerais, principalmente de potássio (CORAZZA; SALLES-FILHO, 2000). Além disso, a fertirrigação é uma prática de baixo custo, que não exige tecnologia complexa, o que reduz os gastos financeiros.

No entanto, é importante conhecer as relações do resíduo com o solo e com o clima para que doses maiores do que o suportável não sejam aplicadas. Ou seja, deve-se ter cuidado para que os baixos custos dessa prática não incentivem a alocação de doses excessivas em uma mesma área pois, apesar dos efeitos tóxicos da aplicação no campo serem minimizados através da distribuição da vinhaça sobre uma grande área, significa mais gasto no sistema de distribuição (WILLINGTON; MARTEN, 1982).

A aplicação de vinhaça no solo é possível e desejável, desde que a quantidade de efluente lançado não ultrapasse a capacidade do solo de reter íons, ou seja, ao fertirrigar determinada área deve-se levar em consideração as características do solo da região para que o mesmo não seja prejudicado nem a curto nem a longo prazo.

Sendo assim, o uso racional da vinhaça não provoca saturação de potássio ou qualquer outro tipo de dano para o solo. Além disso, gera benefícios ambientais, financeiros e agronômicos, melhora o condicionamento da subsuperfície do solo e proporciona ganhos de pelo menos cinco toneladas de cana por hectare comparado ao potássio proveniente de adubo químico, de acordo com o consultor Sérgio Antonio Veronez, que destaca também que a fertirrigação é benéfica para a longevidade do canavial, podendo chegar até a oito cortes (JORNALCANA, 2008).

Dessa forma, apesar das vantagens discutidas anteriormente, a fertirrigação é uma solução que pode não se sustentar no longo prazo (PINTO, 1999), caso não sejam tomados os devidos cuidados com a quantidade de vinhaça aplicada. Assim, é necessário que mais estudos sejam desenvolvidos no sentido de buscar alternativas de tratamento para a vinhaça que reduzam seu potencial poluidor sem perder suas características de fertilizante, possibilitando a prática da fertirrigação com esse resíduo tratado.

4.1.2. Biodigestão Anaeróbia da Vinhaça e o Biogás

O processo de biodigestão anaeróbia da vinhaça é uma resposta recente às alternativas de aproveitamento desse efluente, que permite a estabilização da matéria orgânica com desassimilação de uma mistura gasosa, cujos principais componentes são o metano e o dióxido de carbono. Esta mistura é conhecida como biogás e pode ser utilizada como combustível devido às elevadas concentrações de metano, geralmente na faixa de 55% a 70% (PINTO, 1999).

Um ponto importante nesse processo, é a retenção da biomassa bacteriana, pois a taxa de crescimento do substrato de bactérias é relativamente baixa, havendo, portanto, necessidade de sua concentração no interior do reator. Assim, o efluente líquido final do processo de biodigestão anaeróbia integra a parcela da matéria orgânica não convertida em forma solúvel e estável, ou seja, pode ser aplicado no solo sem provocar maiores danos ao mesmo, já que, apesar de uma redução substancial na carga poluidora, permanece com seu potencial como fertilizante.

Tabela 2 – Comparação entre vinhaça *in natura* e tratada.

	Vinhaça <i>in natura</i>	Vinhaça biodigerida
pH	4	6,9
DQO (g/l)	29	9
N total (mg/l)	550	600
N Amon. (mg/l)	40	220
P total (mg/l)	17	32
Sulfato (mg/l)	450	32
Potássio (mg/l)	1400	1400

Fonte: <http://www.bancor.com.br/vinha%E7a.htm>

Como vantagens, o processo de biodigestão anaeróbia da vinhaça apresenta: baixo consumo de energia, pequena produção de lodo (descarte), eficiência na diminuição da carga orgânica - dado o tempo adequado no biodigestor, até 95% da DBO pode ser removida, produzindo um gás capaz de suprir todas as necessidades de uma destilaria (WILLINGTON; MARTEN, 1982) -, reduzido potencial poluidor, e o biogás produzido poderá ser empregado no processo de produção de energia elétrica (FREIRE; CORTEZ, 2000). Além disso, diferentemente da vinhaça *in natura*, o produto digerido pode ser pulverizado sobre as plantações de cana sem o perigo de "queimar" as folhas. A grande desvantagem dessa tecnologia é o alto custo de investimento no biodigestor.

De acordo com Haandel (2005), a digestão anaeróbia pode ser aplicada a vinhaça para produzir biogás suficiente para 0,5 MWh/m³ de álcool. Além disso, o uso racional dos subprodutos da produção de álcool (bagaço e vinhaça) tem potencial para reduzir as emissões de CO₂ para a atmosfera de 0,8-1,2 t/m³ de álcool em relação à geração utilizando gás natural. Assim, o uso racional dos subprodutos não só irá aumentar a produção de energia útil e a rentabilidade das destilarias, mas, ao mesmo tempo, diminuir o impacto ambiental na agricultura e atividades industriais relacionadas com a produção de álcool.

A digestão pode ser realizada em diferentes tipos de reatores, também conhecidos por digestores ou biodigestores. Vários são os modelos existentes, alguns possuem importantes detalhes construtivos, que dependem do tipo de aplicação a que são destinados e, também, da tecnologia disponível (PINTO, 1999). Eles devem ser concebidos com o objetivo de proporcionar vantagens como saneamento, demanda energética e utilização do material biodegradado como fertilizante. No entanto, deve-se ter em mente a dificuldade de alcançar esses três objetivos de forma integrada e otimizada.

De acordo com Granato (2003), um dos mais importantes acontecimentos na área de tratamento do efluente, verificado recentemente, foi o desenvolvimento do reator de fluxo

ascendente com manta de lodo (UASB = Upflow Anaerobic Sludge Blanket), o qual permite, através da retenção dos microorganismos em suspensão, a manipulação independente dos tempos de retenção celular e hidráulica, possibilitando sua operação com tempo de retenção hidráulica de poucas horas, o que gera menores volumes e custos na aplicação. Segundo Pinto (1999), a vinhaça é um resíduo apropriado para o tratamento anaeróbio de fluxo ascendente, pois apresenta baixo teor de sólidos totais (alta diluição) e alto potencial poluente.

O biodigestor UASB é, hoje, o mais estudado e aplicado em todo o mundo, e segundo Lamo (1991), são dimensionados levando-se em conta:

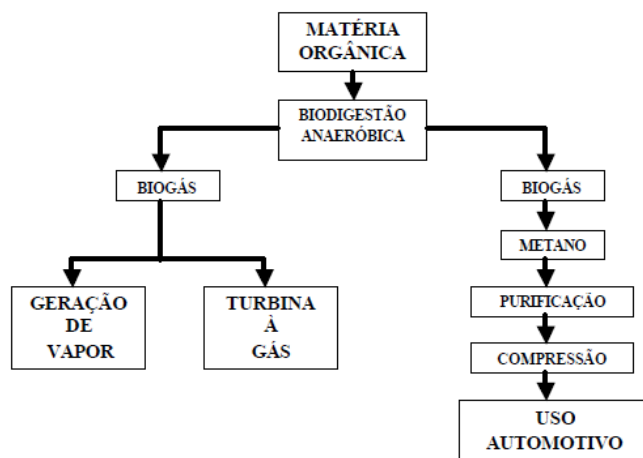
- Produção máxima diária de álcool da destilaria em estudo;
- Volume de vinhaça a ser gerado em consequência dessa produção;
- DQO do efluente, dado devido a sua origem do processo de fabricação;
- Carga orgânica a ser removida por dia.

A partir dessas informações determina-se o volume do reator (diâmetro e altura), possibilitando o fornecimento da produção de biogás para o sistema.

O biogás é, portanto, o gás obtido em biodigestores anaeróbios, que resulta da conversão da biomassa em energia secundária através do processo de biodigestão anaeróbia de resíduos agroindustriais (como a vinhaça) e domésticos. É composto basicamente por CH_4 , CO_2 , O_2 , N_2 , H_2O e H_2S , estando seu poder calorífico diretamente relacionado com a quantidade de metano existente na mistura gasosa. Assim, o grau de pureza do biogás está associado a uma maior ou menor presença de CH_4 nesta mistura. (GRANATO, 2003).

Além da proposta de se criar uma fonte de energia alternativa, a queima do biogás, segundo Granato (2003), é muito mais vantajosa em relação a queima dos combustíveis fósseis, uma vez que a taxa de CO_2 na atmosfera não aumenta, como no segundo caso, pois a produção de CO_2 é equilibrada com o consumo do mesmo na fotossíntese da cana-de-açúcar. Trata-se, portanto, de uma opção viável economicamente e com grandes benefícios ao meio ambiente.

Figura 5 – Etapas da produção e utilização do biogás.



Fonte: Lamo (1991).

O biogás pode ser utilizado para gerar energia elétrica e térmica, e também substituindo o gás natural como combustível para veículos automotores. Seu processo de formação é muito mais rápido comparado ao gás natural. Enquanto este último pode levar milhões de anos para se formar, o biogás é produzido em biodigestores em prazos que variam de 15 a 30 dias, em média, dependendo do tipo de bactéria utilizada no processo.

Atualmente, biodigestores cada vez mais modernos e eficientes estão sendo construídos para alavancar a produção mundial de biogás. Estados Unidos, Alemanha, Japão e Suécia estão investindo nessa nova tecnologia para produção deste biocombustível. Porém, é a Dinamarca que ocupa o posto de líder mundial de produção de biogás¹². No Brasil, há vários projetos em andamento para o aumento na produção de biogás, entre eles, a construção de biodigestores mais simples, para serem usados em cidades que poderão usar o potencial energético dos crescentes aterros sanitários.

4.2. Procedimento para obtenção da quantidade de energia elétrica gerada através do biogás

O método utilizado para cálculo da quantidade de energia elétrica produzida a partir do biogás, que será incluído no modelo, irá seguir a mesma metodologia adotada por Granato (2003), o qual segue o procedimento sugerido por Lamo (1991) para um biodigestor do tipo UASB. No entanto, os valores dos parâmetros adotados por Granato (2003) serão substituídos

¹² Consultar <http://www.harbra.com.br/loja/vernews.php?id=56>.

pelos obtidos com o Grupo JB, que pretende adotar o mesmo tipo de biodigestor (UASB), para que os resultados sejam mais condizentes com o cenário da região estudada. Assim,

$$CO = VVG \times DQO \quad (2)$$

onde:

VVG = volume de vinhaça gerada em m³/dia;

CO = carga orgânica (kg.DQO/dia);

DQO = Demanda Bioquímica de Oxigênio em mg/l.

A produção de biogás pela biodigestão anaeróbia da vinhaça é obtida através da seguinte equação:

$$PB = CO \times E \times F \quad (3)$$

onde:

PB = produção do biogás em Nm³/dia;

E = percentual (eficiência) de remoção de DQO do processo;

F = fator de conversão de biogás por DQO removido em Nm³/kg DQO.

A quantidade de energia do biogás é dada por:

$$GEB = PB \times PCIB \quad (4)$$

onde:

GEB = quantidade de energia do biogás em Kcal/dia;

PCIB = poder calorífico inferior do biogás em Kcal/Nm³.

A produção de energia elétrica irá depender do conjunto de turbinas a serem utilizadas no processo, para que se possa fazer uma estimativa da quantidade de energia elétrica produzida pela combustão do biogás. De acordo com Granato (2003) recomenda-se a utilização de reatores de fluxo ascendente com leito de lodo (UASB) e turbinas a gás modelo J 320V81 – Container, com capacidade de 1000 kWh. Dessa forma pode-se estimar a (PEEB) através da seguinte equação:

$$PEEB = GEB \times E1 \quad (5)$$

onde:

PEEB = quantidade de energia elétrica produzida pela combustão do biogás em Kcal/dia;

E1 = percentual GEB convertida em energia elétrica (eficiência da turbina a gás).

Tabela 3 – Parâmetros necessários para obtenção das equações 2, 3, 4 e 5.

	Valor
DQO	33.000
E	0,85
F	0,35
PCIB	8.500
E1	0,24

Fonte: Elaboração própria.

4.3. Modelagem Econômico-Hidrológica Integrada

O modelo expressa matematicamente a função-objetivo do problema de otimização como a soma dos benefícios líquidos dos múltiplos usuários da água e efluente da bacia do Pirapama no trecho estudado (MORAES et al, 2008).

As restrições de quantidade e qualidade de águas asseguram que os limites institucionais sejam respeitados, o que significa ausência de prejuízos ambientais. A alocação ótima de água e efluente, assim obtida, maximiza esta função objetivo, que pode ser vista como uma função de benefício social líquido (BOARDMAN et al, 2001), dada pelos lucros dos produtores adicionados aos benefícios dos consumidores, com o uso da água e da vinhaça, subtraindo-se os prejuízos ambientais. Devido ao fato de que simulamos todas as restrições atendidas, estes prejuízos ambientais resultantes são nulos.

O modelo original considera duas alternativas de disposição da vinhaça, o tratamento e a fertirrigação, sendo que, devido a esta última, simula-se uma situação em que não há vazamentos na aplicação de vinhaça nos tanques e canais de distribuição e a aplicação é feita em taxas apropriadas. Por isso, o modelo utiliza a estimativa da contaminação encontrada sob estas condições em estudos com usinas do Estado de São Paulo (BNDES; CGEE, 2008), que considera a vazão natural associada a áreas que recebem efluente com uma carga orgânica de 1% da vinhaça *in natura*.

Os benefícios líquidos dos produtores e dos consumidores são funções da quantidade de água e/ou efluente alocado. No que se refere aos fertirrigantes, o modelo original considera custos de transporte do efluente para as áreas plantadas de cana distantes das agroindústrias mais de 2 km, bem como economia com fertilizantes e gastos com aspersão. No benefício dos agroindustriais são considerados custos no caso de sobra de vinhaça, ou seja, da não disposição dos mesmos através da fertirrigação, que refletem despesas referentes ao tratamento da mesma, já que não pode ser jogada no rio. O custo utilizado foi uma

extrapolação, pois na verdade, como não se tinha registros de uso de tratamento deste efluente entre os agroindustriais¹³, o que se fez foi calculá-lo a partir de uma taxa de tratamento da carga do esgoto doméstico.

A opção da produção de biogás através da biodigestão anaeróbia da vinhaça não reduz o seu poder como fertilizante, e ao mesmo tempo produz um outro co-produto que é uma fonte de energia complementar à necessidade de energia das agroindústrias, e mais importante, reduz a carga orgânica potencial do efluente. No caso das destilarias do Pirapama, atualmente, a energia total consumida é proveniente apenas da queima do bagaço.

Na verdade, em muitas destilarias de cana do Brasil, especialmente no Sudeste, já se aproveita a energia do bagaço (outro co-produto), que muitas vezes, além de suprir as próprias necessidades da destilaria, gera energia excedente para ser vendida à rede. Essa co-geração de eletricidade evita emissões de GHG bem como aumenta a eficiência energética do etanol produzido a partir da cana. Como há outras possibilidades de aproveitamento do bagaço, por exemplo, como uma fonte de celulose numa segunda geração de combustíveis, pode haver demanda de energia a ser atendida pelo metano.

A avaliação da opção do biogás através da modelagem econômico-hidrológica integrada será feita através de dois cenários. O primeiro corresponde a situação atual (Cenário 1 – modelo atualizado), onde os agroindustriais praticamente só dispõem da fertirrigação como opção de disposição do efluente, e o segundo inclui a aquisição de um biodigestor (Cenário 2 – modelo adaptado).

Usando os dois modelos, poderão ser calculados os benefícios sociais líquidos nos em ambos os cenários, que podem ser obtidos diretamente através da resolução dos problemas de otimização associados. O benefício social líquido da nova opção de disposição da vinhaça será dado pela diferença entre esses valores, que representa a variação entre os excedentes dos produtores e consumidores sem e com a nova opção de disposição da vinhaça.

Para a obtenção dos custos sociais serão simulados, em cada um dos cenários, dois diferentes níveis de qualidade ambiental – algum prejuízo ambiental (limites de qualidade institucionais menos rigorosos) e nenhum prejuízo ambiental (limites de qualidade institucionais atendidos). Os custos sociais (*deadweight loss*) relativos a perda da qualidade ambiental serão dados pela variação entre os benefícios líquidos sociais obtidos sem e com prejuízos ambientais em cada um dos cenários.

¹³ Provavelmente os agroindustriais não tratam o efluente pois, em geral, não há sobras. Devido a isso, os limites de qualidade, na realidade, não são atendidos.

O modelo pode e já foi utilizado para calcular, de forma similar, os custos sociais associados a diferentes restrições de quantidade de água através da simulação de diferentes prioridades de uso, metodologias de cobrança utilizadas e/ou diferentes vazões ecológicas (MORAES et al, 2009 & MENDES, 2007).

4.3.1. Descrição da Modelagem Econômico-Hidrológica Integrada¹⁴

A modelagem utilizada nesse trabalho foi desenvolvida (MORAES; CIRILO; SAMPAIO, 2006) a partir dos mesmos fundamentos teóricos de um modelo integrado construído em conjunto pelo *International Food Policy Research Institute* (IFPRI), *Center for Research in Water Resources* (CRWR) da Universidade do Texas em Austin e *International Water Management Institute* (IWMI).

O modelo desenvolvido na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) representa a bacia hidrográfica como um todo através de uma rede de nós (entidades físicas) e conexões entre os mesmos. Os nós podem ser de dois tipos: os nós-fonte (rios, reservatórios, águas subterrâneas, etc) e os nós-demanda (agroindústrias, cidades, Pequenas Centrais Hidroelétricas - PCHs, etc). Verifica-se ainda na modelagem os nós de demanda por efluentes, que são as áreas plantadas de cana a serem fertirrigadas pelas agroindústrias da região.

As conexões entre os nós podem representar tanto captações de usuários como lançamentos. Os lançamentos representam não só a contribuição da drenagem pluvial natural, no que se refere à quantidade e à qualidade de água dos trechos e dos afluentes, como também os fluxos de retorno diretos e indiretos de alguns nós-demanda¹⁵.

O trecho modelado (ver Figura 4) é constituído por 8 principais afluentes, 2 reservatórios, 2 PCH's, 22 fontes superficiais de água e 25 áreas plantadas de cana. As categorias de uso consideradas foram: abastecimento humano, abastecimento agroindustrial, geração de energia e fertirrigação. Esse último não emprega nem compromete a água no que se refere à disponibilidade hídrica (pois usa-se na fertirrigação um efluente da produção das destilarias, vinhaça), mas impacta na qualidade da mesma.

¹⁴ Adaptado de Moraes et al. (2006).

¹⁵ De acordo com Moraes et al. (2006), os retornos diretos são conhecidos e constituem-se nos lançamentos feitos pelas agroindústrias das águas usadas no processo de refrigeração. Já os retornos indiretos representariam as possíveis formas de chegada do efluente usado na fertirrigação ao rio. No entanto, no estudo em questão não foram usados estes retornos indiretos por falta de dados sobre os mesmos. A contaminação por vinhoto foi considerada apenas através dos lançamentos naturais médios proporcionais às áreas fertirrigadas.

O modelo integra componentes de hidrologia qualitativa, de qualidade das águas, econômicos, institucionais e agrônômicos numa plataforma única, para determinar a alocação ótima de água em diferentes usos e vinhoto nas áreas plantadas de cana no trecho a montante da barragem Pirapama. Na escala de bacia determinam-se níveis de operação dos sistemas hidrológicos e de alocação de água entre os usuários. Para cada usuário determina-se uma quantidade e localização ótima de aplicação de efluentes dentre as diversas áreas plantadas de cana. O modelo é de curto prazo (1 ano), determinando alocações de água e vinhoto a cada mês, assumindo que as condições de oferta e demanda são relativamente estáveis.

A abordagem utilizada para buscar uma solução viável para esse complexo sistema foi a “modelagem holística” com método de decomposição por temas. Utilizou-se o método *piece-by-piece* apresentado em Cai, McKinney e Landson (2001), que utiliza o *General Algebraic Modeling System* (GAMS), *software* de alto nível utilizado para resolução de problemas de programação matemática. A referida abordagem usa o fato de que grandes modelos podem ser decompostos em várias partes, que são resolvidas sequencialmente, ou seja, cada parte é adicionada em cada etapa. No caso em estudo são utilizados dois sub-modelos para decomposição por temas. O sub-modelo 1 é o modelo de quantidade, que envolve as restrições de disponibilidade hídrica, e o sub-modelo 2 representa o modelo de qualidade de água (restrições de qualidade).

A função-objetivo do modelo constitui-se no benefício líquido obtido a partir da alocação de água e vinhoto para todos os usos considerados. O benefício líquido de cada usuário foi obtido a partir da subtração dos custos incorridos por cada usuário do seu benefício bruto. Este último, resultante da área sob a função de demanda inversa, até o valor alocado de água ou vinhoto. As funções de demanda inversa foram levantadas para cada usuário de acordo com estimativas de elasticidade e disposição a pagar dos mesmos, segundo procedimento detalhado em Germano (2008). Portanto,

$$B.Liq(usuário,t) = e^{C_1} \left[\frac{C_2^{\frac{1}{\eta}+1}}{\frac{1}{\eta}+1} - \frac{|C_2 - Q_{aloc}|^{\frac{1}{\eta}+1}}{\frac{1}{\eta}+1} \right] - C_{médio} \cdot Q_{aloc}(usuário,t) \quad (6)$$

No caso do abastecimento industrial, além desse custo médio será debitado também um custo adicional se houver sobras de efluentes. Isto ocorre porque o modelo considera que caso não seja alocado todo o efluente nas áreas plantadas de cana fertirrigadas pela agroindústria, a mesma deverá arcar com os custos de tratamento dessas sobras. Já para a

fertirrigação, além de custos de aspersão do vinhoto há também economia com os fertilizantes que não precisam ser utilizados e, dependendo do site de demanda a ser fertirrigado, haverá ou não custos com transporte por carros-pipas (MORAES; CIRILO; SAMPAIO, 2006).

Por fim, a função objetivo do modelo corresponde à soma dos excedentes líquidos de todos os usuários individuais, resultando assim no benefício social líquido.

$$F_{\text{objetivo}} = \sum_{mun} BL_{Ah}(usuário_{mun}) + \sum_{aund} BL_A(usuário_{aund}) + \sum_{pch} BL_{GE}(usuário_{pch}) + \sum_{frrig} BL_{fr}(usuário_{frrig}) \quad (7)$$

Com relação as restrições utilizadas no modelo, pode-se consultar (Moraes, 2003) para a descrição detalhada das restrições de quantidade de água (sub-modelo 1) relacionadas abaixo:

- Equação de *balance* nas junções principais e nas junções afluentes;
- Balanço de massa para os reservatórios;
- Fluxo mínimo para atender demandas ecológicas;
- Vazão de restrição a jusante dos barramentos;
- Capacidades máxima e mínima do reservatório;
- Conservação do volume armazenado ao fim do período de análise;
- Capacidade máxima instalada de PCH's;
- Quantidades limite para aplicação de efluentes.

No que se refere as restrições de qualidade de água, o objetivo é garantir que as variáveis de decisão escolhidas sejam tais que o oxigênio dissolvido (OD)¹⁶ esteja sempre acima do nível permitido pela legislação (MORAES et al, 2006). Este modelo fornece, portanto, a alocação ótima, dadas as restrições hidrológicas, de quantidade e qualidade de águas. A meta social é simulada assim, pois maximiza-se o benefício líquido social, ao mesmo tempo em que se assegura o atendimento das restrições.

4.4. Atualizações e adaptações no modelo

As modificações no modelo original para introduzir a alternativa de disposição da vinhaça para produção de biogás e gerar o modelo adaptado (Cenário 2) dividem-se, basicamente, em atualizações de parâmetros e modificações nas equações, conforme descrito a seguir. Deve-se ressaltar que as atualizações dos parâmetros (que constam no item 4.4.1)

¹⁶ Para maiores detalhes a respeito da simulação da curva de OD no modelo, ver Moraes (2003).

também foram feitas para gerar o modelo que continuaremos a chamar de original ou atualizado, que representará o Cenário 1.

4.4.1. Atualização de parâmetros do modelo

a) Atualização dos valores econômicos do modelo para o ano de 2010.

Com relação aos dados econômicos utilizados no modelo foram feitas atualizações de acordo com o Índice Geral de Preços - Disponibilidade Interna (IGP-DI) da Fundação Getúlio Vargas, no período de agosto de 2003 para outubro de 2010. Alguns, no entanto, foram atualizados de agosto de 1998 para outubro de 2010, pois foram obtidos em Carrera-Fernandez (1999), como o custo médio de obtenção de água em R\$/m³ tanto para as agroindústrias como para os municípios.

Outros dados não precisaram de atualização, pois estavam disponíveis para o presente ano, como por exemplo, o preço do álcool obtido no site da Escola Superior de Agricultura – ESALQ¹⁷, para o mês de novembro. Calculou-se uma média entre os custos do álcool anidro e hidratado para formação de um preço único para utilização no modelo. O valor da tonelada de cana é outro exemplo, pois foi obtido para o mês de maio de 2010, no site da MF Rural¹⁸.

O valor do custo de aspersão para irrigação, que era de R\$ 19,11, passou para R\$ 29,2516 quando multiplicado pela variação do IGP-DI no período considerado (1,5307), assim como a economia com o uso de fertilizantes, que antes era de R\$ 267,15 e, com a atualização, passou a ser R\$ 408,9265.

O valor da energia elétrica gerada pelas PCH's foi estimada a partir do valor que as mesmas pagariam caso comprassem energia da CELPE¹⁹ no item “poderes públicos, tração elétrica, indústria, comércio, serviços, outros” para o mês de novembro de 2010 em unidade de R\$/kWh, precisando ser transformada para R\$/MWh. Já o valor da tarifa residencial para cálculo dos benefícios municipais (Recife e Vitória) foi obtido no site da COMPESA²⁰ para o mês de outubro de 2010.

O custo médio de obtenção da água para a geração de energia elétrica também precisou ser atualizado pelo índice de preço. Este custo, que era de R\$ 14,00 por MWh em agosto de 2003, passou a valer R\$ 22,1492 por MWh em outubro de 2010.

¹⁷ <http://www.cepea.esalq.usp.br/alcool/>, acesso 02/12/10.

¹⁸ <http://www.mfrural.com.br/>, site de classificados de produtos rurais e intermediação de negócios.

¹⁹ <http://www.celpe.com.br/>.

²⁰ <http://www.compesa.com.br/index.php?option=content&task=view&id=15&Itemid=32>.

No que se refere ao custo médio de obtenção da água para os municípios, a atualização foi feita de acordo com o Índice de Preços ao Consumidor Amplo (IPCA) calculado pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística²¹ (IBGE). A tarifa de energia embutida neste custo é corrigida de acordo com o Índice Geral de Preços do Mercado (IGP-M), no entanto, este indexador onera mais o consumidor do que o IPCA. Este fato resultou em Projeto de Lei do Senado (PLS) nº 33/2010 proposto pelo Senador Renato Casagrande, cuja ementa altera a Lei nº 8.987, de 13 de fevereiro de 1995, para estabelecer o IPCA como índice indexador para o reajuste das remunerações devidas em contratos de concessão de serviços públicos. Devido a isso, a atualização deste custo médio se deu através da variação do IPCA.

b) Atualização de parâmetros relativos a produção das agroindústrias

No que se refere aos dados de produção das agroindústrias, estes foram atualizados segundo informações obtidas junto ao Grupo JB para a safra 2009/2010. Antes era considerado no modelo o número de meses de safra igual a 5, mas na realidade são cerca de 7 (média entre o tempo efetivo e total de safra). Dessa forma, os dados das demais destilarias consideradas no modelo foram multiplicados por 5 e divididos por 7, uma vez que as mesmas não disponibilizaram informação alguma a respeito das safras mais atuais.

Os dados relativos a produção de álcool, quantidade de água consumida para processamento e quantidade de cana moída, no mês, para cada destilaria, foram obtidos, em sua maioria, nas licenças concedidas pela Agência Estadual de Meio Ambiente e Recursos Hídricos (CPRH). Aqueles que não puderam ser obtidos dessa forma, foram atualizados através da multiplicação por 5 e, posteriormente, divisão por 7, como explicado anteriormente.

Além disso, o modelo considerava que cada litro de álcool produzido gerava 12 litros de vinhaça, mas, de acordo com a JB, essa relação é de 1 para 14, ou seja, gera-se mais efluente com 1 litro de álcool do que se julgava anteriormente.

c) Atualização de dados relativos ao uso da água

Os dados relativos a oferta de água não foram atualizados, utilizou-se os valores do modelo que se referiam a um ano representativo (2004) das condições hídricas da bacia. Os

²¹ http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/precos/inpc_ipca/defaultseriesHist.shtm

dados de uso da água não sofreram alterações pois, segundo informações da Secretaria de Recursos Hídricos (SRH), as outorgas de cada usuário permaneceram as mesmas.

d) Atualização de parâmetros relativos a vinhaça

Inicialmente foi alterada a concentração de DBO do efluente de 16,4 para 19,8 Kg/m³ de vinhaça, uma vez que, de acordo com a JB, a concentração de DQO é de 33 Kg/m³, e que a relação DBO/DQO é de cerca de 60% segundo amostra obtida para usinas do Estado de São Paulo apresentada em Elia Neto e Nakahondo (1995) sobre a composição da vinhaça.

Foi atualizado também, pelo IGP-DI, o custo de transporte da vinhaça, através do preço do carro pipa e do custo por km, que passaram, respectivamente, de R\$ 6,00 e R\$ 0,25 para R\$ 9,1842 e R\$ 0,382675, no período de agosto de 2003 a outubro de 2010.

Com relação as despesas com o tratamento da vinhaça, o modelo considerava o custo de tratamento do efluente doméstico como aproximação para o industrial. Agora, serão utilizados os valores obtidos em Trobisch (1992), que estima o custo energético de tratar a carga orgânica. Segundo esta referência, o custo aproximado de remover 1Kg de DBO é de 1 kWh.

Com relação a carga orgânica da vinhaça a ser tratada ou alocada como fertilizante, uma vez que se invista na produção de biogás, todo o efluente irá passar pelo biodigestor e terá essa carga reduzida em 85%, logo a concentração de DBO, tanto nas sobras quanto no montante do efluente destinado a fertirrigação, será 15% do valor original.

4.4.2. Modificação de equações da modelagem original

4.4.2.1. Modificação na função-objetivo (a ser usado em ambos os cenários)

O modelo foi concebido como se cada área plantada de cana pertencesse a um proprietário diferente, no entanto, não foi levantado nenhum cadastro de propriedade destas áreas. De acordo com BNDES e CGEE (2008), no geral, as usinas brasileiras trabalham, em média, com 80% da cana proveniente de terras próprias. Além disso, segundo informações da JB, 100% das áreas fertirrigadas por esta destilaria são de sua propriedade. Devido a isso, o modelo, de uma forma geral, passou a considerar que o uso da fertirrigação faz parte do agroindustrial, ou seja, todas as áreas fertirrigadas pertencem a unidade industrial da qual recebem o efluente. Assim, a nova função de benefício líquido dos agroindustriais incorpora os excedentes líquidos resultantes da fertirrigação:

$$BL_{AIND} = BB_{AIND} - CM_{AIND} - PB_{AIND} + BL_{AIND}F \quad (8)$$

onde²²:

BL_{AIND} = benefício líquido do agroindustrial no ano (safra), em milhões de reais, devido a alocação de água para o processo produtivo do etanol e a alocação de vinhoto nas suas áreas de cana;

BB_{AIND} = benefício bruto da agroindústria com a produção de álcool e aguardente, em milhões de reais no ano, função da alocação de água ao processo produtivo do etanol;

CM_{AIND} = custo médio da agroindústria com a obtenção da água para o processo produtivo do etanol, em milhões de reais no ano;

PB_{AIND} = Custos do tratamento da sobra de vinhaça não alocada pela agroindústria, em milhões de reais no ano;

$BL_{AIND}F$ = benefícios líquidos para a agroindústria da fertirrigação de suas áreas devido a alocação de vinhoto nas mesmas, em milhões de reais no ano.

Este benefício líquido associado a agroindústria, devido a fertirrigação, é na verdade a soma dos benefícios líquidos de todas as áreas fertirrigadas pela mesma, resultado do somatório das áreas individualmente que, como no modelo original, continua sendo:

$$BL_{AIND}F = \sum_i BLFIR_i \quad (9)$$

onde:

i = áreas fertirrigadas associadas a unidade agroindustrial. Por exemplo para a JB, i vai de FIR0 a FIR8, inclui FIR5_1 e FIR10 a FIR12. Para a Sibéria i se constitui apenas numa única área, FIR9, e para a INEXPORT, i vai de FIR13 a FIR21, e inclui FIR23_1, FIR23_2 e FIR24.

$$BLFIR_i = BBF_i - CA_i + GF_i - CT_i \quad (10)$$

$BLFIR_i$ = benefício líquido total de cada área a ser fertirrigada, em milhões de reais no ano;

BBF_i = benefício bruto de cada unidade fertirrigada em milhões de reais no ano;

CA_i = custo de aspersão do efluentes de cada unidade fertirrigada, em milhões de reais no ano;

GF_i = economia com o uso de fertilizantes de cada unidade fertirrigada, em milhões de reais no ano;

CT_i = custos com transporte da vinhaça para fertirrigar áreas mais distantes de cada unidade fertirrigada, em milhões de reais no ano.

²² O subíndice AIND serve para especificar de que agroindústria são os custos e benefícios.

Cada um desses componentes também pode ser totalizado para ser computado para a agroindústria correspondente. Temos assim:

$$BBF_{AIND} = \sum_i BBF_i \quad (11)$$

$$CA_{AIND} = \sum_i CA_i \quad (12)$$

$$GF_{AIND} = \sum_i GF_i \quad (13)$$

$$CT_{AIND} = \sum_i CT_i \quad (14)$$

BBF_{AIND} = benefício bruto com a prática da fertirrigação em todas as áreas fertirrigadas associadas a AIND, em milhões de reais no ano;

CA_{AIND} = custo de aspersão do efluente em todas as áreas fertirrigadas associadas a AIND, em milhões de reais no ano;

GF_{AIND} = economia com o uso de fertilizantes em todas as áreas fertirrigadas associadas a AIND, em milhões de reais no ano;

CT_{AIND} = custos com transporte da vinhaça para fertirrigar áreas mais distantes em todas as áreas fertirrigadas associadas a AIND, em milhões de reais no ano.

Não houve mudanças nas funções de benefício líquido dos usuários de geração de energia elétrica nem de abastecimento humano, e a função ojetivo a ser maximizada no modelo continua sendo a agregação destes benefícios líquidos somados em todos os meses do ano. Importante destacar, mais uma vez, que o excedente líquido dos usuários de fertirrigação está agregado ao do agroindustrial e, por isso, não foi destacado na referida função. Assim, temos:

$$F_{objetivo} = \sum_{mun} BL_{AH}(usuário_{mun}) + \sum_{aind} BL_{AI}(usuário_{aind}) + \sum_{pch} BL_{GE}(usuário_{pch}) \quad (15)$$

Dentre as destilarias deste trecho, o Grupo JB, que produz cerca de 54000 m³ de álcool por safra, já iniciou o estudo de viabilidade de aquisição da tecnologia de biodigestão anaeróbia como alternativa para a disposição do seu efluente. A JB gera energia mais do que suficiente para sua operação com a queima do bagaço, o que sobra é vendido. Assim, com a aquisição dessa tecnologia, toda a energia gerada com o biogás será direcionada para o consumo externo.

Devido a falta de informações fornecidas pelas demais destilarias do trecho, a maioria dos dados da JB foi considerada para as demais. Este é o caso da venda da energia excedente, ou seja, considera-se que toda energia produzida com o biogás nas mesmas será direcionada para venda. Dessa forma, uma vez adotada esta tecnologia, o efluente utilizado nas áreas fertirrigadas, além de ter uma carga orgânica reduzida, gera receitas com a venda da energia elétrica, resultando em benefícios tanto ambientais quanto econômicos. No entanto, a tecnologia da biodigestão possui um alto custo de investimento²³, e o retorno do mesmo não é imediato.

4.4.2.2. Modificação para incluir a alternativa de Biodigestão Anaeróbia da Vinhaça e introdução de novos parâmetros (a ser usada apenas no Cenário 2)

Para cálculo dos custos e benefícios associados a implantação dessa tecnologia utilizou-se como base o estudo desenvolvido por Granato (2003), cujo o objetivo principal foi analisar o potencial de geração de energia elétrica, a partir da queima do biogás gerado no processo de biodigestão anaeróbia da vinhaça, de uma destilaria com capacidade produtiva de 600 m³ de álcool por dia. Além disso, consideram-se as estimativas realizadas pelo Grupo JB na hipótese de se obter um biodigestor em sua unidade produtiva.

Com relação ao cálculo do benefício líquido dos agroindustriais no modelo, quando estes utilizam a biodigestão anaeróbia, foram incluídas as estimativas de custos operacionais totais calculadas pelo Grupo JB, em R\$/safra. Para que estes custos variassem de acordo com o volume de vinhaça gerado por cada agroindústria no período de safra foi preciso dividir o mesmo pela produção do resíduo (safra 2009/2010), ficando os mesmos em R\$/m³ de vinhaça.

Tabela 4 – Estimativas de custos relativos à aquisição do Biodigestor.

Custos	RS/safra	RS/m³ de vinhaça (756.000 m³/safra)
Energia Elétrica	88.000	0,116402116
Operação	130.000	0,171957672
Soda Cáustica	39.781,86	0,052621508
Custos diversos de manutenção	100.000	0,132275132

Fonte: Elaboração própria a partir de informações obtidas junto ao Grupo JB.

²³ Segundo estimativas da JB, um sistema de biodigestão capaz de receber uma vazão média de vinhaça de 125 m³/h custa em torno de R\$ 12 milhões.

Além disso, também foi inserida na função de benefício líquido a receita que as destilarias obteriam com a venda da energia excedente gerada que, de acordo com a JB, é de R\$ 145 por MWh.

Esses valores foram utilizados para as demais destilarias do modelo, pois não foi possível obter informações destas na CPRH nem através de contato direto com os responsáveis. Devido a isso, na função de benefício líquido das destilarias serão acrescentados os custos e benefícios relativos a esta opção de aproveitamento da vinhaça, considerando que a realidade da JB se estende as demais destilarias da região analisada.

Sendo assim, usando o procedimento já descrito na seção 4.2 e os dados da agroindústria JB, foi introduzida a nova equação de benefício líquido dos agroindustriais, dada por:

$$BL_{AIND} = BB_{AIND} - CM_{AIND} - PB_{AIND} + BL_{AIND}F + BL_{AIND}PBG \quad (16)$$

onde:

$$BL_{AIND}PBG = - Co * PSW + P * ((PEEB / Hsd * Tc * Cv) * Hsm) \quad (17)$$

$BL_{AIND}PBG$ = benefício líquido com a produção de biogás por ano em milhões de reais.

Nesta equação temos:

Co = total de custos operacionais com a aquisição do biodigestor em R\$/m³;

PSW = produção de vinhaça pela agroindústria no mês em milhões de m³;

P = preço do MWh para venda da energia excedente em reais;

$PEEB$ = quantidade de energia elétrica produzida pela combustão do biogás em Kcal/dia;

Hsd = número de horas no dia;

Tc = taxa de conversão de Kcal para kW;

Cv = constante utilizada para converter kW em MW;

Hsm = número de horas no mês.

Os demais termos já foram descritos na seção anterior.

Tabela 5 – Parâmetros da Equação 17.

	Valor
Co	0,473256429
P	145
Hsd	24
Tc	860
Cv	1000
Hsm	720

Fonte: Elaboração própria.

Outra modificação com a produção do biogás é a redução na carga de DBO da vinhaça, que irá impactar tanto no custo de tratamento das sobras, uma vez que estas terão 15% da carga original para ser tratada, como na fertirrigação, dado que a carga orgânica na vazão natural será 1% da vinhaça não mais *in natura*, e sim com 85% da DBO removida.

4.5. Método utilizado para cálculo do retorno do investimento

Para obtenção do período de recuperação do capital inicial será adotado o método do "Pay-Back Period" (PBP) ou Período de Reposição, que há muito vem sendo tratado na literatura específica como um método simplificado para determinar o tempo de retorno de uma alternativa de investimento realizada (FERREIRA, 2000). Esse método prevê o tempo de recuperação "t" sendo fornecido através da razão entre o custo inicial do investimento e o lucro uniforme por período operacional. Assim:

$$t = \frac{C_0}{L} \quad (18)$$

onde:

t = tempo de retorno;

C_0 = valor do investimento (custo inicial);

L = lucro uniforme.

No caso em que o lucro esperado do investimento analisado não é uniforme, período a período, o prazo de reposição do capital aplicado deverá ser determinado somando-se os lucros esperados em anos sucessivos até que esse resultado se iguale ao desembolso do custo inicial.

Há abordagens mais precisas para este cálculo, que incluem o custo de oportunidade do capital²⁴ mas, considerando que o objetivo dessa análise não é comparar diferentes alternativas de investimentos disponíveis e, sim, avaliar o tempo de retorno de um mesmo investimento para diferentes agentes econômicos (destilarias), será utilizado o método mais simples, também conhecido como Pay Back Simples (PBS), pois é um índice econômico-financeiro de fácil entendimento (FERREIRA, 2000).

²⁴ Ver Ferreira (2000) e a fórmula de Getúlio S. Dowsley.

5. OBTENÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

5.1. Benefícios sociais líquidos da produção do biogás

Nesta seção, comparam-se os benefícios sociais líquidos obtidos com e sem a produção de biogás, Cenário 2 e Cenário 1, respectivamente, diante do atendimento aos níveis de qualidade impostos pela legislação e, portanto, nenhum prejuízo ambiental. A diferença entre estes benefícios representa o ganho social líquido da introdução da opção do biogás, cuja distribuição entre os agentes (variações no excedente) também se analisa. Vale salientar que, dentre os usuários analisados, encontram-se 3 agroindústrias (JB, Sibéria e INEXPORT), 2 municípios (Recife e Vitória) e 2 pequenas centrais hidrelétricas (PCHCIP e PCHJB).

Tabela 6 – Benefícios líquidos associados a cada usuário nos cenários 1 e 2, em milhões de reais no ano.

Usuários	Cenário 1	Cenário 2	Variação no Excedente
JB	69,672	74,757	5,085
Sibéria	3,814	3,976	0,162
INEXPORT	37,284	40,226	2,942
Recife	53,572	53,572	0,000
Vitória	1,234	1,237	0,003
PCHJB	1,086	1,086	0,000
PCHCIP	2,026	2,031	0,005
	Cenário 1	Cenário 2	Benefício Social
Agregado	168,688	176,885	8,197

Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 6 mostra que o benefício social líquido da utilização do efluente para geração do biogás é de R\$ 8,197 milhões. De forma geral, o excedente dos usuários é maior (ou igual) com a produção do mesmo (Cenário 2), ou seja, nenhum usuário perde com a adoção da tecnologia de biodigestão anaeróbia da vinhaça, sendo que a quase totalidade dos benefícios associados a esta nova opção de disposição do efluente são dos usuários agroindustriais e, dentre eles, a JB é a que obtém a maior parte dos ganhos.

O aumento nos excedentes da cidade de Vitória e da PCHCIP decorre de uma maior alocação de água, para estes dois usuários. Isto resulta da diminuição da carga orgânica do efluente (15% da original) que é usado na fertirrigação das áreas próximas ao reservatório Águas Claras (FIR9)²⁵. Isto exige menores volumes de água no mesmo para evitar a

²⁵ A quantidade de vinhoto colocado ali pela agroindústria Sibéria é a mesma. No entanto, como a carga orgânica diminui ocorre uma maior disponibilidade de água.

eutrofização. Assim, maiores volumes de água, além de serem alocados para Vitória, devem fluir sobre a PCHCIP, já que esta recebe água das liberações do referido reservatório (ver Figura 4).

Analisando a situação de cada agroindústria, através dos componentes do benefício líquido das mesmas (Tabela 7), percebe-se que o aumento no excedente da Sibéria é resultante exclusivamente do ganho líquido com a produção do biogás (coluna 5).

Tabela 7 – Resultados dos componentes do benefício líquido dos agroindustriais, relativos aos cenários 1 e 2, em milhões de reais por ano (safra).

Cenário 1									
						BLF			
Usuários	BB	CM	PB	BLF	BLPBG	BBF	CA	GF	CT
JB	85,106	13,627	1,118	-0,689	0	2,698	2,226	1,037	2,198
Sibéria	5,556	1,912	0	0,170	0	0,257	0,163	0,076	0
INEXP.	49,365	11,345	0	-0,736	0	2,121	1,763	0,821	1,915
Cenário 2									
						BLF			
Usuários	BB	CM	PB	BLF	BLPBG	BBF	CA	GF	CT
JB	85,307	13,801	0,368	1,023	2,596	1,979	1,789	0,833	0
Sibéria	5,556	1,912	0	0,170	0,162	0,257	0,163	0,076	0
INEXP.	49,860	11,787	0,290	0,653	1,790	1,269	1,153	0,537	0
Diferença entre os componentes do BL nas duas situações (Cenário 2 – Cenário 1)									
						BLF			
Usuários	BB	CM	PB	BLF	BLPBG	BBF	CA	GF	CT
JB	0,201	0,174	-0,750	1,712	2,596	-0,719	-0,413	-0,204	-2,198
Sibéria	0	0	0	0	0,162	0	0	0	0
INEXP.	0,495	0,442	0,290	1,389	1,790	-0,852	-0,610	-0,284	-1,915

Fonte: Elaboração própria.

Com relação a JB e INEXPORT, o Cenário 2 proporciona maiores benefícios brutos e custos médios de obtenção da água (colunas 1 e 2), devido ao aumento na quantidade alocada para consumo industrial, que da mesma forma como foi explicado para Vitória e PCHCIP, decorre de uma maior disponibilidade de água. Neste caso, entretanto, esta maior disponibilidade resulta não só da menor carga orgânica do efluente, mas também da redução da quantidade de efluente utilizado para fertirrigação pela JB e INEXPORT. Com isso menores volumes de água são requeridos a continuar no rio para que este possa atender aos limites de qualidade através do processo de autodepuração. Além disso, os custos de tratamento do efluente (coluna 3) são menores para JB e maiores para a INEXPORT. Na verdade ambas reduzem a zero a fertirrigação nas áreas mais distantes (CT nulos, coluna 9) e

optam pelo tratamento do efluente (coluna 3) que agora está associado a um custo menor, resultado da menor concentração de DBO no resíduo, que mais que compensa o aumento na quantidade de vinhaça a ser tratada em ambos os casos (no caso da INEXPORT a quantidade a ser tratada deixa de ser nula).

Interessante notar que, mesmo com a redução de áreas fertirrigadas para JB e INEXPORT os benefícios líquidos (BLF) passam a ser positivos. Ao analisar os componentes desse benefício (colunas 6, 7, 8 e 9), percebe-se que, tanto para JB como INEXPORT, os benefícios brutos da fertirrigação são menores devido a uma menor quantidade alocada de vinhaça (que passou a ser tratada), resultando, portanto, em menores custos de aspersão, ganhos com fertilizantes e custos de transporte nulos (as áreas distantes não são mais fertirrigadas). No entanto, como os benefícios caem menos do que os custos, principalmente os custos de transporte que reduzem bastante, o BLF passa a ser positivo.

Sendo assim, diante de uma fiscalização eficaz (sem impactos ambientais), a adoção da biodigestão anaeróbia traz um benefício social líquido positivo. Além de utilizar a vinhaça para produzir o biogás os produtores distribuiriam a mesma para fertirrigação em menor quantidade e tratariam um maior volume do efluente. Assim, a razão de alocação do efluente entre tratamento e fertirrigação mudaria. Isto porque toda vinhaça gerada entra e sai do biodigestor com o mesmo volume. A única diferença é que a concentração de DBO na vinhaça destinada para estas duas opções, no Cenário 2, é 85% menor do que a verificada no Cenário 1. Como o custo de tratamento depende da carga orgânica do efluente, as destilarias têm maior incentivo para tratá-las após o processo de biodigestão, ao invés de transportá-la para grandes distâncias da destilaria.

5.2. Custos sociais associados a mudanças nos níveis de qualidade da água nos dois cenários

Para obtenção desses resultados, como já explicado, foram alterados os valores das restrições de qualidade de água institucionais dentro dos modelos, simulando diferentes níveis de qualidade ambiental. Assim, tem-se uma situação com prejuízos ambientais (esta situação pode ser resultante também de uma fiscalização ineficaz diante das mesmas restrições) e outra sem danos ao meio ambiente (fiscalização eficaz). Fazendo isso em cada modelo ou cenário (ver Quadro 1), obtêm-se os custos sociais, ou a perda de bem-estar social (*deadweight loss*) de uma diminuição no nível de qualidade ambiental, através da diferença entre os benefícios

líquidos nas duas situações. Aqui também estes valores podem ser obtidos de forma agregada e individual.

Quadro 1 – Situações analisadas em cada cenário.

CENÁRIO 1 (Modelo original: tratamento e fertirrigação)	Situação 1 (sem prejuízos ambientais)	Restrições de qualidade institucionais atendidas
	Situação 2 (alguns prejuízos ambientais)	Restrições de qualidade menos restritivas que as institucionais.
CENÁRIO 2 (Modelo adaptado: tratamento, fertirrigação e biogás)	Situação 1 (sem prejuízos ambientais)	Restrições de qualidade institucionais atendidas
	Situação 2 (alguns prejuízos ambientais)	Restrições de qualidade menos restritivas que as institucionais.

Fonte: Elaboração própria.

Os benefícios líquidos encontrados na Situação 2 são maiores, ou pelo menos iguais para alguns usuários, do que os obtidos na Situação 1 (ver Tabela 8), isto porque o modelo não mensura os prejuízos ambientais. A diferença entre os excedentes nas duas situações, que ocorre devido a saída do ótimo social, é exatamente o custo social. Individualmente, essas diferenças representam as perdas no excedente do produtor e do consumidor decorrentes das reduções na quantidade de água associadas a obtenção do ótimo social. Essas perdas devem ser internalizadas por cada agente para que os prejuízos ambientais desapareçam, o que deve acontecer diante de uma regulação mais eficaz ou pelo menos de uma perspectiva de sua ocorrência.

Tabela 8 – Benefícios líquidos (BL's) associados a cada usuário no Cenário 1, em milhões de reais no ano.

Usuários	BL – Situação 1	BL – Situação 2	Perda de excedente
JB	69,672	70,735	1,063
Sibéria	3,814	3,814	0,000
INEXPORT	37,284	37,317	0,033
Recife	53,572	53,572	0,000
Vitória	1,234	1,237	0,003
PCHJB	1,086	1,086	0,000
PCHCIP	2,026	2,031	0,005
	BL – Situação 1	BL – Situação 2	Custo Social
Total	168,688	169,792	1,104

Fonte: Elaboração própria.

Os resultados apresentados na Tabela 8 mostram que o custo social decorrente de um nível de qualidade da água fora dos limites institucionais é de R\$ 1,104 milhões. As perdas de

excedentes resultantes são maiores para a JB, sendo da ordem de R\$ 1,063 milhões, no caso em que ela tenha apenas as opções de disposição da vinhaça atuais, a saber: tratamento e fertirrigação. Sibéria, Recife e a PCHJB não sofrem perdas de excedentes, pois não se verifica nenhuma redução na sua alocação de água e, portanto, seus benefícios líquidos permanecem inalterados. A agroindústria INEXPORT apresenta uma pequena perda de excedente, assim como a cidade de Vitória e a PCHCIP. Estas duas últimas sofrem reduções de alocação, pois as suas alocações dependem do reservatório Águas Claras. Assim, menores quantidades de água são alocadas para Vitória, para que maiores volumes sejam mantidos no reservatório, diminuindo a possibilidade de eutrofização, o que resulta em menores volumes de água fluindo sobre a PCHCIP.

Para analisar o caso das agroindústrias, é interessante avaliar cada componente dos benefícios líquidos das mesmas e compará-los nas duas situações, para entender de que forma os mesmos variam na passagem da Situação 2 para a Situação 1. É importante destacar que, se a diferença entre estes componentes, calculadas nas tabelas 9 e 12 for positiva significa que os mesmos diminuem diante de uma melhor qualidade ambiental, caso contrário os valores dos componentes aumentam na condição de melhoria ambiental.

Tabela 9 – Resultados dos componentes do benefício líquido dos agroindustriais, relativos ao Cenário 1, em milhões de reais por ano (safra).

BL – Situação 1								
Usuários					BLF			
	BB	CM	PB	BLF	BBF	CA	GF	CT
JB	85,106	13,627	1,118	-0,689	2,698	2,226	1,037	2,198
INEXPORT	49,365	11,345	0	-0,736	2,121	1,763	0,821	1,915
BL – Situação 2								
Usuários					BLF			
	BB	CM	PB	BLF	BBF	CA	GF	CT
JB	85,254	13,754	0	-0,765	3,199	2,619	1,220	2,565
INEXPORT	49,384	11,360	0	-0,707	2,154	1,764	0,822	1,919
Diferença entre os componentes do BL nas duas situações (Situação 2 – Situação 1)								
Usuários					BLF			
	BB	CM	PB	BLF	BBF	CA	GF	CT
JB	0,148	0,127	-1,118	-0,076	0,501	0,393	0,183	0,367
INEXPORT	0,019	0,015	0	0,029	0,033	0,001	0,001	0,004

Fonte: Elaboração própria.

A Tabela 9 mostra que os efeitos sobre a JB e INEXPORT de se atingir um melhor nível de qualidade de água no rio são os de diminuição dos benefícios brutos e custos médios de obtenção da água (colunas 1 e 2), os quais se devem a queda do volume de água alocado para estas indústrias, devido a menor disponibilidade resultante do melhor nível de qualidade ambiental requerido. Ademais, os custos de tratamento do efluente (coluna 3) passam a ser positivos para a JB, pois nem toda vinhaça produzida será utilizada na fertirrigação devido aos limites de qualidade impostos na Situação 1 e, portanto, deve ser tratada.

Com relação a fertirrigação, enquanto se verifica um aumento nos benefícios associados para a JB (coluna 4), observa-se uma queda para a INEXPORT. Na verdade, deve-se observar que BLF para as duas agroindústrias são negativos numa situação com algum prejuízo ambiental (Situação 2) e, no caso da INEXPORT, ficam ainda mais negativos se estes prejuízos deixam de existir (Situação 1)²⁶. Isso indica que, em nenhuma das situações, a alocação da vinhaça como fertilizante se justifica por motivos econômicos, pois os custos excedem os benefícios²⁷. Tanto para JB como para INEXPORT, os benefícios brutos da fertirrigação caem devido a uma menor produção e alocação para fertirrigação. Consequentemente, o mesmo ocorre com os custos de aspersão, ganhos com fertilizantes e custos de transporte. No caso da INEXPORT, como os custos caem menos do que os benefícios, o BLF fica ainda mais negativo. O interessante é que, no caso da JB, o menor volume de vinhaça destinado para aplicação no solo faz com que os benefícios da fertirrigação sejam um pouco menos negativos. Isto ocorre porque os benefícios caem menos do que os custos para esta destilaria.

Ao comparar os resultados obtidos na Tabela 8 (Cenário 1) com os do Cenário 2 (Tabela 10), pode-se observar a mudança na redução dos excedentes no caso das agroindústrias investirem numa outra opção de disposição da vinhaça.

²⁶ No caso da JB, os benefícios da fertirrigação continuam negativos, mas um pouco menos.

²⁷ Provavelmente, devido a não utilização da dosagem correta pelos agroindustriais, os mesmos não incorram em custos de transporte e façam assim a disposição economicamente viável numa área sem fiscalização eficaz.

Tabela 10 – Benefícios líquidos (BL's) associados a cada usuário no Cenário 2, em milhões de reais no ano.

Usuários	BL – Situação 1	BL – Situação 2	Perda de excedente
JB	74,757	74,774	0,017
Sibéria	3,976	3,976	0,000
INEXPORT	40,226	40,226	0,000
Recife	53,572	53,572	0,000
Vitória	1,237	1,239	0,002
PCHJB	1,086	1,086	0,000
PCHCIP	2,031	2,033	0,002
	BL – Situação 1	BL – Situação 2	Custo Social
Total	176,885	176,906	0,021

Fonte: Elaboração própria.

No segundo cenário, verifica-se uma queda substancial no custo social. No caso da JB, a perda de excedente diminui bastante se a empresa tiver optado pela compra de um biodigestor (ver Tabela 11), numa situação de exigência de níveis de qualidade de água melhores. O valor para esta destilaria passa a ser de R\$ 0,017 milhões, bem menor do que o encontrado no cenário anterior.

Tabela 11 – Diferença entre as variações de benefício líquido nos cenários 1 e 2, em milhões de reais no ano.

Usuários	Perda de excedente (Cenário 1)	Perda de excedente (Cenário 2)	Redução nas Perdas
JB	1,063	0,017	1,046
Sibéria	0,000	0,000	0,000
INEXPORT	0,033	0,000	0,033
Recife	0,000	0,000	0,000
Vitória	0,003	0,002	0,001
PCHJB	0,000	0,000	0,000
PCHCIP	0,005	0,002	0,003
	Custo social (Cenário 1)	Custo social (Cenário 2)	Redução do Custo Social
Total	1,104	0,021	1,083

Fonte: Elaboração própria.

Vitória e PCHCIP continuam a apresentar perdas de excedentes devido a reduções na alocação, no entanto, estas são menores do que as encontradas no Cenário 1, pois a redução na carga orgânica do efluente usado na fertirrigação deve exigir menores volumes no reservatório para evitar a eutrofização. Além de Recife e da PCHJB, a INEXPORT e a Sibéria também não sofrem perdas de excedente para atingir a Situação 1.

Para analisar os casos das destilarias, neste novo cenário, construiu-se a Tabela 12 da mesma forma que a Tabela 9.

Tabela 12 – Resultados dos componentes do benefício líquido dos agroindustriais, relativos ao Cenário 2, em milhões de reais por ano (safra).

BL – Situação 1									
Usuários						BLF			
	BB	CM	PB	BLF	BLPBG	BBF	CA	GF	CT
JB	85,307	13,801	0,368	1,023	2,596	1,979	1,789	0,833	0
INEXP.	49,860	11,787	0,290	0,653	1,790	1,269	1,153	0,537	0
BL – Situação 2									
Usuários						BLF			
	BB	CM	PB	BLF	BLPBG	BBF	CA	GF	CT
JB	85,309	13,802	0,357	1,028	2,596	1,997	1,814	0,845	0
INEXP.	49,860	11,787	0,290	0,653	1,790	1,269	1,153	0,537	0
Diferença entre os componentes do BL nas duas situações (Situação 2 – Situação 1)									
Usuários						BLF			
	BB	CM	PB	BLF	BLPBG	BBF	CA	GF	CT
JB	0,002	0,001	-0,011	0,005	0	0,018	0,025	0,012	0
INEXP.	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Fonte: Elaboração própria.

De forma geral, observa-se que o novo cenário, para ambas as destilarias, torna os benefícios da fertirrigação positivos (coluna 4), o que é explicado pelos custos de transporte nulos (coluna 9). Com uma menor carga orgânica, depois da biodigestão, o efluente é distribuído, em parte, nas áreas mais próximas, na dosagem correta, e as sobras são tratadas, o que envolve agora custos bem menores devido a redução na DBO. Assim, com a alternativa de produção do biogás passa a ser mais vantajoso tratar o efluente do que alocá-lo em áreas com custos de transporte (CT).

No que diz respeito aos benefícios brutos e custos médios (colunas 1 e 2) de obtenção da água como insumo para a produção do etanol, há apenas uma pequena variação na JB, o que resulta de uma pequena diminuição de alocação de água para esta indústria devido a requisitos de qualidade melhores.

Com relação ao benefício líquido resultante da produção do biogás (coluna 5), o mesmo é positivo para todas as agroindústrias, o que significa que os ganhos com a venda da energia elétrica do biogás superam os custos totais relacionados a operação e manutenção do biodigestor. Além disso, não se observa qualquer alteração de uma situação para outra, uma vez que o BLPBG é função apenas do nível de produção da vinhaça e, portanto, da produção

do etanol, o qual praticamente não se altera frente a diferentes níveis de qualidade ambiental²⁸. Ou seja, a quantidade do efluente produzida e enviada para o biodigestor permanece praticamente a mesma nas duas situações.

Analisando mais de perto o caso da JB, que arca praticamente com toda a redução de excedente devido a melhoria na qualidade da água, observa-se que a mesma deve-se ao aumento nos custos de tratamento do efluente (coluna 3), associado a uma redução nos benefícios da fertirrigação (coluna 4). Os componentes destes benefícios (colunas 6, 7, 8 e 9) mostram que esta redução se deve a uma menor alocação de vinhaça, que leva a menores benefícios brutos da fertirrigação e, conseqüentemente, menores ganhos com fertilizante e custos de aspersão.

Para o caso da INEXPORT, a nova opção de disposição da vinhaça faria com que a mesma deixasse de incorrer em perda de excedentes diante de uma melhoria exigida na qualidade das águas. A principal diferença, em relação ao cenário sem biogás, é a estratégia de tratamento, que passa a ser usada consideravelmente, mesmo quando se admite algum prejuízo ambiental (Situação 2).

5.3. Análise das alternativas de uso econômico da vinhaça a partir das medidas de benefícios e custos sociais obtidas

A partir dos resultados apresentados em 5.1, verifica-se que, num contexto em que todas as restrições de qualidade institucionais são atendidas, a adoção da alternativa de produção do biogás aumenta (ou mantém inalterados) os excedentes de todos (ver Tabela 6) e, portanto, faz o benefício social líquido dessa alternativa positivo. Assim, no contexto sem prejuízo ambiental, o que se observa são ganhos líquidos sociais no valor de R\$ 8,197 milhões provenientes da adoção da tecnologia de biodigestão do efluente ao lado das opções de tratamento e/ou fertirrigação. Estes valores, quando considerados para os agroindustriais (ver Tabela 6), mostram o ganho potencial da inclusão dessa alternativa, já que admitem um contexto sem poluição, o que não é real.

Ao considerar diferentes níveis de qualidade ambiental para cada um dos cenários analisados (ver seção 5.2), simula-se uma situação em que as empresas são pressionadas, por algum instrumento regulatório, a atender os limites de qualidade institucionais. As

²⁸ Na verdade, há uma pequena redução na quantidade de etanol produzida pela JB devido a menor quantidade de água alocada, o que resulta num menor montante de vinhaça. No entanto, esse efeito não aparece na ordem de grandeza em que os valores dos benefícios são apresentados.

consideráveis reduções nas perdas de excedentes (ver Tabela 11), ou ganhos obtidos entre os dois cenários, mostram que a opção do biogás continua a ajudar bastante neste contexto mais próximo da realidade, comparado ao da seção 5.1. Assim, em ambos os contextos, a alternativa de produção do biogás proporciona maiores ganhos, especialmente para as agroindústrias da região.

A grande barreira na adoção da tecnologia de biodigestão, segundo os produtores da região, é o alto custo de investimento na compra do biodigestor. Pode-se fazer alguns exercícios usando os resultados obtidos neste estudo para se ter uma ideia do tempo de retorno do investimento. Para isso, será utilizado o valor obtido para a aquisição do biodigestor com o Grupo JB, que é de R\$ 12 milhões, em valores correntes, e os valores de benefício líquido da opção num contexto sem prejuízos ambientais (Tabela 6), assim como os valores das reduções nas perdas de excedentes (Tabela 11). Assim, inicialmente, pode-se calcular o tempo de retorno usando o valor do investimento e o ganho de excedente decorrente da opção do biogás para cada uma das destilarias (tabelas 6 e 13) num contexto em que os níveis de qualidade da água são atendidos (seção 5.1).

Tabela 13 – Cálculo do retorno do investimento no biodigestor.

	t = período de recuperação do capital aplicado em anos
JB	$t = \frac{12}{5,085} = 2,3598$
Sibéria	$t = \frac{12}{0,162} = 74,0740$
INEXPORT	$t = \frac{12}{2,942} = 4,0788$

Fonte: Elaboração própria.

Assim, neste contexto, o retorno simples que a JB teria com essa tecnologia é de mais de 2 anos, ou seja, seriam necessárias mais de 2 safras para que esta destilaria recuperasse seu investimento. No caso da Sibéria, por ser uma destilaria de pequeno porte em relação as demais (e terem sido usados valores obtidos da JB) produz pouco efluente e, portanto, seria viável obter um biodigestor de capacidade menor e, conseqüentemente, custo inicial mais baixo, para que o retorno da aplicação fosse verificado num prazo mais curto, e a alternativa se mostrasse viável economicamente. Com relação a INEXPORT, o número de safras necessárias para retorno da aplicação seria cerca de 4.

Fazendo este mesmo exercício usando as reduções nas perdas de excedentes, do primeiro cenário para o segundo, devido a mudanças nas restrições institucionais (ver seção 5.2 e Tabela 11) tem-se outros prazos de retorno do investimento para as agroindústrias, os quais estão apresentados na tabela a seguir.

Tabela 14 – Cálculo do retorno do investimento no biodigestor considerando reduções nas perdas de excedentes.

	t = período de recuperação do capital aplicado em anos
JB	$t = \frac{12}{1,047} = 11,4613$
INEXPORT	$t = \frac{12}{0,033} = 363,3636$

Fonte: Elaboração própria.

Verifica-se, portanto, que os prazos de recuperação, neste caso, são bem maiores que os encontrados na situação anterior (Tabela 13). A JB, que antes necessitava de pouco mais de 2 safras para ter o retorno do capital investido, agora precisa de aproximadamente 12 e, para INEXPORT, a aquisição do biodigestor se torna inviável, pois o tempo de recuperação do investimento é de cerca de 364 safras. Com relação a Sibéria, observa-se mais uma vez a inviabilidade da adoção da tecnologia de biodigestão anaeróbia, já que não há variações de excedentes em nenhum dos cenários analisados. Ou seja, esta destilaria não perde nem deixa de ganhar nada, em termos de excedente, com a produção do biogás, quando diferentes níveis de qualidade são requeridos e, por isso, não foi inserida na Tabela 14.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho teve como objetivo calcular e comparar benefícios e custos sociais da alternativa da produção do biogás para dois cenários, utilizando modelagem econômico-hidrológica integrada. Num contexto em que todas as restrições de qualidade são atendidas, pôde-se calcular os benefícios sociais decorrentes da utilização da vinhaça na produção do biogás. Os custos sociais, por sua vez, foram obtidos através da diferença entre os benefícios líquidos obtidos para diferentes níveis de qualidade ambiental em cada cenário estudado, simulando um contexto em que os usuários deveriam atuar de forma a atender aos limites de qualidade institucionais. Além disso, como o modelo permite mensurar os diferentes componentes dos excedentes dos produtores e consumidores, pôde-se analisar os mesmos diante da existência ou não da opção de produzir o biogás.

Os resultados mostraram que, diante de uma fiscalização eficaz para manutenção de níveis de qualidade adequados, o benefício social líquido da opção do biogás é positivo. Este valor foi de R\$ 8,197 milhões, sendo o aumento no excedente dos agroindustriais responsável por quase 100% destes ganhos. Além disso, a opção do biogás faz com que os ganhos com a fertirrigação passem a ser positivos e torna viável o tratamento das sobras, uma vez que a carga orgânica (DBO) do efluente, após o processo de biodigestão, equivale a 15% da original.

Num contexto em que se simula a passagem de uma situação com algum prejuízo ambiental para outra que atende os limites institucionais de qualidade de água, nos dois cenários, verificou-se que um custo social consideravelmente menor foi obtido quando a tecnologia de biodigestão foi considerada pelas agroindústrias (Cenário 2). Enquanto o custo social foi de R\$ 1,104 milhões quando as opções de disposição da vinhaça eram apenas fertirrigação *in natura* e/ou tratamento (Cenário 1), com a produção do biogás esse custo caiu para R\$ 0,021 milhões, mostrando mais uma vez ganhos devido a adoção dessa alternativa.

No caso em que a opção do biogás é incluída, verificou-se que as áreas de cana mais distantes deixam de ser fertilizadas (custos de transporte nulos), independente do nível de qualidade ambiental exigido. Sendo assim, o aumento nos custos de tratamento das sobras de vinhaça para JB, ocorrido da Situação de algum prejuízo ambiental para a de nenhum prejuízo, foi decorrente da redução na quantidade do efluente alocado para fertirrigação das áreas mais próximas. Ou seja, diante de restrições de qualidade ambiental mais restritivas, uma menor quantidade de vinhaça foi aplicada no solo das áreas plantadas de cana localizadas

nos arredores da unidade industrial pois, com a redução da carga orgânica, o tratamento do efluente passou a ser viável.

No que se refere ao retorno do investimento a ser realizado na tecnologia de biodigestão anaeróbia observou-se prazos viáveis de recuperação do capital aplicado, pouco mais de 2 e 4 safras, para JB e INEXPORT, respectivamente, utilizando os benefícios potenciais ou máximos da opção do biogás. No entanto, ao considerar um contexto mais real, em que existem certos prejuízos ambientais e uma pressão regulatória venha a aumentar, o tempo de retorno do investimento mostrou-se relativamente inviável. Na verdade, a situação atual provavelmente está associada a prejuízos ambientais bem maiores que os simulados e as opções de disposição da vinhaça consideradas no modelo impõem custos que atualmente os agroindustriais não arcam. Portanto, os custos sociais devem ser maiores do que os simulados e a possibilidade de uma regulação mais estrita já está levando os produtores de etanol a estudos de obtenção da tecnologia de biodigestão anaeróbia.

No caso da Sibéria, mesmo no contexto com um benefício social máximo, investir num biodigestor com a mesma capacidade que o adquirido pelas demais destilarias não é viável, pois essa agroindústria produz consideravelmente menos efluente que as outras.

A maior limitação do trabalho está relacionada a obtenção de dados fidedignos dos produtores de etanol da região, especialmente no que se refere as formas de disposição da vinhaça e aos custos associados. Além disso, valores mais específicos, relativos a biodigestores com capacidade compatível com a produção de vinhaça de cada um dos produtores da região não foram encontrados.

De uma forma geral, o modelo dá uma indicação confiável, de que a adoção da alternativa de produção do biogás gera benefícios sociais consideráveis. Isto porque as condições que são simuladas pelo modelo são mais favoráveis que as reais, no que se refere aos prejuízos ambientais. No entanto, a menos que haja regulação e políticas públicas que levem as empresas a internalizarem os custos que a poluição impõe a sociedade, este tipo de solução pode não ser considerada.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BANCO NACIONAL DE DESENVOLVIMENTO (BNDES); CENTRO DE GESTÃO E ESTUDOS ESTRATÉGICOS (CGEE). *Bioetanol de cana-de-açúcar: energia para o desenvolvimento sustentável*. 1º Edição, Rio de Janeiro: BNDES, 2008.

BERNDES, G. 2008. *Water Demand for global bioenergy production: trends, risks and opportunities*. ISBN 978-3-9396191-21-9. WBGU. Goteborg, Berlin.

BOARDMAN, A. E. et al, 2001. *Cost Benefit Analysis: Concepts and Practice*. Third Edition. Pearson Education Inc., Upper Saddle River, New Jersey.

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.

CARRERA-FERNANDEZ, J. *Estudo de cobrança pelo uso da água na bacia hidrográfica do Rio Pirapama*. Cidade: CPRH, ago. 1999. (Relatório de Consultoria).

COMPANHIA DE TECNOLOGIA DE SANEAMENTO AMBIENTAL (CETESB). 2005. *Norma Técnica - P4.231 – Vinhaça Critérios e Procedimentos para Aplicação no Solo Agrícola*. Disponível em: http://www.udop.com.br/download/legislacao/meio/vinhaca/portaria_4231_vinhaca.pdf, acesso 27/01/11.

CORAZZA, R. I. *Impactos ambientais da vinhaça: controvérsias científicas e lock-in na fertirrigação*. XLIV Congresso da SOBER, 2006.

CORAZZA, R. I.; SALLES-FILHO, S. *Opções produtivas mais limpas: uma perspectiva evolucionista a partir de um estudo de trajetória tecnológica na agroindústria canavieira*. XXI Simpósio de Gestão da Inovação Tecnológica. São Paulo, novembro de 2000.

DEPARTAMENT FOR INTERNACIONAL DEVELOPMENT (DFID); COMPANHIA PERNAMBUCANA DO MEIO AMBIENTE (CPRH). *Diagnóstico ambiental integrado da bacia do Pirapama*. Recife: CPRH, 1999.

ELIA NETO, A.; NAKAHODO, T. *Caracterização físico-química da vinhaça - projeto nº 9500278*. Relatório Técnico da Seção de Tecnologia de Tratamento de Águas do Centro de Tecnologia Copersucar, Piracicaba, 1995. 26p.

FERREIRA, R. G. *Matemática Financeira Aplicada: Mercado de Capitais, Administração Financeira, Finanças Pessoais*. 5ª edição, São Paulo: Atlas, 2000.

FREIRE, W. J.; CORTEZ, L. B. *Vinhaça de cana-de-açúcar*. Guaíba – RS. Livraria e Editora Agropecuária, 2000.

GERMANO, B. N. *Identificação do custo de oportunidade para alocação de efluentes nas áreas plantadas de cana na bacia do Pirapama com vistas ao atendimento das restrições de qualidade do rio, através do Modelo Econômico-Hidrológico Integrado*. Monografia – UFPE, Recife, jul. 2008.

GERMANO, B. N.; MORAES, M. M. G. A.; RAMOS, F. S. *Custos de oportunidade para alocação de efluentes nas áreas plantadas de cana na bacia do rio Pirapama*. Estudos Econômicos, São Paulo, vol. 40, n. 3, p. 679-711, julho-setembro 2010.

GRANATO, E. F. *Geração de energia através da biodigestão anaeróbica da vinhaça*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista, Abril de 2003.

GUNKEL, G. et al. 2007. *Sugarcane Industry as a Source of Water Pollution - Case Study on the Situation in Ipojuca River, Pernambuco, Brazil*. Water Air Soil Pollution 180: 261-269.

HAANDEL, A. C. van. *Integrated energy production and reduction of the environmental impact at alcohol distillery plants*. Water Science & Technology, vol 52 n° 1-2 pp 49–57, 2005.

JORNALCANA, Maio de 2008. Disponível em:
<http://www.jornalcana.com.br/pdf/173//tecagr.pdf>, acesso 04/10/2010.

LAMO, P. *Sistema produtor de Gás Metano Através de Tratamento de Efluentes Industriais*. METHAX/BIOPAQ – CODISTIL – Piracicaba, 1991.

MENDES, B. G. *Avaliação da cobrança como mecanismo econômico alocativo na gestão de Bacias Hidrográficas: o caso da bacia do rio Pirapama*. Dissertação de Mestrado, UFPE, Agosto de 2007.

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*. Recife, UFPE. Tese de Doutorado.

MORAES, M. M. G. A.; CIRILO, J. A.; SAMPAIO, Y. *Integração dos Componentes Econômico e Hidrológico na Modelagem de Alocação Ótima de Água para Apoio a Gestão de Recursos: Uma Aplicação na bacia do Pirapama*. Revista Economia, vol. 7, n° 2, maio/agosto de 2006, pg.s 332 a 364.

MORAES, M. M. G. A. et al. *Gestão de Recursos Hídricos usando modelagem econômico-hidrológica integrada na identificação de alocação ótima de água entre usos múltiplos*. REGA. Revista de Gestão de Águas da América Latina, v. 3, p. 29-44, 2006.

_____. 2008. *Apoio a decisão na gestão de recursos hídricos usando modelo econômico-hidrológico integrado para alocação ótima de água: uma aplicação na bacia do rio Pirapama*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, v. 13, n. 1, p. 29-42, 2008.

_____. 2009. *Avaliação de Instrumentos Econômicos alocativos na gestão de bacias hidrográficas usando modelo econômico-hidrológico integrado*. REGA. Revista de Gestão de Águas da América Latina, v. 6, p. 49-64.

_____. 2010. *Joint Water Quantity-Quality Management in a Biofuel Production Area-Integrated Economic-Hydrologic Modeling Analysis*. J. Water Resour. Plng. and Mgmt. Volume 136, Issue 4, pp. 502-511 (July/August).

MOREIRA, J. R. *Water use and impacts due ethanol production in Brazil*. “Linkages between Energy and Water Management for Agriculture in Developing Countries International Conference”, Hyderabad, International Water Management Institute and Food and Agriculture Organization of the United Nations, janeiro, 2007.

OMETTO, J. P. H. B. et al. 2000. *Effects of land use on water chemistry and macroinvertebrates in two streams of the Piracicaba River Basin, Southeast Brazil*. Freshwater Biology 44:327–337.

PINTO, C. P. *Tecnologia da Digestão Anaeróbia da Vinhaça e Desenvolvimento Sustentável*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Abril de 1999.

RAMOS, F. S. *Qualidade do meio-ambiente e falhas de mercado*. Análise Econômica, ano 14, Março/Setembro 1996, p. 39-51.

RIBEIRO, M. M. R. *Alternativas para a outorga e a cobrança pelo uso da água*. Tese de Doutorado, UFRS, Janeiro de 2000.

SILVA, S. C.; RIBEIRO, M. M. R. *Enquadramento dos corpos d'água e cobrança pelo uso da água na bacia do rio Pirapama – PE*. 2006, 022p. ABES, Vol. II, nº04.

SIMPSON, T. W. et al. 2009. *Impact of Ethanol Production on nutrient cycles and water quality: the United States and Brazil as case studies*. Pages 153-167 in R. W. Howarth and S. Bringezu(eds) Biofuels: Environmental consequences and Interactions with Changing Land Use.

SMEETS, E. et al. *The sustainability of Brazilian ethanol – An assessment of the possibilities of certified production*. Biomass and Bioenergy, v. 32, n.8, p. 781-813, 2008.

THOMAS, J. M.; CALLAN, S. J. *Economia ambiental: fundamentos, políticas e aplicações*. São Paulo: Cengage Learning, 2009.

TROBISH, K. H. 1992. *Recent developments in the treatment of chemical waste water in Europe*. Water Science and Technology, 26: 319-322.

UNEP DTIE, Oeko-Institut and IEA Bioenergy Task 43. *Zooming in on the Bioenergy and Water Nexus*. 2011. In elaboration.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA (UNESP). *Termo de Referência para o Workshop Tecnológico: Vinhaça*. Setembro de 2007. Disponível em: http://www.apta.sp.gov.br/cana/anexos/Termo_de_Referencia_Vinhaca.pdf, acesso 10/05/2010.

VARIAN, H. R. *Microeconomia – princípios básicos*. Rio de Janeiro: Campus, 2003.

VON SPERLING, M. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. Terceira Edição, v.1, 2005.

WILKIE, A. C.; RIEDESEL, K. J.; OWENS, J. M. *Stillage characterization and anaerobic treatment of ethanol stillage from conventional and cellulosic feedstocks*. Biomass and Bioenergy 19 (2000), p. 63-102.

WILLINGTON, I. P.; MARTEN, G. G. *Options for handling stillage waste from sugar-based fuel ethanol production*. Environment and Policy Institute, East-West Center, Honolulu, Hawaii 96848 (U.S.A.). Resources and Conservation, 8 (1982), pag. 111-129. Elsevier Scientific Publishing Company, Amsterdam - Printed in The Netherlands.

PAGINAS CONSULTADAS:

<http://www.bancor.com.br/vinha%E7a.htm>, acesso 15/07/2010.

<http://www.harbra.com.br/loja/vernews.php?id=56>, acesso 15/07/2010.

<http://www.cepea.esalq.usp.br/alcool/>, acesso 02/12/10.

<http://www.mfrural.com.br/>, acesso 02/12/10.

<http://www.celpe.com.br/>, acesso 02/12/10.

<http://www.compesa.com.br/index.php?option=content&task=view&id=15&Itemid=32>, acesso 02/12/10.

http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/indicadores/precos/inpc_ipca/defaultseriesHist.shtm, acesso 15/12/10.

<http://tribunapopular.wordpress.com/2007/09/20/convenio-libera-r-284-milhoes-para-o-sistema-pirapama/>, acesso 07/01/11.

<http://www.diariodepernambuco.com.br/vidaurbana/nota.asp?materia=20110110094751>, acesso 24/01/11.

<http://www.dicionario.pro.br/dicionario/index.php/Eutrofiza%C3%A7%C3%A3o>, acesso 07/01/11.