

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

Bruna da Nóbrega Germano
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

Márcia Maria Guedes Alcoforado de Moraes
Universidade Federal de Pernambuco – UFPE

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). The results showed that the net gains received by users are greater when the biogas production alternative is considered. Additionally, viable terms for returns on the investment in anaerobic biodigestion technology can be obtained by two of the three agribusinesses analyzed when considering the potential benefits of adopting this technology.

Keywords: fertirrigation, anaerobic digestion, social benefit.

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).

No processo de produção de etanol atual, independente da biomassa utilizada, não há 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, 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).

No Brasil, que produz etanol a partir da cana-de-açúcar, o *stillage*, nacionalmente conhecido como vinhaça, é gerado em enormes volumes líquidos com grandes quantidades de potássio, mas pouco valor nutricional para ser aproveitado como ração animal (produto resultante do processo de evaporação industrial). 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). Além disso, o baixo valor do produto final comparado aos altos custos de capital e energia, torna essa alternativa inviável economicamente no país.

Devido a isso, a opção que vem sendo utilizada é a disposição deste resíduo *in natura* como fertilizante nas lavouras de cana (fertirrigação). 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 humano e geração de energia elétrica. Esse é exatamente o caso da bacia do rio Pirapama, cujos dados e modelagem econômica-hidrológica, já desenvolvida para o primeiro trecho da mesma (MORAES et al, 2010), são utilizados neste estudo.

Problemas na qualidade das águas relacionados a fertirrigação, bem como a inviabilidade econômica da evaporação industrial, no Brasil, 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 todo 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 exploração da energia residual contida na vinhaça através da biodigestão anaeróbia para produção do biogás.

A opção do 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 poder ser vendida à rede (UNEP, 2011).

Assim, o objetivo deste trabalho é obter uma plataforma para mensurar o valor do ganho social líquido da adoção, pelas agroindústrias da região, de mais uma opção para uso econômico da vinhaça. Esse ganho é observado tanto para os produtores e consumidores individualmente como para a sociedade como um todo, o que permite, portanto, subsidiar decisões na esfera pública e privada que levem ao desenvolvimento sustentável da região.

2. 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, a saber: 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 m³ 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).

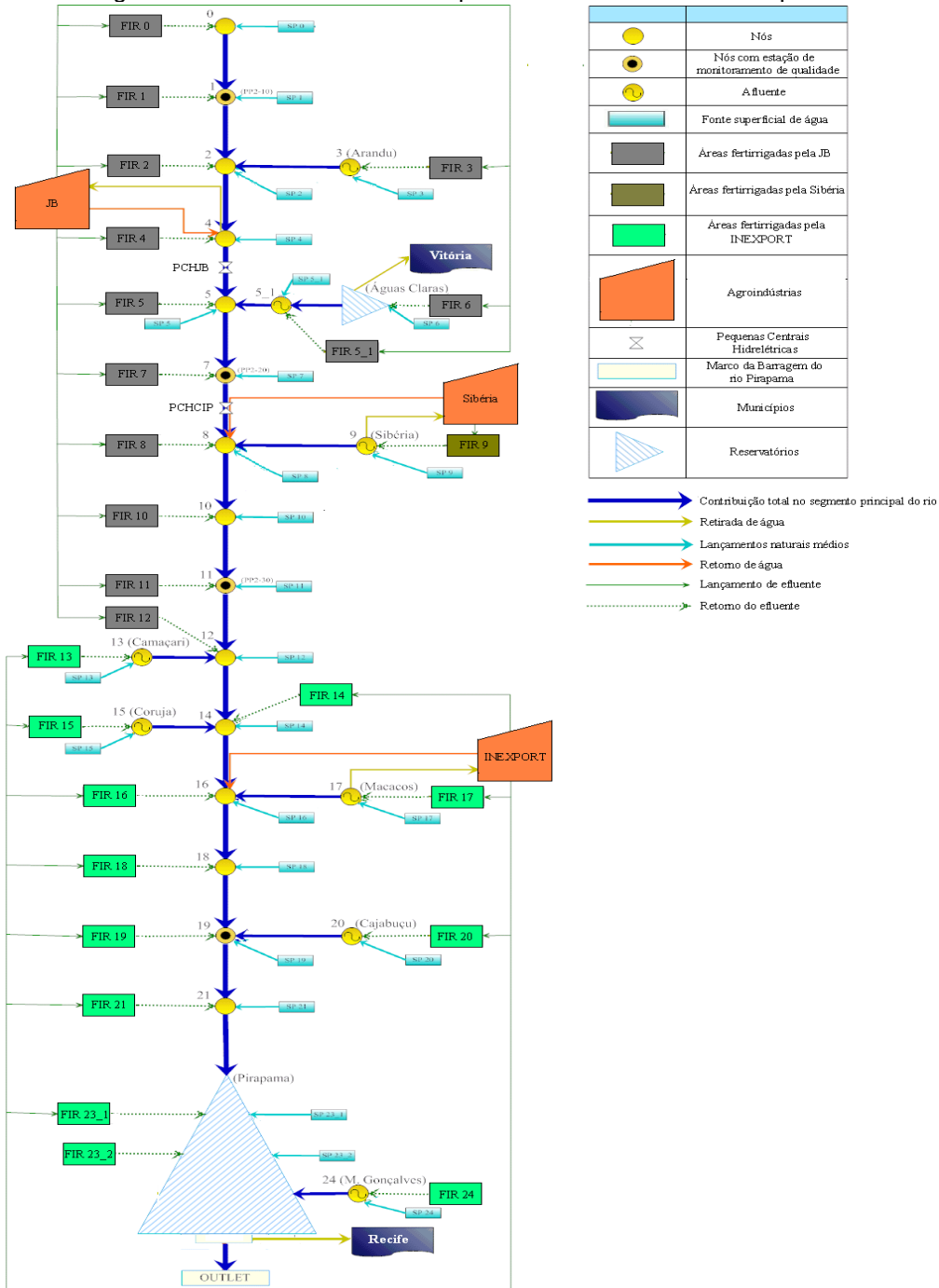
O Sistema Pirapama é uma obra de responsabilidade do governo do estado e que recebeu recursos do Programa de Aceleração do Crescimento (PAC). No total, serão cerca de R\$ 500 milhões investidos para que 3,5 milhões de pernambucanos deixem de sofrer com o problema da falta de água. A conclusão desse empreendimento estava prevista para dezembro de 2010. No entanto, esse sistema está sendo construído em etapas, e apenas 2 foram concluídas neste prazo. A terceira etapa de conclusão do Sistema Pirapama deverá ocorrer ainda no primeiro semestre de 2011 (Para maiores informações consultar a página www.diariodepernambuco.com.br/vidaurbana/nota.asp?materia=20110110094751).

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 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. Através dessa figura, pode-se identificar 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. Destas 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.

Figura 1 – Rede de nós e links representativa da bacia do Pirapama.



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

3. METODOLOGIA

O modelo econômico-hidrológico integrado original será atualizado com valores econômicos do ano de 2010 (Cenário 1) e adaptado (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 fertilização e tratamento, que é a produção do biogás.

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.

3.1. As formas de disposição da vinhaça utilizadas neste estudo

3.1.1. Fertirrigação

Dentre as várias alternativas existentes 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* 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).

Dessa forma, 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 agrônômicos, 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 (JORNALCANA, 2008).

Vale destacar que, 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. É necessário, portanto, 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.

3.1.2. 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. O efluente líquido final desse processo 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 permanece com seu potencial como fertilizante.

Tabela 1 – 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 apresenta: baixo consumo de energia, pequena produção de lodo (descarte), eficiência na diminuição da carga orgânica, 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. Vários são os modelos existentes 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.

O biogás é, assim, 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. Pode ser utilizado para gerar energia elétrica e térmica, e também substituindo o gás natural como combustível para veículos automotores.

3.2. 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 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,

$$CO = VVG \times DQO \quad (1)$$

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:

$$PB = CO \times E \times F \quad (2)$$

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:

$$GEB = PB \times PCIB \quad (3)$$

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:

$$PEEB = GEB \times E1 \quad (4)$$

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 2 – Parâmetros necessários para obtenção das equações 1, 2, 3 e 4.

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

Fonte: Elaboração própria.

3.3. 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 agroindustriais (provavelmente os agroindustriais não tratam o efluente pois, em geral, não há sobras, o que impede que os limites de qualidade sejam realmente atendidos), 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 que, muitas vezes, 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 desse co-produto, 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), 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).

Usando os dois modelos, poderão ser calculados os benefícios sociais líquidos 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.

3.3.1. Descrição da Modelagem Econômico-Hidrológica Integrada (Adaptado de Moraes et al. (2006))

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-demanda. 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 trecho modelado (ver Figura 1) 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.

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,

$$B.Liq(usuário,t) = e^{C_1} \left[\frac{C_2^{\frac{1}{\eta}+1}}{\frac{1}{\eta}+1} - \frac{|C_2 - Q_{aloc}|^{\frac{1}{\eta}+1}}{\frac{1}{\eta}+1} \right] - C_{médio} \cdot Q_{aloc}(usuário,t) \quad (5)$$

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.

$$F_{objetivo} = \sum_{mun} B.Liq_{AH}(usuário_{mun}) + \sum_{aind} B.Liq_{AI}(usuário_{aind}) + \sum_{pch} B.Liq_{GE}(usuário_{pch}) + \sum_{firrig} B.Liq_{fir}(usuário_{firrig}) \quad (6)$$

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) 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.

3.4. Alterações e adaptações no modelo

3.4.1. Modelo original

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 (o subíndice AIND serve para especificar de que agroindústria são os custos e benefícios):

$$BL_{AIND} = BB_{AIND} - CM_{AIND} - PB_{AIND} + BL_{AIND}F \quad (7)$$

onde:

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:

$$BL_{AIND}F = \sum_{i=FIR0}^{FIR24} BLFIR_i \quad (8)$$

onde:

$$BLFIR_i = BBF_{AIND} - CA_{AIND} + GF_{AIND} - CT_{AIND} \quad (9)$$

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

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

CA_{AIND} = custo de aspersão do efluente, em milhões de reais no ano;

GF_{AIND} = economia com o uso de fertilizantes, em milhões de reais no ano;

CT_{AIND} = custos com transporte da vinhaça para fertirrigar áreas mais distantes, 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 objetivo 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:

$$F_{objetivo} = \sum_{mun} BL_{AH} (usuário_{mun}) + \sum_{aind} BL_{AI} (usuário_{aind}) + \sum_{pch} BL_{GE} (usuário_{pch}) \quad (10)$$

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 investimento (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) e o retorno do mesmo não é imediato.

3.4.2. Adaptações do modelo para incluir a alternativa de biodigestão anaeróbia da vinhaça e introdução de novos parâmetros

Para cálculo dos custos e benefícios associados a implantação dessa tecnologia utilizou-se como base o estudo desenvolvido por Granato (2003). 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 3 – Estimativas de custos relativos à aquisição do Biodigestor.

Custos	RS/safra	RS/m ³ de vinhaça (756.000 m ³ /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.

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 3.2 e os dados da agroindústria JB, foi introduzida a nova equação de benefício líquido dos agroindustriais, dada por:

$$BL_{AIND} = BB_{AIND} - CM_{AIND} - PB_{AIND} + BL_{AIND}F + BL_{AIND}PBG \quad (11)$$

onde:

$$BL_{AIND}PBG = - CO*PSW + P*((PEEB/Hsd*Tc*Cv)*Hsm) \quad (12)$$

$BL_{AIND}PBG$ = 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, que é de 0,473256429 (ver Tabela 3);

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

P = preço do MWh para venda da energia excedente, considerado de R\$ 145,00 pela JB;

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

Hsd = número de horas no dia (24);

Tc = taxa de conversão de Kcal para kW, que é de 860;

Cv = constante utilizada para converter kW em MW, ou seja, 1000;

Hsm = número de horas no mês (720).

Os demais termos já foram descritos nas equações 7, 8, e 9.

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.

3.5. 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:

$$t = \frac{C_0}{L} \quad (13)$$

onde:

t = tempo de retorno;

C₀ = 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 capital (Ver Ferreira (2000) e a fórmula de Getúlio S. Dowsley) mas, considerando-se 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).

4. OBTENÇÃO E ANÁLISE DOS RESULTADOS

4.1. 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 4 – Benefícios líquidos associados a cada usuário nos cenários 1 e 2, em milhões de reais no ano.

Usuários	Cenário 1	Cenário 2	Varição 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 4 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, 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, resultante da diminuição da carga orgânica do efluente (15% da original) que é usado na fertirrigação das áreas próximas ao reservatório Águas Claras (FIR9). A quantidade de efluente despejada em FIR9 pela agroindústria Sibéria é a mesma. No entanto, como a carga orgânica diminui ocorre uma maior disponibilidade de água. Isto exige menores volumes de água no reservatório para evitar a eutrofização. Assim, maiores volumes de água, além de serem alocados para Vitória, devem fluir sobre a PCHCIP, já que esta recebe água das liberações desse reservatório (ver Figura 1).

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

Tabela 5 – Resultados dos componentes do benefício líquido dos agroindustriais, relativos aos cenários 1 e 2, em milhões de reais por ano (safra).

Cenário 1									
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									
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)									
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.

4.2. Obtenção do prazo de retorno do investimento no biodigestor

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 o ganho de excedente decorrente da opção do biogás para cada uma das destilarias (tabelas 4 e 6) num contexto em que os níveis de qualidade da água são atendidos (seção 4.1).

Tabela 6 – Cálculo do retorno do investimento no biodigestor (t).

JB	$t = (12 / 5,085) = 2,3598$
Sibéria	$t = (12 / 0,162) = 74,0740$
INEXPORT	$t = (12 / 2,942) = 4,0788$

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, consequentemente, 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.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

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\$ 8,237 milhões, sendo o aumento no excedente dos agroindustriais responsável por quase 100% destes ganhos. Além disso, a opção do biogás favorece a aplicação da vinhaça no solo (os ganhos com a fertirrigação passaram a ser positivos) e torna viável o seu tratamento, uma vez que a carga orgânica (DBO) do efluente, após o processo de biodigestão, equivale a 15% da original.

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 caso da Sibéria, 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 (exceto a JB) 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 concerne 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*. 1ª 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.

- 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.
- 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.; 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.
- 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.

- _____. 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).
- PINTO, C. P. *Tecnologia da Digestão Anaeróbia da Vinhaça e Desenvolvimento Sustentável*. Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual de Campinas, Abril de 1999.
- 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.
- 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.
- 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.diariodepernambuco.com.br/vidaurbana/nota.asp?materia=20110110094751>, acesso 24/01/11.