

Degradabilidad ruminal y digestibilidad de hojas de caña de azúcar tratadas con ácido fosfórico

Ruminal degradability and digestibility of sugar cane leaves treated with phosphoric acid

Joyce Sánchez-Olguín¹ , José Isidro Alejos-De la Fuente² , Glaforo Torres-Hernández¹ ,
Eliseo Sosa- Montes^{2*} , Arturo Pro-Martínez¹ , Benito Bello-Olivera¹ 

¹Colegio de Postgraduados, Campus Montecillos, Posgrado en Recursos Genéticos y Productividad-Ganadería. Km. 36.5 Carr. México-Texcoco. Montecillo CP. 56230. Municipio de Texcoco, Estado de México, México

²Departamento de Zootecnia, Universidad Autónoma Chapingo, Chapingo, CP. 56230. Municipio de Texcoco, Estado de México, México.

*Autor de correspondencia: eliseososa@yahoo.com.mx

Artículo científico

Recibido: 07 de marzo 2024

Aceptado: 17 de junio 2025

RESUMEN. Se trataron hojas de caña de azúcar con ácido fosfórico (H_3PO_4), y se determinaron, fibra detergente neutro (FDN), fibra detergente ácido (FDA), lignina (LDA), hemicelulosa (Hem), celulosa (Cel), sílice (S), degradabilidad ruminal (Deg) y digestibilidad ruminal (Dig). Se impregnaron 500 g de hojas con 250 mL de H_3PO_4 0.01, 0.1 y 1.0 molar durante 1, 3, 5 y 7 días. Al día 3 con H_3PO_4 0.01 y 0.1 molar, FDN y FDA aumentaron y después disminuyó FDN (se disolvió Hem) mientras que FDA, permaneció constante. Al día 3 con H_3PO_4 1.0 molar, ambas variables disminuyeron (se disolvieron algunas fracciones lignocelulósicas) y FDN continuó disminuyendo. Con H_3PO_4 0.01, 0.1 y 1.0 molar, LDA aumentó al día 7 (14.78, 14.07 y 11.68%, respectivamente). Con H_3PO_4 0.01 y 0.1 molar, Hem no cambió con el tiempo, pero Cel disminuyó al día 7 (31.34 y 34.17%). Con H_3PO_4 1.0 molar del día 1 al 7, Hem y Cel disminuyeron. Con H_3PO_4 0.01 y 0.1 molar, S aumentó al día 1 (6.72 y 6.92%), y con H_3PO_4 1.0 molar no cambió. Con H_3PO_4 0.01 y 0.1 molar, Deg y Dig no cambiaron, mientras que, con 1.0 molar el día 1, ambas variables aumentaron. Conclusión: a bajas concentraciones, el H_3PO_4 se une a la fibra y la aumenta, por lo que FDN, FDA y S aumentan, pero a 1.0 molar (99 g L⁻¹), disuelve varias fracciones lignocelulósicas de las hojas de caña de azúcar aumentando su degradabilidad y digestibilidad.

Palabras clave: Hidrólisis, forraje, sequía, tratamiento químico.

ABSTRACT. Sugarcane leaves were treated with phosphoric acid (H_3PO_4) and neutral detergent fiber (NDF), acid detergent fiber (ADF), lignin (ADL), hemicellulose (Hem), cellulose (Cell), silica (S), ruminal degradability (Deg) and ruminal digestibility (Dig) were determined in sugarcane leaves. Five hundred g of leaves were impregnated with 250 mL of 0.01, 0.1 and 1.0 molar H_3PO_4 for 1, 3, 5 and 7 days. At day 3 with H_3PO_4 0.01 and 0.1 molar, NDF and ADF increased and then NDF decreased (Hem was dissolved) while ADF remained constant. At day 3 with H_3PO_4 1.0 molar, both variables decreased (some lignocellulosic fractions were dissolved) and NDF continued to decrease. With H_3PO_4 0.01, 0.1 and 1.0 molar, ADL increased at day 7 (14.78, 14.07 and 11.68%, respectively). With H_3PO_4 0.01 and 0.1 molar, Hem did not change with time, but Cell decreased at day 7 (31.34 and 34.17%). With H_3PO_4 1.0 molar from day 1 to 7, Hem and Cell decreased. With H_3PO_4 0.01 and 0.1 molar, S increased on day 1 (6.72 and 6.92%), and with H_3PO_4 1.0 molar it did not change. With H_3PO_4 0.01 and 0.1 molar, Deg and Dig did not change, while, with 1.0 molar on day 1, both variables increased. Conclusion: at low concentrations, H_3PO_4 binds to the fiber and increases it, so NDF, ADF and S increase, but at 1.0 molar (99 g L⁻¹), it dissolves several lignocellulosic fractions of sugarcane leaves increasing their degradability and digestibility.

Key words: Hydrolysis, forage, drought, chemical treatment.

Como citar: Sánchez-Olguín J, Alejos-De la fuente JI, Torres-Hernández G, Sosa-Montes E, Pro-Martínez A, Bello-Olivera B (2025) Degradabilidad ruminal y digestibilidad de hojas de caña de azúcar tratadas con ácido fosfórico. Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 12(2): e4050 DOI: 10.19136/era.a12n2.4050

INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar se emplea como materia prima para la producción de azúcar y etanol (Zavala *et al.* 2021). Este cultivo se produce en regiones tropicales y subtropicales (Assureira y Assureira 2022); su cosecha coincide con los meses más fríos y secos para garantizar el máximo contenido de sacarosa en el tallo (Alokika *et al.* 2021). Alrededor de 70% del azúcar que se consume en el mundo depende del cultivo de la caña de azúcar (Cabrera y Zuaznábar 2010) con elevada tasa de formación de biomasa debido a la anatomía de sus hojas, mismas que representan 60% del residuo generado por el cultivo (Carvalho *et al.* 2017).

Los ingenios azucareros mexicanos procesan 5 957 170 t de azúcar provenientes de 777 078 hectáreas. Las hojas de caña se han empleado tradicionalmente en la alimentación animal como forraje para el ganado bovino y ovino (Alokika *et al.* 2021) semi estabulado y estabulado, pero su baja densidad, de 17 kg/m³ dificulta su manipulación (Assureira y Assureira 2022) e indica altos contenidos de fibra. Las hojas, son consideradas un rastrojo y cuando se ofrecen como único alimento muestran limitaciones nutricionales, que sugieren buscar metodologías para aprovechar su potencial.

Los tratamientos químicos en forrajes mejoran la disponibilidad de los carbohidratos estructurales, reducen el contenido de fibra y aumentan la digestibilidad ruminal. Así mismo, buscan disminuir costos y ser una opción viable y sustentable para la alimentación del ganado (Samadi *et al.* 2016, Alokika *et al.* 2021). Se encontraron pocas investigaciones sobre el tratamiento de los residuos de caña de azúcar con ácido fosfórico H₃PO₄ (Hermiati *et al.* 2022). Otros residuos lignocelulósicos como el rastrojo de bambú se han tratado con H₃PO₄ y se observa que mejora su digestibilidad enzimática (Huang *et al.* 2019). Pero no se encontraron estudios sobre la degradabilidad y digestibilidad de hojas de caña de azúcar tratadas con ácido fosfórico. Por tanto, el objetivo del presente estudio fue evaluar la degradabilidad ruminal y digestibilidad de las hojas de caña de azúcar tratadas con H₃PO₄ durante 1 a 7 días, y determinar la degradabilidad ruminal y la digestibilidad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ubicación del experimento

El estudio se realizó en el laboratorio de Nutrición Animal del Departamento de Zootecnia de la Universidad Autónoma Chapingo, ubicada en el municipio de Texcoco de Mora, Estado de México.

Obtención de muestras

Se utilizaron hojas de caña de azúcar (*Saccharum officinarum* L.) cv cubana, del Campo Paredones, ejido de Cuautlixco, Cuautla, Morelos. Estas se obtuvieron de cosecha manual sin quema, durante la temporada febrero/marzo 2023. Las hojas con tres semanas postcosecha se transportaron al Laboratorio de Nutrición Animal, se secaron al sol por una semana y tres días en estufa (Tecsca®, modelo HFT-18) a 60 °C. El material vegetal se molió (molino de laboratorio Wiley Mill®, modelo 4), con criba de 3.0 mm, obteniéndose 30 kg.

Tratamiento químico

Se utilizó una solución de H_3PO_4 (pureza 86%, densidad 1.88 g mL^{-1} ; Reasol®) (0.01, 0.1 y 1.0 mol L^{-1} o M) y tiempos de exposición de 1, 3, 5 y 7 días. Las unidades experimentales fueron 500 g de hojas de caña molida en bolsas de polietileno de $25 \times 35 \text{ cm}$. El contenido de cada bolsa se asperjó con 250 mL de H_3PO_4 a 0.01, 0.1 o 1.0 M. Las bolsas se incubaron por 1, 3, 5 y 7 d. Transcurrido el tiempo de incubación correspondiente, las muestras se pasaron a bolsas de papel de estraza y se metieron a la estufa de aire forzado (Riossa®, modelo FOFD-71) a 60°C por 3 días, para inhibir el tratamiento y secarlas.

Análisis químicos

La materia seca (MS) se determinó por secado a 105°C , durante 24 h en estufa. Posteriormente, se determinaron fibra detergente neutro (FDN), fibra detergente ácido (FDA), lignina detergente ácido (LDA), hemicelulosa (Hem), celulosa (Cel) y sílice (S).

Degradabilidad ruminal y digestibilidad

Para la digestibilidad se usaron bolsas Ankom® ($9.5 \times 18 \text{ cm}$ con porosidad de $50 \mu\text{m}$) se pesaron 3 g en una balanza analítica (Ohaus Pioner®). La incubación de las muestras fue en un animal Holstein de 2 años, con fístula ruminal. Su alimentación fue con base en maíz (25%), melaza (5%), heno de alfalfa (20%), paja de avena (30%), pasta de soya (15%) y premezcla de vitaminas y minerales (5%). El animal se trató según las recomendaciones del Comité de Bienestar Animal del Colegio de Posgraduados (COLPOS 2016).

Todas las muestras se incubaron por triplicado al mismo tiempo en el rumen. Las bolsas ANKOM se colocaron dentro de una red de nylon, suspendida de la fístula con un hilo de nylon. Después de 72 h, las muestras fueron retiradas del rumen, se lavaron con agua corriente y agua destilada hasta quedar limpias, para secarse después a 60°C por 48 h. La degradabilidad ruminal se determinó por diferencia entre el peso de la muestra menos el peso del residuo y se expresó como porcentaje de la muestra. Las muestras provenientes de la degradabilidad ruminal se digirieron con detergente neutro según el método propuesto por Van-Soest (1966), el residuo obtenido se pesó en balanza analítica (Ohaus Adventurer® modelo H-5276), se restó del peso inicial de aproximadamente 3 g, el resultado se expresó como porcentaje y fue considerado la digestibilidad.

Análisis estadísticos

El diseño experimental fue completamente al azar con arreglo factorial de tratamientos. Los factores fueron tiempo (niveles 1, 3, 5 y 7 días) y molaridad del H_3PO_4 (niveles 0.01, 0.1 y 1.0 M) más un testigo (molaridad 0, tiempo 0). Se obtuvieron las medias y las significancias ($\alpha = 0.05$) de los efectos principales y de las interacciones. Se graficó el factor tiempo en el eje horizontal, las molaridades como líneas separadas y las variables de respuesta en el eje vertical. Las medias de los 13 tratamientos fueron separadas usando la prueba de Tukey ($p < 0.05$). Todos los análisis estadísticos se realizaron empleando el paquete estadístico SPSS®. El modelo fue $Y = \mu + \alpha_i + \beta_j + (\alpha\beta)_{ij} + \tau_t + \epsilon_{ijk}$, donde Y = variable respuesta, μ = promedio de todas las observaciones, α_i = efecto del factor tiempo, β_j = efecto del factor molaridad, $(\alpha\beta)_{ij}$ = efecto de la interacción de los factores tiempo y molaridad, τ_k = efecto del testigo, ϵ_{ijk} = error experimental, $i = 1, 3, 5$ y 7 d , $j = 0.01, 0.1$ y 1 M y $k = 1, 2, 3, 4$ repeticiones.

RESULTADOS

Interacciones significativas

Las variables FDN, LDA, S y CEL produjeron interacciones significativas ($p < 0.05$) de los factores tiempo y molaridad (Tabla 1). En forma gráfica estas interacciones se muestran en las figuras 1, 3, 4 y 6. En ellas se observa que los patrones de cambio o pendientes de las variables mencionadas difieren entre las molaridades bajas (0.01 y 0.1 M) y la molaridad mayor (1.0 M). Se observa que el ácido fosfórico (1.0 M), disminuyó ($p < 0.01$) el porcentaje de FDN en 14.27% al día 3, sin presentar cambios significativos en los siguientes días de tratamiento.

Tabla 1. Interacciones significativas entre los valores tiempo y molaridad (medias, errores estándar y valores de p).

Variable de respuesta	Molaridad	Días de exposición al ácido					Error estándar	Valor de p
		0	1	3	5	7		
FDN	1 M		67.18	61.12	60.81	57.68	1.530	<0.01
	0.1 M		80.98	85.51	79.93	78.62		
	0.01 M		82.80	86.03	80.32	78.09		
	0 M	75.40						
LDA	1 M		6.14	5.51	6.11	14.07	1.779	<0.05
	0.1 M		8.06	8.60	7.64	11.68		
	0.01 M		8.38	8.69	8.17	14.78		
	0 M	6.35						
S	1 M		5.27	4.30	5.14	4.95	0.142	<0.05
	0.1 M		6.92	6.20	5.66	6.31		
	0.01 M		6.72	6.44	6.14	6.82		
	0 M	4.55						
Cel	1 M		30.35	32.75	32.75	24.98	3.498	<0.01
	0.1 M		36.60	40.76	38.72	34.17		
	0.01 M		38.11	39.45	39.41	31.33		
	0 M	35.98						

FDN: fibra detergente neutro, LDA: linina detergente ácido, S: sílice, Cel: celulosa.

Fibra detergente neutro o pared celular (FDN) y fibra detergente ácido (FDA)

Las Figuras 1 y 2 muestran a las variables FDN y FDA. Con H_3PO_4 1.0 M y en comparación con el testigo, los valores de FDN fueron 8.22 y 14.27% menores ($p < 0.05$) en los días 1 y 2, respectivamente.

Al ser tratadas las muestras con H_3PO_4 a baja concentración (0.01 y 0.1 M), FDN y FDA aumentaron ($p < 0.05$) al día 1, con respecto al testigo. Contrariamente, cuando las muestras fueron tratadas con solución 1.0 M de H_3PO_4 , ambas variables disminuyeron, por hidrólisis de hemicelulosa y celulosa. La concentración 1.0 M de H_3PO_4 disminuyó en 6.75% ($p < 0.05$) los valores de FDA al día 1 de tratamiento con respecto al testigo (Figura 2). Posteriormente no hubo cambios significativos de FDA ($p > 0.05$).

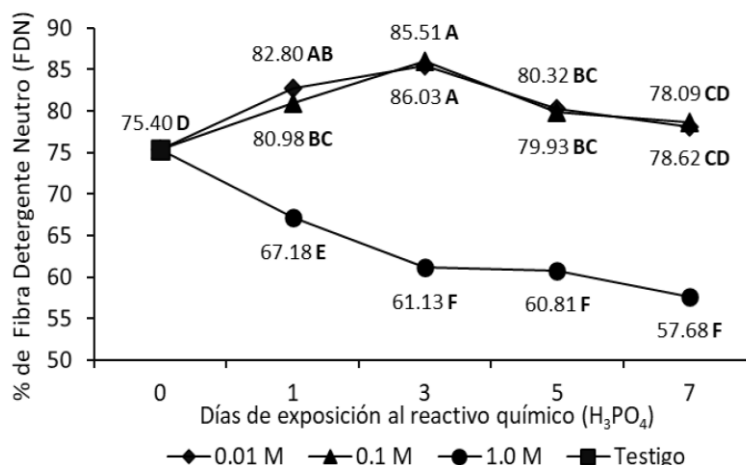


Figura 1. Efectos del tiempo y concentración (M) de H₃PO₄ (líneas separadas) del porcentaje de fibra detergente neutro, FDN o pared celular, en hojas de caña de azúcar. M: mol L⁻¹. Letras distintas indican medias diferentes (Tukey, $p < 0.05$).

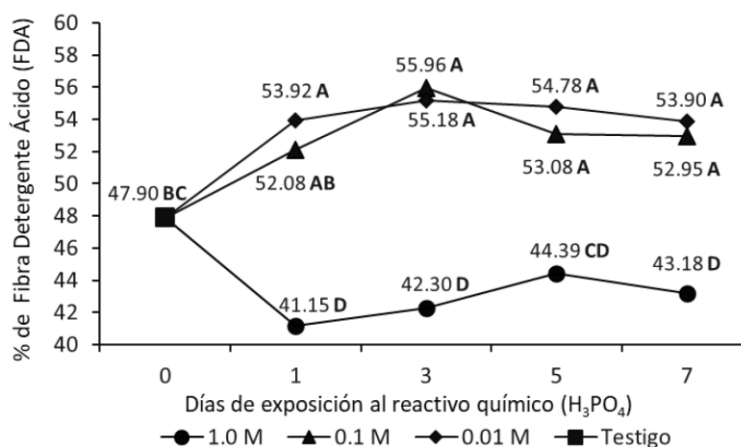


Figura 2. Efectos del tiempo y concentración (M) de H₃PO₄ (líneas separadas) del porcentaje de fibra detergente ácido FDA, en hojas de caña de azúcar. M: mol L⁻¹. Letras distintas indican medias diferentes (Tukey, $p < 0.05$).

Lignina detergente ácido (LDA) y sílice (S)

La Figura 3 muestra la variable LDA, hasta el día 5 la LDA fue similar ($p > 0.05$) al valor del testigo, pero al día 7 su valor aumentó ($p < 0.05$) con las tres concentraciones de H₃PO₄ (Figura 3).

La figura 4 muestra la variable sílice (S), con la concentración 1.0 M, el valor del testigo no experimentó cambio alguno ($p > 0.05$), pero a concentraciones más bajas, S aumentó ($p < 0.05$) 2.37% a 0.1 M y 2.17% a 0.01 M respecto del testigo al día 1, y después permaneció constante hasta el día 7.

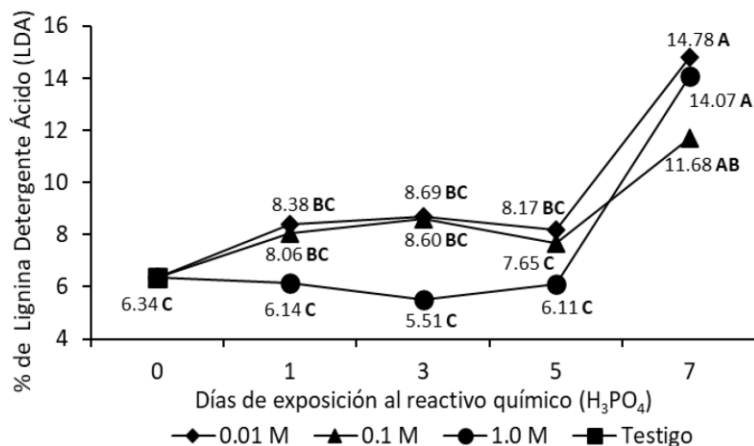


Figura 3. Efectos del tiempo y concentración (M) de H_3PO_4 (líneas separadas) del porcentaje de lignina detergente ácido LDA, de hojas en caña de azúcar. M: mol L^{-1} . Letras distintas indican medias diferentes (Tukey, $p < 0.05$).

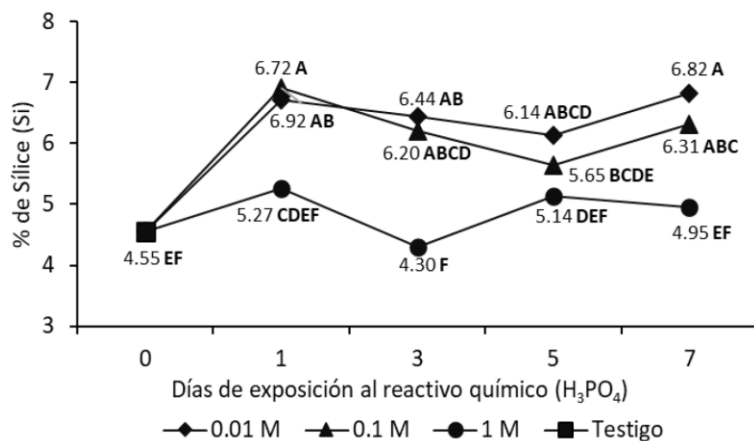


Figura 4. Efectos del tiempo y concentración (M) de H_3PO_4 (líneas separadas) del porcentaje de sílice (S) o SiO_2 , en hojas de caña de azúcar. M: mol L^{-1} . Letras distintas indican medias diferentes (Tukey, $p < 0.05$).

Hemicelulosa (Hem) y celulosa (Cel)

En las figuras 5 y 6 se muestran las variables hemicelulosa y celulosa. A concentración 1.0 molar de H_3PO_4 (Figura 5), la hemicelulosa disminuyó respecto al testigo, este cambio se observó al tercer día de exposición al tratamiento ácido ($p < 0.05$), 8.67% menos respecto al testigo, sin cambios posteriores. Las concentraciones bajas de H_3PO_4 (0.01 y 0.1 M) no afectaron los valores de Hem ($p > 0.05$).

El día 1, la celulosa con el tratamiento 1.0 M fue 5.62% menor ($p < 0.05$) respecto al testigo (Figura 6); de 1 a 5 días no hubo diferencias en el contenido de celulosa. El efecto del día 1 se acentuó en el día 7 (11%). Los tratamientos a concentración (0.01 y 0.1 M) no cambiaron el contenido de celulosa en el transcurso del tiempo ($p < 0.05$).

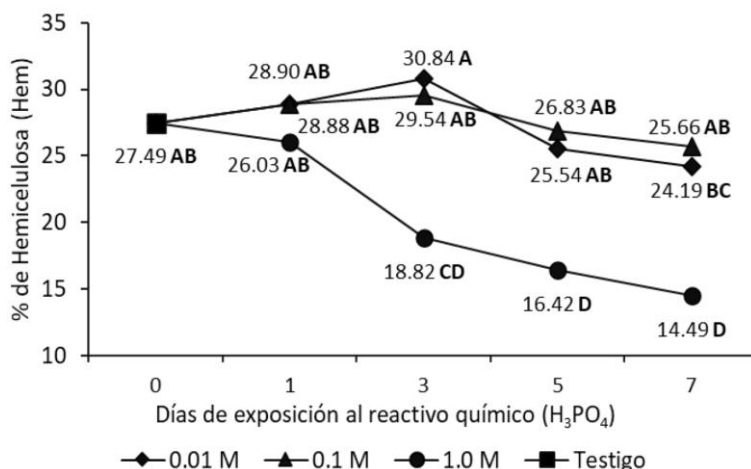


Figura 5. Efectos del tiempo y concentración (M) de H_3PO_4 (líneas separadas) del porcentaje de hemicelulosa (Hem), en hojas de caña de azúcar. M: mol/L. Letras distintas indican medias diferentes (Tukey, $p < 0.05$).

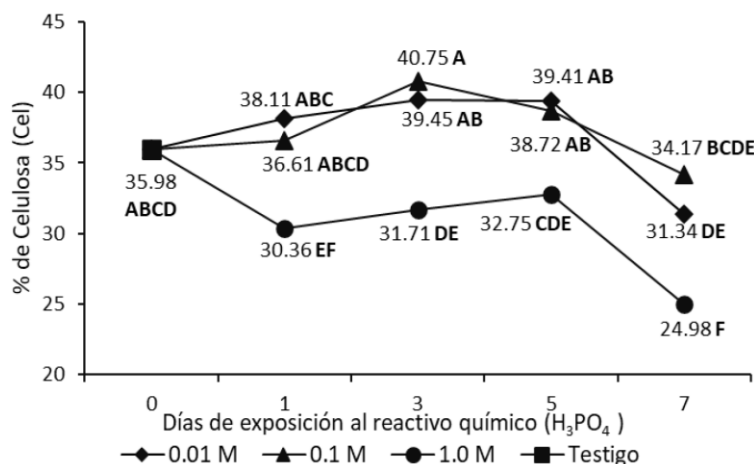


Figura 6. Efectos del tiempo y concentración (M) de H_3PO_4 (líneas separadas) del porcentaje de celulosa (Cel), en hojas de caña de azúcar. M: mol L^{-1} . Letras distintas indican medias diferentes (Tukey, $p < 0.05$).

Degradabilidad ruminal (Deg) y digestibilidad (Dig)

Del día 0 al día 1 con solución 1.0 M de H_3PO_4 , la degradabilidad ruminal (Figura 7) aumentó, y también aumentó la digestibilidad (Figura 8). Los días posteriores no se observaron cambios en los valores de estas dos variables. Con las molaridades 0.01 y 0.1 M de H_3PO_4 , no se observaron cambios en estas dos variables al transcurrir el tiempo.

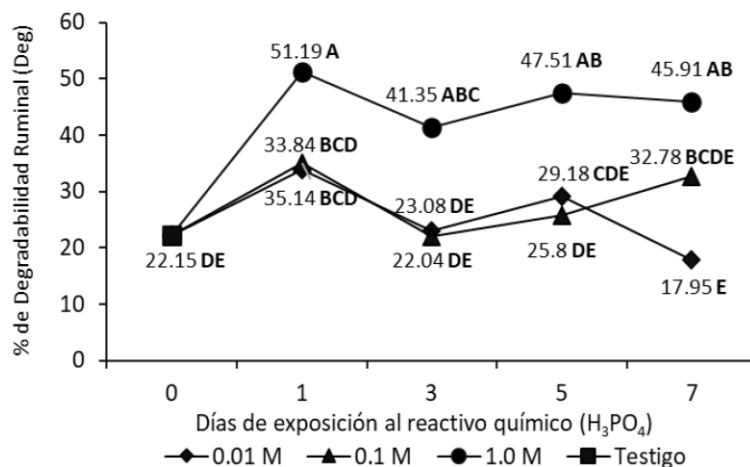


Figura 7. Efectos del tiempo y concentración (M) de H_3PO_4 (líneas separadas) del porcentaje de degradabilidad ruminal (Deg), en hojas de caña de azúcar. M: mol L^{-1} . Letras distintas indican medias diferentes (Tukey, $p < 0.05$).

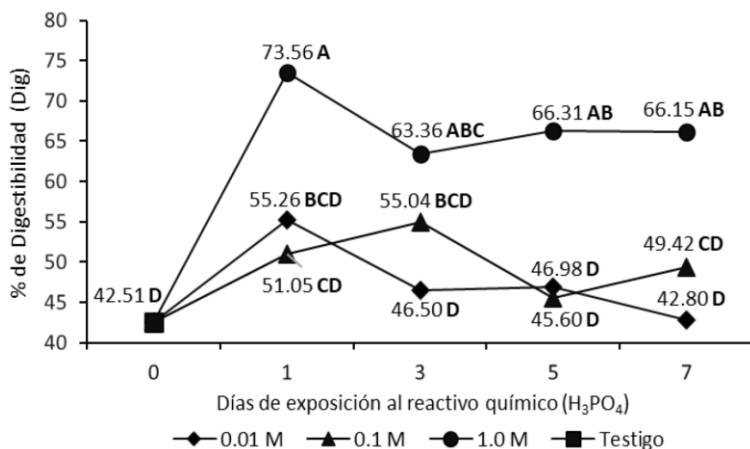


Figura 8. Efectos del tiempo y concentración (M) de H_3PO_4 (líneas separadas) del porcentaje de Digestibilidad (Dig), en hojas de caña de azúcar. M: mol L^{-1} . Letras distintas indican medias diferentes (Tukey, $p < 0.05$).

DISCUSIÓN

De acuerdo Moodley y Kana (2018) la variación en composición estructural de hojas de caña de azúcar depende de la ubicación, crecimiento, periodo de cosecha y procedimiento analítico realizado. También Menandro *et al.* (2017) muestran que el contenido promedio de hemicelulosa, celulosa y lignina en hojas verdes de caña de azúcar es de 26, 32 y 18%, respectivamente; mientras que en hojas secas es de 29, 37 y 21%. Los correspondientes valores de FDN y FDA fueron 15 y 10% más bajos, que los reportados por Uppal y Kaur (2011) y Hermiati *et al.* (2022) reportan que para el bagazo de caña tratado con tres concentraciones: 1, 2 y 3 M de ácidos, reportan que los efectos del

ácido fosfórico (H_3PO_4) a mayor concentración se observan debido a que se afectan significativamente los grupos funcionales y la morfología de la biomasa de las hojas de caña.

Existe evidencia de que el pH ácido, debilita a la pared celular (FDN) antes de romperse (Phyo *et al.* 2019). El H_3PO_4 en alta concentración afecta los grupos funcionales (Hermiati *et al.* 2022). Probablemente la disminución de FDN con H_3PO_4 1.0 M se debe a la hidrólisis de Hem, más no la disminución de FDA que no contiene Hem. Tal vez la disminución de FDA se debe a la hidrólisis de Cel o de los demás componentes de la fibra en condiciones ácidas. Por ejemplo, el ácido sulfúrico se usa para hidrolizar cristales de celulosa de bambú (Zhang *et al.* 2014). Al respecto, Siripong *et al.* (2016) reportaron que, en malezas, la acción del ácido fosfórico elimina la mayor parte de hemicelulosa de la pared celular, lo cual permite tener acceso a la celulosa, cuya remoción es menor.

El valor de LDA fue muy parecido al reportado por Aguirre *et al.* (2010) en hojas de caña de azúcar con puntas (6.3%). El valor calculado de S (sílice), en el residuo de caña de azúcar (4.45% de cenizas y 57.66% de S en las cenizas) fue 2.6% (Canilha *et al.* 2012, Gutierrez *et al.* 2018), que es 2% menor que el del presente estudio, debido a que contrariamente a lo sucedido con Hem y Cel, no se observó ningún efecto hidrolítico liberador de S, aun a esta alta concentración de H_3PO_4 1.0 M. El aumento de LDA observado el día 7, se debe probablemente a un efecto de reacción del H_3PO_4 con la lignina, como lo afirman Xie *et al.* (2019), ya que el ácido fosfórico es una molécula polar y puede penetrar en el polímero de lignina para actuar como plastificante. Mientras que Gao *et al.* (2020) concluyeron que los grupos fenólicos activos de la lignina kraft (obtenida por degradación alcanina de la madera), reaccionan con el grupo fosfato para obtener lignina fosforilada, en este estudio cuando los valores de Cel y Hem comenzaron a disminuir y el H_3PO_4 comenzó a unirse a la LDA en lugar de liberarla por hidrólisis. Contrariamente, Huang *et al.* (2019), mencionan que los catalizadores ácidos reducen la resistencia de la biomasa, al hidrolizar la hemicelulosa y una porción de lignina. Estos investigadores usaron H_3PO_4 entre 40 y 80%, mientras que en este estudio se usaron concentraciones de 0.1 a 10%.

Probablemente el aumento de S (sílice) al día 1, se debe a la adsorción de H_3PO_4 por S, de acuerdo con Hena *et al.* (2015), el bagazo de caña de azúcar modificado puede ser usado eficientemente para remover iones fosfato del agua, e incluso sin modificar, el bagazo de caña de azúcar posee sitios especiales de enlace para remover contaminantes, por ejemplo, el bagazo crudo adsorbe 90% de nitritos (Sarker *et al.* 2017). Probablemente, el S es responsable de esta adsorción ya que es componente de las zeolitas, usadas para adsorber fosfatos (Wan *et al.* 2018, Deng *et al.* 2022).

La disminución de hemicelulosa usando H_3PO_4 1.0 M (10%), fue reportada por otros investigadores. Mientras que Qiu *et al.* (2017), refieren que los contenidos de hemicelulosa y lignina disminuyeron con H_3PO_4 (85% p/p) en paja de trigo. En tanto que Wan *et al.* (2018), mencionan que el tratamiento ácido afecta principalmente a la hemicelulosa con un pequeño impacto en la lignina, el H_3PO_4 irrumpe los enlaces covalentes de hidrógeno, y solubiliza la hemicelulosa. La disminución de celulosa usando H_3PO_4 1.0 M (10%), fue reportada por otros investigadores. Por ejemplo, Hermiati *et al.* (2022), reportaron que los iones de hidrógeno de los ácidos sirven como catalizadores que hidrolizan los polisacáridos a monómeros de azúcar, degradando de forma ligera la fracción de celulosa. En tanto que Huang *et al.* (2019), refieren que el modo de acción del H_3PO_4 ,

depende de su capacidad para interrumpir los enlaces de hidrógeno dentro de la celulosa, en su trabajo con tratamientos de H_3PO_4 a residuos de bambú encontraron que la cristalinidad de la celulosa disminuyó de 54.4 a 51.5% al aumentar la concentración de H_3PO_4 de 40 a 85%. Mientras que Qiu *et al.* (2017), reportaron que el contenido de celulosa de la paja de trigo disminuye cuando aumenta la concentración de H_3PO_4 .

Dado que la degradabilidad es solamente ruminal, será menor que la digestibilidad (degradabilidad ruminal + digestión intestinal). Por tanto, todos los valores de la Figura 7 resultaron menores que sus correspondientes valores de la Figura 8. Al respecto, Araiza-Rosales *et al.* (2013) encontraron en ensilados de maíz, degradabilidades cercanas al 80% que aumentaron a cerca del 85% cuando se les agregó manzana de desecho. El aumento observado en la degradabilidad ruminal se debe a la degradación de FDN, FDA y celulosa que disminuyeron en el día 1. Mientras que Uppal *et al.* (2011) trabajando con H_3PO_4 a concentraciones 1.0, 2.0 y 3.0 M en bagazo de caña de azúcar, reportaron que los ácidos concentrados hidrolizan tanto los enlaces débiles de la hemicelulosa como los más fuertes de la celulosa β (1,4). Sobre lo mismo Xu *et al.* (2021) refieren que la lignina de distintos forrajes se puede degradar entre 7.22 y 15.04% en el rumen de búfalos, lo cual hace que la digestibilidad de los componentes lignocelulósicos sea mayor en búfalo que en ganado criollo. Sobre lo mismo De-Olivera *et al.* (2023) encontraron que, el tratamiento de caña de azúcar con óxido de calcio disminuye las fracciones de FDN, celulosa y lignina por lo que aumenta la digestibilidad *in vitro*. Estos resultados coinciden con los de la presente investigación en que la disminución de FDN, FDA y celulosa (Figuras 1, 2 y 6) hace que aumenten la degradabilidad ruminal (Figura 7) y la digestibilidad (Figura 8), probablemente por la hidrólisis de los carbohidratos estructurales de las hojas de caña de azúcar, que proporcionan energía (y adicionalmente fósforo) para el crecimiento de los microorganismos del rumen. En tanto que Palangi *et al.* (2023), reportaron que la adición de ácido fumárico aumenta la fracción “a” de rápida degradabilidad (59.71 a 64.96%) del forraje de alfalfa. Mientras que Contreras *et al.* (2019) estudiaron la degradabilidad ruminal de la fibra de los forrajes y residuos de cosecha, y encontraron una degradabilidad potencial de 70.25 % en paja de avena, valor muy alto comparado con la degradabilidad ruminal máxima del presente estudio.

El aumento de la concentración de H_3PO_4 mejora la digestibilidad enzimática, más que la temperatura y el tiempo (Qiu *et al.* 2017). Mientras que la digestibilidad enzimática de residuos de bambú pasó de 15.4 a 61.4% por tratamiento con ácido sulfúrico seguido por H_3PO_4 (Huang *et al.* 2019). En tanto que Phillip *et al.* (2023), el ácido acético a altas concentraciones penetra eficazmente la estructura de la celulosa y rompe los enlaces de hidrógeno, por lo que mejora la digestibilidad *in vivo* de la paja de arroz. Al respecto, Siripong *et al.* (2016) y Huang *et al.* (2019) reportan que el H_3PO_4 es de bajo costo, es poco corrosivo, puede disolver la celulosa, no es volátil, presenta estabilidad química, sus residuos son ambientalmente amigables y sus sales son fácilmente reciclables para ser usadas como fertilizantes, es un tampón de acidez efectivo en procesos bioquímicos y un nutriente para los microorganismos. El H_3PO_4 es menos peligroso en comparación con el ácido clorhídrico (HCl) y el ácido sulfúrico (H_2SO_4) que resultan corrosivos para el equipo y peligrosos para la manipulación humana (Wan *et al.* 2018).

CONCLUSIONES

El ácido fosfórico 1.0 M (aproximadamente 10%), disminuye la fibra detergente neutro o paredes celulares y la fibra detergente ácido debido a la degradación de hemicelulosa y celulosa. Por lo que aumenta la biodisponibilidad de la materia seca para los microorganismos ruminales y, en consecuencia, aumenta la degradabilidad ruminal y la digestibilidad. La tecnología propuesta, es adecuada para los pequeños productores con la necesidad de tener alternativas de alimentos para el ganado, a partir del reciclado de biomasa, como las hojas del cultivo de caña de azúcar, desechos agrícolas, rastrojos y malezas.

AGRADECIMIENTOS

Los autores desean agradecer el apoyo al área de Nutrición Animal del Departamento de Zootecnia de la Universidad Autónoma Chapingo.

CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran que no tienen ningún conflicto de interés relacionado con la presente investigación.

FINANCIAMIENTO

La presente investigación fue financiada por el Colegio de Posgraduados y la Universidad Autónoma Chapingo.

LITERATURA CITADA

- Aguirre J, Magaña R, Martínez S, Gómez A, Ramírez J C, Barajas R, Plascencia A, Barcena R, García DE (2010) Caracterización nutricional y uso de la caña de azúcar y residuos transformados en dietas para ovinos. *Zootecnia Tropical* 28: 489-498.
- Alokika A, Kumar A, Kumar V, Singh B (2021) Cellulosic and hemicellulosic fractions of sugarcane bagasse: Potential, challenges and future perspective. *International Journal of Biological Macromolecules* 169: 564-582. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.12.175>
- Assureira E, Assureira M (2022) Transformación de las hojas de caña de azúcar en biocarbón para su uso como combustible y agente reductor en procesos de reducción directa de minerales de hierro. *Información Tecnológica* 33: 51-66. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642022000300051>
- Araiza-Rosales E, Delgado-Licon E, Carrete-Carreón F. O, Medrano-Roldán H, Solís-Soto A, Murillo-Ortiz M, Haubi-Segura C (2013) Degradabilidad ruminal *in situ* y digestibilidad *in vitro* de diferentes formulaciones de ensilados de maíz-manzana adicionados con melaza. *Avances en Investigación Agropecuaria* 17: 79-96.

- Cabrera JA, Zuaznábar R (2010) Impacto sobre el ambiente del monocultivo de la caña de azúcar con el uso de la quema para la cosecha y la fertilización nitrogenada. I. Balance del carbono. *Cultivos tropicales* 31: 5-13.
- Canilha L, Chandel A. K, Suzane Dos Santos Milessi T, Antunes FAF, Luiz da Costa Freitas W, Das Graças Almeida Felipe M, da Silva SS (2012) Bioconversion of sugarcane biomass into ethanol: an overview about composition, pretreatment methods, detoxification of hydrolysates, enzymatic saccharification, and ethanol fermentation. *BioMed Research International* 2012: 1-15. <https://doi.org/10.1155/2012/989572>
- Carvalho J, Nogueirol R, Menandro L, Bordonal RdO, Borges C, Cantarella H, Franco HCJ (2017) Agronomic and environmental implications of sugarcane straw removal: A majorreview. *GCB Bioenergy: Bioproducts for a Sustainable Bioeconomy* 9: 1181-1195. <https://doi.org/10.1111/gcbb.12410>
- Contreras JL, Matos M A, Felipe E, Cordero AG, Ramos-Espinoza Y (2019) Degradabilidad ruminal de forrajes y residuos de cosecha en bovinos Brown Swiss. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú* 30: 1117-1128. <http://dx.doi.org/10.15381/rivep.v30i3.16601>
- COLPOS (2016) Reglamento para el Uso y Cuidado de Animales Destinados a la Investigación en el Colegio de Postgraduados. Editorial Colegio de Posgraduados. Montecillo, Estado de México, México. 18p.
- De-Oliveira RC, Libânio-Tosto MS, Alveranga-Santos S, Vieira-Pires AJ, Ribeiro OL, De Albuquerque-Maranhão CM, Rufino LMA, Correia GS, Ruiz-Alba HD, Pinto-de-Carvalho GD (2023) Nutritive profile, digestibility, and carbohydrate fractionation of three sugarcane genotypes treated with calcium oxide. *Agronomy* 13: 1-12. <https://doi.org/10.3390/agronomy13030733>
- Deng Z, Gu S, Cheng H, Xing D, Twagirayezu G, Wang X, Ning W, Mao M (2022) Removal of phosphate from aqueous solution by zeolite-biochar composite: Adsorption performance and regulation mechanism. *Applied Sciences* 12: 5334. <https://doi.org/10.3390/app12115334>
- Gao C, Zhou L, Yao S, Qin C, and Fatehi P (2020) Phosphorylated kraft lignin with improved thermal stability. *International Journal of Biological Macromolecules* 162(1): 1642-1652. <https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2020.08.088>
- Gutierrez CE, Mistretta G, Zamora-Rueda G, Peralta FL, Golato MA, Juárez G, Ruiz M, Paz D, Cárdenas GJ (2018) Contenido de sílice total en cenizas de residuos agrícolas de cosecha de caña de azúcar (RAC) en Tucumán, Argentina. *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán* 95: 21-26.
- Hena S, Atikah S, Ahmad H (2015) Removal of phosphate ion from water using chemically modified biomass of sugarcane bagasse. *The International Journal of Engineering and Science* 4: 51-62.
- Hermiati E, Laksana RPB, Fatriasari W, Kholida LN, Thontowi A, Yopi AT, Arnienanto DR, Champreda V, Watanabe T (2022) Microwave-assisted acid pretreatment for enhancing enzymatic saccharification of sugarcane trash. *Biomass Conversion and Biorefinery* 12: 3054-3054. <https://doi.org/10.1007/s13399-020-00971-z>
- Huang C, Lin W, Lai C, Li X, Jin Y, Yong Q (2019) Coupling the post-extraction process to remove residual lignin and alter the recalcitrant structures for improving the enzymatic digestibility of acid-pretreated bamboo residues. *Bioresource Technology* 285: 121355-121311. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2019.121355>
- Menandro LMS, Cantarella H, Franco HCJ, Kölln OT, Pimenta MTB, Sanches GM, Carvalho JLN (2017) Comprehensive assessment of sugarcane straw: implications for biomass and bioenergy production. *Biofuels, Bioproducts and Biorefining* 11(3): 488-504. <https://doi.org/10.1002/bbb.1760>
- Moodley P, Kana EG (2018) Comparative study of three optimized acid-based pretreatments for sugar recovery from sugarcane leaf waste: a sustainable feedstock for biohydrogen production. *Engineering science and Technology, an International Journal* 21(1): 107-116. <https://doi.org/10.1016/j.jestch.2017.11.010>

- Palangi V, Macit M, Kılıç Ü (2023) Effects of organic acid treated legume forages on *in-vitro* degradability values. Journal of the Hellenic Veterinary Medical Society 74: 5817-5824. <https://doi.org/10.12681/jhvms.30344>
- Phyo P, Gu Y, Hong M (2019) Impact of acidic pH on plant cell wall polysaccharide structure and dynamics: Insights into the mechanism of acid growth in plants from solid-state NMR. Cellulose 26: 291-304. <https://doi.org/10.1007/s10570-018-2094-7>
- Phillip YL, Hassanien HA, Abou El-Fadel MH, El-Badawy MM, El-Sanafawy HA, Hussein AM, Salem AZM (2023) Effect of acetic acid addition to rice straw pre-treated with urea on performance of dairy ewes. Tropical Animal Health and Production 55: 351. <https://doi.org/10.1007/s11250-023-03716-y>
- Qiu J, Wang Q, Shen F, Yang G, Zhang Y, Deng S, Zhang J, Zeng Y, Song Ch (2017) Optimizing phosphoric acid plus hydrogen peroxide (PHP) pretreatment on wheat straw by response surface method for enzymatic saccharification. Applied Biochemistry and Biotechnology 181: 1123-1139. <https://doi.org/10.1007/s12010-016-2273-7>
- Samadi S, Wajizah S, Usman Y, Riayatsyah D, Firdausyi Z (2016) Improving sugarcane bagasse as animal feed by ammoniation and followed by fermentation with *Trichoderma harzianum* (*In vitro* study). Animal Production 18(1): 14-21. <https://doi.org/10.20884/1.anprod.2016.18.1.516>
- Sarker TC, Azam SMGG, El-Gawad AMA, Gaglione SA, Bonanomi G (2017) Sugarcane bagasse: A potential low-cost biosorbent for the removal of hazardous materials. Clean Technologies and Environmental Policy 19: 2343-2362. <https://doi.org/10.1007/s10098-017-1429-7>
- Siripong P, Duangporn P, Takata E, Tsutsumi Y (2016) Phosphoric acid pretreatment of *Achyranthes aspera* and *Sida acuta* weed biomass to improve enzymatic hydrolysis. Bioresource Technology 203: 303-308. <https://doi.org/10.1016/j.biortech.2015.12.037>
- Van-Soest PJ, Wine RH, Moore LA (1966) Estimation of the true digestibility of forages by the in-vitro digestion of cell walls. In: Proceedings of the Xth International Grassland Congress. Helsinki. pp. 438-441.
- Uppal, SK, Kaur R (2011) Hemicellulosic furfural production from sugarcane bagasse using different acids. Sugar Tech 13: 166-169. <https://doi.org/10.1007/s12355-011-0081-5>
- Wan X, Tian D, Shen F, Hu J, Yang G, Zhang Y, Deng S, Zhang J, Zeng Y (2018) Fractionating wheat straw via phosphoric acid with hydrogen peroxide pretreatment and structural elucidation of the derived lignin. Energy & Fuels 32: 5218-5225. <https://doi.org/10.1021/ACS.ENERGYFUELS.8B00297>
- Xie J, Han Q, Feng B, Liu Z (2019) Preparation of amphiphilic mesoporous carbon-based solid acid from kraft lignin activated by phosphoric acid and its catalytic performance for hydration of α -pinene. BioResources 14: 4284-4303. <https://doi.org/10.15376/biores.14.2.4284-4303>
- Xu Q, Zhong H, Zhou J, Wu Y, Ma Z, Yang L, Wang Z, Ling Ch, Li X (2021) Lignin degradation by water buffalo. Tropical animal health and production 53: 1-8. <https://doi.org/10.1007/s11250-021-02787-z>
- Zavala CH, Pretell V, Verastegui J, Ramirez A (2021) Estimación del potencial energético del gas pobre a partir de la gasificación de cáscara de cacao y racimos de frutos vacíos de palma aceitera. Información Tecnológica 32: 143-150. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642021000200143>
- Zhang PP, Tong DS, Lin CX, Yang HM, Zhong ZK, Yu WH, Wang H, Zhou CH (2014) Effects of acid treatments on bamboo cellulose nanocrystals. Asia-Pacific Journal of Chemical Engineering 9: 686-695. <https://doi.org/10.1002/apj.1812>