



Revista Industrial
y Agrícola de
Tucumán

ISSN 0370-5404

Tomo 101 (2) | 2024



ESTACION EXPERIMENTAL
AGROINDUSTRIAL
OBISPO COLOMBRES
Tucumán | Argentina



Autoridades EEAOC

Presidente

Ing. Agr. Roberto Sánchez Loria

Vicepresidente

Lic. Sebastián Budeguer

Vocales

Ing. Agr. José Ignacio Lobo Viaña

Ing. Agr. Francisco J. Estrada

Dn. Luis Fernando Umana

Dn. Pablo José Padilla

Dn. Juan Carlos Crovella

Dn. José Antonio Linares

Mg. Lic. Catalina Rocchia Ferro

Ing. Bernabé Oscar Alzabé

Director Técnico

Dr. Hernán Salas López

Directores Asistentes:

Tecnología Agropecuaria

Dr. Santiago Ostengo

Tecnología Industrial

Ing. Qco. Roberto Marcelo Ruiz

Administración y Servicios

C.P.N. Mariana Barraquero

Recursos Humanos

Lic. José D. Rodríguez Domato

Editor Responsable

Dr. Hernán Salas López

Editora de contenidos

Dra. Francisca Perera

Comisión asesora

Dra. Andrea Peña

Ing. Federico Franck Colombres

Responsable Técnico OJS

Ing. Jorge Poch

Ing. C. Filippone

Arte, diseño y diagramación

Diego Lobo

Corrección

Prof. en Letras Ernesto Klass

Difusión

D.G. Silvio César Salmoiraghi

Coordinadora de Publicaciones

Ing. Agr. Victoria González



Revista Industrial
y Agrícola de
Tucumán

Tomo 101 (2):
2024

ISSN
0370-5404

En línea
1851-3018

EEAOC

| | Pag |
|---|-----|
| Comparación de dos alternativas para el tratamiento de vinazas generadas en la producción de alcohol de caña de azúcar | 5 |
| Recompresión de vapor como alternativa de ahorro de agua en los condensadores barométricos de un ingenio azucarero | 13 |
| Emisiones de gases de efecto invernadero de prácticas agrícolas en caña de azúcar, Tucumán, Argentina | 21 |
| Variación de las temperaturas de fusión de cenizas de bagazo y residuos de cosecha de la caña de azúcar de Tucumán, Argentina en función de sus componentes mayoritarios | 29 |
| Desarrollo y optimización de un método de Digestión Húmeda para estudio de la calidad industrial de caña de azúcar | 35 |
| La RT-PCR como metodología para el diagnóstico del viroide del enanismo de los cítricos y del viroide de la curvatura de la hoja de los cítricos en el Noroeste Argentino | 45 |



ESTACION EXPERIMENTAL
AGROINDUSTRIAL
OBISPO COLOMBRES
Tucumán | Argentina



Av. William Cross 3150
T4101XAC | Las Talitas
Tucumán | Argentina
Tel: (54 381) 452 1000
Fax: (54 381) 452 1008
direcc@eeaoc.org.ar
www.eeaoc.org.ar



Agradecimiento Revisores

RIAT 101 (2) - 2024

Ing. Emilia Iñigo

University of Burgos - International Research Center
in Critical Raw Materials for Advanced Industrial
Technologies (ICCRAM) - Centro de I+D+I

Dr. Ing. Waldir A. Bizzo

Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de
Engenharia Mecânica. Campinas, SP, BR

Ing. Agr. Beatriz Stein

Consultor privado

Ing. Luis Pastorino

Universidad Nacional de Tucumán - Facultad de
Ciencias Exactas - Departamento de Mecánica

Dr. Ing. Agr. Emiliano Jozami

Universidad Nacional de Rosario - Facultad de
Ciencias Agrarias

Dra. Aida ben Altabef

Instituto de Investigaciones Químicas del Noroeste
Argentino (INQUINOA) / CONICET / UNT



Revista Industrial
y Agrícola de
Tucumán

ISSN 0370-5404

En línea
1851-3018

Tomo 101 (2):
5-12; 2024



ESTACION EXPERIMENTAL
AGROINDUSTRIAL
OBISPO COLOMBRES
Tucumán | Argentina

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

Comparación de dos alternativas para el tratamiento de vinazas generadas en la producción de alcohol de caña de azúcar

Norma Eliana Soledad Medina*; Romina Salazar** y Eugenio Quaia*

* Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC); ** Instituto Nacional de Tecnología Industrial (INTI).
Email: smedina@eeaoc.org.ar

RESUMEN

La importancia que actualmente tienen los temas energéticos en el mundo obliga a la búsqueda permanente de opciones energéticas y ambientales a los combustibles derivados de hidrocarburos. El bioetanol, producido con eficiencia y sustentabilidad, es capaz de responder a la urgente necesidad de reducir las emisiones de gases de efecto invernadero, mejorar la calidad del aire y competir en precio con las energías convencionales de origen no renovables. Sin embargo, esta alternativa a los combustibles fósiles trae consigo el grave problema de la generación de efluentes como la vinaza. El objetivo de este trabajo fue comparar dos alternativas de producción de energía y biofertilizantes, mediante aprovechamiento de las vinazas generadas por la industria sucro-alcoholera en la provincia de Tucumán. Estas alternativas fueron: concentrar Vinazas y generar Biogás en ambos casos como combustibles para generación eléctrica. Del estudio realizado surge que podría producirse energía eléctrica con una potencia de 2,288 MW y obtener 18,829 tn/día de cenizas ricas en potasio a partir de la concentración y combustión de vinaza o se podrían generar 57 389 m³ biogás/día, para producir energía eléctrica con una potencia de 1,756 MW y 265,2 tn/día de biofertilizante líquido rico en potasio y nitrógeno, mediante la biodigestión y concentración de la misma. Se determinó que ambas alternativas, permitirían aprovechar energéticamente la vinaza. Además, presentan ventajas para su disposición final, lo que haría posible que esta se realice de una forma más segura. A su vez, ofrecen la posibilidad de recuperar los nutrientes de la vinaza.

Palabras clave: Bioetanol, biofertilizante, biogás.

ABSTRACT

Comparison between two alternatives to the treatment of vinasse generated in the sugarcane alcohol production

The importance that all energy issues have nowadays around the world, forces to permanently search for environmental energy options to fuels derived from hydrocarbons. Bioethanol, produced in an efficient and sustainable way, is capable of responding to the urgent need to reduce the greenhouse effect emissions, to improve the quality of the air and to compete on price with conventional energies from non-renewable source. However, this alternative to fossil fuels implies a serious problem of the generation of effluents as the vinasse. The aim of this research was to compare two alternatives of energy and biofertilizers production, through harnessing the vinasse generated by the sugar-alcohol industry in the province of Tucuman. Those alternatives were: to concentrate vinasse and to generate biogas, in both cases as fuels for power generation. It was determined that both alternatives would allow to take advantage of the vinasse, energetically. Moreover, they have advantages for its final disposal, which would make it possible this is done in a safer way. In turn, they offer the possibility to recover the vinasse nutrients. The study suggests that energy could be generated at a power output of 2,288 MW and obtain 18,819 tn/day of ashes high in potassium from the vinasse concentration and combustion or it could be generated 57 389 m³ biogas/day to generate energy at a power output of 1,756 MW and 265,2 tn/day of liquid biofertilizer high in potassium and nitrogen, through its biodigestive work and concentration.

It was determined that both alternatives would allow for the energy recovery of vinasse. In addition, they offer advantages for its final disposal, making it possible to carry it out in a safer manner. Furthermore, they provide the possibility of recovering the nutrients present in the vinasse.

Key words: Bioethanol, biofertilizers, biogas.

Fecha de
recepción:
04/10/2024

Fecha de
aceptación:
22/05/2025

INTRODUCCIÓN

En los últimos dos siglos, la energía se ha convertido en un bien indispensable para llevar a cabo casi la totalidad de las actividades personales y productivas. El desarrollo económico y las exigencias del consumo mundial impulsan una demanda creciente y constante de generación de energía. Sin embargo, los recursos utilizados, en su gran mayoría de origen fósil y no renovable son finitos y tienen un límite que pronto será alcanzado. De acuerdo con el British Petroleum Statistical Review, en el año 2022 los combustibles fósiles representaron el mayor recurso energético utilizado en el mundo, donde el petróleo contabilizó más del 30% del consumo primario. El carbón ocupó el segundo lugar, seguido por el gas natural.

En Argentina en el año 2020, de acuerdo a datos publicados por el Ministerio de Energía y Minería de la Nación (MINEM), las fuentes fósiles representaron el 90% de la producción total de energía primaria. De los datos anteriores se puede observar que existe una gran dependencia, tanto a nivel mundial como a nivel país, de los combustibles fósiles, lo cual está llevando al mundo a una difícil situación energética.

Las fuentes de petróleo descubiertas hace 40 años, son la base de la producción mundial actual de dicho combustible, y a pesar de que la búsqueda continúa, el apogeo del descubrimiento de petróleo fue entre 1950 y 1980 lo que sugiere que la mayor parte del petróleo ya se ha encontrado.

Por otro lado, es de suma importancia encontrar una solución para la elevada liberación al ambiente de los llamados Gases de Efecto Invernadero (GEI), los cuales provocan un aumento de la temperatura terrestre que trae como consecuencia cambios en las condiciones climáticas del mundo provocando una serie de fenómenos naturales extremos como sequías, olas de calor, inundaciones, tornados y temporales.

La concentración atmosférica de estos GEI se está incrementando continuamente, debido fundamentalmente a las cantidades de dióxido de carbono (el principal aportante de los GEI) que se libera en la quema de combustibles fósiles en el transporte, en procesos industriales y en la generación de energía eléctrica, como así también por cambios en el uso agrícola del suelo, la deforestación y procesos naturales, como la descomposición de la materia vegetal.

Estos motivos han potenciado el interés por las llamadas Energías Alternativas, que son aquellas que, a diferencia de las convencionales, usan como fuente de generación recursos renovables. Entre ellas se encuentra la biomasa, término que se refiere a toda materia orgánica originada en un proceso biológico que puede ser utilizado como fuente de energía. Dentro de este grupo se encuentran los llamados cultivos energéticos a partir de los cuales se pueden obtener combustibles líquidos.

En la actualidad los procesos más destacados para la producción de biocombustibles a partir de biomasa son la esterificación y transesterificación de aceites vegetales para la obtención de biodiesel; los procesos bioquímicos o fermentativos para la obtención de biogás y etanol; y los procesos termoquímicos de conversión (combustión, pirólisis, gasificación, licuefacción) principalmente para obtener calor, combustibles, etc. (Sukumar *et al.*,

2015).

El bioetanol en general se produce a partir de materias primas azucaradas como la caña de azúcar, la remolacha o el sorgo azucarado; o de materias primas amiláceas como el maíz.

En Tucumán el bioetanol es producido en destilerías anexas a ingenios azucareros que utilizan principalmente mieles residuales del proceso de fabricación de azúcar como materia prima.

Dentro del proceso de producción del etanol, la fuente principal de generación de efluentes es la etapa de destilación, en la que se producen grandes volúmenes de un efluente marrón oscuro, conocido como vinaza. La cantidad producida de vinaza en las destilerías de caña de azúcar se encuentra en el rango de 10 a 15 litros por cada litro de alcohol producido (Ortiz y Erazzú, 2019) y posee una alta carga contaminante.

En general, siempre se ha pensado en como disponer las vinazas tratando de minimizar su impacto ambiental y el costo asociado. En este trabajo el objetivo fue analizar dos formas de tratamiento de vinazas generadas en la industria de la caña de azúcar: concentración y combustión versus biodigestión y concentración, y determinar mediante los balances correspondientes las ventajas de los productos y energía resultantes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se analizaron los dos métodos propuestos para el tratamiento de vinaza (Concentración y combustión y Biodigestión y concentración) con el fin de determinar las cantidades y calidades de los productos que se generan. En ambos casos se consideró una planta que produce 100.000 litros de alcohol por día. Teniendo en cuenta que por cada litro de alcohol producido se generan 13 litros de vinaza, el caudal de la misma a tratar se estableció en 1.300.000 litros por día. Además, se tomó un valor inicial de sólidos de 11°Bx y se fijó un valor final de los mismos en 60°Bx.

Concentración y combustión de vinaza

En primer lugar, se estudió la concentración de la vinaza con la posterior quema de la misma en caldera. En la Figura 1 se presenta un esquema del proceso. En este caso, para resolver el sistema de evaporación, se utilizó el software SICOVIN, desarrollado por Díaz *et al.* (2013), que permite predecir el desarrollo del proceso real mediante su representación a través de un modelo matemático basado en la formulación de balances de materia y energía y la transferencia global de calor en el sistema, junto con el uso de ecuaciones empíricas que modelan las propiedades de la vinaza.

De acuerdo a lo establecido por Díaz *et al.* (2013), para el planteo de los balances de materia y energía, se consideró lo siguiente:

- El proceso opera en estado estacionario.
- El soluto es no volátil y todos los sólidos disueltos son transportados por la corriente de salida; es decir que el vapor vegetal no arrastra sólidos.
- No hay subenfriamiento de los condensados.

- Se emplea vapor saturado para la calefacción.
- Los vapores vegetales sobrecalentados pierden calor en las cañerías, por lo que se asume que salen saturados.
- No hay pérdidas de vapor en la condensación de los vapores utilizados para calentamiento.
- Hay pérdidas por radiación en la transferencia de calor desde el vapor de calefacción al líquido a concentrar.
- La vinaza ingresa al primer efecto a la temperatura de saturación de este.

Para realizar la simulación se consideró una presión de vapor de escape de 2,40 atm, la presión en el último efecto de 0,25 atm y una presión atmosférica de 0,96 atm.

Como se estableció anteriormente, la vinaza que sale de la etapa de evaporación tiene una concentración de 60°Bx. Ésta se utilizaría para la producción de energía a partir de la quema de la misma en calderas. El proceso de combustión se inicia con un combustible tradicional, en este caso bagazo, calentando la caldera hasta alcanzar una temperatura adecuada. Se inyecta luego la vinaza de 60°Bx, reduciéndose gradualmente la cantidad de combustible convencional, hasta que quede operando solo con vinaza como combustible (Perera, 2009).

Para determinar la cantidad de vapor generado por la caldera se tuvo en cuenta la Ecuación 1, de rendimiento de la misma:

Ecuación 1

$$\eta = \frac{\text{calor generado}}{\text{calor teórico}} = \frac{G_v \cdot (H_v - H_a)}{G_{\text{vin}60^\circ} \cdot \text{PCI}_{\text{vin}60^\circ}}$$

Donde:
 η: rendimiento de caldera considerado como 75% (Franck, 2011).
 G_v: caudal de vapor generado en caldera.
 H_v: entalpia de vapor.
 H_a: entalpia de agua.
 G_{vin60°}: caudal de vinaza 60°Bx.
 PCI_{vin60°}: Poder calorífico inferior de la vinaza 60°Bx.

Los valores de entalpias de agua y vapor se extrajeron de tablas teniendo en cuenta los siguientes datos aportados por técnicos de la EEAOC (comunicación

personal): T_{agua} = 106°C; T_{vapor} = 400°C; P_{vapor} = 42 bar. Las entalpías del vapor y del agua fueron entonces 768 kcal/kg y 101 033 kcal/kg respectivamente.

El PCI de la vinaza a 60°Bx se calculó a partir de la Ecuación 2 (Feijóo *et al.*, 2015):

Ecuación 2

$$PCI = PCS \cdot (1 - w) - 2442 \cdot E$$

Donde:
 PCS [kJ/kg de combustible seco] = poder calorífico superior en base seca.
 PCI [kJ/kg de combustible] = poder calorífico inferior en base húmeda (b.h.).
 w [kg agua/kg combustible] = contenido de agua del combustible
 H [kJ H₂/kg de combustible seco libre de ceniza] = contenido de hidrógeno en la materia seca libre de ceniza.
 Cz [kg de ceniza/kg de combustible seco] = contenido de ceniza de la materia seca.

El valor de E (cantidad de agua en los gases de combustión) de la Ecuación 2, se calcula a partir de la Ecuación 3 en [kg agua/kg de combustible]:

Ecuación 3

$$E = 9 \cdot H \cdot (1 - C_z) \cdot (1 - w) + w$$

Entonces, reemplazando en la Ecuación 2, la misma quedó de la siguiente forma:

Ecuación 4

$$PCI \text{ [kJ/kg]} = PCS \cdot (1 - w) - 2442 \cdot x$$

$$[9 \cdot H \cdot (1 - C_z) \cdot (1 - w) + w]$$

Los valores de PCS, H y Cz son 13 301 kJ/kg, 5,2% y 34,65% respectivamente (Zamora *et al.*, 2019).

Para determinar la cantidad de energía generada en este método, se debe conocer el consumo específico de la turbina, que es la cantidad de energía que esta pue-

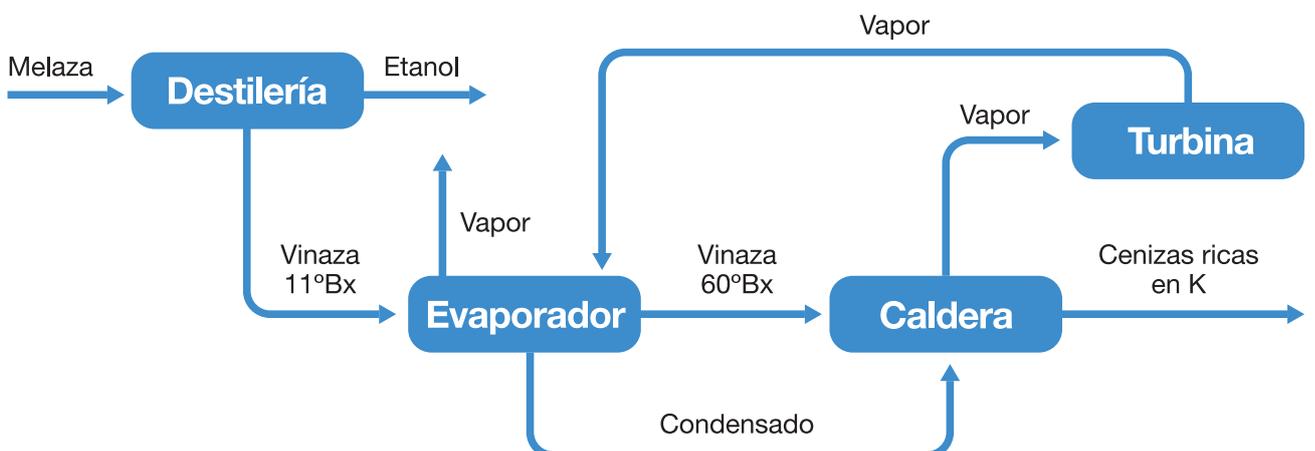


Figura 1. Esquema de un sistema de evaporación de la vinaza con posterior quema en caldera.

de generar a partir de un determinado caudal de vapor. Teniendo en cuenta una presión de 42 bar y una temperatura de 400°C, el consumo específico se determinó en 7,8 kg vapor/kWh (Alderetes, 2016).

Una vez que la vinaza es quemada en la caldera, se obtienen, además del vapor, cenizas ricas en K. Para calcular la cantidad generada del mismo se consideró que este se mantiene sin pérdidas durante el proceso. Para los cálculos se tuvieron en cuenta, el caudal de vinaza que ingresa al sistema de evaporación y la concentración de K en esta corriente, la cual se tomó como 1,42% (Perera, 2009).

Tratamiento biológico anaeróbico. Biodigestión de vinaza con producción de biogás

En segundo lugar, se estudió la biodigestión de vinaza con producción de biogás. En este caso, la vinaza ingresa primero a un reactor anaeróbico UASB, obteniéndose biogás que es enviado a la caldera para la produc-

ción de vapor. La vinaza que sale del reactor, se envía a evaporadores para reducir su volumen.

En la Figura 2 se puede observar un esquema del proceso.

Para el estudio del reactor UASB se utilizó un valor de DQO de entrada (DQO_{e1}) de 120 000 g/m³, dato aportado por el sector de Medio Ambiente de la Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales de la Estación Experimental Agroindustrial de Tucumán.

El esquema de trabajo que se tomó en cuenta para realizar los cálculos correspondientes es el que se presenta en la Figura 3.

Como puede observarse, la vinaza que proviene de destilería presenta un valor de DQO muy elevado ($DQO_{e1} = 120\ 000\ g/m^3$). La velocidad de la etapa de metanogénesis en el reactor es mucho menor que la velocidad de la etapa de acidogénesis, por lo que, al ingresar una vinaza con elevado DQO, se puede producir la acidificación del reactor con la posterior disminución o muerte de los microorganismos que se encuentran en el mismo, ya que

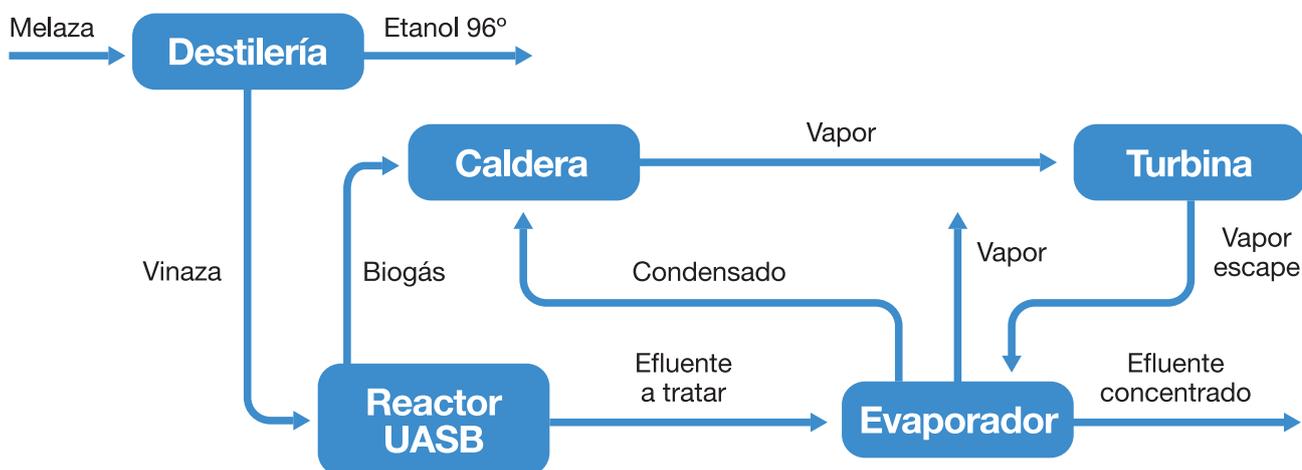


Figura 2. Esquema de un sistema de evaporación de la vinaza de cinco efectos previamente tratada en un reactor anaeróbico y con quema en caldera del biogás.

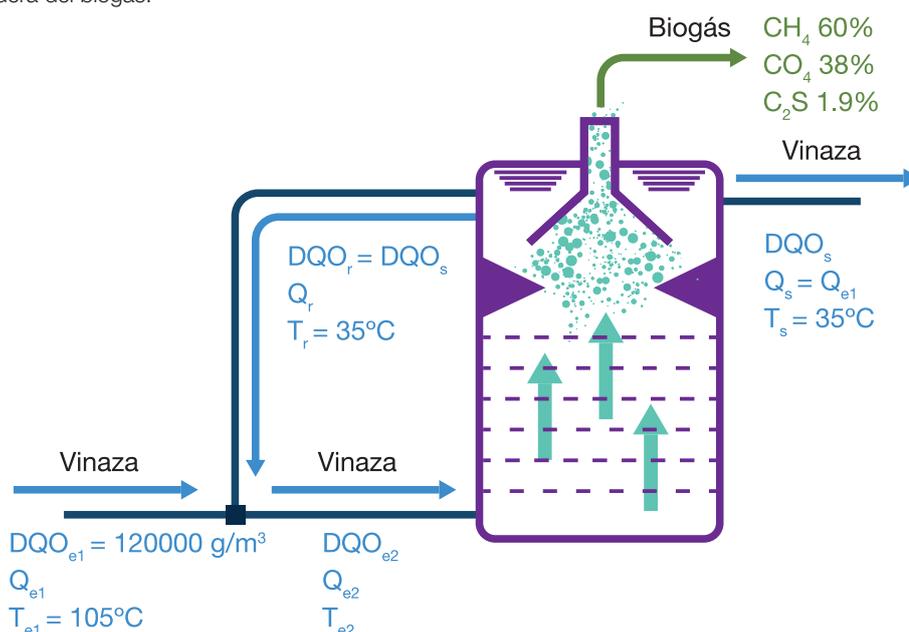


Figura 3. Esquema reactor UASB utilizado para los cálculos.

el pH adecuado para la operación es de 7, aproximadamente. Por ello, se hace necesario colocar un reciclo que permita disminuir el valor del DQO de entrada (DQO_{e1}). Además, con este reciclo se consigue también modificar el pH de la corriente de entrada (la vinaza sale de la destilería con pH bajo, entre 4 y 5) y enfriar dicha corriente hasta la temperatura del reactor.

En este caso se consideraron 5 reactores con un rendimiento individual (η_R) del 75% (Molina *et al.*, 2020), por lo que, el caudal de vinaza a tratar en cada uno de ellos (Q_{e1}) fue de 10,83 m³/h.

La cantidad de biogás producido se obtuvo en función de la cantidad de DQO removido, de acuerdo a la Ecuación 5:

Ecuación 5

$$Q_{BIOGAS} = (DQO_{e1} * Q_{e1} - DQO_s * Q_s) * P_{BG}$$

Donde:

Q_{BIOGAS} : Caudal de biogás producido [m³/d].

DQO_{e1} : Demanda química de oxígeno en vinaza que llega de destilería [g/m³].

DQO_s : Demanda química de oxígeno en vinaza que sale del reactor [g/m³].

Q_{e1} : Caudal de vinaza a tratar [m³/h].

Q_s : Caudal de vinaza tratada [m³/h].

P_{BG} : Cantidad de biogás producido por kg de DQO removido [m³ Biogás/kg DQO_{REMOVIDO}].

El valor de DQO de salida (DQOs) se calculó teniendo en cuenta el rendimiento de cada reactor de acuerdo a la Ecuación 6:

Ecuación 6

$$DQO_s = DQO_{e1} - (DQO_{e1} * \eta_R)$$

Donde:

DQO_{e1} : Demanda química de oxígeno en vinaza que llega de destilería [g/m³].

DQO_s : Demanda química de oxígeno en vinaza que sale del reactor [g/m³].

η_R : Rendimiento del reactor, fijado en 75%, Molina *et al.* (2020)

En cuanto al valor de P_{BG} se adoptó en 0,5 m³ Biogás/kg DQO removido, (Elia Neto y Shintaku, 2009).

Conocido P_{BG} y DQO_s , se calculó la producción de biogás (Q_{BIOGAS}) con la Ecuación 5.

La capacidad de producción diaria de una planta de 5 reactores será entonces:

Ecuación 7

$$Q_{TOTALBIOGAS} = Q_{BIOGAS} * 5 * 24 \frac{h}{d}$$

El biogás obtenido se utilizaría como combustible en la caldera para la posterior generación de energía. Para ello, es necesario eliminar el H₂S del mismo ya que su combustión produce SO₂, gas muy tóxico, corrosivo y for-

mador de las lluvias ácidas. En este trabajo se consideró el método de purificación del biogás a partir de pellets de óxido de hierro con una eficiencia de limpieza del 99,98% (Betzabet Morero, 2014). Con este dato, y teniendo en cuenta que el biogás tiene un 1,9% de H₂S (Leme y Seabra, 2017), fue posible calcular la cantidad total de biogás que ingresará a la caldera de acuerdo a:

Ecuación 8

$$Q_{BG} = Q_{TOTALBIOGAS} * (1 - 0,019)$$

Para determinar la cantidad de vapor generado en la caldera en este caso, se utilizó la Ecuación 9, que se presenta a continuación:

Ecuación 9

$$\eta = \frac{\text{calor generado}}{\text{calor teórico}} = \frac{G_v * (H_v - H_a)}{G_{biogás} * PCI_{biogás}}$$

En este caso, se usa para biogás el correspondiente flujo de gas calculado para el reactor propuesto (Q_{BG}) y el PCI del mismo, siendo éste de 5095,6 kcal/m³ (Salomon, 2011), valor adoptado en este trabajo.

Una vez calculado el caudal de vapor generado en la caldera utilizando el biogás, se utilizó nuevamente al valor del consumo específico de vapor para determinar la cantidad de energía generada en este caso.

En cuanto a la vinaza obtenida como producto de la biodigestión, se la sometió a un proceso de evaporación en un sistema múltiple efecto como el utilizado para el caso de evaporación y combustión. Para resolver este sistema se utilizó nuevamente el software SICOVIN.

RESULTADOS

Concentración y combustión de vinaza

Los resultados obtenidos con SICOVIN para un caudal de vinaza de 1300 m³ y 11°Bx, se muestran en la Tabla 1.

Analizando los resultados obtenidos, se observa la necesidad de 9562,52 kg/h de vapor de calefacción, obteniéndose un caudal de 10 128,24 kg/h de vinaza concentrada a 60°Bx y de 10 003,47 kg/h de vapor del último efecto.

Luego de realizar la simulación, se procedió a calcular la cantidad de vapor que se generaría en la caldera al usar la vinaza concentrada como combustible. Para ello, se calculó en primer lugar el PCI de la vinaza 60 el cual resultó en 1566,85 kcal/kg.

A partir de este valor se calculó el caudal de vapor generado en calderas que resultó en 17 843,23 kg/h.

Luego se calculó la potencia de salida a partir de este método, la cual resultó en 2,288 MW.

En cuanto a la cantidad de K obtenida en el proceso, se calculó en 18 829 kg/día.

Tabla 1. Resultados de la simulación realizada con el software SICOVIN con sistema de evaporación de 5 efectos.

| Parámetro | Unidad | 1er Efecto | 2do Efecto | 3er Efecto | 4to Efecto | 5to Efecto |
|---------------------|--------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Caudal Entrada | kg/h | 55250 | 47336,8 | 38798,69 | 29707,93 | 20131,71 |
| Caudal Salida | kg/h | 47336,8 | 38798,69 | 29707,93 | 20131,71 | 10128,24 |
| Brix entrada | % | 11 | 12,84 | 15,66 | 20,46 | 30,19 |
| Brix salida | % | 12,84 | 15,66 | 20,46 | 30,19 | 60,01 |
| Caudal vapor | kg/h | 7913,2 | 8538,11 | 9090,77 | 9576,22 | 10003,47 |
| Caudal vapor calef. | kg/h | 9562,52 | 7913,2 | 8538,11 | 9090,77 | 9576,22 |

Biodigestión de vinaza con producción de biogás

En el caso de la biodigestión se calculó en primer lugar la DQO de salida del reactor (DQOs). Este valor resultó en 30 000 g/m³.

Conocidos P_{BG} y DQO_s, se calculó la producción de biogás:

$$Q_{BIOGAS} = \frac{120000g/m^3 - 30000g/m^3}{1000g/Kg} * 10,83 \frac{m^3}{h} * 0,5 \frac{m^3}{Kg}$$

$$Q_{BIOGAS} = 487,5 \frac{m^3}{h}$$

La capacidad de producción diaria de una planta de 5 reactores será entonces:

$$Q_{TOTALBIOGAS} = 487,5 \frac{m^3}{h} * 5 * 24 \frac{h}{d}$$

$$Q_{TOTALBIOGAS} = 58500 \frac{m^3}{d}$$

Luego, teniendo en cuenta que el H₂S representa el 1,9% del biogás, el total del mismo que ingresará a la

caldera resultó en 57 388,72 m³/día.

El caudal de vapor obtenido en caldera a partir del biogás resultó en 13 700 kg/h.

La potencia en este caso fue de 1,756 MW.

La vinaza obtenida en el reactor, fue sometida también a un proceso de evaporación con el fin de disminuir su volumen. Los resultados obtenidos en este caso se muestran a continuación en la Tabla 2.

Analizando los resultados obtenidos, se observa la necesidad de 15 702 kg/h de vapor escape, obteniéndose un caudal de aproximadamente 265,2 tn/día de vinaza concentrada a 60°Bx, la cual puede comercializarse como biofertilizante líquido rico en potasio.

A continuación, se presenta la Tabla 3 con un resumen de los resultados obtenidos para cada método propuesto. Cabe aclarar que en este trabajo no se tuvo en cuenta el condensado que resulta de la evaporación de la vinaza, cuyo tratamiento puede ser abordado en posteriores trabajos de investigación.

Se puede observar que en el método de concentración y combustión se obtienen 0,532 MW más que en el caso de biodigestión.

En cuanto al vapor disponible para el proceso, se puede observar que para el primer caso existe un excedente de 8281 kg/h que podría usarse en diferentes partes del proceso, mientras que, para el caso de biodigestión, se tiene un valor de -2000 kg/h, lo que implicaría que el vapor generado a partir del biogás no es suficiente para concentrar toda la vinaza proveniente de la destilería.

Tabla 2. Resultados de la simulación con SICOVIN para un sistema de evaporación de 5 efectos, caso Biodigestión.

| Parámetro | Unidad | 1er Efecto | 2do Efecto | 3er Efecto | 4to Efecto | 5to Efecto |
|---------------------|--------|------------|------------|------------|------------|------------|
| Caudal Entrada | kg/h | 55250 | 47603,22 | 39284,58 | 30374,73 | 20945,14 |
| Caudal Salida | kg/h | 47603,22 | 39284,58 | 30374,73 | 20945,14 | 11048,9 |
| Brix entrada | % | 8 | 9,29 | 11,25 | 14,55 | 21,1 |
| Brix salida | % | 9,29 | 11,25 | 14,55 | 21,1 | 40 |
| Caudal vapor | kg/h | 7646,78 | 8318,64 | 8909,86 | 9429,59 | 9896,23 |
| Caudal vapor calef. | kg/h | 15702,01 | 7646,78 | 8318,64 | 8909,86 | 9429,59 |

Tabla 3. Resumen de resultados obtenidos en cada método de tratamiento.

| | Concentración y combustión | Biodigestión y concentración |
|-----------------------------------|----------------------------|------------------------------|
| Potencia Eléctrica MW | 2,288 | 1,756 |
| Vapor (kg/h) | 8281 | -2000 |
| Cenizas ricas en Potasio (tn/día) | 18,829 | - |
| Biofertilizante líquido (tn/día) | - | 265,2 |

Por último, se puede observar que, en el caso de la combustión, además de energía se obtienen 18,829 tn/día de cenizas ricas en K que pueden luego emplearse como fertilizante. En el caso de la biodigestión, se obtienen 265,2 tn/día de un biofertilizante rico en potasio.

CONCLUSIONES

Se estudió el potencial de producción de energía y biofertilizante para aprovechar las vinazas que resultan de la industria sucro-alcoholera mediante la aplicación de dos tecnologías: Concentración y combustión de vinaza y Biodigestión con generación de biogás.

De acuerdo a lo analizado, se pudo determinar que ambas alternativas, tanto la concentración de la vinaza seguida de quema de la misma como la biodigestión con producción de biogás, permitirían aprovechar energéticamente la vinaza, obteniéndose en el primer caso energía eléctrica con una potencia de 2,288 MW y en el segundo caso, energía con una potencia de 1,756 MW.

A su vez, al comparar los dos métodos de tratamiento de vinaza se observa que ambos permiten la obtención de productos con potencial uso como biofertilizantes ricos en potasio, aunque con características y ventajas diferenciadas. El primer método conduce a la generación de 18,829 tn/día de cenizas sólidas ricas en potasio, mientras que el segundo método produce 265,2 tn/día de un biofertilizante líquido también enriquecido en dicho nutriente. Las cenizas presentan una alta concentración de potasio en forma de óxidos (K_2O), fácilmente asimilables por las plantas y de fácil almacenamiento y transporte. No obstante, su contenido en materia orgánica es prácticamente nulo y su aplicación continuada puede alterar el pH del suelo, disminuyendo su calidad a largo plazo.

En contraste, el biofertilizante líquido obtenido a partir de la digestión anaerobia de vinaza y posterior concentración, mantiene una fracción importante de materia orgánica disuelta, además de contener otros nutrientes esenciales como nitrógeno, fósforo y micronutrientes. Si bien su concentración de potasio por unidad de masa es menor que en las cenizas, su formulación líquida facilita la aplicación mediante sistemas de fertirriego o aspersión, promoviendo una absorción más eficiente por parte de los cultivos. La elección entre vinaza líquida y sólida dependerá de las condiciones específicas del cultivo y el entorno.

Finalmente, es importante señalar que la implementación de cada una de estas tecnologías implica costos asociados, tanto operativos como de infraestructura, que pueden influir en su viabilidad económica. Si bien este trabajo no abordó el análisis económico comparativo, dicho aspecto representa una línea de investigación complementaria que podría desarrollarse en estudios futuros, con el fin de aportar criterios más integrales para la toma de decisiones en contextos productivos reales.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Alderetes, C. 2016.** Calderas a Bagazo - Proyecto, operación y mantenimiento. 1ra ed. Argentina.
- Betzabet Morero. 2014.** Purificación de biogás con tecnologías de producción limpias. Tesis presentada para la obtención del Grado Académico de Doctora en Tecnologías Químicas. Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química. Santa Fe, Argentina
- British Petroleum. 2022.** Consumo de energía primaria mundial. Disponible en https://www.bp.com/content/dam/bp/countrysites/es_es/spain/home/pdfs/noticias/2019/infografia_sr_bp19.pdf. Consultado el día 13 de agosto de 2024.
- Cortez, I.; Brossard Pérez, I. 1997.** Experiences on vinasse disposal Part III: Combustion of vinasse fuel oil emulsions. Brazilian Journal of Chemical Engineering, [s. l.], v. 14, n. 1, p. 9.
- Diaz, G.; De Boeck, G.; Cruz, M. y Paz, D. 2013.** SICOVIN V.1.0: "software" para el análisis de concentración de vinaza. Revista Industrial y Agrícola de Tucumán. Tomo 90 (2), pag. 39-47.
- Elia Neto, A.; Shintaku, A.2009.** As boas práticas industriais. Manual de conservação e reúso de água na agroindústria sucroenergética. Brasília: Agência Nacional de Águas (ANA) p. 240.
- Feijóo, E., Golato M., Franck, F., Paz, D., Cárdenas, G. 2015.** Características energéticas de los residuos agrícolas de la cosecha en verde de caña de azúcar de Tucumán. Revista Industrial y Agrícola de Tucumán. Tomo 92 (2), pag. 23 – 32.
- Franck, F.; Golato, M.; Morales, W.; Cruz, C.; Paz, D. 2011.** Rendimiento térmico de calderas bagaceras modernas en Tucumán, R. Argentina. Revista Industrial y Agrícola de Tucumán, vol 88, nº2. Marzo de 2021.
- Leme, R.; Seabra, J. 2017.** Technical-economic assessment of different biogas upgrading routes from vinasse anaerobic digestion in the Brazilian bioethanol industry. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/310752932_Technical-economic_assessment_of_different_biogas_upgrading_routes_from_vinasse_anaerobic_digestion_in_the_Brazilian_bioethanol_industry. Consultado el día 29 de marzo de 2024.
- Manual Biogás FAO. 2011.** Santiago de Chile. Disponible en <https://www.fao.org/3/as400s/as400s.pdf>. Consultado el día 22 de marzo de 2024.
- Ministerio de Energía y Minería. 2021.** Balances energéticos. Disponible en <https://www.argentina.gob.ar/economia/energia/hidrocarburos/balances-energeticos>. Consultado el día 13 de agosto de 2024.
- Molina, C.; Marquetti, F.; Quايا, E. y Machado, W. 2020.** Arranque y seguimiento del proceso de granulación en un reactor anaeróbico utilizando vinaza como sustrato. Revista Industrial y Agrícola de Tucumán. Tomo 97 (1), pag.52-55.
- Morandini, M., y Quايا, E. 2013.** Alternativas para el aprovechamiento de la vinaza como subproducto de la actividad sucroalcoholera. Revista Avance Agroindustrial. Tomo 34(2), pag. 1-12.
- Ortiz, J. y Erazzú, L. 2019.** Sugar cane energy: potencial

electricity production from vinasse produced by the ethanol industry. Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists. Vol. 30, pag. 1595-1602.

Perera, J. 2009. Concentración y combustión de vinazas. Ministerio de Gobierno y Justicia de la Provincia de Tucumán, Secretaría de Estado de Gobierno y Justicia, Subsecretaría de Asuntos Técnicos.

Quaia, E. 2021. Alternativas para aprovechar la vinaza como subproducto. Disponible en <https://www.eeaoc.gob.ar/?noticia=alternativas-para-aprovechar-la-vinaza-como-subproducto-de-la-actividad-sucroalcoholera>. Consultado el día 13 de abril de 2024.

Rodríguez Reis, C.; Hu, B. 2017. Vinasse from Sugarcane Ethanol Production: Better Treatment or Better

Utilization? *Frontiers in Energy Research*, v. 5, pag. 1–7.

Salomon, K.; Rocha, M. 2011. Cost calculations for biogas from vinasse biodigestion and its energy utilization. *Sugar Industry*, v. 4, p. 1–7.

Sukumar V., Manienyan V. y Sivaprakasam, S. 2015. Bio oil Production from Biomass using Pyrolysis and Upgrading. A Review. *International Journal of ChemTech Research* Vol.8, No.1, pag. 196-206.

Zamora Rueda, G.; Mistretta, M.; Gutierrez, C.; Golato, M.; Paz, D.; y Cárdenas G. 2019. Caracterización energética de vinazas de caña de azúcar de Tucumán, Argentina. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/330872092_CARACTERIZACION_ENERGETICA_DE_VINAZAS_DE_CANA_DE_AZUCAR_DE_TUCUMAN_ARGENTINA. Consultado el día 13 de agosto de 2024.



Revista Industrial
y Agrícola de
Tucumán

ISSN 0370-5404

En línea
1851-3018

Tomo 101 (2):
13-19; 2024



ESTACION EXPERIMENTAL
AGROINDUSTRIAL
OBISPO COLOMBRES
Tucumán | Argentina

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

Recompresión de vapor como alternativa de ahorro de agua en los condensadores barométricos de un ingenio azucarero

Marcos Noé Russo* y Oscar Antonio Diez*

*Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales, EEAOC. Email: mrusso@eeaoc.org.ar

RESUMEN

Se analizó la factibilidad de termocomprimir los vapores enviados a los condensadores barométricos en tándem de evaporación de cuatro y cinco efectos, con el objeto de anular el uso de agua fresca en dichos condensadores. Se compararon consumos energéticos y consumo de agua fresca a condensadores. Con la estrategia propuesta se muestra que es factible el uso de termocompresión para la disminución de captación de agua en la industrialización de la caña de azúcar sin comprometer los recursos energéticos, manteniendo la demanda de vapor entre 50% y 53% caña.

Palabras clave: termocompresión, condensador barométrico, ahorro agua.

ABSTRACT

Vapor recompression as a water-saving alternative in barometric condensers of a sugar mill.

The feasibility of thermocompressing vapors sent to the barometric condensers in 4 and 5-effect tandem evaporation was analyzed, with the aim of eliminating the use of fresh water for this operation. Energy parameters and fresh water consumption by the condensers were compared. The proposed strategy demonstrates the feasibility of using thermocompression to reduce water consumption in the sugar cane industrialization process, without compromising energy resources, maintaining the steam demand between 50% and 53% cane.

Key words: thermo-vapor compressor, barometric condenser, water saving.

Fecha de
recepción:
09/09/2024

Fecha de
aceptación:
04/06/2025

INTRODUCCIÓN

En el proceso de fabricación de azúcar, los equipos destinados a mantener el vacío en las operaciones de evaporación son de vital importancia, dado que involucran dos aspectos de alto impacto económico. Por un lado, el vacío permite llegar a la ebullición a menor temperatura y a la vez, utilizar los vapores vegetales para calefaccionar sistemas con menor presión. Otro aspecto se encuentra referido a que trabajar a bajas temperaturas implica menor velocidad de formación de color.

El equipo habitual para generar este vacío es el condensador barométrico. En esencia, este no es más que un recipiente donde se ponen en contacto directo vapor y agua fresca, generando la condensación del vapor; con ella, una contracción del volumen y por consiguiente, la generación del vacío.

Si bien este dispositivo cuenta con gran popularidad por su simplicidad, bajo costo y fácil mantenimiento, presenta una desventaja: una alta tasa de consumo de agua, la cual ronda los 25 kg de agua/kg de vapor; referido a la molienda, el consumo promedio del condensador barométrico de evaporación de jugos es de 2,250 metros cúbicos por tonelada de caña (m^3/t caña) (Salazar *et al.*, 2021).

Las sequías de los últimos años acentuaron los problemas de agua disponible, algunos ingenios carecen de fuentes de agua holgadas para sostener todas las demandas de la fábrica, y quienes hoy están cubiertos no tienen garantías del abastecimiento de este recurso natural. Minimizar la captación no sólo es una cuestión de cuidado del recurso, sino que minimiza a la vez los costos de adquisición y de posterior tratamiento (Klemeš, 2012).

En los últimos años, para contrarrestar esta desventaja, la termocompresión de vapores ha cobrado relevancia, sobre todo en procesos de desalinización de agua de mar (Mazini *et al.*, 2014; Askari and Ameri, 2020; Menasri *et al.*, 2022).

En la recompresión térmica de vapor (o termocompresión), dicha operación se realiza a través de un eyector de vapor, y en procesos como en la desalinización de agua de mar, es un factor clave para aumentar la eficiencia del proceso propiamente dicho (Hassan and Darwish, 2014). En un eyector hay dos entradas: una que toma el vapor de alta presión, y otra que admite el vapor succionado de baja presión, dando como resultado una mezcla que posee propiedades termodinámicas intermedias entre las de los flujos ingresantes (Figura 1).

La termocompresión cuenta con varias ventajas,

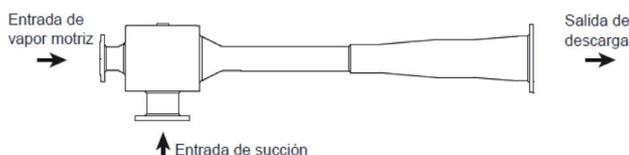


Figura 1. Eyector empleado en termocompresión de vapor. (Fuente: TLV, 2021).

entre ellas: construcción simple, diseño compacto, bajo costo capital y de operación y sin partes móviles ni mecanismos de revolución, lo que implica un mínimo mantenimiento; además, no necesita electricidad y los modernos

sistemas de control simplifican su funcionamiento (Spirax Sarco, 2015).

Entre los factores limitantes hay que citar que el consumo de vapor motriz puede resultar elevado, dando un exceso de vapor de descarga que quizás se deba ventear, y una limitada flexibilidad ante los cambios en las condiciones de operación (Everest, 2016).

En general, el último evaporador del tándem funciona a 0,2 atmósferas de presión, y los vapores de éstos son enviados a sus respectivos condensadores barométricos. Debido a su baja presión, dichos vapores tienen limitada aplicación como medio calefactor, por lo que se incurre en una pérdida de energía y un gasto importante de agua fresca al condensarlos.

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar la posibilidad de termocomprimir los vapores vegetales que salen del último efecto del tándem de evaporación hasta las condiciones de vapor vegetal generado por la primera caja de un tándem de evaporación (VG1), el cual se utiliza para la calefacción de jugo encalado, jugo claro y tachos de cocimientos, a los fines de prescindir del uso de condensador barométrico en el proceso de concentración de jugo. Para ello, se tomó como caso base un ingenio tipo que cuenta con evaporación de cuatro o cinco efectos, y se comparó el consumo de agua y energía, antes y después de la termocompresión.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para el desarrollo de este estudio se tomó como base una fábrica tipo de azúcar blanco directo, capaz de procesar 10.000 toneladas de caña por día (TCD), con destilería anexa en condiciones de procesar toda la melaza producida, y que consume 4,5 kg de vapor de escape por litro de alcohol producido. Dos escenarios fueron propuestos y posteriormente sometidos a evaluación: un sistema de evaporación de cuatro efectos y otro de cinco efectos.

Los sistemas de evaporación fueron resueltos con el simulador SIMCE 3.0 (EEAOC, 2005), el cual requiere algunos parámetros típicos de fábrica. Para este caso de estudio, dichos parámetros fueron los caudales de jugo encalado y jugo claro expresado en por ciento caña (%C), temperatura del vapor escape (VE), temperatura del jugo claro (ambas expresadas en °C), sólidos solubles en jugo claro y melado (% Brix), temperatura del vapor del último efecto (°C) y valor medio de pérdidas por radiación en el sistema de evaporación. Los valores adoptados se presentan en la Tabla 1.

En el sistema de evaporación se realizaron extracciones de vapor vegetal (VG) desde el primer efecto hasta el cuarto. La extracción de VG1 se utilizó para alimentar dos calentadores, uno de jugo claro (de 95°C a 100°C) y otro de jugo encalado (de 90°C a 103°C) y abastecer de vapor de calefacción el sector de cocimiento. El resto de las extracciones de vapor tuvieron como destino tres diferentes etapas de calentamiento de jugo encalado (Figura 2).

Con respecto a las extracciones de vapor, fueron fijadas según las necesidades térmicas para un esquema de evaporación eficiente, lo que implica que se maximicen las extracciones intermedias.

Tabla 1. Valores promedio adoptados para la resolución del sistema de evaporación.

| | | | |
|-------------------------------|-----|--------------------------------------|----|
| Jugo encalado [% caña] | 115 | Brix jugo claro [% caña] | 15 |
| Jugo claro [%caña] | 100 | Brix melado [%caña] | 70 |
| Temperatura vapor escape [°C] | 125 | Temperatura vapor último efecto [°C] | 60 |
| Temperatura jugo claro [°C] | 119 | Pérdidas por radiación [%] | 3 |

En la Tabla 2 se muestra el esquema de extracciones propuestas, donde T_e es temperatura de entrada al intercambiador; y T_s es temperatura de salida.

La estrategia de cocimientos considerada fue la misma para todos los escenarios y consistió en un sistema de tres templeas. El mismo fue resuelto planteando balances de materia en una hoja de cálculo Excel y, junto con el complemento Solver, se resolvió el conjunto de ecuaciones ajustado a restricciones establecidas según Paz *et al.* (1995). Aquí se calculó el consumo de VG1 para los tachos de cocimiento, asumiendo valores promedio para los contenidos de sólidos solubles en mieles, jarabes y magma.

Los consumos de agua en condensadores barométricos del tándem fueron calculados según la metodología propuesta por Salazar *et al.* (2021).

La estrategia de recompresión de vapor consistió en tomar el vapor que va a condensadores y termocomprimirlo hasta condiciones de VG1, de manera tal de aprovechar el mismo para satisfacer las necesidades energéticas

de los consumidores de VG1, tal como se muestra en la Figura 3.

• **Recompresión térmica de vapor o termocompresión:** los cálculos de la potencia requerida por el eyector de estos sistemas se realizaron según catálogo de la firma TLV (2021). Pevio a esto fue necesario establecer tres parámetros: la relación de compresión (C_r), definida como la presión de descarga sobre la presión de succión; y la relación de expansión (E_r), que es el cociente entre la presión del vapor de alta y la presión de succión. Empleando ambos valores, se calculó la relación de mezclado (M_r), definida como el flujo de vapor de alta sobre el flujo de vapor de succión según metodología TLV. Una vez establecida la relación M_r se calculó la cantidad de vapor motriz necesario para realizar la termocompresión (vapor de alta presión) mediante la ecuación 1. El vapor de succión se obtuvo de la diferencia entre el vapor vegetal que sale del último efecto del sistema de evaporación ($VG_{\text{último efecto}}$) y el vapor destinado a calentador 1 ($VG_{\text{calentador1}}$).

Tabla 2. Extracciones propuestas para los sistemas a analizar.

| Calentamiento de jugo encalado (JE) y jugo clarificado (JC) | | |
|---|------------------|----------------|
| Tipo de Jugo | Medio calefactor | T_e-T_s [°C] |
| JE | VG4 | 20-50 |
| | VG3 | 50-75 |
| | VG2 | 75-90 |
| | VG1 | 90-103 |
| JC | VG1 | 95-100 |
| | VE | 100-119 |

Ecuación 1

$$Vapor_{motriz} = M_r \times Vapor_{succión}$$

Donde:

Ecuación 2

$$Vapor_{succión} = VG_{últimoefecto} - VG_{calentador1}$$

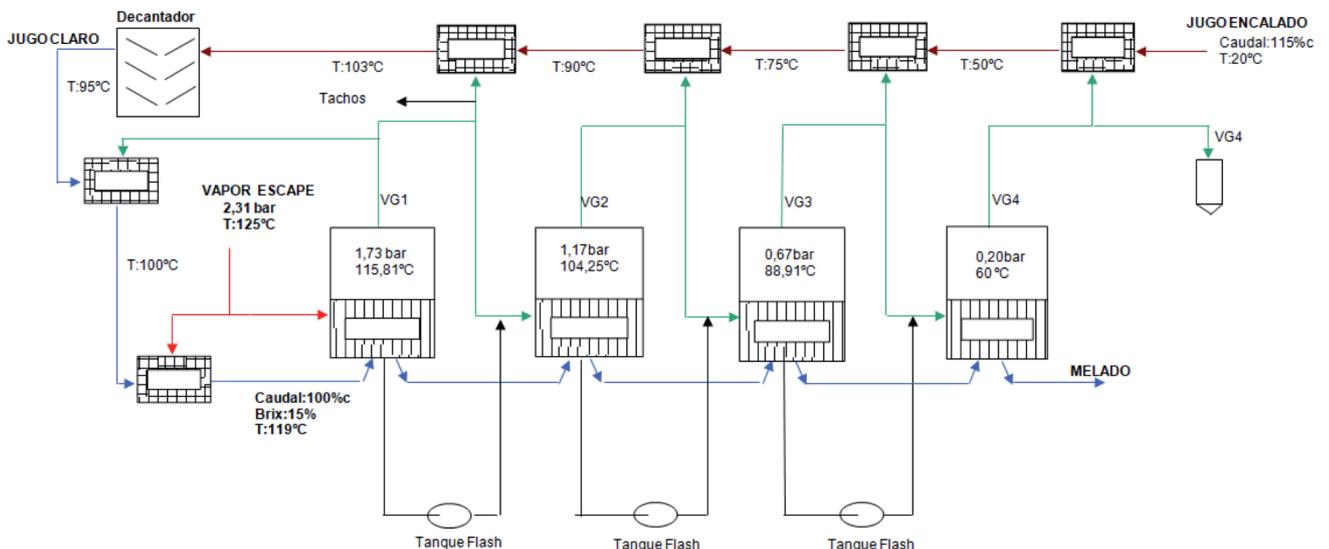


Figura 2. Configuración del sistema de evaporación del escenario 1.

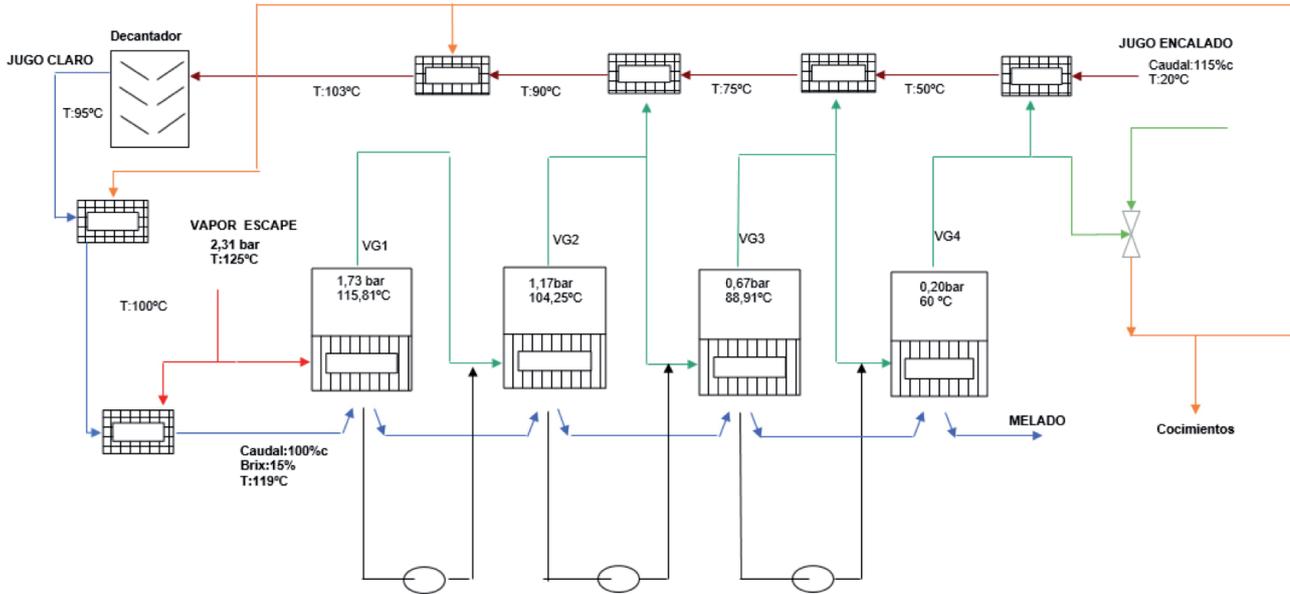


Figura 3. Configuración para el sistema de evaporación de 4 efectos y termocompresión.

Con el valor de vapor motriz obtenido se calculó, a través de la ecuación 3, el vapor total disponible a ser reutilizado en la fábrica.

Ecuación 3

$$Vapor_{Disponible} = Vapor_{motriz} + Vapor_{Succión}$$

Por último, para cada caso y situación estudiada se elaboraron en Excel diagramas de consumo de vapor, donde se determina el gas consumido, el vapor laminado y el vapor de escape venteado, como así también las demandas energéticas de los sistemas de recompresión. Estos cálculos permitieron realizar las comparaciones entre cada sistema.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de las simulaciones realizadas con SIMCE se presentan en la Tabla 3. En ellas se observan el caudal de vapor de escape utilizado (VE) en el primer cuerpo, los vapores vegetales en cada cuerpo (VG) y las extracciones de vapor empleadas como medios de calefacción de jugo. Todos estos resultados fueron expresados en por ciento caña (%C).

Tabla 3. Resultados de las simulaciones realizadas con SIMCE de los sistemas de 4 y 5 efectos.

| | Cuatro Efectos | | | | Cinco Efectos | | | | |
|---------------|----------------|-------|---------|-------|---------------|-------|-------|------|------|
| | VE [%C] | 37,09 | VE [%C] | 34,92 | VG1 | VG2 | VG3 | VG4 | VG5 |
| GENERAC. [%C] | 36,23 | 16,86 | 14,52 | 10,43 | 34,87 | 15,44 | 13,65 | 9,45 | 4,75 |
| EXTRACC. [%C] | 20,437 | 3,1 | 5,02 | 5,77 | 20,357 | 3,58 | 3,04 | 4,94 | - |

De acuerdo a lo planteado por Salazar *et al.* (2021), se estimaron los caudales de agua empleados en los condensadores barométricos (m agua fría) a partir de los caudales de vapor a condensar, para los sistemas de evaporación. Los resultados son expresados en metros cúbicos por tonelada de caña y se muestran en la Tabla 4.

Tabla 4. Cantidad de agua necesaria en condensadores barométricos de evaporación.

| Agua necesaria para el condensador barométrico de la evaporación | | |
|--|-----------------------|-------------------------|
| | VG último efecto [%C] | m agua fría [m³/t caña] |
| Cuatro efectos eficiente | 4,66 | 1,165 |
| Cinco efectos eficiente | 4,75 | 1,187 |

En la Figura 4 se muestra el esquema de consumo de vapor por la fábrica propuesta, con sistema de evaporación de cuatro efectos, donde se detallan los consumidores de vapor vivo y los de escape, como así también la distribución de los vapores vegetal y el agua fresca a condensador. Todos los flujos están expresados en toneladas por hora, como en porcentaje caña.

Termocompresión (recompresión térmica de vapor)

Para el cálculo de la cantidad de vapor de alta presión se estableció el valor de presión de alta (P_a), y el valor de la presión de succión (P_s), el cual se corresponde con la presión de trabajo de la última caja del tándem de evaporación, mientras que la presión de descarga es la presión correspondiente a la de VG1 para cada caso. Con las presiones establecidas y el catálogo de TLV se calcularon las relaciones C_r, E_r y M_r. Los resultados obtenidos se muestran en la Tabla 5.

Los datos mostrados en la Tabla 5 permiten calcular, por medio de las ecuaciones 1 y 3, el vapor de alta necesario (motriz) y el vapor disponible para satisfacer las demandas energéticas de cocimientos, y calentadores.

La Tabla 6 muestra un resumen de la información

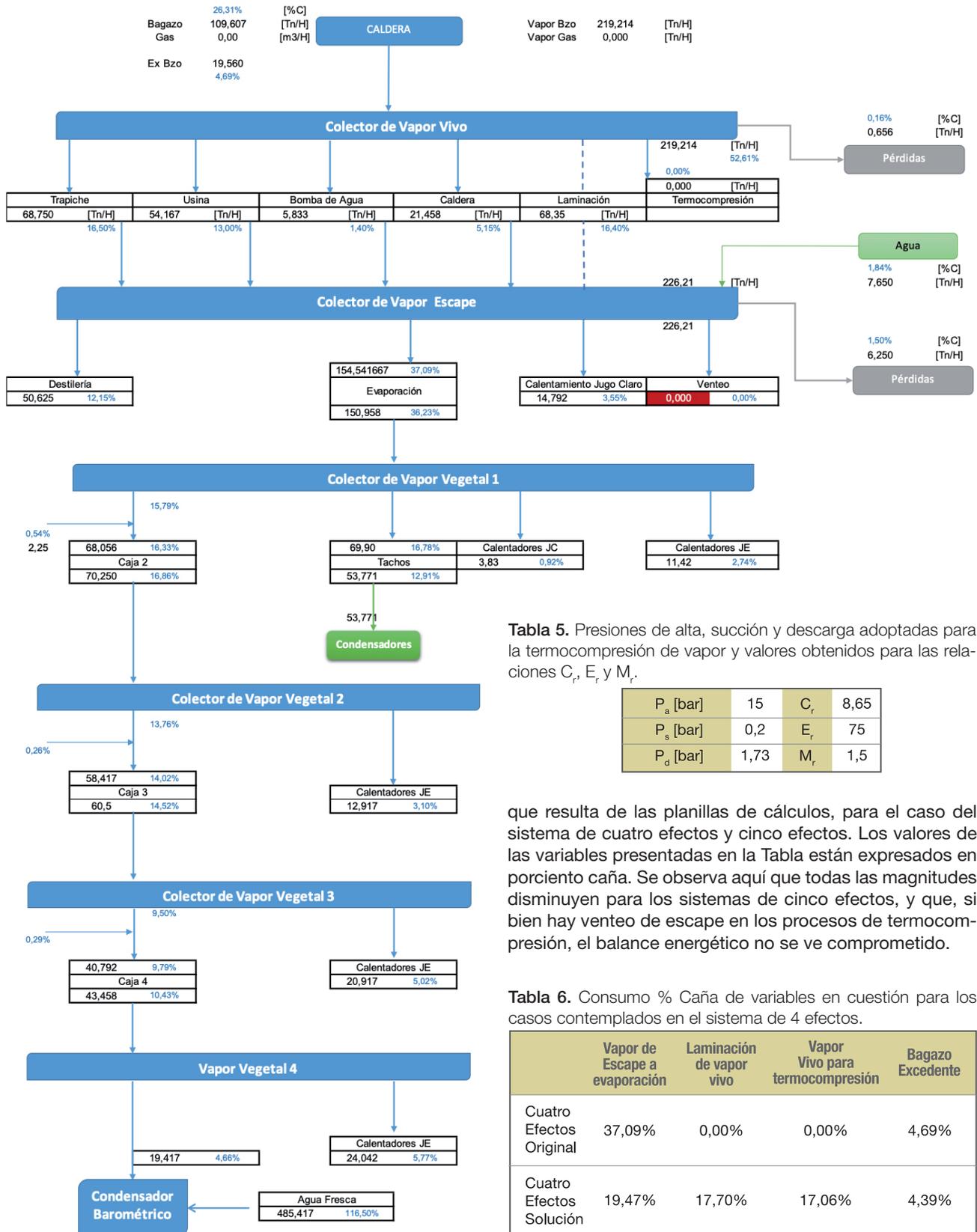


Figura 4. Flujo de vapor para un sistema con evaporación de cuatro efectos.

Tabla 5. Presiones de alta, succión y descarga adoptadas para la termocompresión de vapor y valores obtenidos para las relaciones C_r , E_r y M_r .

que resulta de las planillas de cálculos, para el caso del sistema de cuatro efectos y cinco efectos. Los valores de las variables presentadas en la Tabla están expresados en por ciento caña. Se observa aquí que todas las magnitudes disminuyen para los sistemas de cinco efectos, y que, si bien hay venteo de escape en los procesos de termocompresión, el balance energético no se ve comprometido.

Tabla 6. Consumo % Caña de variables en cuestión para los casos contemplados en el sistema de 4 efectos.

| | Vapor de Escape a evaporación | Laminación de vapor vivo | Vapor Vivo para termocompresión | Bagazo Excedente |
|-------------------------|-------------------------------|--------------------------|---------------------------------|------------------|
| Cuatro Efectos Original | 37,09% | 0,00% | 0,00% | 4,69% |
| Cuatro Efectos Solución | 19,47% | 17,70% | 17,06% | 4,39% |
| Cinco Efectos Original | 34,92% | 0,00% | 0,00% | 5,75% |
| Cinco Efectos Solución | 18,19% | 15,78% | 13,86% | 5,99% |

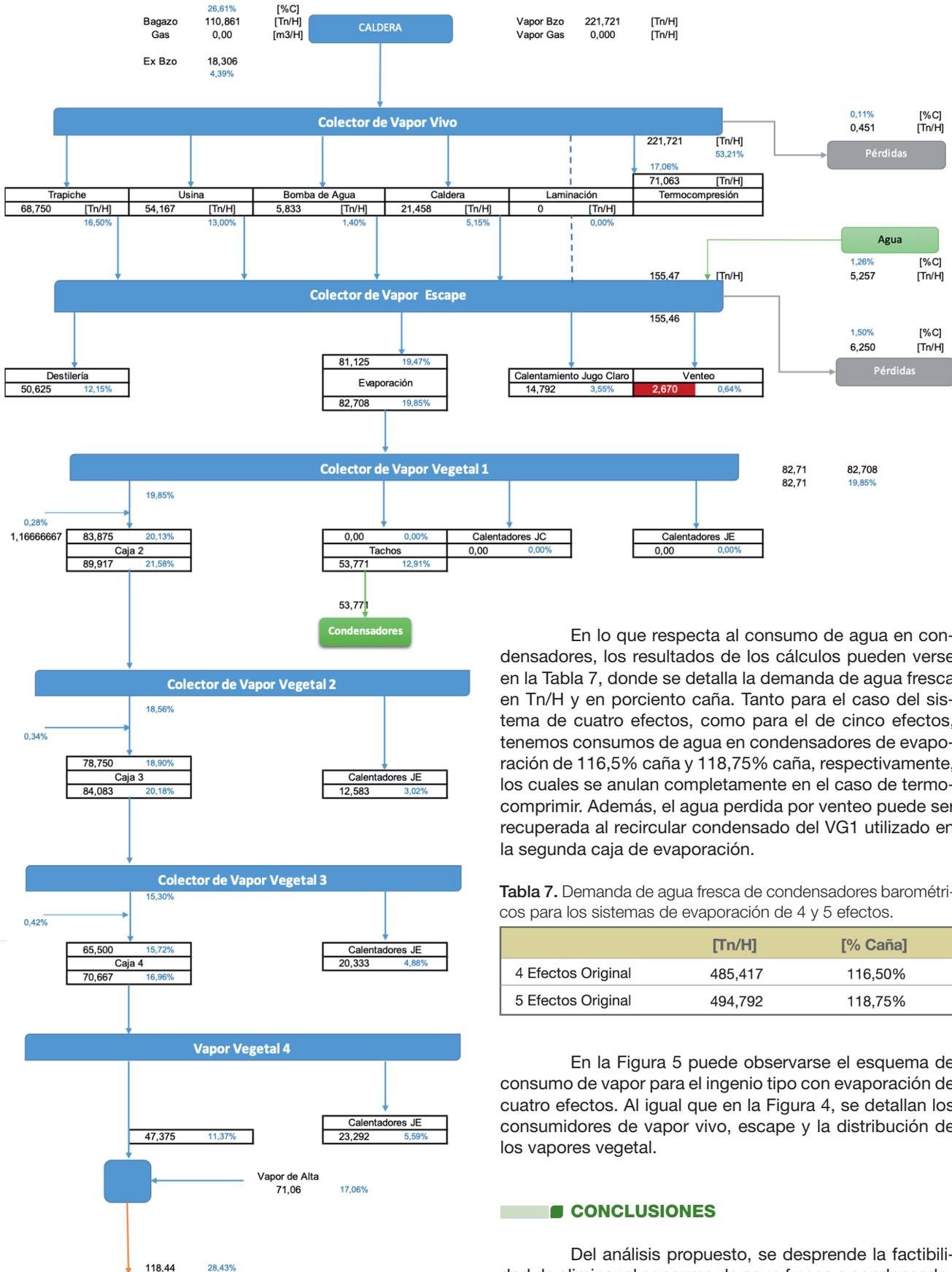


Figura 5. Flujo de vapor para un sistema con evaporación eficiente de 4 efectos y termocompresión del vapor vegetal de último efecto y cocimientos.

En lo que respecta al consumo de agua en condensadores, los resultados de los cálculos pueden verse en la Tabla 7, donde se detalla la demanda de agua fresca en Tn/H y en porcentaje caña. Tanto para el caso del sistema de cuatro efectos, como para el de cinco efectos, tenemos consumos de agua en condensadores de evaporación de 116,5% caña y 118,75% caña, respectivamente, los cuales se anulan completamente en el caso de termocomprimir. Además, el agua perdida por venteo puede ser recuperada al recircular condensado del VG1 utilizado en la segunda caja de evaporación.

Tabla 7. Demanda de agua fresca de condensadores barométricos para los sistemas de evaporación de 4 y 5 efectos.

| | [Tn/H] | [% Caña] |
|--------------------|---------|----------|
| 4 Efectos Original | 485,417 | 116,50% |
| 5 Efectos Original | 494,792 | 118,75% |

En la Figura 5 puede observarse el esquema de consumo de vapor para el ingenio tipo con evaporación de cuatro efectos. Al igual que en la Figura 4, se detallan los consumidores de vapor vivo, escape y la distribución de los vapores vegetal.

CONCLUSIONES

Del análisis propuesto, se desprende la factibilidad de eliminar el consumo de agua fresca a condensadores en evaporación tanto para cuatro efectos como para cinco efectos, lo que implica una disminución de la captación en 116,5% caña y 118,75% caña, respectivamen-

te. Durante el cambio a sistema con termocompresión, el balance energético no se ve comprometido, dando como resultado una ligera disminución del excedente de bagazo, la cual incluso puede tomarse como despreciable.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Askari, I. B. and I. B. Ameri. 2020.** Thermodynamic analysis of multi effect desalination unit with thermal vapor compression feed by different motive steam pressures. *Desalination and Water Treatment* (184): 57-71
- Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEOC). 2005.** SIMCE 3.0. Manual del usuario. Versión 3.0. [CD ROM]. EEOC, Las Talitas, Tucumán, R. Argentina.
- Everest. 2016.** Catálogo: Mechanical vapour recompressors. (Disponible en: <http://www.everestblowers.com/everestblowers-data/uploads/2021/06/mvr-writeup-2016.pdf>)
- Hassan, A. S. and M. A. Darwish. 2014.** Performance of thermal vapor compression. *Desalination*. Elsevier. 335: 41-46.
- Klemeš, J. 2012.** Industrial water recycle/reuse, *Current Opinion in Chemical Engineering* 1 (3): 238-245.
- Menasria, R.; Trikia, Z.; M. Nadjib Bouaziza and B. Hamrounib. 2022.** Energy and exergy analyses of a novel multi-effect distillation system with thermal vapor compression for seawater desalination. *Desalination and Water Treatment*. 246:54-67
- Salazar, R. A.; C. A. Gómez; E. A. Feijóo; M. M. de los A. Coronel; R. M. Ruiz y D. Paz. 2021.** Usos de agua en la industria suroenergética de Tucumán, R. Argentina. *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán*. 98 (2): 37-45.
- Spirax Sarco. 2015.** Catálogo: SJT Steam Jet Thermocompressor (Disponible en: <https://content.spiraxsarco.com/-/media/spiraxsarco/international/documents/ca/ti/sjt-ti-p493-02-en.ashx?rev=00f217ab148b45fbb0ad38f5feb3587e>)
- TLV. 2021.** Catálogo: Compresor de vapor modelo SC. (Disponible en: https://www.tlv.com/global_pdf/tla/l-sc110-hp.pdf).



Revista Industrial
y Agrícola de
Tucumán

ISSN 0370-5404

En línea
1851-3018

Tomo 101 (2):
21-27; 2024



ESTACION EXPERIMENTAL
AGROINDUSTRIAL
OBISPO COLOMBRES
Tucumán | Argentina

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

Emisiones de gases de efecto invernadero de prácticas agrícolas en caña de azúcar, Tucumán, Argentina

Javier Tonatto *, P. Lorena Garolera De Nucci*, Luis G. Alonso*, Enrique Feijóo* y Eduardo R. Romero*

* Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres, William Cross 3150, Las Talitas – Tucumán, Argentina, Tel: (54 381) 452 1000. Email: jtonatto@eeaoc.org.ar

RESUMEN

En la búsqueda de sistemas agrícolas sustentables es necesario cuantificar los impactos ambientales de las diversas prácticas de manejo para tomar decisiones sobre la sustentabilidad agrícola y lograr resultados ecológicos positivos. El objetivo del presente trabajo es estimar las emisiones de GEI en la producción del cultivo de caña de azúcar en las condiciones agroecológicas de una localidad de la provincia de Tucumán, mediante el empleo de diferentes fertilizantes nitrogenados y teniendo en cuenta la recolección del RAC para potencial uso bioenergético en un ingenio azucarero. Se consideraron las labores culturales, el consumo de combustible diésel, la aplicación de agroquímicos y la labor de cosecha para obtener una cantidad definida de materia prima bajo dos sistemas, según el tipo de fertilizante nitrogenado empleado: nitrato de amonio calcáreo (CAN) (67,5 kg N/ha) y urea (115 kg N/ha). Las emisiones de GEI se estimaron empleando una herramienta denominada Cool Farm Tool versión 2.0 (2003). Las emisiones totales por unidad de superficie fueron 1628 kg CO₂e/ha al emplear CAN, mientras que al emplear urea resultaron en 2346 kg CO₂e/ha. Las emisiones de GEI expresadas en relación a la producción de caña de azúcar obtenida al emplear CAN fueron 24,08 kg CO₂e/t caña MF; y 35,26 kg CO₂e/t caña MF al emplear urea. Las labores correspondientes al acondicionamiento del RAC para su potencial aprovechamiento fueron estimadas en 83,5 kg CO₂e/ha en ambos sistemas. Los resultados manifiestan una disminución en la estimación de emisiones de GEI asociados al uso de una práctica de fertilización alternativa empleando CAN como fuente de nitrógeno. Se combinan beneficios propios de su etapa de producción y uso en campo, con ventajas agronómicas y operativas durante su aplicación. Se observa la relevancia que adquieren en ambos sistemas las emisiones relacionadas con el uso de combustible diésel en las operaciones agrícolas, representando entre el 33% y el 44% del total de las emisiones.

Palabras clave: nutrientes, agricultura, sustentabilidad, RAC, herramientas.

ABSTRACT

Greenhouse gas emissions from agricultural practices in sugar cane, Tucumán, Argentina

In the search for sustainable agricultural systems, it is essential to quantify the environmental impacts of various management practices to make informed decisions about agricultural sustainability and achieve positive ecological outcomes. The objective of this study is to estimate greenhouse gas (GHG) emissions in sugarcane production under the agroecological conditions of a location in Tucumán province. Different nitrogen fertilizers use was considered as well as the collection of harvest residues for potential bioenergy purposes in a sugar mill. Cultural practices, diesel fuel consumption, the use of agrochemicals, and the harvesting process were considered to obtain a defined amount of feedstock under two systems based on the type of nitrogen fertilizer used: calcium ammonium nitrate (CAN) (67.5 kg N/ha) and urea (115 kg N/ha). GHG emissions were

Fecha de
recepción:
27/09/2024

Fecha de
aceptación:
11/06/2025

estimated using Cool Farm Tool (version 2.0). Total emissions per unit area were 1628 kg CO₂e/ha when using CAN, while using urea resulted in 2346 kg CO₂e/ha. GHG emissions expressed in relation to the sugar cane production obtained when using CAN were 24.08 kg CO₂e/t cane and 35.26 kg CO₂e/t cane when using urea. The emissions associated with harvest residues collection for potential use were estimated at 83.5 kg CO₂e/ha in both systems. The results indicate a reduction in the estimated GHG emissions associated with the use of an alternative fertilizer as CAN. This practice combines benefits from its production stage and field use, as well as agronomic and operational advantages during its application stage. The significance of emissions related to diesel use in agricultural operations is highlighted in both systems.

Key words: fertilizers, sustainability, biomass.

INTRODUCCIÓN

Según el informe más reciente del Joint Research Centre (JRC) - European Commission (2024), las emisiones globales de gases de efecto invernadero alcanzaron un récord de 53,0 Gt CO₂e en 2023, con el sector agrícola y uso del suelo representando una fracción muy relevante de estas (Crippa *et al.*, 2024). Al analizar las tendencias de emisiones antropogénicas netas de gases de efecto invernadero (GEI), responsables del calentamiento global, se observa que han aumentado desde 2010 en todos los sectores principales a nivel mundial. Según los informes más recientes del Panel Intergubernamental de Cambio Climático (Pörtner *et al.*, 2022), las principales actividades que emiten GEI son, en valores aproximados, las siguientes:

- 34% (20 Gt CO₂-eq) del total de emisiones antropogénicas netas de GEI provenientes del sector de suministro de energía
 - 24% (14 Gt CO₂-eq) de la industria
 - 22% (13 Gt CO₂-eq) de la agricultura, la silvicultura y otros uso del suelo
 - 15% (8,7 Gt CO₂-eq) del transporte
 - 6% (3,3 Gt CO₂-eq) del sector de la construcción

Claramente se manifiestan la relevancia del sector relacionado con energía y actividades agrícolas y la oportunidad de realizar aportes efectivos para la mitigación de sus efectos. Además, está ampliamente documentada la estrecha vinculación de las economías con las fuentes de energía fósiles, situación agravada por aumentos en la población mundial y en la demanda de energía. Esto ha generado preocupación desde el sector político, económico y ambiental (Bilgili *et al.*, 2017).

Las contribuciones regionales a las emisiones globales de GEI mantienen notables diferencias entre ellas, con emisiones nacionales per cápita que reflejan en parte diferentes etapas de desarrollo (Pörtner *et al.*, 2022). Por ello es que se ha dado un mayor énfasis al cambio climático a nivel regional, evaluando riesgos, medidas de adaptación y toma de decisiones a nivel local. Sin embargo, es necesario aclarar que una de las principales debilidades de los inventarios nacionales es la escasa disponibilidad de datos regionales o específicos por cultivo, lo que limita la precisión de las políticas de mitigación sectoriales (Crippa *et al.*, 2024).

Actualmente, la biomasa es globalmente reconocida como una fuente de energía renovable fiable, la cual puede almacenarse y aportar beneficios como la protección del medio ambiente, la generación de nuevos puestos de trabajo, la integración de comunidades energéticamente vulnerables y la conversión de residuos en recursos. Gracias a las diversas condiciones agroecológicas y las ventajas competitivas de su agroindustria, Argentina es un gran productor de biomasa con potencial energético.

A nivel nacional, el reporte del Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero atribuye al sector agrícola, ganadero y forestal el 39% de las emisiones informadas (MAYDS, 2022). Además del indiscutible desafío que plantea el cambio climático y el calentamiento global, el sector agrícola enfrenta el de proveer alimentos a una población en aumento, garantizando su seguridad alimentaria.

La agroindustria sucro-alcoholera se caracteriza por ser capaz de producir alimentos, biocombustibles y derivados o subproductos factibles de ser aprovechados para la generación de energía renovable y otras aplicaciones.

En Argentina, el cultivo de la caña de azúcar se ubica en la región noroeste del país. Actualmente, esa producción se realiza en 23 ingenios azucareros activos, de los cuales 15 están ubicados en la provincia de Tucumán, donde la superficie sembrada con caña de azúcar es de casi 276.400 ha (Fandos *et al.*, 2021). Además, se produce etanol como co-producto en destilerías anexas a ingenios azucareros (no todas deshidratan), que utilizan mieles del proceso de fabricación de azúcar y a veces parte del jugo directo de la caña como materia prima. Esta industria es una de las principales actividades socio-económicas de Tucumán y generadora de empleo, especialmente en época de cosecha. La industria azucarera no es energéticamente autónoma, aunque tiene todas las posibilidades de serlo. Tradicionalmente, el bagazo (residuo fibroso obtenido después de la extracción del jugo) se utiliza como combustible en calderas de biomasa para la generación de vapor y energía eléctrica para el autoabastecimiento de la industria sucroalcoholera (Feijóo *et al.*, 2022).

La caña de azúcar (*Saccharum officinarum*) es uno de los cultivos energéticos más reconocidos, con un alto potencial para la producción de biomasa (40 – 150 t/ha MF). Una fracción de esta biomasa (porciones inmaduras del tallo y hojas de la planta), denominada RAC (resi-

duo agrícola de cosecha), no se utiliza para la producción de azúcar/alcohol y se deja en el campo durante la operación de cosecha. Localmente ha sido estimada en 151 kg de materia seca por tonelada de caña de azúcar molible (materia fresca) (Romero *et al.*, 2009).

Gracias al elevado porcentaje de adopción del manejo de caña sustentable, el 98,1% de la superficie de la provincia es cosechada en verde (Aybar Guchea, 2020). Esto implica que los cañaverales no son quemados previamente a la cosecha y el RAC generado durante la cosecha generalmente es mantenido sobre la superficie del suelo. Así, se logran beneficios como el reciclado de nutrientes, la reducción de riesgos de erosión de suelos, la conservación de humedad edáfica, mejoras en el control de malezas y un mayor desarrollo de microorganismos degradadores de materia orgánica y fijadores de nitrógeno, entre otros (Alonso *et al.*, 2005; Tortora *et al.*, 2013). Paralelamente, y considerando el creciente interés por las fuentes de energía renovables y su aprovechamiento en el mismo lugar donde se producen, estudios locales desarrollaron tecnologías para el manejo del RAC y su utilización, en diferentes proporciones, para la cogeneración o generación de energía en la industria local (Casen *et al.*, 2011; Golato *et al.*, 2017). Existen antecedentes locales de estudios de sustentabilidad para el sector sucro-alcoholero que investigaron emisiones de GEI pero sin contemplar la posibilidad de acondicionar el RAC para un potencial aprovechamiento energético (Chalco Vera, 2020; Acreche y Valeiro, 2013). Otros trabajos evaluaron los indicadores uso de energía y EROI para diferentes sistemas de manejo y alcances (Acreche y Valeiro, 2013; Tonatto *et al.*, 2019; Feijóo, 2022).

En la búsqueda de sistemas agrícolas sustentables, a nivel global se trabaja constantemente para favorecer la adopción de medidas conservacionistas. Sin embargo, en muchos casos se han encontrado resultados contradictorios o inciertos en relación con la sustentabilidad y la producción de los sistemas agrícolas al adoptar estas medidas, con una gran influencia de las condiciones ambientales locales y de manejo (Guo C. *et al.*, 2022). Esto pone en evidencia la necesidad de contar con datos detallados a nivel regional y por actividad específica, especialmente en sectores productivos como la caña de azúcar, donde aún existen brechas de información sobre prácticas agrícolas y su impacto ambiental para tomar decisiones sobre la sustentabilidad agrícola y lograr resultados ecológicos positivos.

El objetivo del presente trabajo es estimar las emisiones de GEI en la producción del cultivo de caña de azúcar en las condiciones agroecológicas de una localidad de la provincia de Tucumán, mediante el empleo de diferentes fertilizantes nitrogenados y teniendo en cuenta la recolección del RAC para un potencial uso bioenergético en un ingenio azucarero.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio plantea un modelo teórico basado en un ensayo de fertilización realizado en una plantación ubicada en la localidad de Acherai (Tucumán, Argentina) que corresponde a un ciclo de cultivo de 12 meses (período 2020/2021) y a ensayos de prácticas de

enfardado de RAC realizados en diferentes localidades de la provincia (Feijóo *et al.*, 2022). Se incluyen las labores culturales, el consumo de combustible diésel, la aplicación de agroquímicos y la labor de cosecha para obtener una cantidad definida de materia prima: 64,15 t de caña/ha (materia fresca) y 9,7 t RAC/ha (materia seca) (Figura 1). El análisis incluye las actividades en el campo, así como la procedencia de los fertilizantes empleados, la distancia recorrida desde la planta de elaboración hasta el sitio de uso final y el tipo de transporte.

La unidad de referencia para la comparación de los sistemas bajo estudio es la producción de 1 ha implantada con el cultivo de caña de azúcar.

A fin de mantener los beneficios ambientales y edáficos que la conservación de RAC sobre la superficie del suelo ofrece, se consideró la recuperación del 50% de la biomasa residual en 4,85 t RAC/ha (materia seca), y las correspondientes tareas realizadas en el campo: i- hilerado de biomasa; ii- enfardado prismático; y iii- carga y movimiento interno de los fardos. La dimensión de los fardos prismáticos producidos fue de 0,80 x 0,90 x 2,10 metros con una densidad de 170 a 210 kg/m³.

Queda excluido del análisis el transporte de la materia prima obtenida al ingenio, debido a la diversidad de plantas industriales disponibles y la variabilidad en la distancia a recorrer en cada caso, así como el proceso de aprovechamiento bioenergético en industria.

Al ser la caña de azúcar un cultivo semi-perenne (caña planta + 4 socas), se consideró para el período mencionado la fracción de insumos correspondiente utilizada en la plantación del cultivo. Se analizaron dos sistemas según el tipo de fertilizante nitrogenado empleado:

- **Sistema 1:** nitrato de amonio calcáreo (CAN) a razón de 67,5 kg N/ha.
- **Sistema 2:** urea a razón de 115 kg N/ha.

Cabe destacar que, si bien las dosis en términos de unidades de nitrógeno difieren, permiten obtener resultados agronómicos equivalentes, según lo reportado por Leggio Neme *et al.* (2018) en una serie de ensayos realizados localmente. Esto se basa en una serie de ventajas que ofrece el CAN, entre ellas formas químicas de rápida disponibilidad para el cultivo, menores pérdidas por volatilización y por ende una mayor eficiencia agronómica.

Esta última opción corresponde a un manejo agronómico tradicional a nivel local y es un caso teórico para este estudio que se realizó con el fin de comparar el desempeño de estos dos sistemas de manejo. No se consideraron otras fuentes de nutrientes para el cultivo.

Respecto del método de aplicación de los fertilizantes, al emplear urea como fuente de N, esta debe ser incorporada en el suelo, por lo que conlleva el uso de equipos con mayor requerimiento de potencia y menor capacidad de trabajo (163 HP y 1,3 ha/h). Al emplear nitrato de amonio calcáreo como fuente de N, es factible la aplicación en superficie empleando abonadoras neumáticas con un menor requerimiento de potencia y mayor capacidad de trabajo (92 HP y 4 a 6,5 ha/h).

Respecto del frente de cosecha, el mismo incluye una máquina cosechadora integral y dos tractores para la movilización de carros autovolcables.

A fin de estimar las emisiones de GEI, se empleó una herramienta de amplia aplicación a nivel internacional

Sistema de cultivo y aprovechamiento bioenergético Caña de azúcar

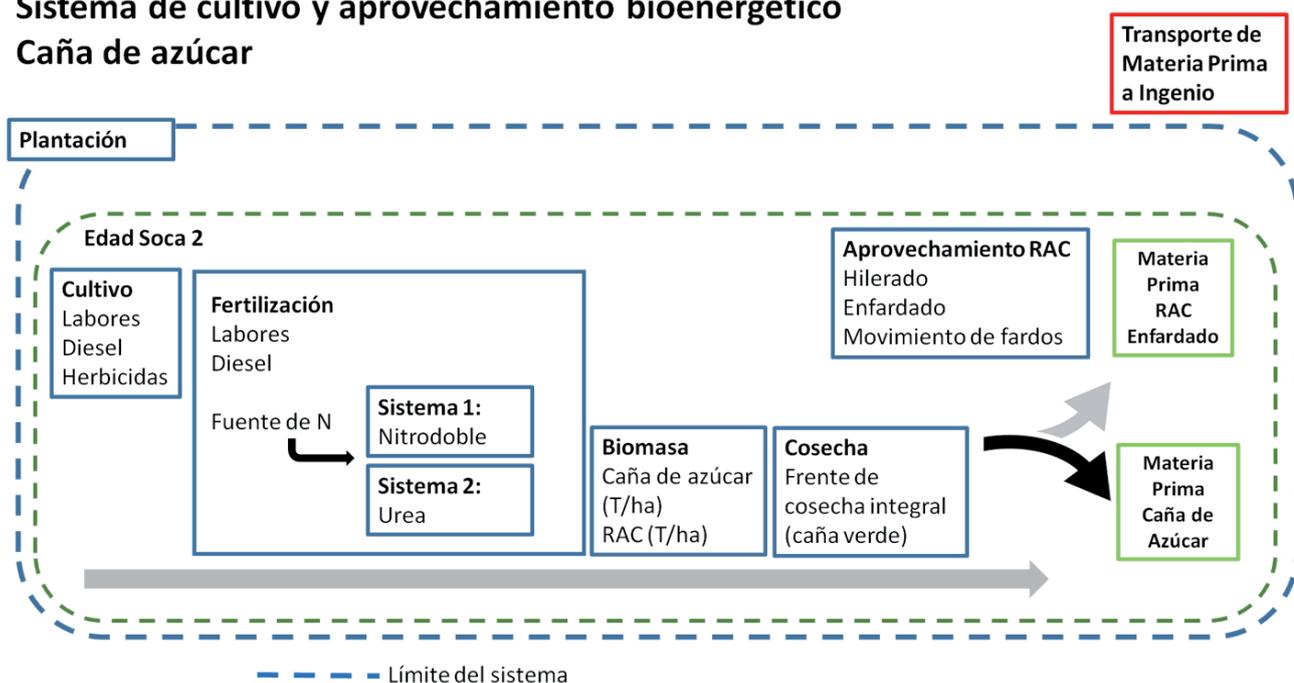


Figura 1. Límite de los sistemas considerados para el cultivo de caña de azúcar: sistema 1 (empleando nitrato de amonio calcáreo) y sistema 2 (empleando urea).

denominada Cool Farm Tool (versión 2.0) a través de una plataforma en línea (Cool Farm Alliance, 2023). En ella se consideran las características climatológicas del sitio, los insumos de producción y otras prácticas de gestión en campo, con las cargas ambientales asociadas a los sistemas de producción. Si bien esta herramienta no sigue una norma en particular, está alineada con diversos estándares y protocolos (IPCC principalmente) para la estimación de GEI.

Dicha herramienta es ampliamente utilizada en diversos cultivos, con antecedentes en caña de azúcar a nivel de estudios sectoriales como Huella de Carbono y Huella de Agua en Mauricio (Sachse and Kowalewski, 2021), y emisiones de GEI en grupos de productores de India (Adeel *et al.*, 2025).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Las emisiones totales por unidad de superficie fueron 1628 kg CO₂e/ha al emplear CAN, mientras que al emplear urea resultaron en 2346 kg CO₂e/ha. Las emisiones de GEI expresadas en relación a la producción de caña de azúcar obtenida al emplear CAN fueron 24,08 kg CO₂e/t caña y 35,26 kg CO₂e/t caña al emplear urea.

La Figura 2 muestra las principales contribuciones a las emisiones de GEI del cultivo de caña de azúcar empleando dichos fertilizantes.

Se destaca un efecto favorable al usar CAN como fuente de N, ya que las emisiones originadas en el suelo por el uso de fertilizantes se reducen en 53,7% respecto de la urea. Esta diferencia estaría relacionada al mayor uso

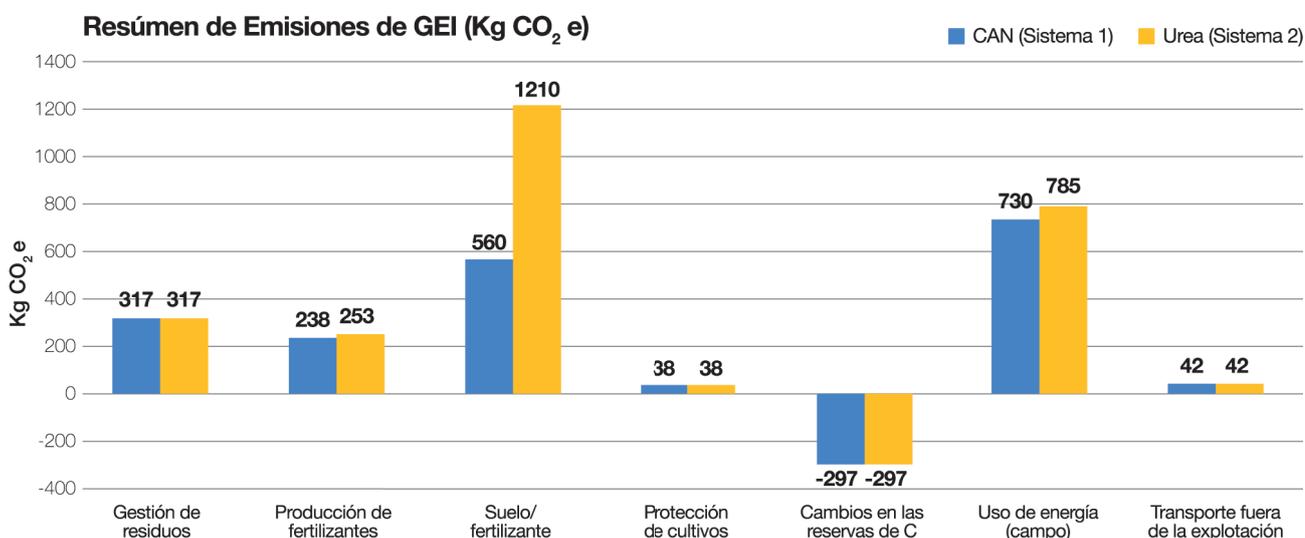


Figura 2. Emisiones totales de GEI por hectárea para los distintos procesos que intervienen en el cultivo de caña de azúcar.

de nutrientes, eficiencia agronómica y baja volatilización asociados a dicho producto (Leggio Neme, 2018).

Al considerar las labores correspondientes al acondicionamiento del RAC para su potencial aprovechamiento, las emisiones estimadas fueron de 83,5 kg CO₂e/ha en ambos sistemas.

Se evidencia un efecto positivo de los sistemas de manejo al capturar C en el suelo como resultado de su contenido original de materia orgánica (MO 2,36%), al cambio en el sistema de labranza registrado en los últimos 10 años (labranza convencional a labranza reducida) y al aporte de RAC conservado en el suelo. Se estimó un valor de 296 kg CO₂e/ha capturados por cada uno de los sistemas estudiados (representado por Cambios en las Reservas de Carbono en la Figura 2).

Las emisiones correspondientes al manejo de RAC en campo se estimaron en 317 kg CO₂e/ha (representado por Gestión de Residuos en la Figura 2), relacionados al aporte de residuos agrícola de cosecha y su conservación en la superficie del suelo, su contenido de N y proceso de mineralización.

Los autores Acreche y Valeiro (2013) analizaron dos sistemas tecnológicos aplicados: bajo/medio (rendimiento cultural medio de 60 t/ha, cosecha manual y mecanizada) y medio/alto (rendimiento cultural medio de 68 t/ha y cosecha mecanizada) en Argentina. En dicho estudio se estimaron 1824 y 2231 kg CO₂e/ha/año, correspondientes a 30,4 kg CO₂e/t caña y 32,8 kg CO₂e/t caña para el sistema bajo/medio y medio/alto, respectivamente. Por su parte Macedo *et al.* (2008) estimó las emisiones de GEI para la producción de bioetanol a partir de caña de azúcar en Brasil con valores de 35,5 kg CO₂e/t caña y proyecciones de 29,6 kg CO₂e/t caña en 2020 durante la etapa agrícola. Resultados similares fueron reportados por De Figueiredo (2011) en Brasil.

Las emisiones correspondientes al empleo de los fertilizantes están influenciadas por condiciones ambientales y edáficas, la composición y la dosis del fertilizante empleado, así como por las prácticas de fertilización. Por ello, es posible encontrar reportes internacionales con resultados contrastantes (Rahman *et al.*, 2021; Harty *et al.*, 2016).

Cabe destacar que los reportes citados presentan algunas diferencias referidas a los sistemas estudiados que comprenden el uso exclusivo de urea y de fertilizantes con P, por ejemplo. Además, estos reportes se basaron en estudios complejos que implicaron un relevamiento exhaustivo en cada etapa de la actividad considerada y un relevamiento a escala regional.

En la Figura 3 se presenta el porcentaje de emisiones correspondiente a las labores agrícolas y el consumo de combustible diésel asociado.

Se destaca claramente el rol preponderante de la cosecha mecanizada en verde debido al elevado consumo de diésel (1,8 – 2 lt diésel/t caña cosechada para el frente de cosecha completo), representando entre 56,3% y 60,3% del total de emisiones por consumo de combustible diésel en el caso del sistema 1 y en el caso del sistema 2, respectivamente.

Sin embargo, resulta interesante destacar la diferencia en aporte de emisiones según el tipo de fertilizante usado:

- **En el Sistema 1:** al emplear CAN, la participación porcentual es 0,8% respecto del total originado por el uso de combustible. Dicho valor favorable se basa en la capacidad de trabajo de los equipos de fertilización neumáticos (abarcando múltiples surcos de cultivo por cada paso de maquinaria) con una baja demanda de potencia.

- **En el Sistema 2:** al emplear urea, la participación es de 7,8%, valor asociado a una aplicación de producto incorporado en el suelo con una menor capacidad de trabajo y mayor demanda de potencia.

CONCLUSIONES

Los resultados manifiestan una disminución en la estimación de emisiones de GEI asociados al uso de una práctica de fertilización alternativa empleando CAN como fuente de nitrógeno. Se combinan beneficios propios de su etapa de producción y uso en campo, ventajas agronómicas que permiten el uso de menos unidades de N y operativas durante su etapa de aplicación. Además, se observa la relevancia que adquiere en ambos sistemas

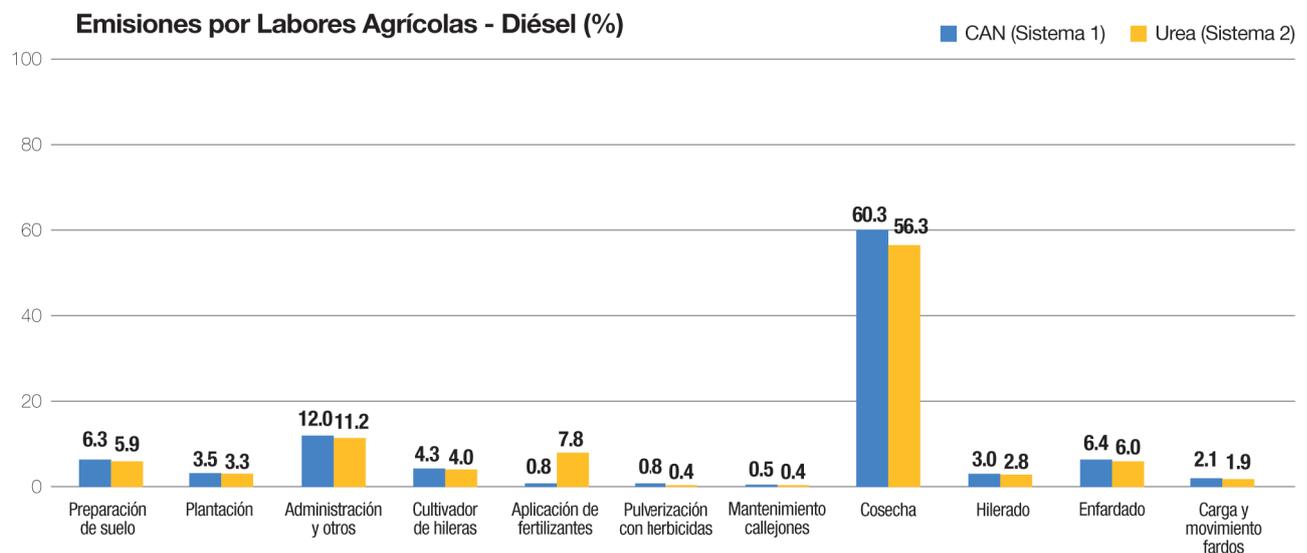


Figura 3. Porcentaje de emisiones de GEI correspondientes a las labores agrícolas y su consumo de combustible diésel asociado.

el uso de energía a través del combustible diésel, lo que hace necesario un adecuado dimensionamiento del parque de maquinaria, así como el control constante y la optimización de las operaciones agrícolas.

La herramienta CFT presenta ciertas limitaciones para el ajuste del análisis, pero se destaca su facilidad de empleo para el sector agrícola en general, siendo un recurso de fácil acceso y con información adecuadamente organizada para su análisis. Si bien los resultados no reemplazan un estudio más amplio como es un análisis de ciclo de vida, esta aplicación de la herramienta ofrece resultados útiles para la optimización de prácticas agrícolas. Además, resulta interesante plantear su empleo de manera previa a la realización de operaciones para poder realizar ajustes bajo un enfoque de sustentabilidad.

A fin de contribuir al mejor ajuste de los resultados obtenidos por modelos, queda manifiesta la necesidad de obtener datos locales de series de tiempo prolongadas.

El presente trabajo se desarrolló en el marco de un convenio de I+D+i entre Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres y YARA Argentina.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Acreche, Martín M. & Valeiro, Alejandro H., 2013.** "Greenhouse gases emissions and energy balances of a non-vertically integrated sugar and ethanol supply chain: A case study in Argentina," *Energy*, Elsevier. 54(C): 146-154. DOI: 10.1016/j.energy.2012.12.046
- Adeel, A.; P. Smith; S. H. Vetter; S. S. Otari & A. S. Jadhav 2025.** Assessing greenhouse gas emissions and energy consumption from 15 sugar cane farms in Karvir taluka, India using the cool farm tool. *Environmental Progress & Sustainable Energy*. <https://doi.org/10.1002/ep.14612>
- Aybar Guchea, M.; S. Ostengo; M. A. Espinosa; P. Medina; J. Díaz; E. Chavanne; D. Costilla y M. I. Cuenya. 2020.** Reporte Agroindustrial 195. ISSN 2346-9102.
- Alonso, J.; E. Romero y J. Scandaliaris. 2005.** Cosecha en verde de la caña de azúcar y aprovechamiento de sus residuos. *Avance Agroind.* 26 (2): 22-28.
- Bilgili, F.; E. Koçak; U. Bulut and S. Kuşkaya. 2017.** Can biomass energy be an efficient policy tool for sustainable development?. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 71: 830-845. ISSN 1364-0321.
- Casen, S. D.; E. R. Romero; J. Fernández de Ullivarri; P. Fernández González; A. Sánchez Ducca; D. Pérez; F. Soria; P. Digonzelli; L. Alonso y D. Duarte. 2011.** RAC potencialmente disponible en el área cañera de Tucumán y alternativas de enfardado. En: Resúmenes de la Reunión Técnica Nacional de la Caña de Azúcar, 17, Orán, Salta, R. Argentina, pp. 179-183.
- Chalco Vera, J.; Acreche, M. M.. 2020.** Emisiones provinciales de gases con efecto invernadero del sistema suelo-caña de azúcar de Tucumán. *RIA. Revista de investigaciones agropecuarias*, 46(3): 339-346.
- Cool Farm Alliance. 2023.** Cool Farm Tool - Technical Method Description - version CFT 2.0. Tool and description available at <https://coolfarmtool.org/>
- Crippa, M.; D. Guizzardi; F. Pagani; M. Muntean; E. Schaaf; E. Solazzo; ... & E. Vignati. 2024.** GHG emissions of all world countries (2023 report). Publications Office of the European Union. <https://doi.org/10.2760/4002897>
- De Figueiredo, E. and N. La Scala. 2011.** Greenhouse gas balance due to the conversion of sugarcane areas from burned to green harvest in Brazil. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 141 (1-2): 77-85, ISSN 0167-8809. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.02.014>.
- European Commission, Joint Research Centre, Crippa, M., Guizzardi, D., Pagani, F., Banja, M., Muntean, M., Schaaf, E., Monforti-Ferrario, F., Becker, W.E., Quadrelli, R., Risquez Martin, A., Taghavi-Moharamli, P., Köykkä, J., Grassi, G., Rossi, S., Melo, J., Oom, D., Branco, A., San-Miguel, J., Manca, G., Pisoni, E., Vignati, E. and Pekar, F. 2024.** GHG emissions of all world countries, Publications Office of the European Union. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/4002897>, JRC138862.
- Fandos, C.; P. Scandaliaris; J. Carreras Baldrés y F. Soria. 2021.** Dinámica de la cosecha de caña de azúcar en Tucumán, zafra 2021. 2021. Reporte Agroindustrial 229. ISSN 2346-9102.
- Feijóo, E. A.; R. A. Salazar; L. P. Garolera De Nucci; M. J. Tonatto y R. M. Ruiz. 2022.** Determinación de la tasa de retorno energética del RAC enfardado con fines energéticos en Tucumán. Memorias de la XXII REUNIÓN TÉCNICA SATCA 2022. 28 y 29 de noviembre de 2022.
- Golato, M.; E. Feijóo; F. Franck Colombres; D. Paz y G. Cárdenas. 2017.** Estudio preliminar del aprovechamiento de los residuos agrícolas de cosecha de la caña de azúcar como combustible adicional para calderas bagaceras de Tucumán (Argentina). *Revista industrial y agrícola de Tucumán*, 94 (2): 21-31. Recuperado en 14 de julio de 2023, de http://www.scielo.org.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1851-30182017000200003&Ing=es&Ing=es.
- Guo, C.; X. Liu & X. He. 2022.** A global meta-analysis of crop yield and agricultural greenhouse gas emissions under nitrogen fertilizer application. *Science of The Total Environment* 831, 154982.
- M. A. Harty, P.J. Forrester, C.J. Watson, K.L. McGeough, R. Carolan, C. Elliot, D. Krol, R.J. Laughlin, K.G. Richards, G.J. Lanigan. 2016.** Reducing nitrous oxide emissions by changing N fertiliser use from calcium ammonium nitrate (CAN) to urea based formulations. *Science of The Total Environment*. 563-564:576-86. ISSN 0048-9697. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.120>.
- Leggio Neme, M. F.; L. G. Alonso; P. E. 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.; J. E. A. Seabra and J. E. A. R. Silva. 2008.**

- Greenhouse gases emissions in the production and use of ethanol from sugarcane in Brazil: The 2005/2006 averages and a prediction for 2020. *Biomass and Bioenergy* 32: 582-595.
- MAyDS. 2022.** Inventario Nacional de Gases de Efecto Invernadero: Argentina 2021. ISBN 978-987-8959-10-8.
- Rahman, N.; K. Richards; M. Marty; C. J. Watson; R. Carolan; D. Krol; G. J. Lanigan and P. J. Forrester. 2021.** Differing effects of increasing calcium ammonium nitrate, urea and urea + NBPT fertiliser rates on nitrous oxide emission factors at six temperate grassland sites in Ireland. *Agriculture, Ecosystems & Environment* 313 ISSN 0167-8809. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2021.107382>.
- Romero, Eduardo R.; J. Scandaliaris; P. A. Digonzelli; L. G. Alonso; F. Leggio; J. A. Giardina; S. D. Casen; M. J. Tonattoier & J. Fernández de Ullivarri. 2009.** Effect of variety and cane yield on sugarcane potential trash. *Revista industrial y agrícola de Tucumán*, 86 (1): 9-13.
- Pörtner, H. O.; D. D. Roberts; H. Adams; C. Adler; P. Aldunce; E. Ali, E. & J. Birkmann 2022.** *Climate change 2022: Impacts, adaptation and vulnerability.* IPCC Sixth Assessment Report.
- Sachse, I. and E. Kowalewski. 2021.** Carbon and water footprint assessment of the Mauritian sugar cane sector. <https://mauritiussugar.mu/wp-content/uploads/2021/06/Report-Carbon-and-water-footprint-assessment-of-the-Mauritian-sugar-cane-sector-1.pdf>
- Tonatto, J.; P. Garolera De Nucci; E. Romero y M. Ruiz. 2019.** Use of energy in sugarcane production in Tucumán, Argentina.. Argentina. San Miguel de Tucumán. XXX ISSCT Congress Tucumán - Argentina 2019.
- Tortora M. L.; L. Vera; N. Grellet Naval; J. Fernández de Ullivarri; P. A. Digonzelli y E. R. Romero. 2013.** Effect of sugar cane trash blanketing on the development of microorganisms of agronomic and environmental interest. *Rev. ind. agríc. Tucumán* 90 (1): 61-68.



Revista Industrial
y Agrícola de
Tucumán

ISSN 0370-5404

En línea
1851-3018

Tomo 101 (2):
29-34; 2024



ESTACION EXPERIMENTAL
AGROINDUSTRIAL
OBISPO COLOMBRES
Tucumán | Argentina

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

¹ Resultados
parciales del
trabajo de tesis de
maestría del Ing.
Marcos A. Golato.

Fecha de
recepción:
04/12/2023

Fecha de
aceptación:
02/07/2025

Variación de las temperaturas de fusión de cenizas de bagazo y residuos de cosecha de la caña de azúcar de Tucumán, Argentina en función de sus componentes mayoritarios¹

Marcos Golato*, Cynthia E. Gutiérrez*, G. del H. Zamora Rueda*, Norma Kamiya**, Dora Paz* y Marcelo Ruiz*.

* Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales, EEAOC. ** Sección Química de los Productos Agroindustriales.
Email: mgolato@eeaoc.org.ar

RESUMEN

El proceso de formación de los residuos inorgánicos depende principalmente del tipo de combustible, la composición química, la temperatura del hogar de la caldera, el tipo de atmósfera, el tamaño y forma de las partículas, etc. Las propiedades físicas resultantes de las cenizas establecen si las mismas se adherirán a las superficies de transferencia de calor o serán arrastradas por el interior de la caldera hasta su descarga por la chimenea. Además, la aerodinámica del horno puede desempeñar un papel en el proceso de deposición de estos residuos, independientemente del tipo de calentamiento que se esté produciendo. En estudios previos se procesaron 30 muestras de bagazo provenientes de ingenios azucareros y 30 muestras de RAC recolectadas de campos cañeros de la provincia de Tucumán, Argentina, para la variedad de caña LCP 85-384, durante las zafas azucareras de 2016 a 2019, en ellos se determinaron los componentes mayoritarios encontrados en las cenizas de estas biomásas (Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 y SO_3). En el presente estudio se analizó la fusibilidad de estas cenizas, según ASTM D1865, en función de los elementos mayoritarios encontrados. Además, se determinaron los componentes ácidos (CA) y básicos (CB) en cenizas, y se obtuvieron correlaciones para la temperatura de fusión inicial (DT) para diferentes concentraciones de los elementos químicos presentes en ellas. En cenizas de bagazo se obtuvo en promedio 86,7% de CA y 13,3% de CB, alcanzando una DT mínima de 979°C. Para el caso del RAC, la DT mínima fue de 962°C para una proporción promedio de 67,8% de CA y 32,2% de CB. Se obtuvieron curvas de correlación para la fusibilidad de ceniza de bagazo y RAC de caña de azúcar, que podrían ser útiles para mejorar la regulación y control de los generadores de vapor de la industria azucarera, considerando la calidad de las cenizas del combustible utilizado.

Palabras clave: biomasa residual, bioenergía, combustibles para calderas.

ABSTRACT

Variation of melting temperatures of sugarcane bagasse and agricultural harvest residue ashes from tucumán, argentina, based on their major components

The formation process of inorganic residues mainly depends on the type of fuel, chemical composition, boiler furnace temperature, type of atmosphere, composition, size, and shape of the particles, etc. The resulting physical properties of the ashes determine whether they will adhere to heat transfer surfaces or be carried through the interior of the boiler until they are discharged through the chimney. Additionally, the furnace's

aerodynamics can play a role in the deposition process of these residues, regardless of the type of heating taking place. This paper provides information on the fusibility characteristics of bagasse ashes and sugarcane harvest residues (SCR) based on their elemental chemical composition for efficient management in steam boilers. In previous studies, 30 bagasse samples from sugar mills and 30 SCR samples collected from sugarcane fields in the province of Tucumán, Argentina, were processed during the 2016 to 2019 sugar harvests. All analyzed samples belonged to the LCP 85-384 cane varieties. Ash fusibility studies were conducted according to ASTM D1865, based on the major elemental components found in them (Fe_2O_3 , CaO , MgO , Na_2O , K_2O , SiO_2 , Al_2O_3 , TiO_2 , and SO_3). Additionally, acidic (AC) and basic (BC) components in the ashes were determined, and correlations were obtained for the initial fusion temperature (DT) for different concentrations of the chemical elements in them. Bagasse ash gave an average of 86.7% CA and 13.3% CB, reaching a minimum DT of 979°C. For RAC, the minimum DT was 962°C, with an average ratio of 67.8% CA and 32.2% CB. Correlation curves were obtained for the ash fusibility of bagasse and sugarcane RAC, which could help improve regulation and control of steam generators in the sugar industry, by considering the quality of ash from the fuel used.

Key words: residual biomass, bioenergy, boiler fuels.

INTRODUCCIÓN

Las impurezas que acompañan a los combustibles son responsables del mantenimiento adicional, la reducción de la tasa de transferencia de calor y la corrosión en los generadores de vapor (Bryers, 1996). La naturaleza y la gravedad de la formación de depósitos por ensuciamiento y escoriación de cenizas fueron modificándose a medida que cambiaban los combustibles y sus impurezas. Además, el proceso de generación de vapor experimentó cambios a lo largo del tiempo, resultando calderas de vapor de mayor tamaño y eficiencia, por lo que fue necesario utilizar materiales más resistentes y aplicar mejores controles en los servicios de suministro de agua y combustible, con el objetivo de preservar la integridad de los equipos y prolongar su vida útil.

La norma ASTM D-1857 es un método de evaluación predictivo tradicional y constituye la base de las técnicas tradicionales de predicción del comportamiento de las cenizas (ASTM, 2010). No obstante, es necesario realizar experiencias prácticas adicionales para establecer la relación exacta de las pruebas de fusibilidad con la composición química real del combustible que se quema en el hogar de una caldera de vapor.

El proceso de formación de los residuos inorgánicos depende principalmente del tipo de combustible, la temperatura de la partícula, su composición, tamaño y forma, el tipo de atmósfera, etc. (Chong *et al.*, 2019). Las propiedades físicas resultantes de las cenizas establecen, en general, si se adherirán a las superficies de transferencia de calor. Además, la aerodinámica del horno puede desempeñar un papel en el proceso de deposición de estos residuos, independientemente del tipo de calentamiento que se esté produciendo (Niu *et al.*, 2016). Vamvuka y Zografos (2004) indicaron que para temperaturas de combustión elevadas aumenta la vaporización de algunas especies minerales incluidas en las cenizas, de modo que a 900°C estas se vuelven ricas en la mayoría de los óxidos, mientras se tornan más pobres en algunos compuestos, por ejemplo, el K_2O , ya que este compuesto y sus derivados son relativamente más volátiles. Además, observaron

que parte del azufre (S) se convierte en fase vapor y se libera hasta los 780°C.

Propiedades ácidas y básicas de las cenizas

Las características ácidas o básicas de las cenizas están relacionadas con su reactividad y su capacidad para formar compuestos ácidos (CA) o básicos (CB), lo cual depende de la forma en que se encuentran, de la presencia y la cantidad de otros componentes químicos y de la atmósfera que las rodea. Algunos metales, como el aluminio (Al) y el hierro (Fe), pueden formar compuestos ácidos cuando se oxidan en presencia de agua o ácido sulfúrico (Abbassi *et al.*, 2009). Otros metales, como el calcio (Ca), el magnesio (Mg), el sodio (Na) y el potasio (K), son comúnmente encontrados en forma de óxidos o hidróxidos en las cenizas y pueden tener propiedades básicas (Melissari, 2014). El silicio (Si) puede formar compuestos ácidos en ciertas condiciones, esto no significa que las cenizas que contienen Si sean necesariamente ácidas. La acidez o la basicidad de las cenizas dependen de la composición química total de las mismas, así como de las condiciones ambientales en las que se encuentran (Kleinhans *et al.*, 2018). En los sistemas a base de carbón, el Fe juega un papel importante en las propiedades de los depósitos de cenizas, ya que actúa como un eficaz fundente para los materiales formados por silicatos. En particular, el estado de oxidación del Fe en estos materiales es sensible a las condiciones de la atmósfera que los rodea, prevaleciendo el óxido férrico (Fe_2O_3) en condiciones oxidantes y formándose cantidades crecientes de óxido ferroso (FeO) en condiciones reductoras. El FeO incorporado a los silicatos conduce a puntos de fusión más bajos que el Fe_2O_3 . Las formas típicas del Fe en la estructura química de un combustible incluyen sulfuros como la piritita (FeS_2), sulfatos, óxidos, silicatos y carbonatos (Chambon *et al.*, 2018; Miles *et al.*, 1995).

Composición mayoritaria de las cenizas de bagazo y RAC de caña de azúcar

Golato *et al.* (2024) determinaron los elementos mayoritarios en cenizas de bagazo y RAC de caña de

azúcar de Tucumán, Argentina. La Figura 1 muestra estos resultados. Puede verse que la mayor proporción de componentes está dada por la sílice (SiO_2), seguida por Al_2O_3 y K_2O para el bagazo, y por CaO y K_2O para el residuo agrícola de cosecha (RAC).

Asimismo, estudios previos determinaron correlaciones entre los componentes mayoritarios encontrados en cenizas de bagazo y de RAC de la caña de azúcar de Tucumán, Argentina, y las temperaturas de fusión de las cenizas correspondientes (Golato, 2021; Golato *et al.*, 2021). La Tabla 1 muestra un resumen de estas correlaciones propuestas para diferentes concentraciones de componentes básicos (%CB) en cenizas fortificadas de bagazo y RAC de caña de azúcar en función de la atmósfera circundante, que puede ser oxidante (AO) o reductora (AR).

El objetivo del presente estudio fue evaluar la in-

fluencia de los componentes mayoritarios (CA y CB) encontrados en cenizas de bagazo y RAC de caña de azúcar de Tucumán, Argentina, sobre la fusibilidad de aquellas. Este trabajo podría proporcionarles a los operadores de salas de calderas una herramienta para mejorar el control y la regulación del generador de vapor, permitiéndoles tomar decisiones más eficientes en sus tareas diarias.

MATERIALES Y MÉTODOS

A partir de análisis realizados en estudios anteriores (Golato, 2021; Golato *et al.*, 2021), durante las zafras azucareras comprendidas entre 2016 y 2019 se procesaron 30 muestras de bagazo provenientes de ingenios azucareros y 30 muestras de RAC recolectadas de campos cañeros de la provincia de Tucumán, Argentina. Todas las

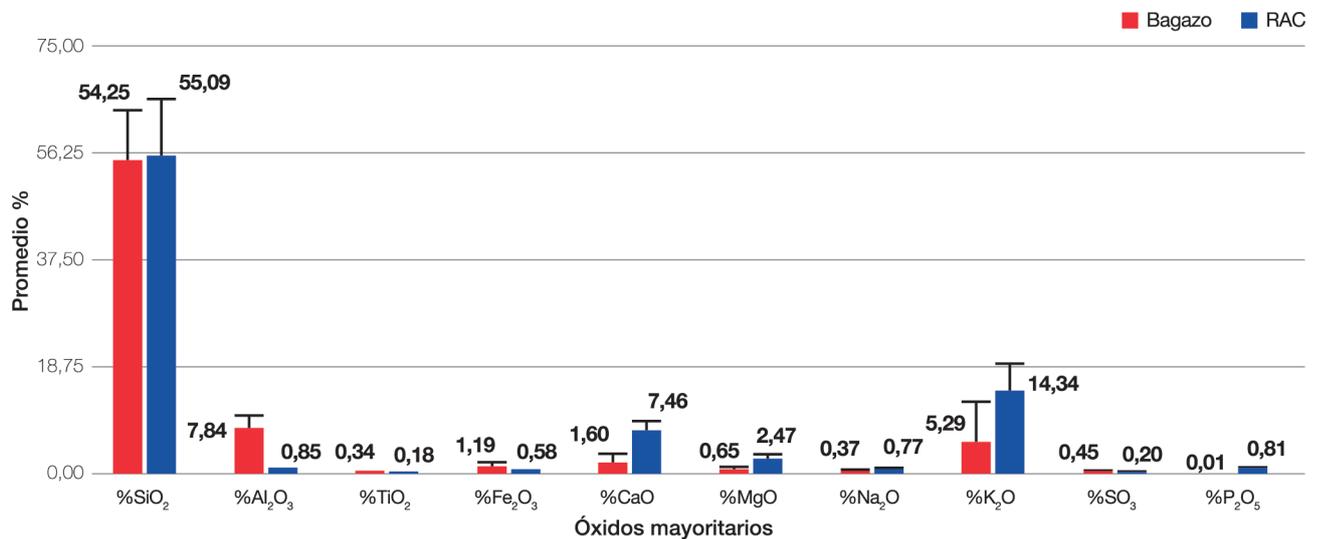


Figura 1. Composición química promedio de cenizas de bagazo y RAC de Tucumán, Argentina, según Golato *et al.* (2024).

Tabla 1. Correlaciones de fusibilidad de cenizas de bagazo y RAC en función de %CB y tipo de atmósfera circundante, adaptado de Golato (2021).

| Tipo de biomasa | Tipo de atmósfera | Temperatura s/ ASTM D1857 | Correlación con %CB | R ² |
|-----------------|-------------------|---------------------------|--|----------------|
| Bagazo | AO | FT°C | $= -13,953.(\%CB)^2 + 1492,6.\%CB + 1354,5$ | 0,2619 |
| | | HT°C | $= 13,035.(\%CB)^2 - 26,69.\%CB + 1386,5$ | 0,0673 |
| | | ST°C | $= 33,333.(\%CB)^2 - 81,1857.\%CB + 1354,5$ | 0,3357 |
| | | DT°C | $= 217,1.(\%CB)^2 - 222,57.\%CB + 1092,9$ | 0,2666 |
| | AR | FT°C | $= -108,53.(\%CB)^2 + 148,7.\%CB + 1408,7$ | 0,2749 |
| | | HT°C | $= -149,52.(\%CB)^2 + 242,57.\%CB + 1303,9$ | 0,7312 |
| | | ST°C | $= -124,82.(\%CB)^2 + 213,5.\%CB + 1261,5$ | 0,4999 |
| | | DT°C | $= 277,39.(\%CB)^2 - 300,44.\%CB + 1011,7$ | 0,4007 |
| RAC | AO | FT°C | $= -25,064.(\%CB)^2 + 12,267.\%CB + 1484,5$ | 0,2874 |
| | | HT°C | $= -59,98.(\%CB)^2 + 45,602.\%CB + 1348,9$ | 0,1473 |
| | | ST°C | $= 147,24.(\%CB)^2 - 158,13.\%CB + 1267$ | 0,2300 |
| | | DT°C | $= 349,94.(\%CB)^2 - 367,02.\%CB + 1169,6$ | 0,5780 |
| | AR | FT°C | $= 357,06.(\%CB)^2 - 402,37.\%CB + 1533,6$ | 0,5657 |
| | | HT°C | $= 184,03.(\%CB)^2 - 135,88.\%CB + 1269,5$ | 0,0998 |
| | | ST°C | $= -89,649.(\%CB)^2 - 57,024.\%CB + 1128,9$ | 0,2129 |
| | | DT°C | $= 253,51.(\%CB)^2 - 243,87.\%CB + 1014,3$ | 0,6078 |

muestras pertenecían a la variedad de caña LCP 85-384. En el presente estudio se consideró que las cenizas (CZ) se encuentran constituidas por componentes básicos (CB) y componentes ácidos (CA), según la ecuación Ec. 1.

Ecuación 1

$$100\% CZ = (\%CB|_{cz} + \%CA|_{cz} + \%Otros|_{cz})$$

Donde:

$\%CB|_{cz}$: porcentaje de CB en la muestra de ceniza original, definido como:

Ecuación 2

$$\%CB|_{cz} = \sum (\%Fe_2O_3 + \%CaO + \%MgO + \%Na_2O + \%K_2O + \%P_2O_5)$$

$\%CA|_{cz}$: porcentaje de CA en la muestra de ceniza original, definido como:

Ecuación 3

$$\%CA|_{cz} = \sum (\%Al_2O_3 + \%SiO_2 + \%TiO_2)$$

$\%Otros|_{cz}$: porcentaje de indeterminados en la muestra original.

Con el objetivo de eliminar la influencia numérica del porcentaje de elementos indeterminados de la muestra de ceniza original ($\%Otros|_{cz}$), se corrigieron las proporciones de los óxidos correspondientes en relación a la masa total de los mismos por medio de Ec.4.

Ecuación 4

$$\%Óxido|_{corr.} = \frac{\%Óxido}{(100 - \%OtrosVcz)}$$

De esta manera la Ec.1 quedó definida como indica la ecuación Ec.5:

Ecuación 5

$$CZ|_{corr.} = (\%CB|_{czcorr.} + \%CA|_{czcorr.}) = 100\%$$

Además, para considerar la influencia de CA y CB en la fusibilidad de las cenizas de bagazo y RAC de caña de azúcar, se fortificaron muestras de cenizas de las biomásas en estudio con el agregado de óxidos comerciales puros, manteniendo iguales relaciones de CB y CA a los encontrados en cenizas de las biomásas originales. La Tabla 2 muestra las proporciones consideradas de CA y CB, de manera de obtener una variación representativa de todas las posibilidades de concentración de óxidos que se podrían presentar en las biomásas en estudio.

Para el caso del 100% de CA y 100% de CB, se formularon directamente con los compuestos puros proporcionados en igual relación a los encontrados en cenizas originales. En total se formularon 11 muestras de cenizas fortificadas de bagazo y 11 muestras de cenizas fortificadas de RAC, a las cuales luego se les realizó un análisis de fusibilidad en atmósfera oxidante (AO) y en at-

mósfera reductora (AR), siguiendo la metodología ASTM D1857. Además, se consideró como temperatura crítica la temperatura de inicio de fusión (DT), por ser la temperatura más baja que define el comienzo de la fusión de las cenizas.

Las cantidades en masa de estos elementos se determinaron por medio de las ecuaciones Ec.6 y Ec.7.

Ecuación 6

$$gCA|_{czcorr.} = (gSiO_2 + gAl_2O_3 + gTiO_2)$$

Ecuación 7

$$gCB|_{czcorr.} = (gFe_2O_3 + gCaO + gMgO + gNa_2O + gK_2O + gP_2O_5)$$

La determinación de la cantidad porcentual de CB en las cenizas de las biomásas ($\%CB$) se realizó por medio de la ecuación Ec.8.

Ecuación 8

$$\%CB = [(\sum CB) / (CB + CA)] \cdot 100$$

A partir de los datos de la Figura 1 y las proporciones indicadas en la Tabla 2 para las muestras de bagazo y RAC en estudio y, además, considerando las correlaciones de DT en AO y AR indicadas en Tabla 1, se elaboró un gráfico que muestra las variaciones de la temperatura DT en función de $\%CB$ para las mencionadas biomásas en estudio de Tucumán, Argentina.

Tabla 2. Variación de la composición de CA y CB en mezclas fortificadas de cenizas para las biomásas en estudio. Elaboración propia.

| Mezcla | Composición de la mezcla |
|---------------------------|---|
| 100% M1 _{Sint} | 100% CA _{Sint} |
| 100% M2 _{Sint} | 90% CA _{Sint} + 10% CB _{Sint} |
| 100% M3 _{Sint} | 80% CA _{Sint} + 20% CB _{Sint} |
| 100% M4 _{Sint} | 70% CA _{Sint} + 30% CB _{Sint} |
| 100% M5 _{Sint} | 60% CA _{Sint} + 40% CB _{Sint} |
| 100% M6 _{Sint} | 50% CA _{Sint} + 50% CB _{Sint} |
| 100% M7 _{Sint} | 40% CA _{Sint} + 60% CB _{Sint} |
| 100% M8 _{Sint} | 30% CA _{Sint} + 70% CB _{Sint} |
| 100% M9 _{Sint} | 20% CA _{Sint} + 80% CB _{Sint} |
| 100% M10 _{Sint} | 10% CA _{Sint} + 90% CB _{Sint} |
| 100% M11 _{Si} | 100% CB |

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Figura 2 muestra los CA y CB determinados a partir de la composición química mayoritaria encontradas en cenizas de bagazo y RAC de caña de azúcar de la variedad de caña LCP 85-384 en Tucumán según Golato *et al.* (2024). Se puede observar que el RAC posee un mayor contenido de CB en relación al bagazo (26,63% vs. 9,56%), lo que representa porcentualmente, en relación al total de elementos un %CB de 32,2% y de 13,3%, respectivamente.

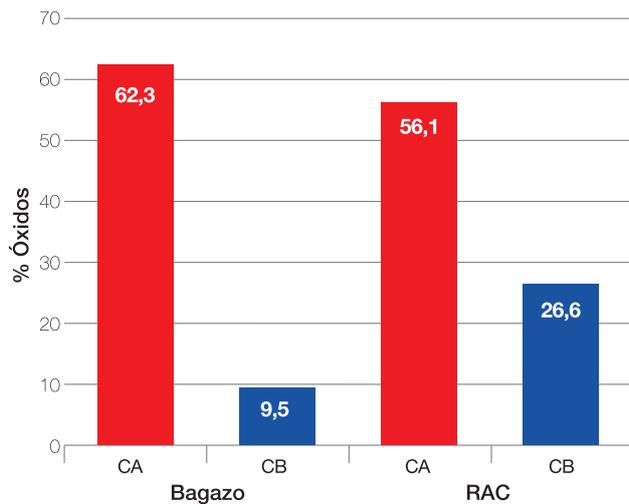


Figura 2. Componentes ácidos (CA) y básicos (CB) en cenizas de bagazo y RAC de Tucumán, Argentina.

La Figura 3 muestra para AO (líneas de trazo) y AR (líneas continuas) las curvas de correlación de fusibilidad de ceniza vs. concentración de CB en conjunto para bagazo y RAC de caña de azúcar de la variedad de caña LCP 85-384 en Tucumán. Si consideramos la concentración total promedio de %CB encontrado en cenizas de

bagazo de este estudio (13,3%) y las de RAC (32,2%), interceptando verticalmente con las curvas correspondientes a estas biomásas para AR y AO encontraríamos de manera aproximada las temperaturas de inicio de fusión DT. Para el bagazo en estudio sería de 979°C en AR y de 1069°C en AO, como se indica en la figura. En este caso, la amplitud máxima de fusibilidad por cambio en la atmósfera ($DT_{Bzo}^{AO} - DT_{Bzo}^{AR}$) resultaría de 90°C. De igual manera, para el caso del RAC, con %CB en cenizas de 32,2%, las temperaturas DT aproximadas en AO y en AR serían de 1088°C y 962°C, respectivamente. La amplitud máxima de fusibilidad por cambio en la atmósfera ($DT_{RAC}^{AO} - DT_{RAC}^{AR}$) resultaría de 126°C para la composición química determinada en cenizas de RAC. Estos resultados muestran en promedio una mayor amplitud de fusibilidad para las cenizas de RAC en relación al bagazo (126°C vs. 90°C). Esto indicaría en principio que ante un cambio de atmósfera, de AO a AR en el interior del hogar de una caldera, el RAC tendría un mejor comportamiento frente al bagazo, ya que la curva de variación de DT en función de CB% para el RAC se encuentra por arriba de la curva de DT para bagazo en AR.

No obstante, para la composición química encontrada en RAC (CB% = 32,2%), la DT promedio resultó menor en comparación con la DT del bagazo (962°C vs. 979°C), lo que implicaría un riesgo de inicio de fusión de las cenizas de RAC para esa concentración de %CB. Asimismo, el bagazo de caña de azúcar tendría una mayor probabilidad de alcanzar temperaturas críticas respecto al RAC para iguales concentraciones de %CB. Por consiguiente, resultaría conveniente desde este punto de vista utilizar mezclas de bagazo y RAC para atenuar el bajo nivel de fusibilidad del bagazo en similares condiciones de concentración de óxidos.

CONCLUSIONES

Para las muestras de la variedad de caña de azúcar LCP 85-384 estudiadas, las cenizas del RAC poseen

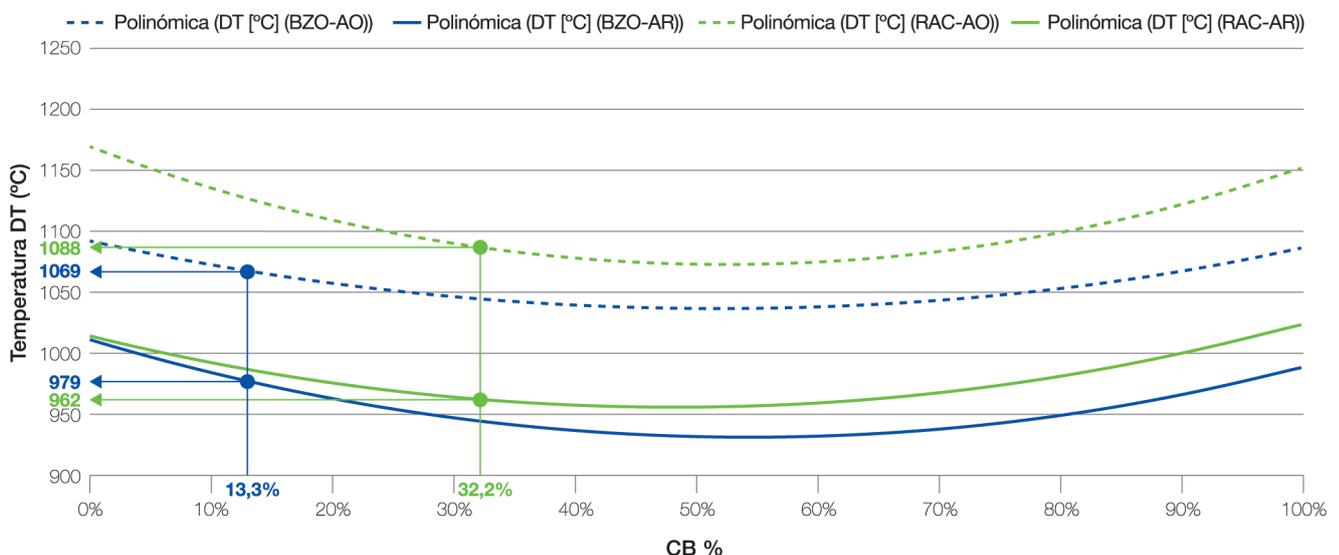


Figura 3. Curva de fusibilidad de cenizas de bagazo y RAC de la variedad de caña de azúcar LCP 85-384 de Tucumán, Argentina.

un mayor rango de amplitud de fusibilidad en relación a las cenizas del bagazo (126°C vs 90°C) cuando los combustibles trabajan entre atmósferas oxidantes (con exceso de aire) y reductoras (con deficiencia de oxígeno). Si se considera a la temperatura de DT como temperatura crítica, el RAC de caña de azúcar resultaría más flexible a los cambios de atmósfera en el interior del hogar de una caldera de vapor. No obstante, debido al mayor contenido de %CB en sus cenizas (32,2%) en relación al bagazo (13,3%), el RAC alcanzaría primero el estado inicial de fusión en AR. En el futuro se podría evaluar diferentes mezclas de bagazo y RAC con el fin de encontrar su mejor proporción para lograr componentes en las cenizas que generen niveles de fusibilidad aceptables.

■ AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Fca. Gabriela Juárez y a la Lic. Raquel Dellmans, de la Sección Química de los Productos Agroindustriales, por su colaboración en las determinaciones analíticas de las cenizas de bagazo y RAC; y al Dr. Ing. Agr. Eduardo Romero y al Ing. Agr. Sergio Casen, de la Sección Agronomía de Caña de Azúcar, por su colaboración en el muestreo de RAC de los diferentes campos cañeros de la provincia de Tucumán.

■ BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Abbassi, R.; F. Khan & K. Hawboldt. 2009.** Prediction of minerals producing acid mine drainage using a computer-assisted thermodynamic chemical equilibrium model. *Mine Water and the Environment*, 28 (1), 74-78. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s10230-008-0062-4>
- ASTM D1857-04. 2010.** Standard Test Method for Fusibility of Coal and Coke Ash. American Society for Testing and Materials (ASTM). 100 Barr Harbor Drive, PO Box C700, West Conshohocken, PA 19428-2959. USA.
- Bryers, R. W. 1996.** Fireside slagging, fouling, and high-temperature corrosion of heat-transfer surface due to impurities in steam-raising fuels. *Progress in Energy and Combustion Science* 22 (1) 1996: 29-120. Disponible en: <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0360128595000127>. Consultado 13/03/23.
- Chambon, C. L.; T. Y. Mkhize; P. Reddy; A. Brandt-Talbot; N. Deenadayalu; P. S. Fennell and J. P. Hallett. 2018.** Pretreatment of South African sugarcane bagasse using a low-cost protic ionic liquid: a comparison of whole, depithed, fibrous and pith bagasse fractions. *Biotechnol Biofuels* 11: 247. Disponible en: <https://biotechnologyforbiofuels.biomedcentral.com/track/pdf/10.1186/s13068-018-1247-0.pdf>. Consultado 12/03/23.
- Chong, H.; J. Bai; A. Ilyushechkin; H. Zhao; L. Kong; H. Li; Z. Bai; Z. Guo and W. Li. 2019.** Effect of chemical composition on the fusion behaviour of synthetic high-iron coal ash. *Fuel* (253): 1465-1472. ISSN 0016-2361, Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2019.05.135>. Consultado 14/02/23.
- Golato, M. A.; C. E. Gutiérrez; G. del H. Zamora Rueda; G. Juárez; N. Kamiya; D. Paz y M. Ruiz. 2024.** Características de las cenizas de bagazo y de residuos agrícolas de cosecha de la caña de azúcar (RAC) de Tucumán, Argentina. *Revista industrial y agrícola de Tucumán*, en prensa.
- Golato, M. A.; G. Zamora Rueda; C. Gutiérrez; M. G. Mistretta; D. Paz y M. Ruiz. 2021.** Características de la fusibilidad de cenizas de bagazo y de residuos de cosecha de caña de azúcar (RAC) de Tucumán - Argentina. *Revista industrial y agrícola de Tucumán* 98 (2): 21-27.
- Golato, M. A., 2021.** Estudio de la variación de la temperatura de fusión de cenizas de calderas de biomasa en función de sus componentes ácidos y básicos. Tesis de Maestría en Ingeniería Bioenergética. Facultad Regional Tucumán. Universidad Tecnológica Nacional. Disponible en: <https://ria.utn.edu.ar/xmlui/handle/20.500.12272/6079>. Consultado 16/02/23.
- Kleinhans, U.; C. Wieland; F. J. Frandsen and H. Spliethoff. 2018.** Ash formation and deposition in coal and biomass fired combustion systems: Progress and challenges in the field of ash particle sticking and rebound behavior, *Progress in Energy and Combustion Science* 68: pp. 65-168. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.pecs.2018.02.001>.
- Melissari, B. 2014.** Problemas relacionados a cenizas de biomasa con alto contenido de sales alcalinas y su mitigación. *Ingeniería* (12): 31-44.
- Miles, T. R.; T. R. Miles Jr.; L. L. Baxter; R. W. Bryers; B. M. Jenkins and L. L. Oden. 1995.** Alkali deposits found in biomass power plants. National Renewable Energy Laboratory, US Department of Energy. Disponible en: <https://www.nrel.gov/docs/legosti/fy96/8142v1.pdf>. Consultado 12/03/23.
- Niu, Y.; H. Tan and S. Hui. 2016.** Ash-related issues during biomass combustion: Alkali-induced slagging, silicate melt-induced slagging (ash fusion), agglomeration, corrosion, ash utilization, and related countermeasures. *Progress in Energy and Combustion Science* 52 (2016): 1-61. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.pecs.2015.09.003>. Consultado 16/03/23.
- Vamvuka; D. and D. Zografos. 2004.** Predicting the behaviour of ash from agricultural wastes during combustion. *Fuel* 83: 2051-2057. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0016236104001358>. Consultado 12/03/23.



Revista Industrial
y Agrícola de
Tucumán

ISSN 0370-5404

En línea
1851-3018

Tomo 101 (2):
35-44; 2024



ESTACION EXPERIMENTAL
AGROINDUSTRIAL
OBISPO COLOMBRES
Tucumán | Argentina

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

Desarrollo y optimización de un método de Digestión Húmeda para estudio de la calidad industrial de caña de azúcar

Natalia Sorol*, Paula Diez* y Oscar Diez**

* Sección Química de Productos Agroindustriales. EEAOC; **Sección Ingeniería y Proyectos. EEAOC.
Email: nrsorol@eeaoc.org.ar

RESUMEN

La evaluación precisa de la calidad de la caña de azúcar es clave para optimizar la eficiencia industrial en la producción de azúcar y alcohol. En este contexto, las metodologías rápidas, confiables y adaptables a los recursos disponibles adquieren especial relevancia, especialmente en regiones productoras como Tucumán, Argentina. El objetivo de este trabajo fue desarrollar y optimizar un método de digestión húmeda como alternativa al método tradicional de prensa hidráulica para la determinación de variables de calidad que permite obtener simultáneamente Pol%caña, Brix%caña, Humedad%caña, Fibra%caña y azúcares reductores totales (ART%caña) a partir de una única muestra de caña desfibrada, utilizando equipamiento doméstico adaptado. Se optimizó el proceso de digestión, con una licuadora de alta potencia, estableciendo como condiciones óptimas 200 g de muestra, 800 g de agua y 5 minutos de licuado, con un error promedio de 2,11% en pureza. Se validó la metodología mediante comparación con el método de prensa hidráulica, obteniendo alta correlación ($R^2 > 0.90$) para Pol y fibra. Para la humedad, se demostró la equivalencia entre el método convencional por estufa y la alternativa por microondas. En cuanto a fibra, se optimizó la técnica de difusión en bolsa utilizando un lavarropas automático. Como aporte metodológico original, se incorporó la determinación directa de ART%caña desde el extracto de digestión húmeda, una variable relevante que no se mide habitualmente y que refleja el contenido total de azúcares disponibles. Esta metodología representa una alternativa accesible, robusta y reproducible para el análisis directo de calidad de caña en laboratorios regionales, con potencial para mejorar la toma de decisiones industriales e integrarse a tecnologías emergentes como NIRS.

Palabras clave: calidad, método directo, control industrial, ART.

ABSTRACT

Development and Optimization of a Wet Digestion Method for the Study of Industrial Quality in Sugarcane

Precise evaluation of sugarcane quality is key to optimizing industrial efficiency in sugar and alcohol production. In this context, rapid, reliable, and resource-adapted methodologies are especially relevant, particularly in producing regions such as Tucumán, Argentina. The objective of this study was to develop and optimize a wet digestion method an alternative to the traditional hydraulic press method for the determination of quality variables. This approach enables the simultaneous measurement of Pol%cane, Brix%cane, moisture, fiber, and total reducing sugars (ART%cane) from a single sample of defibrated cane using adapted household equipment. The digestion process was optimized using a high-power blender, establishing the optimal conditions as 200 g of sample, 800 g of water, and 5 minutes of blending, with an average purity error of 2.11%. The method was validated through comparison with the hydraulic press technique, showing high correlation ($R^2 > 0.90$) for Pol and fiber. For moisture, equivalence was demonstrated between the conventional oven-drying method and the microwave alternative. For fiber, a bag-diffusion

Fecha de
recepción:
18/10/2023

Fecha de
aceptación:
15/07/2025

technique was optimized using an automatic washing machine. As a methodological innovation, the direct determination of ART% cane from the wet digestion extract was incorporated—an important variable not routinely measured, which reflects the total sugar content available for processing. This methodology represents an accessible, robust, and reproducible alternative for direct sugarcane quality analysis in regional laboratories, with potential to enhance industrial decision-making and integrate with emerging technologies such as NIRS.

Key words: quality, direct method, industrial control, ART.

INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar constituye una de las principales materias primas utilizadas en la producción de azúcar y bioetanol a nivel mundial. Su cultivo y procesamiento industrial tienen un impacto económico y social significativo en múltiples regiones tropicales y subtropicales, como es el caso de la provincia de Tucumán, Argentina. En esta región, la actividad cañera representa uno de los pilares de la agroindustria local, involucrando tanto a productores como a ingenios y centros de investigación en un esfuerzo conjunto por mejorar la productividad y la eficiencia del sistema agroindustrial.

La calidad de la caña de azúcar procesada incide de manera directa en el rendimiento industrial de los productos finales, por lo que su evaluación precisa se ha convertido en un objetivo prioritario. Entre los parámetros más relevantes para esta evaluación se encuentran el contenido de sacarosa (Pol), los sólidos solubles totales ($^{\circ}$ Brix), los azúcares reductores totales (ART), la fibra y la humedad. Una caracterización adecuada de estos componentes no solo permite optimizar los procesos de molienda y clarificación, sino también realizar pagos más justos a los productores en base al valor real de la materia prima. Actualmente, para la cuantificación de la calidad existen numerosos métodos definidos por diversos países y laboratorios, y no hay entre ellos acuerdos que estipulen parámetros para la selección más adecuada. Esencialmente puede evaluarse de diferentes maneras; por un lado, el método indirecto, que valora a partir de las determinaciones de Pol y pureza en el jugo de primera presión; por el otro, el método directo, que analiza caña desfibrada, determinando, además de los valores en jugo, la fibra en caña (Romero *et al.*, 2009).

En el método indirecto, la evaluación de la calidad se basa en el análisis de los jugos primarios o de primera extracción. La variable más relevante es la Pol % caña, que representa la sacarosa contenida en la caña y se estima de forma indirecta a partir de la Pol del jugo, aplicando el denominado factor Java, el cual supone un valor teórico del contenido de fibra. Esta estimación indirecta introduce una fuente de error que afecta la precisión del análisis y constituye una de las principales desventajas del método. A pesar de su uso generalizado en ingenios azucareros de la provincia debido a su rapidez operativa, el método indirecto presenta limitaciones significativas, especialmente cuando la materia prima contiene niveles elevados de materia extraña (trash) o se encuentra deteriorada, condiciones que pueden alterar la relación jugo-

fibra y distorsionar los resultados obtenidos (Digonzelli *et al.*, 2015).

El método directo de calidad incluye principalmente dos alternativas: por prensa hidráulica y por digestión húmeda, ambas desarrolladas para obtener estimaciones precisas a partir de caña desfibrada, sin recurrir a factores de corrección como en el método indirecto. Este enfoque surgió con el desarrollo del desintegrador húmedo tipo Jeffco en Australia, en 1959 (Spencer-Meade, 1963), adoptado en Sudáfrica bajo la denominación Direct Analysis of Cane (DAC) (Laboratory Manual, 2005; ICUMSA, 2024), y más tarde ampliado con la incorporación de la prensa hidráulica combinada con desfibrador, promovida por M. Hoarau en la isla Reunión entre 1967 y 1968 (Fogliata, 2014). La principal ventaja de los métodos directos es que permiten conocer la composición real de la caña y su rendimiento esperado, sin necesidad de aplicar factores de fábrica, facilitando la determinación directa de Pol%caña y Fibra%caña, un constituyente clave cuya variabilidad se ha incrementado con la mecanización de la cosecha y la incorporación de trash al suministro. Esta información resulta esencial para minimizar costos, optimizar la extracción de jugo y mejorar las oportunidades de ingreso en la industria sucroalcoholera. Sin embargo, su implementación a nivel local ha sido limitada por los altos costos de los equipos industriales requeridos. En este contexto, el presente trabajo propone un método alternativo de bajo costo, accesible y reproducible, basado en el uso de licuadoras de alta potencia y equipamiento doméstico adaptado, para realizar digestión húmeda de caña desfibrada en condiciones de laboratorio regional.

El objetivo de este trabajo fue desarrollar, optimizar y validar un método directo por digestión húmeda para la determinación simultánea de Pol%caña, Brix%caña, Humedad%caña, Fibra%caña y ART%caña, evaluando su correlación con el método por prensa hidráulica. El enfoque propuesto busca mejorar la eficiencia, confiabilidad y velocidad del análisis, e incorpora la determinación de ART%caña, un parámetro de importancia industrial que actualmente no se analiza de forma rutinaria y que aporta información clave sobre la calidad de la materia prima. Este método apunta a facilitar su aplicación en laboratorios regionales y contribuir a la mejora continua de los procesos en el sector azucarero en contextos como el del Noroeste argentino. La necesidad de contar con métodos directos y precisos para evaluar la calidad de caña ha sido señalada en trabajos recientes y normativas internacionales (Shi *et al.*, 2023; ICUMSA, 2024). El método directo por digestión húmeda y sus variantes han sido validados en

diferentes países como alternativas al de prensa hidráulica tradicional (Berding & Pollock, 1982; Spencer-Meade, 1963).

MATERIALES Y MÉTODOS

1. Diseño general del estudio

Durante dos zafas consecutivas, en el Laboratorio de Investigaciones Azucareras de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEOC), se desarrolló y optimizó un método directo por digestión húmeda para evaluar variables macro de calidad en caña de azúcar: humedad, fibra, Brix, Pol y azúcares reductores totales (ART). Para validar este método, se compararon los resultados obtenidos con los del método directo por prensa hidráulica. Se utilizaron muestras representativas de caña desfibrada, preparadas a partir de 10 tallos limpios y despuntados, cosechados manualmente.

2. Preparación de la muestra

La caña se desfibró utilizando un desfibrador de martillos hasta alcanzar una apertura celular (open cell) superior al 92%. Esta muestra homogénea fue dividida en cuatro alícuotas, utilizadas para distintas determinaciones analíticas para el método por digestión húmeda. Para el método por prensa hidráulica, la caña desfibrada fue prensada a 250 kg/cm² durante 1 minuto para obtener el jugo primario.

3. Método propuesto

El método diseñado integra procedimientos para la determinación simultánea de las variables de calidad mencionadas, utilizando equipamiento accesible y adaptable a condiciones de laboratorio regional. El esquema completo del procedimiento se presenta en la Figura 1.

El procedimiento se basa en recomendaciones de manuales internacionales de referencia y normativas reconocidas en la industria (Anon, 2014; ICUMSA, 2024; AOAC, 1964), así como en estudios comparativos de métodos directos (Shi *et al.*, 2023).

Algunas de estas técnicas fueron modificadas con respecto a los métodos tradicionales de medición y

puestas a punto en el laboratorio, lo cual se describe detalladamente a continuación.

3.1 Humedad

Para la puesta a punto de la determinación de Humedad%caña (H%) por el método de microondas, se trabajó con 41 muestras. Estas fueron procesadas por duplicado en estufa (ICUMSA, 2019) y por secado a peso constante utilizando un horno de microondas.

Para el método por estufa se tomaron dos porciones representativas de aproximadamente 100 gramos de cada muestra, se pesaron y se colocaron en bandejas de aluminio; luego se secaron en una estufa eléctrica marca ORL con circulación de aire forzado, regulada a la temperatura de 105°C, hasta peso constante, durante 24 horas, para luego proceder a su pesaje, previo enfriamiento.

Para el método por microondas se tomaron dos porciones representativas de aproximadamente 100 gramos, las que fueron introducidas en un horno microondas marca Philco, modelo MPD8620N, de 220 V - 50 Hz, con una potencia máxima de 700 W y frecuencia máxima de 2450 MHz. Estas muestras se sometieron a tres ciclos de secado, cada uno de 4 minutos de duración, operando a máxima potencia, lo que resultó en un tiempo total de exposición de 12 minutos. Durante el proceso, se utilizaron recipientes planos para garantizar una distribución uniforme de la muestra. Para asegurar la homogeneidad del calentamiento después de cada ciclo de 4 minutos, se realizó una mezcla cuidadosa con una espátula metálica de superficie reducida, para evitar pérdidas de muestra debidas a la adherencia a elementos de mayor tamaño. Posteriormente, las muestras se enfriaron en un desecador y se procedió al pesaje.

Para el análisis de los resultados se realizó una regresión lineal y una comparación de medias de los resultados obtenidos con ambas metodologías mediante una prueba t para muestras pareadas con $\alpha = 0,05$ (probabilidad del 95%) utilizando el software estadístico R (R Core Team, 2023).

3.2 Fibra

En la segunda alícuota de 100 gramos se deter-

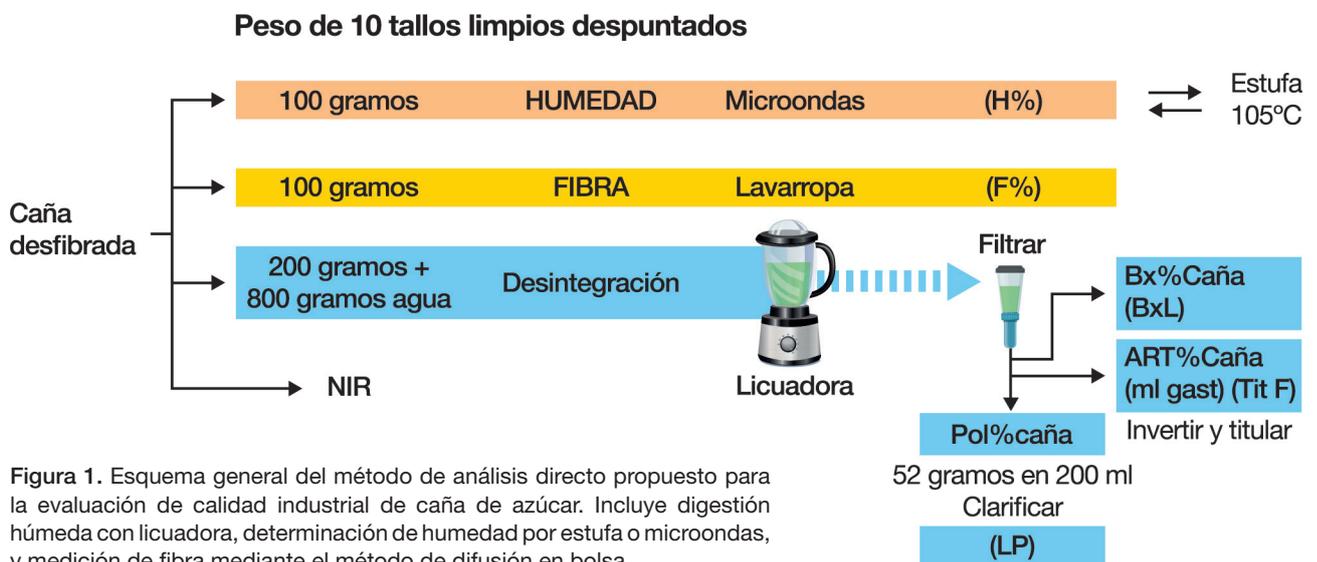


Figura 1. Esquema general del método de análisis directo propuesto para la evaluación de calidad industrial de caña de azúcar. Incluye digestión húmeda con licuadora, determinación de humedad por estufa o microondas, y medición de fibra mediante el método de difusión en bolsa.

minó Fibra%caña (F%). Existen múltiples métodos para su medición, como por ejemplo ICUMSA (ICUMSA, 2011); el método por prensa propuesto por Tanimoto (1964) y mejorado por Berding and Pollock (1982); y el método Hamna (Sanullah, 2013). Estos métodos requieren varios pasos y cálculos, y son indirectos. En cambio, el método de difusión en bolsa (bag-diffusion method) (Anon, 2014), base de este trabajo, es directo. Como evolución de esta técnica se desarrolló el equipo CFM (Cane-Fibre Machine) (Anon, 2021), que automatiza el proceso de lavado de caña desfibrada hasta eliminar completamente el Brix.

En este estudio se empleó una técnica basada en el método de difusión en bolsa, adaptada por el laboratorio, que consiste en colocar la caña desfibrada en bolsas de lienzo de algodón y someterla a un ciclo de lavado en un lavarropas automático hasta eliminar completamente los azúcares y solubles. La fibra se calcula por diferencia de pesos tras secado en estufa a 105°C hasta peso constante (basado en Diez *et al.*, 2000). Durante la etapa de puesta a punto se evaluaron dos variables principales: la cantidad de muestra y las condiciones de lavado. Para la primera, se compararon 50 g y 100 g de caña desfibrada. En cuanto al lavado, se contrastó un ciclo sin temperatura con un ciclo a 60°C. Los ensayos se realizaron por duplicado en 16 muestras para la comparación de cantidades; y en 24 muestras para la comparación de condiciones de lavado. En ambos casos, se utilizó la herramienta Solver de Excel para calcular los errores y optimizar la metodología.

.....3.3 Desarrollo del método de digestión húmeda

..... 3.3.1 Optimización de condiciones de desintegración

En la tercera alícuota se realizó la desintegración propiamente dicha o digestión húmeda. Con el objetivo de optimizar la extracción de los azúcares presentes en la caña, se realizaron pruebas sistemáticas en las que se variaron parámetros operativos: cantidad de muestra, volumen de agua, tiempo y velocidad de licuado. Estas pruebas se llevaron a cabo utilizando una licuadora Blendtec modelo Connoisseur 825 de 3,5 HP de potencia. Los resultados se compararon con los de un digestor húmedo con camisa de agua para refrigeración, similar al modelo Jeffco, que trabaja con 500 g de muestra y 2000 g de agua, considerado como referencia.

..... 3.3.2 Comparación entre licuadoras

Se evaluaron posibles diferencias entre licuadoras de diferentes marcas y potencias: una Blendtec (3,5 HP) y una Turboblender modelo TB 020 (4 HP). En ambos casos se procesaron muestras por duplicado (muestras diferentes a las utilizadas en la optimización de condiciones de desintegración) y las variables Brix, Pol y Pureza fueron comparadas para verificar la reproducibilidad del método en diferentes equipos.

..... 3.3.3 Procedimiento estándar adoptado

Como resultado de las pruebas de optimización se definió un procedimiento estándar de digestión con licuadora Turboblender utilizando 200 g de caña desfibrada y 800 g de agua destilada. La mezcla se procesó durante 5 minutos a velocidad máxima (~3500 rpm). El producto

obtenido fue tamizado con malla metálica y filtrado con papel de servilleta para remover los sólidos. El extracto líquido resultante se utilizó para la determinación de las variables analíticas seleccionadas.

..... 3.3.4 Determinaciones analíticas

- **Brix refractométrico (Bx%caña):** se determinó realizando la lectura del extracto utilizando un refractómetro digital marca KEM modelo RA-620 (Chen and Chou, 1993). El valor obtenido se denominó BxL (brix leído).

- **Pol (Pol%caña):** se llevó a cabo pesando 52 gramos del extracto en un matraz de 200 ml, para luego utilizar una cantidad mínima de subacetato de plomo (aproximadamente de 0,70 a 0,90 gramos) como agente clarificante, y filtrar a través de papel de filtro. Se realizaron las lecturas (el valor obtenido se denominó LP) en un polarímetro digital Anton Paar modelo MCP 500 Sucromat (Spencer – Meade, 1967).

- **Azúcares reductores totales (ART%caña):** se realizó en el laboratorio la adaptación y puesta a punto para este tipo de muestras (extracto líquido resultante de la digestión), con una metodología basada en el método de Fehling Causse Bonnans (AOAC, 1964), realizando la inversión ácida de 10 gramos de muestra en un matraz de 100 ml para luego llevar a cabo la titulación con Licor de Fehling Causse Bonnans.

El principio de este método está basado en la propiedad que tienen los monosacáridos y otras sustancias presentes de reducir el cobre del estado cúprico al cuproso. Si la reacción se lleva a cabo en medio alcalino y en condiciones controladas, la cantidad de cobre reducida es proporcional a la cantidad de sustancias reductoras presentes, detectándose el punto final mediante el uso de azul de metileno como indicador interno.

Se invierte la sacarosa contenida en la muestra con una solución de ácido clorhídrico, transformándose en glucosa más fructosa, que se suman a los azúcares reductores presentes inicialmente.

..... 3.3.5 Cálculos

Las variables fueron calculadas según las siguientes ecuaciones:

Ecuación 1

$$S = 100 - H\% - F\%$$

Ecuación 2

$$Pol\%caña = \frac{LP \times (500 - F\%)}{100}$$

Ecuación 3

$$Brix\%caña = \frac{BxL \times (500 - F\%)}{100}$$

Ecuación 4

$$Pureza\%caña = \frac{Pol\%caña \cdot 100}{Brix\%caña}$$

Ecuación 5

$$No\ Azúcares\%caña = Brix\%caña - Pol\%caña$$

Ecuación 6

$$ART\%caña = \frac{10 \times Tit\ F \times (500 - F\%)}{V}$$

Donde:

- S = Sólidos solubles
- H% = Humedad%caña
- F% = Fibra%caña
- LP = Lectura polarimétrica del extracto
- BxL = Brix refractométrico del extracto leído
- Tit F = Título de la solución de Fehling Cause Bonnans
- V = volumen (ml) de muestra gastados en la titulación

.....3.4 Evaluación de precisión metodológica mediante Solver

En el presente estudio se aplicó un enfoque de optimización mediante la herramienta Solver, disponible en Microsoft Excel, con el objetivo de evaluar y mejorar la precisión de los métodos empleados. Las variables analizadas fueron Pol, Brix, ART, humedad y fibra, todas de relevancia crítica para los objetivos de la investigación. Inicialmente, se asumió que la medición de Brix, realizada mediante refractómetro, presentaba un bajo margen de error, y por tanto se la consideró como de referencia. En base a esta premisa, se configuraron distintos modelos en Solver para investigar la precisión relativa de las otras variables. Para las variables Brix, humedad y fibra, se planteó una condición de suma igual a 100, fijando el valor de Brix y permitiendo la optimización de las otras dos. Cada variable fue analizada individualmente, manteniendo las demás constantes, lo que permitió estimar el error promedio asociado a cada método.

.....3.5 Implementación Espectroscopia NIR

La cuarta alícuota de caña desfibrada y el extracto líquido se emplearon para adquirir espectros utilizando un equipo de Espectroscopia de Infrarrojo Cercano (NIR) del que dispone el laboratorio, con detector de reflectancia para muestras sólidas; y transmitancia para muestras líquidas. Esto se llevó a cabo con el propósito de construir en el futuro una base de datos que facilite la creación de modelos de calibración para todas las variables que se encuentran bajo estudio.

.....3.6 Comparación con el método de prensa hidráulica

Durante el año 2022 se procesaron 171 muestras por digestión húmeda y también mediante la utilización de una prensa hidráulica de 60 TN, obteniendo las variables de interés siguiendo la metodología propuesta por Diez et al. (2000), permitiendo así comparar los resultados de las dos metodologías para las variables Pol%caña y Fibra%caña.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

1. Evaluación de precisión de los métodos

Para estimar la precisión de los métodos implementados, se utilizó la herramienta Solver de Excel, configurada para optimizar errores asociados a cada variable analizada. Se asumió que el valor de Brix (medido por refractometría) presentaba un margen de error bajo, utilizándolo como referencia. Las demás variables fueron optimizadas individualmente bajo la restricción

Ecuación 7

$$Brix\%caña + H\% + F\% = 100$$

Inicialmente, se aplicó Solver para encontrar soluciones óptimas para la variable humedad, manteniendo fijas las otras dos variables; posteriormente, se realizó el mismo procedimiento para la variable fibra, manteniendo las otras dos fijas. En el caso de Pol y ART, se utilizaron sus fórmulas analíticas respectivas, y Solver se aplicó para minimizar la diferencia entre los valores medidos y los valores teóricos calculados, sin modificar las condiciones de entrada de Brix, humedad y fibra. Los resultados de los errores obtenidos se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Errores promedio (%), mínimo y máximo, obtenidos con Solver para Pol%caña, Humedad, Fibra%caña y ART%caña.

| | Error (%) | | | |
|----------|-----------|---------|------------|-------|
| | Pol%caña | Humedad | Fibra%caña | ART |
| Promedio | 2,17 | 1,13 | 5,49 | 4,23 |
| Máximo | 6,65 | 3,26 | 18,15 | 12,77 |
| Mínimo | 0,05 | 0,09 | 0,43 | 0,04 |

El procedimiento permitió calcular errores promedio de 2,17% para Pol%caña y de 1,13% para Humedad, siendo estas las variables con menor nivel de error. En cambio, los valores más altos se registraron en Fibra%caña (5,49%) y ART (4,23%), lo que indicó que estas determinaciones requerían mayor atención y ajustes para mejorar su precisión. En el caso de ART, se logró una reducción significativa del error mediante la optimización del tiempo de titulación de la muestra, mejorando la exactitud de los resultados. Para la variable Fibra%caña, se realizaron ajustes específicos que se detallan más adelante. Los datos obtenidos brindaron información clave sobre la precisión relativa de cada variable, orientando acciones para la mejora continua de los métodos analíticos y contribuyendo a garantizar resultados más confiables.

2. Comparación de métodos para determinación de humedad

Se compararon los métodos tradicionales de secado en estufa con una alternativa mediante horno microondas. En la Tabla 2 se pueden observar los resultados de humedad obtenidos por ambos métodos.

Se realizó un modelo de regresión lineal utilizan-

Tabla 2. Resultados de Humedad (%) obtenidos por método estufa y microondas para 41 muestras de caña desfibrada. promedios, mínimos, máximos, desvío estándar (Desvío) y coeficiente de variación (CV%).

| | Humedad (%) | |
|----------|-------------|------------|
| | Estufa | Microondas |
| n | 41 | 41 |
| Promedio | 67,26 | 67,17 |
| Mínimo | 63,99 | 63,90 |
| Máximo | 71,83 | 71,13 |
| Desvío | 2,00 | 1,92 |
| CV% | 2,97 | 2,86 |

do el software estadístico R con los resultados obtenidos por ambos métodos. Ya que la pendiente fue significativa ($p\text{-value} < 2,2e-16$), dicho modelo sugiere que existe una fuerte relación lineal entre las variables Humedad por Estufa y Humedad por Microondas. En la Figura 2 pueden observarse la correlación de los métodos y la gráfica de las diferencias o residuales en 41 muestras.

Los resultados muestran una fuerte correlación entre ambos ($R^2 \approx 0,97$) y no se observaron diferencias significativas en la prueba t para muestras pareadas ($p\text{-value} = 0,1235$). El error promedio entre métodos fue de 0,09%, validando el uso del microondas como método confiable y eficiente.

3. Optimización del método de Fibra

Durante la zafra 2021, se realizaron ensayos preliminares utilizando un lavarropas doméstico antiguo, donde se observó que un solo ciclo de lavado no era suficiente para eliminar completamente los solubles. En la zafra siguiente, con la incorporación de un nuevo equipo, se comprobó que un único ciclo bastaba para lograr una remoción efectiva, reduciendo la variabilidad y mejorando la eficiencia del proceso. Esto evidenció la influencia significativa del tipo de equipo sobre el desempeño del método.

Para definir la cantidad óptima de muestra, se evaluaron dos niveles (50 g y 100 g de caña desfibrada). El análisis mediante Solver mostró que el uso de 100 g reducía de manera notable el error promedio, mejorando la estabilidad del resultado. Los resultados de los errores obtenidos se muestran en la Tabla 3.

Tabla 3. Errores promedio (%), mínimo y máximo, obtenidos con Solver para Fibra%caña utilizando 50 y 100 gramos de caña desfibrada en 16 muestras.

| | Error (%) | |
|----------|---------------|--------------|
| | Fibra (100 g) | Fibra (50 g) |
| Promedio | 5,60 | 10,76 |
| Máximo | 14,39 | 20,47 |
| Mínimo | 0,08 | 0,25 |

Asimismo, se investigó el efecto de la temperatura del agua de lavado. Se compararon 24 muestras por duplicado, lavadas a 60°C y sin temperatura. Los errores obtenidos con Solver se presentan en la Tabla 4. Aunque los errores promedio fueron levemente menores en el lavado sin temperatura, las diferencias fueron sutiles.

Tabla 4. Errores promedio (%), mínimo y máximo, obtenidos con Solver para Fibra%caña sin Temperatura y con Temperatura (60°C) en 24 muestras.

| | Error (%) | |
|----------|-------------|--------------------|
| | Fibra sin T | Fibra con T (60°C) |
| Promedio | 3,15 | 4,46 |
| Máximo | 9,71 | 9,23 |
| Mínimo | 0,29 | 0,00 |

Desde el punto de vista estadístico, el análisis de medias mediante test t para muestras pareadas no detectó diferencias significativas entre ambos métodos ($p\text{-value} = 0,1637$). Por otro lado, la regresión lineal mostró una asociación estadísticamente significativa ($p\text{-value} = 0,03011$), aunque el coeficiente de determinación fue bajo ($R^2 = 0,1386$), indicando que la proporción de la variabilidad explicada era limitada. Esta combinación de resultados sugiere que, si bien existe cierta relación entre los métodos, la diferencia práctica es poco relevante.

En base a estos hallazgos, se concluyó que el uso de lavado sin temperatura resulta apropiado para la determinación de fibra, ya que permite reducir el consumo energético sin comprometer la precisión analítica del método.

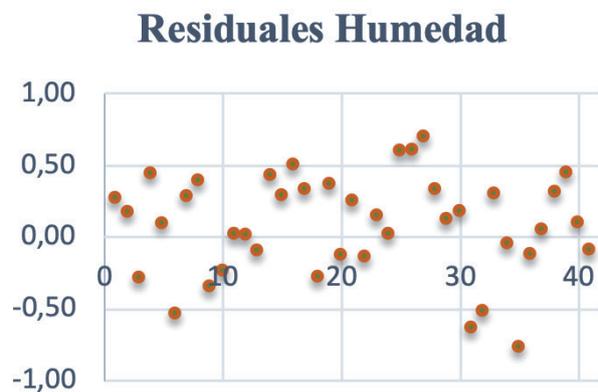
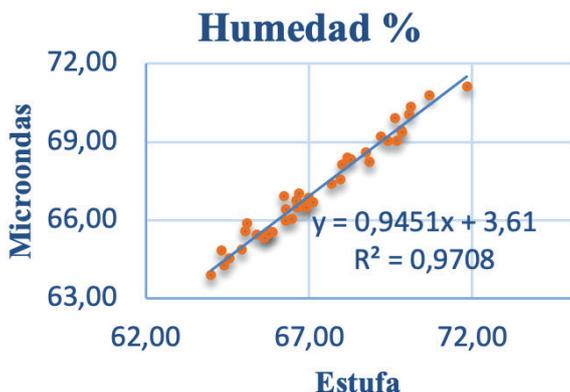


Figura 2. Comparación de métodos de determinación de humedad por estufa y microondas. Regresión lineal y Residuales, ensayos realizados en 41 muestras.

4. Desarrollo del método de Digestión Húmeda

4.1 Optimización del proceso de desintegración

Como resultado de las pruebas experimentales de puesta a punto, se estableció que una combinación de 200 g de caña y 800 g de agua, licuada durante 5 minutos a velocidad máxima, era adecuada para lograr una extracción eficiente de los azúcares. Se procesaron cinco muestras por triplicado y se calculó la pureza a partir de los valores de Brix y Pol obtenidos. La comparación con el digestor similar al Jeffco mostró un error promedio en pureza de 2,11%, dentro del margen aceptable (<5%). La correlación entre métodos fue alta ($R^2 > 0,95$), validando la propuesta basada en licuadoras de alta potencia como una alternativa eficaz y accesible. La correlación de los valores de pureza entre digestor y licuadora se muestra en la Figura 3.

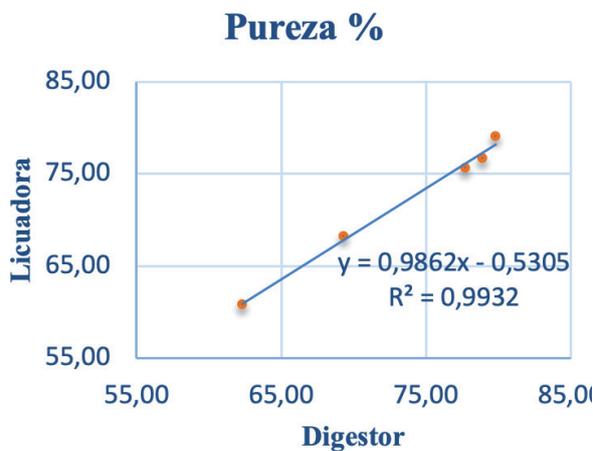


Figura 3. Correlación de valores de Pureza% obtenidos por Digestor y Licuadora Blendtec en cinco muestras por triplicado.

4.2 Comparación entre licuadoras

Se compararon los resultados de dos equipos: Blendtec y Turboblender. Ambos mostraron valores promedio similares y coeficientes de variación (CV%) menores al 2% (Tabla 5), confirmando la robustez del método ante diferencias de marca o potencia del equipo.

5. Comparación con el método de prensa hidráulica

Se determinó la calidad industrial de 171 muestras por los métodos de digestión húmeda y prensa hidráulica. Se observan los valores promedio, mínimos, máximos, desvío estándar y CV% y la comparación entre ambos métodos para los parámetros Pol%caña y Fibra%caña en la Tabla 6.

Los valores de desvío estándar y coeficiente de

Tabla 6. Comparación de métodos de prensa hidráulica y digestión húmeda para Pol%caña y Fibra % caña, promedio, mínimos, máximos, desvío estándar y CV% de los ensayos realizados en 171 muestras.

| | Pol%caña | | Fibra%caña | |
|----------|------------------|-------------------|------------------|-------------------|
| | Digestión húmeda | Prensa hidráulica | Digestión húmeda | Prensa hidráulica |
| | % | % | % | % |
| Promedio | 14,21 | 14,38 | 12,27 | 12,07 |
| Mínimo | 8,62 | 8,48 | 9,46 | 9,14 |
| Máximo | 20,23 | 20,33 | 17,20 | 17,84 |
| Desvío | 2,40 | 2,42 | 1,66 | 1,58 |
| CV% | 16,88 | 16,82 | 13,48 | 13,10 |

variación (CV%) calculados a partir de esta tabla reflejan la variabilidad natural entre muestras de caña de azúcar con diferente composición. Por lo tanto, no deben interpretarse como indicadores de precisión analítica.

En la Figura 4 se puede observar un análisis de las diferencias o residuales para las variables Pol%caña y Fibra%caña en 171 muestras.

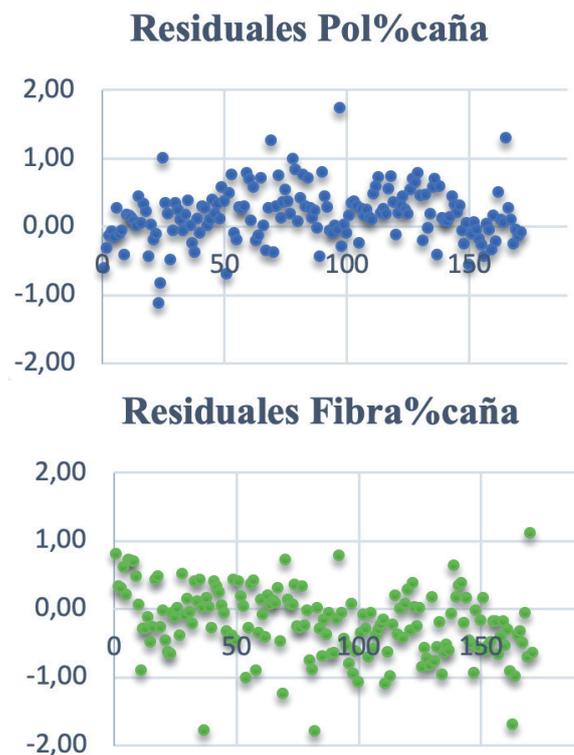


Figura 4. Comparación de métodos de prensa hidráulica y digestión húmeda. Residuales para Pol%caña y Fibra%caña, ensayos realizados en 171 muestras.

Tabla 5. Promedio, desvío estándar, CV% para Brix%caña, Pol%caña y Pureza%caña obtenidos con licuadoras marca Blendtec y Turboblender en veinte muestras.

| | Bx%caña | | Pol%caña | | Pza%caña | |
|----------|----------|--------------|----------|--------------|----------|--------------|
| | Blendtec | Turboblender | Blendtec | Turboblender | Blendtec | Turboblender |
| Promedio | 20,07 | 20,29 | 17,75 | 18,32 | 88,45 | 90,30 |
| Desvío | 0,32 | 0,13 | 0,27 | 0,38 | 1,18 | 1,60 |
| CV% | 1,61 | 0,62 | 1,52 | 2,07 | 1,34 | 1,77 |

Aunque la prueba t de comparación de medias indicó diferencias estadísticamente significativas ($p < 0,05$), las diferencias absolutas fueron pequeñas: 0,17 para Pol y -0,20 para fibra. La regresión mostró una relación lineal muy fuerte ($R^2 = 0,97$ para Pol%caña, $R^2 = 0,91$ para Fibra%caña), lo que sugiere buena concordancia entre ambos métodos (Figura 5).

6. Discusión comparativa con trabajos previos

Los resultados obtenidos en este estudio sobre determinación de humedad mediante microondas y optimización del método de fibra muestran concordancia con investigaciones previas tanto nacionales como internacionales.

En relación a la humedad, el trabajo de Zamora Rueda *et al.* (2016) validó la metodología de secado por microondas en bagazo, concluyendo que no existían diferencias significativas respecto al método de estufa, con errores estándar menores al 1% y desviaciones estándar dentro de los rangos aceptables. Nuestros resultados, obtenidos con muestras de caña desfibrada y no de bagazo, reflejan una tendencia similar: diferencias mínimas entre métodos, alta correlación ($R^2 \approx 0,97$) y error promedio de 0,09%, lo cual valida la aplicabilidad del microondas también en esta matriz. Este hallazgo representa un avance local, ya que aporta evidencia concreta para extender esta metodología a etapas tempranas del proceso industrial.

Por otra parte, Imbachi-Ordonez *et al.* (2023) también señalan las limitaciones del secado en estufa por su lentitud, alta demanda de espacio y variabilidad entre fábricas, destacando la necesidad de métodos más rápidos y reproducibles. Si bien su estudio se centra en caña prensada y compara métodos tradicionales con analizadores digitales de humedad, sus conclusiones refuerzan la idea de que los métodos alternativos más rápidos, como microondas, pueden ser implementados con resultados confiables. En este contexto, nuestros resultados respaldan el potencial del microondas como alternativa eficaz, económica y accesible en laboratorios regionales.

Los resultados obtenidos en este trabajo sobre optimización del método de fibra son consistentes con los criterios analíticos propuestos por Shi *et al.* (2023), quienes compararon los principales métodos internacionales de determinación de fibra utilizados en la industria azucarera. Estos autores concluyen que los métodos más precisos y repetibles son aquellos que utilizan una única mues-

tra completa de caña y evitan suposiciones adicionales en el cálculo de fibra, como ocurre con algunos métodos basados en prensado. En esta propuesta, el empleo de caña desfibrada, el lavado directo con agua y la ausencia de etapas de extracción mecánicas complejas permiten cumplir con estos principios. Asimismo, el enfoque de optimización mediante Solver permitió cuantificar el impacto del tipo de equipo, el peso de muestra y la temperatura sobre la precisión analítica, validando la eficacia del procedimiento bajo condiciones prácticas y accesibles. En este sentido, el protocolo desarrollado representa una alternativa reproducible y de bajo costo, alineada con los estándares metodológicos actuales propuestos a nivel internacional.

A nivel internacional, no se ha reportado hasta ahora la utilización de licuadoras de uso doméstico como equipo de digestión húmeda en lugar del digestor Jeffco o de otros equipos industriales, lo que convierte a este estudio en un caso potencialmente único y pionero en el campo. El método propuesto combina eficiencia, accesibilidad y resultados comparables a los obtenidos por métodos de referencia, con la ventaja adicional de requerir una inversión mínima y ser plenamente replicable en laboratorios con recursos limitados. La robustez del método y su aplicabilidad en laboratorios regionales se alinea con los criterios técnicos propuestos en manuales australianos y sudafricanos (Anon, 2014; ICUMSA, 2024).

En la Bibliografía citada no se hallan reportes de métodos específicos para la determinación de ART%caña (azúcares reductores totales expresados sobre caña entera) a partir del extracto líquido generado mediante digestión húmeda o desintegración directa con agua. Los métodos disponibles se enfocan casi exclusivamente en la determinación de azúcares reductores totales en el jugo de caña, empleando técnicas como Fehling y Lane-Eynon, y luego infieren el ART%caña mediante cálculos. En este contexto, la incorporación de esta variable analítica directa representa un aporte metodológico novedoso. Este parámetro permite cuantificar la suma de los principales azúcares presentes en la caña (sacarosa, glucosa y fructosa), y estimar así el contenido total de azúcares disponibles para los procesos industriales. Su determinación directa en caña desfibrada resulta particularmente útil, ya que refleja el estado fisiológico y de conservación de la materia prima, y puede anticipar su comportamiento en términos de eficiencia de extracción, fermentabilidad o potencial de

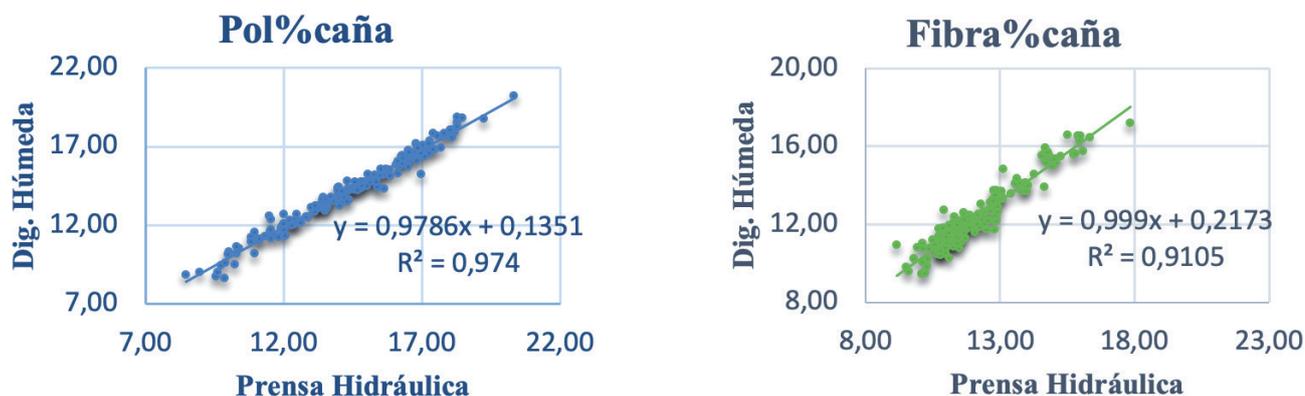


Figura 5. Comparación de métodos de prensa hidráulica y digestión húmeda. Regresión lineal para Pol%caña y Fibra%caña, ensayos realizados en 171 muestras.

formación de compuestos no deseados durante la fabricación de azúcar y bioetanol. Además, aporta información que actualmente no se obtiene de forma rutinaria en los laboratorios de control de calidad.

CONCLUSIONES

El presente estudio propuso, desarrolló y validó un método directo de digestión húmeda para la determinación simultánea de variables clave en caña de azúcar (Pol%caña, Brix%caña, Humedad%caña, Fibra%caña y ART%caña), utilizando equipamiento accesible y replicable en laboratorios con recursos limitados como alternativa al método por prensa hidráulica, y utilización de equipos industriales de desintegración. Se comprobó que el empleo de licuadoras de alta potencia permite obtener resultados comparables a los del digestor industrial Jeffco, con un error aceptable (2,11% de pureza) y fuerte correlación con el método de prensa hidráulica para Pol%caña y Fibra%caña. La incorporación del método de secado por microondas para determinación de humedad y de una adaptación del método de difusión en bolsa para medición de fibra con un lavarropas automático resultaron eficientes, reproducibles y operativamente viables, incluso bajo condiciones de laboratorio convencionales.

Como innovación relevante, se incorporó por primera vez la determinación directa de ART%caña a partir del extracto líquido de la digestión húmeda, lo cual representa un aporte novedoso que permite conocer el contenido total de azúcares disponibles para los procesos industriales. Esta variable, que no se determina de forma rutinaria, puede ofrecer una visión más completa del estado fisiológico y calidad de la caña procesada.

En conjunto, esta propuesta amplía las posibilidades de evaluación en la industria sucroalcoholera regional, promueve una estandarización más accesible y sienta las bases para futuras integraciones con tecnologías emergentes como NIRS, cuya aplicación durante la cosecha ha sido explorada recientemente con fines de monitoreo en tiempo real, como lo demuestran Corrédo et al. (2024). Su aplicabilidad y bajo costo la posicionan como una alternativa viable para mejorar la eficiencia analítica y operativa en contextos productivos del Noroeste argentino y regiones cañeras similares.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Ing. Qca. Romina Salazar por sus valiosos aportes en las pruebas preliminares para la puesta a punto de la metodología de digestión húmeda.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Anon. 2014.** The standard laboratory manual for Australian sugar mills: Volume 2. Sugar Research Australia. <https://sugarresearch.com.au/>
- Anon. 2021.** Can fibre machines. Sugar Research Institute. <https://www.sri.org.au/can-fibre-machines/>
- Association of Official Analytical Chemist (AOAC). 1964.** Método de Fehling-Causse-Bonnans modificado. USA., pp. 495
- Berding, N. and J. S. Pollock. 1982.** Screening clones for fibre content with a hydraulic press. International Society of Sugar Cane Technologists Sugar cane Breeders' Newsletter 44: 43-48.
- Chen, J. C. P. and C. C. Chou. 1993.** Cane Sugar Handbook, 12th ed., Wiley & Sons, pp. 121.
- Corrédo, M.; J. Molin e R. Filho. 2024.** Is it possible to measure the quality of sugarcane in real time during harvesting using on-board NIR spectroscopy? *AgriEngineering*, 6 (1): 64-80. DOI: <https://doi.org/10.3390/agriengineering6010005>
- Diez, O.; S. Zossi; E. Chavanne y G. Cárdenas. 2000.** Calidad industrial de las variedades de caña de azúcar de maduración temprana LCP 85-384 y LCP 85-376 en Tucumán. Análisis de sus principales constituyentes físico-químicos. *Rev. Ind. y Agric. Tucumán* 77 (2): 39-48.
- Digonzelli, P.; E. Romero y J. Scandaliaris. 2015.** Guía técnica del cañero. Las Talitas, Argentina. Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombes. Capítulo C3.
- Fogliata, F. 2014.** Caña de azúcar: aportes para su valoración cualitativa. 1era Edición, pp. 47.
- Imbachi-Ordonez, S.; A. Triplett; G. Eggleston and A. Mandalika. 2023.** Evaluation of a rapid analysis of press-cane moisture content. *Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists*, volume 31, 411-416. <https://www.issct.org/proceedings/>
- International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis (ICUMSA). 2024.** Method book. Method GS 5-1 (2022): Sucrose, dry substance and fibre in cane and bagasse by VIS-Polarimetry after clarification of the aqueous extract with lead acetate and by refractometry - Official. Bartens, Berlin.
- International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis (ICUMSA). 2019.** Method book. Method GS 7-5: The Determination of moisture in cane and bagasse by oven drying (Accepted) (1994). Bartens, Berlin.
- Laboratory Manual. 2005.** Laboratory Manual for South African Sugar Factories. S.Afr.Sugar Technol. Ass., Mount Edgecombe, South Africa. 4th Ed.
- R Core Team. 2023.** R: A Language and Environment for Statistical Computing (versión 4.3.1)
- Romero, E.; P. Digonzelli y J. Scandaliaris. 2009.** Manual del Cañero. Las Talitas, Argentina. Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombes. Capítulo 17.
- Sanullah, A. 2013.** An alternative method for determination of fibre% cane. *Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists* 28: pp. 5.
- Shi, C.; G. Kentand C. Henderson. 2023.** A new approach to measuring the fibre content of sugarcane. *Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists* 31, pp. 345-356. <https://www.issct.org/proceedings>
- Spencer - Meade. 1963.** Cane Sugar Handbook. Editorial: J. Wiley - USA, pp. 542.
- Spencer - Meade. 1967.** Manual del Azúcar de Caña,

Editorial: Montaner y Simón, pp. 457.

Tanimoto, T. 1964. The press method of cane analysis.
The Hawaiian Planters' Record 57: 133-150.

Zamora Rueda, G.; C. Gutierrez; G. Mistretta; F. Peral-

ta; M. Golato; M. Ruiz y D. Paz. 2016. Determinación del contenido de humedad del bagazo de caña de azúcar por medio de microondas. Rev. ind. agríc. Tucumán 93 (2): 7-12.





Revista Industrial
y Agrícola de
Tucumán

ISSN 0370-5404

En línea
1851-3018

Tomo 101 (2):
45-49; 2024



ESTACION EXPERIMENTAL
AGROINDUSTRIAL
OBISPO COLOMBRES
Tucumán | Argentina

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

La RT-PCR como metodología para el diagnóstico del viroide del enanismo de los cítricos y del viroide de la curvatura de la hoja de los cítricos en el Noroeste Argentino

María F. Palacios * y Julia Figueroa*

* Sección Centro de Saneamiento. Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC), Las Talitas, Tucumán, Argentina. Email: saneamiento@eeaoc.org.ar

RESUMEN

Los cítricos son hospederos naturales de varias especies de viroides. En Argentina hasta 2022 solamente estaban reportados el *Citrus Exocortis Viroid* (CEVd) y el *Hop Stunt Citrus Viroid* (HSVd), agentes causales de la Exocortis y de la Caquexia respectivamente.

En razón de que la reacción en cadena de la polimerasa con transcripción inversa (RT-PCR) es una técnica sensible, fiable, económica y de amplia utilización para la detección de diferentes agentes patógenos e implementada en centros de saneamiento cítrico referentes a nivel mundial, el objetivo de este trabajo fue la optimización e incorporación de esta metodología como técnica de rutina del laboratorio para la detección de ambos viroides. A través de un proceso de ajuste se optimizó el protocolo de RT-PCR para la identificación de los viroides causantes del enanismo de los cítricos, el *Citrus Dwarfing Viroid* (CDVd) y la curvatura de la hoja de los cítricos, *Citrus Bent Leaf Viroid* (CBLVd). La metodología optimizada demostró ser eficaz para la detección de ambos viroides en diversas especies cítricas, tanto en variedades copa como en portainjertos de quintas cítricas del noroeste argentino, lo que valida su implementación como herramienta de diagnóstico de rutina en el laboratorio del Centro de Saneamiento de Citrus (CSC).

Palabras clave: enfermedades transmisibles por injerto, detección molecular, certificación de material de propagación.

ABSTRACT

Incorporation of RT-PCR as a methodology for diagnosis of Citrus Bent Leaf Viroid and Citrus Dwarfing Viroid

Citrus trees are natural hosts to several viroid species. Until 2022, only *Citrus Exocortis Viroid* (CEVd) and *Hop Stunt Viroid* (HSVd), the causal agents of Exocortis and Cachexia, respectively, had been reported in Argentina. Given the sensitivity, reliability, cost-effectiveness, and widespread use of reverse transcription polymerase chain reaction (RT-PCR) for pathogen detection, the aim of this work was to optimize and establish this methodology as a routine laboratory technique for the detection of these viroids.

In this study, the RT-PCR protocol was optimized for the detection and identification of *Citrus Dwarfing Viroid* (CDVd) and *Citrus Bent Leaf Viroid* (CBLVd). The methodology proved to be effective for detecting both viroids in various citrus species, including both scions and rootstocks from citrus orchards in the northwest of Argentina, thus validating its implementation as a routine diagnostic tool in the CSC laboratory.

Key words: graft transmissible diseases, molecular diagnosis, indexing program.

Fecha de
recepción:
23/08/2024

Fecha de
aceptación:
18/06/2025

INTRODUCCIÓN

La citricultura representa una de las principales actividades frutícolas de Argentina, con un marcado impacto económico y social en las regiones productoras. La provincia de Tucumán concentra la mayor superficie cultivada con limón (*Citrus limon* (L.) Burm. f.), posicionándose como el principal polo cítrico nacional y uno de los más relevantes a nivel mundial en términos de producción, industrialización y exportación. En este contexto, la sanidad de los materiales de propagación constituye un componente crítico para la sostenibilidad del sistema productivo.

En Argentina, las normas para la producción, comercialización e introducción de plantas cítricas de vivero y sus partes (Res.458/2023 de INASE) establecen la obligatoriedad del uso de material de propagación cítrico fiscalizado de alta calidad genética, saneado por la técnica de microinjerto de ápices caulinares y libres de determinadas enfermedades transmisibles por injerto. Las enfermedades causadas por patógenos como virus, bacterias y fitoplasmas pueden propagarse fácilmente a través de injertos, lo que acentúa la necesidad de una detección temprana para tomar decisiones adecuadas para su manejo, prevenir su dispersión y minimizar pérdidas económicas en la producción de cultivos (Olmos *et al.*, 2007; Venbrux *et al.*, 2023).

La normativa vigente hasta 2023 establecía el uso del diagnóstico biológico, la hibridación de improntas y la electroforesis secuencial en geles de poliacrilamida (sPAGE) como únicas metodologías autorizadas para detección de viroides cítricos (Res. 149/98, MEOSP-SAGPyA). Dichas técnicas requieren mucho tiempo, infraestructura y condiciones ambientales específicas que las hacen laboriosas y costosas y en la mayoría de los casos permiten la detección de los viroides presentes en las muestras pero de manera inespecífica, sin posibilidad de identificación.

Las técnicas moleculares como la reacción en

cadena de la polimerasa (PCR) han demostrado ser herramientas valiosas para el diagnóstico de enfermedades transmisibles por injerto.

El proceso de validación de las técnicas de diagnóstico implica evaluar la sensibilidad, especificidad y reproducibilidad, asegurando que éstas proporcionen resultados precisos y útiles. La validación de métodos de diagnóstico es esencial para garantizar la detección oportuna de plagas y enfermedades, lo que a la vez contribuye a la seguridad alimentaria y la sostenibilidad agrícola (Luchi *et al.*, 2020).

En este trabajo se describe la estandarización del método de detección molecular por RT-PCR de dos viroides cítricos que fueron recientemente citados en Argentina (Palacios y Figueroa, 2022), el *Citrus Bent Leaf Viroid* (CBLVd) y *Citrus Dwarfing Viroid* (CDVd), con el objetivo de incorporar en el laboratorio una técnica de diagnóstico más rápida, sensible y específica.

MATERIALES Y MÉTODOS

Como material de referencia se utilizaron los controles T-0001, T-0002 y T-2209 para CDVd y T-0178 y T-0180 para CBLVd (Tabla 1). Los productos de amplificación del genoma de estos cinco aislados fueron previamente secuenciados y las secuencias resultantes se depositaron en la base de acceso libre, GenBank, con los siguientes números de acceso: OK181215, OK181216 y OK181217 (CDVd) y OK181218 y OK181219 (CBLVd).

Los alineamientos de las secuencias en BLASTn revelaron una identidad mayor al 96% con las secuencias de referencia correspondientes para cada viroide.

Además, se incluyeron otros 10 controles positivos seleccionados de plantas infectadas con CDVd y/o CBLVd del banco de virus y viroides del CSC previamente caracterizados por métodos moleculares (Tabla 1).

Se trabajó también con muestras de 25 plantas

Tabla 1. Controles positivos utilizados en el ensayo.

| Identificación Interna | Origen | Especie | Variedad |
|------------------------|----------------------------|--------------------|---------------|
| T-0001* | Tucumán - Lules | <i>C. reshni</i> | Cleopatra |
| T-0002* | Salta - Orán | <i>C. sinensis</i> | Valencia |
| T-0010 | Tucumán - Colección EEAOC | <i>C. sinensis</i> | Ruby Blood |
| T-0011 | Tucumán - Colección EEAOC | <i>C. sinensis</i> | Ruby Blood |
| T-0096 | Salta - Orán | <i>C. sinensis</i> | Jaffa |
| T-0178** | Salta - Colonia Santa Rosa | <i>C. paradisi</i> | Rouge La Toma |
| T-0180** | Salta - Colonia Santa Rosa | <i>C. paradisi</i> | Rouge La Toma |
| T-0186 | Tucumán - Lules | <i>C. sinensis</i> | Marr's Early |
| T-0202 | Salta - Colonia Santa Rosa | <i>C. paradisi</i> | Rouge La Toma |
| T-0205 | Salta - Colonia Santa Rosa | <i>C. paradisi</i> | Rouge La Toma |
| T-0312 | Jujuy - Ledesma | <i>C. limon</i> | Eureka |
| T-0398 | Tucumán - Las Cañitas | <i>C. limon</i> | Eureka |
| T-0455 | Tucumán - Lules | <i>Citrumelo</i> | CPB 4475 |
| T-1905 | Tucumán - Colección EEAOC | <i>C. paradisi</i> | Rouge La Toma |
| T-2209* | Tucumán - La Cocha | <i>C. limon</i> | Eureka |

*Aislados de referencia para CDVd. **Aislados de referencia para CBLVd.

de campo infectadas con viroides, con y sin síntomas, provenientes de las provincias de Salta, Jujuy y Tucumán, que incluyeron pomelos, naranjos dulces, limoneros y un Citrumelo 75 AB (Tabla 2). El objetivo fue garantizar que la población analizada fuera representativa de la región en relación a su origen, especies y variedades.

Para corroborar la especificidad de la prueba se utilizaron ocho muestras infectadas con otros virus tales

como el virus de la tristeza de los cítricos (CTV), psorosis de los cítricos (CPsV), concave gum (CGAV) y los viroides CEVd y HSVd, detalladas en la Tabla 3.

Los métodos de referencia que se utilizaron fueron las pruebas de diagnóstico biológicas con planta indicadora de cidro Etrog injertado sobre limonero rugoso y el diagnóstico molecular por sPAGE descritos en el anexo III de la Resolución 479/2023 de INASE.

Tabla 2. Muestras de campo utilizadas en el ensayo.

| Identificación Interna | Origen | Especie | Variedad |
|------------------------|----------------------------|--------------------|-----------------|
| R-1321 | Salta - Urundel | <i>C. paradisi</i> | Henninger's |
| R-1324 | Salta - Colonia Santa Rosa | <i>C. paradisi</i> | Foster Seedlees |
| R-1789 | Tucumán - Lules | <i>C. sinensis</i> | Pineapple |
| R-2123 | Tucumán - Famaillá | <i>C. limon</i> | Adamo |
| R-2199 | Tucumán - Famaillá | <i>C. limon</i> | Interdonato |
| R-2244 | Tucumán - Lules | <i>C. sinensis</i> | Pineapple |
| R-2242 | Tucumán - Lules | <i>C. sinensis</i> | Pineapple |
| R-2206 | Tucumán - La Cocha | <i>C. limon</i> | Eureka |
| R-2207 | Tucumán - La Cocha | <i>C. limon</i> | Eureka |
| R-2208 | Tucumán - La Cocha | <i>C. limon</i> | Eureka |
| R-2210 | Tucumán - La Cocha | <i>C. limon</i> | Eureka |
| R-2376 | Jujuy - Ledesma | <i>Citrumelo</i> | 75 AB |
| R-2723 | Salta - Colonia Santa Rosa | <i>C. paradisi</i> | Rio Red |
| R-2725 | Salta - Colonia Santa Rosa | <i>C. paradisi</i> | Rio Red |
| R-2726 | Salta - Colonia Santa Rosa | <i>C. paradisi</i> | Rio Red |
| R-2727 | Salta - Colonia Santa Rosa | <i>C. paradisi</i> | Rio Red |
| R-2731 | Salta - Colonia Santa Rosa | <i>C. paradisi</i> | Flame |
| R-2732 | Salta - Colonia Santa Rosa | <i>C. paradisi</i> | Flame |
| R-2733 | Salta - Colonia Santa Rosa | <i>C. paradisi</i> | Flame |
| R-2734 | Salta - Colonia Santa Rosa | <i>C. paradisi</i> | Flame |
| R-3079 | Tucumán - Colección EAAOC | <i>C. limon</i> | Napoles |
| R-3080 | Tucumán - Colección EAAOC | <i>C. limon</i> | Kennedy |
| R-3081 | Tucumán - Colección EAAOC | <i>C. limon</i> | Giardino |
| R-3082 | Tucumán - Colección EAAOC | <i>C. limon</i> | Amalfi |
| R-3083 | Tucumán - Colección EAAOC | <i>C. limon</i> | Damas |

Tabla 3. Muestras infectadas con otros patógenos utilizadas en el ensayo.

| Identificación Interna | Patógeno | Especie | Variedad |
|------------------------|----------|---------------------|-----------------|
| T-0008 | CEVd | <i>C. limon</i> | Sin identificar |
| T-0053 | CPsV | <i>C. sinensis</i> | Westin |
| T-0069 | CEVd | <i>C. latifolia</i> | L. Rangpur |
| T-0074 | HSVd | <i>C. sinensis</i> | Cape Nartge |
| T-0127 | CCGAV | <i>Citrange</i> | Carrizo |
| T-0184 | CEVd | <i>C. limon</i> | Limoneira 8A |
| T-0514 | CEVd | <i>C. limon</i> | Lisboa |
| T-0706 | CTV | <i>C. reshni</i> | m Cleopatra |

RT-PCR como método cualitativo para determinación de presencia/ausencia de CBLVd y CDVd

La extracción de ácidos nucleicos totales se realizó a partir de corteza tierna, pecíolos y nervadura central de hojas jóvenes de plantas cítricas por las técnicas de SDS-KOAc (Garnsey *et al.*, 2002) para material vegetal de campo o de invernadero, o de Semancik *et al.* (1975) para plantas de cidro Etrog inoculadas del diagnóstico biológico.

Los análisis para cada viroide se ejecutaron en reacciones separadas (simplex).

Se realizó una exhaustiva revisión bibliográfica para la selección de cebadores empleados para el CDVd y CBLVd, escogiéndose los diseñados por Ito, Ieki y Ozaki en 2002 (Tabla 4), por su capacidad para detectar todas las variantes de dichos patógenos.

Tabla 4. Secuencia de cebadores específicos utilizados para la amplificación de ARN genómico de aislados de CBLVd y CDVd mediante RT-PCR.

| Patógeno | Cebador | Secuencia (5'-3') | Tamaño amplicón |
|--------------|--------------|--------------------------|-----------------|
| CBLVd | CBLVd-CM2- R | TCGACGACGACCAGTCAGCT | 233 pb |
| | CBLVd-AP2- F | TCCCCTTCACCCGAGCGCTGC | |
| CDVd | CVdIII-AM- R | TCACCAACTTAGCTGCCTTCGTC | 271 pb |
| | CVdIII-AP- F | CTCCGCTAGTCGGAAAGACTCCGC | |

La reacción para la síntesis de ADNc consistió en 2 µl - de ARN total; 7,5 µM del cebador complementario, 5X RT buffer (Promega, Madison, WI, EEUU), 10 mM de mix de dNTP (Promega, Madison, EEUU), 25 mM MgCl₂ y las enzimas Ribolock RNase Inhibitor (Thermo Fisher Scientific Inc.) y Revert Aid Reverse Transcriptase (Thermo Fisher Scientific Inc.), según las instrucciones del proveedor. Las reacciones se incubaron a 42°C durante 1 h. La PCR se llevó a cabo utilizando 2 µl de ADNc como templado; 0,2 µM de cebadores homólogo y complementario; 0,2 mM dNTPs; 10 X Taq Buffer; 1 mM MgCl₂; 1 U Taq DNA Polymerase (Thermo Fisher Scientific Inc.) y agua de grado molecular hasta un volumen total de 20 µl. Las condiciones de ciclado de PCR fueron 1 ciclo de 94°C por 2 min, 40 ciclos de 94°C por 30 s, 55°C por 30 s, 72°C por 1 min y 1 ciclo de 72°C por 5 min. Los productos finales de PCR fueron visualizados en gel de agarosa al 1,5%, teñido con GelRed 10000 X.

RESULTADOS

RT-PCR y comparación con métodos de referencia

Los resultados de las muestras analizadas por RT-PCR y los métodos de referencia se detallan a continuación (Tabla 5).

Los controles referentes de CDVd (muestras 1, 2 y 15) y CBLVd (muestras 6 y 7) y los demás controles positivos fueron detectados por los tres métodos utilizados.

Todas las muestras de campo, tanto de planta con síntomas como asintomáticas, resultaron positivas para viroides por diagnóstico biológico y sPAGE y por el

Tabla 5. Resultados obtenidos por muestra con el método de validación y métodos de referencia.

| Identificación Interna | sPAGE | Diagnóstico Biológico | | RT-PCR | |
|------------------------|-------|-----------------------|---|--------|------|
| | | Viroides | | CBLVd | CDVd |
| 1 T-0001 (Ref CDVd) | + | + | - | + | |
| 2 T-0002 (Ref CDVd) | + | + | - | + | |
| 3 T-0010 | + | + | - | + | |
| 4 T-0011 | + | + | - | + | |
| 5 T-0096 | + | + | - | + | |
| 6 T-0178 (Ref CBLVd) | + | + | + | + | |
| 7 T-0180 (Ref CBLVd) | + | + | + | + | |
| 8 T-0186 | + | + | - | + | |
| 9 T-0202 | + | + | + | + | |
| 10 T-0205 | + | + | + | + | |
| 11 T-0312 | + | + | - | + | |
| 12 T-0398 | + | + | - | + | |
| 13 T-0455 | + | + | - | + | |
| 14 T-1905 | + | + | + | + | |
| 15 T-2209 (Ref CDVd) | + | + | - | + | |
| 16 R-1321 | + | + | + | + | |
| 17 R-1324 | + | + | + | + | |
| 18 R-1789 | + | + | - | + | |
| 19 R-2123 | + | + | - | + | |
| 20 R-2199 | + | + | - | + | |
| 21 R-2244 | + | + | - | + | |
| 22 R-2242 | + | + | - | + | |
| 23 R-2206 | + | + | - | + | |
| 24 R-2207 | + | + | - | + | |
| 25 R-2208 | + | + | - | + | |
| 26 R-2210 | + | + | - | + | |
| 27 R-2376 | + | + | - | + | |
| 28 R-2723 | + | + | + | + | |
| 29 R-2725 | + | + | + | + | |
| 30 R-2726 | + | + | + | + | |
| 31 R-2727 | + | + | + | + | |
| 32 R-2731 | + | + | + | + | |
| 33 R-2732 | + | + | + | + | |
| 34 R-2733 | + | + | + | + | |
| 35 R-2734 | + | + | + | + | |
| 36 R-3079 | + | + | + | + | |
| 37 R-3080 | + | + | + | + | |
| 38 R-3081 | + | + | + | + | |
| 39 R-3082 | + | + | + | + | |
| 40 R-3083 | + | + | + | + | |
| 41 T-0008 (CEVd) | + | + | - | - | |
| 42 T-0053 (CPsV) | - | - | - | - | |
| 43 T-0069 (CEVd) | + | + | - | - | |
| 44 T-0074 (HSVd) | + | + | - | - | |
| 45 T-0127 (CCGAV) | - | - | - | - | |
| 46 T-0184 (CEVd) | + | + | - | - | |
| 47 T-0514 (CEVd) | + | + | - | - | |
| 48 T-0706 (CTV) | - | - | - | - | |

Resultado +: Detectado; Resultado -: No Detectado

método de RT-PCR se pudo confirmar la presencia de CDVd de manera individual o coinfectado con CBLVd.

No se observó amplificación en ninguna de las muestras de plantas infectadas con otros patógenos (muestras 41 a 48) con el método ajustado, demostrando la alta especificidad del mismo.

El método biológico permite detectar viroides tanto individuales como en mezcla sin posibilidad de identificación (Ito *et al.*, 2002). Por esto, las muestras T-0008, T-0069, T-0184 y T-0514 que contenían CEVd y la T-0074 infectada con HSVd manifestaron síntomas en el diagnóstico biológico y mostraron bandas en el gel mediante el diagnóstico por sPAGE, pero estaban libres de CDVd y CBLVd. Como testigos negativos se incluyeron además muestras de 57 plantas madres sanas del CSC y cinco plantas de invernadero sin inocular, las que resultaron negativas con todas las técnicas.

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos con la técnica de reacción en cadena de la polimerasa de las 110 plantas analizadas mostraron 100% de correlación con los métodos de referencia utilizados.

Mediante la técnica propuesta se pudo detectar la presencia de CDVd y CBLVd en los controles positivos correspondientes. Respecto a los testigos negativos, las 70 plantas sanas o infectadas con otros patógenos no presentaron amplificación.

Las 25 muestras de campo analizadas, tanto de plantas con síntomas como asintomáticas que resultaron positivas para viroides por los otros dos métodos ensayados, amplificaron para CDVd y/o CBLVd.

Por todo lo anteriormente detallado, este trabajo demuestra que la RT-PCR con los cebadores seleccionados es una herramienta apropiada para el diagnóstico de CBLVd y CDVd en aislados de la región y por lo tanto, se incorpora como método de rutina. Como ventaja adicional, permitió la identificación inequívoca de los viroides estudiados requiriendo un tiempo significativamente inferior (48 horas) para la obtención de resultados, en comparación con las otras técnicas disponibles hasta el momento.

El uso complementario de dos o más metodologías incrementa la seguridad y la confiabilidad de los resultados y minimiza la incertidumbre, sobre todo en aquellos casos de importación y exportación de material vegetal, certificación o cuarentena (Olmos *et al.*, 2008). En este sentido, la puesta a punto del presente método representa una tercera alternativa diagnóstica que contribuye al fortalecimiento del sistema de detección.

Finalmente, el trabajo realizado fue analizado por el Laboratorio de Marcadores Moleculares y Fitopatología de la Dirección de Calidad del INASE e incorporado posteriormente como metodología habilitada en el anexo II de la vigente normativa (Resolución 479/2023), lo que constituye un aporte relevante del Centro de Saneamiento de Citrus de la EEOC al sistema nacional de certificación cítrico.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Garnsey, S. M.; D. L. Zies; M. Irely; P. J. Sieburth; J. S. Semancik; L. Levy and M. E. Hilf. 2002.** Practical Field Detection of Citrus Viroids in Florida by RT-PCR. En: Proc. Conf. IOCV, 15 Riverside, CA, USA, pp. 219-229.
- INASE. 2023.** Normativas. Resolución 458/2023. Publicado en internet, disponible en <https://www.boletinoficial.gob.ar/detalleAviso/primera/291056/20230727> (consultado julio 2024).
- INASE. 2023.** Normativas. Resolución 479/2023. Anexo II. Publicado en internet, disponible en <https://www.boletinoficial.gob.ar/detalleAviso/primera/291916/20230810?busqueda=2> (consultado julio 2024).
- Ito, T.; H. Ieki; K. Ozaki; T. Iwanami; K. Nakahara; T. Hataya; M. Isaka and T. Kano. 2002.** Multiple citrus viroids in citrus from Japan and their ability to produce exocortis-like symptoms in citron. *Phytopathology* 92: 542-547.
- Ito, T.; H. Ieki and K. Ozaki. 2002.** Simultaneous detection of six citrus viroids and Apple stem grooving virus from citrus plants by multiplex reverse transcription polymerase chain reaction. *Journal of Virological Methods* 106: 235-239.
- Luchi, N.; R. Ios & A. Santini. 2020.** Fast and reliable molecular methods to detect fungal pathogens in woody plants. *Appl Microbiol Biotechnol* 104: 2453-2468. <https://doi.org/10.1007/s00253-020-10395-4>.
- Ministerio de Economía, Obras y Servicios Públicos, Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación (MEOSP-SAGPyA). Resolución 149/98. 1998.** Normas para la producción, comercialización e introducción de plantas cítricas de vivero y sus partes. MEOSP-SAGPyA, Buenos Aires. Argentina.
- Olmos, A.; N. Capote; E. Bertolini y M. Cambra. 2007.** Molecular diagnostic methods for plant viruses. *Biotechnology and Plant Disease Management*; 227-249.
- Olmos, A.; E. Bertolini y M. Cambra. 2008.** Validación de métodos de detección y diagnóstico de patógenos y costes de la especificidad y sensibilidad. *Boletín SEF* (63): 7-11.
- Palacios, M. & J. Figueroa. 2022.** First report of CBLVd and CDVd in Argentina. *Journal of Citrus Pathology*, 9. <http://dx.doi.org/10.5070/C49151296>. Retrieved from <https://escholarship.org/uc/item/7212n0wp>
- Semancik, J. S.; T. J. Morris; L. G. Weathers; G. F. Rordorf and D. R. Kearns. 1975.** Physical properties of a minimal infectious RNA (viroid) associated with the exocortis disease. *Virology* 63: 160-167.
- Venbrux, M.; S. Crauwels and H. Rediers. 2023.** Current and emerging trends in techniques for plant pathogen detection. *Front Plant Sci.* May 8; 14:1120968. doi: 10.3389/fpls.2023.1120968. PMID: 37223788; PMCID: PMC10200959.



**ESTACION EXPERIMENTAL
AGROINDUSTRIAL
OBISPO COLOMBRES**

Tucumán | Argentina