

ANÁLISE ENERGÉTICA DO GIRASSOL IRRIGADO COM ESGOTO DOMÉSTICO TRATADO PARA PRODUÇÃO DE BIODIESEL¹

CLEY ANDERSON SILVA DE FREITAS^{2*}; ALEXANDRE REUBER ALMEIDA DA SILVA³; FRANCISCO MARCUS LIMA BEZERRA⁴; RICARDO RODRIGUES DE ANDRADE⁵; FRANCISCO SUETÔNIO MOTA⁶

RESUMO - Na busca por fontes energéticas mais sustentáveis, têm-se investido no biodiesel. Contudo, para a certificação sustentável faz-se necessário que a energia gerada com o biocombustível seja superior a energia gasta em todo o seu processo de produção. Neste contexto, a adubação nitrogenada tem sido um desafio uma vez que há grandes dispêndios energéticos para sua obtenção, desta forma, a utilização de fontes alternativas de nitrogênio na agricultura pode viabilizar ecologicamente o biodiesel. Com isso, o presente trabalho teve por objetivo avaliar a influência do uso de esgoto doméstico tratado na produção do girassol. O delineamento estatístico adotado foi o de blocos ao acaso, em parcelas subdivididas, com quatro repetições. Nas parcelas, avaliou-se o efeito de dois tipos de água de irrigação; nas subparcelas foram distribuídas cinco lâminas de irrigação, 0,25; 0,50; 0,75; 1,00 e 1,25 da evaporação do tanque classe A (ECA). Nas subsubparcelas, avaliou-se o efeito de quatro doses de adubação nitrogenada 25, 50, 75 e 100 kg ha⁻¹. O balanço energético mais positivo de 1:1,30 e 1:1,36 foi obtido com lâmina de irrigação de 222,48 mm e doses de nitrogênio de 50 e 25 kg ha⁻¹, irrigados com água de poço e esgoto, respectivamente.

Palavras-chave: reúso de água. balanço de energia. *Helianthus annuus*.

ENERGY ANALYSIS OF IRRIGATED SUNFLOWER WITH TREATED DOMESTIC SEWAGE TO PRODUCE BIODIESEL

ABSTRACT - In the search for more sustainable energy sources, it has been invested in renewable energy sources like the biodiesel. However, for certification sustainable it is necessary that the energy generated by the biofuel is greater than the energy required for the entire production process. In this context, nitrogen fertilization has been a challenge because are large energy expenditures to obtain it, then, the use of alternative sources of nitrogen in agriculture may enable the environmentally friendly biodiesel. Thus, the objective this study was to evaluate the influence of the use of treated domestic sewage in the production of sunflower. The statistical design used was randomized blocks in split plots with four replications. In the plots, we evaluated the effect of two types of irrigation water; plots were distributed five irrigation, 0.25, 0.50, 0.75, 1.00 and 1.25 of the evaporation of class "A" PAN. In subsubplots, we evaluated the effect of four doses of nitrogen fertilization 25, 50, 75 and 100 kg ha⁻¹. The more positive energy balance of 1:1,30 and 1:1,36 was obtained with irrigation of 222.48 mm and nitrogen levels of 50 and 25 kg ha⁻¹, irrigated with well water and sewage, respectively.

Keywords: reuse water, energy balance, *Helianthus annuus*.

*Autor para correspondência.

¹ Recebido para publicação em 06/08/2012; aceito em 10/06/2013

Trabalho de conclusão de doutorado em engenharia agrícola do primeiro autor.

²Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará, IFCE, 62320-000, Tianguá –CE; cleyanderson@ifce.edu.br

³Departamento de Engenharia Agrícola, UFC, Caixa Postal 12.168, 60450-760, Fortaleza-CE; alexandre_reuber@hotmail.com

⁴Departamento de Engenharia Agrícola, UFC, Caixa Postal 12.168, 60450-760, Fortaleza-CE; mbezerra@ufc.br

⁵Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia do Ceará, IFCE, 63660-000, Tauá –CE; rr-andrade@hotmail.com

⁶Departamento de Engenharia Ambiental, UFC, Caixa Postal 6001, 60450-760, Fortaleza-CE; suetonio@ufc.br

INTRODUÇÃO

O biodiesel é uma fonte energética alternativa considerada mais limpa, quando comparada aos combustíveis derivados do petróleo. De acordo com o Programa Nacional de Biodiesel, a Petrobrás desde 2008 vem adicionando 2% de biodiesel ao diesel de petróleo. A partir de 2013 esta adição deverá ser de 13%, podendo haver redução nestes prazos. Para atingir os percentuais supracitados, estima-se que será necessário o plantio de 1,5 milhões de hectares com o emprego de aproximadamente 600 mil famílias, o que provocará grandes benefícios sociais (HOLANDA, 2004).

O girassol apresenta características desejáveis do ponto de vista agrônomo, como ciclo curto e alta qualidade, tornando-se uma boa e nova opção de renda aos produtores brasileiros; esta possibilidade deverá ser aumentada com a recente decisão do governo federal em se utilizar o biodiesel na matriz energética nacional. Para tanto, deve-se questionar a viabilidade energética do biocombustível. Pimentel e Patzek (2005) observaram balanço energético negativo em 1467 kcal para a produção de um litro de etanol de milho nos Estados Unidos.

Oliveira et al. (2008) avaliando a eficiência energética de oleaginosas em São Paulo, observaram balanço energético positivo de 2,9 para a cultura do girassol. Ainda segundo os autores, o dispêndio para se produzir um hectare de girassol é de aproximadamente 2.986.873,7 Kcal, enquanto que a receita é de 11.733.550,0 Kcal.

O balanço energético é o parâmetro mais adequado para definir a viabilidade técnica de um programa de bioenergia. Para ser positivo, o balanço energético depende de diversos fatores, em especial do rendimento da cultura e do menor consumo de fertilizantes nitrogenados. Para Soares et al. (2008), na produção agrícola do girassol a adubação nitrogenada de 40 kg ha⁻¹ pode representar 22% do gasto energético. Assim, entre os desafios da pesquisa agropecuária está aumentar a produtividade da cultura e o teor de óleo do grão, bem como a utilização da adubação verde e fixação simbiótica como fonte de N (GAZZONI et al., 2005). O uso do esgoto doméstico para irrigação das culturas destinadas à produção de biocombustível, em especial o girassol, é uma estratégia para se reduzir o uso da adubação nitrogenada comercial, uma maneira de favorecer o balanço de energia positivo.

É de bom senso entre pesquisadores que o manejo da irrigação deve ser feito de forma tecnificada e precisa, sem que haja déficit nem excesso de água no solo. Silva et al. (2007) e Silva et al. (2011) verificaram efeito positivo da irrigação sobre o potencial produtivo do girassol. Contudo, o uso excessivo de água de irrigação pode afetar negativamente a produtividade da cultura e consequentemente o

balanço de energia do biodiesel do girassol.

As melhores produtividades do girassol estão associadas à irrigação e adubação adequada (UNGARO, 1990). Desta forma, o fornecimento de água de nitrogênio em quantidades ideais pode ser uma estratégia para se obter um balanço de energia mais positivo. Para viabilizar a alternativa energética renovável é indispensável o estudo do balanço energético, de modo que a energia final obtida com o biocombustível seja superior ao gasto de toda a cadeia de produção, industrialização e logística, ou seja, o balanço energético deve ser sustentável. Diante do exposto, o presente trabalho teve como objetivo avaliar o balanço energético do girassol sob dois tipos de água de irrigação, cinco lâminas de irrigação e quatro doses de adubação nitrogenada.

MATERIAL E MÉTODOS

Os dados do presente trabalho foram obtidos das pesquisas realizadas em 2009/1010 com a cultura do girassol, no Centro de Pesquisa sobre Tratamento e Reúso de Águas Residuárias, da Companhia de Águas e Esgotos do Ceará (CAGECE) e Universidade Federal do Ceará, localizado no município de Aquiraz, região metropolitana de Fortaleza.

Na presente pesquisa foi adotada a variação das lâminas de irrigação e doses de adubação nitrogenada com intuito de maximizar o potencial energético e o balanço energético. Para isso, foi empregado delineamento experimental em blocos ao acaso com parcelas subdivididas (split-split-plot).

As parcelas constituíram-se de dois tipos de água para irrigação (água de poço freático - AP; esgoto doméstico tratado - E). Nas subparcelas avaliou-se o efeito de cinco lâminas de irrigação baseadas na evaporação do tanque Classe "A" (ECA): L1, lâmina de irrigação referente a 25% da ECA; L2, lâmina de irrigação referente a 50% da ECA; L3, lâmina de irrigação referente a 75% da ECA; L4, lâmina de irrigação referente a 100% da ECA e L5, lâmina de irrigação referente a 125%.

As subsubparcelas foram testadas quatro doses de adubação nitrogenada: N1, 25 kg de N ha⁻¹; N2, 50 kg de N ha⁻¹; N3, 75 kg de N ha⁻¹ e N4, 100 kg de N ha⁻¹, utilizando como fonte a Uréia (45% de N). Sendo que 40% das doses foram aplicadas aos 15 dias após a emergência (DAE) e o restante aos 30 DAE.

Para avaliar a viabilidade do biodiesel de girassol, determinou-se o balanço energético, o qual estabelece a relação entre o total de energia contida no biodiesel (SAIDA) e o total de energia investida em todo o processo de produção (ENTRADA ou DISPÊNDIO), incluindo-se as etapas agrícola e industrial.

Diante da complexidade de se determinar a energia consumida em todo o processo de produção agrícola como: desde a fabricação de máquinas e implementos; produção de insumos; plantio; manejo e a colheita; transporte do produto agrícola ao local de processamento e consumo de combustível nas operações agrícolas. Desta forma, têm-se utilizado no Brasil valores médios tabelados dos gastos de energia, resultado de pesquisas de diversos autores. Com isso, para alguns fatores, utilizou-se valores tabelados de estudos anteriores para cada unidade do insumo empregado na produção.

Foram considerados dois tipos de dispêndio energético: os fixos e os variáveis. Os gastos de energia fixos foram considerados aqueles comuns a todos os tratamentos, como preparo da área, mão de obra para montagem do sistema de irrigação, abertura das covas, adubação e plantio do girassol, capinas, colheita e transporte. Já os gastos variáveis foram calculados em função dos tratamentos com o tipo de água utilizado na irrigação, a quantidade da adubação nitrogenada utilizada e a lâmina de irrigação aplicada. Desta forma, o consumo de energia durante a produção agrícola do girassol foi determinada de acordo com a Eq. 1:

$$Dp = Dcf + Dcv \dots\dots\dots(1)$$

Em que,
Dp – Dispêndio energético na produção agrícola (MJ ha⁻¹);

Dcf - Dispêndio energético comum a todos os tratamentos (MJ ha⁻¹);

Dcv – Dispêndio energético variável de acordo com o tratamento (MJ ha⁻¹) (Eq. 2).

$$Dcv = Ai + DL + DN \dots\dots\dots(2)$$

Em que,

Ai – Dispêndio energético para se obter a água de irrigação; neste caso, para a cultura irrigada com efluente foi computado o dispêndio energético com o tratamento do esgoto, já para o girassol irrigado com água de poço freático foi computado o dispêndio energético de um sistema motobomba (5 cv) para captação da água de irrigação (MJ ha⁻¹);

DL – Dispêndio energético com o bombeamento (sistema motobomba 5 cv) referente ao tempo de irrigação, de acordo com o tratamento L1 = 8,90 h; L2 = 17,80 h; L3 = 26,70 h; L4 = 35,60 h e L5 = 44,50 h (MJ ha⁻¹);

DN – Dispêndio energético devido à adubação nitrogenada em função dos tratamentos N1 = 25 kg ha⁻¹ N; N2 = 50 kg ha⁻¹ N; N3 = 75 kg ha⁻¹ N e N4 = 100 kg ha⁻¹ N (MJ ha⁻¹).

Componentes energéticos:

a) Estação de tratamento de Esgoto ETE

Foram estimados os dispêndios energéticos para construção do sistema de tratamento de esgoto ETE de Aquiraz, utilizando o projeto das lagoas de competência da VBA Consultores S/C Ltda. As dimensões das lagoas estão expostas na Tabela 1.

Tabela 1. Dimensões das lagoas de estabilização da ETE de Aquiraz, CE.

Lagoa	Profundidade (m)	Dimensões do fundo (m)
Anaeróbia	3,00	86,70 x 40,70
Facultativa	1,50	192,70 x 95,50
Maturação	1,50	154,00 x 72,00
Maturação	1,50	153,70 x 71,70

A composição energética das lagoas de estabilização (Tabela 2) foi estimada a partir dos materiais e operações utilizados para construção do sistema de tratamento. Foi adotada vida útil das lagoas de estabilização de 30 anos.

Para estimar as máquinas e o tempo de operações destas envolvidas nas atividades de aterro e compactação mecânica; bota fora 5 km e escavação, carga, transporte e espalhamento de 200 a 100 m, utilizou-se a Tabela de Composição de Preços para Orçamentos - TCPO 10. A TCPO 10 também foi consultada para determinar o material e o tempo de operação da escavação, aterro e limpeza manual, pintura, argamassa, concreto armado, concreto usinado, argamassa, alvenaria e reboco.

Para cálculo do dispêndio de energia com mão-de-obra, foi contabilizada a carga horária em cada operação, segundo TCPO 10 e multiplicando-se pelo coeficiente energético de 4,39 MJ hora⁻¹ homem⁻¹ adotado por Pimentel, (1980) e Souza et al. (2009).

De acordo com o dispêndio total de energia estimada para construção das lagoas de 493,977 GJ, vida útil das lagoas 30 anos e vazão de efluente estimada para 2011 de aproximadamente 60,44 L s⁻¹, foi determinado o dispêndio energético relativo a 1 litro de esgoto doméstico tratado de 0,000166 MJ L⁻¹.

b) Dispêndio considerado fixo para o preparo da área, plantio, condução da cultura e colheita do Girassol:

Tabela 2. Componentes de entradas energéticas estimadas para a construção da estação de tratamento de esgoto ETE de Aquiraz

Pré-tratamento	Unid.	Quant.	Disp. Energ. (MJ)
Limpeza manual	m ²	324,00	8,69
Escavação de vala manual, até 1,5 m	m ³	85,11	1.952,77
Aterro de vala manual	m ³	59,38	1.362,42
Aterro e comp. Mec.	m ³	264,79	8.299,12
Concreto usinado	m ³	5,60	637,40
Concreto armado	m ³	15,80	39.700,01
Argamassa 1:3	m ³	46,44	87,63
Pintura a base de cal, 3 demãos	m ²	37,34	129,72
Alvenaria de tijolo maciço	m ²	34,77	1.050,05
Piso de cimento liso, E = 0,02 m	m ³	1,35	0,10
Reboco de cimento e areia grossa traço 1:3	m ²	24,34	45,43
Dispêndio energético Sub-total			53.273,36
Lagoas (Anaerobia, Facul., Mat. 1 e Mat. 2)			
Escavação manual, até 1,5 m	m ³	301,05	3.872,32
Limpeza manual	m ²	180.236,36	4.834,66
Bota-fora, DMT 5 km	m ³	5.142,18	984.465,08
Aterro e comp. Mec.	m ³	168.452,30	
Moto niveladora 95 kw	h	842,26	768.869,36
Caminhão irrigante 97 kw	h	1.684,52	1.741.361,77
Trator de pneus 59 kw (MF 3060)	h	1.684,52	927.718,94
Pé-de-cameiro 75-97 kw	h	842,26	969.150,22
Grade de disco	h	1.684,52	63.079,49
Rolo compactador de pneus 92 - 108 kw	h	842,26	798.432,23
Servente	h	2.526,78	12.103,30
Escavação, carga, transporte e espalhamento de 200 a 100 m	m ³	16.558,00	
Trator de esteira 140 Hp PD 140	h	331,16	366.354,76
Pá carregadeira sobre pneus 170Hp	h	331,16	361.786,63
Caminhão Basculante	h	993,48	1.027.001,76
Manta asfáltica 3 mm*	m ²	8.389,00	427.839,00
Concreto armado	m ³	56,36	141.613,46
Argamassa	m ³	0,83	1,56
Tubos PVC, J.E DN 200 mm	m	347,42	354.368,40
Tubos PVC, J.E DN 300 mm	m	226,18	493.977,12
Dispendio energético Sub-total			9.446.830,05
Dispendio energético total			9.500.103,41

* - Tavares (2006)

Como utilizado por Chechetto et al. (2010), o gasto de energia para o preparo do solo por meio da gradagem foi baseado na quantidade de energia correspondente à fabricação do trator, grade e combustível, relacionando-os com sua massa, vida econômica e capacidade de trabalho. Como recomendado pelos autores, consideraram-se 12.000 horas como vida econômica dos tratores e 5.000 horas para grade de discos. A capacidade de campo teórica utilizada foi de 1,770 ha h⁻¹ para a grade. O consumo de óleo diesel para operação da gradagem é de 6,40 L ha⁻¹ (SIQUEIRA et al., 1999). Como, 1 L de óleo diesel equivale a 11.400 kcal de energia (PIMENTEL; PATZEK, 2005).

Trator utilizado TRATOR MF 265 F (potência 47,8 kW) peso 3131 kg (Massey Ferguson). A grade utilizada foi do modelo HI da Baldan com 28 discos (18") e massa de 520 kg. Os coeficientes energéticos foram os mesmos adotados por Campos et al. (2004) e Souza et al. (2009), de 69,83 MJ kg⁻¹ para o trator e de 57,200 MJ kg⁻¹ para os demais equipamentos (não auto-propelidos).

A massa e o gasto de energia das sementes

estimados para o presente trabalho foram de 4 kg ha⁻¹ e 0,13 GJ, respectivamente, assim como utilizado por Soares et al (2008).

Como utilizado por Silva e Freitas (2008) e Soares et al. (2008), o dispêndio de energia dos fertilizantes, fósforo e potássio foi de aproximadamente 17,25 MJ kg⁻¹ e 13,54 MJ kg⁻¹, respectivamente. Já para o micronutriente, foi utilizado de 5,40 MJ kg⁻¹, como adotado por Souza et al. (2008) e Chechetto et al. (2010).

O gasto de energia do sistema de irrigação localizado foi de 4.159 MJ ha⁻¹, como sugerido por Frigo et al. (2008).

Adotou-se coeficiente energético de 0,50 MJ km⁻¹ Mg⁻¹, como constatado por Biaggioni e Bovolenta (2010) para o escoamento rodoviário da soja. Foi adotado uma distância de 172 km referente à distância entre as cidades de Aquiraz e Quixadá, onde se encontra uma usina beneficiadora de biocombustível.

Na Tabela 3 estão expostas os dispêndios considerados fixos, estimados no presente trabalho, para produção de 1 hectare de girassol.

Tabela 3. Componentes de entradas energéticas consideradas fixas, estimados para o cultivo de 1 hectare de girassol, Aquiraz, CE, 2009/2010.

Componentes	Unid.	Quantidade	MJ ha ⁻¹
Gradagem			
Trator	H	3	54,66
Grade disco	H	3	17,85
Combustível	L	6,4	304,96
Sistema de irrigação			4159
Sementes	kg	4	130
Fósforo	kg	60	1035
Potássio	kg	20	270,8
Micronutrientes	kg	66	356,4
Mão de obra	H	8,6	1440
Trasporte	km	172	248,71
Total do dispêndio fixos			7.768,666

c) Dispêndios considerados variáveis, de acordo com os tratamentos adotados (manejo de irrigação e doses de nitrogênio):

Dispêndio energético relativo à obtenção (para captação, com sistema motobomba 5 cv, da água de poço freático e tratamento do esgoto) e da lâmina de irrigação aplicada, em função dos tratamentos L1 = 74,16; L2 = 148,32; L3 = 222,48; L4 = 296,64 h e L5 = 370,80 mm aplicadas por conjunto motobomba de 5 cv (Tabela 4).

O dispêndio energético com adubação nitrogenada foi estimado em função da dose, aplicada para cada tratamento e do dispêndio energético para se produzir 1 kg do fertilizante nitrogenado (67,0 MJ kg⁻¹), como já utilizado por Silva; Freitas (2008) e Soares et al. (2008), (Tabela 5).

d) Processamento industrial

Foi utilizado o coeficiente energético de 15.085 MJ para o processamento industrial para cada 1.000 kg de biodiesel de girassol produzido, como adotado por Gazonni et al. (2005).

Tabela 4. Componentes de entradas energéticas estimadas em função da obtenção e distribuição das fontes hídricas: água de poço freático (AP) e esgoto doméstico tratado (E), Aquiraz, CE, 2009/2010.

Tratamento	Unid.	L1	L2	L3	L4	L5
Lâminas	mm	74,16	148,32	222,48	296,64	370,80
Tempo de irrigação	h	8,90	17,80	26,70	35,60	44,50
Dispêndio c/ captação AP (5cv) ¹	MJ ha ⁻¹	271,24	542,48	813,72	1.085,00	1.356,20
Dispêndio c/ irrigação AP (5cv) ²	MJ ha ⁻¹	271,24	542,48	813,72	1.085,00	1.356,20
Dispêndio total c/ irrig. AP (5 cv)	MJ ha ⁻¹	542,48	1.084,96	1.627,45	2.169,93	2.712,41
Dispêndio c/ irrigação E (5 cv)	MJ ha ⁻¹	271,24	542,48	813,72	1.084,96	1.356,21
Dispêndio tratamento esgoto E	MJ ha ⁻¹	123,21	246,42	369,63	492,84	616,05
Dispêndio total c/ irrigação E	MJ ha ⁻¹	394,45	788,90	1.183,35	1.577,80	1.972,25

¹Sistema motobomba utilizado para captação de água no poço freático (AP); ²Sistema motobomba utilizado para irrigação com água de poço (AP).

Tabela 5. Componentes de entradas energéticas estimadas em função das lâminas de irrigação.

Tratamento	Unid.	N1	N2	N3	N4
Dose de nitrogênio	kg ha ⁻¹	25	50	75	100
Dispêndio de energia	MJ ha ⁻¹	1.675	3.350	5.025	6.700

Saída de energia

Para se estimar a saída de energia do sistema, foram utilizados os dados de potencial produtivo de grãos e do teor de óleo, determinado pelo Laboratório do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal do Ceará (UFC), pelo método do Soxhlet, em 2010. O potencial produtivo de óleo foi multiplicado pelo coeficiente de ajuste de 0,90. Segundo Pighinelli (2010), o óleo de girassol, quando submetido ao processo de transesterificação por via etílica, se obtém um rendimento de aproximadamente 90%. Foi adotado o valor energético de aproximadamente 37,62 MJ por litro de biodiesel, de acordo com o utilizado por Pimentel e Patzek (2005).

Os dados das variáveis avaliadas foram submetidos à análise de variância pelo teste F a 1 e 5% de probabilidade. Quando verificado efeito significativo na análise de variância, os dados obtidos nos diferentes tratamentos de natureza qualitativa foram comparados usando o teste de Tukey em nível de 1 e 5% de probabilidade e os de natureza quantitativa foram submetidos ao estudo de regressão, buscando-se ajustar equações com significados biológicos, sendo selecionados os modelos matemáticos que apresentaram melhores níveis de significância e maior valor de coeficiente de determinação (R²), utilizando-se os softwares para análises estatísticas SAEG 9.0 UFV e ASSISTAT 7.6 Beta.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 6 encontra-se o resumo das análises das variâncias para os dados do potencial produtivo de biocombustível (BIO), dispêndio energético (DISP), Saída de energia do sistema (SAID) e Balanço energético (BAL). Pelos resultados apresentados, não se verificou efeito significativo dos tipos de água

para nenhuma das variáveis analisadas. Quanto aos tratamentos do tipo lâminas de irrigação e doses de nitrogênio, houve efeito significativo em todas as variáveis analisadas (DISP, BIO, SAID e BAL). Nas interações A x L, A x N, L x N e A x L x N houve interação significativa para todas variáveis analisadas, revelando a dependência entre estes fatores.

O maior dispêndio energético ou entrada de energia no sistema, de 29.024,31 MJ ha⁻¹, foi observado para irrigação com água de poço, não se diferenciando estatisticamente (P<0,05), do dispêndio de 28.376,58 MJ ha⁻¹ observado para irrigação com água de reúso. Estes gastos energéticos foram próximos, porém superiores ao constatado por Gazzoni et al. (2005), de aproximadamente 26.471,94 MJ ha⁻¹; esta diferença pode estar associada ao dispêndio energético com a prática da irrigação, utilizada no presente trabalho.

Os dispêndios próximos observados para as duas fontes hídricas estão associados aos gastos energéticos próprios para suas obtenções. Neste sentido para obtenção da água de poço foram necessárias duas motobombas, de 5 cv, sendo a primeira utilizada para bombear a água do poço freático para a cisterna e a segunda para irrigar a cultura. Já para irrigação com esgoto, embora tenha havido um grande investimento energético para construção das lagoas, de aproximadamente 9.500.103,41 MJ, a vazão de esgoto tratado 60,44 L s⁻¹ e vida útil das lagoas (30 anos) tornam o dispêndio energético por volume de esgoto tratado pequeno, de aproximadamente 0,166 J L⁻¹. Corroborando com Souza et al. (2009) que avaliando a eficiência energética da produção de suínos com aproveitamento do esgoto tratado por lagoas de estabilização, constataram que o somatório de todo o dispêndio energético considerado indireto como: instalações; as lagoas de estabilização; equipamento e máquinas agrícolas representam apenas 1,75% do

total de entrada. Ainda segundo os autores, o dispêndio energético com a construção das lagoas foi de aproximadamente 0,13% do dispêndio total.

Nas Figuras 1A e B, estão expostas as superfícies de resposta estimadas dos dispêndios energéticos para a produção de biocombustível por hectare de girassol irrigado em função das lâminas de irrigação e doses de nitrogênio. Os maiores dispêndios energéticos foram de 34.223 e 34.557 MJ ha⁻¹, obtidos com os tratamentos L4N3 (296,64 mm e 75 kg ha⁻¹ de N) e L4N4 (296,64 mm e 100 kg ha⁻¹ de N), para irrigação com água de poço freático e esgoto, respectivamente.

De acordo com os gráficos, pode-se observar que há maior dispêndio energético quanto ao aumento do fator dose de nitrogênio, quando comparado ao observado para a variável lâmina de irrigação. Isto se deve ao grande dispêndio energético para produção dos nutrientes nitrogenados. Fato já relatado por Santos e Simon (2010) e Oliveira Junior e Kroll (2005). Segundo Oliveira et al. (2008), o dispêndio energético com os fertilizantes é de aproximadamente 79,6% de todo gasto energético envolvido no cultivo do girassol sob plantio direto. Para Gazzoni et al. (2005), é necessário racionalizar e buscar fontes alternativas dos fertilizantes nitrogenados de modo a mitigar o dispêndio energético na produção agrícola e viabilizar a produção de biocombustível.

Nos dois sistemas de produção, o aumento dos fatores lâmina de irrigação e dose de nitrogênio proporcionou incremento do dispêndio energético, até o ponto máximo em que o aumento dos fatores proporcionou diminuição do dispêndio energético. Isto ocorreu devido à diminuição da produtividade da cultura; desta forma, houve menos óleo para ser processado. Segundo dados apresentados por Pimentel e Patzek (2005), o processamento industrial consome aproximadamente 55,5% de todo o dispêndio energético para a produção de biocombustível, campo e indústria.

A maior média de potencial produtivo de biocombustível (909 kg ha⁻¹) foi obtida com irrigação de esgoto, contudo, não houve diferença estatística (P<0,05) do observado para irrigação com água de poço freático, de 858 kg ha⁻¹.

De acordo a equação obtida para irrigação com água de poço freático, representado pela superfície de resposta, Figura 2A, pode-se observar que os aumentos dos dois fatores, lâmina de irrigação e doses de nitrogênio, são fundamentais para se obter o potencial máximo de biocombustível por hectare de girassol plantado. O máximo rendimento de biocombustível por hectare foi estimado para o tratamento L3N3 (222,48 mm e 75 kg ha⁻¹ de N) de aproximadamente 1.134 kg ha⁻¹ de biodiesel. Para Silva e Freitas (2008), a eficiência energética do biocombustível está relacionada diretamente ao aumento das variáveis de produção com o teor de óleo e produtividade de grãos e da mitigação dos dispêndios energéticos da produção. Desta forma, determinar o in-

cremento da produção em função do aumento das lâminas de irrigação e doses de nitrogênio pode possibilitar a racionalização na produção do biocombustível.

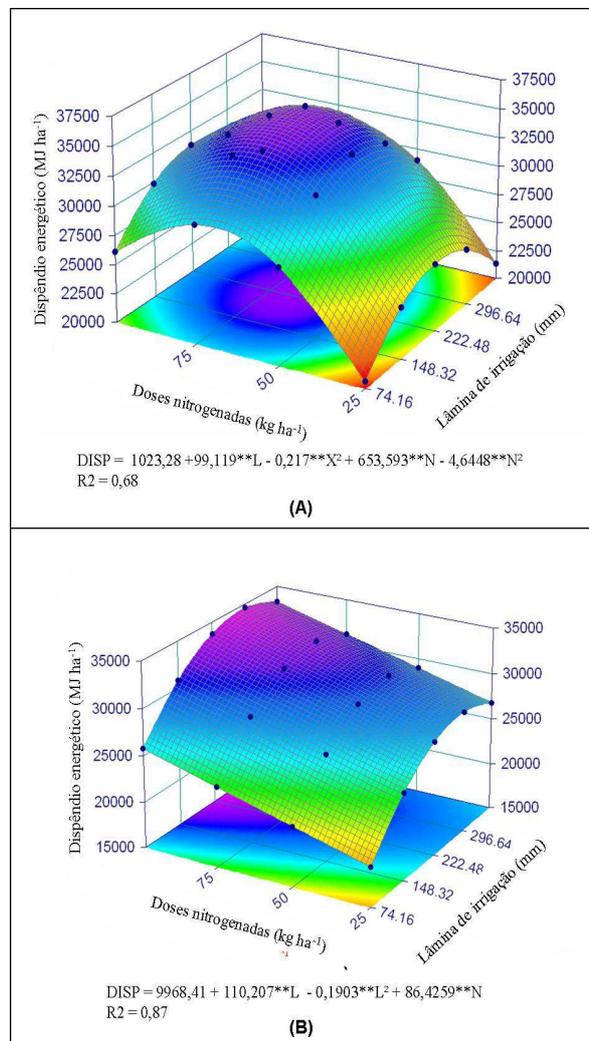


Figura 1. Dispêndio energético do girassol em função das lâminas de irrigação e doses de nitrogênio, irrigados com água de poço freático (A) e esgoto (B).

O rendimento de biocombustível estimado para irrigação com esgoto em função das lâminas de irrigação e doses de nitrogênio (Figura 2B) diferiu do estimado para água de poço freático. O incremento do biocombustível foi quadrático em função das lâminas de irrigação e linear para as doses de nitrogênio. Embora, o maior rendimento de biocombustível de 1.228 kg ha⁻¹ tenha sido estimado para lâmina de irrigação e doses de nitrogênio de 296,64 mm e 100 kg ha⁻¹ de N, respectivamente; fixando a lâmina de irrigação em 296,64 mm, o incremento de biocombustível em função do aumento das doses entre N1 e N4 foi de apenas 7,8%. Isto se deve provavelmente ao aproveitamento dos nutrientes, em especial o nitrogênio, presente no esgoto, pela planta. Corroborando com Chernicharo (2001), ao afirmar que os

nutrientes contidos nos efluentes tratados podem reduzir, ou mesmo eliminar, a necessidade de fertilizantes comerciais.

O maior rendimento energético ou saída de energia do sistema ($32.289 \text{ MJ ha}^{-1}$), foi obtido para irrigação com esgoto, não diferindo estatisticamente ($P < 0,05$) de $34.198 \text{ MJ ha}^{-1}$, obtido com água de poço freático.

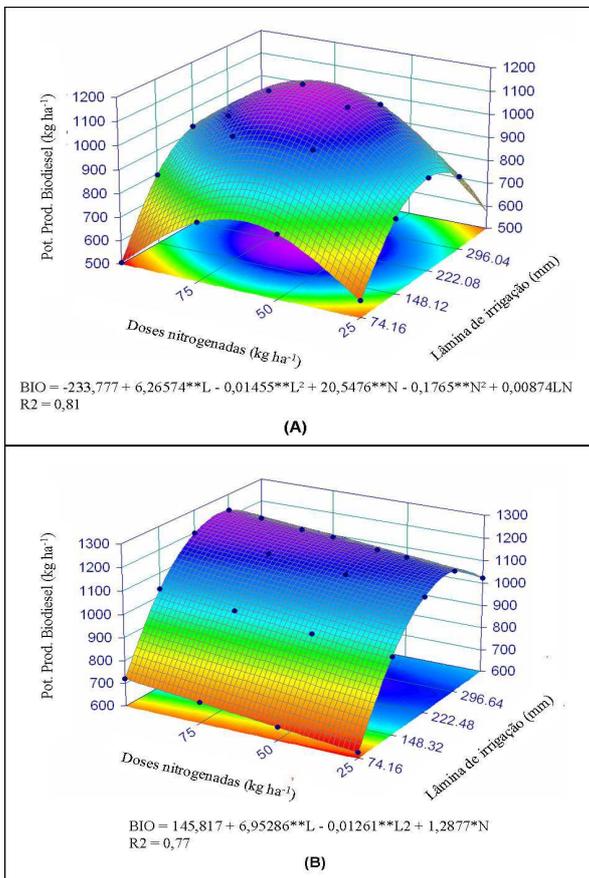


Figura 2. Potencial produtivo de biodiesel do girassol em função das lâminas de irrigação e doses de nitrogênio, irrigados com água de poço freático (A) e esgoto (B)

Foi estimado incremento energético quadrático, para o girassol irrigado com água de poço freático, em função do aumento das lâminas de irrigação e doses de nitrogênio. A máxima saída de energia ($40.592,59 \text{ MJ ha}^{-1}$) foi estimada para os tratamentos L3N3 (Figura 3A). Este valor foi superior ao constatado por Gozzoni et al. (2005), de $37.620 \text{ MJ ha}^{-1}$, diferença que pode estar associada ao rendimento de biocombustível por hectare, já que os referidos autores consideraram rendimento de 1000 kg ha^{-1} de biocombustível e no presente trabalho, sob os tratamentos L3N3, este rendimento foi de 1134 kg ha^{-1} . Diante do exposto, pode-se afirmar que para se obter a maior produção energética do girassol irrigado com água de poço deve-se aplicar uma lâmina de irrigação de $222,48 \text{ mm}$ bem distribuída na fase vegetativa da cultura e adubação nitrogenada de 75 kg ha^{-1} de N.

Foi observado incremento do rendimento energético do girassol irrigado com esgoto, mais acentuado e modo quadrático em função das lâminas de irrigação. Já em função das doses de nitrogênio, foi constatado aumento linear e menos acentuado do rendimento energético (Figura 3B). Embora para irrigação com esgoto tenha-se investido maiores lâminas de irrigação e dose de nitrogênio L4N4 para se obter rendimento energético de $41.546,23 \text{ MJ ha}^{-1}$ maior apenas 2,3% ao estimado para água de poço com os tratamentos L3N3, ao fixar a lâmina de irrigação em L4 há pouca variação do rendimento energético em função das doses de nitrogênio. Para o girassol irrigado com esgoto, o rendimento energético estimado com o tratamento L4N1 de aproximadamente 38276 MJ ha^{-1} é apenas 5,7% inferior ao obtido com o tratamento L3N3, para irrigação com água de poço, porém uma economia de 50 kg ha^{-1} de N.

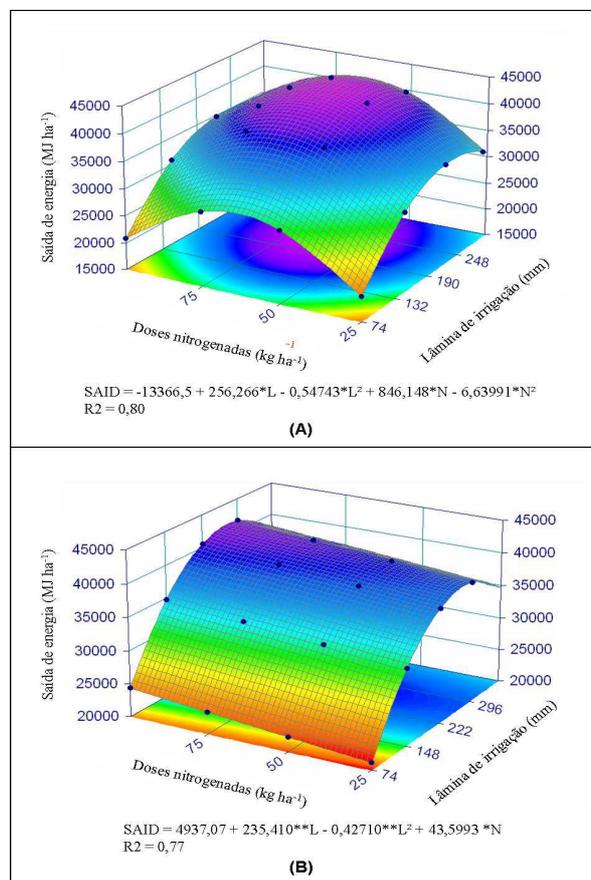


Figura 3. Rendimento energético do girassol em função das lâminas de irrigação e doses de nitrogênio, irrigado com água de poço freático (A) e esgoto (B)

O balanço energético do biocombustível a partir do girassol irrigado foi positivo. Para cada unidade de energia investida na produção do girassol obteve-se um retorno de aproximadamente 1,11 e 1,19 unidades de energia para o girassol irrigado com água de poço e esgoto, respectivamente, não constatando diferença significativa ($P > 0,05$). Estes valores foram superiores ao observado por Pimentel

e Patzek (2005), de 0,76, e inferiores ao constatado por Gazzoni et al. (2005), ao observarem que para cada unidade de energia investida na produção de biocombustível de girassol resultou em retorno de 2,37. Esta diferença pode estar associada aos dispêndios energéticos oriundos das práticas, como o dispêndio com a irrigação, não mencionada por Gazzoni et al. (2005), porém utilizada no presente trabalho. A saída de energia do sistema também influencia no balanço energético Pimentel e Patzek (2005) consideraram rendimento de apenas 390 kg ha⁻¹ de óleo, enquanto no presente trabalho obteve-se uma média de 879 kg ha⁻¹ de óleo.

O balanço energético estimado para o girassol irrigado com água de poço, aumenta de forma positiva com o aumento da disponibilidade hídrica e doses de nitrogênio até o tratamento L3N2 de 1,30, sendo este o tratamento mais recomendado para produção de biodiesel sustentável e ecologicamente correto (Figura 4A). De acordo com Pracucho et al. (2007), avaliar a eficiência energética na produção agrícola permite a aproximação da sustentabilidade ambiental.

A redução do balanço energético estimado para doses de adubação nitrogenadas superior ao tratamento N2 (50 kg ha⁻¹ de N) deve-se ao grande dispêndio energético necessário para produção do fertilizante nitrogenado. Desta forma, o incremento do ganho energético com aumento das doses de nitrogênio é inferior ao dispêndio com fertilizante nitrogenado (Figura 4A). É de bom senso entre os pesquisadores que o fertilizante nitrogenado pode proporcionar balanço energético negativo, devido ao grande dispêndio energético para sua produção (SILVA; FREITAS, 2008, PIMENTEL; PITZEK, 2005 e GAZZONI et al., 2005).

Oliveira et al. (2008) observaram balanço energético de 2,9 para o girassol sob plantio direto. Para obter este valor os referidos autores computaram apenas os dispêndios energéticos com o cultivo do girassol, não considerando o dispêndio energético com o transporte e o processamento industrial. Desta forma, a possível justificativa para este alto valor do balanço energético deve-se à não inclusão de dispêndio com o beneficiamento no sistema. Pois, só o processamento industrial consome aproximadamente 55,5% de todo o dispêndio energético para a produção de biocombustível, campo e indústria. Pimentel e Patzek (2005).

Na Figura 4B pode-se observar incremento positivo do balanço energético, do girassol irrigado com esgoto, em função do aumento das lâminas de irrigação e diminuição das doses de nitrogênio. O maior balanço de energia (1,36) foi estimado com a menor dose de nitrogênio N1 (25 kg ha⁻¹ de N) e lâmina de irrigação referente a 222,48 mm. Este bom resultado se deve provavelmente à reciclagem dos nutrientes presentes no esgoto pela planta. Desta forma pode-se minimizar o uso do fertilizante nitrogenado sem causar diminuições acentuadas do rendi-

mento de biodiesel. Corroborando com Santos e Lucas Júnior (2004), ao afirmarem que todo processo produtivo gera resíduos e nestes há acúmulo de energia. Desta forma, a reutilização dos resíduos proporciona reciclagem da energia, redução de custos, dos impactos ambientais, promovendo a sustentabilidade energética.

Diante da viabilidade energética do girassol irrigado com esgoto e das vantagens ambientais, como o não lançamento dos esgotos nas calhas dos rios, uso de água de qualidade inferior para irrigação e aproveitamento dos nutrientes presentes no esgoto pelas plantas, recomenda-se o uso desta fonte hídrica sob a lâmina de irrigação de 222,48 mm e dose de 25 kg ha⁻¹ de N para cultivo do girassol destinado a produção de biocombustível.

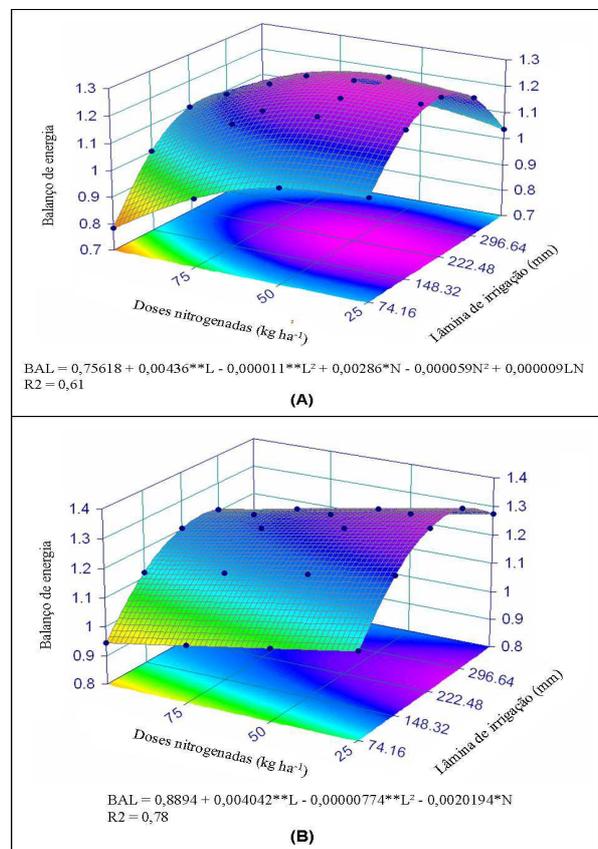


Figura 4. Balanço energético do girassol em função das lâminas de irrigação e doses de nitrogênio, irrigados com água de poço freático (A) e esgoto (B)

CONCLUSÕES

Os maiores resultados de potenciais produtivos de biodiesel, de 1134 e 1228 kg ha⁻¹ foram obtidos com L3N3 (222,48 mm e 75 kg ha⁻¹ de N) e L3N4 (222,48 mm e 100 kg ha⁻¹ de N); quanto ao dispêndio energético, os maiores foram de 34.223 e 34.557 MJ ha⁻¹ obtidos com L4N3 e L4N4; já para a saída de energia, os máximos de 40.592,59 MJ ha⁻¹ e

41.546,23 MJ ha⁻¹ foram obtidos com L3N3 e L4N4 para irrigação com água de poço e esgoto, respectivamente.

O uso excessivo da lâmina de irrigação e doses de nitrogênio proporciona diminuição do balanço energético.

Para o girassol irrigado com água de poço, a lâmina de irrigação de 222,48 mm aliada à adubação nitrogenada de 50 kg ha⁻¹, proporcionaram balanço energético mais positivo de 1,30. Enquanto para o girassol irrigado com esgoto a lâmina de irrigação de 222,48 mm e adubação nitrogenada de 25 kg ha⁻¹, balanço energético mais positivo de 1,36 e consequentemente a produção de biodiesel mais sustentável.

O esgoto doméstico tratado pode ser utilizado no cultivo do girassol destinado à produção de biodiesel, pois viabiliza de modo ecologicamente sustentável o balanço energético.

AGRADECIMENTOS

A Companhia de Água e Esgoto do Ceará (CAGECE) pelo apoio financeiro e estrutura a esta pesquisa e a FUNCAP pela concessão da bolsa de estudo.

REFERÊNCIAS

- BIAGGIONI, M. A. M.; BOVOLENTA, F. C. Balanço energético comparativo para rotas de escoamento de soja. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 30, n. 4, p. 587-599, 2010.
- CAMPOS, A. T. et al. Balanço energético na produção de feno de alfafa em sistema intensivo de produção de leite. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 1, p. 245-251, 2004.
- CHECHETTO, R. G.; SIQUEIRA, R.; GAMERO, C. A. Balanço energético para a produção de biodiesel pela cultura da mamona (*Ricinus communis* L.). **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 41, n. 4, p. 546-553, 2010.
- CHERNICHARO, C. A. de L. **Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios**. Belo Horizonte, MG: UFMG, 2001, 544 p.
- FRIGO, M. S. et al. Análise energética do primeiro ano de cultivo de pião-manso em sistema de irrigação localizado. **Revista Irriga**, Botucatu, v. 13, n. 2, p. 261-271, 2008.
- GAZZONI, D. L. et al. Balanço energético das culturas de girassol e soja para produção de biodiesel. **Biomassa e Energia**, Viçosa, v. 2, n. 4, p. 259-265, 2005.
- HOLANDA, A. **Cadernos de altos estudos: biodiesel e inclusão social**. Brasília: Câmara dos Deputados, 2004. 200 p. (Cadernos de Altos Estudos, 1).
- OLIVEIRA JUNIOR, E. D.; KROLL, L. B. Energia agregada nas mudas de eucalipto. **Revista Científica Eletrônica de Engenharia Florestal**, Graça, v. 3, n. 6, 2005.
- OLIVEIRA, M. D. M.; FREITAS, S. M.; FREDO, C. E. Análise energética da produção de oleaginosas no Estado de São Paulo. **Análises e Indicadores do Agronegócio**, São Paulo, v. 3, n. 6, jun. 2008.
- PIGHINELLI, A. L. M. T. **Estudo da extração mecânica e da transesterificação etílica de óleos vegetais**. 2010. 222 f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Universidade Estadual de Campinas, Campinas, SP, 2010.
- PIMENTEL, D. **Handbook of energy utilization in agriculture**. (Ed) Boca Raton: CRC Press, 1980. 475 p.
- PIMENTEL, D.; PATZEK, T. W. Ethanol production using corn, switchgrass, and wood; biodiesel production using soybean and sunflower. **Natural Resources Research**, [S.l.], v. 14, n. 1, p. 65-76, 2005.
- PRACUCHO, T. T. G. M.; ESPERANCINE, M. S. T.; BUENO, O. C. Análise energética e econômica da produção de milho (*Zea mays*) em sistema de plantio direto em propriedades familiares no município de Pratânia - SP. **Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 22, n. 2, p.94-109, 2007.
- SANTOS, R. R.; SIMON, E. J. Análise energética do milho em sistema de plantio direto, no assentamento rural da fazenda Pirituba, Itaberá/SP. **Revista Energia na Agricultura**, Botucatu, v. 25, n. 1, p.121-137, 2010.
- SANTOS, T. M. B.; LUCAS JÚNIOR, J. Balanço energético em galpão de frangos de corte. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 1, p. 25-36, 2004.
- SILVA, A. R. A. et al. Desempenho de cultivares de girassol sob diferentes lâminas de irrigação no Vale do Curu, CE. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 42, n. 1, p. 57-64, 2011.
- SILVA, M. L. O. et al. Crescimento e produtividade do girassol cultivado na entressafra com diferentes lâminas de água. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola Ambiental**, Campina Grande, v. 11, n. 5, p. 482-488, 2007.

SILVA, P. R. F.; FREITAS, T. F. S. Biodiesel: o ônus e o bônus de produzir combustível. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 3, P. 843-851, 2008.

SIQUEIRA, R.; GAMERO, C. A.; BOLLER, W. Balanço de energia na implantação e manejo de plantas de cobertura de solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 19, n. 1, p. 80-89, 1999.

SOARES, L. H. B. et al. **Eficiência energética comparada das culturas do girassol e soja, com aptidão para a produção de biodiesel no Brasil**. Seropédica: EMBRAPA, 2008. 1-6 p. (Circular técnica, 25).

SOUZA, C. V. et al. Análise energética em sistema de produção de suínos com aproveitamento dos dejetos como biofertilizante em pastagem. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 29, n. 4, p. 547-557, 2009.

SOUZA, J. L. et al. Balanço e análise da sustentabilidade energética na produção orgânica de hortaliças. **Revista Horticultura Brasileira**, Brasília, v. 26, n. 4, p. 433-440, 2008.

TAVARES, S. F. **Metodologia de análise do ciclo de vida energético de edificações residenciais brasileiras**. 2006. 225 f. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2006.

TCPO 10: **Tabela de Composições de Preços para Orçamentos**. 1. ed. São Paulo: Pini, 1996. 899 p.

UNGARO, M. R. G. **Girassol (*Helianthus annuus* L.)**. Boletim Informativo do Instituto Agrônomo, Campinas, 1990. v. 200, n. 5, p. 112-113.