

## Artículo científico

# Efecto de la nutrición mineral en el rendimiento y las características bromatológicas del forraje verde hidropónico de maíz

## Effect of mineral nutrition on the yield and bromatological characteristics of corn hydroponic green forage

Freddy Soto-Bravo<sup>1</sup> y Carolina Ramírez-Viquez<sup>2</sup><sup>1</sup>Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Facultad de Ciencias Agroalimentarias, Escuela de Agronomía, Universidad de Costa Rica, Apdo. postal 183-4050, Alajuela, Costa Rica<sup>2</sup>Universidad de Costa Rica, San JoséCorreo electrónico: [freddy.sotobravo@ucr.ac.cr](mailto:freddy.sotobravo@ucr.ac.cr)

### Resumen

El objetivo de este estudio fue determinar el efecto de la nutrición mineral, aplicada mediante soluciones nutritivas, sobre el rendimiento fresco (PF) y las características bromatológicas del forraje verde hidropónico (FVH) de maíz. La investigación se realizó en un invernadero ubicado en la Estación de Investigación Agrícola Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica. Se aplicaron dos tratamientos de solución nutritiva: 1) con alta ( $N_a$ ), y 2) con baja ( $N_b$ ) concentración de nutrientes minerales, y un testigo con agua (T), distribuidos en un diseño irrestricto al azar. La semilla se seleccionó; se preparó mediante lavado, desinfección, imbibición, escurrimiento y aireación; se pregerminó en cámara húmeda (3 días) en bandejas plásticas (densidad de  $3 \text{ kg m}^{-2}$ ); y se trasladó al invernadero, donde permaneció 11 días hasta la cosecha. En sentido general, no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos, y los valores promedio fueron:  $15,3 \text{ kg m}^{-2}$  de PF; 20,01 % de proteína bruta; 18,95 % de fibra bruta; 1,48 % de lignina; 44,27 % de fibra detergente neutra; 0,96 % de nitrógeno de la fibra detergente neutra; 22,09 % de fibra detergente ácida; 0,24 % nitrógeno de la fibra detergente ácida; 4,5 % de ceniza; 7,44 % de extracto etéreo; 88,6 % de digestibilidad de la materia seca; y  $3,2 \text{ Mcal kg MS}^{-1}$  de energía metabolizable. Se concluye que la aplicación de nutrientes minerales mediante solución nutritiva no afectó el rendimiento fresco ni los indicadores bromatológicos, y se demostró el potencial de utilización del forraje verde hidropónico de maíz como fuente de alimentación en la producción animal.

Palabras clave: digestibilidad, proteína bruta, solución nutritiva, valor nutricional.

### Abstract

The objective of this study was to determine the effect of mineral nutrition, applied through nutritional solutions, on the fresh yield (FY) and bromatological characteristics of corn hydroponic green forage (HGF). The study was conducted in a greenhouse located in the Agricultural Research Station Fabio Baudrit Moreno, Alajuela, Costa Rica. Two treatments of nutritional solution were applied: 1) with high ( $N_a$ ), and 2) with low ( $N_b$ ) concentration of mineral nutrients, and a control with water (Te), distributed in an unrestricted randomized design. The seed was selected; prepared through washing, disinfection, imbibition, draining and aeration; it was pregerminated in humidity chamber (3 days) on plastic trays (density of  $3 \text{ kg m}^{-2}$ ); and was transferred to the greenhouse, where it remained during 11 days until harvest. In general, no significant differences were found among the treatments, and the average values were:  $15,3 \text{ kg m}^{-2}$  of FY; 20,01 % of crude protein; 18,95 % of crude fiber; 1,48 % of lignin; 44,27 % of neutral detergent fiber; 0,96 % of nitrogen of the neutral detergent fiber; 22,09 % of acid detergent fiber; 0,24 % nitrogen of the acid detergent fiber; 4,5 % of ash; 7,44 % of ether extract; 88,6 % of dry matter digestibility; and  $3,2 \text{ Mcal kg DM}^{-1}$  of metabolizable energy. It is concluded that the application of mineral nutrients through nutritional solution did not affect the fresh yield or bromatological indicators, and the potential of utilization of the corn hydroponic green forage as feeding source in animal production was proven.

Keywords: digestibility, crude protein, nutritional solution, nutritional value

### Introducción

La disponibilidad de forraje, en el sistema tradicional de alimentación animal basado en el pastoreo extensivo a campo abierto, enfrenta una serie de contrastes asociados al cambio climático y a la

crisis mundial del agua, tales como: inundación de tierras, escasez de tierras cultivables, salinidad del agua, incremento en el costo de los fertilizantes y la mano de obra, largos periodos de crecimiento y fenómenos naturales (Naik *et al.*, 2015).

Una alternativa en la alimentación animal puede ser el forraje verde hidropónico, ya que presenta una serie de ventajas respecto al sistema convencional de producción de forrajes a campo abierto. El forraje verde hidropónico se obtiene a partir de la germinación de semillas o granos, y puede ser utilizado como suplemento nutricional en diferentes especies de animales, ya que presenta un excelente porcentaje de proteína (Contreras *et al.*, 2015), un adecuado balance en la relación fibra soluble/fibra insoluble, alta digestibilidad de la MS (Gómez-Burneo, 2008) y un buen aporte de energía (Bedolla-Torres *et al.*, 2015).

La producción intensiva de forraje verde hidropónico en ambientes protegidos es menos vulnerable a los cambios del clima; permite una producción programada y periódica durante todo el año, con un uso eficiente del agua (Al-Karakí y Al-Hashimi, 2012), y una reducción de los fertilizantes, agroquímicos y mano de obra (Candia, 2014).

En la producción de forraje verde hidropónico se han utilizado diferentes especies, entre ellas gramíneas y leguminosas. Algunos estudios evaluaron la calidad del forraje verde hidropónico en maíz [(*Zea mays* L.) (Naik *et al.*, 2017)], sorgo [(*Sorghum bicolor* L.) (Gonzales-Díaz y García-Reyes, 2015)], cebada [(*Hordeum vulgare* L.) (Quispe-Cusi *et al.*, 2016)], trigo [(*Triticum aestivum* L.) (Contreras *et al.*, 2015)], arroz [(*Oriza sativa* L.) (Maldonado *et al.*, 2013)], y en mezclas de cereales y leguminosas (Contreras *et al.*, 2015). Sin embargo, solo un número reducido estudió la calidad del forraje verde hidropónico en respuesta a la aplicación de soluciones nutritivas; por ejemplo: en maíz (Acosta *et al.*, 2016), trigo (Maldonado *et al.*, 2013), cebada (Quispe *et al.*, 2016) y sorgo (Gonzales-Díaz y García-Reyes, 2015). En varias de estas investigaciones, se utilizó un testigo absoluto con agua sin nutrientes; y en algunos indicadores bromatológicos se obtuvieron valores similares a los de otras en que se aplicó solución nutritiva en el riego (Naik *et al.*, 2017); lo cual genera incertidumbre respecto a la necesidad de usar nutrición mineral en la producción de forraje verde hidropónico.

En la literatura consultada, se encontró que la concentración de nutrientes minerales en la solución nutritiva variaba ampliamente. Por ejemplo, en el caso del nitrógeno, los rangos fluctuaron desde 5 mg L<sup>-1</sup> (Rivera *et al.*, 2010) hasta 250 mg L<sup>-1</sup> (Vargas-Rodríguez, 2008); mientras que las concentraciones de hierro, desde 4,3 mg L<sup>-1</sup> (Salas-Pérez *et al.*, 2012) hasta 800 mg L<sup>-1</sup> (Rivera *et al.*, 2010).

Esta variabilidad se debe a la diversidad de factores que influyen, tales como el clima, el genotipo, la densidad de siembra y los días para la cosecha.

Tomando en consideración lo anteriormente planteado, el objetivo de este estudio fue determinar si la nutrición mineral, aplicada mediante soluciones nutritivas, afectaba el rendimiento y las características bromatológicas del forraje verde hidropónico de maíz, y basado en ello definir la necesidad de la aplicación de fertilizantes.

## Materiales y Métodos

*Sitio experimental.* El estudio se realizó en la Estación Experimental Agrícola Fabio Baudrit Moreno, ubicada en San José de Alajuela, Costa Rica (10° 01' N, 84° 16' W, a 840 msnm), con valores de temperatura promedio mensual de 22 °C, humedad relativa de 78 % y una precipitación promedio anual de 1 940 mm.

Se utilizó un invernadero multitúnel de 9,75 m de ancho por 50 m de largo, y una altura de 6 m al centro del túnel y 4 m al canalón. El invernadero fue construido con hierro galvanizado, cubierta de polietileno transparente tricapa (200 µm) y malla de nailon antiinsecto (43 x 28 hilos pulg<sup>-2</sup>) en las paredes y en la apertura cenital. El sistema de ventilación fue pasivo, combinado con el funcionamiento automatizado de ventanas cenitales según la velocidad del viento, que se monitoreó con un anemómetro.

Dentro de la estructura de producción de forraje verde hidropónico, se monitoreó la temperatura y la humedad relativa del aire (Data logger HOBO U23 Pro v2) cada cinco minutos, registrando los promedios horarios. El máximo, el mínimo y el promedio de temperatura y humedad relativa fueron de 31,5; 19,7 y 23,9 °C, y 97,4; 59,8 y 86,0 %, respectivamente.

*Material vegetal.* Se usó semilla de maíz, basado en su disponibilidad, alto volumen de producción y bajo costo respecto a otros materiales importados (Ramírez-Viquez, 2016); específicamente de la variedad local Diamantes 8843, de polinización libre, grano color blanco, con madurez tardía (120-135 días), rendimiento fresco de 3-6 t ha<sup>-1</sup> y un amplio rango de adaptación a condiciones agroclimáticas (INTA-AECI, 2005).

*Tratamientos.* Se aplicaron dos tratamientos de solución nutritiva (tabla 1): 1) alta concentración de nutrientes (N<sub>a</sub>), y 2) baja concentración de nutrientes (N<sub>b</sub>); y un testigo con agua sin nutrientes (T<sub>c</sub>).

La concentración de nutrientes minerales en la solución nutritiva, para los tratamientos N<sub>b</sub> y N<sub>a</sub>, se

Tabla 1. Concentración de macro- y micronutrientes en cada tratamiento.

Tratamiento	pH	Macro (mg L <sup>-1</sup> )					Micro (mg L <sup>-1</sup> )						*CE (mS cm <sup>-1</sup> )
		N	Ca	Mg	K	P	Fe	Zn	Cu	Mn	Na	S	
Testigo (T <sub>c</sub> )	8,3	6,2	12,6	5,4	3,6	0,3	ND	ND	ND	ND	9,3	0,9	0,2
Nutrición baja (N <sub>b</sub> )	6,7	94,6	94,2	22,3	145,6	18,4	0,3	0,1	0,1	ND	12,1	35	1,3
Nutrición alta (N <sub>a</sub> )	6,6	227	202,7	49,5	341,4	46,1	1,2	0,5	0,5	0,7	16,3	78,8	2,5

\*CE: conductividad eléctrica (mS cm<sup>-1</sup>), ND: no detectable.

definió sobre la base de los rangos reportados en la literatura (Al-Karaki y Al-Hashimi, 2012; Candia, 2014), y se descartaron aquellos valores considerados extremos. La cantidad de nutrientes en T<sub>c</sub> se correspondió con la concentración presente en el agua.

*Procedimiento experimental.* El proceso de producción de forraje verde hidropónico se llevó a cabo según lo propuesto por Vargas-Rodríguez (2008), e incluyó la preparación de la semilla, la pregerminación y la etapa de crecimiento. A su vez, la preparación de la semilla incluyó: selección, limpieza, prelavado, desinfección e imbibición. La desinfección consistió en: inmersión de las semillas en una solución de 100 g L<sup>-1</sup> de hidróxido de calcio (8 h), lavado de la cal y, por último, inmersión por 5 min en Busamart® (TCMTB: benzotiazol) con una dosis de 1 ml L<sup>-1</sup>. Posteriormente se lavó el residuo de TCMTB en las semillas, se dejaron aireando al ambiente (1 h) y se sometieron a un proceso de imbibición, sumergiéndolas en agua durante un periodo de 10 h.

El proceso de producción se llevó a cabo en un ciclo de cultivo de 14 días, que incluyó dos etapas: I: germinación (3 días), y II: crecimiento (11 días). Una vez concluida la imbibición, se hizo un escurrimiento pasivo y se colocaron las semillas en bandejas plásticas, a una densidad de 3 kg m<sup>-2</sup> según lo reportado para el maíz (Acosta *et al.*, 2016; Naik *et al.*, 2017). A continuación, se pusieron a germinar en cámara oscura, con humedad relativa superior a 85 % y temperatura de 23 a 25 °C.

En la etapa de crecimiento del forraje verde hidropónico se retiró el papel de protección de las semillas germinadas en las bandejas, las cuales se trasladaron a un módulo de producción ubicado dentro del invernadero. Dicho módulo consistía en una estructura de 3 m de largo; 1,2 m de ancho y 2 m de altura, con cinco estantes horizontales separados a 0,40 m. La estructura fue dividida verticalmente en tres secciones, que fueron asignadas aleatoriamente a cada uno de los tres tratamientos.

Cada sección vertical estaba compuesta por cinco estantes, y cada uno contenía cuatro repeticiones.

El sistema de riego estuvo compuesto por: a) tanques de almacenamiento, b) bombas de impulsión, c) tubería de conducción (PVC de 19 mm), d) microaspersores autocompensados, e) reguladores de presión, y f) manómetros. Cada estante o nivel tenía cuatro líneas de riego (PE de 16 mm), provistas de dos aspersores cada una, para un total de 20 líneas y 40 aspersores en toda la estructura.

Para la preparación de las soluciones nutritivas se utilizaron fertilizantes hidrosolubles, tales como fosfato monopotásico, sulfato potásico, sulfato de magnesio, nitrato de calcio, nitrato de potasio y una premezcla de micronutrientes. Posteriormente, estas se almacenaron en dos tanques identificados como N<sub>a</sub> y N<sub>b</sub> para los tratamientos con alta y baja concentración de nutrientes, respectivamente.

Las soluciones nutritivas fueron aplicadas en cada evento de riego, mediante fertirriego por nebulización. La programación del riego se realizó por tiempos fijos mediante un programador (*timer*), con una duración de 15 segundos y una frecuencia cada 45 minutos, en un intervalo horario entre las 6 a. m. y las 6 p. m. En cada tratamiento se registraron las entradas y salidas de agua en el sistema de cultivo, durante 11 días del ciclo de cultivo (tabla 2).

*Variables de respuesta.* Al final del ciclo de cultivo se determinó el rendimiento (kg m<sup>-2</sup>), a partir del peso fresco (PF) obtenido por bandeja (0,165 m<sup>2</sup>). Como variables bromatológicas, se determinó: proteína bruta (PB), fibra bruta (FB), lignina detergente ácida (lignina), fibra detergente neutra (FDN), nitrógeno de la fibra detergente neutra (NFDN), fibra detergente ácida (FDA), nitrógeno de la fibra detergente ácida (NFDA), ceniza, extracto etéreo (EEt), digestibilidad de la materia seca (DMS) y energía metabolizable (EM). Se utilizaron las metodologías de análisis estandarizadas del laboratorio del Centro de Investigación en Nutrición Animal (CINA, 2015): a) Asociación Oficial

Tabla 2. Balance hídrico para la producción de forraje verde hidropónico de maíz en los diferentes tratamientos.

Indicador en el sistema de producción		Tratamiento		
		Testigo	Nutrición baja	Nutrición alta
Entradas (L m <sup>-2</sup> )	Riego	11,7	12,1	8,9
	Pérdidas laterales	4,1	4,1	2,6
Salidas (L m <sup>-2</sup> )	Drenaje	3,3	4	0,6
	ET <sub>c</sub>	3,6	3,1	5,1
	Total salidas	11	11,2	8,3
Balance (L m <sup>-2</sup> )		0,6	0,9	0,5

de Químicos Agrícolas (AOAC) 942.05, 2) AOAC 920.39, 3) AOAC 962.69, 4) AOAC 2001.11, y 5) AOAC 996.17.

La DMS (%) se estimó a partir del contenido de FDA, según la ecuación:  $DMS = 88,9 - (\% FDA \times 0,779)$ , propuesta por Di Marco (2011). La EM (Mcal kg<sup>-1</sup> MS<sup>-1</sup>) se estimó a partir de la DMS, según el procedimiento descrito por Di Marco (2011), usando la ecuación  $EM = 3,61 \times (DMS/100)$ .

Las muestras fueron tomadas del centro de cada bandeja, con el fin de descartar el efecto de borde. En cada tratamiento la muestra por repetición correspondió a una muestra compuesta de todas las repeticiones presentes en cada uno de los cinco estantes, con el fin de obviar el efecto de la reducción de la luz solar, según la posición descendente desde el estante superior hasta el inferior.

*Diseño experimental y análisis estadístico.* Se utilizó un diseño irrestricto al azar, con cuatro repeticiones en cada uno de los cinco estantes dentro de la estructura de producción. Cada repetición correspondió a una bandeja plástica (0,55 m x 0,30 m = 0,165 m<sup>2</sup>) con forraje verde hidropónico. Entre tratamientos, hubo una bandeja de forraje utilizada

como borde. Los datos de las variables de respuesta fueron sometidos a la verificación de normalidad y homocedasticidad, usando el programa informático INFSTAT (Di Rienzo *et al.*, 2017). Al cumplirse dichos supuestos, los datos fueron sometidos a análisis de varianza (ANOVA) y comparación múltiple de medias utilizando LSD FISHER, con un nivel de probabilidad de 0,05.

## Resultados

Al final del ciclo de cultivo, los tratamientos de nutrición no afectaron el rendimiento fresco de forraje verde hidropónico de maíz, con valores de 15,20; 15,27 y 15,37 kg m<sup>-2</sup> para T<sub>c</sub>, N<sub>b</sub> y N<sub>a</sub>, respectivamente. Tampoco hubo efecto en los contenidos de PB, FB, lignina, FDN y FDA.

Los promedios de las variables bromatológicas se muestran en la tabla 3. Para las variables NFDN y NFDA, el tratamiento T<sub>c</sub> difirió de N<sub>a</sub> y N<sub>b</sub>, sin diferencias estadísticas entre estos últimos. El promedio de todos los tratamientos fue de 0,95 % para NFDN y de 0,24 % para NFDA.

Los contenidos de ceniza y EEt presentaron diferencias estadísticas ( $p < 0,05$ ) entre tratamientos

Tabla 3. Variables bromatológicas en el forraje verde hidropónico de maíz.

Tratamiento	Variable (%)						
	PB	FB	Lignina	FDN	NFDN	FDA	NFDA
Testigo (T <sub>c</sub> )	19,27	19,61	1,30	45,05	0,86 <sup>a</sup>	22,40	0,21 <sup>a</sup>
Nutrición baja (N <sub>b</sub> )	20,06	18,75	1,55	43,20	0,98 <sup>b</sup>	21,88	0,27 <sup>b</sup>
Nutrición alta (N <sub>a</sub> )	20,69	18,50	1,58	44,55	1,03 <sup>b</sup>	21,98	0,25 <sup>b</sup>
Promedio	20,01	18,95	1,50	44,27	0,95	22,09	0,24
CV	6,26	4,72	13,51	3,08	4,62	4,64	7,99
Valor P	0,3221	0,2363	0,1531	0,1955	0,0009	0,7508	0,0028

Valores con letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos ( $p < 0,05$ ).

(tabla 4).  $N_a$  mostró un contenido de ceniza ligeramente superior al de  $T_c$  y  $N_b$ , sin diferencias entre estos últimos. Para el EEt, no hubo diferencias estadísticas entre  $T_c$  y  $N_b$ , que difirieron de  $N_a$ . Por otra parte, no hubo efecto de la nutrición mineral en la DMS ni en el contenido de EM, con promedios de 88,6 % y 3,20 Mcal kg MS<sup>-1</sup>, respectivamente (tabla 4).

## Discusión

La aplicación de las concentraciones baja y alta de nutrientes en solución nutritiva, mediante el riego, no afectó el rendimiento fresco ni la calidad bromatológica del forraje verde hidropónico de maíz. Los resultados demostraron que, para obtener rendimientos aceptables y una buena calidad bromatológica del forraje, no fue necesaria la aplicación de la nutrición mineral.

El sistema radical, durante el desarrollo temprano de las plántulas de maíz, comprende las raíces embrionarias, formadas por una sola raíz primaria y un número variable de raíces seminales (Hochholdinger *et al.*, 2018). Estas raíces posteriormente son sustituidas por un sistema radical permanente que emerge de los nudos del tallo, compuesto de raíces laterales que incrementan sustancialmente la superficie de absorción, debido a la aparición de raíces altamente diferenciadas denominadas pelos absorbentes (Marzec *et al.*, 2015).

Por tanto, durante el crecimiento inicial de la plántula, el incipiente sistema radical –poco diferenciado y carente de pelos absorbentes– no es eficiente en la absorción de nutrientes minerales. En estudios de nutrición en maíz, la respuesta a los tratamientos de fertilización se presentó a partir de las dos o tres semanas (Bertsch, 2009) después de la siembra, al finalizar la etapa de germinación, emergencia y

crecimiento inicial. Además, durante dicha etapa la plántula puede sobrevivir a partir de las reservas de la semilla. Los almidones y las proteínas del endospermo de la semilla son transformados en azúcares simples y aminoácidos, que son utilizados para el crecimiento del embrión, del hipocótilo y de la plántula (Taiz y Zeiger, 2006).

En relación con el rendimiento fresco (PF) y la calidad del forraje obtenido, en estudios similares con forraje verde hidropónico de maíz se reportaron valores aceptables en dichas variables, independientemente de la aplicación de riego con agua o con solución nutritiva.

Los rendimientos, incluidos los del testigo con agua, fueron similares a los informados en maíz (16,49 kg m<sup>-2</sup>) por Salas-Pérez *et al.* (2010) y Naik *et al.* (2015, 2017), quienes utilizaron concentraciones de nutrientes y densidades de semilla similares a las del tratamiento  $N_a$ . A su vez, Rivera *et al.* (2010) indicaron que el uso de solución nutritiva para la producción de forraje verde hidropónico no mejora la calidad bromatológica del forraje, y que es factible utilizar solo agua sin nutrientes.

El forraje verde hidropónico es valorado por sus niveles de PB (Contreras *et al.*, 2015). En este sentido, Van Soest (1994) señaló que el contenido mínimo de proteína cruda en un forraje verde hidropónico debe estar alrededor de 7 %. Los contenidos de PB en el forraje de este estudio, aun aplicando agua sola, fueron superiores a los informados en estudios similares (13,5-19,2 %) por López y Mcfield (2013) y Acosta *et al.* (2016). En otro estudio, Salas-Pérez *et al.* (2010) demostraron que la aplicación de nutrientes mediante solución nutritiva no afectó el contenido de PB (13,3 %), comparado con el tratamiento en que se aplicó agua sin nutrientes (12,2 %).

Tabla 4. Contenido de ceniza, extracto etéreo, digestibilidad de la materia seca y energía metabolizable.

Tratamiento	Variable			
	Ceniza (%)	EEt (%)	DMS (%)	EM (Mcal kg MS <sup>-1</sup> )
Testigo ( $T_c$ )	4,10 <sup>a</sup>	7,95 <sup>b</sup>	88,63	3,22
Nutrición baja ( $N_b$ )	4,07 <sup>a</sup>	7,50 <sup>b</sup>	88,60	3,20
Nutrición alta ( $N_a$ )	5,32 <sup>b</sup>	6,87 <sup>a</sup>	88,55	3,21
Promedio	4,5	7,44	88,59	3,21
CV	7,77	4,28	0,07	0,08
Valor P	0,0009	0,0032	0,2955	0,2437

Valores con letras diferentes en la misma columna indican diferencias significativas entre tratamientos ( $p < 0,05$ ).

El forraje verde hidropónico también es valorado por un buen balance fibra soluble/fibra insoluble, lo que determina la digestibilidad de los nutrientes contenidos en este. Los contenidos de FDN y FDA en forraje verde hidropónico de maíz no fueron afectados por la aplicación de solución nutritiva, y se mantuvo una calidad aceptable en el testigo ( $T_c$ ). Lo anterior coincide con lo señalado por López y Mcfield (2013) y Acosta *et al.* (2016), quienes no hallaron respuesta en los contenidos de FDN y FDA en forraje verde hidropónico de maíz, cuando aplicaron solución nutritiva o agua sin nutrientes.

La FDN representa el componente potencialmente digerible de los forrajes (Candia, 2014). Al respecto, López y Mcfield (2013) señalaron que valores superiores a 55 % reducen la digestibilidad del forraje, debido a la relación inversa entre el contenido de FDN y el valor nutricional, el consumo y la digestibilidad. Los valores de FDN (43,2-45,05 %) de este estudio se ubican dentro del rango reportado por Salas-Pérez *et al.* (2010) y Acosta *et al.* (2016): 42,1-57,8 %, lo que explica la alta digestibilidad.

La FDA es la fracción insoluble de la fibra cruda, y un factor importante para una adecuada fermentación en el rumen. Según Maldonado *et al.* (2013), las raciones del ganado lechero deben contener entre 19 y 27 % de FDA, ya que valores menores pueden reducir el contenido de grasa en la leche. En este estudio, no hubo efecto en la FDA al aplicar solución nutritiva ( $N_a = 21,98$  %;  $N_b = 21,88$  %) o agua sin nutrientes ( $T_c = 22,4$  %). Dichos valores fueron similares a los reportados por Acosta *et al.* (2016) cuando aplicaron solución nutritiva. Por su parte, López-Aguilar *et al.* (2009) demostraron que era factible obtener valores aceptables de FDA (28,5 %) en forraje verde hidropónico de maíz, aun con la aplicación únicamente de agua.

El contenido de lignina presenta una correlación negativa con la DMS del forraje, ya que valores bajos de lignina incrementan su digestibilidad. En este estudio, el porcentaje de lignina (1,30-1,58 %) en todos los tratamientos fue inferior a 5 %, valor a partir del cual se considera que hay una reducción sustancial en la digestibilidad del forraje, y por ello la DMS (88,6 %) fue alta. Ello difiere de lo hallado por Acosta *et al.* (2016), quienes reportaron valores inferiores de DMS en forraje verde hidropónico de maíz (70,0-72,3%), independientemente de la aplicación de soluciones nutritivas o agua.

Valores altos de NFDN y NFDA indican que el nitrógeno se presenta de una forma no aprovechable. Los promedios de NFDN (0,95 %) y NFDA (0,24 %)

fueron similares a lo reportado por Sánchez y Soto (1998).

El EEt representa la cantidad de grasa que contiene el forraje y, por tanto, el componente energético. En este estudio, el rango obtenido (6,87-7,95 %) mostró que no hubo efecto de la aplicación de nutrientes en comparación con el testigo. Estos valores superan los reportados en forraje verde hidropónico de maíz (2,0-4,6 %), cuando se evaluó la respuesta a la aplicación de soluciones nutritivas (Acosta *et al.*, 2016; Naik *et al.*, 2017).

Los estudios acerca del efecto de la aplicación de la nutrición mineral se enfocan más en la evaluación de variables de producción y bromatológicas que en el efecto en la composición mineral del forraje. En este estudio, la ceniza promedio fue de 4,5 %; mientras que en estudios similares, cuando se aplicó agua sin nutrientes, se obtuvo 3,6-6,9 % de ceniza (Cuesta y Machado, 2009; López-Aguilar *et al.*, 2009).

La DMS y el contenido de EM son indicadores importantes porque muestran la cantidad de trabajo metabólico del organismo. El promedio de EM, basado en que no hubo diferencias estadísticas entre tratamientos, fue de 3,2 Mcal  $kg^{-1}$ . Estos resultados coinciden con los informados en forraje verde hidropónico de maíz, al comparar diferentes soluciones nutritivas con un testigo sin nutrientes (López-Aguilar *et al.*, 2009; Acosta *et al.*, 2016).

En resumen, un forraje de alta calidad contiene aproximadamente 70 % de DMS, menos de 50 % de FDN y más de 15 % de proteína; mientras que en un forraje de baja calidad la DMS disminuye a menos del 50 %, la FDN se incrementa a más del 65 % y la proteína baja a menos del 8 % (Di Marco, 2011). En el tratamiento testigo, regado con agua sin nutrientes, la DMS, la proteína bruta y el buen balance de las fibras demostraron que el forraje verde hidropónico de maíz es de óptima calidad, con gran potencial como complemento en dietas para la alimentación animal.

Se concluye que la nutrición mineral, mediante la aplicación de soluciones nutritivas con diferentes concentraciones, no afectó el rendimiento fresco ni la calidad bromatológica del forraje verde hidropónico de maíz a los 11 días de cosecha. Adicionalmente, los valores en las variables de respuesta a los tratamientos, comparados con los reportados en diferentes estudios, demostraron el potencial de utilización del forraje verde hidropónico de maíz como fuente de alimentación en la producción animal, independientemente de la aplicación de riego con solución nutritiva o con agua sin nutrientes.

## Agradecimientos

A la Fundación para el Fomento y Promoción de la Investigación y Transferencia de Tecnología Agropecuaria (FITTACORI), por su aporte financiero para este estudio.

## Referencias bibliográficas

- Acosta, N. V.; Lima, R.; Castro, A.; Avellaneda, J. H. & Suárez, Y. G. Evaluación de diferentes sistemas de producción de biomasa hidropónica de maíz. *Centro Agrícola*. 43 (4):57-66, 2016.
- Al-Karakí, G. N. & Al-Hashimi, M. Green fodder production and water use efficiency of some forage crops under hydroponic conditions. *ISRN Agronomy*. <https://doi.org/10.5402/2012/924672>. [02/09/2017], 2012.
- Bedolla-Torres, Martha H.; Palacios-Espinosa, A.; Palacios, O. A.; Choix, F. J.; Ascencio-Valle, F de J.; López-Aguilar, D. R. *et al.* La irrigación con levaduras incrementa el contenido nutricional del forraje verde hidropónico de maíz. *Rev. Argent. Microbiol.* 47 (3):236-244, 2015.
- Bertsch, Floria. *Absorción de nutrimentos por los cultivos*. San José, Costa Rica: Asociación Costarricense de la Ciencia del Suelo, 2009.
- Candia, Liz. Evaluación de la calidad nutritiva de forraje verde de cebada *Hordeum vulgare* hidropónico, fertilizado con soluciones de guano de cuy *Cavia porcellus* a dos concentraciones. *Salud tecnol. vet.* 2 (1):55-62, 2014.
- CINA. *Laboratorio de Bromatología de Forrajes de la Universidad de Costa Rica*. San José, Costa Rica: Centro de Investigación en Nutrición Animal. <http://www.cina.ucr.ac.cr/index.php/2015-10-28-20-54-43/laboratorio-de-bromatologia>. [02/09/2017], 2015.
- Contreras, J. L.; Tunque, M. & Cordero, A. G. Rendimiento hidropónico de la arveja con cebada y trigo en la producción de germinados. *Rev. investig. vet. Perú*. 26 (1):9-19, 2015.
- Cuesta, T. & Machado, R. Producción y evaluación de la calidad nutricional del forraje verde hidropónico a base de maíz (*Zea mays*) como alternativa para la alimentación de pollos de engorde en la Estación Ambiental Tutunendo, Chocó, Colombia. *Bioetnia*. 6 (2):127-134, 2009.
- Di Marco, O. Estimación de la calidad de los forrajes. *Producir XXI*. 20 (240):24-30, 2011.
- Di Rienzo, J. A.; Casanoves, F.; Balzarini, Mónica G.; González, Laura; Tablada, Margot & Robledo, C. W. *InfoStat versión 2017*. Córdoba, Argentina: Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba. <http://www.infostat.com.ar/>. [13/01/2015], 2017.
- Gómez-Burneo, J. M. *Evaluación de la producción y la composición nutricional de tres tipos diferentes de forraje hidropónico*. Zamorano, Honduras: Universidad Zamorano, 2008.
- Gonzales-Díaz, J. F. & García-Reyes, M. A. *Evaluación de tres tipos de fertilizantes en la producción de forraje verde hidropónico de sorgo (Sorghum bicolor L.) en invernadero no convencional, La Trinidad, Estelí*. Tesis presentada como requisito parcial para optar al título Ingeniero Zootecnista. Managua: Universidad Nacional Agraria, 2015.
- Hochholdinger, F.; Yu, P. & Marcon, C. Genetic control of root system development in maize. *Trends Plant Sci.* 23 (1):79-88, 2018.
- INTA-AECI. *Proyecto de granos básicos: variedad de maíz "Diamantes 8843"*. San José, Costa Rica: Instituto Nacional de Innovación y Transferencia en Tecnología Agropecuaria, Agencia Española de Cooperación Internacional, 2005.
- López-Aguilar, R.; Murillo-Amador, B. & Rodríguez-Quezada, G. El forraje verde hidropónico: una alternativa de producción de alimento para el ganado en zonas áridas. *Interciencia*. 34 (2):121-126, 2009.
- López, P. P. & Mcfield, G. S. *Efectos de tres tipos de fertilizantes en la producción de forraje verde hidropónico de maíz (Zea mays) variedad NB6, en un invernadero no tradicional*. Tesis presentada para el grado de Ingeniero en Zootecnia. Managua: Universidad Nacional Agraria, 2013.
- Maldonado, R.; Álvarez, M.; Cristóbal, D. & Ríos, E. Nutrición mineral de forraje verde hidropónico. *Revista Chapingo. Serie Horticultura*. 19 (2):211-223, 2013.
- Marzec, M.; Melzer, M. & Szarejko, Iwona. Root hair development in the grasses: what we already know and what we still need to know. *Plant Physiol.* 168 (2):407-414, 2015.
- Naik, P. K.; Swain, B. K.; Chakurkar, E. B. & Singh, N. P. Effect of seed rate on yield and proximate constituents of different parts of hydroponics maize fodder. *Ind. J. Anim. Sci.* 87 (1):109-112, 2017.
- Naik, P. K.; Swain, B. K. & Singh, N. P. Production and utilization of hydroponics fodder. *Ind. J. Anim. Nut.* 32 (1):1-9, 2015.
- Quispe-Cusi, A.; Paquiyaury, Z.; Ramos, Y. V.; Contreras, J. L. & Véliz, M. A. Influencia de niveles de azufre en la producción, composición química bromatológica y digestibilidad del forraje verde hidropónico de cebada (*Hordeum vulgare* L.). *Rev. investig. vet. Perú*. 27 (1):31-38, 2016.
- Ramírez-Viquez, Carolina A. *Efecto de la nutrición sobre la calidad del forraje verde hidropónico en la zona de Alajuela, Costa Rica*. Tesis para optar al título profesional de Ingeniero Agrónomo con el grado de Licenciado en Agronomía. San José, Costa Rica: Escuela de Agronomía, Universidad de Costa Rica, 2016.

- Rivera, A.; Moronta, María; González-Estopiñan, M.; González, Diomary; Perdomo, D.; García, D. *et al.* Producción de forraje verde hidropónico de maíz (*Zea mays* L.) en condiciones de iluminación deficiente. *Zootecnia Trop.* 28 (1):33-41, 2010.
- Salas-Pérez, Lilia; Esparza-Rivera, J. R.; Preciado-Rangel, P.; Álvarez-Reina, V. de P.; A., Meza-Velázquez, J.; Velázquez-Martínez, J. R. *et al.* Rendimiento, calidad nutricional, contenido fenólico y capacidad antioxidante de forraje verde hidropónico de maíz (*Zea mays*) producido en invernadero bajo fertilización orgánica. *Inter-ciencia.* 37 (3):215-220, 2012.
- Sánchez, J. M. & Soto, H. Estimación de la calidad nutricional de los forrajes del cantón de San Carlos. II. Componentes de la pared celular. *Nutrición Animal Tropical.* 4:3-23, 1998.
- Taiz, L. & Zeiger, E. *Plant physiology.* Sunderland, USA: Sinauer Associates Inc., 2006.
- Vargas-Rodríguez, C. F. Comparación productiva de forraje verde hidropónico de maíz, arroz y sorgo negro forrajero. *Agron. Mesoam.* 19 (2):233-240, 2008.
- Van Soest, P. J. *Nutritional ecology of the ruminant.* Ithaca, USA: Cornell University Press, 1994.

Recibido el 12 de junio del 2017

Aceptado el 5 de junio del 2018