

ANÁLISE DO CICLO DE VIDA APLICADA À PRODUÇÃO DE BIOETANOL A PARTIR DE MATERIAL LIGNOCELULÓSICO REMANESCENTE EM DEJETO BOVINO

Amaro de Azevedo¹, Diego de Souza¹, Rosana de Cassia de Souza Schneider^{1-2*}, Michele Hoeltz¹⁻³

¹Programa de Pós-Graduação em Tecnologia Ambiental, Universidade de Santa Cruz do Sul, CEP 96815-900, Santa Cruz do Sul, RS, Brasil.

²Departamento de Química e Física, Universidade de Santa Cruz do Sul, CEP 96815-900, Santa Cruz do Sul, RS, Brasil.

³Departamento de Biologia e Farmácia, Universidade de Santa Cruz do Sul, CEP 96815-900, Santa Cruz do Sul, RS, Brasil.

*E-mail: rosana@unisc.br

Recebido em: 05/06/2016

Aceito em: 28/06/2016

RESUMO

Biocombustíveis podem ter uma contribuição significativa na redução de danos ambientais dependendo da sua rota de produção. A produção de bioetanol, ou etanol lignocelulósico, pode ser uma alternativa frente aos combustíveis fósseis e de grande relevância estratégica para o Brasil. Neste contexto, estudamos a análise do ciclo de vida (ACV) da produção de etanol a partir do material lignocelulósico contido no dejetos bovino. Esses dejetos são formados por uma biomassa rica em celulose, que pode ser convertida em glicose e em outros açúcares fermentáveis e, então, ao bioetanol. Para tanto, consideramos como Unidade Funcional o processamento de 1.000 kg de dejetos. Para a análise dos impactos aplicamos o método *Ecoindicator* 99, através das bibliotecas EcoInvent, do software SimaPro versão 7.3.2. Foram consideradas as seguintes categorias de impacto: cancerígenos, orgânicos e inorgânicos inaláveis, mudanças climáticas, radiação, camada de ozônio, ecotoxicidade, acidificação/eutrofização, uso do solo, minerais e combustíveis fósseis. Para a avaliação de danos ambientais, essas categorias foram agrupadas em três categorias de danos: danos à saúde humana, danos aos ecossistemas e danos aos recursos naturais. De acordo com o estudo realizado, verificamos que o insumo do processo que mais contribuiu na ACV foi o consumo de energia, resultando em maior impacto ambiental na categoria “cancerígenos”, agrupada na categoria de “danos à saúde humana”. A partir dos resultados, foi possível minimizar os impactos propondo modificações no processo, principalmente nos sistemas de aquecimento que poderão ser utilizados.

Palavras-chave: Dejetos bovino. Bioetanol. ACV.

1 Introdução

Com o crescente consumo de combustíveis fósseis, e consequente crescimento de emissões de poluentes, novas opções de energia tornam-se necessárias, principalmente de fontes renováveis alternativas, como o uso de resíduos agropecuários [1].

Existem inúmeras iniciativas para o aproveitamento de resíduos vegetais na produção de etanol, empregando métodos convencionais e em busca de melhorias, com uso de tratamento químico, com microrganismos selecionados e/ou enzimas. Até mesmo com biomassas tradicionais ainda existem inovações a serem inseridas no processo, levando a maior eficiência e menor custo [2-4].

Assim, é preciso otimizar processos como pré-tratamento, hidrólise enzimática e novos microrganismos para a fermentação, que inclusive convertam as pentoses para a produção de etanol [5, 6]. Dessa forma, as inovações na área vão além do bagaço de cana, incluindo diversas culturas e

resíduos industriais e buscando o desenvolvimento ao alcance de um menor custo e maior produtividade.

Destaca-se, no entanto, que a produção de biocombustíveis é controversa devido aos benefícios ambientais incertos e as desvantagens sociais, tais como, uso do solo e ameaças à segurança alimentar [7], portanto, o uso de resíduos pode ser a mais promissora alternativa para a produção de biocombustíveis, uma vez que os biocombustíveis de primeira geração podem ser responsáveis pelo aumento dos preços dos alimentos [8]. Nesse sentido, o etanol de material lignocelulósico residual não compete com a produção de alimentos [9].

Muitos estudos estão sendo realizados, tanto no Brasil como no exterior, para utilização de diferentes biomassas na produção alternativa de biocombustíveis, tais como, resíduos da colheita de cereais e da produção animal [1, 10-14].

A produção animal é, então, uma fonte potencial de material lignocelulósico, através dos dejetos gerados.

No Rio Grande do Sul, o rebanho de bovinos em 2007 era de 13.516.426 cabeças (6,8% da produção nacional), e o

nacional 199.752.014 cabeças. A produção brasileira em 2013 foi de 208.000.000 cabeças, correspondendo a um aumento de 3% em relação ao ano anterior. Destas, 1 milhão estão em confinamento, não considerando o gado leiteiro, que na condição confinado ou semiconfinado tem aumentado, buscando mais produtividade e lucratividade [15].

Os animais confinados podem produzir dejetos contendo 40 kg de esterco e 40 kg de urina por dia e por cabeça, e os semiconfinados, de 15 a 20 kg de dejetos aproximadamente [16]. Esse dejetos representa um reservatório de biomassa ainda inexplorada para produção de energia, dentre eles o etanol [17].

O dejetos bovino contém material lignocelulósico não digerido e sua composição depende da dieta alimentar, podendo ser facilmente separado em sistemas confinados. Bovinos convertem apenas 30 a 40% do alimento ingerido em produção [18]. Por outro lado, é importante dar aproveitamento aos dejetos, pois se não forem adequadamente manejados, podem gerar uma grande carga poluidora. Caso esses resíduos sejam arrastados e atinjam os cursos hídricos, a sua alta Demanda Bioquímica de Oxigênio reduzirá o teor de oxigênio da água, provocando a morte de peixes e outros organismos. Além disso, a presença de nutrientes como N e P estimulam o crescimento de plantas aquáticas, podendo provocar a eutrofização do meio hídrico.

A biomassa lignocelulósica é composta por polímeros de carboidratos (celulose e hemicelulose), lignina e outros como extrativos, ácidos, sais e minerais. A celulose e hemicelulose, que compreendem tipicamente dois terços da massa seca, são polissacarídeos que podem ser hidrolisados para açúcares e, eventualmente, serem fermentados em etanol. Entretanto, a lignina não é facilmente hidrolisada para ser utilizada na produção de etanol [19]. Vários estudos têm sido realizados para a avaliação do desempenho ambiental na produção de etanol celulósico, por exemplo, de eucalipto [20], trigo [21], palha [22], grama [23], entre outros.

Considerando os aspectos da produção de bioetanol a partir de biomassa lignocelulósica, o principal objetivo deste estudo foi apresentar a Análise do Ciclo de Vida (ACV) da produção de bioetanol lignocelulósico produzido a partir do dejetos bovino. Para isso, o processo foi instalado em escala laboratorial utilizando parâmetros já otimizados [24]. Os dados obtidos foram organizados para a unidade funcional estabelecida no estudo e a Avaliação do Ciclo de Vida foi realizada com o auxílio do software Simapro 7.3.2.

2 Parte Experimental ou Metodologia

2.1 Objetivo e escopo

O objetivo foi avaliar os potenciais impactos ambientais da produção de etanol, a partir do material

lignocelulósico do dejetos bovino, e interpretar os resultados como uma estratégia para reduzir os impactos ambientais do bioetanol a ser produzido no futuro. A fronteira do sistema para a avaliação do ciclo de vida do presente bioetanol está ilustrado na Figura 1. Considerou-se que a instalação de equipamentos deverá estar ao lado do local da coleta de dejetos, evitando o transporte de materiais.

2.2 Inventário do ciclo de vida (ICV)

O ICV foi realizado em escala laboratorial, no período de agosto de 2013 a dezembro de 2014, e com base na configuração dos equipamentos selecionados para a produção de etanol em escala piloto.

Para tanto, foi realizada pesquisa de equipamentos, junto a fornecedores do mercado nacional, quanto a características, dimensões, consumo de energia e outras informações necessárias. A Unidade Funcional considerada foi de 1000 kg de dejetos.

O método considerado para a produção de etanol foi o da Hidrólise e Fermentação em Separado, em inglês *Separated Hydrolysis and Fermentation* – SHF, com condições registradas em Vancov et al. [24].

O processo considerado para o ICV consistiu em secagem, moagem, pré-tratamento ácido, tratamento enzimático, fermentação e destilação para obtenção do bioetanol lignocelulósico, conforme disposto na Figura 2.

Dados relacionados a emissões e consumo de matéria-prima foram registrados em escala laboratorial e convertidos para uma escala de 1000 kg de dejetos coletado (base úmida). O consumo de energia foi calculado conforme os equipamentos selecionados para escala piloto. O inventário do processo foi realizado conforme as condições projetadas para 193 kg de biomassa seca, obtida a partir de 1000 kg de dejetos, conforme percentual de água obtido após a secagem em laboratório.

2.3 Avaliação dos impactos do ciclo de vida (AICV)

Após a construção do ICV foi possível avaliar os impactos com o software Simapro versão 7.3.2, utilizando a base de dados EcoInvent. O método escolhido foi o *Ecoindicator 99* que apresenta as seguintes categorias de danos:

Danos à saúde: Expressa o número de anos perdidos mais o número de anos vividos com incapacidade. Unidade: *DALYs - Disability Adjusted Life Years* (Anos de vida perdidos ou vividos com incapacidade).

Danos à qualidade dos ecossistemas: Expressa a perda de espécies em uma determinada área. Unidade: *PDF*m2yr - Potentially Disappeared Fraction* (Fração Potencialmente Desaparecida em m^2 (ano de emissão)⁻¹).

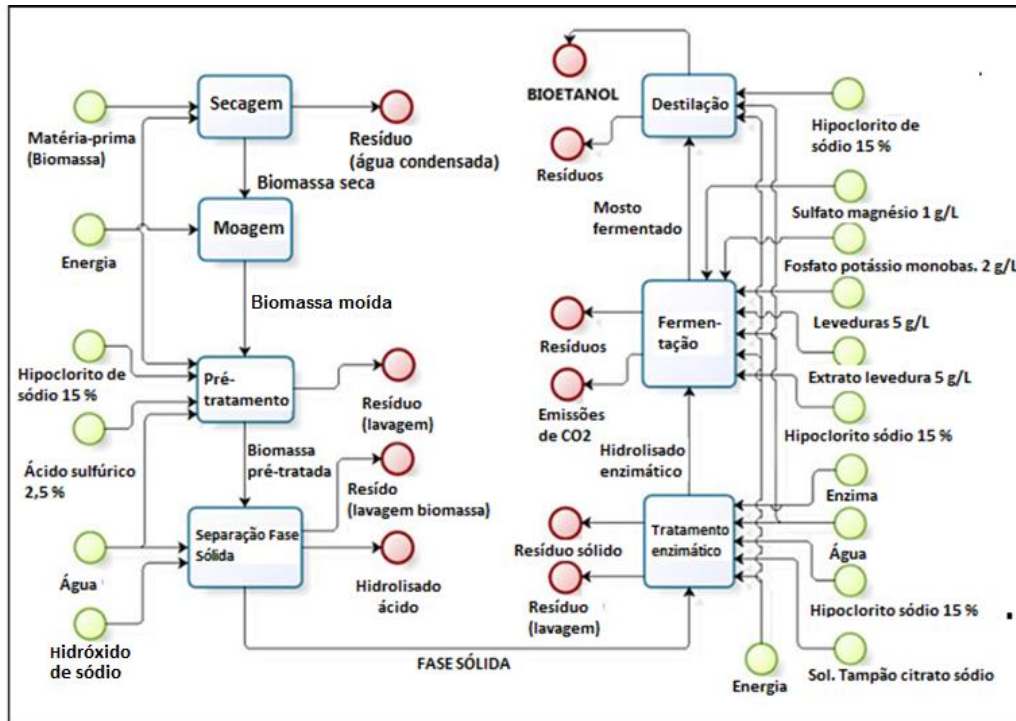


Figura 1: Produção de bioetanol lignocelulósico considerando o processo de produção de etanol a partir de material lignocelulósico contido no dejeito bovino.

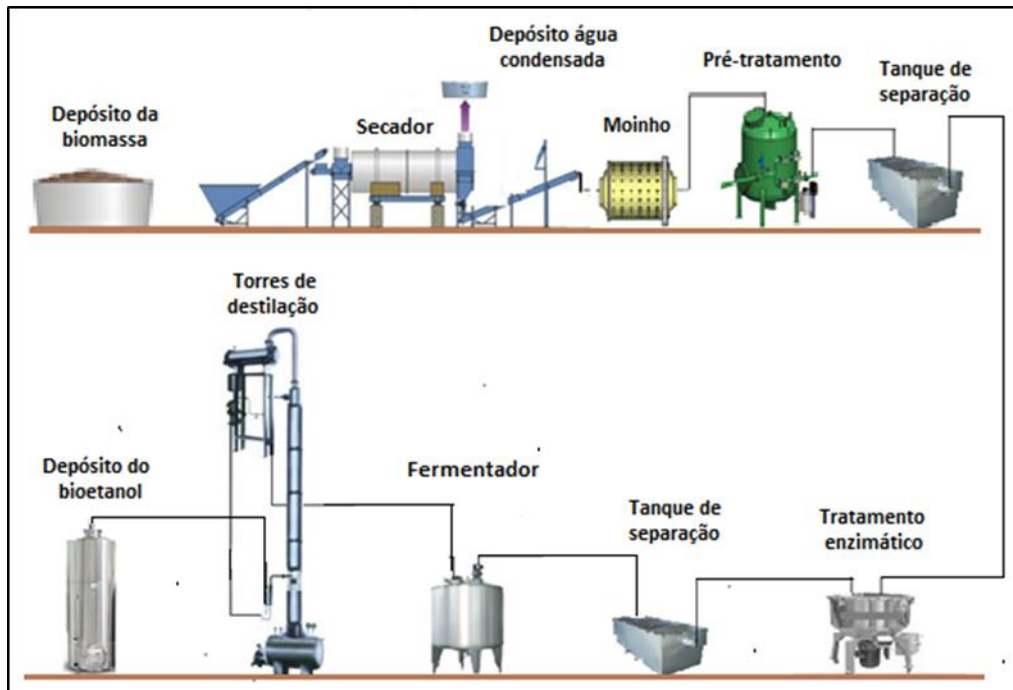


Figura 2: Fluxograma do processo de produção de etanol proposto para conversão de material lignocelulósico contido no dejeito bovino em bioetanol.

Danos aos recursos: Expressa a energia necessária para a extração de minerais e combustíveis fósseis consumidos no processo. Unidade: MJ Surplus (Megajoule excedente).

As categorias acima são um agrupamento das categorias gerais do método *Ecoindicator-99*, que avalia os impactos ambientais através de onze categorias. Sendo que muitas delas são as mesmas avaliadas por outros métodos.

Carcinogênicos: Expressa os efeitos das emissões de substâncias carcinogênicas nas emissões para o ar, água e solo. Unidade: DALYs.

Orgânicos inaláveis: Expressa os efeitos causados pelas emissões de substâncias orgânicas para a atmosfera. Consideradas emissões de verão. Unidade: DALYs.

Inorgânicos inaláveis: Expressa os efeitos causados pelas emissões de substâncias inorgânicas como material particulado, enxofre e óxidos de nitrogênio para a atmosfera. Consideradas emissões de inverno. Unidade: DALYs.

Mudanças climáticas: Expressa os danos resultantes do aparecimento de doenças e mortes causadas por mudanças climáticas. Unidade: DALYs.

Radiação: Expressa os efeitos causados por radiações. Unidade: DALYs.

Camada de ozônio: Expressa os danos causados pelo aumento das emissões de gases que destroem a camada de ozônio. Unidade: DALYs.

Ecotoxicidade: Expressa a deterioração da qualidade dos ecossistemas pela emissão de substâncias tóxicas para o ar, solo e águas. Unidade: PDF*m2yr.

Acidificação/Eutrofização: Expressa a deterioração dos ecossistemas devido às emissões de substâncias acidificantes. Unidade: PDF*m2yr.

Uso do solo: Expressa o impacto na biodiversidade motivado pela atividade que causa danos por conversão ou ocupação do solo: Unidade: PDF*m2yr.

Minerais: Expressa o excedente de energia causado pela redução das reservas minerais. Unidade: MJ excedente.

Combustíveis fósseis: Expressa o excedente de energia extraída como resultado da redução da qualidade dos recursos. Unidade: MJ excedente.

Para a avaliação do processo, foi realizada a conversão dos resultados de cada categoria em pontuação única, empregando os fatores de normalização e ponderação deste conjunto de dados.

Com base na AICV do inventário inicial, obteve-se o cenário 1 de impactos ambientais da produção de etanol de dejetos bovino. As proposições de melhorias sugeridas a partir deste

foram inseridas em uma nova AICV, obtendo-se o cenário 2, para identificar a efetiva redução do impacto ambiental, relacionado as mudanças propostas no prognóstico.

3 Resultados e discussões

3.1 ICV da obtenção de bioetanol a partir de dejetos bovino

Após levantar os dados, foi necessário conhecer todas as etapas do processo para definir entradas e saídas de materiais e energia. A Figura 1 mostrou o fluxograma do processo de obtenção do bioetanol a partir de dejetos bovino, com a apresentação das entradas e saídas para a Avaliação do Ciclo de Vida, sendo que as principais entradas e saídas estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1 - Principais entradas e saídas da produção de bioetanol a partir de dejetos bovino

Entradas/saídas	Unidade	Quantidade
Entradas		
Dejeto	kg	1.000
Energia	kWh	1.176,5
Água	kg	38.949,7
Ácido sulfúrico	kg	92,4
Hipoclorito de sódio	kg	9,75
Hidróxido de sódio 50%	kg	75,6
Enzima	kg	0,6
Ácido acético	kg	21,0
Fosfato de sódio	kg	3,0
Sulfato de magnésio	kg	1,5
Levedura	kg	7,6
Extrato de levedura	kg	7,6
Saídas		
CO ₂ biogênico	kg	32,7
Efluente	m ³	41,5

No processo de secagem da biomassa foi considerado a energia e o efluente gerado através da condensação do vapor de água oriundo do processo. Nesta etapa, considerou-se a energia de vaporização da água (44 kJ mol^{-1}) contida no dejetos, portanto, foram necessários $1.973.115 \text{ kJ}$ para evaporação dos 807 kg de água contida em 1.000 kg de dejetos coletado, determinado pela secagem em laboratório. A capacidade do equipamento selecionado é de 1.000 kg h^{-1} . Dessa forma, para evaporar 807 kg de água são necessários $0,807 \text{ h}$, apresentando um consumo de energia de 446.519 kWh , uma vez que o secador rotativo (SRL500, Lippel) necessita de 49 min para a secagem deste dejetos.

Na moagem da biomassa, além da biomassa seca, há entrada de energia de 1,3 kWh para a moagem da biomassa seca (193 kg). Entretanto, o pré-tratamento ácido realizado com solução 2,5% de ácido sulfúrico em uma proporção de 10% de biomassa em relação a solução ácida, por 1 h, 121°C, consome 91 kWh no uso da autoclave (Phoenix, AHVC-1000).

Além do ácido sulfúrico, responsável pela hidrólise ácida, após o pré-tratamento ainda é necessário a etapa de limpeza da autoclave (50 L de água e 1 L de hipoclorito de sódio 15%) e a separação do hidrolisado da fase sólida. Para a separação da biomassa foi considerado um separador/decantador, no qual a fase sólida é encaminhada para a hidrólise enzimática e a fase líquida é considerada um resíduo ou pode ser encaminhada à produção de biopolímeros por ser rica em pentoses.

Esse resíduo é gerado em função do processo de fermentação ser conduzido com a levedura *S. cerevisiae*. Ela é comumente utilizada e converte apenas as hexoses, mas, recentemente, alguns microrganismos estão sendo conhecidos por serem capazes de consumir tanto pentoses quanto hexoses, dando um rendimento maior de bioetanol e podendo absorver o hidrolisado ácido como matéria-prima para a produção de etanol [12].

A biomassa separada é lavada até atingir pH 5,0, consumindo 36.670 kg de água. A água de lavagem apresentou um pH final 2,0 e foi neutralizada com hidróxido de sódio em solução 50% (p/v).

Para a sacarificação, a hidrólise enzimática foi conduzida na proporção de 5% de biomassa em relação à solução tampão pH 5. A enzima **Cellic® CTec 2 da Novozymes** foi utilizada para a hidrólise dos polissacarídeos ricos em celulose. Como esta enzima não é encontrada nas bibliotecas do software, foram utilizados os valores de impacto obtidos para o processo de produção de outra enzima, a Spirizymes® Plus FG, uma outra celulase do mesmo fabricante [25], considerando que as etapas e os insumos da produção e separação das enzimas sejam semelhantes.

A biomassa resultante do pré-tratamento foi quantificada em escala laboratorial e representa 44,71% da biomassa processada. Portanto, para uma escala de 193 kg (base seca) de biomassa pré-tratada, tem-se 86,29 kg (base seca) para entrada na etapa de hidrólise enzimática em um tanque com controle de temperatura e agitação. Para hidrolisar o conjunto de biomassa, meio e enzima (1.812,72 kg) em duas bateladas foi calculado um consumo de energia de 467,4 kWh, considerando que a hidrólise ocorre a 50 °C por 72 h.

A fase líquida foi encaminhada para a fermentação e a fase sólida, considerada resíduo, pode ser utilizada na fertilização de solos. O resíduo, 14,62 % do total após hidrólise enzimática, apresenta principalmente lignina. Após o tratamento, são

necessários os mesmos volumes de água e hipoclorito de sódio, usados anteriormente no pré-tratamento, para a lavagem do equipamento.

A fermentação utiliza um tanque de diluição, mistura e cozimento e uma dorna de fermentação, com tempo de cozimento de 30 min e tempo de fermentação determinado experimentalmente em 8 h. Nessas condições, o consumo de energia fica em 6,864 kWh.

A emissão de CO₂ biogênico foi quantificada a partir da quantidade de etanol determinada experimentalmente. A quantidade de etanol produzida em 8 h de fermentação foi 17,74 g de etanol/100 g de biomassa, considerando a biomassa seca inicial antes do processamento. Assim, a partir de 193 kg de biomassa seca foi possível estimar uma produção de 32,75 kg CO₂ emitida diretamente da fermentação.

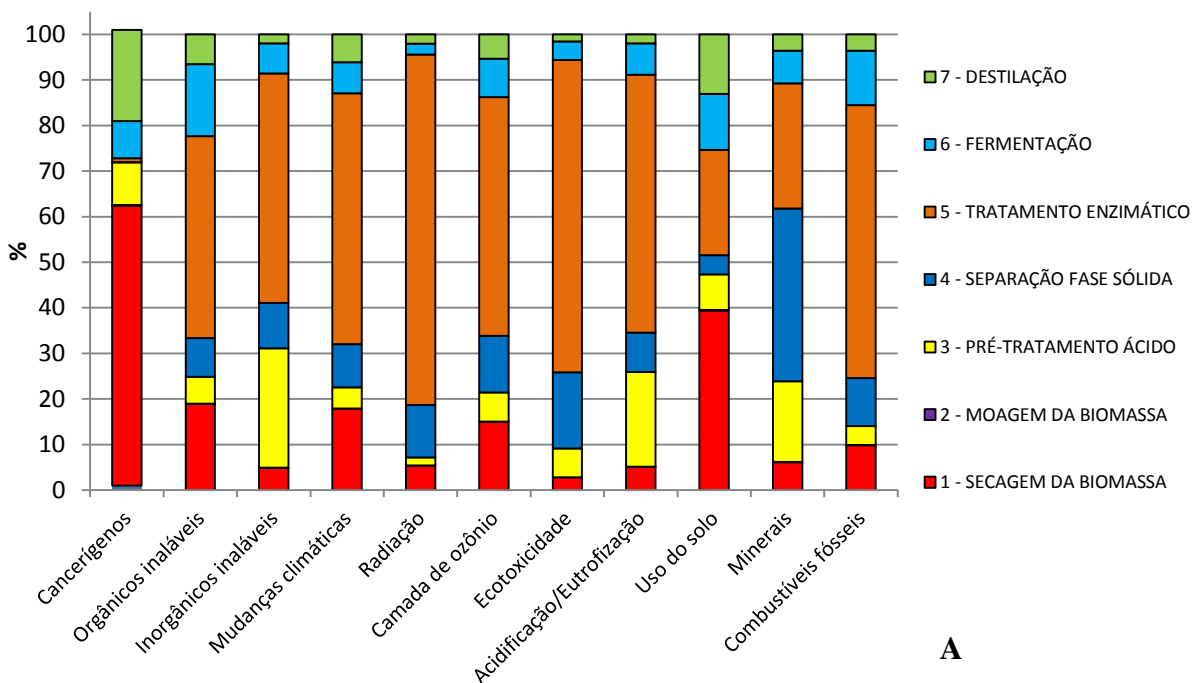
Por último, a destilação foi proposta para um equipamento da Limana Poliserviços, que necessita 180 kWh para destilar por 4 h o extrato fermentado final (1534,84 kg), dividido em 3 bateladas. A água de condensação/resfriamento, bem como, a água utilizada para geração de vapor, recirculam no sistema, portanto, não foram consideradas como entradas no inventário. O efluente da destilação pode ser utilizado na fertilização de plantas.

3.2 AICV na produção de bioetanol a partir de dejetos bovinos

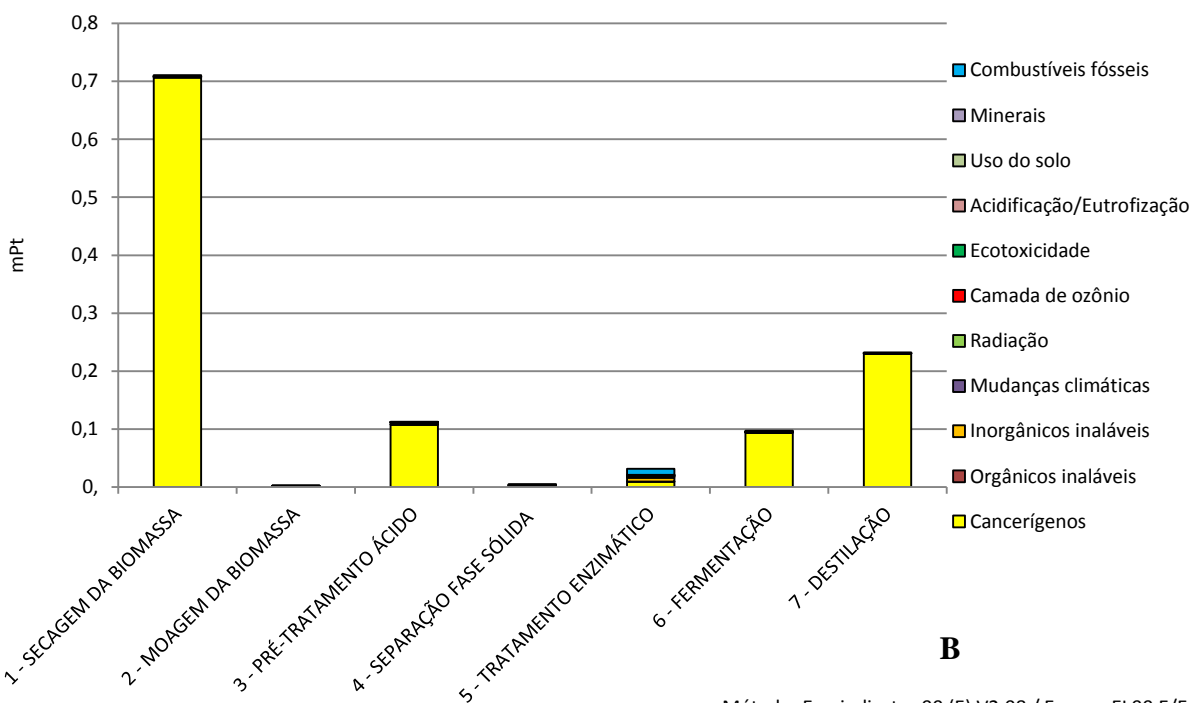
No estudo de AICV no processo de produção de bioetanol a partir de dejetos bovinos, verificou-se a participação de cada etapa do processo na caracterização dos impactos ambientais (Figura 3) e na avaliação dos danos ambientais para os seres humanos, para o ecossistema e para os recursos naturais (Figura 4).

A entrada de dejetos não foi considerada na etapa de secagem para fins de AICV, para não mascarar o impacto do processo propriamente dito, uma vez que, a entrada de dejetos na avaliação carrega vários impactos relacionados ao mesmo, considerando as potenciais contaminações atribuídas a ele e a necessidade de tratamento para descarte final. Esses impactos ambientais deixam de existir quando o dejetos passa a ser um insumo e, na AICV, são impactos de sinal negativo, muito maiores do que os impactos de sinal positivo relacionados ao processo de produção do etanol em estudo.

Portanto, a AICV assim conduzida, permitiu identificar os danos à saúde humana, ao ecossistema e aos recursos naturais relacionados ao processo de produção de bioetanol delineado em escala laboratorial e proposto para a escala piloto (Figura 4).



Método: Eco-indicator 99 (E) V2.08 / Europe EI 99 E/E



Método: Eco-indicator 99 (E) V2.08 / Europe EI 99 E/E

Figura 3 – Caracterização de impactos ambientais no processo de obtenção de bioetanol lignocelulósico a partir de dejetos bovinos. A) Percentual considerando a contribuição de cada etapa em relação às categorias de impacto; B) Contribuição de cada etapa em relação às categorias de impacto em pontuação única.

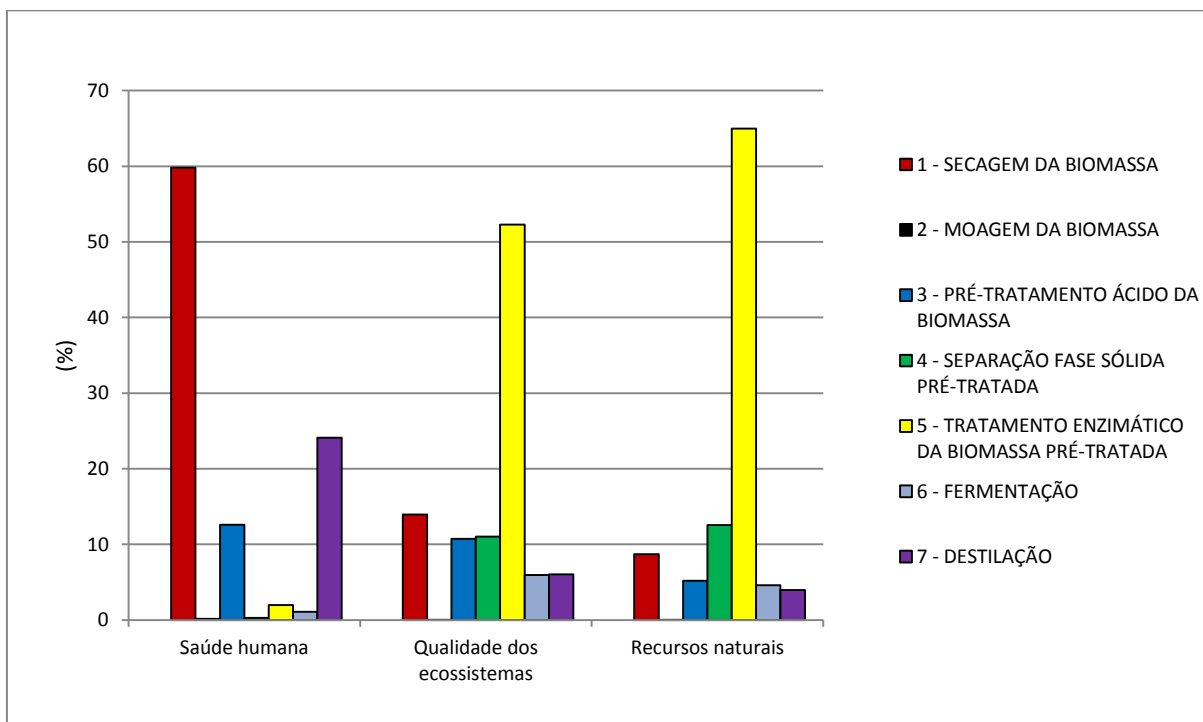


Figura 4 – Avaliação de danos ambientais no processo de obtenção de bioetanol lignocelulósico a partir de dejeito bovino.

De acordo com os dados caracterizados pode-se observar que a etapa de secagem foi a que mais contribuiu na avaliação de danos à saúde humana. Na avaliação da qualidade dos ecossistemas e na avaliação de danos aos recursos naturais, a etapa que mais contribuiu foi a do tratamento enzimático. As atividades que mais afetam esses impactos são o consumo de energia, o uso de ácido sulfúrico e hidróxido de sódio, além do tratamento de resíduos das etapas de separação e tratamento enzimático.

Analisando por pontuação única (Figura 3B) é possível identificar que os impactos relacionados ao uso de reagentes ou nutrientes são baixos comparados ao uso de energia no processo, uma vez que os impactos estão alocados principalmente na secagem, hidrólises e destilação.

Considerando que, os dados de consumo de energia utilizados referem-se à energia elétrica, cabe discutir a redução do consumo de energia nessas etapas do processo ou geração de energia através de outros métodos como, por exemplo, caldeira a lenha. Essa redução do consumo de energia garante ganho ambiental, porém a forma como a energia poderá ser gerada não garante tal resultado, pois seria necessário uma ACV

considerando a regionalidade da produção de energia, que no Rio Grande do Sul é principalmente oriunda de hidrelétricas.

Destaca-se, também, que a forma como este estudo foi conduzido, permite conhecer cada etapa do processo para torná-lo mais eco-eficiente [26], reduzindo o impacto na implementação dos equipamentos. Assim, a ACV tem sido aplicada antecipadamente à instalação propriamente dita e possui potencial como ferramenta de análise e *design* de processos [27].

Considerando, no contexto abordado anteriormente (cenário 1), que os danos provocados pela produção de bioetanol a partir do dejeito bovino podem ser minimizados, propôs-se um novo cenário (cenário 2) para esse processo. Com base no inventário, que levou a avaliação dos impactos do ciclo de vida desse processo, foi possível propor as modificações apresentadas na Tabela 2.

O gráfico da Figura apresenta a comparação dos danos ambientais nos dois cenários, sendo que o cenário 2 corresponde às modificações propostas. Neste cenário, há redução dos impactos ambientais, com exceção da categoria uso do solo, porque na geração de calor por caldeira a lenha os danos estão associados à produção das florestas, fornecedoras de lenha. No

entanto, considerando o agrupamento das categorias, como mostra a Tabela 3, houve redução dos impactos, principalmente relacionados à saúde humana e ao uso de recursos naturais.

A aplicação de ACV na prática pode apresentar resultados divergentes para produtos ou processos similares. Isto é verdadeiro, principalmente, quando se inclui sistemas agrícolas nos quais os parâmetros podem variar dependendo das condições específicas. Aspectos importantes relacionados à metodologia de ACV para biocombustíveis são: a definição da fronteira do sistema, a escolha de uma unidade funcional, a escolha dos métodos de atribuição, o tratamento do carbono biogênico, a seleção das categorias de impacto, a escolha do sistema de referência e o efeito da remoção de biomassa a partir de solos [12].

Tabela 2 - Modificações propostas para minimização dos impactos nas etapas do processo em escala piloto (Cenário 2).

Etapas	Mudança proposta no processo
Secagem	- Secagem ao sol.
Pré-tratamento	- Uso de caldeira a lenha para gerar vapor para a autoclave.
Separação da fase sólida	- Neutralização do hidrolisado antes da separação. - Sedimentação da biomassa pré-tratada antes da separação. - Aproveitamento do resíduo (hidrolisado ácido). - Redução de água de lavagem.
Tratamento enzimático	- Uso de caldeira a lenha para gerar vapor para aquecimento. - Aproveitamento do resíduo como adubo.
Fermentação	- Uso de caldeira a lenha para aquecimento.
Destilação	- Uso de caldeira a lenha para gerar vapor para aquecimento. - Aproveitamento do resíduo da destilação (vinhoto) na fertirrigação de lavouras e/ou produção de biogás.

Estudo de ACV, realizado no Japão, utilizou duas variedades de arroz na produção de bioetanol lignocelulósico, avaliando uma unidade funcional definida como 1L de bioetanol

anidro produzido a partir da palha de arroz. Avaliando o consumo de energia em MJ L⁻¹, o estudo mostrou que para as duas espécies diferentes de arroz os resultados de ACV foram diferentes. Para uma espécie, as quatro etapas que mais contribuem para o consumo de energia foram, primeiramente, a destilação, seguida da produção de enzima, pré-tratamento e a sacarificação. Para a segunda espécie, a etapa que mais contribuiu com o consumo de energia foi o pré-tratamento, seguido da produção de enzima, destilação e sacarificação [10]. A justificativa da grande mudança no resultado da ACV pode ser consequência da inserção de mudanças relativas à fonte de energia para as diferentes etapas de produção [28].

O aproveitamento do dejetos animal, como insumo no processo, vem ao encontro da redução do impacto ambiental relacionado ao destino usual do mesmo nas propriedades agrícolas. Como exemplo, destaca-se as emissões a partir do armazenamento do dejetos em tanque aberto, seguido de uso como fertilizante, onde até 82% do impacto total foi devido à emissão de amônia ou a partir do emprego na produção de biogás, ao qual foi atribuído impacto relacionado ao aumento das emissões de NOx com a combustão de biogás [29].

Tabela 3. Resumo das propostas de modificações nas etapas do processo em escala piloto.

Categoria de danos	Cenário 1	Cenário 2	Redução de impactos (%)
Saúde Humana (DALY)	$3,44 \cdot 10^{-5}$	$5,11 \cdot 10^{-7}$	98,52
Qualidade dos ecossistemas (PDF*m2yr)	$4,75 \cdot 10^{-2}$	$4,55 \cdot 10^{-2}$	4,18
Recursos Naturais (MJ excedente)	$5,06 \cdot 10^{-1}$	$1,68 \cdot 10^{-1}$	66,83

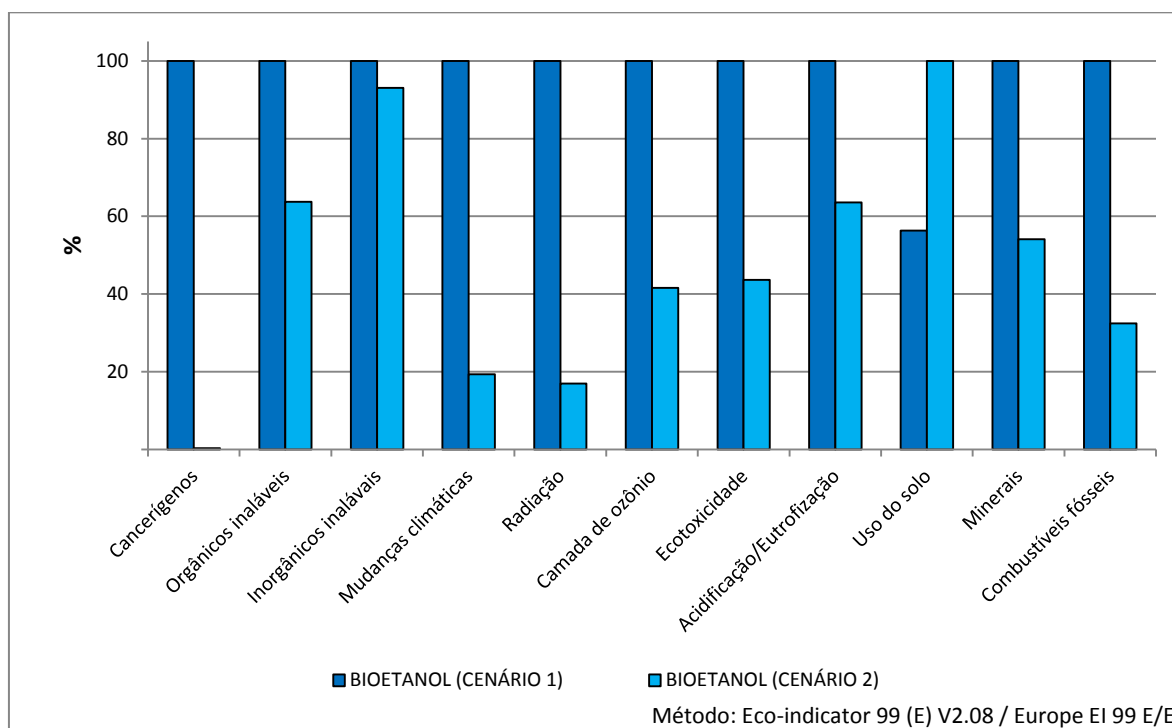


Figura 5 – Comparação por categoria de impacto na produção em escala piloto antes (Cenário 1) e depois (Cenário 2) das proposições de mudanças no processo.

4 Conclusões

Com base nos resultados obtidos foi possível realizar a ACV da produção de bioetanol a partir de dejetos bovinos. Destaca-se que, o inventário realizado com base nos dados experimentais e na proposição de equipamentos para escala piloto, contribuiu para definir a AICV do processo em uma unidade funcional de 1000 kg de dejetos bovinos.

De acordo com o estudo, o que mais contribuiu para impactos ambientais no processo foi o consumo de energia. Etapas do processo que utilizaram mais energia apresentaram maior impacto ambiental na categoria cancerígenos, agrupada na categoria de danos à saúde. Os danos identificados para cada categoria foram: categoria Danos à Saúde Humana, com $2,79 \cdot 10^{-5}$ DALYs correspondendo a 948 mPt (em pontuação única); categoria “Danos aos Ecossistemas” com $4,51 \cdot 10^{-2}$ PDF*m2yr correspondendo a 3,95 mPt; e categoria “Danos aos Recursos Naturais” com $4,59 \cdot 10^{-1}$ MJ excedente, correspondendo a 16,4 mPt.

Além disso, a etapa de secagem foi a que mais contribuiu na avaliação de danos à saúde humana. Na avaliação de qualidade dos ecossistemas e na avaliação de danos aos recursos naturais, a etapa que mais contribuiu foi o tratamento enzimático. As atividades que mais afetam esses impactos são: o consumo de energia, o uso de ácido sulfúrico e hidróxido de sódio, além de substâncias químicas envolvidas e o tratamento de resíduos das etapas de separação e tratamento enzimático.

Agradecimentos

Ao Ministério de Ciência, Tecnologia e Inovação, Termo de Convênio nº 01.0144.00/2010, à SDECT pelo auxílio no processo 209-2551/14-1, à Capes pela bolsa de mestrado em Tecnologia Ambiental e auxílio no Processo 10225/12-9 e ao Programa FAP/UNISC.

LIFE CYCLE ASSESSMENT APPLIED TO BIOETHANOL PRODUCTION FROM LIGNOCELLULOSIC MATERIAL REMAINING IN CATTLE MANURE

ABSTRACT: Biofuels can have a significant contribution in reducing the environmental impact depending on their route of production. The production of bioethanol, or lignocellulosic ethanol, may be an alternative regarding to fossil fuels, and it is of great strategic relevance to Brazil. In this context, we studied the life cycle assessment (LCA) of ethanol production from lignocellulosic material in cattle manure. These manures are rich in cellulose biomass, which can be converted into glucose and other fermentable sugars, and after into ethanol. Therefore, we considered as Functional Unit the processing of 1,000 kg/manure. In order to analyze the impacts, we applied the Ecoindicator 99 method through the EcoInvent libraries, from SimaPro software version 7.3.2. The following impact categories were considered:

carcinogenic, organic and inhalable inorganic, climate change, radiation, ozone layer, ecotoxicity, acidification / eutrophication, land use, minerals and fossil fuels. So to evaluate the environmental impact, these categories were classified in three damage categories: damage to human health, damage to ecosystems and damage to natural resources. According to the research, the input process that has most contributed to the LCA was the energy consumption, resulting in higher environmental impact on the "carcinogenic" category from the "damage to human health" category. As from the results, it was possible to minimize the impacts by suggesting changes within the process, mainly on the heating systems that may be used.

Keywords: Cattle Manure. Bioethanol. LCA.

Referências

- [1] VISIOLI, L. J. *et al.*; Chapter 3 - Use of Agroindustrial Residues for Bioethanol Production, in: V.K. Gupta, M.G.T.P. Kubicek, J.S. Xu (Eds.) *Bioenergy Research: Advances and Applications*, Elsevier, Amsterdam, 2014, pp. 49-56.
- [2] KIM, S.; DALE, B. E.; Global potential bioethanol production from wasted crops and crop residues, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 26, n. 4, p. 361-375, 2004.
- [3] BALAT, M. *et al.*; Progress in bioethanol processing, *Progress in Energy and Combustion Science*, Vol. 34, n. 5, p. 551-573, 2008.
- [4] BINOD, P. *et al.*; Bioethanol production from rice straw: An overview, *Bioresource Technology*, Vol. 101, n. 13, p. 4767-4774, 2010.
- [5] SUN, Y.; CHENG, J.; Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review, *Bioresource Technology*, Vol. 83, n. 1, p. 1-11, 2002.
- [6] TALEBNIA, F. *et al.*; Production of bioethanol from wheat straw: An overview on pretreatment, hydrolysis and fermentation, *Bioresource Technology*, Vol. 101, n. 13, p. 4744-4753, 2010.
- [7] NASTERLACK, T. *et al.*; Are biofuel concerns globally relevant? Prospects for a proposed pioneer bioethanol project in South Africa, *Energy for Sustainable Development*, Vol. 23, n. 0, p. 1-14, 2014.
- [8] MUELLER, S. A. *et al.*; Impact of biofuel production and other supply and demand factors on food price increases in 2008, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 35, n. 5, p. 1623-1632, 2011.
- [9] SÁNCHEZ, Ó. J.; CARDONA, C. A.; Trends in biotechnological production of fuel ethanol from different feedstocks, *Bioresource Technology*, Vol. 99, n. 13, p. 5270-5295, 2008.
- [10] ROY, P. *et al.*; Evaluation of the life cycle of bioethanol produced from rice straws, *Bioresource Technology*, Vol. 110, n. 0, p. 239-244, 2012.
- [11] MABEE, W. E.; SADDLER, J. N.; Bioethanol from lignocellulosics: Status and perspectives in Canada, *Bioresource Technology*, Vol. 101, n. 13, p. 4806-4813, 2010.
- [12] WILOSO, E. I. *et al.*; LCA of second generation bioethanol: A review and some issues to be resolved for good LCA practice, *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Vol. 16, n. 7, p. 5295-5308, 2012.
- [13] GNANSOUNOU, E.; Production and use of lignocellulosic bioethanol in Europe: Current situation and perspectives, *Bioresource Technology*, Vol. 101, n. 13, p. 4842-4850, 2010.
- [14] OLESKOWICZ-POPIEL, P. *et al.*; Ethanol production from maize silage as lignocellulosic biomass in anaerobically digested and wet-oxidized manure, *Bioresource Technology*, Vol. 99, n. 13, p. 5327-5334, 2008.
- [15] ABIEC; Balanço da pecuária, Associação Brasileira das Indústrias Exportadoras de Carnes, 2013.
- [16] SOUZA, C. D. F.; Instalações para gado de leite, Área de CRA/DEA/UFV, *Amiagro*, Viçosa/MG., 2005.
- [17] LIAO, W. *et al.*; Chapter 13 - Integrated Farm-Based Biorefinery, in: N.Q.B.H.A. Vertès (Ed.) *Biorefineries*, Elsevier, Amsterdam, 2014, pp. 255-270.
- [18] KOZEN, E. A.; ALVARENGA, R. C.; Manejo e utilização de dejetos animais: aspectos agronômicos e ambientais *Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo Circular Técnica* 63, 2005.
- [19] HAMELINCK, C. N. *et al.*; Ethanol from lignocellulosic biomass: techno-economic performance in short-, middle- and long-term, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 28, n. 4, p. 384-410, 2005.
- [20] GONZÁLEZ-GARCÍA, S. *et al.*; Environmental aspects of eucalyptus based ethanol production and use, *Science of the Total Environment*, Vol. 438, n., p. 1-8, 2012.
- [21] BISWAS, W. K. *et al.*; Global warming potential of wheat production in Western Australia: A life cycle assessment, *Water and Environment Journal*, Vol. 22, n. 3, p. 206-216, 2008.
- [22] KRAVANJA, P. *et al.*; Perspectives for the production of bioethanol from wood and straw in Austria: Technical, economic, and ecological aspects, *Clean Technologies and Environmental Policy*, Vol. 14, n. 3, p. 411-425, 2012.
- [23] KUMAR, D.; MURTHY, G. S.; Life cycle assessment of energy and GHG emissions during ethanol production from grass straws using various pretreatment processes, *International Journal of Life Cycle Assessment*, Vol. 17, n. 4, p. 388-401, 2012.
- [24] VANCOV, T. *et al.*; Potential use of feedlot cattle manure for bioethanol production, *Bioresour Technol*, Vol. no prelo, n., p., 2015.

- [25] NIELSEN, P. *et al.*; Cradle-to-gate environmental assessment of enzyme products produced industrially in denmark by novozymes A/S, *Int J Life Cycle Assess*, Vol. 12, n. 6, p. 432-438, 2007.
- [26] ROY, P. *et al.*; A review of life cycle assessment (LCA) on some food products, *Journal of Food Engineering*, Vol. 90, n. 1, p. 1-10, 2009.
- [27] GILLANI, S. T. *et al.*; Review of Life Cycle Assessment in Agro-Chemical Processes, *Chemical Product and Process Modeling*, Vol. 5, n. 1, p., 2010.
- [28] BORRION, A. L. *et al.*; Environmental life cycle assessment of bioethanol production from wheat straw, *Biomass and Bioenergy*, Vol. 47, n. 0, p. 9-19, 2012.
- [29] BATTINI, F. *et al.*; Mitigating the environmental impacts of milk production via anaerobic digestion of manure: Case study of a dairy farm in the Po Valley, *Science of The Total Environment*, Vol. 481, n., p. 196-208, 2014.