

Potencial de producción de biogás en sorgo, en respuesta a diferentes tipos de híbridos y densidades

Biogas yielding potential of sorghum as affected by hybrid and plant density

Marcelo G. Torrecillas¹, Ezequiel García Stepien¹, María S. Borlandelli¹, Daniel Alonso¹

m.torrecillas@agrarias.unlz.edu.ar, garciastepien@agrarias.unlz.edu.ar, msborlandelli@gmail.com, adosvaldo@yahoo.com.ar

¹Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Lomas de Zamora, Camino de Cintura y Juan XXIII, 1832, Lomas de Zamora, Buenos Aires, Argentina

Recibido 09/12/2024; Aceptado: 02/01/2024

Resumen: La producción de biogás a partir de biomasa de cultivos es una fuente renovable promisoría, cuya importancia se ha incrementado en los países del norte europeo, a través del uso del maíz. El sorgo, por su parte, ofrece gran diversidad morfológica, incluyendo características como *Brown Mid Rib* (BMR), *stay-green*, médula seca, alto nivel de azúcar, todos ellos de elevada producción de biomasa, potencialmente aprovechable para la transformación de biogás y compatible con la seguridad alimentaria. Este experimento tuvo como objetivo estimar el potencial de producción de biogás y metano, en tres biotipos de sorgo bajo dos densidades de siembra contrastantes. Los resultados mostraron efectos significativos del tipo de híbrido en todas las variables en estudio. Asimismo, no se detectó significancia en la interacción Híbrido×Densidad para ninguna de las variables mencionadas, excepto en sólidos solubles totales, por lo cual la performance de los materiales fue promediada a través de las densidades, para la mayoría de los caracteres. Tanto el morfotipo fotosensitivo convencional como el silero tuvieron la mejor performance para el rendimiento de biomasa, lo cual traccionó favorablemente el rendimiento potencial de biogás y metano. El morfotipo BMR y el maíz registraron los mayores valores de rendimiento específico de biogás (Y_B) y metano, en parte debido a bajos valores de lignina y alta proporción de grano. Se encontró asociación positiva y

significativa entre la digestibilidad de FDN y Y_B . En función de los resultados se concluye que el sorgo es una excelente alternativa para la producción de biogás y metano, con capacidad de complementar exitosamente al cultivo de maíz.

Palabras-clave: Biogás; metano; sorgo; predicción; constituyentes de calidad.

Abstract: Biogas production from crop biomass is a promising renewable energy source, whose importance has increased in northern European countries through the use of maize. Sorghum crop, however, offers great morphological diversity including traits such as Brown Mid Rib (BMR), stay-green, dry pith, high sugar content. All these traits are associated with high biomass yields that can potentially be used for biogas production while remaining compatible with food security. This experiment aimed to estimate the biogas and methane production potential of three sorghum biotypes under two contrasting planting densities. The results showed significant effects of hybrid on all variables studied. No significant interaction between Hybrid \times Density was detected for any of the variables mentioned, except for total soluble solids, so the performance of hybrids was averaged across densities for most traits. Both the conventional photosensitive morphotype and the silage type showed the best performance in biomass yield, which positively influenced the potential yield of biogas and methane. The BMR morphotype and maize recorded the highest values for specific biogas (Y_B) and methane yields, partly due to their low lignin content and high grain proportion. A significant positive association was found between NDF digestibility and Y_B . Based on the results, it is concluded that sorghum is an excellent alternative for biogas and methane production, capable of successfully complementing maize crop.

Keywords: Biogas; methane; sorghum; prediction; quality constituents.

1. Introducción

La producción de biogás a partir de biomasa de cultivos es una fuente renovable promisoría, cuya importancia se ha incrementado en los países del norte europeo.

La República Argentina tiene un significativo potencial para la generación de biogás a partir de biomasa residual, donde el aprovechamiento energético de este material mejora la sostenibilidad de las prácticas productivas de los establecimientos, ya que favorece el desplazamiento de energía derivada de fuentes fósiles por una de fuentes renovables y al mismo tiempo, permite gestionar adecuadamente los residuos.

El silaje de maíz es el sustrato agrícola más utilizado para la producción de biogás debido a que es ampliamente cultivado (Meyer-Aurich et al., 2016; Bacenetti et al., 2015; Barbosa et al., 2014; Rath et al., 2013), caracterizado por un alto rendimiento de biomasa por unidad de superficie (Jankowski et al., 2016; Muylle et al., 2015), elevada aptitud para ensilar y alto rendimiento de biogás (Brauer-Siebrecht et al., 2016; Mayer et al., 2014; Herrmann et al., 2013). La principal ventaja del silaje de maíz sobre otros sustratos es que garantiza una producción estable de biogás y metano, lo cual facilita significativamente

la dosificación del sustrato a la cámara de fermentación y estabiliza la operación de la unidad de co-generación.

El dilema sobre el uso de los cultivos convencionales para fines bioenergéticos es crítico y debe ser considerado en el debate de la seguridad alimentaria. Por otro lado, el sistema de producción de un único cultivo (maíz) como sustrato para las plantas de biogás podría comprometer la rotación agrícola sostenible. Entonces la incorporación de especies alternativas como el sorgo, le otorgan complementariedad, estabilidad y resiliencia al sistema.

En este sentido, el cultivo de sorgo ofrece gran diversidad morfológica entre los diferentes biotipos (sileros, forrajeros, fotosensitivos, etc.) con presencia de variados rasgos morfológicos (BMR's, stay-green, médula seca, alto nivel de azúcar, etc.), todos ellos de elevada producción de biomasa, potencialmente aprovechable para la transformación en bioenergía en general y en la forma de biogás en particular.

Asimismo, el sorgo es más tolerante a variadas condiciones ambientales y su producción es energéticamente menos intensiva en comparación con maíz (Amaducci et al., 2016; Grassini y Cassman, 2012; Ren et al., 2012;). Esto último es una consideración de gran trascendencia debido a que los cultivos con destino energético deberían apuntar a un sistema de producción con balance energético positivo, para lo cual no sólo deberían estar categorizados por alto rendimiento de biomasa sino también por bajo nivel de insumos energéticos asociados con el manejo del cultivo (Jankowski et al., 2020; Roozeboom et al., 2019; Jacobs et al., 2016).

Algunas de las fortalezas que presenta el cultivo de sorgo desde el punto de vista ambiental son: i) presenta mayor tolerancia a períodos de estrés hídrico que maíz, por lo cual el rendimiento de biomasa es mayor en años de baja magnitud o de irregular distribución de precipitaciones (Stamenkovic et al., 2020; Amaducci et al., 2016,); ii) se adapta mejor a variadas condiciones ambientales (Druille et al., 2020); iii) puede ser producido con éxito en suelos de textura liviana/arenosa o pesados con alto contenido de arcilla; iv) prospera bien tanto en suelos de reacción ácida como alcalinos (dentro de un rango de pH de 5,0-8,5) e incluso con contenido salino que podría ser limitante para el crecimiento del maíz (Dar et al., 2018; Jantar et al., 2018; Amaducci et al., 2016; Dalla Marta et al., 2014), v) tiene aptitud para recuperar estructura en suelos degradados o marginales (Carcedo et al., 2022) y vi) en general posee menor requerimiento de fertilización en relación a otros cultivos (Dar et al., 2018; Windpassinger et al., 2015).

En este sentido, existen reportes de diferencias varietales entre híbridos en relación a la composición química de la materia seca (hidratos de carbono solubles, Proteína bruta, Fibra detergente neutro, Fibra detergente ácido, Lignina detergente ácido, digestibilidad in vitro de la materia seca y de la fibra) (Beck et al., 2007).

Estas diferencias en la composición química pueden influir significativamente en la eficiencia de la fermentación y en la producción tanto de biogás como de metano, ya que ciertos morfotipos pueden tener una mayor proporción de componentes digestibles que facilitan estos procesos. Dicha variabilidad existente resalta la necesidad de investigar morfotipos más adecuados para la producción de biogás.

A diferencia de lo que sucede con maíz (en donde la morfología no difiere demasiado entre los diferentes híbridos), en sorgo se observan contrastes importantes en la fisonomía de la planta según el morfotipo involucrado y la densidad de plantas utilizada.

Una variante que necesita ser profundamente estudiada es la del híbrido fotosensitivo BMR (contenido de lignina reducido en un 50%), el cual hipotéticamente requiere menor energía en el proceso de digestión anaeróbica para la transformación en biogás (Pasteris et al., 2022).

El objetivo de este experimento fue estimar el potencial de producción de biogás y metano de tres biotipos de sorgo bajo dos densidades de siembra contrastantes, evaluando su relación con los constituyentes bioquímicos que determinan la calidad forrajera.

2. Materiales y métodos

El ensayo se llevó a cabo en el Establecimiento “La Esperanza” (Pdo. Cañuelas, Bs. As.), durante la campaña 2022/23 y en condiciones de secano. Los híbridos de sorgo fueron seleccionados en base a diferencias en arquitectura de planta y aptitud productiva. Los híbridos (Hib) fueron: ACA785FTBMR[®] (Fotosensitivo BMR), Green Feed[®] (Fotosensitivo convencional), Sugargraze[®] (Silero de baja proporción de grano) y a modo comparativo se incluyó un híbrido de maíz con aptitud para la producción de biogás, KWS 60-050 VIP3 FULL[®].

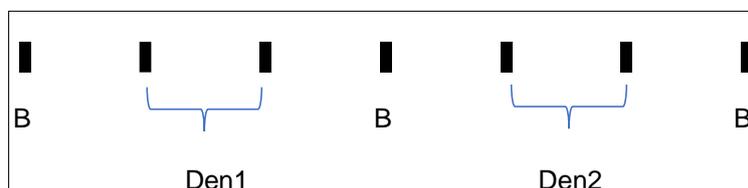
Las densidades de plantas (Den) se ajustaron, para sorgo, como Alta: 280000 plantas.ha⁻¹ y Baja: 130000 plantas.ha⁻¹ y para maíz como Alta: 100000 plantas.ha⁻¹ y Baja: 50000 plantas.ha⁻¹.

Se realizó un control preventivo de malezas aplicando 2,0 kg.ha⁻¹ de atrazina [6-cloro-N-etil-N'-(1-metil-etil)-1,3,5-triazina-2,4-diamina] + 1,3 l.ha⁻¹ de Dual Gold[®] (s-metolaclor) como tratamiento de preemergencia. Toda la semilla de sorgo fue tratada con Concep III[®]. Al momento de la siembra se fertilizó con 130 kg.ha⁻¹ de Nitrocomplex Zar (21-17-3 + 1 % MgO + 5 % S + 0,1% Zn). Se efectuó un control preventivo de pulgón de la caña de azúcar (*Melanaphis sorghi*) con formulación de Tiametoxán (14,1 %) + Lambdacialotrina (10,6 %).

Se utilizó un diseño experimental de tres bloques completamente aleatorizados y la parcela experimental consistió en siete surcos de 5,2 m de longitud, separados a 0,5 m. Las dos densidades (para cada híbrido) se distribuyeron de acuerdo a la figura 1.

Figura 1

Esquema de la asignación de los diferentes surcos borduras (B) y de densidades (Den1 y Den2) en la parcela experimental.



El momento de corte fue ajustado según cada morfotipo. En fotosensitivos (ACA758FTBMR y Green Feed) se realizó cuando las plantas alcanzaron un grado de amarillamiento basal coincidente con un contenido de materia seca (MS) de 30 - 35 %. En el silero se efectuó cuando el cultivo alcanzó el estado de grano pastoso duro (E8₂) (Torrecillas et al., 2011). En maíz el corte se realizó con el grano en estado 2/3 pastoso.

La cosecha consistió en el corte de 3 m lineales de ambos surcos de cada parcela, registrándose el peso, con el que se obtuvo el rendimiento de materia verde por parcela. Se chipearon 12 plantas completas de cada parcela y repetición cosechada y se secaron en estufa de ventilación forzada con una temperatura de 60°C hasta alcanzar peso constante. De cada muestra chipearada, constituida por 12 plantas, se extrajeron submuestras que se molieron y tamizaron con una malla de 1 mm. De acuerdo con el porcentaje de materia seca obtenido (MS) se calculó el rendimiento de biomasa seca por unidad de superficie (RBS).

Previo a cada cosecha se realizó la medición de sólidos solubles totales (SST) en el jugo, sobre tres plantas representativas, utilizando un refractómetro portátil digital (ATAGO PAL-1, Atago USA). La variable SST se expresó en °Brix.

Sobre las muestras obtenidas se realizaron las siguientes determinaciones de calidad:

- Contenido de Fibra detergente neutro (%) (FDN)
- Contenido de Fibra detergente ácido (%) (FDA)
- Contenido de Lignina Detergente ácido (%) (LDA)
- Digestibilidad *in vitro* de la FDN (%) (dFDN)

El contenido de Hemicelulosa (%) (HC) se calculó en base a la expresión:

$$HC = FDN - FDA$$

Las determinaciones de FDN, FDA, LDA y dFDN se efectuaron mediante la técnica de bolsitas filtrables en incubadores ANKOM220 (ANKOM technology Corp., Fairport, NY) (Vogel et al., 1999) y Daisy II (ANKOM technology Corp., Fairport, NY).

El cálculo del rendimiento específico de biogás y metano se efectuó de acuerdo a las expresiones de Dandikas et al. (2014), las cuales están validadas para especies cuya concentración de LDA está por debajo de 10 %.

Dichas expresiones propuestas son las siguientes:

$$Y_B (\text{m}^3 \cdot \text{t MS}^{-1}) = 727 + 0,25 \text{ HC} - 3,93 \text{ LDA}$$

$$Y_M (\text{m}^3 \cdot \text{t MS}^{-1}) = 371 + 0,13 \text{ HC} - 2 \text{ LDA}$$

donde Y_B y Y_M corresponden a rendimiento específico de biogás y metano, respectivamente. Luego de efectuar la corrección con el rendimiento de biomasa seca se obtuvo el rendimiento potencial de biogás (RpB), ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$) y el rendimiento potencial de metano (RpM), ($\text{m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$).

Se efectuó un ANAVA considerando como factores el morfotipo, la densidad de plantas y la interacción entre ambos. Las comparaciones entre medias se realizaron por medio del test de Diferencias Mínimas Significativas (DMS) con un nivel de significancia de $p < 0,05$.

Se evaluaron correlaciones fenotípicas entre los constituyentes de calidad y la producción de biogás y metano. Para la realización de todos los análisis estadísticos se utilizó el software INFOSTAT (Di Rienzo et al., 2020).

3. Resultados y discusión

Condiciones climáticas

La campaña 2022/23 registró 240 mm menos que la media histórica, con bajos registros en los meses de noviembre y diciembre, lo cual puso en evidencia algunas dificultades en la implantación y en las primeras etapas de crecimiento vegetativo (Tabla 1).

Los valores de temperatura, en función de la media mensual, se ubicaron dentro del rango normal del registro histórico.

Tabla 1

Distribución de precipitaciones (mm) y temperatura media (°C) en el período crítico del cultivo y registro histórico de 35 años en la zona de influencia, para la campaña 2022/23.

Mes	2022/23		Histórico (1960-1996)	
	mm	°C	mm	°C
Noviembre	23	20,5	119,8	19,2
Diciembre	51	23,0	105,2	22,0
Enero	66	24,0	90	23,2
Febrero	53	22,1	121,6	21,9
Total	193		436,6	

En relación a los materiales que panojaron o florecieron y en líneas generales para ambas especies, el material más temprano (maíz) alcanzó el estado de aparición de estigmas (R_1) 72 días después de emergencia, mientras que Sugargraze llegó al estado de mitad de floración (E_6) en 93 días. Si bien existieron condiciones restrictivas en las primeras fases de crecimiento, se desencadenó un período moderado de latencia en los híbridos de sorgo. La altura de planta de los materiales de sorgo varió de 3,25 m (Green Feed) a 2,28 m (ACA785FTBMR) y 1,71 m para KWS 60-050 VIP3 FULL (maíz).

Variables productivas y de calidad de la MS

Para todas las variables en estudio hubo efectos significativos en el tipo de híbrido. Asimismo, no se detectó significancia en la interacción Hib×Den para ninguna de las variables mencionadas, excepto para SST, por lo cual la performance de los materiales fue promediada a través de las densidades, para la mayoría de los caracteres.

El morfotipo fotosensitivo convencional de sorgo (Green Feed) mostró superioridad con respecto al resto de los materiales, considerando el RBS ($22,17 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$). Dicha performance reflejó claramente la rigurosidad de la campaña, puesto que, por ejemplo, difirió de lo obtenido por Erbetta et al. (2021), Ottman y Ray, (2018) y Cotton et al. (2013), en materiales similares y bajo condiciones de secano.

También, la pobre performance del híbrido de maíz para RBS en ambas densidades ($15,67 \text{ t}\cdot\text{ha}^{-1}$), resalta la menor aptitud de esta especie cuando las condiciones ambientales son limitantes.

Por otra parte, el morfotipo fotosensitivo BMR (ACA785FTBMR) fue superado significativamente por ambos sorgos, pero fue superior al valor alcanzado por el maíz (Tabla 2). En ese sentido, la presencia del rasgo BMR supone en general una merma de rendimiento de MS del orden de 15 – 20 %, con respecto a la contraparte convencional (Oliver et al., 2005).

La significancia hallada en la interacción Hib×Den para la variable SST determinó cambios relativos en los ránkines y comportamientos diferenciales de los híbridos según la densidad considerada (Tabla 3).

En cultivos con perfil bioenergético, el contenido de hidratos de carbono solubles es determinante en la definición del rendimiento de etanol a partir del jugo, pero también está asociado a la aptitud para la obtención de biogás, cuando consideramos el silaje con alta proporción de grano como sustrato base.

El morfotipo de sorgo silero (Sugargraze) se destacó significativamente en ambas densidades, con valores cercanos a 17 °Brix en la densidad inferior.

Cabe destacar que el cultivo conducido a una menor densidad determinó un cambio de arquitectura de planta en todos los materiales, lo cual se reflejó en el aumento del diámetro del tallo (datos no mostrados). Dicha caracterización y su relación con SST concuerda con lo expresado por Kanbar et al. (2021) y Morey et al. (2018).

Con respecto a FDN y FDA, tanto los ránkines como las significancias tuvieron comportamientos disímiles, donde por ejemplo, pudo observarse que la presencia de grano en la MS de Sugargraze y el

híbrido de maíz, determinaron valores inferiores de FDA (32,19 % y 23,66 %, respectivamente), lo cual coincide plenamente con Mahmood et al. (2013). Valores inferiores de FDA son deseables porque indican una menor cantidad de fibra no digestible, lo que facilita la digestión anaeróbica y mejora la producción de biogás. En este sentido, aún con la presencia del rasgo BMR, el híbrido ACA785FTBMR registró para FDA casi cinco puntos porcentuales por encima de los registrados en Sugargraze y maíz.

La evaluación de LDA permitió observar que tanto el maíz como el híbrido BMR tuvieron valores significativamente inferiores (5,43 % y 5,83 %, respectivamente) a Green Feed y Sugargraze (7,91 % y 7,66 %, respectivamente).

La otra variable clave en la predicción de la producción de biogás y metano, además de LDA, es HC, donde el híbrido de maíz superó significativamente al resto de los materiales. Los valores de HC, encontrados en el presente estudio, son superiores a los registrados por Rath et al. (2013), quienes trabajaron con un híbrido de maíz de similares características, lo cual pudo deberse a un mayor contenido de grano en la MS, en el experimento de dichos autores.

Una variable clave en la predicción de la digestión anaeróbica es dFDN, cuyo comportamiento en el presente experimento marcó un claro escalonamiento, donde ACA785FTBMR se impuso significativamente sobre el resto de los materiales, seguido por el híbrido de maíz, con buena performance. Tanto el rasgo BMR como el contenido de grano y bajo LDA, pueden haber condicionado dicho comportamiento en ambos materiales.

Tabla 2

Rendimiento de biomasa seca (RBS), contenido de Fibra detergente neutro (FDN), contenido de Fibra detergente ácido (FDA), contenido de Lignina detergente ácido (LDA), contenido de hemicelulosa (HC) y digestibilidad in vitro de la FDN (dFDN) para tres híbridos de sorgo (Green Feed, ACA785FTBMR, y Sugargraze) y para maíz y significancia del análisis de varianza (ANAVA).

Híbrido	RBS (t.ha ⁻¹)	FDN (%)	FDA (%)	LDA (%)	HC (%)	dFDN (%)
Green Feed	22,17 a	65,52 a	38,96 a	7,91 a	26,56 b	26,9 d
ACA785FTBMR	17,52 c	62,70 b	37,54 a	5,83 b	25,17 b	57,0 a
Maíz	15,67 d	57,32 c	23,66 c	5,43 b	33,66 a	51,5 b
Sugargraze	20,41 b	57,61 c	32,19 b	7,66 a	25,42 b	31,9 c
ANAVA						
Híbrido	*	*	*	*	*	*
Den	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Hib×Den	ns	ns	ns	ns	ns	ns

Los valores resultan del promedio de los datos obtenidos a partir de dos densidades. Letras distintas dentro de la misma columna implican diferencias significativas a valores iguales o inferiores al 5% de probabilidad de acuerdo al test LSD; ANAVA: * y ns: significativo y no significativo, respectivamente.

Tabla 3.

Sólidos solubles totales (SST), valores de dos densidades de siembra en tres morfotipos de sorgo y en maíz, durante la campaña 2022/23.

Densidad	Green Feed	ACA785FTBMR	Maíz	Sugargraze
°Brix				
Alta	5,03 b	4,07 b	5,73 b	14,10 a
Baja	5,20 b	5,40 b	5,27 b	17,07 a

Letras distintas dentro de la misma fila implican diferencias significativas a valores iguales o inferiores al 5% de probabilidad de acuerdo al test LSD.

Rendimiento de biogás, metano y correlaciones fenotípicas

No se encontró respuesta diferencial entre las densidades aquí estudiadas para estas variables.

Analizando el rendimiento específico de biogás (Y_B), se comprobó que el mejor comportamiento fue el del híbrido de maíz, que obtuvo un valor significativamente más elevado que el resto ($714,1 \text{ m}^3 \cdot \text{t MS}^{-1}$) (Tabla 4). De la misma forma, Mahmood et al. (2013) efectuaron una evaluación comparativa de maíz con diferentes sorgos, y obtuvieron valores similares ($720 \text{ m}^3 \cdot \text{t MS}^{-1}$) para maíz, a los hallados en nuestro estudio.

De todas maneras, los híbridos Sugargraze y Green Feed superaron significativamente al resto cuando se evaluó el RpB con valores de $15,58 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ y $14,35 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, respectivamente. Dichos resultados presentan alguna similitud a los hallados por Erbetta et al. (2021), quienes encontraron valores cercanos a $12 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ para el mismo híbrido GF, entre otros sorgos. Para Sugargraze, también evaluado por aquellos, los resultados no se ajustaron a los obtenidos en nuestro experimento, probablemente explicado por la menor proporción de grano lograda en el trabajo de dichos autores.

Es claro que el alto valor logrado para RBS, especialmente para Green Feed, tuvo gran incidencia en el comportamiento de la variable RpB.

Por otro lado, tanto maíz como el híbrido fotosensitivo BMR tuvieron menor performance, sin diferencias significativas entre ellos y con valores de $11,19 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$ y $12,45 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1}$, respectivamente.

Una tendencia similar a la de Y_B fue observada para el rendimiento específico de metano (Y_M), donde el registro superior fue para maíz ($364,5 \text{ m}^3 \cdot \text{t MS}^{-1}$) significativamente superior al resto, seguido por el híbrido de sorgo con el rasgo BMR ($362,6 \text{ m}^3 \cdot \text{t MS}^{-1}$).

El mayor contenido de metano en maíz pudo deberse a contenidos adecuados de SST y HC y bajos contenidos de FDA y LDA, según lo reportado por Rath et al. (2013).

Por su parte, el alto valor de Y_M en ACA785FTBMR pudo estar ligado a la presencia del rasgo BMR. Ha sido claramente reportado que la condición BMR ha mejorado considerablemente la tasa de conversión en el proceso de bionergía lignocelulósica (Sattler, 2010). Entonces, dichos resultados indicarían que el contenido reducido de LDA en maíz y ACA785FTBMR podría mejorar sustancialmente la digestibilidad de la FDN, en el proceso de digestión anaeróbica de biogás.

Las correlaciones fenotípicas entre las variables evaluadas están expresadas en la tabla 5. El conocimiento de las estimaciones de correlación permitió evaluar el grado de asociación entre dos caracteres. Estos valores muestran influencia positiva o negativa entre las variables, facilitando la predicción del su comportamiento.

Los mayores valores de correlación significativa y positiva, exceptuando los relacionados a la ecuación de predicción, fueron observados entre $Y_B \times dFDN$ (0,78), $RpB \times LDA$ (0,78), $Y_B \times HC$ (0,56), $Y_M \times dFDN$ (0,78), $Y_M \times HC$ (0,57), remarcando una clara relación positiva entre $dFDN$ y los rendimientos específicos de biogás y metano. La excelente performance del híbrido BMR para $dFDN$ se contrapone con el bajo RBS, y ello también impacta negativamente sobre el rendimiento potencial de biogás. En ese sentido, Erbetta et al. (2021), evaluando materiales BMR con diferentes características, encontraron el mismo comportamiento que el hallado en el presente experimento.

Una alternativa que contribuiría a maximizar el RpB en este segmento de híbridos y que constituye un desafío para el mejorador de sorgo, es incrementar la proporción de la fracción reproductiva/vegetativa y con ello el contenido de grano y la aptitud silera. No obstante, la utilización de estos materiales sigue siendo riesgosa ya que la disminución en un 50% del contenido de lignina, sumado a la mayor altura, impacta negativamente sobre la performance agronómica y determina una mayor susceptibilidad a vuelco (da Silva et al. 2020, Oliver, 2005).

La relación positiva y negativa encontrada entre $RpB \times LDA$ y $RpB \times dFDN$, respectivamente, es coincidente con lo reportado por Diallo et al. (2019), en que los componentes estructurales de la fibra contribuyen al volumen de la biomasa pero disminuyen la calidad, lo cual también se reflejó en la disminución del rendimiento específico de biogás.

Se puede concluir que el sorgo es una excelente alternativa para la producción de biogás y metano, con capacidad de complementar exitosamente al cultivo de maíz y de expandir la obtención de este recurso energético en áreas marginales, y de minimizar costos de producción sin comprometer la seguridad alimentaria.

Tabla 4.

Rendimiento específico de biogás (Y_B) y metano (Y_M) y rendimiento potencial de biogás (RpB) y metano (RpM) para tres híbridos de sorgo (Green Feed, ACA785FTBMR, y Sugargraze) y para maíz y significancia del análisis de varianza (ANAVA).

Híbrido	Y_B ($m^3 \cdot t \ MS^{-1}$)	Y_M ($m^3 \cdot t \ MS^{-1}$)	RpB ($m^3 \cdot ha^{-1}$)	RpM ($m^3 \cdot ha^{-1}$)
---------	--------------------------------------	--------------------------------------	----------------------------------	----------------------------------

Green Feed	702,6 c	358,6 c	15577 a	7951 a
ACA785FTBMR	710,4 b	362,6 b	12450 b	6355 b
Maíz	714,1 a	364,5 a	11189 b	5711 b
Sugargraze	703,2 c	358,9 c	14349 a	7325 a
Híbrido	*	*	*	*
Densidad	ns	ns	ns	ns
Híbrido x Densidad	ns	ns	ns	ns

Nota: Valores promediados a partir de los datos obtenidos en dos densidades. Letras distintas dentro de la misma columna implican diferencias significativas a valores iguales o inferiores al 5% de probabilidad de acuerdo al test LSD; ANAVA: * y ns: significativo y no significativo, respectivamente.

Tabla 5

Coefficientes de correlación fenotípica de Pearson entre las variables: Rendimiento específico de biogás (Y_B), Rendimiento potencial de biogás, Lignina detergente ácido (LDA), Contenido de Hemicelulosa (Hcel), Rendimiento específico de metano (Y_M), Digestibilidad in vitro de la FDN (dFDN), Fibra detergente neutro (FDN) y Fibra detergente ácido (FDA).

Variables	Y _B	RpB	LDA	HC	Y _M	dFDN	FDN
RpB	-0,80*						
LDA	-0,98*	0,78*					
HC	0,56*	-0,49*	-0,43				
Y _M	-	-0,79*	-0,98*	0,57*			
dFDN	0,78*	-0,78*	-0,79*	0,32	0,78*		
FDN	-0,39	0,53*	0,36	-0,34	-0,38	-0,21	
FDA	-0,58*	0,62*	0,48*	-0,81*	-0,58*	-0,32	0,82*

Nota: * Significativo a nivel de 0,05

4. Referencias bibliográficas

- Amaducci, S., Colauzzi, M., Battini, F., Fracasso, A. y Perego, A. (2016). Effect of irrigation and nitrogen fertilization on the production of biogas from maize and sorghum in a water limited environment. *European J. Agron.*, 76, 54-65.
- Bacenetti, J., Negri, M., Lovarelli, D., García, L. y Fiala, M. (2015). Economic performances of anaerobic digestion plants: Effect of maize silage energy density at increasing transport distances. *Biomass and Bioenergy*, 80, 73-84.
- Barbosa, D., Nabel, M. y Jablonowski, N. (2014). Biogas-digestate as nutrient source for biomass production of *Sida hermaphrodita*, *Zea mays* L. and *Medicago Sativa* L. *Energy Procedia*, 59, 120-126.
- Beck, P., Hutchinson, S., Stewart, C., Shockey, J. y Gunter, S. (2007). Effect of crabgrass (*Digitaria ciliaris*) hay harvest interval on forage quality and performance of growing calves fed mixed diets. *J. Anim. Sci.* 85, 527-535.
- Brauer-Siebrecht, W., Jacobs, A., Christen, O., Götze, P., Koch, H., Rücknagel, J. y Märländer, B. (2016). Silage maize and sugar beet for biogas production in rotations and continuous cultivation: Dry matter and estimated methane yield. *Agronomy*, 6, 2-12.
- Carcedo, A., Mayor, L., Demarco, P., Morris, G., Lingenfelter, J., Messina, C. y Ciampitti, I. (2022). Environment characterization in sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] by modelling water-deficit and heat patterns in the great plains Region, United States. *Frontiers in plant science*, 13, 768610.

- Cotton, J, Burow, G., Acosta Martínez, V. y Moore-Kucera, J. (2013). Biomass and cellulosic ethanol production of forage sorghum under limited water conditions. *Bioenerg. Res.*, 6, 711-718. <https://doi.org/10.1007/s12155-012-9285-0>
- Dalla Marta, A., Mancini, M., Orlando, F., Natali, F., Capecchi, L. y Orlandini, S. (2014). Sweet sorghum for bioethanol production: Crop responses to different water stress levels. *Biomass and Bioenergy*, 64, 211-219.
- Dandikas, V., Heuwinkel, H., Lichti, F., Drewes, J. y Koch, K. (2014). Correlation between biogas yield and chemical composition of energy crops. *Bioresource Technol.*, 174, 316-320.
- Dar, R., Dar, E., Kaur, A. y Phutela, U. (2018). Sweet sorghum a promising alternative feedstock for biofuel production. *Renewable Sustainable Energy Rev*, 82, 4070-4090.
- da Silva, M. J., Borges-Damasceno, C. M. B., Texeira-Guimarães, C., de Oliveira-Pinto, M., de Almeida-Barros, B., de Souza-Carneiro, J., Schaffert, R. y da Costa-Parrellla, R. (2020). Introgression of the bmr6 allele in biomass sorghum lines for bioenergy production. *Euphytica*, 216, 1-12.
- Diallo, B., Li, M., Tang, C., Ameen, A., Zhang, W. y Xie, G.H. (2019). Biomass yield, chemical composition and theoretical ethanol yield for different genotypes of energy sorghum cultivated on marginal land in China. *Industrial Crops and Products*, 137, 221-230.
- Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., Gonzalez, L., Tablada, M. y Robledo, C. W. InfoStat (versión 2020) [Software]. Córdoba, Argentina: Centro de Transferencia InfoStat, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba. <http://www.infostat.com.ar>
- Druille, M., Williams, A., Torrecillas, M., Kim, S., Meki, N. y Kiniry, J. (2020). Modeling climate warming impacts on grain and forage sorghum yields in Argentina. *Agronomy*, 10, 964. <http://doi:10.3390/agronomy10070964>
- Erbetta, E., Gabbanelli, N., Echarte, L., Alfonso, C. y Echarte, M. (2021). Producción de biogás de híbridos de sorgo forrajeros fotosensitivos y sileros que difieren en la presencia de mutaciones BMR. *RedBioLAC*, 5, 77-81.
- Grassini, P. y Cassman, K. (2012). High yield maize with large net energy yield and small global warming intensity. *Proc. Natl. Acad. Sci.*, 109, 1074-1079.
- Herrmann, A., Sieling, K., Wienforth, B., Taube, F. y Kage, H. (2013). Short-term effects of biogas residue application on yield performance and N balance parameters of maize in different cropping systems. *J. Agric.*, 151, 449-462.
- Jacobs, A., Brauer-Siebrecht, W., Christen, O., Götze, P., Koch, H., Rücknagel, J. y Märlander, B. (2016). Silage maize and sugar beet for biogas production in crop rotations and continuous cultivation-energy efficiency and land demand. *Field Crops Res.*, 196, 75-84.
- Jankowski, K., Dubis, B., Budzynski, W., Borawski, P. y Bulkowska, K. (2016). Energy efficiency of crops grown for biogas production in a large-scale farm in Poland. *Energy*, 109, 277-286.
- Jankowski, K., Sokólski, M., Dubis, B., Zatuski, D. y Szempliński, W. (2020). Sweet sorghum – Biomass production and energy balance at different levels of agricultural inputs. A six year field experiment in north-eastern Poland. *European J. Agron.*, 119, 126119.

- Jantar, H., Adekpe, D., Bature, S. y Hussaini, Y. (2018). Yield and yield attributes of sweet sorghum [Sorghum bicolor subs. saccharatum (L.) Moench] varieties as influenced by weed control treatments and plant population in the semi-arid region of Nigeria. *BAJOPAS*, 11, 67-73.
- Kanbar, A., Flubacher, N., Hermuth, J., Kosova, K., Horn, T. y Nick, P. (2021). Mining sorghum biodiversity- Potential of dual-purpose hybrids for bio-economy. *Diversity*, 13, 192.
- Mahmood, A., Ullah, H., Ijaz, M., Javaid, M., Shahzad, M. y Honermeier, B. (2013). Evaluation of sorghum hybrids for biomass and biogas production. *Australian J. of Crop Science*, 7 (10), 1456-1462.
- Mayer, F., Gerin, P., Noo, A., Foucart, G., Flammang, J., Lemaigre, S., Sinnaeve, G., Dardenne, P. y Delfosse, P. (2014). Assessment of factors influencing the biomethane yield of maize silages. *Biores. Technol.*, 153, 260-268.
- Meyer-Aurich, A., Lochmann, Y., Klaus, H. y Prochnow, A. (2016). Comparative advantage of maize and grass-silage base feedstock for biogas production with respect to greenhouse gas mitigation. *Sustainability*, 8, 617.
- Morey, S., Hashida, Y., Ohsugi, R., Yamagishi, J. y Aoki, N. (2018). Evaluation of performance of sorghum varieties grown in Tokyo for sugar accumulation and its correlation with vacuolar invertase genes Sblnv1 and Sblnv2. *Plant Prod. Science*, 21 (4), 328-338.
- Muyllle, H., Van Hullea, S., De Vliegheer, A., Baert, J., Van Bockstaele, E. y Roldan-Ruiz, I. (2015). Yield and energy balance of anual and perennial lignocellulosic crops for biorefinery use: a 4-year field experiment in Belgium. *Eur. J. Agron.*, 63, 62-70.
- Oliver, A, Pedersen, J., Grant, R. y Klopfenstein, T. (2005). Comparative effects of the sorghum bmr-6 and bmr-12 genes: I. Forage sorghum yield and quality. *Crop Sci.*, 45, 2234-2239.
- Ottman, M.J. y Ray, D.T. (2018). Irrigated sweet sorghum yield as affected by plant spacing and row width. *Agron. J.*, 110, 1008-1016.
- Pasteris, A., Heiermann, M., Theuerl, S., Plogsties, V., Jost, C., Prochnow, A., Herrmann, C. Multi-advantageous sorghum as feedstock for biogas production: A comparison between single-stage and two-stage anaerobic digestion systems. *Journal of Cleaner Production*, 358, 131985.
- Rath, J., Heuwinkel, H. y Herrmann, A. (2013). Specific Biogas Yield of Maize Can Be Predicted by the Interaction of Four Biochemical Constituents. *Bioenerg. Res.*, 6, 939-952.
- Ren, L., Liu, Z., Wei, T. y Xie, G. (2012). Evaluation of energy input and output of sweet sorghum grown as a bioenergy crop on coastal saline-alkali land. *Energy*, 47, 166-173.
- Roozeboom, K.L., Wang, D., McGowan, A.R., Propheter, J.L., Staggenborg, S.A. y Rice, C.W. (2019). Long-term biomass and potential ethanol yield of annual and perennial biofuel crops. *Agron. J.*, 111, 74–83
- Sattler, S., Funnell-Harris, D. y Pedersen, J. (2010). Brown midrib mutations and their importance to the utilization of maize, sorghum and pearl millet lignocellulosic tissues. *Plant Science*, 178 (3), 229-238.
- Stamenkovic, O., Siliveru, K., Veljkovic, V., Bankovic-Ilic, I., Tasic, M., Ciampitti, I., Đalovic, I., Mitrovic, P., Sikora, V. y Prasad, V. (2020). Production of biofuels from sorghum. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 124, 109769.

- Torreallas, M.G., Cantamutto, M.A. y Bertoia, L.M. (2011). Head and stover contribution to digestible dry matter yield on grain and dual-purpose sorghum crop. *Aust. J. Crop Sci.*, 5, 116-122.
- Vogel, K.; Pedersen, J., Masterson, S. y Toy, J. (1999). Evaluation of a filter bag system for NDF, and IVDMD forage analysis. *Crop Sci.*, 39, 276-279.
- Windpassinger, S., Friedt, W., Frauen, M., Snowdon, R. y Wittkop, B. (2015). Designing adapted sorghum silage types with an enhanced energy density for biogas generation in temperate Europe. *Biomass and Bioenergy*, 81, 496-504.