

CIENCIAS EXACTAS

EVALUACIÓN DEL RENDIMIENTO PARA LA PRODUCCIÓN DE ETANOL EN ONCE CULTIVARES DE CAÑA DE AZÚCAR (*Saccharum* spp. HÍBRIDO) DURANTE UN CICLO DE PRODUCCIÓNEVALUATION OF PERFORMANCE FOR ETHANOL PRODUCTION IN ELEVEN SUGARCANE CULTIVARS (*Saccharum* spp. HYBRID) DURING A PRODUCTION CYCLE

Autores:

Bracho, Nolis^{1,2}; Labrador, José^{1,2}; Vielma, José^{3,4}¹ Universidad Nacional Experimental Sur del Lago "Jesús María Semprum", Santa Bárbara de Zulia, estado Zulia.² Universidad Nacional Experimental del Táchira, San Cristóbal, estado Táchira.³ Laboratorio Clínico Biocenter, Barinas, estado Barinas.⁴ Universidad Politécnica Territorial "José Félix Ribas", Barinas, estado Barinas, Venezuela.

Corresponding Author: joravig2015@gmail.com

RESUMEN

Con el fin de evaluar el rendimiento de caña de azúcar (*Saccharum* spp. híbrido) para la producción de etanol, se utilizaron once cultivares: V91-8, V98-86, V91-01, V99-271, C323-368, V98-120, V99-236, B80-408, V00-50, V99-190, CP74-2005 durante un ciclo de producción. El ensayo se llevó a cabo en el campo de la UNESUR, en un diseño de bloques al azar, eligiéndose plantas del surco central de cada parcela experimental (45m²/trat). Los criterios evaluados fueron: producción en toneladas de caña por hectárea (TCH), toneladas de azúcar/ha (TAH), porcentaje de polisacáridos (% POL), litros de etanol por hectárea (LtEt/ha), eficiencia (LtEt/TC) y concentración del etanol producido. Los resultados indican diferencias no significativas entre los tratamientos por efecto de los cultivares para la variable TAH, y altamente significativas para eficiencia (LtEt/TC) ($p \geq 0,001$) y concentración de etanol ($p \geq 0,001$). Entre los cultivares sobresalientes: para TCH V-91-8, V98-120, V99-190, con un promedio de 73,04; para TAH, V91-8 (9,67), V98-120 (11,21) y V99-190 (9,66), para % POL, CP74-2005, V91-01, C32-368 con promedio 46,97% para concentración de etanol producido V-91-8, C323-68, CP74-2005 con un promedio de (46,97%), para (LtEt/ha) la V-98-120, V98-86 y CP74-2005 en promedio de 1.717,29. En cuanto a eficiencia (LtEt/TC) los mejores cultivares resultaron C32-368 (27,9) V98-6 (55,48) y CP74-2005 (40,84). Para efecto de producción en cuanto a calidad y pureza del etanol en el municipio Colón se deben sembrar los cultivares V91-8, V99-236 y CP74-2005.

ABSTRACT

To aim the performance of sugarcane (*Saccharum* spp. hybrid) for ethanol production, eleven cultivars: V91-8, V98-86, V91-01, V99-271, C323-368, V98-120, V99-236, B80-408, V00-50, V99-190, and CP74-2005, during a production cycle were evaluated. The trial was carried out in the field of the UNESUR, in a random block design, choosing plants from the central furrow of each experimental plot (45m²/ treat). The criteria production in tons of cane per hectare (TCH), tons of sugar/ha (TAH), percentage of polysaccharides (% POL), liters of ethanol per hectare (LtEt/ha), efficiency (LtEt/TC) and concentration of the ethanol produced were evaluated. The results indicate non-significant differences between the treatments due to the effect of the cultivars for the variable TAH, and highly significant for efficiency (LtEt/TC) ($p \geq 0.001$) and ethanol concentration ($p \geq 0.001$). Among the outstanding cultivars in this trial were: for TCH V-91-8, V98-120, V99-190, with an average of 73.04; for TAH, V91-8 (9.67), V98-120 (11.21) and V99-190 (9.66), for % POL, CP74-2005, V91-01, C32-368 with average 46.97% for concentration of ethanol produced V-91-8, C323-68, CP74-2005 with an average of (46.97%), for (LtEt/ha) the V-98-120, V98-86 and CP74-2005 on average of 1,717.29. In terms of efficiency (LtEt/TC), the best cultivars were C32-368 (27.9), V98-6 (55.48) and CP74-2005 (40.84). For production purposes in terms of quality and purity of ethanol in the Colón municipality, the cultivars V91-8, V99-236 and CP74-2005 should be planted.

Palabras clave: *Saccharum* spp. híbrido; etanol; variedad; fermentación de azúcares, biocombustibles.

Key words: *Saccharum* spp. hybrid; ethanol; variety; fermentation of sugars, biofuels.

Recibido: 10/07/2024

Aprobado: 16/12/2024

INTRODUCCIÓN

De acuerdo con un documento de la Comisión Económica Para América Latina y el Caribe (CEPAL) del año 2008 se estableció que frente a las dificultades para asegurar el abastecimiento de petróleo y sus derivados, y la fuerte alza en sus precios, la adopción de los programas de biocombustibles por parte de los países desarrollados, particularmente de los Estados Unidos y de la Unión Europea, plantea una serie de oportunidades, desafíos y riesgos para los países en vías de desarrollo (German Agency for Technical Cooperation, 2008; Aguilar Rivera *et al.*, 2012; Labrador Ramírez *et al.*, 2020). Debido a esta situación, se deben buscar alternativas viables que minimicen el grado de la contaminación ambiental (D'Hont *et al.*, 1998; Aguilar Rivera, 2007; Castro Martínez *et al.*, 2012).

El uso del etanol ($\text{CH}_3\text{CH}_2\text{OH}$) como aditivo para combustibles o directamente como fuente de estos ha crecido en popularidad debido a las regulaciones gubernamentales y en algunos casos a los incentivos económicos basados en preocupaciones medio ambientales, así como al deseo de reducir la dependencia del petróleo (Mussatto *et al.*, 2010; Devi *et al.*, 2022).

Actualmente en el mundo el biocombustible más importante es el etanol producto cien por ciento renovable, obtenido a partir de los cultivos bioenergéticos y de la biomasa. El uso de este alcohol como combustible no genera una emisión neta de dióxido de carbono (CO_2) sobre el ambiente, debido a que el CO_2 producido en los motores durante la combustión y durante el proceso de obtención del etanol, es nuevamente fijado por la biomasa mediante el proceso de fotosíntesis (Sanhueza, 2009; Meléndez, 2022).

Entre los cultivos bioenergéticos más usados para la producción de etanol, la caña de azúcar es la materia prima más utilizada en países tropicales como Brasil (principal productor mundial de etanol).

En el caso de Brasil, la fermentación a gran escala y no aséptica de materias primas de caña de azúcar para producir etanol combustible emplean a la levadura *Saccharomyces cerevisiae* como el organismo predominante. Varios factores influyen en la producción de etanol a gran escala como: la variedad de caña de azúcar, el diseño de los procesos, condiciones climáticas y operativas de las denominadas biorefinerías (Rego-Costa *et al.*, 2023).

En nuestro país, la zona Sur del lago de Maracaibo presenta ventajas para la producción de biocombustibles, por las grandes extensiones de terrenos fértiles para diferentes rubros como: la caña de azúcar, plátanos, palma aceitera entre otros rubros del sector vegetal (Meléndez *et al.*, 2021; Meléndez *et al.*, 2022). La caña de azúcar es un cultivo tradicional en Venezuela y el proceso de obtención de etanol a partir de caña de azúcar comprende dos etapas: una fase de extracción del jugo de caña (rico en azúcares) y en segundo lugar el acondicionamiento para hacerlo más asimilable por las levaduras durante la fermentación (Alvira *et al.*, 2010; Aro, 2016).

El presente estudio plantea como objetivo general evaluar el rendimiento de la producción de etanol en once cultivares de caña de azúcar (*Saccharum* spp. híbrido) durante un ciclo de producción en la hacienda La Glorieta, en el campo Experimental de la UNESUR.

MÉTODO

Tipo y diseño de la investigación. El tipo de investigación fue experimental y de campo, bajo el paradigma cuantitativo (Sabino, 1992; Sabino, 2002). El diseño de la investigación se realizó de manera aleatoria, utilizando la forma de bloques.

Población y muestra. Estuvo representada por plantas establecidas en un área efectiva de superficie plana de 3.000 m². La población general comprendió 11.880 plantas de las once variedades evaluadas. Por su parte, las muestras fueron una alícuota de tan solo 99 plantas de caña de azúcar, con un peso promedio de 2-4 kg.

Índice de maduración. Es definido como el proceso gradual de acumulación de sacarosa en el tallo de la caña de azúcar (maduración fisiológica). Las variedades de la caña de azúcar maduran en forma diferente a pesar que compartan similares condiciones ambientales y de manejo. En caña de azúcar se han reportado tres tipos de maduración: botánica, fisiológica y económica (Larrahondo y Villegas, 1995). La determinación del momento adecuado para el corte de la caña, que corresponda a la máxima maduración o acumulación de sacarosa, determina en parte los rendimientos de azúcar. Las medidas del Brix ($^{\circ}$ Brix) que se realizaron en el campo experimental de la UNESUR con el refractómetro de mano (figura 1) en los tercios medios e inferior de los tallos, son sencillas, fáciles de realizarse y tienen buena precisión en la determinación del grado de maduración (Larrahondo y Villegas, 1995).

Procesamiento de las muestras. La investigación se inició en el mes de junio de 2008 con la siembra de esquejes de las siguientes variedades: V91-8, V98-86, V91-01, V99-217, C32-368, V98-120, V99-236, B80-408, V00-50, V99-190 y CP74-2005, provenientes del material genético del Instituto Nacional de Investigaciones Agrícolas (INIA), San Cristóbal, estado Táchira. El área de terreno a utilizar fue de topografía plana, previamente preparado con un pase de arado, 2 pases de rastra y uno de surcado.

La parcela experimental considerada fue de 45 m², de 1.50 metros entre surco por 10 m de largo con separación entre los tres bloques de 6 m. Para la evaluación de las muestras se consideró un bloque para cada variedad, consistentes en tres surcos, para la recolección de las muestras se cortaron cinco tallos al azar solo del surco central. La siembra de las plantillas (años 2008-2009) se realizó con una densidad de 12 yemas / metro lineal de surco.

El ensayo fue conducido por el ciclo de plantilla; la cosecha de la plantilla se efectuó a los trece meses (julio, 2009), de acuerdo con un cronograma de actividades. La fertilización en fase de plantilla se realizó conforme al análisis

de suelo con 280 Kg/ha de urea ($\text{N}_2\text{H}_4\text{CO}$), 200 kg / ha de superfosfato triple (técnicamente, se conoce como fosfato diácido de calcio y como fosfato monocálcico [$\text{Ca}(\text{H}_2\text{PO}_4)_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$]) y 430 Kg. de cloruro de potasio (KCl), aplicándose todo el fósforo 1 / 3 de nitrógeno y 1 / 3 de potasio al momento de la siembra y 1 / 3 de nitrógeno y 1 / 3 de potasio a los 45 días y el resto de fertilizante a los 90 días (Labrador Ramírez *et al.*, 2020).

La labor de la muestra de suelo se realizó a los 60 días, previo a la siembra se tomaron las muestras de suelo donde los resultados revelaron 40 cm. de profundidad, un suelo de textura franco arcillosa, alto en fósforo 46 ppm, alto en potasio 212 ppm, contenido medio de calcio 65 ppm, medio en materia orgánica 3,37%. A cada variedad se le determinó: el % de brotación, aspecto general del cultivo, índice de maduración y las variables de producción: toneladas de caña por hectárea (TCH), toneladas de azúcar por hectárea (TAH), litros de etanol por hectárea (LtEt/Ha), litros de etanol por tonelada de caña (LtEt/TC), rendimiento % de extracción, % de sacarosa $^{\circ}$ Brix.

A partir de los 10 meses (280 días) se determinó la brixometría del cultivo cada 20 días, para el índice de maduración hasta los 360 días. En el momento que cada una de las variedades alcanzó el punto de maduración (tabla 1), se procedió a muestrear cinco tallos del surco central, se pesaron y enviaron al laboratorio en el INIA del estado Yaracuy, donde se les realizó el análisis de % de polisacáridos, sacarosa, peso de los tallos, $^{\circ}$ Brix, entre otros parámetros.

Los tallos cosechados fueron trasladados al molino donde se les extrajo el jugo de caña de azúcar pesándolo y midiendo su volumen, se pasaron por un filtro reteniendo partículas gruesas. Seguidamente, se tomó una porción de 1000 mL con el que se realizó el medio de cultivo en el laboratorio y se hizo la esterilización de los materiales y el jugo de caña, donde se formó el inóculo. Después, se dejó en reposo para bajar la temperatura, el pH se ajustó a 4.5 agregando ácido sulfúrico (1 M de H_2SO_4), se agregó 10g de la levadura *Saccharomyces*

cerevisiae, 0,65g de sulfato de calcio, 0,5g de urea y pequeñas cantidades de sulfato de zinc, cobalto y magnesio. Posteriormente, se llevó a la

incubadora con una temperatura de 32°C dejándolo en reposo por 24 horas (Figura 1) (Labrador-Ramírez *et al.*, 2020).

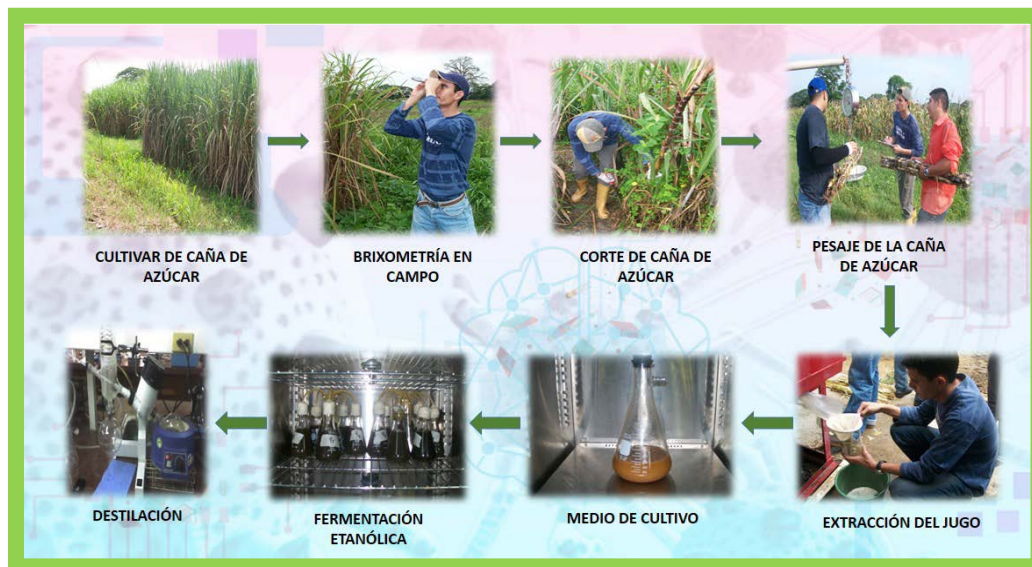


Figura 1. Esquema propuesto para la obtención de etanol a partir de los cultivares de caña de azúcar en la Hacienda La Glorieta, Santa Bárbara de Zulía, estado Zulía.

En el medio de cultivo se realizó la inoculación de las 99 muestras totales de 100mL, tomando los °Brix de cada jugo de caña y se colocó en un kitasato esterilizado de 100 mL sellado con un tapón de goma y en el extremo de boca fina se alargó una manguera reposando en un vaso de precipitado con agua para asegurar que el CO₂ producido por la fermentación apacigüe la presión del recipiente saliendo por allí, asegurando un ambiente completamente libre de O₂. Luego, se midió el pH de la misma manera que con el medio de cultivo, ajustando el pH 4.5 con ácido sulfúrico (1 M H₂SO₄) y se inoculó con el medio de cultivo con 3% del volumen de jugo de caña o mosto (3mL). Estas muestras se colocaron en una incubadora a una temperatura de 32°C por un tiempo de 5 días (Reyes Hernández *et al.*, 2022).

Una vez que se alcanzó la fermentación de las muestras se determinó el tiempo óptimo de fermentación (10 a 12 días), posteriormente se midieron los °Brix de las muestras para comparar las concentraciones de los azúcares antes y después de la fermentación. Seguidamente, se procedió con la destilación de cada jugo

fermentado, colocándolo en un balón de destilación (500mL) los 100 mL para instalarlo en el rotaevaporador, donde se realizó el proceso de destilación, una vez que el termómetro indicó una temperatura de 76°C, el líquido obtenido se descartó, colectando a partir de los 78°C hasta los 92°C, donde se obtuvo el etanol, más un pequeño porcentaje de agua.

Así, al producto obtenido por la destilación se le midió el volumen en un cilindro graduado, se tomaron pequeñas cantidades de etanol para medir el índice de refracción con el refractómetro digital, obteniendo los datos necesarios para llevarlos a la recta de calibración con la que se obtuvo la concentración del etanol producido. Después de finalizado el proceso de destilación para todas las muestras se determinó el porcentaje de etanol producido, rendimiento de etanol por Ha (LtEt/Ha) y eficiencia (LtEt/TC).

Análisis estadístico y procesamiento de los datos. Para el procesamiento de los datos primarios se realizó un análisis estadístico de la varianza y la prueba de medias de Tukey con el

programa estadístico SPSS-Windows para: TCH, % Pol, TAH, concentración del Etanol, LtEt/Ha, LtEt/TC. Todas las variables analizadas fueron interpretadas mediante histogramas, curvas de interpretación, comparaciones en la fase de plantilla con la soca I y posteriormente se interpretaron los resultados obtenidos (Labrador-Ramírez *et al.*, 2020).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 se presenta el índice de madurez para los cultivares incluidos en este estudio. Para cada una de las once variedades de *Saccharum* spp. híbrido se obtuvo un índice de madurez que osciló entre 0.7 y 1.2, lo cual nos permitió conocer el estado de maduración respectivo.

El índice de maduración de las variedades tardías se muestra en la Figura 2, lo cual indicó el punto

de cosecha del ensayo que se inició con el muestreo de las lecturas de los grados Brix (°Brix). Según estos valores se puede apreciar que las variedades V98-120, B80-408, V00-50 y V99-190 se comportaron como tardías, ya que no superaron el valor indicativo de la madurez fisiológica (Pm: 0.95 - 1), aun cumpliendo con el ciclo del cultivo y no estaban aptas para cosechar, pues su indicador de madurez osciló entre 0,7 y 0.9 para las condiciones del municipio Colón. A fin de optimizar los rendimientos de las variedades establecidas, la cosecha se debe realizar en el punto óptimo de la maduración del cultivo, donde la alta concentración de sólidos solubles presentes en el tallo favorece los rendimientos en producción de sacarosa, contribuyendo con la producción de etanol.

Tabla 1. Índice de Madurez de los cultivares de caña de azúcar (*Saccharum* spp. híbrido) durante un ciclo de producción en el campo experimental de la UNESUR.

Nº	Cultivares	Días de la Plantación					Promedio	Estado de maduración del cultivo
		280	300	320	340	360		
		I	II	III	IV	V		
1	V91-8	0,9	1,0	1,0	0,9	1,0	0,9	Madura
2	V98-86	0,9	0,9	0,9	0,9	0,8	0,9	Madura
3	V91-01	0,9	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	Madura
4	V99-217	0,9	1,2	0,9	0,9	0,8	1,0	Madura
5	C32-368	0,8	0,8	0,9	0,9	0,9	0,9	Madura
6	V98-120	0,8	0,8	0,9	0,9	1,0	0,9	Madura
7	V99-236	0,8	0,8	0,8	0,8	0,9	0,8	Inmadura
8	B80-408	0,7	0,6	0,7	0,8	0,7	0,7	Inmadura
9	V00-50	0,8	0,7	0,9	0,8	0,8	0,8	Inmadura
10	V99-190	0,9	0,7	0,7	0,9	0,8	0,8	Inmadura
11	CP74-2005	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	0,9	Madura

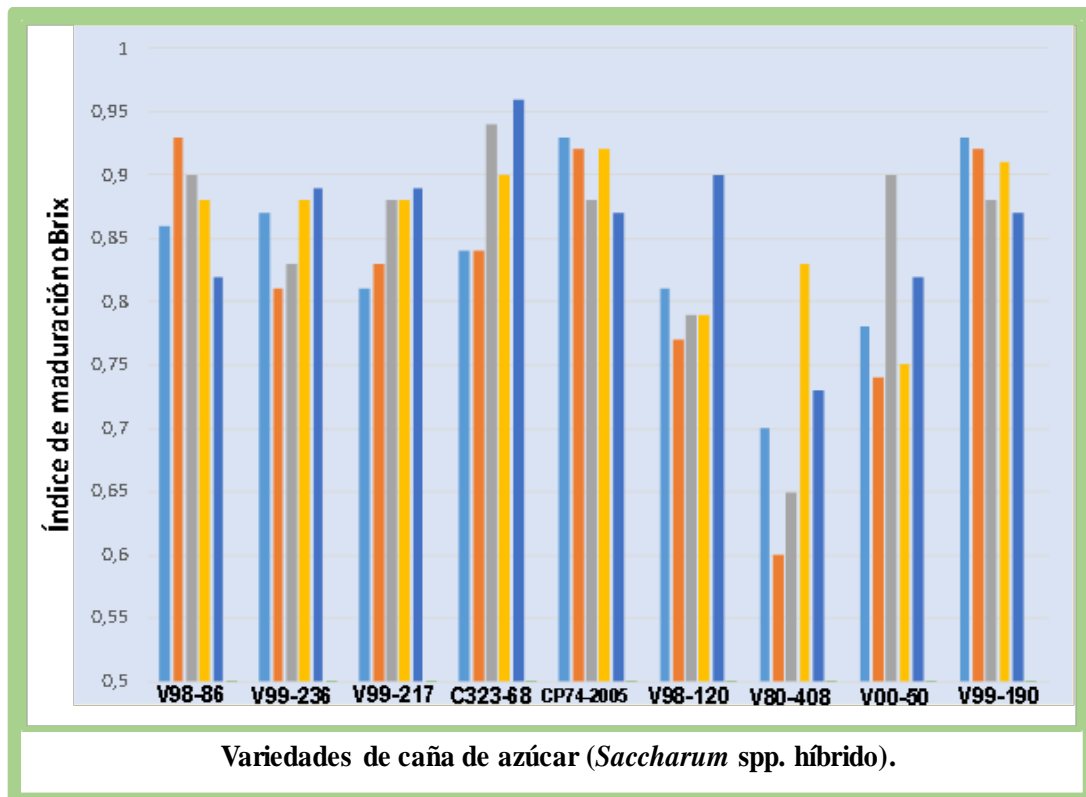


Figura 2. Índice de maduración de las variedades tardías en estudio en once cultivares de caña de azúcar (*Saccharum* spp. híbrido) durante un ciclo de producción. La variable tiempo a 280 días se representa en color azul claro, el color naranja indica el índice de maduración a los 300 días, a los 320 días le corresponde el color gris claro, 340 días indica el valor del índice de maduración en color amarillo ocre y finalmente el color azul oscuro representa el valor del índice de maduración a los 360 días.

En la Figura 3 se evidenció que las variedades V91-8, V91-01 alcanzaron el punto de maduración fisiológica antes de cumplir el ciclo del cultivo (360 días), comportándose como variedades precoces, pues su índice de maduración supera el 0.95, valor obtenido en la brixometría al momento de realizar la lectura en el campo, donde más de 50% de los materiales

estaban a punto de cosecha antes de cumplir el ciclo del cultivo. En este sentido, se puede decir que la maduración o punto de cosecha en la caña de azúcar está afectado por las características genéticas propias de la variedad, pero restringido por las condiciones del medio ambiente (Valecillos, 2002).

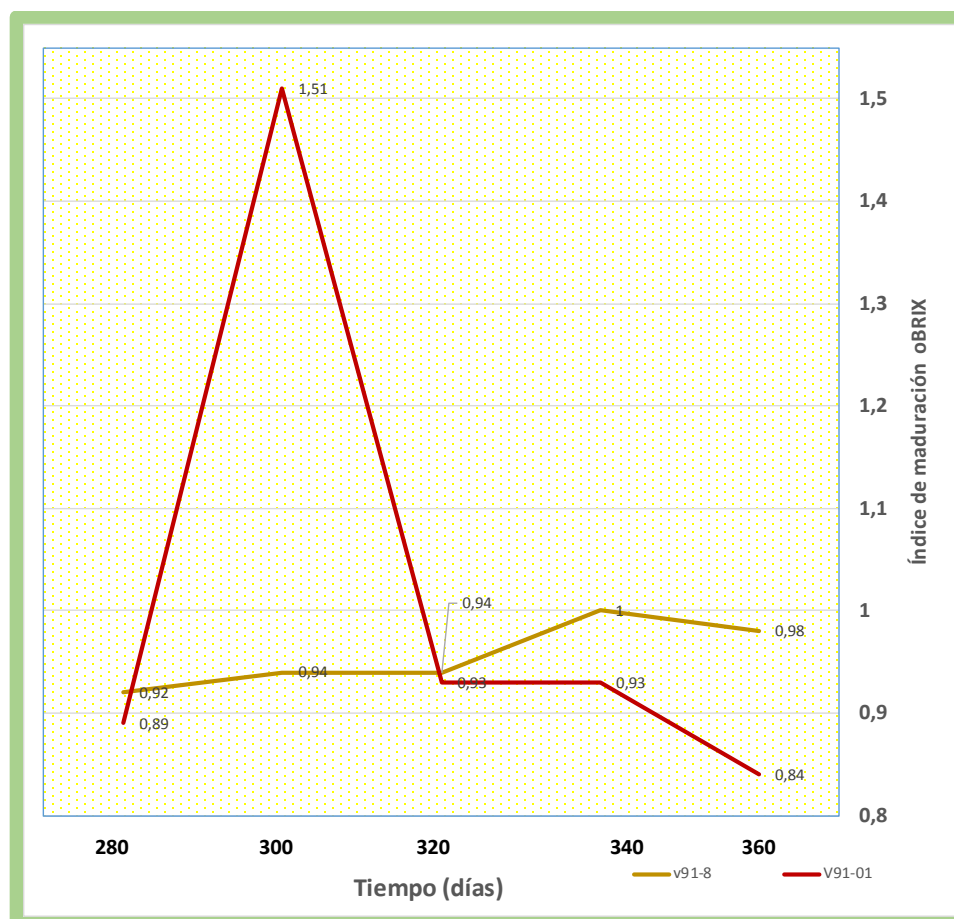


Figura 3. Índice de maduración de variedades precoces en estudio en once cultivares de caña de azúcar (*Saccharum* spp. híbrido) durante un ciclo de producción. La variedad V91-8 se muestra en color marrón claro y la variedad V91-01 se muestra en color rojo.

En la Figura 4 se presentan los resultados promedios de las toneladas de caña por hectárea (TCH) para cada uno de los cultivares de caña de azúcar incluidos en este estudio. Al comparar los valores promedios para esta variable la prueba de medias de Tukey para la respuesta al rendimiento en TCH, donde los resultados según el ANOVA revelaron diferencias significativas ($Pr > f = 0,0209$) para esta variable, apreciándose tres grupos de medias: El primer grupo, conformado por los valores más altos en TCH para las variedades V91-8, V98-120, V99-190 en un promedio de 73,04. Un segundo grupo intermedio, conformado por las variedades V91-01, V99-217 y V00-50, con valor promedio en TCH de 57,17 TCH y un tercer grupo con los

valores bajos en TCH, conformado por los materiales V98-86, C32-368, V99-236 y CP74-2005, en un promedio de 35,68. Esta respuesta no supera a los valores de los ensayos realizados por Alvarado y El Ayoubi en 2007, con condiciones iguales y con otros cultivares azucareros, donde el rendimiento promedio fue 131,04 para la variable TCH en fase soca II y una diferencia no significativa para esta variable; cabe destacar que los rendimientos de esta variable en la zona se vieron afectados por condiciones ambientales poco favorables para el desarrollo del cultivo, pues presentan un periodo de sequía extremo durante la etapa crítica y desarrollo del cultivar.

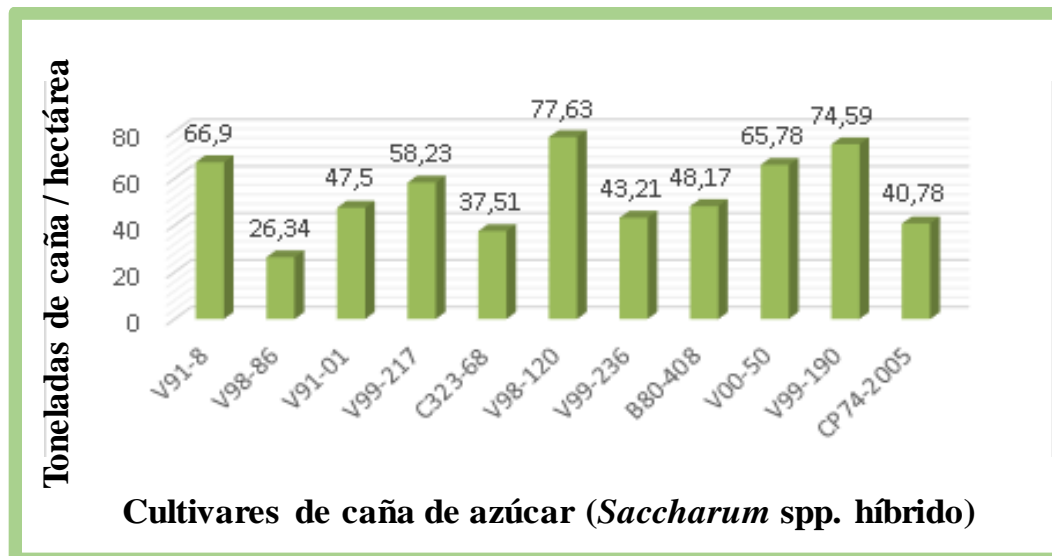


Figura 4. Toneladas de caña por hectárea (THC) en once cultivares de caña de azúcar (*Saccharum* spp. híbrido) durante un ciclo de producción.

En la Figura 5 se muestran los resultados obtenidos para la variable porcentaje de polisacáridos, donde la variedad que arrojó mejores resultados fue: CP74-2005 (54,6%). En cuanto al de menor % de Pol obtenido tenemos la V99-217 (12,93%). El resto de las variedades en estudios se comportaron de forma similar, obteniéndose valores que oscilan entre 20,73 y 42,47%, valores estos considerados óptimos para

una zona de alta humedad y elevada precipitación. Posiblemente los altos porcentajes de polisacáridos (% de Pol) expresados por las variedades se debieron a la buena fertilidad del suelo y características genéticas propias de la variedad, ya que un alto % de Pol es un indicador de alto rendimiento en sacarosa, azúcar y por ende de etanol (Gómez, 1975).

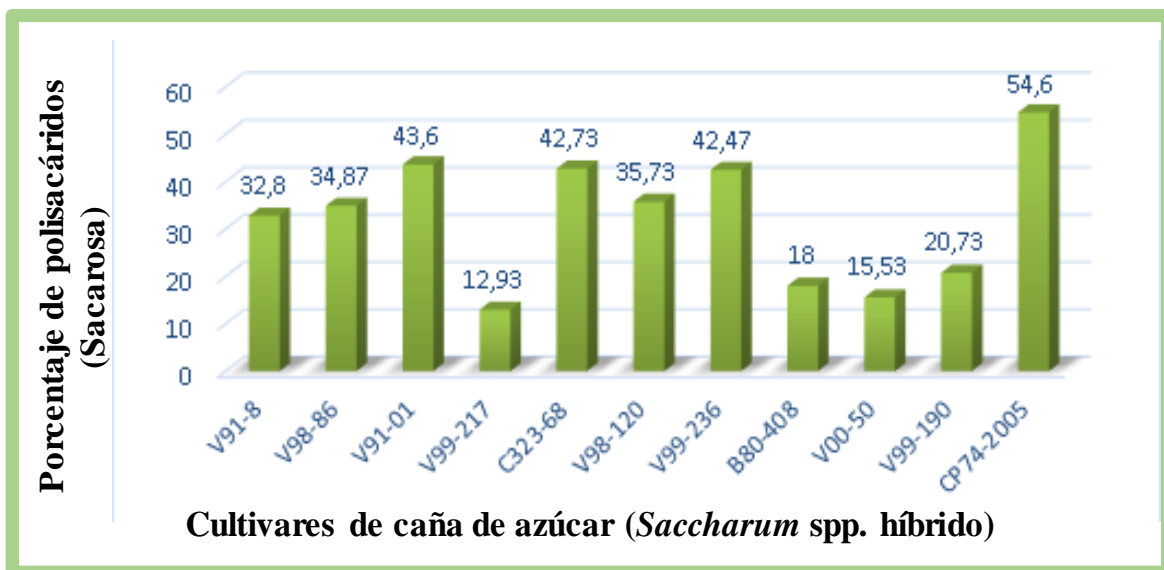


Figura 5. Promedios del Porcentaje de Polisacáridos (Sacarosa) en cultivares de caña de azúcar (*Saccharum* spp. híbrido) durante un ciclo de producción.

En la Figura 6 se muestran los promedios para la variable TAH, donde los resultados indicaron dos situaciones diferentes: un primer grupo con valores en producción de azúcar en un promedio de 10,18 TAH, conformado por V91-8, V98-120, V99-190; y un segundo grupo con los valores más bajos en promedio de 6,11 TAH, conformado por V98-86, C323-68, B80-48. Estos rendimientos en azúcar son similares al ensayo realizado en zonas óptimas para el

cultivo de la caña de azúcar del país, Amaya *et al.*, 2003 en la localidad de Ureña estado Táchira, sus mejores resultados fueron para las variedades PR980 (12 TAH) y la B74-118 (11,8 TAH). Es importante resaltar que los altos rendimientos en azúcar se deben a los altos contenidos de % de Pol de las variedades que se puede ver reflejada en los rendimientos de alcohol.

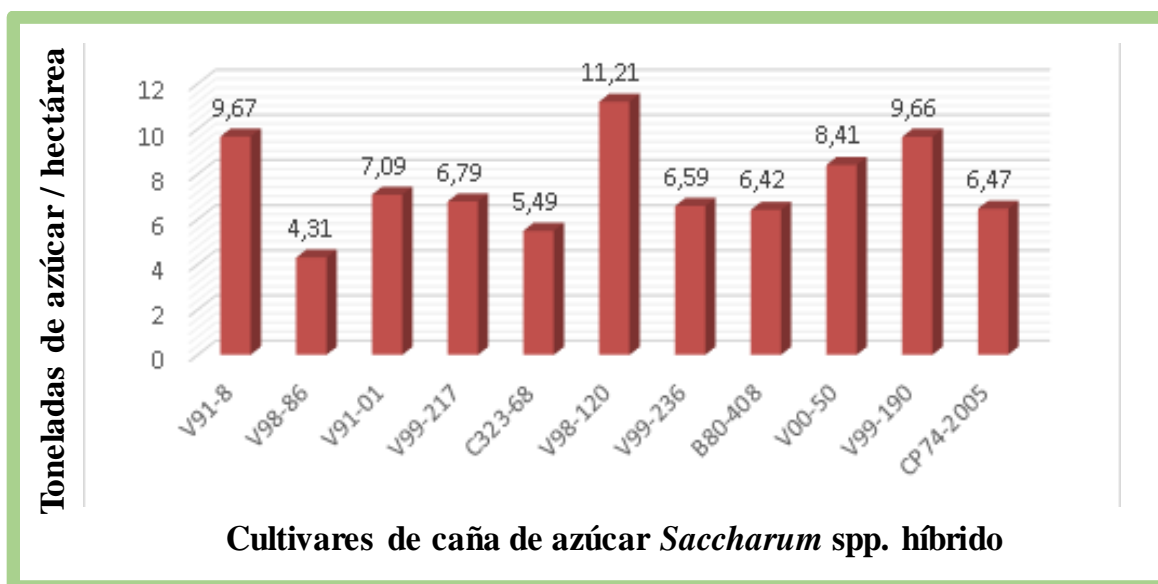


Figura 6. Toneladas de azúcar por hectárea en cultivares de caña de azúcar (*Saccharum* spp. híbrido) durante un ciclo de producción en la hacienda La Glorieta, Santa Bárbara de Zulia.

Producción de etanol en once variedades de caña de azúcar durante un ciclo de producción en la hacienda La Glorieta, UNESUR durante un ciclo de producción.

Con respecto a la producción mundial de etanol en el mundo para el año 2016 los principales países productores del bioetanol en unidades expresadas en metros cúbicos $\times 10^6$ fueron en orden descendente: Estados Unidos ($52,7 \text{ m}^3 \times 10^6$), Brasil (21,1), Unión Europea (5,3), resto del mundo (5,0), China (3,2), Canadá (1,7) para un total general de $66,7 \text{ m}^3 \times 10^6$ e acuerdo a la fuente: U.S Energy Information Administration (2017). En este contexto global, y desde una mirada comercial Brasil y USA han implementado de manera masiva y exitosa el etanol como combustible alternativo y han mostrado que puede ser competitivo con la

gasolina en precios y energía (Chandel *et al.*, 2014; Alonso Gómez y Bello Pérez, 2018).

Una de las ventajas comparativas de la producción de etanol a partir de caña de azúcar es su menor costo de producción, seguida por el proceso a partir de almidón de maíz. La caña de azúcar no es la única materia prima para la obtención del bioetanol, también se incluyen: la remolacha (utilizada en los países de Europa, con la denominada remolacha azucarera que rinde 5500 litros de etanol por hectárea trabajada), el maíz, el trigo y por supuesto el mayor rendimiento por hectárea trabajada se obtiene con el uso de la caña de azúcar que rinde un total de 6500 litros de etanol (Alonso Gómez y Bello Pérez, 2018).

Antes de continuar con la presentación de los resultados de etanol obtenidos en el presente trabajo, debemos señalar que en Venezuela no existe una industria de biocombustibles fuertemente desarrollada. Es más nuestro país importa bioetanol desde Brasil (Rosendo Rovati y Soledad Rodríguez (2021). No obstante, el desarrollo de un marco legal al menos en fase de preparación espera sentar la base para impulsar una necesidad impulsada desde PSVSA-gas.

En la Figura 7 se muestra la respuesta para la variable concentración del etanol, donde los resultados revelaron una discrepancia altamente significativa entre los materiales, diferenciándose en dos grupos cuyos valores más altos lo obtuvieron los cultivares V91-01, C32-368 y CP74-2005, con un promedio de 46,97 y el otro grupo con valores más bajos en promedio de 15,48 en los cultivares V99-217, B80-408 y V00-50. Estos resultados superaron los obtenidos en la investigación realizada por Labrador *et al.* 2016, cuyos promedios oscilaron entre V99-236 (31,17%) y B80-408 (24,2%). Esto es atribuido posiblemente a los índices de

refracción obtenidos para cada variedad, en los cuales se obtuvo un bajo promedio en sus valores, que al ser interpolado al método tabulado SSPS de la recta de calibración (Índice de Refracción vs % de Etanol) manifiestan esa calidad de concentración. Es decir, que la eficiencia de calidad del etanol para las 11 variedades es aparentemente igual y para efectos de selección se debe considerar la variedad que produjo mayor volumen de etanol.

En el trabajo de Alvarado y Amaya (2021) se utilizaron diferentes técnicas para el aprovechamiento de residuos lignocelulósicos como el bagazo de la caña de azúcar, mediante una serie de fases que incluyeron el pretratamiento de la materia prima, la hidrólisis enzimática, la fermentación de los azúcares por medio de levaduras y, por último, la fase de destilación para dar con la obtención del bioetanol. En el presente estudio se trabajó directamente con la materia prima, para posteriormente proceder a la fermentación con *S. cerevisiae*, lo que constituyó una producción aceptable de etanol.

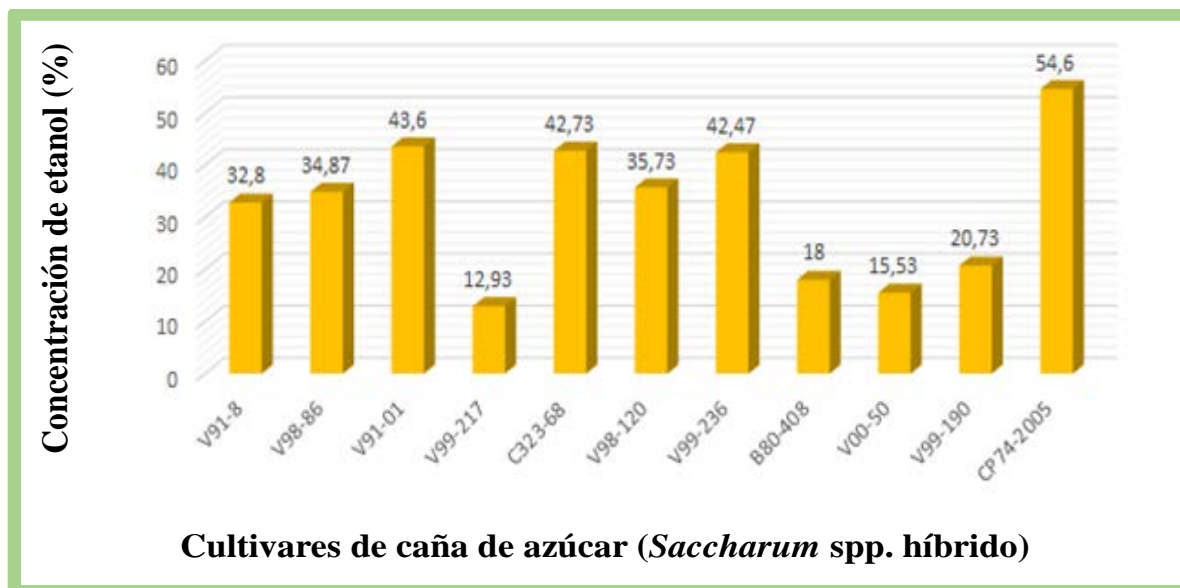


Figura 7. Valores promedios de la concentración de etanol (%) en once cultivares de caña de azúcar (*Saccharum* spp. híbrido) durante un ciclo de producción.

En la Figura 8 se presentan los valores promedios obtenidos para la variable eficiencia que relaciona los litros de etanol en función a la tonelada de caña de azúcar (LtEt / TC). Al

utilizar un análisis de la varianza para la prueba de medias de Tukey, se encontró una eficiencia altamente significativa ($Pr > f=0,001$). En efecto, en los valores absolutos se pudo corroborar que

sí existe diferencia, destacándose como los mejores cultivares V98-86, V99-236 y la CP74-2005, que mayores litros de etanol por tonelada de caña producen. Estos resultados fueron superiores a la investigación ejecutada por

Labrador *et al.* 2016, cuya respuesta a la variable eficiencia LtEt / TC para la prueba de media Tukey indicaron diferencias no significativas. Esto fue debido al comportamiento similar que obtuvieron los diversos cultivares a evaluar.

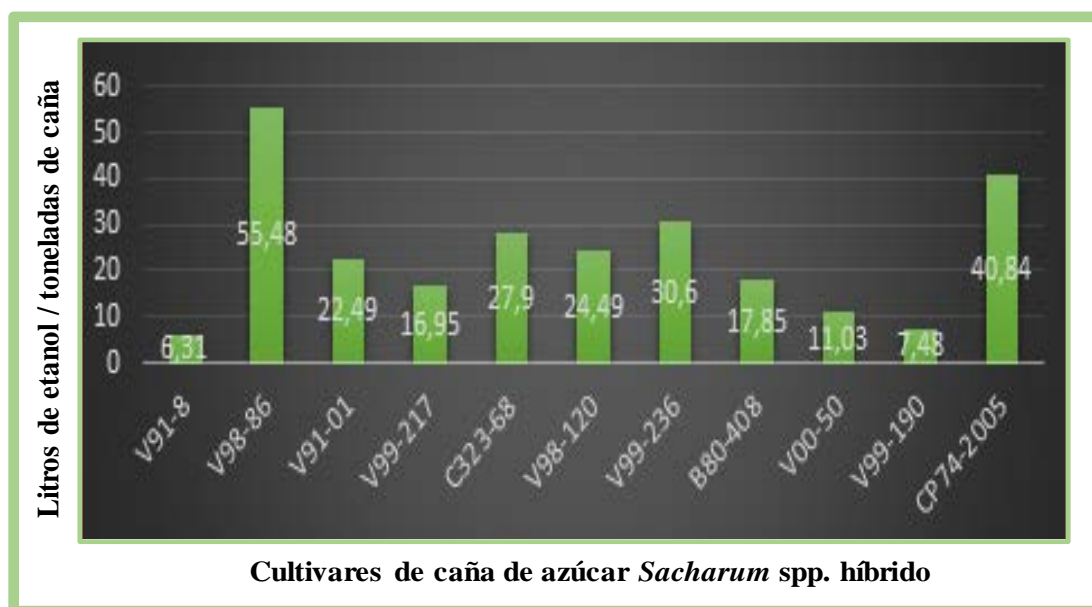


Figura 8. Valores promedio de la eficiencia (LtEt/TC) en once cultivares de caña de azúcar (*Saccharum* spp. híbrido) durante un ciclo de producción en el campo experimental UNESUR.

En la Figura 9 se presentan los resultados promedios en litros de etanol por hectárea en las once cultivares de caña de azúcar (*Saccharum* spp. híbrido) durante un ciclo de producción. Los resultados estadísticos de la prueba de medias de Tukey para la variable LtEt / Ha, en su análisis de la varianza encontró diferencias significativas ($Pr > f = 0,03$) entre las variedades que pueden ser atribuidos a los altos contenidos de % de sacarosa, donde se identifican tres grupos de medias. El grupo más eficiente lo conforman las variedades de mayor producción en LtEt / Ha: V98-86, V98-120 y CP74-2005, en un promedio de 1717,29 LtEt / Ha. Un grupo intermedio lo integran las variedades V91-01, C32-368, V99-236, con un promedio de 1138,42 LtEt / Ha. Y un tercer grupo lo constituyen las

variedades más deficientes V91-8, B80-408, V00-50 y la V99-190, con promedio de 603,82 LtEt / Ha. Estos volúmenes de etanol obtenidos son aparentemente buenos para la zona climática del municipio Colón, debido a los altos índices de precipitación que afectan la zona. Esta respuesta se asemeja a los resultados indicados por Alvarado y El Ayoubi (2007) para esta misma variable con diferentes variedades, donde obtuvieron mayores volúmenes de etanol. Del mismo modo los datos arrojados fueron inferiores comparados con el ensayo en fase plantilla realizado por Bardalez-Vásquez (2009) donde los mejores resultados obtenidos para esta variable fueron V99-236 y V99-217 con un promedio de 2.908,9 LtEt / Ha.

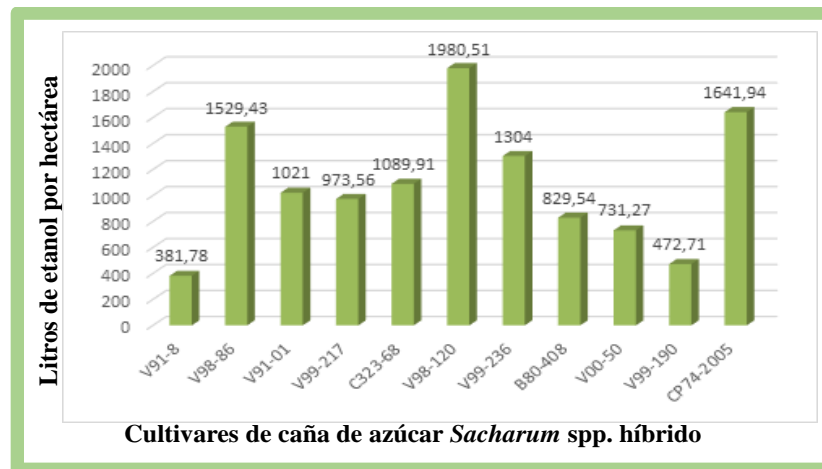


Figura 9. Promedio en litros de etanol por hectárea en once cultivares de caña de azúcar (*Sacharum* spp. híbrido) durante un ciclo de producción en la Hacienda La Glorietta, UNESUR, Santa Bárbara de Zulía, Venezuela.

Perspectivas. Para el año 2022 el consumo de biocombustibles se incrementó, con lo cual se compensó la disminución ocasionada por la drástica reducción del uso mundial de combustibles para transporte público durante la pandemia de la COVID-19, cuando se restringió el desplazamiento de las personas y la logística del gran comercio mundial entre países sufrió trastornos significativos afectando las ventas de bienes e insumos a escala mundial. El mercado del etanol casi volvió a los niveles registrados durante 2019. Si bien los precios mundiales de los biocombustibles (biodiesel y etanol) aumentaron debido al mayor costo de producción, ocasionado a su vez por los costos más altos de las materias primas y la mano de obra, los incrementos de los precios del petróleo y sus derivados superaron a los registrados en el mercado de biocombustibles con lo que se logró mantener los incentivos para continuar e incluso expandir el uso de biocombustibles (OCDE-FAO, 2023).

Una pregunta es necesaria: ¿Está Venezuela preparada para afrontar los retos en materia de biocombustibles, en especial del etanol? Esta inquietud debería llamar a reflexión, si bien la realidad del gigante latinoamericano Brasil parece muy distante, los ejemplos de nuestros hermanos de Argentina, Colombia, Paraguay deberían incentivarnos a explotar y diversificar nuestras metas a mediano y largo plazo en materias del bioetanol.

CONCLUSIÓN

En términos de producción en calidad, cantidad y pureza del etanol en el municipio Colón se deben sembrar los cultivares V91-8, V99-236 y CP74-2005, ya que ofrecen los mejores resultados en este estudio. Por otra parte, si se pretende establecer ensayos de producción vegetal, se deben disponer de herramientas tecnológicas que contribuyan a disminuir el efecto de las condiciones climatológicas y permitan el buen desarrollo de los cultivos de caña de azúcar. Para posteriores estudios, se hace necesario ampliar el número de repeticiones con el propósito de obtener resultados más precisos en cuanto a la producción y calidad del etanol obtenido a partir de la caña de azúcar.

REFERENCIAS

- Alonso-Gómez, L.A. y Bello-Pérez, L.A. (2018). Materias primas usadas para la producción de etanol de cuatro generaciones: retos y oportunidades. *Agrociencia*. 52 (7): 967-990. https://www.scielo.org.mx/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1405-31952018000700967
- Alvarado, J. y El Ayoubi, B. (2007). Etanol: alternativa para obtener combustible a partir de trece variedades de caña de azúcar (*Sacharum* spp. híbrido) en fase soca II. [Trabajo de grado]. Universidad Nacional Experimental Sur del Lago "Jesús María Semprum". Ingeniería de producción animal.

- Santa Bárbara de Zulía, estado Zulía. 98 p.
- Alvarado Ludeña, G. R. y Amaya Pinos, J. B. (2021). Obtención de bioetanol a partir del bagazo de la caña de azúcar mediante hidrólisis enzimática. [Trabajo de grado]. Universidad Politécnica Salesiana. Cuenca, Ecuador.. <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/21229>. 200 p.
- Aguilar-Rivera N., Galindo Mendoza, G. y Fortanelli Martínez, J.(2012). Evaluación agroindustrial del cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) mediante imágenes SPOT 5 HRV en la Huasteca México. Revista de la facultad de agronomía, La Plata. 111(2): 64-74.
- Aguilar-Rivera, N. (2007). Bioetanol de la caña de azúcar. Avances en investigación agropecuaria.11. <https://www.redalyc.org/pdf/837/83711303.pdf>. (3): 25-39.
- Alvira, P., Tomás-Pejó, E., Ballesteros, M. y Negro, M. J. (2010). Pretreatment technologies for an efficient bioethanol production process based on enzymatic hydrolysis: A review. Bioresource technology. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2009.11.093>. 101(13): 4851-4861.
- Amaya, F.L., Hernández, E. Y., Carrillo, P., Lindarte, O. y Bonilla, N. (2003). Caracterización del sistema productivo caña de azúcar en el valle San Antonio-Ureña, estado Táchira, Venezuela. Caña de azúcar. http://sian.inia.gob.ve/canadeazucar/cana2101/arti/amaya_1.htm. 21(1): 17-39.
- Aro, E.M. (2016). From first generation biofuels to advanced solar biofuels. Ambio. <https://doi.org/10.1007/s13280-015-0730-0>. 45(S-1): 24-31.
- Bardalez-Vásquez, C.B. (2009). Producción de bioetanol del desecho lignocelulósico "peladilla" de *Asparagus officinalis* L. "esparrago" por *Candida utilis* var. major cetc 1430. [Tesis doctoral].Universidad Nacional de Trujillo. <https://hdl.handle.net/20.500.14414/5911>. 61 p.
- Castro Martínez, C., Beltrán Arredondo, L.I. y Ortiz Ojeda, J.C. (2012). Producción de biodiesel o bioetanol ¿Una alternativa sustentable a la crisis energética? Ra Simhai revista de sociedad, cultura y desarrollo sustentable. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/<https://uaim.edu.mx/wbraximhai/Ej-25baticulosPDF/9%20CASTRO-MARTINEZ.pdf>. 8(3): 93-100.
- Chandel, A. K., T. L., Junqueira, E. R., Morais, V. L. R., Gouveia, O., Cavalett, E. C., Rivera, V. C., Geraldo, A., Bonomi, S. S. y Da Silva, S.S. (2014). Techno-economic analysis of second-generation ethanol in Brazil: Competitive, complementary aspects with first-generation ethanol. Biofuels in Brazil. Springer Int. Pub. pp: 1-29.
- Devi, A., Bajar, S., Kour, H., Kothari, R., Pant, D. y Singh, A. (2022). Lignocellulosic Biomass Valorization for Bioethanol Production: a Circular Bioeconomy Approach. Bioenergy Res. 15 (4): 1820-1841. <http://doi:10.1007/s12155-022-10401-9>.
- D'Hont A.; Ison, D.; Alix, K.; Roux, C.; Glaszmann, J.C. (1998). Determination of basic chromosome numbers in the genus *Saccharum* by physical mapping of ribosomal RNA genes. Genome. 41: 221-225.
- German Agency for Technical Cooperation (ONU. CEPAL). (2008). Biocombustibles líquidos para transporte en América Latina y el Caribe. CEPAL. <https://www.cepal.org/es/publicaciones/3638-biocombustibles-liquidos-transporte-america-latina-caribe>. 187 p.
- Gómez, F. (1975). Caña de azúcar. Edición UPAVE. Centrales azucareros, C.A. Caracas, Venezuela. 170 p.
- Labrador Ramírez J. R., Razz García, R. C., Bracho Bravo, B. Y., y Contreras Rubio, Q. L. (2020). Producción de etanol en 10 cultivares de caña de azúcar (*Saccharum* spp híbrido) en un ciclo productivo. Revista de la Facultad de Agronomía de la Universidad del Zulia. <https://produccioncientificaluz.org/index.php/agronomia/article/view/31198>. 36(2): 111-134.
- Labrador, J., Hernández, E. y Amaya F. (2008). Evaluación de 13 variedades de *Saccharum* spp. Híbrido con fines azucareros, paneleros y forrajeros en fase de plantilla, municipio Colón, estado Zulia, Venezuela. Producción Agropecuaria. 1(1): 7-14.
- Labrador, J., Mora, D., Alcántara, L., Paz, F., Hernández, E., Contreras, J. y Álvarez, R. (2016). Producción de panela en bloque en once cultivares de caña de azúcar (*Saccharum*

- spp. híbrido) en fase plantilla, municipio Colón. Producción agropecuaria. 5(1): 3-7.
- Laguna Garvett, M. (2011). Objetivos de sostenibilidad agrícola referida a la tendencia en los patrones de producir etanol a partir del maíz y de la caña de azúcar en Venezuela como materia prima. [Trabajo especial de grado]. Universidad Central Lisandro Alvarado. Postgrado de gerencia agraria, Barquisimeto, Venezuela. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/http://biadm.ucla.edu.ve/edocs_baducla/Repositorio/P1221.pdf. 246 p.
- Larrahondo, J.E. y Villegas, F. (1995). Control y características de maduración. En: CENICANA. El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia, Cali. CENICANA, https://www.cenicana.org/pdf_privado/documentos_no_seriados/libro_el_cultivo_cana/libro_p297-313.pdf. p. 297-313.
- Marcano, M., García, M. y Caraballo, L. (2003). Prueba comparativa de variedades de caña de azúcar en el noreste del estado Monagas, Venezuela. Bioagro. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-33612003000300010&lng=es&tlng=es. 15(3): 221-225.
- Meléndez, J. R., Velásquez-Rivera, J., El Salous, A., y Peñalver, A. (2021). Gestión para la producción de biocombustibles 2G: Revisión del escenario tecnológico y económico. Revista venezolana de gerencia. <https://doi.org/10.52080/rvg93.07>. 26(93): 78-91.
- Meléndez, J. R. (2022). Biotecnología y gerencia aplicada en la producción de bioetanol 1G y 2G. Revista de ciencias sociales. XXVIII (4): 415-429.
- Meléndez, J. R., Mátyás, B., Hena, S., Lowy, D. A., y El Salous, A. (2022). Perspectives in the production of bioethanol: A review of sustainable methods, technologies, and bioprocesses. Renewable and sustainable energy reviews. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2022.112260>. 160: 112260.
- Mussatto, S.I., Dragone, G., Guimarães, P.M., Silva, J.P., Carneiro, L.M., Roberto, I.C., Vicente, A., Domingues, L. y Teixeira, J.A. (2010). Technological trends, global market, and challenges of bio-ethanol production. Biotechnol Adv. <https://doi.org/10.1016/j.biotechadv.2010.07.001>. 28(6): 817-30.
- OECD/FAO (2023), OCDE-FAO Perspectivas Agrícolas 2023-2032, Biocombustibles. Capítulo 9. 250-262 p. OECD Publishing, Paris, <https://doi.org/10.1787/2ad6c3ab-es>.
- Rego-Costa, A., Huang, I.T., Desai, M.M. y Gombert, A.K. (2023). Yeast population dynamics in Brazilian bioethanol production. G3 (Bethesda). 13 (7): jkad104. [HTTP://doi: 10.1093/g3journal/jkad104](http://doi.org/10.1093/g3journal/jkad104).
- Reyes Hernández, J., Torres de los Santos, R., Hernández Torres, H., Hernández Robledo E., Alvarado Ramírez, E. y Joaquín Cancino, S. (2022). Rendimiento y calidad de siete variedades de caña de azúcar en El Mante, Tamaulipas. Revistamexicana de ciencias agrícolas. <https://doi.org/10.29312/remexca.v13i5.3232>. 13 (5): 883-892.
- Rosendo Rovati, J.C. y Soledad Rodríguez, B.E. (2021). Diseño de una planta sustentable para la generación de biodisel en el territorio venezolano. Tekhné. <https://revistasenlinea.saber.ucab.edu.ve/index.php/tekhne/article/view/5214>. 24 (3): 50-56.
- Sabino, C. (1992). El proceso de investigación. Editorial Panamericana, Bogotá, Colombia. chrome-extension://efaidnbmnnnibpcajpcglclefindmkaj/https://www.perio.unlp.edu.ar/tif/wp-content/uploads/2021/04/CarlosSabino-ElProcesoDeInvestigacion_0.pdf. 163 p.
- Sabino, C.A. (2002). ¿Cómo hacer una tesis? y elaborar todo tipo de escritos. Editorial Panapo, Caracas, Venezuela. 141 p.
- Sanhueza, E. (2009). Agroetanol ¿un combustible ambientalmente amigable? Interciencia. [citado 2024 Jul 08]. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0378-18442009000200007&lng=es. 34 (2): 106-112.
- Valecillos, E. (2002). Evaluación de 10 variedades de caña de azúcar. Segundo ensayo regional de variedades. Central azucarero Venezuela. X Reunión nacional de variedades de caña de azúcar. Atave, Fundacaña. Guanare, Venezuela. 66-67 p.