

Seropédica, RJ
Abril, 2009

Autores

Luis H. de B. Soares

Pesquisador da Embrapa
Agrobiologia, BR 465,
km 7, 23890-000,
Seropédica, RJ
lshenrique@cnpab.embrapa.br

Bruno José R. Alves

Pesquisador da Embrapa
Agrobiologia, BR 465,
km 7, 23890-000,
Seropédica, RJ
bruno@cnpab.embrapa.br

Segundo Urquiaga

Pesquisador da Embrapa
Agrobiologia, BR 465,
km 7, 23890-000,
Seropédica, RJ
urquiaga@cnpab.embrapa.br

Robert M. Boddey

Pesquisador da Embrapa
Agrobiologia, BR 465,
km 7, 23890-000,
Seropédica, RJ
bob@cnpab.embrapa.br

Mitigação das emissões de gases efeito estufa pelo uso de etanol da cana-de-açúcar produzido no Brasil

Introdução

O etanol é um produto resultante do processo de fermentação dos açúcares produzidos e/ou derivados de culturas agrícolas como cana-de-açúcar, milho ou mandioca, enquanto que o biodiesel é feito com óleos vegetais extraídos da soja, mamona ou dendê; ambos são chamados biocombustíveis. A utilização destes biocombustíveis em veículos de transporte ou passeio não significa que o veículo locomove-se sem emissões de gases de efeito estufa. Mesmo considerando-se que o biocombustível derivado de materiais vegetais é composto por carbono derivado exclusivamente do gás carbônico (dióxido de carbono, CO_2) da atmosfera, via processo de fotossíntese, as etapas de produção de qualquer biocombustível requerem a utilização de energia contida em fontes fósseis de carbono (petróleo, carvão e gás natural, por exemplo), para operações agrícolas, síntese do biocombustível e distribuição ao consumidor. Em todo esse processo, também ocorrem emissões de outros gases de efeito estufa, principalmente metano (CH_4) e óxido nitroso (N_2O).

Vários especialistas brasileiros estimaram a quantidade da energia fóssil necessária para se produzir etanol da cana-de-açúcar (energia por litro, em MJ L^{-1} , ou energia por tonelada, GJ Mg^{-1}) nas condições brasileiras (MACEDO, 1998; MACEDO, SEABRA e SILVA, 2008; URQUIAGA, ALVES e BODDEY, 2005; BODDEY et al., 2008). O consenso entre essas equipes é o de que o balanço energético (razão entre a energia total contida no biocombustível produzido e a energia fóssil investida na sua produção) é aproximadamente 8 ou 9, tanto nas condições de São Paulo (MACEDO, 1998; MACEDO, SEABRA e SILVA, 2008) como em nível nacional (URQUIAGA, ALVES e BODDEY, 2005; BODDEY et al., 2008). Entretanto, estudos feitos no exterior também calcularam o balanço energético para o etanol da cana nas condições brasileiras (PIMENTEL et al., 1988; PIMENTEL e PATZEK, 2008; OLIVEIRA, VAUGHAN e RYKIEL, 2005; OLIVEIRA 2008), e suas estimativas são consideravelmente menores (entre 3,7 e 1,1:1). As razões para isso são várias. Pimentel et al. (1988) considerou que a energia usada na produção de etanol era toda de origem fóssil, como no passado, mas na atualidade, toda energia usada nas Usinas é renovável, fornecida com a queima do próprio bagaço resultante do esmagamento da cana. As estimativas mais recentes de Pimentel e Patzek (2008), Oliveira, Vaughan e Rykiel (2005) e Oliveira (2008) trazem balanços energéticos baixos para o etanol da cana porque são baseadas em dados ultrapassados de uso de energia fóssil nas operações de campo, e também usam estimativas muito altas do custo energético do transporte da cana do campo à usina. Estas discrepâncias foram discutidas por Boddey et al. (2008).

A compilação de todos os dados para calcular o balanço energético de um biocombustível envolve muito esforço e tempo, mas isso é apenas um dos componentes da avaliação do impacto ambiental global na utilização de biocombustíveis. A questão mais relevante dentro do presente contexto é a economia nas emissões de GEEs (mitigação total do efeito estufa) quando um veículo consome etanol da cana em vez de gasolina (com ou sem adição de etanol) ou diesel convencional. Nesses cálculos deve-se considerar também a distância rodada pelo automóvel com um litro de cada combustível, para permitir a comparação entre eles.

O objetivo deste trabalho é contabilizar o impacto total na mitigação dos gases de efeito

estufa com a mudança de diesel ou gasolina para etanol de cana-de-açúcar, considerando-se um veículo (motor "FlexFuel") rodando com bioetanol hidratado, conforme é vendido em qualquer posto de abastecimento no Brasil. Para isso, foi necessário abordar os seguintes pontos:

1. Qual é a relação da energia total do bioetanol de cana com a energia fóssil utilizada em sua produção, a contabilidade do chamado Balanço Energético?
2. Quais as emissões dos outros gases de efeito estufa (GEEs), CH_4 e N_2O , durante a produção da cana-de-açúcar e sua conversão em etanol?
3. Qual é o impacto, na forma de emissões de GEEs, quando da mudança entre a colheita manual após queima do canavial, para a colheita mecanizada da chamada cana crua (colhida sem a queima prévia)?
4. Qual é o impacto nas emissões de GEEs da possível expansão na área de cana-de-açúcar para produzir etanol?

O balanço energético da produção de cana-de-açúcar nas condições brasileiras

Operações agrícolas

Para calcular o balanço energético da produção de cana foram usados os dados mais atuais disponíveis. A base de dados do IBGE consultada em janeiro de 2009 fornece as seguintes informações (IBGE, 2009): A área colhida de cana-de-açúcar na safra de 2008 foi de 8,2 Mha, um aumento de 16,5% em comparação a 2007; a produção total foi de 653 Mt (milhões de toneladas ou 653 Tg); e o rendimento médio foi de 79,5 toneladas (Mg) ha^{-1} de colmos frescos. Na safra de 2006, o rendimento foi de 76,7 Mg ha^{-1} (IBGE, 2007 citado por BODDEY et al., 2008), e a produção de etanol por hectare foi de 6.281 litros. Nestes últimos dois anos o rendimento aumentou em 3,65%, e assumindo-se que a eficiência de conversão de cana em etanol manteve-se estável, estima-se que a produção de etanol por ha em 2008 foi de 6.510 litros ha^{-1} .

O manejo da cultura da cana-de-açúcar varia entre as usinas, mas após diversas consultas a usineiros e agrônomos de São Paulo e de outras regiões, foi possível chegar a um "manejo padrão" que é típico para a maioria das usinas bem conduzidas. O ciclo de plantio é de 6 anos, com um ciclo de cana-planta de 18 meses, iniciado após um pousio de 6 meses, seguida por 4 so-cas colhidas em intervalos de 12 meses. Existem produtores que investem menos nos insumos, geralmente com rendimentos menores do que a

média nacional, e que renovam as plantações menos frequentemente. Neste caso, os ingressos de energia fóssil e as emissões de GEEs são menores do que o padrão, e por isso, neste trabalho, a tendência é a de subestimar o balanço energético, ou o poder mitigador da substituição de diesel ou gasolina por etanol.

Quase todos os produtores usam o cultivo convencional para a renovação do canavial. Consiste em duas ou três passagens com um arado de discos pesado, frequentemente precedido por um subsolador e seguido por uma grade niveladora e depois um sulcador. Recentemente, foi introduzido em escala experimental um sistema de plantio direto onde a cultura anterior remanescente e as ervas daninhas são controladas por herbicidas, e a única operação mecânica no solo é a formação dos sulcos. Entretanto, com o aumento na utilização de colheitadeiras mecânicas, a tendência é o de agravamento de problemas relacionados à compactação do solo e, por isso, parece pouco provável, por enquanto, que a prática de aração profunda ou subsolação deixe de ser usada.

A maioria das áreas utilizadas com cana-de-açúcar localiza-se em solos ácidos, e segundo Macedo (1998) estima-se que a cada novo plantio (a cada seis anos) são adicionados 2 Mg de calcário ha^{-1} . A adubação de P e K recomendada é de 16 e 83 kg $\text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ de P_2O_5 e K_2O , respectivamente (corresponde a soma das 5 aplicações: 1 cana-planta e 4 socas divididas por 6 anos). O adubo nitrogenado é especialmente "caro" em termos de consumo de energia fóssil, visto que é produzido pelo processo Haber-Bosch, sob temperaturas e pressões altas, alimentado por gás natural. A energia fóssil utilizada na produção de uréia foi calculada em 54 MJ por kg de N, em comparação a 3,2 e 5,9 MJ por kg de P e K, respectivamente (LAEGREID, BOCKMAN E KAARSTAD, 1999). No Brasil, as variedades de cana mais plantadas conseguem se beneficiar da fixação biológica de nitrogênio, realizada por bactérias diazotróficas associadas aos tecidos da planta, conforme comprovado por Lima, Boddey e Döbereiner (1987), Urquiaga, Cruz e Boddey (1992) e Boddey et al. (2001). Por isso, as quantidades de N-fertilizante adicionadas são bem menores do que em outros países como Austrália, Colômbia, EUA, Peru, etc, onde se adicionam entre 150 e 200 kg de N $\text{ha}^{-1} \text{ano}^{-1}$ na cultura da cana-de-açúcar. No Brasil, a aplicação é geralmente de 20 kg N ha^{-1} no plantio e 80 a 100 kg N ha^{-1} nas socas, resultando numa média ponderada anual ao redor de 57 kg de N ha^{-1} .

O plantio é feito com toletes (pedaços de colmo) utilizando-se aproximadamente 12 Mg ha⁻¹ de colmos frescos. A energia fóssil investida para cada 1 Mg de toletes é a mesma investida para produzir 1 Mg de colmos comercial. Como os 12 Mg de toletes são usados para um ciclo de 6 anos de cana-de-açúcar, o ingresso anual de energia fóssil é o mesmo para a produção de 2 Mg ha⁻¹ de colmos de cana (BODDEY et al., 2008).

Outros ingressos de energia fóssil vêm dos herbicidas e inseticidas. A quantidade de herbicidas usada é grande, e com a eliminação da queima poderia até aumentar ao longo dos anos. O Sindicato Nacional da Indústria de Produtos para Defesa Agrícola (SINDAG) relata que foram utilizados 3,2 kg i.a. de herbicidas ha⁻¹ na cultura da cana-de-açúcar em 2006. Devido à complicada síntese dos herbicidas, estes produtos necessitam grandes quantidades de energia fóssil na sua fabricação industrial, sendo estimadas em 452 MJ por kg de ingrediente ativo. No caso de inseticidas, a utilização é muito menor devido aos programas de controle biológico da broca da cana (*Diatraea saccharalis*) com a vespa *Cotesia flavipes*, e da cigarrinha (*Mahanarva fimbriolata* e *M. posticata*) com o fungo *Metarhizium anisopliae* (PINTO, 2006). O grande sucesso destes programas resultou na redução da utilização de inseticidas para

0,24 kg de i.a. ha⁻¹, o que não somente é um benefício para a saúde dos trabalhadores no cana-vial e para o meio ambiente, mas também significa que o ingresso de energia fóssil por essa fonte é pequeno.

A quantidade de combustível utilizado pelas máquinas agrícolas é mostrada na Tab. 1. Como a maior parte da utilização de tratores está na implantação da cultura, é nesse momento que ocorre o maior consumo de óleo diesel, totalizando quase 100 litros ha⁻¹ (4.733 MJ ha⁻¹, em energia). Nas operações de manutenção das socas, a utilização de máquinas é bem menor, sendo menos de 9 L por ha por ano. Na média, as máquinas consomem 22,3 litros ha⁻¹ ano⁻¹ de óleo diesel, ou um total de 1.062,7 MJ ha⁻¹.

Outra atividade com grande consumo de óleo diesel é o transporte da cana do campo para a usina. Para isto, calculou-se (BODDEY et al., 2008) que, em média, a cana é recolhida em um raio de 22 km da usina. O caminhão vazio precisa se deslocar até 22 km e voltar cheio por esta mesma distância. Assumindo que o transporte seja feito por um caminhão com reboque (tipo "Romeu e Julieta"), carregam-se 28 Mg de cana e percorrem-se 1,6 km com cada litro de óleo diesel, quando totalmente carregado. Quando vazio, o caminhão percorre 3 km L⁻¹ de diesel,

Tabela 1. Consumo de energia, na forma de óleo diesel combustível, em operações agrícolas para renovação e manutenção do canavial ao longo de um ciclo de produção de cana-de-açúcar no Brasil. Adaptado de Boddey et al., 2008.

| Operação agrícola | Equipamento | Litros/h | ha/h | Litros/ha | MJ ^a /ha |
|--|-------------|----------|------|--------------|---------------------|
| Ciclo de cana-planta | | | | | |
| Aplicação de calcário | MF 290 | 6,00 | 1,78 | 3,37 | 161,0 |
| Incorporação dos restos culturais | Valmet 1280 | 12,80 | 1,85 | 6,92 | 330,4 |
| Aração pesada I | CAT D6 | 27,60 | 1,98 | 13,94 | 665,7 |
| Subsolagem | CAT D6 | 26,00 | 1,16 | 22,41 | 1070,4 |
| Aração pesada II | CAT D6 | 27,60 | 2,04 | 13,53 | 646,1 |
| Aração pesada III | CAT D6 | 27,60 | 2,04 | 13,53 | 646,1 |
| Gradagem | CAT D6 | 13,00 | 2,52 | 5,16 | 246,4 |
| Sulcamento | MF 660 | 11,50 | 1,26 | 9,13 | 435,9 |
| Distribuição de toletes | MF 275 | 3,30 | 0,79 | 4,18 | 199,5 |
| Fechamento dos sulcos e aplicação de inseticidas | MF 275 | 4,80 | 2,52 | 1,90 | 91,0 |
| Aplicação de herbicidas | Ford 4610 | 4,00 | 3,30 | 1,21 | 57,9 |
| Capina entre linhas | Valmet 880 | 5,50 | 1,44 | 3,82 | 182,4 |
| Total | | | | 99,10 | 4.732,7 |
| Ciclo de cana-soca | | | | | |
| Remoção de resíduos | MF 275 | 4,00 | 1,37 | 2,92 | 139,4 |
| Capina entre linhas | Valmet 1580 | 9,20 | 2,05 | 4,49 | 214,3 |
| Aplicação de herbicidas | Ford 4610 | 4,00 | 3,30 | 1,21 | 57,9 |
| Total | | | | 8,62 | 411,6 |
| Média anual de todas as operações agrícolas^b = | | | | 22,26 | 1.062,7 |

^a Valor calorífico de 1,0 litro de óleo diesel = 47,73 MJ

^b Baseado em um sistema de produção composto por um ciclo de cana-planta e quarto socas em um período total de 6 anos, (média anual de consumo de combustível = {CcP + (4 x CcS)}/6, onde CcP e CcS = consumo de combustível para cana-planta e cana-soca, respectivamente).

donde se calcula que o volume total de óleo diesel necessário para buscar a cana produzida em um hectare é de 52 L. Com 5 colheitas em 6 anos, consomem-se, em média, 47,7 L diesel ha⁻¹ ano⁻¹ ou um total de 2.058 MJ ha⁻¹ ano⁻¹. O óleo diesel também é consumido no transporte de produtos como calcário e adubos para a usina. Em publicação anterior, foi calculado que esses insumos percorrem uma distância média de 500 km, e que um caminhão carrega 35 Mg com um consumo de 1 L de diesel para cada 2 km percorridos (BODDEY et al., 2008).

Considerando-se a demanda de insumos para produzir 1 ha de cana, utilizam-se 5,8 L de diesel para transporte dos insumos (277 MJ ha⁻¹ ano⁻¹).

Para o cálculo do balanço energético supôs-se que a maioria da colheita da cana ainda é feita manualmente após a queimada, situação esta que ocorre em aproximadamente 60% da área canavieira nacional. O cenário alternativo para a colheita mecânica da cana crua é apresentado mais adiante. Todo ingresso de energia fóssil nas operações agrícolas está mostrado na Tab. 2.

Segundo as normativas internacionais ISO (International Organization for Standardization, série 14040), para estudos de "Ciclo de Vida" ("Life Cycle Analysis"), é necessário incluir a energia fóssil utilizada na fabricação, manutenção e possível desmontagem e disposição de equipamentos e construções utilizadas na manufatura de um produto. Todas essas etapas estão contabilizadas na Tab. 2, no item "máquinas", onde se incluem tratores e implementos agrícolas. O detalhamento sobre essa etapa é apresentado em Boddey et al. (2008), segundo a metodologia de Pimentel (1980).

A estimativa do total de energia fóssil utilizado nas operações de campo, incluídos o transporte de cana para a usina e o fornecimento de insumos, é de 12.329,7 MJ ha⁻¹ ano⁻¹. Considerando-se que um litro de etanol produz na combustão 21,45 MJ de energia, um hectare de cana-de-açúcar, capaz de produzir 6.510 L de etanol, pode gerar 139.639 MJ de energia, aproximadamente 11 vezes a energia fóssil investida nas operações agrícolas.

Ingresso de Energia Fóssil na Usina

Uma utilização massiva de energia nas usinas acontece nas fases de limpeza, preparo e esmagamento da cana, nas esteiras de transporte, filtros e centrifugas e aquecimento do caldo para fermentação. Uma usina pode conter mais de 400 motores elétricos de alto rendimento. Também uma

grande quantidade de calor é necessária para a destilação do mosto, para produzir o álcool hidratado (95%). Esta energia foi estimada por Pimentel e Patzek (2008) como de 2.546 Mcal (10.642 MJ) por 1.000 L de etanol, o equivalente a 69.300 MJ ha⁻¹, ou quase 50% da energia contida no etanol. No entanto, as usinas brasileiras produzem toda a energia que consomem pela queima do bagaço em caldeiras de alta pressão, cujo vapor gerado aciona turbinas que produzem eletricidade em unidades de co-geração. Assim, os maiores ingressos de energia fóssil estão associados ao material usado nas construções e nos equipamentos das usinas (Tab. 2).

Estima-se que existam quase 400 usinas no Brasil moendo cana para produzir açúcar e bioetanol, colhida de uma área de 8,2 Mha. Com este dado é evidente que, na média, a cada ano, uma usina deva esmagar cana colhida em aproximadamente 17.000 ha, assumindo que um sexto da área está em pousio. Essa usina "padrão" mói 1,35 Mt (Tg) de cana por ano, ou no período típico de 180 dias de operação, o equivalente a 7.500 Mg de cana por dia. Com a ajuda dos engenheiros Roberto dos Anjos e Antônio Sesso da companhia Dedini S.A. (responsável pela construção de ~ 80% das usinas no Brasil), levantaram-se os dados de tamanho da área física e quantidades de cimento, aço comum, aço inox e outros materiais que compõem uma usina/destilaria com capacidade para moer 2.000.000 Mg de cana ano⁻¹. Como estes dados correspondem a uma usina moderna, bem mais eficiente em termos energéticos do que a maioria das usinas existentes, supôs-se que a usina estava funcionando a 33% da sua capacidade. Isso representa, em média, uma usina com uma estrutura física (conteúdo de energia) três vezes maior, mas moendo somente um terço de seu potencial de 2.000.000 Mg de cana por ano.

Utilizando-se dados do conteúdo de energia no cimento, aço etc, calculou-se, com base nos procedimentos recomendados, a energia necessária para construir, manter e renovar o modelo de usina considerado (BODDEY et al., 2008). Essa energia foi convertida em MJ ha⁻¹ ano⁻¹ de cana moída e um resumo destes resultados são apresentados na Tab. 2. Ainda tendo como base o trabalho de Pimentel e Patzek (2008), fez-se uma estimativa da energia fóssil necessária para converter etanol hidratado (95%) em anidro (99.5%), que é a forma misturada à gasolina (23% etanol) em todo território nacional.

Assim, o **balanço energético** resultante da produção de etanol é de **9,35:1**, o que significa que para cada 1,0 MJ de energia fóssil consumida se produz 9,35 MJ de energia

Tabela 2. Consumo de energia fóssil, produção de energia renovável e balanço energético do bioetanol produzido a partir de cana-de-açúcar nas condições brasileiras atuais. Os valores estão expressos por hectare.

| Entradas | quantidade | unidade | MJ/unidade | MJ/ha/ano |
|---|------------|----------------|------------|-----------|
| Operações agrícolas | | | | |
| Trabalho | 64,0 | h | 7,84 | 501,8 |
| Máquinas | 186,5 | kg | 8,52 | 1.588,8 |
| Óleo Diesel | 28,8 | L | 47,73 | 1.383,7 |
| Nitrogênio | 56,7 | kg | 54,00 | 3.061,8 |
| Fósforo | 16,0 | kg | 3,19 | 51,0 |
| Potássio | 83,0 | kg | 5,89 | 488,9 |
| Calcário | 367,0 | kg | 1,31 | 478,9 |
| Sementes ^a | 2.000,0 | kg | | 252,2 |
| Herbicidas | 3,20 | kg | 451,66 | 1.445,3 |
| Insecticidas | 0,24 | kg | 363,83 | 87,3 |
| Aplicação da vinhaça | 180 | m ³ | 3,64 | 656,0 |
| Transporte de insumos ^b | 820,0 | kg | | 276,8 |
| Transporte da cana ^c | 24,7 | L | 47,73 | 2.058,0 |
| Transporte total | | | | 2.334,8 |
| Total das operações agrícolas | | | | 12.329,7 |
| Entradas da Usina | | | | |
| Reagentes químicos usados na usina ^d | | | | 487,6 |
| Água | | L | | 0,0 |
| Cimento | 11,5 | kg | | 75,9 |
| Aço leve estrutural | 28,1 | kg | | 841,8 |
| Aço leve em equipamentos | 23,1 | | | 693,5 |
| Aço inoxidável | 4,0 | kg | | 287,1 |
| Retificação até 99,5% | | | | 225,3 |
| Tratamento de efluentes | 0 | | | 0,0 |
| Total de entradas na usina | | | | 2.611,1 |
| Total de todas entradas de energia fóssil | | | | 14.940,8 |
| Saídas | | | | |
| Rendimento da cana-de-açúcar | 79,5 | Mg/ha | | |
| Produção total de etanol | 6.510,0 | L/ha | 21,45 | 139.639,5 |
| Balanço energético final ^e | | | | 9,35 |

^a Estimado como correspondente a 2,6% de todas as entradas agrícolas.

^b Transporte de máquinas, implementos, etc., para a lavoura ou fábrica.

^c Transporte de cana colhida para a usina.

^d Adaptado de Macedo et al., (2003) Tab. 3.

^e Total de energia produzida/energia fóssil investida.

total, ou 8,35 MJ de energia renovável, na forma de etanol da cana.

As emissões de gases de efeito estufa (GEEs) CO₂, CH₄ e N₂O durante a produção da cana de açúcar e sua conversão em etanol

Uma molécula do gás metano (CH₄) na atmosfera tem um potencial de efeito-estufa 21 vezes maior do que a de CO₂, enquanto que uma molécula de óxido nitroso (N₂O) apresenta um potencial 310 vezes maior (IPCC, 2006). Portanto, pequenas emissões desses gases durante a fabricação dos insumos e combustíveis fósseis, utilizados nas operações agrícolas e de processamento da cana para produzir etanol, podem contribuir significativamente para o efeito estufa do

planeta. Ainda, os resíduos do processamento industrial, como a vinhaça e a queima da palha, podem ser fontes de emissões significativas de CH₄. As emissões mais importantes de N₂O são esperadas pela aplicação no solo de fertilizantes nitrogenados, tortas e outras fontes de nitrogênio.

Metano e óxido nitroso são produzidos em pequenas quantidades na combustão de petróleo, óleo diesel e outros combustíveis como carvão mineral. Segundo o IPCC (2006) a combustão de petróleo para produzir 1 GJ de energia produz 73,3 kg CO₂, 0,003 kg CH₄ e 0,00006 kg de N₂O. Para 1 GJ de energia derivada de óleo diesel e carvão mineral ("coking coal") são emitidos 74,1 kg CO₂, 0,003 kg CH₄ e 0,00006 kg N₂O e 94,6 kg CO₂, 0,001 kg CH₄ e 0,0015 kg N₂O, respectivamente.

Uma importante fonte de metano é a queima de resíduos agrícolas. Como a maioria da área da cana no País é ainda conduzida sob queima da palhada para facilitar a colheita manual, esta emissão é muito significativa. Variedades de cana diferem muito na quantidade de folhas senescentes presente na hora da colheita. Num estudo conduzido na Embrapa Agrobiologia, encontrou-se que a média anual da palha depositada por 8 variedades comerciais de cana durante um ciclo completo (cana-planta mais 4 socas) variou de 10 a 18 Mg MS ha⁻¹ (XAVIER, 2006). A média de produção da cana (colmos frescos) foi de 72,2 Mg ha⁻¹. Utilizando estas médias, concluiu-se que são depositados 16,4 Mg ha⁻¹ de palha pela cultura anualmente ou 6,56 Mg de C ha⁻¹. Como só 83% da área canavieira nacional é colhida de cada usina a cada ano (5 colheitas em 6 anos) a média de palha queimada por ano (se toda a colheita nacional for realizada após a queima) é de 13,5 Mg de palha ou 5,23 Mg C ha⁻¹. Como não existem dados específicos para a queima da cana quanto as emissões de CH₄ e N₂O, os fatores de emissão fornecidos pelo IPCC (2006) para a queima de resíduos agrícolas foram utilizados. Estes fatores estabelecem que para cada tonelada de MS de cana-de-açúcar, queimada com uma eficiência de 80%, são produzidos 2,7 kg de metano e 0,07 kg de N₂O.

Outras emissões de N₂O têm origem das fontes de N adicionadas à cana no campo. Inicialmente no plantio, adiciona-se N presente na torta de filtro, aproximadamente 5,5 g N kg torta seca⁻¹. Se 10 Mg ha⁻¹ da torta de filtro são adicionados no sulco, isso constitui uma adição de 58 kg ha⁻¹ no plantio, ou 9,2 kg N ha⁻¹ ano⁻¹. Anualmente, parte do N retorna ao solo na palha (~ 30 kg N ha⁻¹), mas se a palha é queimada, este N é perdido e ocorre emissão de N₂O, conforme mencionado no parágrafo anterior. Finalmente, existe a adição do N fertilizante, estimada em 57 kg N ha⁻¹ ano⁻¹. O fator de emissão do IPCC (2006) indica que 1% do N adicionado ao solo é emitido na forma de N₂O. Utilizando este fator, as emissões de N₂O do N adicionado na torta de filtro e fertilizante totalizam 0,66 kg N ou 1,04 kg N₂O ha⁻¹ ano⁻¹.

Não existem ainda dados sobre a emissão de CH₄ ou N₂O da vinhaça. As doses de vinhaça variam de 80 a 150 m³ por ha⁻¹ano⁻¹ podendo chegar a 200 m³, que carregam consigo significativa quantidade de material orgânico e nutrientes. Resende et al. (2006) calcularam que 80 m³ de vinhaça continham 93 kg de K, 35 kg de S, 23 kg de N, e 8 kg de P, mas a composição é muito variável. Como a vinhaça frequentemente contém ao redor de 1 a 2% de carbono solúvel, e a água da lavagem da cana também é contaminada

com algo de açúcar, isto poderia resultar em emissões de CH₄ e N₂O.

Toda a vinhaça produzida na Usina é distribuída nas lavouras de cana-de-açúcar por ferti-irrigação, chegando até os locais de aplicação por canais abertos. A temperatura da vinhaça recém produzida se aproxima dos 100°C e vai esfriando-se no canal de distribuição. A produção de metano pode ocorrer na fase termofílica (~ 60°C) e na mesofílica (~ 40°C), sendo a última mais ativa. Após a aplicação da vinhaça na lavoura não se espera emissão de CH₄ do solo, ao menos que condições anaeróbicas ocorram por várias horas. Ainda não existem estudos que permitam estimar possíveis emissões de CH₄ dos canais de distribuição, e considerou-se que um valor arbitrário de 0,2% do carbono contido na vinhaça é emitido como CH₄. Nesse caso, a emissão de CH₄ ficou estimada em 2,56 kg ha⁻¹, ou 197,1 kg ha⁻¹ de CO₂ eq..

As emissões de N₂O foram estimadas com base na metodologia do IPCC (2006), uma vez que não existem dados disponíveis sobre o processo no Brasil. De acordo com a metodologia, 1% do N aplicado é emitido como N₂O. Considerando-se que aplicam-se 80 m³ de vinhaça no campo, contendo 20 kg N ha⁻¹, são perdidos anualmente 314 g ha⁻¹ de N₂O, ou 97,3 kg ha⁻¹ de CO₂ eq.

Recentemente, a equipe da Embrapa Agrobiologia, em cooperação com colegas do Campus Leonel Miranda da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, em Campos dos Goytacazes, RJ, iniciou um estudo para avaliar as emissões de N₂O após a aplicação da vinhaça no campo. Apesar da grande frequência das chuvas nesta região durante o período do estudo (novembro 2008 a janeiro 2009) as emissões foram menores do que 1% do N existente na vinhaça. Entretanto, neste documento o valor utilizado foi de 1% do N na vinhaça.

Para fazer um balanço de todas as emissões dos três GEEs, toda energia utilizada na produção de etanol da cana (fases agrícola e industrial) foi convertida em emissões equivalentes de CO₂ fóssil. A energia utilizada para a produção de herbicidas, inseticidas e toletes vêm de uma grande diversidade de fontes, e para isso foi utilizado a conversão de MJ para CO₂ assumindo os fatores de emissão para petróleo ("crude oil") do IPCC (2006). A energia embutida nas máquinas agrícolas e da usina foi contabilizada como se fosse a mesma para fabricação de aço (energia fornecida por carvão mineral). O combustível para tratores foi contabilizado como óleo diesel. Emissões de CO₂ do calcário

aplicado na agricultura foram calculadas utilizando o fator de 0,75 (IPCC, 2006 - Tier 1).

As emissões de CO₂ na fabricação dos fertilizantes foram calculadas baseando-se nos fatores recomendados por Kongshaug (1998). Por esses fatores, a produção de 1 kg de uréia, 1 kg de superfosfato simples e 1 kg de cloreto de potássio emitem para a atmosfera, 0,61, 0,17 e 0,34 kg CO₂eq, respectivamente.

As estimativas das emissões dos três GEEs são sumarizados na Tab. 3. As emissões de CO₂ derivadas do uso de energia fóssil predominam no plantio da cana, devido a utilização de máquinas agrícolas para realizar a preparação do solo e abertura de sulcos de plantio e transporte dos insumos. Durante o crescimento da cultura há emissões significativas de N₂O devido às aplicações de N como fertilizante ou de fontes orgânicas (vinhaça e tortas), constituindo 80% das emissões totais em equivalentes de CO₂ nesta fase. Na colheita, a queima da cana é responsável por grandes emissões de CH₄ e N₂O, que totalizam 982,3 kg e 195,3 kg de equivalentes do CO₂, respectivamente, para 60% da área colhida com queima, totalizando 39% de todas as emissões de GEEs no processo de produção de álcool.

Mitigação das emissões de GEEs na substituição do diesel ou gasolina convencional por bioetanol da cana

Recentemente, um estudo francês compilou resultados de

três trabalhos independentes que avaliaram os ciclos de vida e emissões de gases estufa associados às indústrias de combustíveis fósseis baseados no petróleo, e de biocombustíveis (ADEME, 2006). Com algumas diferenças pontuais, os três estudos apontaram que, na produção e distribuição de gasolina e óleo diesel (análise do tipo "cradle-to-tank"), as emissões de gases de efeito estufa ficam na média de 12 e 10,7 g em equivalentes CO₂, respectivamente, para cada MJ de energia contida nestes combustíveis. Isto significa que, ao chegar ao posto de combustível e mesmo antes da combustão, um litro de gasolina já emitiu para a atmosfera 507 g de CO₂. Do mesmo modo, 1 litro de óleo diesel antes de ser totalmente transformado em energia nos motores já emitiu 510,4 g de CO₂. Adicionando o CO₂eq emitido na combustão destas combustíveis, 1 litro de gasolina emite um total de 3,65 kg CO₂eq e 1 litro de diesel, 4,01 kg CO₂eq.

De forma hipotética, isto nos permite realizar uma comparação direta entre dois veículos semelhantes, produzidos no Brasil pela mesma companhia, um deles equipado com motor diesel (Caminhonete S 10 cabine simples, motor 2.8 Turbo Diesel, 140 cv de potência máxima) e outro com motor "total-flex" (S 10 cabine simples, motor 2.4 Flexpower, 141 cv com gasolina e 147 cv com álcool). A caminhonete equipada com motor diesel apresenta consumo médio de 13,5 km por L (ponderada, 55% cidade e 45% estrada); e a caminhonete com motor "total-flex", percorre 10,4 ou 7,2 km para cada litro de gasolina ou álcool, respectivamente (WEBMOTORS, 2009). Estes valores são fornecidos pelo próprio fabricante. Utilizando

Tabela 3. Emissões realizadas e emissões evitadas de gases de efeito estufa, GEE (CO₂, N₂O e CH₄) durante as etapas de produção e distribuição de etanol de cana-de-açúcar.

| Etapa de produção | Gás estufa emitido (por ha) | | | |
|--|--|---|--|----------------------------------|
| | CH ₄ g de CH ₄ ou N ₂ O ha ⁻¹ ano ⁻¹ | N ₂ O g de CH ₄ ou N ₂ O ha ⁻¹ ano ⁻¹ | CO ₂ kg ha ⁻¹ ano ⁻¹ | CO ₂ eq. ^a |
| Plantio da cana ^b | + 8,9 | + 1,8 | + 718,0 | + 719,1 |
| Manejo da cultura ^c | + 2,7 | + 1.362,9 | + 86,9 | + 509,5 |
| colheita ^d | + 17.017,1 | + 631,4 | + 315,0 | + 1493,5 |
| Produção de etanol ^e | + 3.413,3 | --- | + 107,6 | + 304,7 |
| Distribuição do etanol ^f | --- | --- | --- | + 217,3 |
| | Emissão total de GEE fóssil | | | + 3.244,1 |
| Uso combustível do etanol ^g | --- | --- | - 9.580,6 | - 9.580,6 |

^a Cada mol de N₂O e CH₄ é considerado como equivalente a 310 and 21 moles de CO₂, respectivamente (IPCC, 2006). Valores positivos se referem a emissões, valores negativos se referem a emissões evitadas.

^b Maquinário e diesel (50% do total), transporte, mão-de-obra (20% total), herbicidas, calagem, fertilização, e operações de plantio.

^c Maquinário e diesel (10% do total), mão-de-obra (20% total), inseticidas, irrigação e emissões do solo derivadas do fertilizante e da vinhaça (80 m³ ha⁻¹).

^d Maquinário e diesel (40% do total), mão-de-obra (60% total), emissões de resíduos após queima da palhada para colheita de 60% da área e transporte.

^e Instalações da usina, destilaria, processamento e emissão de CH₄ da vinhaça nos canais de distribuição, assumindo-se que 0,2% do C existente na vinhaça (~ 16 kg m⁻³) se reduzem à CH₄.

^f Assumindo que um distância média de 500 km entre as usinas e postos de combustível, via distribuidores.

^g Assumindo que o etanol (teor de C de 52%) é completamente queimado.

estes valores, em uma viagem de 100 km o veículo a diesel libera 29,69 kg de CO₂ equivalente para a atmosfera, correspondente aos gases de efeito estufa emitidos pela indústria na extração, refino, processamento e transporte associados a este combustível, somados a todo o gás carbônico produzido na queima, no motor. O veículo "flex" que utilizasse gasolina pura emitiria, no mesmo trajeto, 35,10 kg de CO₂ (Tab. 4).

Já para este mesmo veículo "flex" rodando com etanol, a média de consumo é de 7,2 km L⁻¹. Assim, nos mesmos 100 km percorridos há o gasto de aproximadamente 13,9 L de combustível. Com base nos dados de emissão total de gases estufa derivados do investimento de energia fóssil para produção de cana no modelo atual onde ainda se queima a palha da cultura em aproximadamente 60% da área, este automóvel emitiria um total de 6,92 kg de CO₂ eq, 5,1 vezes menos do que se rodasse com gasolina pura, o que representa uma mitigação de 80% na emissão de gases de efeito estufa. Nas condições reais, onde acrescenta-se até 23% de etanol à gasolina nacional, o veículo emitiria aproximadamente 28,6 kg de CO₂ equivalente. Isto significa que a gasolina no padrão brasileiro emite aproximadamente 18% menos gases de efeito estufa do que a gasolina comercializada em outras partes do mundo onde não há adição de álcool. No mesmo percurso, o veículo a álcool emitiu aproximadamente 77% menos CO₂ do que o veículo de mesma potência rodando com óleo diesel, e 76% menos que o veículo com gasolina brasileira (com 23% de etanol).

Também é pertinente e ilustrativo calcular a possibilidade de mitigação de GEEs (emissões evitadas) por 1 ha plantado com a cana. Considerando-se o rendimento de um carro a gasolina (10,4 km L⁻¹) e a álcool (7,2 km L⁻¹), significa que 6.500 L de álcool (a produção média nacional por ha,) faz um carro andar da mesma forma que 4.500 L gasolina, uma distância de 46.800 km. Utilizando os valores das emissões estimados em CO₂ eq. mostradas na Tab. 4, a caminhonete

consumindo gasolina emite 16.425 kg CO₂ eq. para a atmosfera. Esta mesma caminhonete andando com etanol de cana para a mesma distância emite somente 3.244 kg de CO₂ eq. A diferença entre estes dois valores (13.180 kg de CO₂ eq) representa o carbono seqüestrado (ou emissão evitada) por um ha de cana utilizada para a produção de etanol, quando é usado em substituição à gasolina convencional (não misturada com etanol).

O impacto nas emissões de GEEs da mudança da colheita manual de cana queimada para a colheita mecanizada de cana crua

Devido às pressões políticas exercidas por organizações não-governamentais e agências ambientais, há um movimento forte que busca acabar com a queima da cana-de-açúcar antes do corte para facilitar a colheita manual. Os prejuízos à qualidade do ar e ao sistema respiratório humano pela fumaça e fuligem emitidas no processo da queima estão bem documentados na literatura (GODOI et al., 2004; ARBEX et al., 2007). Esta poluição atmosférica afeta principalmente crianças e idosos.

O movimento contra a queima da cana é especialmente intenso no estado de São Paulo, onde a legislatura estadual aprovou uma lei no ano de 2003 que determina a eliminação total do processo de queima da cana para colheita até o ano de 2022. Somente para o caso de terras com declive maior de 12%, onde a colheita mecânica é evidentemente inviável, é que a queima será permitida até 2032.

A mudança da colheita manual de cana queimada para a colheita mecanizada de cana crua tem grandes implicações sociais, porque uma colheitadeira realiza o trabalho de 80 a 100 cortadores de cana. Entretanto, no que diz respeito às emissões de GEEs, esta alteração tem duas conseqüências principais:

1. A colheita de cana crua elimina a emissão dos gases

Tabela 4. Produção de CO₂ por automóvel caminhonete (S10 cabine simples) com motores de potência semelhante que rodam com diesel, gasolina pura, gasolina brasileira (misturada com 23% etanol) e etanol puro de cana-de-açúcar, e emissões de CO₂ evitadas com a substituição da gasolina pura pela gasolina brasileira e pelo etanol.

| Modelo | Motor | Combustível | Rendimento Km/L | Potência Máxima | GEEs emitido kg CO ₂ | Emissão evitada (%) |
|--------------------|---------------|----------------------------------|-----------------|-----------------|---------------------------------|---------------------|
| S10 cabine simples | 2.8 turbo | Diesel | 13,5 | 140 CV | 29,69 | -- |
| S10 cabine simples | 2.4 flexpower | Gasolina pura | 10,4 | 141 CV | 35,10 | 0 |
| S10 cabine simples | 2.4 flexpower | Gasolina brasileira (23% etanol) | 9,5 | 141 CV | 28,62 | 18 |
| S10 cabine simples | 2.4 flexpower | Etanol (cana-de-açúcar) | 7,2 | 147 CV | 6,92 | 80 |

metano e N_2O , que totalizam $1.719 \text{ kg CO}_2 \text{ ha}^{-1}$, mas também reduz a emissão derivada da mão-de-obra em mais de três vezes. Em compensação a máquina colhedora de cana corta 70 Mg de cana por hora, mas consome 40 L de diesel no mesmo período. A Tab. 5 mostra a comparação entre as emissões dos dois sistemas do corte. É muito claro que além da eliminação da poluição atmosférica com fumaça e fuligem, apesar do consumo pesado da máquina cortadora, a eliminação da queima diminui em quase 80% as emissões totais de GEEs que ocorrem na colheita.

2. A manutenção da palha no terreno preserva os nutrientes, especialmente N e S, mantém bons níveis de umidade e protege a superfície do solo. Um estudo de longo prazo iniciado em 1983 pela equipe da Embrapa Agrobiologia na Usina Cruangi, em Timbaúba, Zona da Mata em Pernambuco, mostrou que nas áreas onde a palha foi preservada, após 16 anos de cultivo, o rendimento de colmos foi em média 25% maior (58 Mg ha^{-1}) do que nas áreas onde a cana foi queimada para colher 46 Mg ha^{-1} (RESENDE et al., 2006). Essa região é marginal para o plantio de cana-de-açúcar devido à variação sazonal e anual na quantidade de chuva. O maior efeito benéfico da preservação da palha foi em anos com menos chuvas. No final do experimento avaliaram-se os estoques de carbono no solo, encontrando-se se uma tendência para que os estoques até 60 cm de profundidade fossem incrementados em $2,5 \text{ Mg C}$ após 16 anos. Os autores sugeriram que a pequena diferença entre os estoques de C do solo sob a cana queimada e cana crua foi devida a três renovações do canavial, processo que envolve a intensa mecanização do solo, como mencionado anteriormente. Outro experimento

de longo prazo conduzido pelo Departamento de Solos da UFRRJ em cooperação com Embrapa Agrobiologia em Linhares (ES), mostrou que, depois de 14 anos, a preservação da palhada teve pouca influência no rendimento da cana, sendo que foram obtidos rendimentos médios de 80 Mg ha^{-1} quando a palha foi colhida crua e 78 Mg ha^{-1} onde a cana foi queimada (PINHEIRO et al., 2009). Neste caso, o canavial não foi renovado durante os 14 anos, mas, novamente, a diferença em estoques de carbono no solo (até 100 cm) sob os dois sistemas não foi significativa estatisticamente, embora a diferença tenha sido de $13 \text{ Mg de C ha}^{-1}$.

Estes dados indicam que a manutenção da palhada promove apenas pequenos incrementos nos estoques de C do solo, em comparação ao sistema de colheita com queima da palhada. Nesses dois estudos, todas as colheitas foram manuais, o que não reflete a transformação real do que está gradativamente acontecendo no Brasil, ou seja a mudança da colheita manual da cana queimada para a colheita mecanizada de cana crua.

Campos (2004) estudou em detalhe as quantidades de palhada depositadas no sistema de cana crua, e comparou os estoques de C no perfil do solo em dois experimentos, implantados em dois sítios na região de Ribeirão Preto (SP). O acúmulo de palha após 4 anos sem queima foi de 3,6 a 4,5 Mg de matéria seca (1,6 a 2,0 Mg de C por hectare), sendo detectado um aumento de aproximadamente $1 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ no perfil do solo onde a palha foi preservada, em comparação com as parcelas que foram queimadas. Entretanto, este estudo foi de curto prazo, sem a renovação

Tabela 5. Comparação das emissões (por hectare) de gases efeito estufa nos sistemas de colheita manual da cana queimada e da colheita mecanizada da cana crua.

| Fonte da emissão | Emissão | | | Total (kg eq.CO ₂ ha ⁻¹) |
|-----------------------------------|---------------------------------------|--|---|---|
| | CH ₄ (g ha ⁻¹) | N ₂ O (g ha ⁻¹) | CO ₂ fóssil (kg ha ⁻¹) | |
| Colheita manual, cana queimada | | | | |
| 1. A queima da cana | 28.350 ^a | 735 ^b | - | 1.865,1 |
| 2. Mão de obra e transporte | - | - | 327,6 | 327,6 |
| TOTAL | | | | 2.192,7 |
| Colheita mecanizada, cana crua | | | | |
| 1. Combustível colheitadeira | 5,7 | 1,1 | 141,5 | 142,1 |
| 2. GEEs embutido na colheitadeira | - | - | 5,1 | 5,1 |
| 3. Mão de obra e transporte | - | - | 151,5 | 151,5 |
| 4. Mineralização dos resíduos | - | 471,4 | - | 146,1 |
| TOTAL | | | | 444,8 |

^a As emissões de metano (CH₄) pela queima seguiram a metodologia do IPCC, utilizando-se uma produção de resíduos (palha) de $13,1 \text{ Mg ha}^{-1}$, obtida de experimentos realizados no Brasil, com uma eficiência de queima de 80% e fator de emissão de $2,7 \text{ kg CH}_4 \text{ Mg}^{-1}$ resíduo queimado, os dois últimos, valores default para cana-de-açúcar (IPCC, 2006).

^b A mesma metodologia para o cálculo das emissões de CH₄ pela queima foi usada para as emissões de óxido nitroso (N₂O), porém o fator de emissão foi de $0,07 \text{ kg N}_2\text{O Mg}^{-1}$ resíduo queimado; valor default para cana-de-açúcar (IPCC, 2006).

do canavial, e os estudos realizados na Embrapa Agrobiologia sobre o seqüestro de carbono no solo, bem como os de Feller et al. (2001) e Cerri et al. (2007) indicam que a preservação da palha é capaz de promover um aumento de C no solo entre 0,2 e 0,9 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ para os primeiros 10 ou 15 anos após a conversão do manejo de cana queimada para cana crua. Após esse tempo, o sistema se aproxima do equilíbrio entre entrada de resíduos no solo e decomposição (emissão de CO₂), e a taxa de acúmulo anual de C no solo é reduzida.

O impacto nas emissões de GEEs da expansão da área da cana-de-açúcar para produzir etanol.

A área ocupada com a cultura de cana-de-açúcar vem crescendo rapidamente no País, passando de cerca de 6 Mha em 2006 para 9,4 Mha plantados em 2009 (IBGE, 2009). A rápida expansão da cultura foi motivada por uma expectativa de aumento de consumo inter-no de álcool combustível e também das exportações desse produto em função dos altos preços internacionais do petróleo em 2008. Apesar da crise financeira global, que fez despencar o preço do petróleo de US\$ 140 o barril para o patamar de US\$ 40 a 50 em menos de 6 meses, acredita-se que a tendência de aumento de demanda pelo etanol de cana-de-açúcar não deverá ser muito afetada. Existe forte pressão internacional para que combustíveis renováveis ganhem volume na matriz energética em função do aquecimento global.

Apesar do grande potencial do etanol de cana em mitigar emissões de gases de efeito estufa em substituição a gasolina, existe forte preocupação relacionada à forma como se dará a expansão da cultura. De acordo com a CONAB, para a safra 2008/2009 o País possui cerca de 50 Mha do território ocupados com lavouras temporárias e permanentes. A estatística sobre as pastagens não é muito freqüente, sendo disponibilizada pelo IBGE a cada 5 ou 10 anos. A área ocupada total no País foi de 172,3 milhões de hectares em 2006, uma pequena queda em relação a 1996, quando foram contabilizados 177,7 milhões de hectares.

No Estado de São Paulo, principal produtor de cana-de-açúcar do País, as estatísticas sobre uso da terra (IBGE), mostram que, de 1970 a 2006, a área de florestas se manteve relativamente estável, com queda na área de pastagens e aumento nas áreas de lavouras (Fig. 1a). Com relação à área plantada com a cultura de cana-de-açúcar, no estado de São Paulo foi onde houve maior expansão, com 1,3 milhões de hectares a mais em 2007 do que em

2001 (Fig. 1b), sendo a taxa de crescimento maior no período 2005-2007. No período de 2005 a 2007, a área de soja e milho (primeira safra) encolheu 345 mil hectares, sendo as áreas de citrus e café praticamente inalteradas. Neste mesmo período, a área de cana-de-açúcar expandiu em 805 mil hectares, sugerindo que a expansão da cultura ocorreu principalmente em áreas de pastagens, mas também sobre áreas de lavouras.

De acordo com Boddey et al. (2006) e Cerri et al. (2007), a mudança de uso do solo sob pastagens para lavouras de cana-de-açúcar, colhida crua, leva a um incremento nos estoques de C do solo entre 0,1 a 0,9 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹, dependendo do grau de degradação dos solos, podendo-se abstrair um valor médio de 0,5 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹ (1,8 Mg CO₂ ha⁻¹ ano⁻¹). A princípio, com base na informação disponível, considerou-se aqui que a mudança de pastagens para lavouras de cana-de-açúcar com colheita após queima não implica em mudanças significativas nos estoques de C do solo.

No caso da mudança de áreas de lavouras de grãos para a cultura de cana-de-açúcar, são raras as informações disponíveis, mas certamente as alterações nos estoques de C do solo dependerão da forma de preparo do solo das lavouras e da rotação de culturas utilizada anteriormente. Tipicamente no Brasil, a soja é a cultura principal da safra de verão, sendo a cada três a cinco anos rotacionada com a cultura do milho. Assim, é razoável considerar que 75% das áreas de lavoura de grãos são ocupadas com soja e 25% com milho. Estima-se que dessa área de grãos, aproximadamente 50% seja conduzida em sistema plantio direto (FEBRAPDP, 2009). A entrada da cultura da cana em áreas sob plantio direto não deve alterar os estoques de C do solo, desde que colhida crua. A utilização da cana-de-açúcar em áreas onde se pratica o preparo convencional do solo deve aumentar os estoques de C do solo numa taxa semelhante ao que aconteceria nas pastagens (0,5 Mg ha⁻¹ ano⁻¹), embora não existam trabalhos de pesquisa publicados sobre essa situação.

Para avaliar o impacto da mudança de uso do solo, é importante considerar também as emissões de N₂O e CH₄ gases decorrentes do manejo das culturas. Os dados apresentados na Tab. 3 permitem estimar um total de 2.919 kg CO₂ eq. ha⁻¹ ano⁻¹ emitidos pelo cultivo da cana-de-açúcar, devendo-se ainda somar a este número o efeito sobre os estoques de C do solo na mudança de uso do solo.

No caso da soja, as emissões de gases de efeito estufa associadas à cultura surgem do uso de adubos (P, K e micronutrientes) e corretivos de solo, herbicidas e

pesticidas, e as operações mecânicas para plantio, tratos culturais, colheita e armazenamento de grãos, tudo isso consumindo cerca de 11 GJ ha⁻¹ (SOARES et al., 2007), que em termos de petróleo significam (1 GJ de energia de petróleo produz ~ 73,5 kg CO₂ eq) 808,5 kg CO₂ ha⁻¹ emitidos para a atmosfera. Além disso, ocorrem emissões de N₂O do solo devido à decomposição dos cerca de 35 kg N ha⁻¹ contido nos resíduos de colheita (ALVES et al., 2002), que correspondem a 0,55 kg N₂O ha⁻¹ ano⁻¹, ou 1% do N do resíduo (IPCC, 2006). No total, a produção de soja emite aproximadamente 979 kg CO₂ ha⁻¹ safra⁻¹.

Para a cultura do milho, aproximadamente 40% da área cultivada pertence aos grandes produtores, e a quantidade de energia gasta com mecanização, transporte, mão-de-obra e insumos, sem contar o uso de nitrogênio, é de aproximadamente 12 GJ ha⁻¹ (SOARES et al., 2007) ou 882 kg CO₂ eq ha⁻¹. Para pequenos produtores, são atividades comuns o preparo de solo, uso de calcário e mão-de-obra, assumindo-se assim um gasto de energia de 2 GJ ha⁻¹, ou uma emissão de 147 kg CO₂ ha⁻¹. Dessa forma, considerando-se as proporções entre grandes e pequenos produtores, a produção de milho produz cerca de 440 kg CO₂ ha⁻¹, sem considerar o uso de N fertilizante. Os grandes produtores aplicam em média 80 kg N ha⁻¹ de fertilizante, e os pequenos produtores praticamente não usam esse insumo. Dessa forma, pode-se dizer que em média 30 kg N ha⁻¹ são aplicados na cultura do milho, que somente pelas etapas de fabricação, processamento, transporte e aplicação, produzem em média, 135 kg CO₂ ha⁻¹ (ROBERTSON e GRACE, 2004). O total de N que retorna nos resíduos varia de 30 a 40 kg N ha⁻¹ (ALVES et al., 2006), mas considerando-se a contribuição das raízes, poderia chegar a 50 kg N ha⁻¹. Isso implica em um total de emissões de N₂O do solo de 0,8 kg N-N₂O ha⁻¹, ou 390 kg CO₂ eq ha⁻¹ ano⁻¹. Todo o processo de produção de milho produz cerca de 966 kg CO₂ ha⁻¹ safra⁻¹.

Em áreas de pastagens as emissões de N₂O ocorrem pela deposição de excretas dos bovinos e aplicação de fertilizantes, embora esta última fonte seja utilizada somente na formação das pastagens, e em uma proporção muito pequena da área total do País. Assim, é muito provável que a maioria da área de pastagens que vem sendo convertida na lavoura de cana-de-açúcar deva ser de uso extensivo, tipicamente sem aplicação de fertilizante nitrogenado e com uma carga animal média de ~ 0,7 U.A. ha⁻¹. Em estudo feito pela Embrapa Agrobiologia, encontrou-se uma emissão de N₂O da urina de 217 g N ha⁻¹ ano⁻¹ para 1 U.A. (LENGRUBER et al., 2006), e que nas condições tropicais as perdas de N₂O das fezes são praticamente nulas (LESSA et

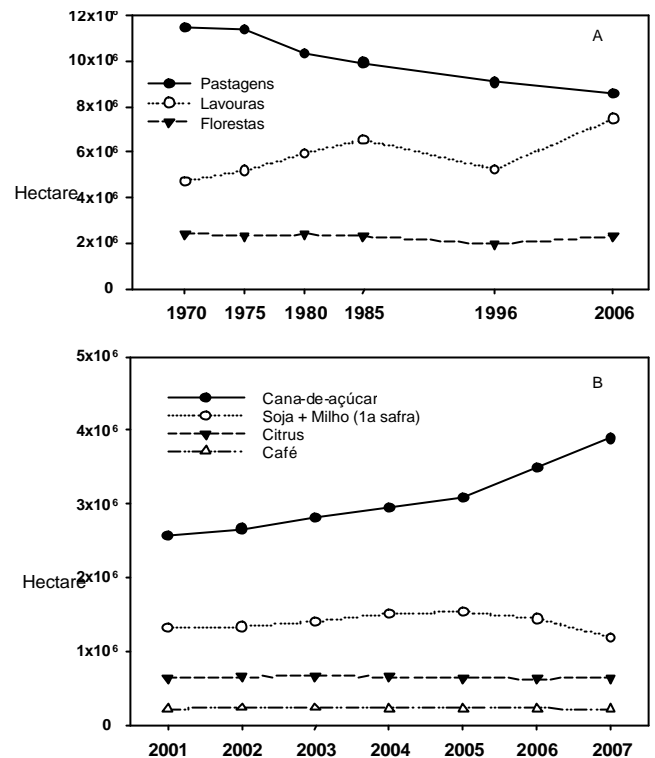


Fig. 1. Alterações no uso agrícola da terra no Estado de São Paulo. A. Flutuação nas áreas totais de pastagens, lavouras e Florestas de 1970 até 2006. B. Ocupação das áreas agrícolas com as principais culturas do Estado no período de 2001 a 2007.

al., 2008). Utilizando-se esses números, pode-se dizer que as pastagens estariam emitindo 239 g N₂O ha⁻¹ ano⁻¹, ou 74 kg CO₂ eq ha⁻¹ ano⁻¹. Considerando o dado médio de emissão de metano ruminal por bovinos criados em pastos de braquiária, apresentado por Demarchi et al. (2003), de 119 g (0,7 U.A.)⁻¹ dia⁻¹, ou o equivalente a 2.508 kg CO₂ eq ha⁻¹ ano⁻¹, o total de gases emitidos do solo e animal seria de 2.582 kg CO₂ eq ha⁻¹ ano⁻¹. Em áreas experimentais de pastagem, no Cerrado, Soares et al. (2007) calcularam um gasto de energia de 742,51 GJ em sanidade, nutrição e transporte de animais. Utilizando esses resultados como base para o presente estudo, pode-se considerar uma produção de aproximadamente 260 kg CO₂ eq ha⁻¹ para manutenção da pastagem. No total, estima-se uma emissão de 2.842 kg CO₂ eq ha⁻¹ da área de pastagem considerada neste estudo.

Assim, quando 1 ha de lavoura (50% plantio direto no sistema soja-milho) passa a ser ocupada por cana-de-açúcar (40% da área colhida crua), ocorrem emissões de gases de efeito estufa do solo de aproximadamente 1,58 Mg CO₂ ha⁻¹ ano⁻¹. Ao contrário, no caso de 1 ha de pastagem ser substituído por 1 ha de cana-de-açúcar (40% da área colhida crua), seriam evitadas emissões ao redor de 0,64 Mg CO₂ eq. ha⁻¹ ano⁻¹. Considerando-se o uso da cana para

produção de etanol, e que o mesmo é usado em substituição à gasolina convencional (sem mistura de etanol), as emissões evitadas pelo plantio da cana em áreas de pastagens são maiores que $13,2 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, e que no caso de plantios em áreas de grãos, o benefício ainda é muito elevado, acima de $11 \text{ Mg CO}_2 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$.

Estes cálculos foram baseados nos modelos de pastagens, lavouras de grãos e de cana-de-açúcar anteriormente discutidos, e certamente vão mudar em função de alterações nas formas de manejo dos sistemas, no entanto, a tendência é a de que sempre haverá mitigação expressiva de emissões de CO_2eq .

Questões finais: as emissões ainda não avaliadas e as prioridades para pesquisa

O presente estudo evidenciou a falta ou limitada disponibilidade de fatores de emissão de gases estufa pela agropecuária brasileira, decorrentes da carência de estudos sobre o assunto no País. No que se refere ao período que vai do plantio a colheita da cultura de cana-de-açúcar, são necessários mais dados sobre as emissões de N_2O e CH_4 originadas da aplicação de fertilizantes e, principalmente, de resíduos orgânicos, derivados dos compostos torta de filtro e vinhaça geralmente aplicados nesta cultura. Neste último caso, foi evidenciada no texto a grande lacuna sobre emissões de gases derivadas da vinhaça existente nos canais de distribuição e após aplicação no solo. O fator de emissão de 0,2% ($0,2\text{g C-CH}_4/100 \text{ g C-vinhaça}$), usado neste trabalho, foi baseado na experiência dos autores, sem maior suporte de resultados de outros grupos. É necessário enfatizar a necessidade de estudos que apontem para o uso eficiente dos insumos agrícolas, como o próprio manejo, sobretudo para minimizar insumos ou processos que demandem altos níveis de energia fóssil ou emitam altos níveis de gases estufa, e aqui destaca-se a fixação biológica de nitrogênio (FBN) que poderia reduzir significativamente a demanda de N-fertilizante pelas culturas.

Referências Bibliográficas

ADEME. Agence de l'Environnement et de la Maîtrise de l'Energie (France). Technical report: **Energy and GhG balances of biofuels and conventional fuels: convergences and divergences of main studies**. Paris: ADEME-Ecobilan, 2006, 28 p.

ALVES, B. J. R.; ZOTARELLI, L.; BODDEY, R. M.; URQUIAGA, S. Soybean benefit to a subsequent wheat crop in a cropping system under zero tillage. In: INTERNATIONAL SYMPOSIUM ON NUCLEAR TECHNIQUES IN INTEGRATED PLANT NUTRIENT, WATER AND SOIL MANAGEMENT, out., 2000, Viena. **Abstracts...** Viena: IAEA, 2000. p. 27-28.

ALVES, B. J. R.; ZOTARELLI, L.; FERNANDES, F. M.; HECKLER, J. C.; MACEDO, R. A. T. de; BODDEY, R. M.; JANTALIA, C. P.; URQUIAGA, S. Fixação biológica de nitrogênio e fertilizantes nitrogenados no balanço de nitrogênio em soja, milho e algodão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 41, p. 449-456, 2006.

ARBEX, M. A.; MARTINS, L. C.; OLIVEIRA, R. C.; PEREIRA, L. A. A.; ARBEX, F. F.; CANÇADO, J. E. D.; SALDIVA, P. H. N.; BRAGA, A. L. F. Air pollution from biomass burning and asthma hospital admissions in a sugar cane plantation area in Brazil. **Journal of Epidemiology and Community Health**, Londres, v. 61, p. 395-400, 2007.

BODDEY, R. M.; JANTALIA, C. P.; MACEDO, M. O.; OLIVEIRA, O. C. de; RESENDE, A. S.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S. Potential of carbon sequestration in soils of the Atlantic Forest Region of Brazil In: **Carbon sequestration in soils of Latin America**. New York: Food Products Press, 2006. 554 p.

BODDEY, R. M.; POLIDORO, J. C.; RESENDE, A. S.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S. Use of the ^{15}N natural abundance technique for the quantification of the contribution of N_2 fixation to sugar cane and other grasses. **Australian Journal of Plant Physiology**, Melbourne, v. 28, p. 889-895, 2001.

BODDEY, R. M.; SOARES, L. H. B.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S. Bio-Ethanol Production in Brazil. In: PIMENTEL, D. (Ed.). **Biofuels, solar and wind as renewable energy systems**. New York: Springer, 2008. p. 321-356.

CAMPOS, D. C. **Potencialidade do sistema de colheita sem queima da cana-de-açúcar para o sequestro de carbono**. Piracicaba, SP, 2004. 103 f. Tese (Doutorado em Microbiologia Agrícola) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiróz.

CERRI, C. E. P.; SPAROVEK, G.; BERNOUX, M.; EASTERLING, W. E.; MELILLO, J. M.; CERRI, C. C. Tropical agriculture and global warming: impacts and mitigation options. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 64, p. 83-99, 2007.

- DEMARCHI, J. J. A. A.; MANELLA, M. Q.; LOURENÇO, A. J.; ALLEONI, G. F.; FRIGHETTO, R. T. S.; PRIMAVESI, O.; LIMA, M. A. Preliminary results on methane emission by nelore cattle in Brazil grazing *Brachiaria brizantha* cv. Marandu. In: INTERNATIONAL METHANE AND NITROUS OXIDE MITIGATION CONFERENCE, 3., 2003, Beijing. **Proceedings...** Beijing: China Coal Information Institute, 2003. p. 80-84.
- FEBRAPDP. Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha. **Evolução área de plantio direto no Brasil:** gráfico. Disponível em: < <http://www.febrapdp.org.br/> > Acesso em: 15 mar. 2009.
- FELLER, C. Efeitos da colheita sem queima da cana-de-açúcar sobre a dinâmica do carbono e propriedades do solo. Piracicaba, 2001. 150 p. Final Report Fapesp Contract 98/12648-3.
- GODOI, R. H. M.; GODOI, A. F. L.; WOROBIEC A.; ANDRADE, S. J.; DE HOOG, J.; SANTIAGO-SILVA, M. R.; VAN GRIEKEN, R. Characterisation of sugar cane combustion particles in the Araraquara region, Southeast Brazil. **Microchimica Acta**, Viena, v. 145, p. 53-56, 2004.
- IBGE. **Sistema IBGE de recuperação automática.** Disponível em: < <http://www.sidra.ibge.gov.br/> > . Acesso em: 15 jan. 2009.
- IPCC-NGGIP. **Guidelines for national greenhouse gas inventories:** 2006. Disponível em: < <http://www.ipcc-nggi.iges.or.jp/public/2006gl> > . Acesso em: 15 jan. 2009.
- KONGSHAUG, G. Energy consumption and greenhouse gas emissions in fertilizer production. In: IFA TECHNICAL CONFERENCE, 28 set. a 01 de out., 1998, Marrakech, MA. Marrakech: International Fertilizer Industry Association, 1998. 18p
- LAEGREID, M.; BOCKMAN, O. C.; KAARSTAD, O. **Agriculture, fertilizers and the environment.** Wallingford: CABI, 1999. 320p.
- LENGRUBER, J. A.; JANTALIA, C. P.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R. Produção de óxido nitroso derivado da urina bovina em pastagem de braquiária In: FERTBIO 2006; REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS 27.; REUNIÃO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 11.; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 9.; REUNIÃO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO, 6., 2006, Bonito, MS. **Anais...** Dourados: Embrapa Agropecuária Oeste, 2006. p. 1-4.
- LESSA, A. C. R.; LENGRUBER, J. A.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M.; ALVES, B. J. R. Emissão de óxido nitroso de fezes e urina bovina. In: FERTBIO, 2008; REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS 28.; REUNIÃO BRASILEIRA SOBRE MICORRIZAS, 12.; SIMPÓSIO BRASILEIRO DE MICROBIOLOGIA DO SOLO, 10.; REUNIÃO BRASILEIRA DE BIOLOGIA DO SOLO, 7., 2008, Londrina, PR. **Anais...** Londrina: Embrapa Soja; SBSCS; IAPAR; UEL, 2008. 4 p.
- LIMA, E.; BODDEY, R. M.; DÖBEREINER, J. Quantification of biological nitrogen fixation associated with sugar cane using a ¹⁵N aided nitrogen balance. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, UK, v. 19, p. 165-170, 1987.
- MACEDO, I. C. Greenhouse gas emissions and energy balances in bio-ethanol production and utilization in Brazil. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, UK, v. 14, p. 77-81, 1998.
- MACEDO, I. C.; SEABRA, J. E. A.; SILVA, E. A. R. Greenhouse gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: the 2005/2006 averages and a prediction for 2020. **Biomass and Bioenergy**, Oxford, UK, v. 32, p. 582-595. 2008.
- OLIVEIRA, M. D. Sugarcane and ethanol production and carbon dioxide balances. In: PIMENTEL, D. (Ed.) **Biofuels, solar and wind as renewable energy systems.** New York: Springer, 2008. p. 215-230,
- OLIVEIRA, M. D.; VAUGHAN, B. E.; RYKIEL JR., E. J. Ethanol as fuel: energy, carbon dioxide balances and ecological footprint. **BioScience**, Washington, DC, v. 55, p. 593-602, 2005.

PIMENTEL, D. **CRC Handbook of energy utilization in agriculture**. Boca Raton: CRC Press. 1980. 475 p.

PIMENTEL, D.; WARNEKE, A. F.; TEEL, W. S.; SCHWAB, K. A.; SIMCOX, N. J.; EBERT, D. M.; BAENISCH, K. D.; AARON, M. R. Food versus biomass fuel: socioeconomic and environmental impacts in the United States, Brazil, India, and Kenya. **Advances in Food Research**, San Diego, CA, v. 32, p. 185-237, 1988.

PIMENTEL, D.; PATZEK, T. Ethanol production: energy and economic issues related to U.S. and Brazilian sugarcane. In: PIMENTEL, D. (Ed.) **Biofuels, solar and wind as renewable energy systems**. New York: Springer, 2008. p. 357-371.

PINHEIRO, E. F. M.; LIMA L.; CEDDIA, M. C.; URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M. **Long-term effects of pre-harvest burning on soil carbon and nitrogen stocks on a sugarcane plantation in the Brazilian Atlantic forest region**. 2009. Trabalho no prelo.

PINTO, A. S. (Org.). **Controle de pragas da cana-de-açúcar**. Sertãozinho, SP: Biocontrol, 2006. (Série Biocontrol, v. 1).

RESENDE, A. S.; XAVIER, R. P.; OLIVEIRA, O. C.; URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M. Long-term effects of pre-harvest burning and nitrogen and vinasse applications on yield of sugar cane and soil carbon and nitrogen stocks on a plantation in Pernambuco, N.E. Brazil. **Plant and Soil**, The Hague, v. 281, p. 339-351, 2006.

ROBERTSON, G. P.; GRACE, P. R. Greenhouse gas fluxes in tropical and temperate agriculture: the need for a full-cost accounting of globalwarming potentials. **Environment, Development and Sustainability**, Chicago, v. 6, p. 51-63, 2004.

SOARES, L. H. B.; MUNIZ, L. C.; FIGUEIREDO, R. S.; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M.; URQUIAGA, S.; MADARI, B. E.; MACHADO, P. L. O. A. **Balanco energético de um sistema integrado lavoura-pecuária no Cerrado**. Seropédica, RJ: Embrapa Agrobiologia, 2007. 28 p. (Embrapa Agrobiologia. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 26).

URQUIAGA, S.; ALVES, B. J. R.; BODDEY, R. M. Produção de biocombustíveis - A questão do balanço energético. **Revista de Política Agrícola**, Brasília, DF, v. 14, p. 42-46, 2005.

URQUIAGA, S.; CRUZ, K. H. S.; BODDEY, R. M. Contribution of nitrogen fixation to sugar cane: Nitrogen-15 and nitrogen-balance estimates. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, WI, v. 56, p.105-114, 1992.

WEBMOTORS. Disponível em: < http://www.webmotors.com.br/wmpublicador/Testes_Conteudo.vxlpub?hmid=35489 > . Acesso em: jan. de 2009.

XAVIER, R. P. **Contribuição da fixação biológica de nitrogênio na produção sustentável de cana-de-açúcar**. Seropédica, 2006. 114 f. Tese. (Doutorado em Fitotecnia) - Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

Circular Técnica, 27

Exemplares desta edição podem ser adquiridos na:
Embrapa Agrobiologia
Endereço: BR 465, km 7, Caixa Postal 74505,
23851-970 - Seropédica, RJ
Fone: (021) 3441-1500
Fax: (021) 2682-1230
E-mail: sac@cnpab.embrapa.br

Embrapa

Ministério da Agricultura,
Pecuária e Abastecimento



1ª edição
1ª impressão (2009): 50 exemplares

Comitê de publicações

Presidente: Norma Gouvea Rumjanek.
Secretário-Executivo: Carmelita do Espírito Santo.
Membros: Bruno José Rodrigues Alves, Ednaldo da
Silva Araújo, Guilherme Montandon Chaer, José Ivo
Baldani, Luis Henrique de Barros Soares.

Expediente

Supervisão editorial: Maria Christine Saraiva Barbosa.
Revisão de texto: Norma Gouvea Rumjanek e
Eduardo Francia Carneiro Campello.
Editoração eletrônica: Marta Maria Gonçalves Bahia.