



Revista Industrial
y Agrícola de
Tucumán

ISSN 0370-5404

En línea
1851-3018

Tomo 99 (2):
41-47; 2022



ESTACION EXPERIMENTAL
AGROINDUSTRIAL
OBISPO COLOMBRES
Tucumán | Argentina

Av. William Cross 3150
T4101XAC - Las Talitas.
Tucumán, Argentina.

Uso de energía para la producción de caña de azúcar en la provincia de Tucumán (Argentina)

Javier Tonatto**, Patricia Garolera De Nucci*, Sergio Casen**, Marcelo Ruiz*** y Eduardo Romero**

* Ingeniería y Proyectos Agroindustriales; **Caña de Azúcar; ***Director Asistente en Tecnología Industrial, EEAOC.
Email: jtonatto@eeaoc.org.ar

RESUMEN

La caña de azúcar es reconocida mundialmente como una de las materias primas más adecuadas para la generación de bioenergía y contribuye a mejorar la matriz energética con fuentes renovables en el noroeste de Argentina. Considerando la influencia de la etapa agrícola del cultivo sobre la sustentabilidad y la necesidad de determinar el uso de energía dentro de los sistemas bioenergéticos, se planteó como objetivo de este estudio cuantificar y analizar el uso de energía a lo largo de las etapas de producción agrícola de la caña de azúcar. Se consideró un sistema de cultivo convencional y un sistema optimizado que incluyó diversas modificaciones en su manejo e insumos, durante un ciclo productivo total de cinco años en la provincia de Tucumán (Argentina). Se consideraron prácticas agronómicas, insumos y dosis de aplicación, además de mano de obra, para estimar el consumo de energía requerido para la producción de esta materia prima. Los principales cambios introducidos fueron el uso de diferentes fuentes de fertilizante nitrogenado, la plantación mecanizada del cañaveral y los herbicidas aplicados. El consumo de energía por tonelada de caña de azúcar en un sistema de manejo agronómico convencional fue de 301,7 MJ; y de 203,4 MJ por t de caña de azúcar para el sistema del manejo agronómico optimizado. En ambos casos, el uso de combustible fósil durante las operaciones mecanizadas y el uso de fertilizantes fueron las principales categorías de consumo de energía. El nitrato de amonio calcáreo se destaca como una de las opciones relevantes para reducir el uso de energía gracias a la menor demanda de esta para su síntesis y logística, la dosis de nutriente requerida y por su forma de aplicación en campo. La definición de dos sistemas de manejo de caña de azúcar (diferentes y ampliamente difundidos), así como la cuantificación de su uso de energía generaron información local para avanzar en los estudios de sustentabilidad y la huella ambiental de biocombustibles.

Palabras clave: energía, nitrógeno, sostenibilidad, operaciones, gestión, optimización.

ABSTRACT

Energy use for sugarcane production in Tucuman, Argentina

Sugar cane is globally recognized as one of the most suitable feedstock for bioenergy generation, offering an opportunity to contribute to an improvement of the energy matrix with renewable sources in northwestern Argentina. Considering the influence of the agricultural stage of the crop on sustainability, there is a need to determine the use of energy within bioenergetic systems. The objective of this study was to quantify and analyze the use of energy throughout the agricultural stage of sugar cane. A conventional cultivation system and an optimized system that included modifications in its management and inputs, during a total production cycle of 5 years, in Tucumán (Argentina) was considered. Agronomic practices, inputs and application rates, as well as labor, were considered to estimate the energy consumption required for the production of this feedstock. The main changes introduced were the use of different sources of nitrogen fertilizer, the mechanized plantation of cane fields and the herbicides used. The use of energy per ton of sugarcane in a conventional agronomic management system was 301.7 MJ, while it was 203.4 MJ per t of sugar cane for the optimized agronomic management system. In both cases, the use of fossil fuel during mechanized operations and the use of fertilizers were the main categories of energy consumption. Calcareous ammonium nitrate stands out as one of the relevant options to reduce energy use thanks to the lower energy required for its synthesis and logistics, the required dose of nutrient and its form of application in the field. Defining

Una versión en inglés de parte de los resultados de este trabajo se presentó en el XXX Congreso Internacional de la Caña de Azúcar - ISSCT 2019 (Argentina – 31 de agosto al 8 de septiembre de 2019).

Fecha de recepción:
01/10/2019

Fecha de aceptación:
28/07/2021

two different and widely spread sugarcane cropping systems and quantifying their energy use generated local information to advance sustainability studies and the environmental footprint of biofuel.

Key words: energy, nitrogen, sustainability, operations, management, optimization.

■ INTRODUCCION

En un escenario global de aumento de la demanda energética (con un incremento proyectado del 30% para 2040) y demandas crecientes en el cuidado del medio ambiente, es necesario aumentar la contribución de diversas fuentes de energía renovable y limpia (IEA, 2016). El consumo mundial de energía en 2019, se estima, está compuesto por 88,5% de combustibles fósiles y solo 11,5% por fuentes de energía renovables. Al considerar las emisiones de carbono a la atmósfera generadas por el consumo de energía, se observó un aumento del 1,6% respecto al período anterior (BP Statistical Review of World Energy, 2020).

Sin embargo, existen casos particulares de países como Brasil, que tienen una participación del 43% de las fuentes de energía renovables generadas principalmente por biomasa (bagazo de caña de azúcar y madera) y biocombustibles (etanol) (Pelkmans, 2018). En el caso de Argentina, su matriz energética refleja el patrón global con un 88,5% del consumo de energía basado en fuentes no renovables (Secretaría de Gobierno de Energía de Argentina 2018).

Al analizar los cultivos energéticos, la caña de azúcar es reconocida mundialmente como una de las materias primas más adecuadas para la producción de bioenergía debido a su potencial para producir etanol, fibra y residuos de cosecha que podrían usarse para la generación de energía térmica o eléctrica.

Los análisis del ciclo de vida indican que la caña de azúcar sería altamente competitiva con otros cultivos como materia prima para una industria basada en la biomasa (Seabra *et al.*, 2011). Existe evidencia de que las características agronómicas de un cultivo pueden influir en su desempeño ambiental relativo, considerando la naturaleza y las cantidades de co-productos que pueden derivarse de un cultivo que desplaza a otros productos que otorgan créditos ambientales (Renouf *et al.*, 2008). Además, existen antecedentes locales de análisis de ciclo de vida que destacan un impacto ambiental positivo del cultivo al capturar carbono durante su ciclo de crecimiento y exploran las implicancias del uso de tecnología en la etapa agrícola (Nishihara Hun *et al.*, 2017). Sin embargo, a nivel general se identifica las actividades de la etapa agrícola de la industria sucro-alcoholera como la de mayor contribución al impacto ambiental en la obtención de etanol, influenciado fuertemente por el rendimiento cultural obtenido (Amores *et al.*, 2013).

Es aceptado a nivel global que la fertilización nitrogenada de la caña de azúcar es una práctica fundamental para la obtención de cañaverales de alto rendi-

miento, con registros de incremento de producción a nivel local del 10% al 40% (Romero *et al.*, 2009; Thorburn *et al.*, 2011). La urea es el fertilizante nitrogenado más utilizado mundialmente, pero puede sufrir importantes pérdidas de nitrógeno por volatilización si este no es adecuadamente incorporado en el suelo, además de lixiviación a capas profundas (Mariano *et al.*, 2012).

En búsqueda de lograr un menor impacto ambiental asociado al empleo de fertilizantes, mejorando la eficiencia y la competitividad de la etapa agrícola del cultivo, se realizaron numerosos estudios para mejorar la eficiencia en el uso de nutrientes, desarrollos o estrategias tecnológicas para disminuir la emisión de gases de efecto invernadero en campo gracias tanto a las características propias de los productos como a sus métodos de aplicación (Bentrup, 2009). El nitrato de amonio calcáreo (CAN), evaluado localmente como alternativa para la provisión de N, evidenció un mayor uso de nutrientes y eficiencia agronómica con baja pérdida por volatilización (volatilización acumulada de 1,6% a 2,55%) en relación a otras fuentes de nutriente. Este permite emplear, en el área productiva de Tucumán, una menor dosis de N aplicándola sobre la superficie del suelo. Simultáneamente, en la etapa industrial se han desarrollado nuevas tecnologías para la obtención de fertilizantes con una menor huella de carbono en su proceso (Leggio *et al.*, 2018; EMEP/European Environmental Agency, 2020; YARA, 2016).

La caña de azúcar es uno de los cultivos bioenergéticos más relevantes en la Región Noroeste de Argentina, con más de 378.000 ha plantadas y 19.160.000 t de caña de azúcar producidas por año (FAOSTAT, 2018). La provincia de Tucumán presenta una importante zona cañera de 276.400 ha estimadas en la zafra 2021. La agroindustria de la caña de azúcar es una de las principales actividades socio-económicas de esa provincia, dado que favorece una mayor industrialización, genera un incremento en el número de empleos (principalmente en la época de cosecha) y más de un 47% del valor agregado de sector agropecuario provincial (Fandos *et al.*, 2021; Subsecretaría de Programación Microeconómica, 2018).

Este cultivo se caracteriza por una alta eficiencia fotosintética y productividad, por lo que es considerado una materia prima óptima para la producción de bioetanol al vincularse con la industria azucarera establecida. A nivel provincial, se estima una producción de 15.150.000 t de caña de azúcar y 293.888 m³ de bioetanol en 2019 (Secretaría de Gobierno de Energía de la Argentina, 2019), lo que ha permitido generar un aporte destacable en las estrategias nacionales que persiguen una mayor participación de las energías renovables y la disminución del impacto ambiental a través de la mezcla de las naftas con una fracción

mínima de 5% de bioetanol (Ley 26.093).

Existe además la posibilidad de realizar un aprovechamiento integral de la biomasa del cultivo, ya que este dispone de material celulósico en su composición (bagazo y residuos agrícolas de cosecha) para la producción de biocombustibles sólidos y etanol de segunda generación. Cabe destacar que algunos ingenios producen electricidad a partir del bagazo para su propio consumo, y venden el excedente a la red eléctrica.

Scandaliaris y Alonso (1983) plantean la importancia de producir energía a partir de especies vegetales, definida en gran medida por los costos de los combustibles y por la eficiencia energética del proceso de producción. Sin embargo, el balance energético debe ser positivo, logrando productos de valor energético superior al de los insumos requeridos para producirlo. Para determinar el consumo de energía en el cultivo de caña de azúcar, bajo un sistema de manejo representativo de la época (década de 1980) en la provincia de Tucumán, se consideró una vida útil del cañaveral de seis años, un aporte de N promedio de 82,5 kg/ha/año (empleado urea como fuente nitrogenada) y obteniendo un rendimiento cultural de 60 t/ha de caña neta para molienda. Además, el sistema de cosecha empleado fue semi-mecanizado y la distancia al ingenio fue de 15 km. El valor alcanzado bajo este sistema fue de 249,84 MJ/t caña. Hay que decir que pueden encontrarse grandes variaciones en los requerimientos energéticos para una misma etapa de producción, según la forma en que esta se practique. El consumo de energía determinado en dicho estudio resultó sumamente favorable respecto de otras regiones productoras del mundo como Louisiana (EE.UU.), San Pablo (Brasil) y Taiwán (China).

Posteriormente, Acreche and Valeiro (2013) realizaron estudios para determinar las emisiones de gases de efecto invernadero y balances de energía para la cadena de producción de caña de azúcar y etanol en Tucumán. Para este análisis se consideraron dos sistemas productivos con dos niveles tecnológicos diferentes (bajo y medio/alto). El primero implicó una dosis de 76,5 kg/ha/año de fertilizante nitrogenado, 2 kg/ha/año de herbicidas aplicados, una proporción de cosecha manual de 20% y mecanizada de 80% y un consumo de combustible diésel de 131,4 l/ha/año, variables que generaron un rendimiento cultural de 60 t/ha. En el segundo caso, se utilizó una dosis de 163,9 kg/ha/año de fertilizante nitrogenado, 3,6 kg/ha/año de fertilizante fosforado, 2,4 kg/ha/año de herbicidas aplicados, cosecha mecanizada en su totalidad y un consumo de combustible diesel de 163,9 l/ha/año, con lo que se obtuvo un rendimiento cultural de 68 t/ha. El uso de energía al emplear un nivel tecnológico bajo registrado fue de 227 MJ/t caña, mientras que al usar un nivel tecnológico medio/alto fue de 232,5 MJ/t caña.

Estudios internacionales realizados por Macedo *et al.* (2004), principalmente vinculados al sector sucroacoholero de Brasil, determinan para dos escenarios tecnológicos el uso de energía, siendo de 201,8 MJ/t caña para el nivel tecnológico general y 192,01 MJ/t caña para el mejor nivel tecnológico propuesto. Por su parte, Boddéy *et al.* (2008), al analizar el Programa ProAlcool para la producción de etanol a partir de caña de azúcar en dicho país, reporta un uso de energía de 165,7 MJ/t caña como promedio, considerando las distintas regiones productoras del país.

Considerando la influencia de la etapa agrícola del cultivo sobre la sustentabilidad y la necesidad de determinar el uso de energía dentro de los sistemas bioenergéticos, se planteó como objetivo de este estudio cuantificar y analizar el uso de energía a lo largo de las etapas de producción agrícola de la caña de azúcar, considerando un sistema de cultivo convencional y un sistema optimizado que incluyó diversas modificaciones en su manejo e insumos, durante un ciclo productivo total de cinco años, en la provincia de Tucumán (Argentina).

MATERIALES Y MÉTODOS

Con el fin de cuantificar la energía total de la producción agrícola de caña de azúcar y analizar el uso de esta a lo largo de las tareas involucradas, se empleó un esquema metodológico con una serie de etapas representadas en la Figura 1.

Esquema Metodológico



Figura 1. Etapas para la definición de los sistemas agronómicos empleados y cálculo del uso de energía correspondiente.

En primera instancia, se realizaron encuestas a productores de caña de azúcar y consultas a especialistas sobre el manejo agronómico. Cuando la información no estuvo disponible, se seleccionaron datos de bibliografía competente (Scandaliaris y Alonso, 1983; Romero *et al.*, 2009; Acreche y Valeiro, 2013). Luego se definieron los sistemas de manejo agronómico a considerar como modelos en el presente estudio, identificando dos de ellos en ejecución en el área cañera de la provincia de Tucumán: un sistema convencional y un sistema optimizado. En ambos se consideraron los diversos requisitos de operaciones durante las actividades de cultivo, los insumos y las dosis empleadas en cada caso (Tabla 1). Las etapas involucradas en el sistema de producción fueron: 1) preparación del suelo y semilla, 2) plantación, 3) manejo de cultivo, 4) cosecha y 5) transporte (Figura 2).

Tabla 1. Principales insumos y dosis empleados en los sistemas de manejo de cultivo convencional y optimizado.

Sistema de Manejo			Convencional	Optimizado
Insumos	Etapa de empleo	Unidad	Cantidad	Cantidad
Combustible Diésel	todas	(l/ha/año)	249,00	252,00
Fertilización N	manejo de cultivo	(kg/ha/año)	105,98	60,75
Fertilización P	manejo de cultivo	(kg/ha/año)	8,05	8,05
Herbicidas + Insecticidas	manejo de cultivo	(kg i.a./ha/año)	15,50	2,31
Maquinaria	todas	(kg/ha/año)	136,6	136,6
Caña Semilla	plantación	(t/ha)	11,52	15



Figura 2. Diferentes etapas involucradas en los sistemas de producción propuestos.

El sistema convencional corresponde al mayormente difundido durante el período 2010-2014 y actualmente vigente, con un rendimiento promedio de 60 t de caña/ha. Las consideraciones tecnológicas más relevantes para este implican la plantación manual de los cañaverales, el uso de urea como fuente sintética de N y control químico de malezas con un espectro de herbicidas tradicionales (ametrina, atrazina, MSMA y TCA, entre otros).

El sistema optimizado corresponde a un sistema adoptado en mayor proporción a partir de 2018, teniendo en cuenta mejoras factibles en el manejo agronómico y las labores agrícolas, así como nuevos desarrollos tecnológicos. Los principales cambios se relacionan principalmente con la utilización de la plantación mecanizada y la aplicación de otras alternativas de fertilizantes sintéticos como el nitrato de amonio calcáreo, que permite su aplicación sobre la superficie del suelo. Por último, se consideraron nuevos desarrollos tecnológicos en las opciones de los herbicidas empleados para el control de malezas (indaziflam, isoxaflutole, imazapic e imazapyr, entre otros). En este sistema se logró un mayor rendimiento cultural con un promedio de 76 t de caña/ha.

Cabe destacar que en ambos sistemas se consideraron el empleo de maquinaria para las diferentes labores, el tiempo empleado para el cumplimiento de cada labor y el consumo de combustible diésel resultante (Tabla 1). Se categorizaron, además, las labores según su requerimiento de potencia, utilizándose tractores de 90 a 140 HP para operaciones de cultivo liviano (tales como laboreo de trochas y aplicación superficial de fertilizantes), mientras que los de 160 a 190 HP se usaron para operaciones de cultivo pesado (como subsolado y plantación mecanizada). El sistema de cosecha en verde incluyó una cosechadora integral con un requerimiento de 337 HP, dos tractores de 140 HP y carros auto-volcables de 10 t de capacidad de carga para el transporte dentro del campo. El transporte de caña de azúcar al ingenio fue realizado

por camiones de 350 a 450 HP con 30 t de capacidad de carga, para recorrer una distancia de 60 km en total hasta el ingenio (considerando un traslado ida y vuelta).

Con el propósito de estimar el consumo de energía involucrado en el sistema productivo se consideraron las diferentes operaciones e insumos utilizados en la producción de 1 t de caña de azúcar transportada al ingenio. A cada insumo se asignó un coeficiente que expresa la cantidad de energía necesaria para producir dicho insumo (MJ/kg o t de insumo empleado) para ser posteriormente contabilizado. Los coeficientes empleados fueron determinados a través de bases de datos propias, consultas a especialistas (Pérez, D. en comunicación personal del 5 de junio de 2018), así como de estudios publicados cuando no se contó con información propia o de carácter local (Scandaliaris y Alonso, 1983; Macedo et al, 2004; Skowronska and Filipek, 2014).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La energía total para producir 1 t de caña de azúcar en el sistema de manejo convencional fue 310,7 MJ (Figura 3). El principal consumo de energía en este caso se debió al uso de combustible diésel durante la operación de la maquinaria, registrando 152,4 MJ/t de caña, lo que representó el 49% del uso total de energía. Las operaciones que dominaron el consumo de combustible fueron la cosecha mecanizada y el transporte de materia prima al ingenio, con un 66,8% del consumo de combustible total entre ambas.

El segundo insumo, en orden de relevancia, fue el correspondiente al uso de fertilizantes, involucrando la energía insumida en su producción y la cantidad utilizada en campo, con un valor de 112,7 MJ/t de caña y un 36% del uso total de energía.

Al definir y analizar los cambios tecnológicos y de

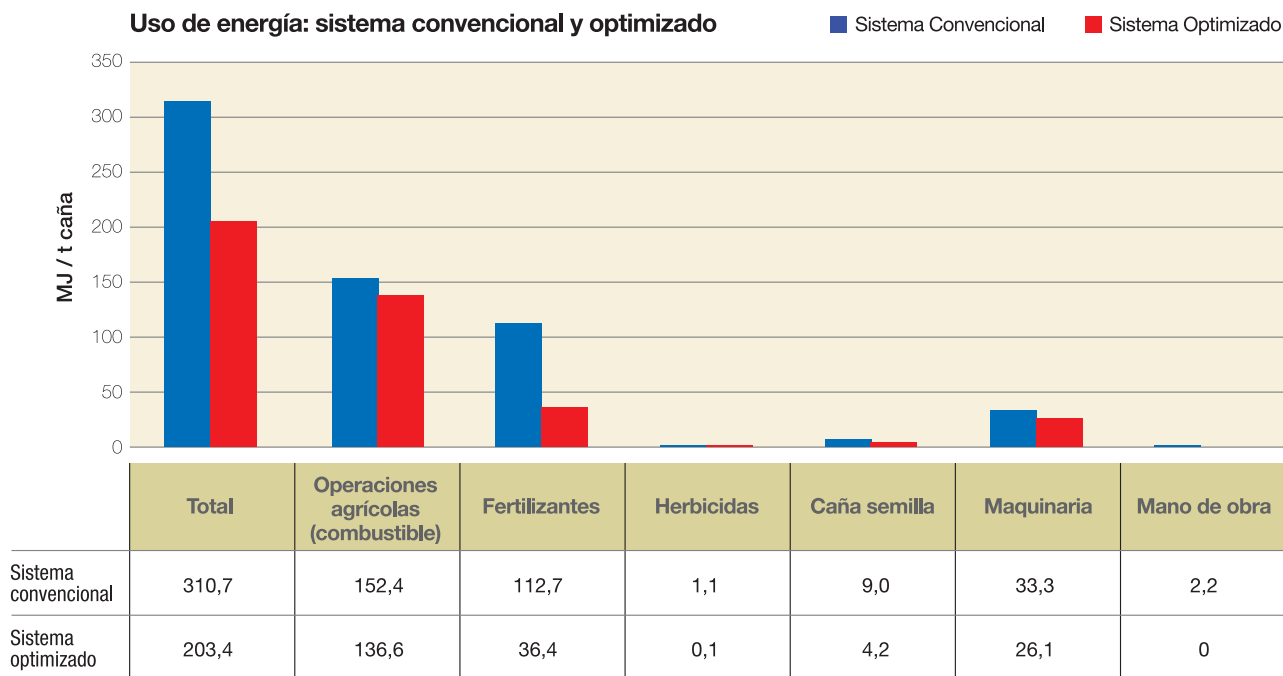


Figura 3. Energía total utilizada para producir 1 t de caña de azúcar incluyendo los principales insumos comprendidos en un sistema de manejo convencional y optimizado.

prácticas culturales en el sistema de manejo optimizado, se logró cuantificar el uso total de energía con un total de 203,4 MJ/t de caña producida (Figura 1). De manera similar al caso anterior, los insumos de mayor influencia sobre el consumo de energía fueron el combustible diésel durante la operación de la maquinaria y el empleo de fertilizantes sintéticos. El valor estimado para el primer insumo fue de 136,6 MJ/t de caña, representando el 67% del uso total de energía del sistema. El segundo insumo registró un valor de 36,4 MJ/t de caña, lo que representó el 17,8% del uso total de energía.

Como se reportó inicialmente, el principal consumo de energía en ambos casos se debió al uso de combustible fósil (diésel) en las operaciones mecanizadas. El análisis permite establecer una disminución de 15,8 MJ/t en el sistema de cultivo optimizado, lo que representó el 5,1% del total de la energía insumida en el sistema convencional. Sin embargo, cambios tecnológicos específicos como el reemplazo de la plantación manual por la plantación mecanizada implicaron un aumento en el uso de combustible. La plantación mecanizada requirió 30,1 MJ/t de caña en esta tarea en particular, mientras que la plantación manual utilizó 25 MJ/t de caña. De manera similar al caso anterior, las operaciones con mayor representación en el consumo de combustible fueron la cosecha mecanizada y el transporte de materia prima al ingenio, con un 71,2% del consumo de combustible total.

La incorporación de cambios asociados al manejo agronómico y la tecnología utilizada permitió generar un sistema de manejo de cultivo optimizado. Uno de los principales cambios en este sistema estuvo asociado a la fuente de N empleado como fertilizante, estimándose una disminución de 76,3 MJ/t de caña al utilizar el nitrato de amonio calcáreo. La comparación de ambos modelos definidos representó una mejora del 24,6% del total de la energía insumida en el sistema convencional.

En el sistema de manejo optimizado, la reduc-

ción de energía total debida al empleo de maquinaria y mano de obra es evidente. El trabajo manual, reemplazado por procesos mecanizados, está asociado a un aumento en el rendimiento cultural del cultivo, lo que genera un menor uso de energía expresada en toneladas de caña producida.

Los cambios en la clase y la dosis de los herbicidas usados generaron una mejora de 1 MJ/t de caña, como resultado de menores cantidades de ingrediente activo. Si bien la contribución en términos de uso de energía total no fue relevante, sí lo fue desde un punto de vista de sustentabilidad ambiental, ya que en el sistema de manejo optimizado se redujo 13,2 kg de i.a./ha respecto del sistema de manejo convencional.

Los resultados obtenidos en este estudio coinciden con las tendencias presentadas en los estudios realizados localmente por Scandaliaris y Alonso (1983) y Acreche y Valeiro (2013), y en investigaciones realizadas en otras regiones productoras de caña de azúcar (Macedo, 2004). Sin embargo, los resultados obtenidos de energía utilizada para producir 1 t de caña de azúcar en el sistema convencional de manejo fueron mayores a los reportados por los autores mencionados. Un aspecto crítico para realizar este tipo de estudios es la escasa disponibilidad de los factores de conversión mencionados a nivel local, por lo que deben adoptarse factores reportados en otras regiones o actividades cuando no fue posible generar los propios.

De los análisis se destaca, y en forma coincidente con los antecedentes citados, la participación sumamente relevante que realizan en el uso de energía los insumos de combustible no renovable (diésel) y el fertilizante nitrogenado. En este sentido, el tipo de fertilizante empleado afecta en múltiples aspectos al uso de energía del cultivo. Esto se verifica a través de la energía requerida para su síntesis y logística: 61,55 MJ/kg N en el caso de la urea (Macedo, 2004) y 42,6 MJ/kg N en el caso del CAN

(Skowronska, 2014); por la dosis de nutriente requerida: 102,7 kg de N/ha.año en el caso de la urea y 60,7 kg de N/ha.año en el caso de CAN; y por su forma de aplicación en campo en base a características propias del producto (movilidad del nutriente, volatilización, etc.): 15 L gasoil/ha para la incorporación de urea en el suelo y 1,92 L gasoil/ha para la aplicación superficial de CAN. Antecedentes locales destacan que el uso de nitrato de amonio calcáreo, en reemplazo de la urea usada tradicionalmente, evidenció un mayor uso de nutrientes y eficiencia agronómica, menores pérdidas de volatilización, permitiendo trabajar con una menor dosis de N (Leggio *et al.*, 2018). Además, se registró una menor demanda de energía para las prácticas de fertilización cuando se utiliza CAN. Gracias a la baja volatilización de este producto, es factible su colocación en la superficie del suelo con equipos de alta capacidad de trabajo y bajos requerimientos de potencia.

Es preciso señalar que al analizar los sistemas de manejo agronómico existe un factor no cuantificable, que es la oportunidad de realización de una determinada práctica o empleo de un insumo. En este sentido, una práctica realizada en tiempo y modo adecuado generará un incremento en el rendimiento cultural mayor al de aquella que haya sido realizada fuera del momento óptimo o en forma inadecuada. Al afectar directamente el rendimiento cultural, afecta el desempeño ambiental del cultivo y por lo tanto el uso de energía en la cadena productiva.

CONCLUSIONES

El consumo total de energía en el sistema de manejo agronómico convencional fue de 310,7 MJ/t de caña, mientras que el sistema optimizado totalizó 203,4 MJ/t caña. La disminución sustancial de 107,3 MJ/t de caña en la energía total utilizada representó una mejora global del 34%, lograda mediante una combinación de factores tecnológicos y de manejo agronómico.

Si bien los resultados evidenciaron tendencias similares a estudios locales previos, los valores registrados en el sistema convencional de manejo fueron mayores a los citados. Estas diferencias podrían estar originadas en los objetivos y alcances de cada estudio, los supuestos considerados en cada análisis y factores de conversión utilizados para transformar las cantidades empleadas de un insumo en términos de energía.

La definición de dos sistemas de manejo agronómico del cultivo de caña de azúcar en la provincia de Tucumán, ampliamente difundidos con su correspondiente estimación y cuantificación del uso de energía, significa un importante avance en los estudios de sustentabilidad bajo condiciones locales. Cabe destacar que este tipo de información no siempre se encuentra adecuadamente documentada o publicada, por lo que este tipo de determinaciones permite proveer información más detallada para diferentes estudios sobre la huella ambiental de cultivos energéticos, biocombustibles y productos derivados.

Este estudio permitió la identificación de “puntos críticos”, donde se pueden realizar aportes o mejoras significativas, como son el empleo de combustible no renovable y el uso de fertilizantes sintéticos. En este sentido, es necesario prestar especial atención a las operaciones de campo, su eficiencia y los requisitos de potencia en

las diferentes labores e implementos utilizados para evitar el uso excesivo de combustible. Con respecto a los fertilizantes, es fundamental una adecuada elección de los mismos, empleando aquellas fuentes con menor huella ambiental, combinándolos con bioproductos siempre que sea posible y aplicando una dosis correcta.

Al considerar sistemas de cultivo que fueron representativos de diferentes momentos (2010-2014 vs. 2018 en adelante), el estudio permitió destacar los principales aportes en los cuales se realizaron mejoras significativas a través de los avances tecnológicos, así como aquellos donde todavía pueden realizarse contribuciones a fin de optimizar los procesos agrícolas.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Acreche M. and A. H. Valeiro. 2013.** Greenhouse gasses emissions and energy balances of a non-vertically integrated sugar and ethanol supply chain: A case study in Argentina. *Energy* 54: 146-154.
- Amores, M. J.; F. D. Mele; L. Jiménez and F. Castells. 2013.** Life cycle assessment of fuel ethanol from sugarcane in Argentina. *International Journal of Life Cycle Assessment* (2013) 18:1344-1357.
- Benrup, F. 2009.** The impact of mineral fertilizers on the carbon footprint of crop production. *The Proceedings of the International Plant Nutrition Colloquium XVI. 2009.* California, Estados Unidos de America.
- Boddey, R. M.; L. E. Soares; B. J. R. Alves and S. Urquiaga. 2008.** Bio-ethanol production in Brazil. En: Pimentel, D. (ed.), *Biofuels, solar and wind as renewable energy systems.* Nueva York, E.E.U.U.. Springer Science. Business Media, pp. 321-356.
- BP Statistical Review of World Energy. 2020.** 69th Edition. BP p.l.c. London, United Kingdom. [En línea] Disponible en : <https://www.bp.com/content/dam/bp/business-sites/en/global/corporate/pdfs/energy-economics/energy-outlook/bp-energy-outlook-2020.pdf> (consultado 08/07/2019).
- EMEP/ European Environment Agency. Air Pollutant Emission Inventory Guidebook 2019.** 2020. Copenhagen, Dinamarca. ISSN 1977-8449. Capítulo 3, pp. 16-17.
- Fandos, C.; J. Scandaliaris; P. Scandaliaris; J. Carreras Baldrés; F. Soria; J. Giardina; J. Fernández de Ullivarri y R. Romero. 2021.** Área cosechable y producción de caña de azúcar y azúcar para la zafra 2021 en Tucumán. *Reporte Agroindustrial* 217. Tucumán, Argentina. ISSN 2346-9102.
- FAOSTAT. 2018.** Food & Agricultural Organization of the United Nations. [En línea] Disponible en: <http://www.fao.org/faostat/en/#data/QC> (consultado 20/06/2019).
- IEA. 2016.** World Energy Outlook 2016. International Energy Agency. Disponible en: <https://www.iea.org/Textbase/npsum/WEO2016SUM.pdf> (consultado 20/06/2019).
- Leggio Neme, M. F.; L. G. Alonso; P. G. Fernández González; B. Luque; D. Quintana; V. Paredes y E. R. Romero. 2018.** Evaluación del nitrato de amonio calcáreo como fertilizante nitrogenado en caña de azúcar en Tucumán, Argentina. *Memorias del XI*

- Congreso ATALAC - TECNICAÑA – 2018. Cali, Colombia.
- Macedo, I. C.; M. R. Lima Verde Leal and E. J. Azevedo Ramos da Silva. 2004.** Assessment of greenhouse gas emissions in the production and use of fuel ethanol in Brazil. 33 Assessment of greenhouse gas emissions in the production and use of fuel ethanol in Brazil. Government of the State of São Paulo. [En línea] Disponible en: <https://www.wilsoncenter.org/sites/default/files/brazil.unicamp.macedo.greenhousegas.pdf> (consultado 23/06/2019).
- Mariano, E.; P. C. O. Trivelin; M. X. Vieira-Megda; J. M. Leite; R. Otto and H. C. J. Franco. 2012.** Ammonia losses estimated by an open collector from urea applied to sugarcane straw. *Rev Bras Cienc Solo* 36:411–419.
- Nishihara Hun, A.; F. D. Mele and G. A. Pérez. 2017.** A comparative life cycle assessment of the sugarcane value chain in the province of Tucumán (Argentina) considering different technology levels. *Int J Life Cycle Assess* 22: 502–515.
- Pelkmans, L. 2018.** International Energy Agency (IEA), Brazil – 2018 updates. IEA Bioenergy Country Reports. International Energy Agency. [En línea] Disponible en: https://www.ieabioenergy.com/wpcontent/uploads/2018/10/CountryReport2018_Brazil_final.pdf (consultado 24/06/2019).
- Renouf, M. A.; M. K. Wegener and L. K. Nielsen. 2008.** An environmental life cycle assessment comparing Australian sugarcane with US corn and UK sugar beet as producers of sugars for fermentation. *Bio-mass and Bioenergy*. 32: 1144– 1155.
- Romero, E. R.; P. Digonzelli y J. Scandaliaris. 2009.** Manual del Cañero. Las Talitas, Tucumán, Argentina: Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombes.
- Scandaliaris, J. y J. Alonso. 1983.** Insumos Energéticos en el cultivo de la caña de azúcar. *Boletín E.E.A.O.C.* No. 145:1-13.
- Seabra, J. E. A.; I. C. Macedo; H. L. Chum; C. E. Faroni and C. A. Sarto. 2011.** Modeling and Analysis: Life cycle assessment of Brazilian sugarcane products. *Biofuels, Bioproducts & Biorefining*. 5: 519–532.
- Secretaría de Gobierno de Energía - Ministerio de Hacienda (Argentina). 2018.** Balance Energético Nacional de la República Argentina 2017. [En línea] Disponible en: <http://www.energia.gob.ar/contenidos/verpagina.php?idpagina=3366> (consultado 25/06/2019).
- Skowrońska, M. and T. Filipek. 2014.** Life cycle assessment of fertilizers: a review. *Int. Agrophys.* 28: 101-110.
- Subsecretaría de Programación Microeconómica - Ministerio de Hacienda (Argentina) 2018.** Informes de Cadenas de Valor Azucarera. pp. 31.
- Thorburn, P. J.; J. S. Biggs; S. J. Webster and I. M. Biggs. 2011.** An improved way to determine nitrogen fertiliser requirements of sugarcane crops to meet global environmental challenges. *Plant and Soil* 339: 51-67.
- Yara Bela Nitrodoble. 2016.** Manual de uso en caña. Yara Argentina S.A. C.A.B.A. - Argentina, pp. 10-11