



Revista Industrial
y Agrícola de
Tucumán

ISSN 0370-5404

En línea
1851-3018

Tomo 100 (1):
3-10; 2023



ESTACION EXPERIMENTAL
AGROINDUSTRIAL
OBISPO COLOMBRES
Tucumán | Argentina

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

Análisis de la productividad energética del sorgo fibroso

M. Carolina Cruz*, Sergio Casen**, Guillermo De Boeck* y Dora Paz*

*Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales, **Sección Caña de Azúcar EEAOC. Email: ccruz@eeaoc.org.ar

RESUMEN

En este trabajo se analiza en primer lugar, la energía que se consume o es insumida al realizar las actividades de logística del sorgo fibroso, desde que es sembrado hasta su combustión en una caldera bagacera, y luego se determina su productividad energética (PE). La PE es la razón entre la cantidad de energía producida y la cantidad de energía insumida en el proceso de obtención del combustible. Para determinar la PE del sorgo fibroso como combustible se analizaron los consumos de gasoil insumidos en las etapas de siembra, el aporte de agroinsumos, la cosecha con máquina para corte y picado de forrajes, el transporte a la fábrica, la carga y alimentación a la caldera bagacera y la energía producida en la posterior combustión. De este modo se determinó que la energía insumida por el sorgo fibroso en todo el proceso fue de 20.428,2 GJ (gigajoule); y la producida por su combustión, de 473.420 GJ, lográndose una PE de 23,2 GJ. Si comparamos este valor con el obtenido para el residuo agrícola de cosecha (RAC) de caña de azúcar, igual a 21,96GJ, se puede decir que la PE del sorgo fibroso calculada es un valor alentador para considerarlo una alternativa para sumar a la matriz energética renovable.

Palabras clave: sorgo fibroso, biocombustible, productividad energética.

ABSTRACT

Analysis of fibrous sorghum energy productivity

This paper first analyzes the energy consumed in the logistic activities from sowing to the combustion of fiber sorghum in order to determine, in a further step, its energy productivity (EP). EP is defined as a ratio between the amount of energy delivered during combustion and the energy consumed in the obtention process per unit of biofuel. To determine the fiber sorghum EP as a biofuel, diesel fuel consumption of sowing, agrochemical products application, harvesting using a cutting-chopping machine, factory transportation, bagasse boiler feeding, and biomass combustion stages were considered. Using this methodology, the energy consumed by the fiber sorghum from sowing to feeding the biomass boiler was 20,428.2 GJ and the energy delivered by biomass combustion was 473,420 GJ, resulting in an EP value of 23.2. Comparing the calculated EP value with the EP value of 21.96 for the harvested sugarcane residue (HSR), it can be concluded that the EP of fiber sorghum is an encouraging value to be considered as new alternative biomass within the renewable energy matrix.

Key words: fibrous sorghum, biofuel, energy productivity.

Fecha de
recepción:
16/10/2019

Fecha de
aceptación:
27/09/2022

INTRODUCCIÓN

En los últimos años se ha generado un creciente interés en la producción de energía a partir de biomasa vegetal como una opción sustentable frente a la utilización de combustibles fósiles, ya que es un recurso abundante, produce bajas emisiones de CO₂ y es de bajo costo. Además, en el año 2016, la biomasa ocupó el cuarto lugar en el consumo total de energía del mundo, precedida por el carbón, el petróleo y el gas natural (Wang *et al.*, 2016).

Hoy en día la producción de biocombustibles a partir de biomasa como recurso energético renovable es muy importante, ya que se trata de un recurso limpio que interrelaciona el cuidado del medio ambiente, las actividades económicas, los manejos agrícolas y el desarrollo rural. Por otro lado, el avance de biocombustibles a partir de cultivos energéticos juega un papel fundamental en la mejora de la economía mundial y la reducción del cambio climático global (Koçarand Civaş, 2013).

La producción de energía a partir de la biomasa pretende, lógicamente utilizar en primer lugar aquellas biomasa residuales que no están destinadas a otros usos; pero dado que este recurso es insuficiente, se plantea también la utilización de cultivos específicamente desarrollados para la producción de energía (IDAE, 2009).

Los cultivos energéticos son generalmente plantaciones comerciales de árboles o plantas cultivadas con el fin específico de producir energía. Los cultivos energéticos sólidos (cardo, sorgo, tuna, maíz integral, alpiste, miscanto, sauce, álamo y eucalipto, entre otros) se pueden utilizar enteros para producir calor y electricidad, ya sea directamente a través de la combustión; o de manera indirecta, a través de la conversión para ser usados como biocombustibles (Sims *et al.*, 2006).

Entre los cultivos energéticos adaptados a condiciones agroecológicas desfavorables se encuentra el sorgo (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) tipo silero (Figura 1), que posee entre sus características más importantes una alta producción de biomasa y un buen nivel en contenido de fibras; por ello se lo llama fibroso o de alta fibra (Casen *et al.*, 2020). Presenta como ventaja que requiere escasos recursos agroclimáticos para la obtención de altos rindes culturales y se adapta a tierras marginales con problemas de napas freáticas o salinidad, ayudando y favoreciendo la recuperación de suelos degradados. Adicionalmente a los beneficios agronómicos, este cultivo ayuda a ampliar la oferta energética de la región (Fernández González y Sánchez Ducca, 2012).

El desarrollo de cultivos energéticos como el

sorgo fibroso y otros similares suele ir acompañado del desarrollo paralelo de la correspondiente industria de transformación de la biomasa producida en biocombustible (Idea & BESEL, 2007).

Existe un indicador de gran utilidad conocido como productividad energética (PE), cuyo concepto se comenzó a definir décadas atrás (Murphy and Charles, 2010). La PE es la razón entre la energía producida y la cantidad de energía insumida en el proceso de obtención del combustible.

En tal sentido se debe procurar que la energía consumida en las etapas de producción y transporte de un combustible sea la menor posible, para que su balance energético, es decir la energía neta que deja disponible, sea mayor. (Golato y Cárdenas., 2012).

En este trabajo se plantea calcular la PE del sorgo fibroso analizando las actividades de industrialización necesarias para considerarlo como un combustible renovable alternativo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El esquema con la logística del procesamiento del sorgo fibroso que se tuvo en cuenta para calcular el consumo de gasoil está representado en la Figura 2, y comprende las etapas de siembra, aplicación de agroinsumos, cosecha con máquina para cortado y picado de forraje, transporte en camiones al ingenio, carga y alimentación; y la posterior combustión del material en una caldera bagacera.

El consumo de gasoil correspondiente al manejo agronómico (siembra, cosecha y aplicación de agroquími-



Figura 1. Sorgo fibroso de tipo silero.

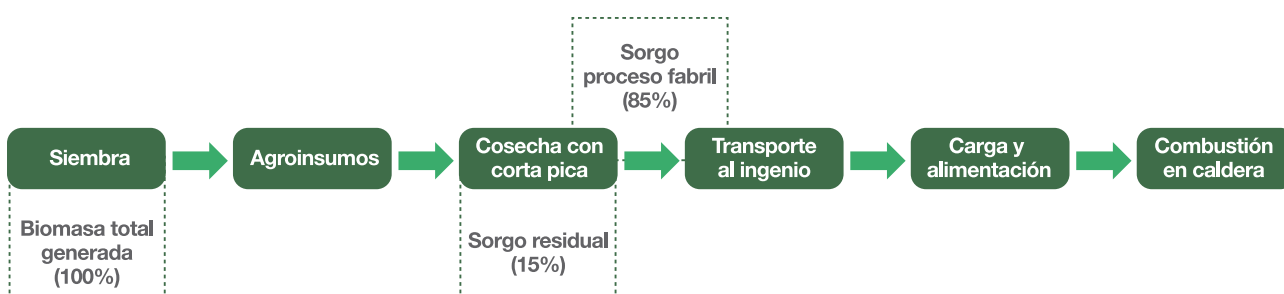


Figura 2. Esquema de logística del sorgo fibroso.

cos) se consideró para la masa vegetal total generada en el campo, consistente en la biomasa transportada y recibida en fábrica, que representa el 85% del total de biomasa vegetal generada, y la materia vegetal residual que permanece sobre el suelo luego de la cosecha.

Logística

Los volúmenes de combustible consumido en cada etapa que conforma la logística de manejo agronómico y transporte del sorgo fibroso fueron calculados tomando como base los resultados de disponibilidad y requerimientos de biomasa para el proceso fábril fuera de zafra, tal como lo plantean Cruz *et al.* (2020) y según se detalla en la Tabla 1.

Tabla 1. Datos obtenidos del artículo de Cruz *et al.* (2020), donde w=humedad del sorgo.

Datos de Cruz <i>et al.</i> (2020)	Unidades	Valor
Superficie efectiva de sorgo fibroso requerido para el proceso fábril	[ha]	979,6
Sorgo fibroso requerido para el proceso fábril. Gs (w=30%)	[t/d]	303,2
Toneladas de sorgo transportadas a fábrica. Gt(w=30%)	[t]	45.490
Rendimiento cultural del sorgo fibroso (w=30%)	[t/ha]	46,5
Energía de combustión entregada por el sorgo fibroso	[GJ]	473.420
Eficiencia de recolección en cosecha (η)	%	85

Siembra

El consumo de combustible adoptado para esta etapa es el informado por Donato (2013), correspondiente a 13,5 litros de gasoil por hectárea de sorgo bajo técnica de cultivo de siembra directa. El consumo en litros se calcula mediante la Ecuación (1):

Ecuación 1

$$GASOIL_{siembra}(l) = Cons. esp. \left[\frac{l}{ha} \right] * Sup. ef. sorgo [ha] / \eta cosecha$$

GASOIL_{siembra}: cantidad de combustible que se consume en la siembra, en litros.

Cons. esp.: consumo específico de gasoil por hectárea, valor= 13,5 l/ha.

Sup. ef. sorgo: superficie efectiva de sorgo requerida.

η cosecha: eficiencia de recolección en cosecha.

Aplicación de agroinsumos

Los datos de consumos de gasoil empleados en la aplicación de herbicidas en barbecho, en pre-emergente e insecticidas, fueron provistos por técnicos de la EEAOC, a partir de experiencias realizadas en la localidad de Graneros, Tucumán (Tabla 2). Cabe aclarar que en este análisis no se considera la energía consumida en la producción de cada herbicida e insecticida; solo se determinó el gasto de gasoil que ocasionó la máquina pulverizadora para su aplicación.

Tabla 2. Consumo de gasoil ocasionado por la aplicación de agroquímicos en las etapas de barbecho, pre emergente y post cosecha.

Aplicación de agroinsumos	Consumo específico
Herbicidas (En barbecho)	0,8 [l/ha]
Herbicidas (Pre-emergente)	0,8 [l/ha]
Insecticidas	0,8 [l/ha]

Ecuación 2

$$GASOIL_{agr.}(l) = N^{\circ} de aplic. * Cons. esp. \left[\frac{l}{ha} \right] * Sup. ef. sorgo [ha] / \eta cosecha$$

GASOIL_{agr.}: cantidad de combustible que se consume en la aplicación de agroinsumos, en litros.

N° de aplic.: número de aplicaciones.

Cons. esp.: consumo específico de gasoil por ha=0,8 l/ha

Sup. ef. sorgo: superficie de sorgo requerido.

η cosecha: eficiencia de recolección en cosecha.

No se consideraron las actividades de riego, ni la aplicación de fertilizantes en el manejo agronómico del sorgo fibroso, puesto que el propósito de incorporar este cultivo energético se basa en favorecer la sustentabilidad del mismo en términos de aprovechamiento energético.

Cosecha

De acuerdo a lo reportado por May *et al.* (2013), con los materiales genéticos existentes en la actualidad se sugiere que la cosecha de sorgo puede realizarse con una humedad del 50% de masa vegetal. El consumo de combustible en esta etapa se calculó utilizando los datos aportados por el fabricante de la máquina autopropulsada diseñada para el corte y picado de forrajes utilizada por Belo de Oliveira (2016). Se trata de una New Holland Modelo FR 9060, con potencia 500 HP (Figura 3).



Figura 3. Cosechadora autopropulsada New Holland. Belo de Oliveira (2016).

Con este tipo de máquina existente en el mercado se puede lograr cortar y picar el sorgo hasta una granulometría de 5 mm, tamaño similar al bagazo de caña de azúcar y al RAC.

El consumo de gasoil de 204,45 l/ha se determina con un rendimiento cultural de 65,1 t/ha de sorgo al 50% (Casen *et al.*, 2015); y con el consumo específico de combustible por tonelada de sorgo cosechado de 3,14 l/t (Belo de Oliveira, 2016).

Ecuación 3

$$GASOILcosecha(l) = Cons.esp. \left[\frac{l}{ha} \right] * Sup.ef.sorgo [ha]/\eta cosecha$$

GASOILcosecha: cantidad de combustible que se consume en la cosecha, en litros.
 Cons. esp.: consumo específico de gasoil, valor= 204,45 l/ha.
 Sup. ef. sorgo: superficie de sorgo requerida.
 η cosecha: eficiencia de recolección en cosecha.

Transporte

Se adopta para los cálculos de consumo de combustible en esta etapa, el transporte en camiones hasta el ingenio de la masa vegetal cosechada a un 50% de humedad con sistema corte y pica hasta una granulometría de aproximadamente 5 mm.

Se consideró un radio de 25 km como distancia media recorrida por los camiones para el transporte de la biomasa, tomando como centro el ingenio. Este radio adoptado es un valor promedio que generalmente se aplica para la evaluación del costo operativo de transporte durante el período de zafra de la caña de azúcar (Olea *et al.*, 1992).

En el cálculo de gasoil que se consume en esta etapa, se tomó como referencia un consumo específico de 0,7 litros por km, informado por Golato *et al.* (2012), considerando un camión con acoplado, con motor turbo cooler de 269 kW a 1900 rpm, según curva de desempeño del motor (Mercedes-Benz, 2010).

La cantidad de biomasa de sorgo cosechada y transportada a granel en camiones desde el campo al ingenio se calculó tomando como referencia el trabajo de Feijóo (2020), donde se determinó que un camión de 30 m³ puede transportar entre 70 y 90 kg/m³ (densidad aparente) de biomasa de RAC cosechados (con la misma máquina para corte y picado utilizada para la cosecha de sorgo) y con una humedad del 15%. Siendo que en este trabajo se considera el transporte de material con 50% de humedad, la rectificación de la carga transportada a granel por camiones se calculó mediante la Ecuación (4):

Ecuación 4

$$G(w=50\%) = da(w=15\%) * \frac{xsol(w=15\%)}{xsol(w=50\%)} * Vol.$$

Donde:
 G (w=50%): carga de sorgo por camión al 50% de humedad, en toneladas.
 da (w=15%): densidad aparente de biomasa de RAC por camión al 15% de humedad, en kg/m³, valor=70 kg/m³
 xsol (w=15%): contenido de sólidos en la biomasa al 15% de humedad.
 xsol (w=50%): contenido de sólidos en la biomasa al 50% de humedad.
 Vol: volumen del camión, valor = 30 m³

La cantidad total de biomasa de sorgo al 50% de humedad que debe ser cosechado y transportado se calculó a través de un balance de sólidos en base a la demanda de biomasa al 30% de humedad que fija el proceso industrial Tabla 1, mediante la Ecuación 5.

Ecuación 5

$$Gt(w=50\%) = Gt(w=30\%) * 0,7/0,5$$

En base a las toneladas de material a transportar en camión por viaje G(w=50%), la cantidad total de biomasa de sorgo que demanda el proceso fabril Gt (w=50%) y los kilómetros que debe recorrer el camión, se calculó, mediante las ecuaciones 6 y 7, la cantidad de viajes que deben realizarse y el combustible que se consume durante el transporte:

Ecuación 6

$$Cvc = \frac{Gt(w=50\%)}{G(w=50\%)}$$

Ecuación 7

$$GASOILtransporte = Cons. esp. * Cvc * K$$

Donde:
 GASOILtransporte: cantidad de combustible que se consume en el transporte, en litros.
 Cons. esp.: consumo específico de gas oil, en l/km, informado por Golato *et al.* (2012), valor=0,7.
 Cvc: cantidad de viajes que debe realizar el camión.
 K: distancia que debe recorrer el camión ida y vuelta, en km.

Carga y alimentación

Siendo que la materia vegetal transportada llega al ingenio con un contenido de humedad del 50%, se considera que la biomasa recibida se almacenará en pilas en un playón en las inmediaciones del ingenio para que se produzca el secado natural a cielo abierto hasta una humedad del 30%. Se asume dos meses como tiempo necesario para secar el sorgo fibroso hasta el 30% de humedad, sujeto a las condiciones climáticas reinantes durante ese período (Francescato *et al.*, 2012). Transcurrido este periodo, el sorgo cortado y picado se supone listo para su carga y alimentación a la caldera.

Para el cálculo de la cantidad de combustible que insume esta tarea se tuvo en cuenta que la actividad de carga y alimentación a la caldera se realiza con una pala cargadora marca Liu Gong CLG 835, con capacidad del balde de 1,7 m³, una carga de 3000 kg, peso operativo de 10.900, potencia nominal de 92 kW y un consumo de combustible de 224 g/kwh.

En la Figura 4 se observa el trabajo de la pala cargadora.

El consumo de gasoil para las tareas de movimiento de la biomasa y carga a la tolva de alimentación de rastras a calderas para los 150 días de operación fue calculado determinando primeramente el número de cargas de la pala cargadora, el tiempo de cada carga, el factor de carga y el consumo de gasoil por operación de la pala cargadora.

Ecuación 8

$$N^{\circ} \text{ de cargas} = Gs/Carga$$

Ecuación 9

$$tc = dr/vt$$

Ecuación 10

$$Fc = (1+0,725)/2$$

Ecuación 11

$$Ccop. = (Cc * Pot.Nom. * tc * Fc)/d$$

Ecuación 12

$$GASOIL_{cya} = Ccop. * N^{\circ} \text{ de cargas} * \text{días de operación}$$

Donde:

GASOIL_{cya}: consumo de gasoil para carga y alimentación, en litros.

Nº de cargas: número de cargas totales que debe realizar la pala.

Gs: cantidad de sorgo a procesar, en t/d.

Carga: peso que puede soportar la pala, en toneladas, valor=3t.

tc: tiempo de carga, en segundos.

vt: velocidad del tractor, valor=8,5 km/h.

dr: distancia recorrida, se asume 0,5 km.

Fc: factor de carga

d: densidad del gas oil, valor=0,8176 kg/l

Pot.Nom: potencia nominal de la pala cargadora, valor=92 kW

Cc: consumo de combustible, g/kwh, valor=22,4.

Ccop: consumo de combustible por operación, en litros.

Días de operación: 150 días.



Figura 4. Carga y alimentación a la caldera.

Los volúmenes de gasoil consumidos en cada una de las actividades fueron transformados en unidades energéticas utilizando la Ecuación (14):

Ecuación 14

$$E (KJ) = \text{Gasoil (l)} * d \left[\frac{kg}{l} \right] * PCI \left[\frac{kJ}{kg} \right]$$

Donde:

d: densidad de gasoil, valor=0,8176 kg/l

PCI: poder calorífico inferior del gasoil, valor = 42636 kJ/kg

En la Figura 4 se observa un esquema representativo de las operaciones de logística del sorgo fibroso.

Los parámetros operativos de la pala cargadora adoptados para los cálculos fueron velocidad de circulación promedio (vt) de 8,5 km/h y distancia recorrida media de ida y vuelta (dr) de 0,5 km.

Energía insumida versus energía producida

Para el cálculo de la PE, definida como la razón entre la energía producida y la cantidad de energía insumida en el proceso, se utilizó la Ecuación (13).

Ecuación 13

$$P.E = \frac{\text{Energía producida}}{\text{Energía insumida}}$$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Siembra directa

El consumo de gasoil calculado de la Ecuación (1) para la etapa de siembra resultó de 15.558,3 litros.

Ecuación 1

$$GASOIL_{siembra} = 13,5 \frac{l}{ha} * 979,6 ha / 0,85$$

$$GASOIL_{siembra} = 15.558,3 l$$



Figura 5. Logística de manejo y recolección del sorgo fibroso

Aplicación de agroinsumos

El consumo de gasoil para la aplicación de los agroinsumos considerados en la Ecuación (2) resultó de 2765,9 litros.

Ecuación 2

$$GASOIL_{agr.}(l) = 3 * 0,8 \frac{l}{ha} * \frac{979,6 ha}{0,85}$$

$$GASOIL_{agr.}(l) = 2.765,9 l$$

Cosecha

El consumo de gasoil para la cosecha de sorgo fibroso calculado de la Ecuación (3) resultó de 235.622,6 litros, utilizando una máquina cosechadora autopropulsada corta y pica.

Ecuación 3

$$GASOIL_{cosecha}(l) = 204,45 \left[\frac{l}{ha} \right] * 979,6 [ha] / 0,85$$

$$GASOIL_{cosecha}(l) = 235.622,6 l$$

Transporte

La cantidad de biomasa al 50% de humedad que transporta cada camión por viaje se calculó mediante la Ecuación (4) y resultó de 3,57 toneladas por viaje.

Ecuación 4

$$G(w=50\%) = (70kg/m^3 * 0,85/0,5) * 30m^3/1000kg$$

$$G(w=50\%) = 3,57 t/viaje$$

Las toneladas de sorgo totales al 50% de humedad que deben transportarse, calculadas mediante la Ecuación (5) en base a los requerimientos del proceso de biomasa al 30% de humedad, resultó de 63.686 t.

Ecuación 5

$$Gt(w=50\%) = (45.490(t) * 0,7) / 0,5$$

$$Gt(w=50\%) = 63.686(t)$$

De las Ecuaciones (6) y (7) se obtuvo el número de viajes necesarios y combustible consumido total para transportar las toneladas de sorgo fibroso al 50% que se requieren en la planta industrial, obteniéndose un valor de 17.839 viajes y 312.182,5 litros de gasoil.

Ecuación 6

$$C_{VC} = \frac{63.686(t)}{3,57 \left(\frac{t}{viaje} \right)} \quad C_{VC} = 17.839 \text{ viajes}$$

Ecuación 7

$$GASOIL_{transporte} = 0,7 \left(\frac{l}{km} \right) * 17.839 * 25(km)$$

$$GASOIL_{transporte} = 312.182,5(l)$$

Carga y alimentación

Los valores obtenidos de número de cargas diarias, tiempo de carga y factor de carga, calculados mediante las Ecuaciones (8), (9) y (10), resultaron en 101,08 cargas por día, 0,06 horas y 0,862 respectivamente.

Ecuación 8

$$N^{\circ} \text{ de cargas} = 303,26 \left(\frac{t}{d} \right) / 3(t/carga)$$

$$N^{\circ} \text{ de cargas} = 101,08 \left(\frac{cargas}{d} \right)$$

Se considera directamente un valor de 102 cargas por día.

Ecuación 9

$$tc = 0,5(km) / 8,5 \left(\frac{km}{h} \right)$$

$$tc = 0,06(h)$$

Ecuación 10

$$F_c = (1 + 0,725) / 2$$

$$F_c = 0,862$$

El consumo de combustible de la pala cargadora por operación determinado a través de la Ecuación (11) resultó en 1,30 litros.

Ecuación 11

$$C_{Cop.} = [224(g/kWh) * 92(kW) * 0,06(h) * 0,862] / (0,81768(g/ml) * 1.000)$$

$$C_{cop.} = 1,30(l)$$

Luego, el consumo de combustible total para el manejo de toda la materia vegetal determinado a través de la Ecuación (12) resultó en 19.890 litros.

Ecuación 12

$$GASOIL_{cya} = 1,30(l) * 102 \left(\frac{cargas}{d} \right) * 150(d)$$

$$GASOIL_{cya} = 19.890(l)$$

En la Tabla 3 se presentan los valores obtenidos de consumos de gasoil para cada etapa de logística de sorgo analizada y la energía que se insume en cada etapa, calculada con la Ecuación 14.

Tabla 3. Consumo de gasoil, energía insumida para cada etapa analizada y energía producida por el sorgo fibroso.

Etapa	Consumo de gasoil [l]	Energía insumida [GJ]	Energía producida [GJ]
Aplicación de agroquímicos	2765,9	96,42	-
Siembra directa	15.558,4	542,4	-
Cosecha	235.622,6	8213,6	-
Transporte	312.182,5	10.882,4	-
Carga y alimentación	19.890,0	693,3	-
Combustión	-	-	473.420,0
Total	586.019,4	20.428,2	473.420,0

Energía insumida versus energía producida

La productividad energética obtenida de la Ecuación (13) resulta en un valor de 23,2.

Ecuación 13

$$P.E = \frac{473\,420, (GJ)}{20\,428,2 (GJ)} \quad P.E = 23,2$$

Este valor de PE obtenido indica que la energía que entrega el sorgo fibroso cuando se quema en una caldera para las condiciones dadas es 23,2 veces mayor que la energía que requiere para las actividades en campo y fábrica evaluadas. En otras palabras, por cada unidad de energía invertida se obtienen 23,2 unidades de energía producida.

En el caso del cálculo de la productividad energética del residuo agrícola de cosecha (RAC), determinado por Feijóo et al. (2020), se obtuvo un valor de 21,96.

Otros autores, como Ren *et al.* (2012), estudiaron la productividad energética del sorgo azucarado, algodón y trigo, obteniendo valores tales como 12,3; 3,1 y 8,3, respectivamente. López-Sandin *et al.* (2019) obtuvieron valores de productividad energética del sorgo azucarado de entre 15,11 y 18,68. En todos los casos citados, los valores son siempre inferiores, comparados con el obtenido por el sorgo fibroso; sin embargo están en el rango 10-32 mencionado por Venturi and Venturi (2003).

La mayor productividad energética del sorgo fibroso reportada en este artículo con respecto a las obtenidas por Ren *et al.* (2012), y por Lopez-Sandin *et al.* (2019), puede deberse a que el sorgo azucarado presenta menor contenido de fibra en los tallos (menor contenido de biomasa aprovechable para bioenergía); en cambio, el sorgo fibroso presenta un 100% de biomasa aprovechable para uso energético para el mismo manejo agronómico y logística de aprovechamiento industrial. También pueden influir los distintos sistemas para la logística que se tuvieron en cuenta para el estudio, condición agronómica, productividad del cultivo, poder calorífico, etc.

Para las tareas de logística del manejo de este tipo de cultivos se recomienda el uso de energías renovables en vez de las provenientes de origen fósil, ya que

cualquier entrada de energía de fuente no renovable causa efectos negativos en la sostenibilidad de producción de cultivos bioenergéticos. Por lo tanto, se tiende a fomentar la investigación y desarrollo para reducir las emisiones de GEI y mejorar la seguridad bioenergética (Ren *et al.*, 2012).

Tucumán cuenta con un potencial de 24.700,8 ha de tierra para el cultivo del sorgo fibroso (Cruz *et al.*, 2020), de lo cual se utilizaría solo el 3,96% para llevar a cabo este proyecto que podría funcionar en interzafra azucarera. El 96,03% restante podría utilizarse para abastecer la demanda actual de combustible durante la zafra azucarera y cítrica. Sin embargo, antes de lanzar una producción comercial de sorgo fibroso se necesita una evaluación más exhaustiva de la viabilidad y sostenibilidad del proyecto.

CONCLUSIONES

La energía producida estimada por el sorgo fibroso resultó 23,2 veces mayor que la energía insumida en los procesos que se tuvieron en cuenta para el análisis. Si bien una parte de la información utilizada para el cálculo de este indicador fueron obtenidas en diferentes condiciones a las locales, se evidencia la factibilidad de este tipo de fuente de biomasa con fines bioenergéticos.

Con esta propuesta se lograría incluir en la matriz energética un nuevo combustible de origen renovable, logrando activar la economía circular, ya que se complementa con la zafra azucarera, se utilizan la infraestructura y equipamiento disponibles en ingenios de la región y se reemplaza un combustible de origen fósil por uno de origen renovable, apostando a la sustentabilidad del sistema.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Belo de Oliveira, N. O. 2016.** O uso do sorgo biomassa para cogeração: aspectos técnicos e econômicos. São Paulo. Brasil.
- Casen, S. D.; P. Fernández González; G. De Boeck; J. Tonatto; M. Medina y E.R. Romero. 2015.** Estudio del comportamiento de híbridos de alta fibra de sorgo para su utilización en la cogeneración de energía. Congreso Nacional de Maíz y Sorgo realizado por AIAMBA, Pergamino, Bs. As.
- Casen, S. D.; E. R. Romero; P. Fernández González y G. De Boeck. 2020.** Sorgo fibroso para la producción de bioenergía. Revista Avance Agroindustrial. 41 (3): 20-24.
- Cruz, M. C.; G. De Boeck y D. Paz. 2020.** Estudio preliminar del aprovechamiento de sorgo fibroso como combustible para abastecer energéticamente a un ingenio durante la interzafra en Tucumán. Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán 97(1): 43-50
- Donato, L. B. 2013.** Estimación del consumo potencial de gasoil para las tareas agrícolas, transporte y secado de granos en el sector agropecuario. INTA. Castelar – Buenos Aires. [En línea] Disponible en <http://inta.gob.ar/personas/donato.lidia>. (consultado el 29 de enero de 2020).
- Feijóo, E. 2020.** Análisis de diferentes opciones logísticas para el uso de los residuos agrícolas de la caña de azúcar con fines energéticos en la provincia de

Tucumán. Trabajo Integrador de la Especialización en Ingeniería Bioenergética. Universidad Tecnológica Nacional. Tucumán, Argentina.

Fernández González, P. y A. Sánchez Ducca. 2012. Análisis del sorgo fibroso como cultivo alternativo para la obtención bioenergía. II Simposio Nacional de sorgo realizado por AIAMBA, Pergamino, Bs. As.

Francescato, V.; E. Antonini and L. Zuccoli Bercomi. 2012. Biomass Trade Centre II - EU. Manual de Combustibles de Madera. [En línea] Disponible en www.biomassstradecentre2.eu/scripts/download.php?file=/data/pdf (consultado el 5 de marzo de 2020).

Golato, M. A. y G. Cárdenas. 2012. Consumo de combustible y energía en el transporte de biodiesel. *Avance Agroindustrial* 33 (1): 39-42.

Idae. 2009. Biomasa – Ahorro y eficiencia energética en los Cultivos Energéticos y Agricultura. [En línea] Disponible en http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_biomasa_cultivos_energeticos_07_4bd9c8e7.pdf (consultado el 25 de marzo de 2020).

Idae y BESEL SA. 2007. Biomasa – Cultivos Energéticos. [En línea]. Disponible en http://www.idae.es/uploads/documentos/documentos_10737_biomasa_cultivos_energeticos_07_4bd9c8e7.pdf (consultado el 25 de marzo de 2020).

Koçar and Civaş. 2013. An overview of biofuels from energy crops: Current status and future prospects. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 28.900-916.

López-Sandín, I; G. Gutiérrez-Soto; A. Gutiérrez Diez; N. Medina Herrera; E. Gutierrez-Castorena and F. Savala-García. 2019. Evaluation of the use of Energy in the Production of Sweet Sorghum (Sorghum

Bicolor (L.) Moench) Under Different Production Systems. Departamento de Mecánica Aplicada, Facultad de Ciencias Técnicas, Universidad de Ciego de Ávila, Cuba. *Energies* 12 (9), 1713. doi. [org/10.3390/en12091713](https://doi.org/10.3390/en12091713)

May, A.; D. D. da Silva e F. C. dos Santos. Embrapa. 2013. Cultivo do sorgo biomassa para cogeneración de energía eléctrica. ISSN 1518-4277.

Mercedes-Benz. 2010. Catálogo de camión Extra-Pesado L1634/51. [En línea] Disponible en: http://www.automotoresmega.com.ar/imagenesmega/vehiculos_1_1634.pdf (consultado 12 agosto de 2020)

Murphy, D. J. and A. S. H. Charles. 2010. Year in review—EROI or energy return on (energy) invested. *Ann. N.Y. Acad. Sci.* 1185: 102–118.

Olea, I.; E. Romero; F. Pérez Zamora y C. González Terán. 1992. Transporte de la caña de azúcar en Tucumán. Reunión Técnica realizada por la EEAOC. *Miscelánea* 95: 13-27.

Ren, L. T.; Z. X. Liu; T. Y. Wei and G. H. Xie. 2012. Evaluation of energy input and output of sweet sorghum grown as a bioenergy crop on coastal saline-alkali land. *Energy* 47: 166–173.

Sims, R. H.; A. Hastings; B. Schlamadinger; G. Taylor y P. Smith. 2006. Cultivos energéticos: estado actual y perspectivas de futuro. *Global Change Biology* 12 (11), pp. 2054 – 2076.

Venturi, P. and G. Venturi. 2003. Analysis of energy comparison for crops in European agricultural systems. *Biomass Bioenergy* 25: 235–255.

Wang, R.; J. Zhang; H. Kang and L. Zhang. 2016. Design, preparation and properties of bio-based elastomer composites aiming at engineering applications. *Composites Science and Technology* 133: 136–156.