



Fluxos de energia do manejo da irrigação e fertirrigação na cultura da cana-de-açúcar

Poliana Rocha D'Almeida Mota^{1(*)}, Marcos Vinícius Folegatti², Aderson Soares de Andrade Júnior³, Thiago Libório Romanelli², Fábio Jordão Rocha², Jose Antonio Frizzone² e Edson Alves Bastos³

¹Universidade Federal do Piauí, Campus Agrícola da Socopo, CEP 64049-550, Teresina, PI, Brasil. E-mail: poliana@ufpi.edu.br

²ESALQ/USP, Avenida Pádua Dias, 11 - Departamento de Engenharia de Biossistemas, CEP 13418-900, Piracicaba, SP, Brasil.

E-mail: mvfolega@usp.br, romanelli@usp.br, fabiojordaorocho@gmail.com e frizzone@usp.br

³Embrapa Meio-Norte, Av. Duque de Caxias, nº 5.650, Bairro Buenos Aires, CEP 64008-780, Teresina, PI, Brasil.

E-mail: aderson.andrade@embrapa.br e edson.bastos@embrapa.br

(*)Autor para correspondência.

INFORMAÇÕES

História do artigo:

Recebido em 5 de junho de 2020

Aceito em 16 de dezembro de 2024

Termos para indexação:

Saccharum officinarum

energia renovável

balanço de energia

EROI

lâmina de água

adubação

RESUMO

A sustentabilidade num sistema de produção da cana-de-açúcar para geração de energia pode ser analisada pelos fluxos energéticos, com o propósito de fomentar mudanças nos padrões de manejo a fim de diminuir a energia consumida no processo produtivo. Esse conhecimento é fundamental para a definição de políticas de incentivo considerando o potencial da cultura como fonte renovável de energia. O estudo objetivou analisar os fluxos de energia, por meio do balanço energético e EROI (*energy return on investment*), na cana-de-açúcar, em dois anos de cultivo, cana planta (CP) e 1º ano de cultivo da cana soca (CS), sob diferentes lâminas de água e doses de N e K₂O, via fertirrigação por gotejamento subsuperficial. O maior valor da energia de entrada na CP é de 14.105,8 MJ, e para CS, 6.297,4 MJ, no tratamento que recebe a maior quantidade de água, adubação nitrogenada e potássica. O balanço de energia obtém seu valor máximo na aplicação de 353 mm, 50 kg de N e 12 kg de K₂O ha⁻¹, sendo 394721 MJ ha⁻¹. No cultivo da CP, o balanço de energia é menor e a lucratividade energética maior (EROI), ao contrário da CS. Contudo, o maior valor de EROI é de 95,6, na CS.

© 2024 SBAgro. Todos os direitos reservados.

Introdução

Com o crescente aumento da demanda por culturas agroenergéticas, especialmente para compor o programa nacional de biocombustíveis, a cana-de-açúcar irrigada ocupará papel de destaque, dada a sua grande capacidade de produção de açúcar e álcool. De acordo com Romanelli (2009), um sistema produtivo que tenha como produto a energia, deve considerar o ótimo energético, diferente-

mente das tomadas de decisão que balizam a busca no ótimo econômico.

O conhecimento de como os sistemas de produção gastam e produzem energia é fundamental para a definição de políticas de estímulo à produção, ou de restrição do consumo, em função da importância estratégica que os sistemas ocupam como potenciais produtores de excedente energético para outros setores da economia (Veiga et al., 2015). Nos balanços energéticos considera-se energia de entrada

não somente as fontes de energia empregadas, como, a eletricidade e os combustíveis, mas também a energia demandada nos processos de fabricação e obtenção de outros insumos e serviços, utilizados no sistema produtivo.

De acordo com Riquetti et al. (2012), a energia direta utilizada num processo produtivo não inclui somente o combustível fóssil, e sim outras formas de energia derivadas do petróleo, tais como aquelas contidas nos lubrificantes e nos adubos. Assim, um estudo completo da energia investida também deve levar em consideração as energias de origem biológica, como o trabalho humano e aquela contida nas sementes. A energia indireta utilizada na agricultura é aquela empregada através do uso de máquinas e implementos necessários à produção. Nesse processo, quantificam-se todos os insumos utilizados e produzidos que são transformados em unidade de energia, segundo o poder calorífico de cada um.

Trombeta & Caixeta Filho (2017) destacam o setor sucroenergético não somente como o fornecedor da matéria-prima com maior balanço energético para produção de etanol, mas também pelos produtos secundários gerados no processamento da cana-de-açúcar. Tais subprodutos, até poucas décadas majoritariamente descartados, têm se tornado potenciais matérias-primas à cogeração de energia elétrica e à produção de etanol de segunda geração, pela hidrólise da celulose e hemicelulose da palha e bagaço.

A biomassa de cana de açúcar como fonte na oferta interna de energia tem a participação de 19,1% (EPE, 2021). A segunda principal fonte de energia é o bagaço de cana-de-açúcar voltado à autoprodução no setor de alimentos e bebidas com 18,2% (EPE, 2022).

A irrigação e a fertirrigação são técnicas benéficas para a agricultura, que podem proporcionar condições adequadas de nutrição e umidade no solo durante todo o ciclo da cultura e melhor desenvolvimento da planta, o que se traduz em maior produção e qualidade. Existe também a irrigação complementar e a irrigação de salvamento, usadas apenas em algumas fases das culturas. No cultivo da cana-de-açúcar é possível a obtenção de excelentes resultados, desde que conduzido dentro da técnica e com o manejo racional dos recursos hídricos.

Entretanto, no Brasil, são escassos os estudos sobre os parâmetros micrometeorológicos que atuam na evapotranspiração, manejo da irrigação e fertirrigação dessa cultura.

Pesquisas tem demonstrado o efeito da irrigação e fertirrigação no aumento da produtividade da cana-de-açúcar (Oliveira et al., 2011; Andrade Júnior et al., 2012; Chen et al., 2012; Uribe et al., 2013; Umesh et al., 2013; Oliveira et al., 2014; Silva et al., 2014; Andrade Júnior et al., 2017; Pires et al., 2018; Singh et al., 2019).

Dentre os métodos de irrigação, possíveis de utili-

zação na cultura da cana-de-açúcar, tem-se destacado a irrigação localizada, notadamente, o gotejamento subsuperficial. Pires et al. (2018) afirmam que a irrigação por gotejamento em subsuperfície permite a aplicação dos nutrientes diretamente na zona radicular, sem provocar danos à planta, possibilitando também aplicações em cobertura de forma racional e parcelada de acordo com a necessidade da cultura nos diferentes estádios de crescimento.

A fertirrigação tem sido pouco praticada, apesar de se constituir numa técnica com elevado potencial para aumentar a eficiência da adubação e contribuir também para a redução dos custos de nutrição da cana-de-açúcar. Dado o potencial aumento de eficiência de aplicação, permite a redução das quantidades de adubos aplicados via solo, fracionamento da aplicação e perdas por lixiviação que necessitam ser executados nas regiões produtoras de cana.

Peloia et al. (2023) ao avaliarem a colheita mecanizada de cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum* L.), citam que materiais e sistema de irrigação usados tiveram impacto mais significativo nas pegadas de água e carbono.

O objetivo deste estudo foi analisar os fluxos energéticos no cultivo da cana-de-açúcar, sob diferentes lâminas de água e doses de N e K₂O, via fertirrigação por gotejamento subsuperficial, em suas fases de crescimento e parâmetros de produção.

Material e Métodos

O experimento foi conduzido num talhão experimental de cana-de-açúcar, em uma área de produção da Usina COMVAP - Grupo Olho D'Água, localizada no município de União, Piauí, região Nordeste do Brasil, sendo as coordenadas geográficas 4°52'50" de latitude Sul, 42°53'08" de longitude Oeste e 67 metros de altitude. O solo da área experimental foi previamente classificado como Plintossolo, de textura média a argilosa e de média fertilidade natural (Descrição do perfil efetuada pelo pesquisador Francisco de Brito Melo, da área de Solos e Nutrição de Plantas, da Embrapa Meio-Norte).

O clima da região pela classificação de Thornthwaite & Mather (1955) é C1sA'a" caracterizado como subúmido seco, megatérmico, com moderado excedente hídrico no verão e elevada deficiência hídrica durante o período de julho a dezembro (Bastos & Andrade Júnior, 2008). De acordo com Bastos & Andrade Júnior (2019), a temperatura média do ar de Teresina é de 28,2°C, umidade relativa média do ar de 69%, velocidade do vento média de 1,1 m s⁻¹, insolação média de 7,8 h e precipitação pluviométrica média de 1.318 mm.

O delineamento estatístico adotado foi o de blocos ao acaso, com duas repetições. Os tratamentos (T) das parce-

las foram constituídos por um fatorial fracionário 1/5 de 5 x 5 x 5 (níveis de irrigação x doses de N x doses de K).

A definição das lâminas de irrigação estudadas foi estabelecida com base num percentual da evapotranspiração de referência (ET_o), estimado pelo método de Penman-Monteith, em escala de tempo decendial. Os dados climáticos foram obtidos de uma Estação Agrometeorológica Automática dotada de sensores, instalada na própria Usina. Os tratamentos de lâminas de água foram os seguintes: E₁ = 150% da ET_o; E₂ = 125% da ET_o; E₃ = 100% da ET_o; E₄ = 75% da ET_o e E₅ = 50% da ET_o. Cada tratamento correspondeu a um percentual da ET_o obtida na Estação Agrometeorológica Automática durante todo o ciclo da cultura.

Os níveis de adubação nitrogenada e potássica avaliados foram definidos como um percentual das respectivas doses recomendadas para a cana-de-açúcar em função da análise do solo (DAS), de avaliações realizadas antes do plantio e após o corte da cana planta. Os tratamentos de níveis de nutrientes foram: N₁ = 40% DAS; N₂ = 70% DAS; N₃ = 100% DAS; N₄ = 130% DAS e N₅ = 160% DAS e K₁ = 40% DAS; K₂ = 70% DAS; K₃ = 100% DAS; K₄ = 130% DAS e K₅ = 160%.

A aplicação dos níveis dos nutrientes foi efetuada por meio de fertirrigação, com uso de um injetor de deslocamento positivo (injetor de diafragma TMB-60). As fontes de nutrientes N e K foram a ureia e o cloreto de potássio, respectivamente. A relação entre fertirrigação e irrigação foi de 1:3, sendo três irrigações por semana tendo-se considerado a ET_o acumulada entre as irrigações sucessivas; e o fracionamento da dose anual de nutriente foi estabelecido para cada tratamento. A adubação fosfatada, definida pela DAS, foi aplicada integralmente no plantio, de modo convencional, utilizando superfosfato simples como fonte de P.

A variedade plantada, em setembro de 2007, foi a RB867515 no espaçamento de plantio em fileira dupla de 1,3 m x 0,5 m x 1,8 m. As parcelas foram constituídas de quatro fileiras duplas de plantio, comprimento de 12,0 m e área total de 86,4 m². A área útil da subparcela correspondeu a 36,0 m², compreendendo as duas fileiras duplas centrais, com 10,0 m de comprimento cada, e a bordadura, constituída de uma fileira dupla de plantas de cada lado e de 1,0 m em cada extremidade da parcela.

Os tratamentos fitossanitários e culturais foram conduzidos de acordo com o cronograma da Usina onde foi instalado o ensaio.

O sistema de irrigação utilizado foi por gotejamento subsuperficial, com a utilização de gotejadores incorporados na linha lateral e espaçados a cada 0,5 m. Para permitir a diferenciação dos tratamentos de umidade nas subparcelas, as linhas laterais de irrigação foram montadas com cinco válvulas hidráulicas, as quais possibilitaram diferenciar o tempo de irrigação, já que foi utilizado o mesmo tubo gotejador em todas as parcelas.

Para a aplicação dos níveis de N e K foram utilizadas válvulas hidráulicas nas entradas das parcelas interligadas a um cabeçal de controle contendo registros Sagiv de três vias, os quais permitem a abertura simultânea das parcelas que recebem os mesmos níveis de N e K. Isto se fez necessário para que não houvesse diferenciação dessas doses ao longo da parcela experimental (N_i x K_j). Uma válvula manteve essa linha fechada, somente ativando-a quando da realização da fertirrigação.

Com os resultados obtidos das variáveis listadas acima, analisadas nos 25 tratamentos procedeu-se a análise do fluxo de energia (Romanelli & Milan, 2010).

Para a obtenção da potência do conjunto elevatório da área experimental, utilizou-se a Equação 1 (Azevedo Netto, 1998):

$$P = \gamma Q H_{\text{man}} / 75\eta \quad \text{Equação (1)}$$

sendo:

P = potência em CV;

γ = peso específico do líquido a ser elevado (água ou esgoto: 1000 kgf m⁻³);

Q = vazão ou descarga, em m³ s⁻¹;

H_{man} = altura manométrica, em m;

η = rendimento global do conjunto elevatório, considerando o motor e a bomba ($\eta = \eta_{\text{motor}} \cdot \eta_{\text{bomba}}$).

Foram considerados os parâmetros descritos a seguir na cultura da cana-de-açúcar em dois anos de cultivo, cana planta (CP) e 1º ano de cultivo da cana soca (CS):

W_{irr} = lâmina aplicada pela irrigação, em mm;

Wt = lâmina aplicada pela irrigação + precipitação, em mm;

N = nitrogênio total aplicado por tratamento, em kg ha⁻¹;

K₂O = potássio total aplicado por tratamento, em kg ha⁻¹;

TCH = produção de colmos, em tonelada ha⁻¹.

Para a obtenção da produção de álcool (VAH), em m³ ha⁻¹, utilizou-se a Equação a seguir:

$$\text{VAH} = (((\text{PCC} \times \text{F}) + \text{ARL}) \text{Fg}) 10 \times \text{TCH} \times \text{PC} \quad \text{Equação (2)}$$

em que:

PCC = quantidade de açúcar bruto em % contido nos colmos e determinada em laboratório;

F = fator de transformação estequiométrica de sacarose em uma molécula de glicose mais uma de frutose, igual a 1,052; ARL = açúcares redutores livres em %, cujos valores variam de 0,70 a 0,85, sendo que a destilaria utiliza 0,70 para PCC alto;

Fg = fator de Gay Lussac igual a 0,6475;

PC = produção de colmos em tonelada ha⁻¹.

A energia de entrada (EE), ou ganho de produção por acréscimo de irrigação, nitrogênio e potássio, em MJ ha⁻¹, foi calculado pela Equação 3:

$$EE = (73,3 \times N) + (6,7 \times K_2O) + E_{IR} \quad \text{Equação (3)}$$

em que:

73,3 = índice energético do N, em MJ kg⁻¹ (Campos et al., 2005);

6,7 = índice energético do K₂O (Pellizzi, 1992);

E_{IR} = energia demandada pela irrigação.

A energia demandada pelo sistema de irrigação (E_{IR}) foi determinada segundo Romanelli & Milan (2005), Equação 4.

$$E_{IR} = (feexPexUdxND) / Ai \quad \text{Equação (4)}$$

em que:

fee = energia incorporada na eletricidade igual a 12,0 MJ kW⁻¹ h⁻¹ (Pimentel, 1984);

Pe = potência do sistema de bombeamento (kW);

Ud = uso médio diário (h);

ND = período de irrigação durante o ciclo (dias);

Ai = área irrigada (ha).

Para a água, segundo a metodologia, a energia incorporada é a própria energia desprendida na sua captação e aplicação.

A massa de cana produzida por energia investida (PEI) em N, K e W, em kg MJ⁻¹, foi obtida por meio das equações 5 a 7:

$$PEI = (TCH \times 1000) / EE \quad \text{Equação (5)}$$

Quanto ao etanol (ET), obtido em L MJ⁻¹, calculou-se utilizando:

$$ET = (VAH \times 1000) / EE \quad \text{Equação (6)}$$

A energia de saída (ES), em MJ ha⁻¹, foi calculada da seguinte forma:

$$ES = VAH \times 1000 \times 22,3 \quad \text{Equação (7)}$$

O balanço energético representa a energia líquida obtida (Equação 8).

$$BE = ES - EE \quad \text{Equação (8)}$$

A denominação EROI (*energy return on investment*) (Hall, 2004), adimensional (MJ MJ⁻¹), é considerada como a razão entre energia de saída e a energia de entrada (Equação 9), indicando a agregação de energia que o sistema estudado obtém durante o seu ciclo produtivo.

$$EROI = ES / EE \quad \text{Equação (9)}$$

Para se determinar a intensidade energética na produção da biomassa da cana-de-açúcar, considera-se a biomassa produzida como *output* (Equação 10). Assim, tem-se um

índice que relaciona a biomassa produzida com a energia demandada pelo sistema de produção, o qual é a intensidade energética (IE), retratando a energia demandada por massa. Para o seu cálculo, determina-se o quanto de energia por unidade de produto final foi requerida através da razão da energia de entrada (MJ ha⁻¹) e a produtividade obtida (t ha⁻¹).

$$IE = EE / \text{Prod} \quad \text{Equação (10)}$$

em que:

IE = intensidade energética, em MJ t⁻¹;

EE = energia de entrada (MJ ha⁻¹)

Prod = produtividade, em t ha⁻¹.

Resultados e discussão

No primeiro ano de cultivo da cana, na modalidade cana planta (CP), a maior produtividade foi de 142,5 t ha⁻¹ (294 mm, 50 kg de N e 23 kg de K₂O), e a menor, 107,9 t ha⁻¹ (294 mm, 65 kg de N e 43 kg de K₂O), Tabela 1, possivelmente pela interação entre a lâmina, N e K.

Já no ano seguinte, a cana soca (CS), teve sua maior produção, 198,5 t ha⁻¹ (Tabela 2) no tratamento que recebeu 675 mm de irrigação, 111 kg de N e 44 kg de K₂O, resultando num acréscimo na produção em relação ao ano anterior, de 39%. Esse mesmo tratamento obteve o potencial de volume de álcool, 18,1 m³ ha⁻¹, e o tratamento que obteve o menor rendimento, 110,1 t ha⁻¹ também resultou no menor volume de álcool: 9,2 m³ ha⁻¹.

Para Santos et al. (2018), o plantio sob irrigação apresentou maior aporte energético, explicado pela energia direta e indireta associada ao sistema de irrigação.

Independente da adubação com N e K, a menor produção de colmos ocorreu com a lâmina de irrigação de 118 mm, para a cana planta, com valores médios de 121,47 t ha⁻¹ (Tabela 1), podendo ter sido o fornecimento de água às plantas um limitante na produtividade, porém a produção de álcool foi semelhante em todos os tratamentos, com valores médios de 11,0 m³ ha⁻¹. A menor produção de álcool ocorreu nas plantas que receberam a lâmina de irrigação de 294 mm, 65 kg ha⁻¹ de N e 43 kg ha⁻¹ de K, com valor de 8,5 m³ ha⁻¹.

O menor ganho de energia líquido por área cultivada ocorreu com o fornecimento de 294 mm de lâmina de irrigação, com valor de 36,03, e independente da lâmina e do K, foi maior na menor dose de N (Tabela 1). Segundo Chechetto et al. (2010), os fertilizantes nitrogenados destacam-se em relação ao gasto energético.

Para Santos et al. (2017), os aumentos na quantidade de nitrogênio aplicado, juntamente com a presença da irrigação, proporcionaram maior produção de frutos e consequentemente de energia, apesar de necessitarem de um maior investimento energético.

Tabela 1. Estudo energético na cultura da cana-de-açúcar, em função de lâminas de água, nitrogênio e potássio, cana planta.

| $W_{irr}^{(1)}$ -mm- | $N^{(2)}$ -kg ha ⁻¹ - | $K^{(3)}$ | $TCH^{(4)}$ -t ha ⁻¹ - | $VAH^{(5)}$ -m ³ ha ⁻¹ - | $EE^{(6)}$ -MJ ha ⁻¹ - | $PEI^{(7)}$ -kg MJ ⁻¹ - | $ET^{(8)}$ -L MJ ⁻¹ - | $ES^{(9)}$ -MJ ha ⁻¹ - | $BE^{(10)}$ -MJ ha ⁻¹ - | $EROI^{(11)}$ - | $IE^{(12)}$ -MJ ton ⁻¹ - |
|-------------------------|-------------------------------------|-----------|--------------------------------------|---|--------------------------------------|---------------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|---------------------------------------|--------------------|--|
| 118 | 20 | 12 | 123,8 | 11,21 | 1.567,86 | 78,99 | 7,15 | 249968 | 248400 | 158,43 | 12,66 |
| 118 | 35 | 33 | 127,9 | 11,05 | 2.818,56 | 45,38 | 3,92 | 246363 | 243544 | 86,41 | 22,04 |
| 118 | 50 | 53 | 124,4 | 11,66 | 4.062,56 | 30,63 | 2,87 | 260113 | 256051 | 63,03 | 32,65 |
| 118 | 65 | 23 | 114,9 | 10,85 | 4.971,56 | 23,11 | 2,18 | 241852 | 236881 | 47,65 | 43,28 |
| 118 | 80 | 43 | 116,3 | 10,35 | 6.215,56 | 18,71 | 1,67 | 230801 | 224586 | 36,13 | 53,44 |
| 176 | 20 | 53 | 123,3 | 10,90 | 1.846,22 | 66,77 | 5,91 | 243143 | 241297 | 130,70 | 14,98 |
| 176 | 35 | 23 | 129,9 | 11,92 | 2.755,22 | 47,15 | 4,32 | 265722 | 262967 | 95,44 | 21,21 |
| 176 | 50 | 43 | 140,9 | 12,81 | 3.999,22 | 35,24 | 3,20 | 285670 | 281671 | 70,43 | 28,38 |
| 176 | 65 | 12 | 127,0 | 10,55 | 4.901,52 | 25,92 | 2,15 | 235369 | 230468 | 47,02 | 38,59 |
| 176 | 80 | 33 | 142,1 | 11,35 | 6.152,22 | 23,09 | 1,84 | 253004 | 246852 | 40,12 | 43,30 |
| 235 | 20 | 43 | 117,2 | 9,84 | 1.782,95 | 65,73 | 5,52 | 219342 | 217559 | 122,02 | 15,21 |
| 235 | 35 | 12 | 135,7 | 13,26 | 2.685,25 | 50,54 | 4,94 | 295618 | 292933 | 109,09 | 19,79 |
| 235 | 50 | 33 | 119,8 | 10,37 | 3.935,95 | 30,44 | 2,63 | 231215 | 227279 | 57,74 | 32,86 |
| 235 | 65 | 53 | 122,7 | 11,97 | 5.179,95 | 23,68 | 2,31 | 267012 | 261832 | 50,55 | 42,22 |
| 235 | 80 | 23 | 136,6 | 11,80 | 6.088,95 | 22,43 | 1,94 | 263158 | 257069 | 42,22 | 44,58 |
| 294 | 20 | 33 | 120,1 | 10,78 | 1.719,68 | 69,83 | 6,27 | 240404 | 238684 | 138,80 | 14,32 |
| 294 | 35 | 53 | 126,7 | 12,05 | 2.963,68 | 42,76 | 4,07 | 268768 | 265805 | 89,69 | 23,38 |
| 294 | 50 | 23 | 142,5 | 11,56 | 3.872,68 | 36,79 | 2,98 | 257688 | 253815 | 65,54 | 27,18 |
| 294 | 65 | 43 | 107,9 | 8,50 | 5.116,68 | 21,09 | 1,66 | 189461 | 184344 | 36,03 | 47,41 |
| 294 | 80 | 12 | 118,6 | 10,79 | 6.018,98 | 19,71 | 1,79 | 240652 | 234633 | 38,98 | 50,74 |
| 353 | 20 | 23 | 125,3 | 10,18 | 1.656,40 | 75,64 | 6,14 | 226948 | 225292 | 136,01 | 13,22 |
| 353 | 35 | 43 | 120,7 | 10,91 | 2.900,40 | 41,60 | 3,76 | 243386 | 240485 | 82,91 | 24,04 |
| 353 | 50 | 12 | 133,1 | 11,40 | 3.802,70 | 35,00 | 3,00 | 254325 | 250523 | 65,88 | 28,57 |
| 353 | 65 | 33 | 142,1 | 12,06 | 5.053,40 | 28,11 | 2,39 | 268945 | 263892 | 52,22 | 35,57 |
| 353 | 80 | 53 | 137,6 | 11,77 | 6.297,40 | 21,84 | 1,87 | 262453 | 256156 | 40,68 | 45,78 |

⁽¹⁾lâmina aplicada pela irrigação, em mm. ⁽²⁾nitrogênio total aplicado por tratamento, em kg ha⁻¹. ⁽³⁾potássio total aplicado por tratamento, em kg ha⁻¹. ⁽⁴⁾ produção de colmos, em toneladas ha⁻¹. ⁽⁵⁾produção de álcool, em m³ ha⁻¹. ⁽⁶⁾ganho de produção por acréscimo de irrigação, nitrogênio e potássio (Energia in), em MJ ha⁻¹. ⁽⁷⁾massa de cana produzida por energia investida em N, K e W, em kg MJ⁻¹ WNK. ⁽⁸⁾etanol, em L MJ⁻¹. ⁽⁹⁾energia de saída, em MJ ha⁻¹. ⁽¹⁰⁾balanço energético, em MJ ha⁻¹. ⁽¹¹⁾ganho de energia líquido por área cultivada. ⁽¹²⁾biomassa produzida com a energia demandada pelo sistema de produção, em MJ ton⁻¹.

Wei et al. (2020) concluíram que a análise energética forneceu uma oportunidade de direcionar práticas de manejo potenciais para reduzir o consumo de energia e produzir a mesma quantidade de cana-de-açúcar, incapaz de descobrir olhando apenas para o rendimento (Mg ha⁻¹).

Santos et al. (2018) citam que o maior componente relacionado ao aporte energético foram os fertilizantes seguido pelo combustível utilizado nas operações de máquinas, mostrando a importância das práticas on-farm.

No segundo ano de cultivo, a maior produção de colmos ocorreu nas maiores lâminas de irrigação, 574 e 675 mm, com valores médios das duas lâminas de 169,0 t ha⁻¹, e a produção de álcool aumentou linearmente em função das lâminas de irrigação (Tabela 2).

O ganho de energia líquido por área cultivada (EROI) aumentou em razão da lâmina de irrigação, e reduziu

com as doses de N e K, enquanto para a biomassa produzida com a energia demandada pelo sistema de produção (IE), ocorreu o inverso (Tabela 2).

O maior valor da energia de entrada na CP (14.105,8 MJ) em relação à CS (6.297,4 MJ) resultou numa diferença de 123%, certamente por ter chovido mais: 2243 mm em comparação a 479 mm, no ano de CP, tendo como consequência um menor tempo de funcionamento do sistema de irrigação, bem como pelo fato do excesso de água no solo não ter sido possível a aplicação de toda a adubação prevista.

A entrada de energia para os dois anos de cultivo da cana-de-açúcar teve seus maiores valores no tratamento que recebeu a maior quantidade de água, adubação nitrogenada e potássica, 353 mm, 80 kg de N e 53 kg de K₂O ha⁻¹ no primeiro ano, e 675 mm, 178 kg de N e 133 kg de K₂O ha⁻¹ no segundo ano, e o menor valor obtido no tratamento

Tabela 2. Estudo energético na cultura da cana-de-açúcar, em função de lâminas de água, nitrogênio e potássio, no primeiro ano de cana soca.

| W _{irr} ⁽¹⁾ -mm- | N ⁽²⁾ -kg ha ⁻¹ - | K ⁽³⁾ -kg ha ⁻¹ - | TCH ⁽⁴⁾ -t ha ⁻¹ - | VAH ⁽⁵⁾ -m ³ ha ⁻¹ - | EE ⁽⁶⁾ -MJ ha ⁻¹ - | PEI ⁽⁷⁾ -kg MJ ⁻¹ - | ET ⁽⁸⁾ -L MJ ⁻¹ - | ES ⁽⁹⁾ -MJ ha ⁻¹ - | BE ⁽¹⁰⁾ -MJ ha ⁻¹ - | EROI ⁽¹¹⁾ - | IE ⁽¹²⁾ -MJ ton ⁻¹ - |
|---|--|--|---|--|---|--|--|---|--|---------------------------|---|
| 288,5 | 44,0 | 44,0 | 134,0 | 12,6 | 3.569,03 | 37,55 | 3,5 | 281660 | 278091 | 77,92 | 26,63 |
| 288,5 | 78,0 | 89,0 | 146,4 | 11,2 | 6.386,53 | 22,93 | 1,8 | 250730 | 244343 | 38,26 | 43,62 |
| 288,5 | 111,0 | 133,0 | 138,2 | 12,7 | 9.123,33 | 15,15 | 1,4 | 282329 | 273205 | 29,95 | 66,02 |
| 288,5 | 144,0 | 67,0 | 117,8 | 11,1 | 11.123,13 | 10,59 | 1,0 | 248210 | 237087 | 21,31 | 94,40 |
| 288,5 | 178,0 | 111,0 | 110,1 | 9,2 | 13.933,93 | 7,90 | 0,7 | 205940 | 192006 | 13,78 | 126,59 |
| 419,5 | 44,0 | 133,0 | 144,7 | 13,7 | 4.173,61 | 34,66 | 3,3 | 305443 | 301269 | 72,18 | 28,85 |
| 419,5 | 78,0 | 67,0 | 141,2 | 12,5 | 6.247,41 | 22,60 | 2,0 | 278939 | 272692 | 43,65 | 44,24 |
| 419,5 | 111,0 | 111,0 | 138,3 | 12,2 | 8.984,21 | 15,39 | 1,4 | 272885 | 263900 | 29,37 | 64,96 |
| 419,5 | 144,0 | 44,0 | 145,1 | 12,5 | 10.977,31 | 13,22 | 1,1 | 277846 | 266869 | 24,31 | 75,63 |
| 419,5 | 178,0 | 89,0 | 140,2 | 13,1 | 13.794,81 | 10,16 | 0,9 | 291048 | 277253 | 20,10 | 98,42 |
| 492,0 | 44,0 | 111,0 | 139,1 | 12,2 | 4.030,79 | 34,51 | 3,0 | 273085 | 269055 | 66,75 | 28,97 |
| 492,0 | 78,0 | 44,0 | 147,0 | 12,6 | 6.097,89 | 24,11 | 2,1 | 280991 | 274893 | 45,08 | 41,48 |
| 492,0 | 111,0 | 89,0 | 167,6 | 15,3 | 8.841,39 | 18,96 | 1,7 | 341881 | 333039 | 37,67 | 52,76 |
| 492,0 | 144,0 | 133,0 | 163,1 | 15,5 | 11.578,19 | 14,09 | 1,3 | 345527 | 333949 | 28,84 | 71,00 |
| 492,0 | 178,0 | 67,0 | 138,4 | 11,9 | 13.651,99 | 10,14 | 0,9 | 265771 | 252119 | 18,47 | 98,62 |
| 574,0 | 44,0 | 89,0 | 179,6 | 16,7 | 3.888,57 | 46,19 | 4,3 | 371874 | 367986 | 94,63 | 21,65 |
| 574,0 | 78,0 | 133,0 | 134,5 | 10,7 | 6.699,37 | 20,08 | 1,6 | 239100 | 232401 | 34,69 | 49,79 |
| 574,0 | 111,0 | 67,0 | 166,8 | 13,6 | 8.699,17 | 19,17 | 1,6 | 304172 | 295472 | 33,97 | 52,16 |
| 574,0 | 144,0 | 111,0 | 178,4 | 14,1 | 11.435,97 | 15,60 | 1,2 | 314340 | 302904 | 26,49 | 64,12 |
| 574,0 | 178,0 | 44,0 | 189,9 | 16,1 | 13.503,07 | 14,07 | 1,2 | 359810 | 346307 | 25,65 | 71,09 |
| 675,0 | 44,0 | 67,0 | 131,7 | 12,4 | 3.747,55 | 35,13 | 3,3 | 275483 | 271735 | 72,51 | 28,46 |
| 675,0 | 78,0 | 111,0 | 166,4 | 15,0 | 6.558,35 | 25,37 | 2,3 | 334020 | 327462 | 49,93 | 39,42 |
| 675,0 | 111,0 | 44,0 | 198,5 | 18,1 | 8.551,45 | 23,21 | 2,1 | 403273 | 394721 | 46,16 | 43,08 |
| 675,0 | 144,0 | 89,0 | 161,5 | 14,1 | 11.294,95 | 14,29 | 1,2 | 313426 | 302131 | 26,75 | 69,96 |
| 675,0 | 178,0 | 133,0 | 188,1 | 18,1 | 14.105,75 | 13,33 | 1,3 | 403808 | 389702 | 27,63 | 75,00 |

⁽¹⁾lâmina aplicada pela irrigação, em mm. ⁽²⁾nitrogênio total aplicado por tratamento, em kg ha⁻¹. ⁽³⁾potássio total aplicado por tratamento, em kg ha⁻¹. ⁽⁴⁾ produção de colmos, em tonelada ha⁻¹. ⁽⁵⁾produção de álcool, em m³ ha⁻¹. ⁽⁶⁾ganho de produção por acréscimo de irrigação, nitrogênio e potássio (Energia in), em MJ ha⁻¹. ⁽⁷⁾massa de cana produzida por energia investida em N, K e W, em kg MJ⁻¹ WNK. ⁽⁸⁾etanol, em L MJ⁻¹. ⁽⁹⁾energia de saída, em MJ ha⁻¹. ⁽¹⁰⁾balanço energético, em MJ ha⁻¹. ⁽¹¹⁾ganho de energia líquido por área cultivada. ⁽¹²⁾biomassa produzida com a energia demandada pelo sistema de produção, em MJ ton⁻¹.

que recebeu as menores quantidades: na CP 118 mm, 20 kg de N e 12 kg de K₂O ha⁻¹, e para a CS, 288 mm e 44 kg de N e K₂O ha⁻¹.

A massa de cana produzida por energia investida em W, N e K₂O, isto é, para cada MJ, ganho de, por exemplo, 79,0 kg de massa de cana-de-açúcar para o maior valor encontrado na CP, contra 46,19 kg MJ⁻¹ (menor valor) e menor na CS (7,9 kg MJ⁻¹, comparado a 18,71 kg MJ⁻¹).

Os valores de etanol foram superiores no cultivo da CP (7,2 L MJ⁻¹), correspondendo a mais de 100% de aumento. Isso quer dizer que para cada 7,2 litros de etanol produzidos, foi gasto 1 MJ, ao contrário do segundo ano, que com a mesma energia, só produziu 3,5 litros. A energia de saída foi maior para CS: 403808 MJ ha⁻¹. Quando comparada ao maior valor obtido para CP, constatou-se uma superioridade na CS de 37%.

dade na CS de 37%.

Na CS, a energia de entrada correspondeu em média a 3,5% da energia de saída, variação de 1,3 a 6,8%. Já na CP, essa porcentagem foi bem menor, em média 1,6%, tendo variado de 0,6 a 2,7%, com média de 1,6%. Romanelli & Milan (2010) ao avaliarem todos os insumos envolvidos no processo de produção do eucalipto, como mecanização e mudas, obtiveram 1,6%.

Quanto ao balanço energético que avalia a energia líquida resultante do processo produtivo, o tratamento que recebeu 353 mm de água, 50 kg de N e 12 kg de K₂O ha⁻¹, obteve o maior valor: 394721 MJ ha⁻¹.

No cultivo da CP, o balanço de energia, isto é, o ganho líquido, foi menor e a lucratividade energética maior (EROI), ao contrário do ocorrido na CS. É necessário lembrar que

nessa pesquisa, a energia de entrada considerada foram os tratamentos (água e adubação nitrogenada e potássica), não tendo sido computados gastos energéticos como, por exemplo, maquinário, mão-de-obra, defensivos etc. Porém, seriam os mesmos valores para todos os tratamentos.

Contudo, o maior valor de EROI obtido foi 94,63 no segundo ano de cultivo da área experimental. Assim, é possível diminuir a energia de entrada utilizando menor volume de água, e quantidade de nitrogênio e potássio, e obter um favorável resultado de EROI e BE.

Na Tabela 3 são apresentados os valores médios dos índices de eficiência energética dos dois anos de cultivo da cana-de-açúcar. De modo geral, houve um decréscimo no valor do EROI da CP para a CS, e um ligeiro aumento no BE. A IE foi maior no CS, indicando maior eficiência na conversão de biomassa produzida por unidade de área.

Tabela 3. Média dos índices de eficiência energética dos dois anos de cultivo da cana-de-açúcar.

| Índice | Valor | | Unidade |
|---------------------|-------------|-----------|---------------------|
| | Cana planta | Cana soca | |
| EROI ⁽¹⁾ | 77,1 | 41,2 | - |
| IE ⁽²⁾ | 31,02 | 59,08 | MJ m ⁻³ |
| Balanco energético | 245.721,1 | 292.024,1 | MJ ha ⁻¹ |

⁽¹⁾ganho de energia líquido por área cultivada. ⁽²⁾biomassa produzida com a energia demandada pelo sistema de produção.

Esses números altos levam a crer que o plantio de cana-de-açúcar é uma eficiente fonte de energia, mas Romanelli & Milan (2010) lembram que não foram contabilizadas as condições edafoclimáticas favoráveis, e ainda a energia que também é envolvida no processo produtivo como maquinários, defensivos, tratos culturais, dentre outros.

A produtividade foi maior no segundo ano de cultivo, de forma mais acentuada a partir do tratamento 13, com a aplicação da lâmina de irrigação de 492 mm. Comportamento semelhante foi observado para a saída de energia.

A energia de entrada aumentou consideravelmente em função das doses dos fertilizantes aplicados, concordando com Chechetto et al. (2010). De acordo com Salla et al. (2010) os insumos são responsáveis pelo alto nível de energia embutida (35,72%), e aparecem como os principais responsáveis pela diminuição dos balanços energéticos. A lâmina da irrigação não teve influência direta na entrada de energia, que foi mais elevada no segundo ano de cultivo.

A produção potencial de etanol foi maior no primeiro ano de cultivo, e reduziu em função das doses dos fertilizantes, como consequência do maior gasto de energia. O ligeiro aumento no balanço energético do primeiro para o

segundo ano é decorrente da menor diferença significativa entre os anos, até o tratamento 12.

O ganho de energia líquida por área cultivada foi maior no primeiro ano de cultivo e decresceu com as doses de N e K. De forma inversa em relação ao EROI, a IE decresceu com o aumento das lâminas de irrigação, e foi maior no segundo ano de cultivo. Além disso, houve aumento com as doses de N e K. Esses resultados reiteram os dados médios apresentados na Tabela 3.

Bernardes et al. (2023) citam que estudos sobre produção de etanol de cana-de-açúcar se baseiam basicamente nos pontos de vista econômico e sustentável, com desconsideração da análise energética. A análise da eficiência energética foi realizada usando os indicadores: balanço de energia (EB), retorno energético sobre o investimento (EROI) e intensidade energética (EI).

Santos et al. (2018) citam que o balanço energético e o EROI tiveram melhora com o uso da irrigação, diferentemente do cenário de sequeiro.

Conclusões

O maior valor da energia de entrada na Cana Planta (CP) é de 14,1 GJ, e para Cana Soca (CS), 6,3 GJ, no tratamento que recebe a maior quantidade de água (353,0 mm CP e 675,0 mm CS), adubação nitrogenada (80 kg ha⁻¹ CP e 178,0 kg ha⁻¹ CS) e potássica (53 kg ha⁻¹ CP e 133 kg ha⁻¹CS).

O balanço de energia obtém seu máximo na aplicação de 353 mm, 50 kg de N e 12 kg de K₂O ha⁻¹: 394721 MJ ha⁻¹. No cultivo da CP, o balanço de energia é menor e a lucratividade energética maior (EROI), ao contrário do ocorrido na CS. Contudo, o maior valor de EROI é de 95,6, no segundo ano de cultivo.

Contribuição dos autores

P. R. D'A. MOTA concepção do trabalho (2ª fase, referente a Fluxo de energia), condução do experimento, aquisição e análise dos dados, redação e revisão do artigo. M. V. FOLEGATTI, T. L. ROMANELLI E F. J. ROCHA análise dos dados, redação e revisão do artigo. A. S. DE ANDRADE JÚNIOR E E. A. BASTOS concepção do trabalho e desenho amostral, condução do experimento, aquisição e análise dos dados, redação e revisão do artigo. J. A. FRIZZONE revisão do artigo.

Referências

ANDRADE JÚNIOR, A. S. de; BASTOS, E. A.; RIBEIRO, V. Q.; DUARTE, J. A. L.; BRAGA, D. L.; NOLETO, D. H. Níveis de água, nitrogênio e potássio por gotejamento subsuperficial em cana-de-açúcar. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, v.47, n.1, p.76-84, 2012. DOI: 0.1590/S0100-204X2012000100011

- ANDRADE JUNIOR, A. S. de; NOLETO, D. H.; BASTOS, E. A.; MOURA, M. S. B. de; ANJOS, J. C. R. dos. Demanda hídrica da cana-de-açúcar, por balanço de energia, na microrregião de Teresina, Piauí. **Agrometeoros**, v.25, n.1, p.217-226, 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.31062/agrom.2511.26282>
- AZEVEDO NETTO, J. M. de. **Manual de Hidráulica**. 8.ed., São Paulo: Editora Edgard Blücher, 1998. 699 p.
- BASTOS, E. A.; ANDRADE JUNIOR, A. S. de. **Boletim Agrometeorológico de 2018 para o município de Teresina, PI**. Teresina: Embrapa Meio-Norte, 2019. 37p. (Documentos / Embrapa Meio-Norte, 266).
- BERNARDES, F. F.; ROMANELI, T. L.; PEREIRA, A. K. S.; CUPERTINO, G. F. M.; FERNANDES, M. A.; BRITO, J. O.; SOUZA, E. C. de.; SALONI, D.; DIAS JUNIOR, A. F. **Energies**, v.16, n. 21, p.7318. 2023. DOI:10.3390/en16217318
- CAMPOS, A. T.; SAGLIETTI, J. R. C.; CAMPOS, A. T.; BUENO, O.C. Análise energética na produção de feno de “coast-cross”. **Engenharia Agrícola**, v.25, n.2, p.349-358, 2005. DOI: 10.1590/S0100-69162005000200008
- 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**, v.41, n.4, p.546-553, 2010. DOI: 10.1590/S1806-66902010000400006
- CHEN, G. F.; TANG, Q. Z.; LI, Y.R.; HUANG, Y. Y.; LIU, B.; XU, L.; HUANG, H. R. Effects of sub-soil drip fertigation on sugarcane in field conditions. **Sugar Tech**, v.14, n.4, p.418-421, 2012. DOI:10.1007/s12355-012-0173-x
- EPE. Empresa de pesquisa energética: **Brazilian energy balance 2022 year 2021** (in portuguese). 2022.
- EPE. Empresa de pesquisa energética: **Nota técnica. Análise de conjuntura dos biocombustíveis – ano 2021**. 2021.
- HALL, C. A. S. The myth of sustainability development – personal reflection on energy, its relation to neoclassical economics and Stanley Jevons. **Journal of Energy Resource Technology**, v.126, n.2, p.85-89, 2004. DOI: 10.1115/1.1737771
- OLIVEIRA, E. C. A. de; FREIRE, F. J.; OLIVEIRA, A. C. de; SIMÕES NETO, D. E.; ROCHA, A. T. da; CARVALHO, L. A. de. Produtividade, eficiência de uso da água e qualidade tecnológica de cana-de-açúcar submetida a diferentes regimes hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.46, n.6, p.617-625, 2011. DOI: 10.1590/S0100-204X2011000600007
- OLIVEIRA, R. C. de; CUNHA, F. N.; SILVA, N. F. da; TEIXEIRA, M.B.; SOARES, F. A. L.; MEGGUER, C. A. Productivity of fertirrigated sugarcane in subsurface drip irrigation system. **African Journal of Agricultural Research**, v.9, n.11, p.993-1000, 2014. DOI: 10.5897/AJAR2013.7829
- PELLIZZI, G. Use of energy and labour in Italian agriculture. **Journal of Agricultural Engineering Research**, v.52, p.111-119, 1992. DOI:10.1016/0021-8634(92)80054-v
- PELOIA, P. R., MILAN, M., ROMANELLI, T. L., GIMENEZ, L. M. Monitoring performance indicators of mechanized agricultural operations through a systemic method. (2023). **Scientia Agrícola**, v.80, e20210143, 2023. DOI: 10.1590/1678-992X-2021-0143
- PIMENTEL, D. **Energy flow in the food system**. In: PIMENTEL, D.; HALL, C.W. (Ed.) Food and energy resources. Orlando: Academic Press, 1984. p.34-53.
- PIRES, W. M.; TEIXEIRA, M. B.; SOARES, F. A. L.; RIBEIRO, W. A.; LOPES FILHO, L. C. Cultivo da cana-de-açúcar sob diferentes níveis de reposição hídrica, com e sem adição de nitrogênio. **Multidisciplinary Journal**, v.5, n.3, p.56-87, 2018. DOI: 10.29247/2358-260X.2018v5i3.p56-87
- RIQUETTI, N. B.; BENEZ, S. H.; SILVA, P. R. A. Demanda energética em diferentes manejos de solo e híbridos de milho. **Energia na Agricultura**, v.27, n.2, p.76-85, 2012. DOI: 10.17224/EnergAgric.2012v27n2p76-85
- ROMANELLI, T. L. Sustentabilidade energética da cana-de-açúcar. In: RIPOLI, T.C.C.; RIPOLI, M.L.C. (Org.). **Biomassa de cana-de-açúcar: colheita, energia e ambiente**. 2.ed. Piracicaba, SP: RIPOLI, T.C.C., 2009. v.1, p.304-312.
- ROMANELLI, T. L.; MILAN, M. Energy balance methodology and modeling of supplementary forage production for cattle in Brazil. **Scientia Agrícola**, v.62, n.1, p.1-7, 2005. DOI: 10.1590/S0103-90162005000100001
- ROMANELLI, T. L.; MILAN, M. Energy performance of a production system of eucalyptus. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.8, p.896-903, 2010. DOI: 10.1590/S1415-43662010000800015
- SALLA, D. A.; FURLANETO, F. P. B.; CABELLO, C.; KANTHACK, R. A. D. Análise energética de sistemas de produção de etanol de mandioca (*Manihot esculenta* Crantz). **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, n.4, p.444-448, 2010. DOI: 10.1590/S1415-43662010000400015
- SANTOS, O. N. A.; FOLEGATTI, M. V.; LENA, B. P.; DIOTTO, A. V.; FRANCISCO, J. P.; ROMANELLI, T. L. Energy analysis of *Jatropha curcas* under irrigation and rainfed at the Southeast Brazilian humid subtropical. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, v.20, n.3. p.116-126. 2018.
- SANTOS, O. N. A.; ANDRADE, I. P. de S.; LENA, B. P.; FOLEGATTI, M. V.; DIOTTO, A. V.; ROMANELLI, T. L. Impact of irrigation and nitrogen fertilization on the energy balance and energy return on investment of *Jatropha* production. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, v.11, n.5, p.1738-1746, 2017. DOI: 10.7127/rbai.v11n500792
- SILVA, M. de A.; ARANTES, M. T.; RHEIN, A. F. de L., GAVA, G. J. C.; KOLLN, O. T. Potencial produtivo da cana-de-açúcar sob irrigação por gotejamento em função de variedades e ciclos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n.3, p.241-249, 2014. DOI: 10.1590/S1415-43662014000300001
- SINGH, H.; SINGH, R. K.; MEENA, R. N.; KUMAR, V. Nitrogen fertigation schedule and irrigation effects on productivity and economics of spring sugarcane. **Indian Journal of Agricultural Research**, v.53, n.4, p.405-410, 2019. DOI: 10.18805/IJARe.A-5208
- TROMBETA, N. de C.; CAIXETA FILHO, J. V. Potencial e disponibilidade de biomassa de cana-de-açúcar na Região Centro-Sul do Brasil: indicadores agroindustriais. **Revista de Economia e Sociologia Rural**, v.55, n.3, p.479-496, 2017. DOI: 10.1590/1234-56781806-94790550304
- UMESH, U. N.; KUMAR, V.; ALAM, M.; SINHA, S. K.; VERMA, K. Integrated effect of organic and inorganic fertilizers on yield, quality parameter and nutrient availability of sugarcane in calcareous soil. **Sugar Tech**, v.15, n.4, p.365-369, 2013. DOI: 10.1007/s12355-013-0213-1
- URIBE, R. A. M.; GAVA, G. J. C.; SAAD, J. C. C.; KOLLN, O. T. Ratoon sugarcane yield integrated drip-irrigation and nitrogen fertilization. **Engenharia Agrícola**, v.33, n.6, p.1124-1133, 2013. DOI: 10.1590/S0100-69162013000600005
- VEIGA, J. P. S.; ROMANELLI, T. L.; GIMENEZ, L. M.; BUSATO, P.; MILAN, M. Energy embodiment in Brazilian agriculture: an overview of 23 crops. **Scientia Agrícola**, v.72, n.6, p.471-477, 2015. DOI:10.1590/0103-9016-2015-0188
- WEI, M. C. F.; ROMANELLI, T. L.; MOLIN, J. P. Energy analysis of sugarcane potential ethanol production from published data: a case study in Campos de Goytacazes – Brazil. **Agricultural Engineering International: CIGR Journal**, v.22, n.4, p.110-118. 2020. Disponível em: <file:///C:/Users/46680/Desktop/5973-Article%Te xt-29673-1-10-20201225.pdf>. Acesso em: 02 dez. 2024.

REFERENCIAÇÃO

- MOTA, P. R. D'A.; FOLEGATTI, M. V.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; ROMANELLI, T. L.; ROCHA, F. J.; FRIZZONE, J. A.; BASTOS, E. A. Fluxos de energia do manejo da irrigação e fertirrigação na cultura da cana-de-açúcar. **Agrometeoros**, Passo Fundo, v.32, e026706, 2024.



Energy flows of irrigation and fertigation management of sugarcane crop

Poliana Rocha D'Almeida Mota^{1(*)}, Marcos Vinícius Folegatti², Aderson Soares de Andrade Júnior³, Thiago Libório Romanelli², Fábio Jordão Rocha², Jose Antonio Frizzone² and Edson Alves Bastos³

¹Universidade Federal do Piauí, Campus Agrícola da Socopo, CEP 64049-550, Teresina, PI, Brazil. E-mail: poliana@ufpi.edu.br

²ESALQ/USP, Avenida Pádua Dias, 11 - Departamento de Engenharia de Biossistemas, CEP 13418-900, Piracicaba, SP, Brazil.

E-mail: mvfolega@usp.br, romanelli@usp.br, fabiojordaorochoa@gmail.com and frizzone@usp.br.

³Embrapa Meio-Norte, Av. Duque de Caxias, nº 5.650, Bairro Buenos Aires, CEP 64008-780, Teresina, PI, Brazil.

E-mail: aderson.andrade@embrapa.br e edson.bastos@embrapa.br

(*)Corresponding author.

ARTICLE INFO

Article history:

Received 5 June 2020

Accepted 16 December 2024

Index terms:

Saccharum officinarum

renewable energy

energy balance

EROI

irrigation water

fertilizer

energy generation

ABSTRACT

Sustainability of a production system of sugarcane for energy generation can be analyzed by energy flows, to promote changes in management standards aiming to reduce the energy consumed in the production process. This knowledge is fundamental to define policies considering the crop potential as renewable energy source. This study aimed to analyze the energy flows through the energy balance and EROI (energy return on investment), of sugarcane, in two years of cultivation: planted cane (PC) and the first year of cultivation from sugarcane ratoon (CS) under different water depths and doses of N and K₂O, subsurface drip fertigation. The highest value of the input energy was the PC 14.1 GJ, and CS, 6.3 GJ, in treatment that provided the largest amount of water, nitrogen and potassium. The highest Energy balance was found with 353 mm, 50 kg ha⁻¹ N and 12 kg ha⁻¹ K₂O, reaching 394.7 GJ ha⁻¹. In the cultivation of the PC, the energy balance was lower and higher energy profitability (EROI), contrary to what occurred in CS. However, the highest value for EROI was 95.6 in CS.

© 2024 SBAgro. All rights reserved.

CITATION

MOTA, P. R. D'A; FOLEGATTI, M. V.; ANDRADE JÚNIOR, A. S.; ROMANELLI, T. L.; ROCHA, F. J.; FRIZZONE, J. A.; BASTOS, E. A. Fluxos de energia do manejo da irrigação e fertirrigação na cultura da cana-de-açúcar. *Agrometeoros*, Passo Fundo, v.32, e026706, 2024.