Agronomía Mesoamericana

UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

Nota técnica
Volumen 32(1):293-305. Enero-abril, 2021
e-ISSN 2215-3608, doi:10.15517/am.v32i1.39712

Índice SPAD, nitratos y rendimiento en sorgo en respuesta al suministro de nitrógeno[1]

SPAD index, nitrates, and sorghum yield in response to nitrogen supply

Rubén Macías-Duarte[2], Raúl Leonel Grijalva-Contreras[2], Fabián Robles-Contreras[2], Fidel Núñez-Ramírez[3], Víctor Alberto Cárdenas-Salazar[3], Cándido Mendóza-Pérez[4]

[1] Recepción: 26 de noviembre, 2019. Aceptación: 2 de julio, 2020. Este trabajo formó parte una investigación parcialmente financiada por el convenio MASAGRO-ICA UABC, 2010-2015; así como por el Cuerpo Académico de Agua y Suelo del Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Baja California, México.

[2] Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias. Campo Experimental Costa de Hermosillo, Sitio Experimental Caborca. C.P. 83600, H. Caborca, Sonora, México. macias.ruben@inifap.gob.mx (https://orcid.org/0000-0002-6540-7464/); grijalva.raul@inifap.gob.mx (https://orcid.org/0000-0003-4274-5855); robles.fabian@inifap.gob.mx (https://orcid.org/0000-0003-3237-1343).

[3] Instituto de Ciencias Agrícolas, Universidad Autónoma de Baja California (ICA-UABC), carretera a Delta s/n Ejido Nuevo León, 21705, Mexicali, Baja California, México. victorcardenas@uabc.edu.mx (https://orcid.org/0000-0001-9690-3615); fidel.nunez@uabc.edu.mx; (autor para la correspondencia; https://orcid.org/0000-0002-5405-3875).

[4] Colegio de Posgraduados. Carretera México-Texcoco, km 36.5, Montecillo, Estado de México, México. C.P. 56230. mendoza.candido@colpos.mx (https://orcid.org/0000-0003-4358-036X).

Resumen

Introducción. El nitrógeno (N) es el macronutriente que más afecta el rendimiento de los cultivos; sin embargo, su utilización por los cultivos se asocia a una baja eficiencia de recuperación; por esta razón es necesario analizar su absorción en el tejido vegetal durante el ciclo para obtener el beneficio deseado. **Objetivo.** Conocer el efecto de la fertilización nitrogenada en el crecimiento, concentración de nitratos en la base del tallo (NBT), índice SPAD (medición de clorofila) y el rendimiento en grano de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench). **Materiales y métodos.** El estudio se realizó en el Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Baja California, México, durante el verano de 2012 y la primavera de 2013. Se evaluaron dosis crecientes de nitrógeno (N) (0, 64, 128, 192, 256 y 320 kg ha^{-1}), bajo un diseño experimental completamente al azar. En el Experimento 1 (Verano 2012), se evaluaron las seis dosis de N en un suelo bajo labranza de conservación (LC). En el experimento 2 (Primavera 2013), se evaluaron las mismas dosis de N y además se incluyó un tratamiento de 128 kg N ha^{-1} utilizando sistema de labranza mínima (LM). Resultados. En el Experimento 1, se obtuvo mayor cantidad de peso seco del grano (PSg), planta completa (PSt), índice de cosecha (IC) y rendimiento de grano, que en el Experimento 2. El mayor PSg, PSt, IC, área foliar (AF) y rendimiento de grano se obtuvo con la dosis de 192 kg de N ha^{-1}. El índice SPAD y la concentración de NBT presentaron correlación con el rendimiento. Los valores R^2 en el índice SPAD fueron mayores que en NBT. **Conclusiones.** Los NBT y el índice SPAD resultaron significativamente asociadas al rendimiento. La mejor época de producción del cultivo de sorgo fue en verano con una dosis de192 kg de N ha^{-1}.

Palabras clave: *Sorghum bicolor*, extracto celular, análisis rápido, diagnóstico, nutrición vegetal.

Agronomía Mesoamericana es desarrollada en la Universidad de Costa Rica bajo una licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-SinDerivar 4.0 Internacional. Para más información escriba a pccmca@ucr.ac.cr o pccmca@gmail.com

Abstract

Introduction. Nitrogen (N) is the macronutrient that most affects crop yield, however, the utilization by crops is associated with a low recovery efficiency; for this reason, it is necessary to analyze its absorption into the plant tissue during the cycle to obtain the desired benefit. **Objective.** To know the effect of nitrogen fertilization on growth, nitrate concentration at the base of the stem (NBT), SPAD index (chlorophyll), and yield of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) grain. **Materials and methods.** The study was conducted at the Instituto de Ciencias Agrícolas of the Universidad Autónoma de Baja California, Mexico, during the summer 2012, and spring 2013. Increasing doses of nitrogen (N) (0, 64, 128, 192, 256, and 320 kg ha^{-1}) were evaluated using a randomized experimental design. On Experiment 1 (Summer 2012), six nitrogen rates were evaluated in a soil under conservation tillage (LC). On Experiment 2 (Spring 2013) the same doses of nitrogen were evaluated and a treatment of 128 kg ha^{-1} was also included using the minimum tillage system (LM). **Results.** On Experiment 1, a greater amount of grain dry weight (PSg), complete plant (PSt), harvest index (IC), and grain yield was obtained than in Experiment 2. Major PSg, PSt, IC, foliar area (AF), and yield grain was obtained with the dose of 192 kg de N ha^{-1}. The SPAD index, and the nitrate concentration on NBT were correlated with yield. Values of R^2 on the SPAD index were higher than those found on NBT. **Conclusions.** The NBT and SPAD index were significantly associated with yield. The best season for sorghum grain production was summer with 192 kg N ha^{-1}.

Keywords: *Sorghum bicolor*, cellular extract, quick test, diagnostic, plant nutrition.

Introducción

Dentro de los principales cultivos establecidos en el valle de Mexicali, al noroeste de México, sobresale la alfalfa, el trigo y el algodón con promedios de superficie de cosecha de 27 500, 82 200 y 32 200 hectáreas y rendimientos de 12,0, 6,0 y 4,7 t ha^{-1} de cada cultivo, respectivamente (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2012). El sorgo para grano es un cultivo establecido en una superficie de alrededor de 1600 ha (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2012); este representa una alternativa económica de cultivo, debido a su alta adaptabilidad a suelos salinos.

Investigaciones realizadas en sorgo revelan que 70 a 80 % de la germinación puede ser alcanzada a valores de salinidad cercanos a 6,0 dS m^{-1}, mientras que un óptimo desarrollo vegetativo y reproductivo puede ser obtenido a valores de 5,0 dS m^{-1} (Rekha et al., 2012). Algunos investigadores han indicado que el rendimiento del cultivo se encuentra asociado más a la partición de componentes dentro de la planta (hojas, tallo, panoja, grano) que a la salinidad del suelo (Sun et al., 2014).

La agricultura de conservación ha sido introducida en cultivos extensivos de maíz y trigo desde principios de 1980, y estudios de largo plazo han demostrado que utilizar esta tecnología de producción beneficia la calidad de suelos y aumenta el rendimiento de los cultivos (Aziz et al., 2013). Los residuos de cosecha retenidos o depositados sobre la superficie del suelo, así como la nula o mínima labranza del mismo incrementan la materia orgánica y reducen los requerimientos de labor y el costo energético empleado en la preparación del suelo (Parihar et al., 2018).

El manejo de la fertilización con nitrógeno en sorgo cultivado en el valle de Mexicali incluye la aplicación de 40 kg N por cada tonelada de grano producido (Loza, 2015). Con base a un promedio de 4,5 toneladas por hectárea de grano (Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2012), se sugiere la aplicación de 180 kg N ha^{-1}. Este tipo de recomendaciones se han generado en base a la meta de rendimiento y la cantidad de nutriente removido por el cultivo. Sin embargo, es posible reducir o ajustar la dosis de N al monitorear la nutrición del cultivo a través del índice SPAD (Akwasi et al., 2016) o del análisis de nitratos en la base del tallo (NBT) (Heckman et al., 2002).

Agron. Mesoam. 32(1):293-305, enero-abril, 2021
ISSN 2215-3608 doi:10.15517/am.v32i1.39712

Ambos métodos pueden llevarse a cabo en campo, son relativamente fáciles de realizar, además de que proveen un diagnóstico real del estado nutricional del nitrógeno en el cultivo (Uchino et al., 2013; Wilhelm et al., 2000).

Recientemente, en México los programas federales de producción en el campo, promueven los sistemas de producción de agricultura de conservación como un método sustentable, el cual reduce los costos de inversión e incrementa el retorno económico por insumo aplicado (Modernización Sustentable de la Agricultura Tradicional, 2014). En el valle de Mexicali el sistema de agricultura de conservación ha sido recientemente introducido e información acerca del manejo de la fertilización con nitrógeno en el cultivo de sorgo no existe. El objetivo de este trabajo fue conocer el efecto de la fertilización nitrogenada sobre el crecimiento, la concentración de nitratos en la base del tallo (NBT), índice SPAD y el rendimiento en grano de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench).

Materiales y métodos

Se realizaron dos experimentos en parcelas contiguas dentro del campo experimental del Instituto de Ciencias Agrícolas de la Universidad Autónoma de Baja California, en el valle de Mexicali, Baja California (Exp. 1: 32°24'09" LN, 115°11'45" LO; Exp.2: 32°24'10" LN, 115°11'47" LO). El tipo de suelo es vertisol, con textura arcillosa de color café con tonalidades grisáceas. El valle de Mexicali tiene una precipitación anual promedio de 132 mm, durante noviembre a marzo y temperaturas promedio anual de 31,2 °C, 50 °C las máximas y 14,9 °C las mínimas (Ruiz-Corral et al., 2006).

Se tomaron muestras compuestas de suelo del perfil de los primeros 30 cm de profundidad (considerando el mayor desarrollo radicular del cultivo) y se identificó su calidad física y química. En ambos experimentos, la calidad del suelo fue similar (textura arcillosa, densidad aparente de 1,17 g cm^{-3}, salinidad alta [4,80-4,48 dS m^{-1}], pH alcalino [7,85-8,01] y un promedio de 8,5, 32, 390, 5246, 1285, 675 ppm de nitrógeno inorgánico, fósforo-Olsen, potasio, calcio, magnesio y sodio, respectivamente). El agua utilizada para riego provenía del Río Colorado y contenía un pH de 8,08, una conductividad eléctrica de 1,34 dS m^{-1} y 1,4, 112,0, 62,4, 174,5, 170,8, 248,5, 412,8 mg l^{-1} de nitrógeno de los nitratos, calcio, magnesio, sodio, bicarbonatos, cloruros y sulfatos, respectivamente. En ambos experimentos, el suelo había sido cultivado con trigo bajo labranza de conservación durante los últimos tres años, manejado de manera convencional con fertilización nitrogenada de 212 kg ha^{-1}.

El primer experimento se llevó a cabo durante ciclo el verano-otoño del año 2012 (Experimento 1), mientras que el segundo fue durante la primavera-verano del año 2013 (Experimento 2). En el Experimento 1 se evaluaron seis dosis de nitrógeno bajo el sistema de labranza de conservación (LC), mientras que en el Experimento 2 se utilizaron las mismas seis dosis de nitrógeno, además de un tratamiento de 128 kg N ha^{-1}, en sorgo cultivado bajo agricultura de labranza mínima (LM; Cuadro 1). El diseño experimental utilizado en ambos experimentos fue completamente al azar con cuatro repeticiones. En el Experimento 2, el tratamiento de LM, recibió doble paso de rastra y reformación de camas.

Se utilizó semilla de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench), de la variedad Pioneer 82G63, a una densidad de población de 14 kg de semilla por hectárea, sembrada en camas a 80 cm de separación. La parcela útil del Experimento 1, consistió de cuatro camas de 10 m de longitud orientados de este a oeste. La fecha de siembra fue el 16 de agosto del 2012. Se utilizó urea (46-00-00) como fuente fertilizante y cada tratamiento se aplicó fraccionado en tres partes durante el crecimiento del cultivo (Cuadro 1). En el Experimento 2, la fecha de siembra fue el 23 de marzo del año 2013. La parcela útil estuvo conformada por tres camas de 12 m de longitud orientadas de norte a sur y se utilizó la variedad Asgrow AZ400. Se utilizó urea como fuente de fertilizante nitrogenado. En evaluaciones previas, realizadas por Montes et al. (2014) y Williams-Alanís & Arco-Cavazos (2015), ambas variedades de sorgo, utilizadas en este estudio, han mostrado un comportamiento de crecimiento y desarrollo similar.

Durante el desarrollo del Experimento 1, se escogieron diez plantas representativas de los tratamientos 0, 128 y 320 kg N ha^{-1}, cada semana se les midió el crecimiento expresado como altura, número de hojas y diámetro de

ISSN 2215-3608 doi:10.15517/am.v32i1.39712

Cuadro 1. Calendario de aplicación y dosis de fertilizante nitrogenado en el cultivo de sorgo grano (*Sorghum bicolor* L. Moench), durante el verano de 2012 y la primavera de 2013, en el valle de Mexicali, Baja California, México.

Table 1. Rates and nitrogen scheduling in sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) grain crop, during the summer of 2012 and the spring of 2013, in the Mexicali Valley, Baja California, Mexico.

			Tratamientos de nitrógeno						
Año	**DDS†**	**UCA $_{acum}$ ‡**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7 β**
			---------- kg N ha^{-1} ----------						
2012	0	0	0	18	38	57	77	96	-
	20	431	0	18	38	57	77	96	-
	39	803	0	24	52	78	102	128	-
	Total		0	64	128	192	256	320	-
2013	0	0	0	32	64	96	128	160	64
	40	423	0	15	31	46	61	77	30
	71	884	0	17	33	50	67	83	33
	Total		0	64	128	192	256	320	128

DDS†: días después de la siembra, UCA $_{acum}$ ‡: unidades calor acumuladas ([temperatura máxima + temperatura mínima]/2 - 11), según Hammer et al., 1993, 7β: Experimento 2013: se aplicaron 128 kg N ha^{-1} en suelo con sistema de agricultura de labranza mínima la cual consistió en realizar dos pasos rastra a profundidad de 25 cm y reformación de cama de siembra.
DDS†: days after seeding, UCA$_{acum}$‡: heat units accumulated [(maximum temperature + minimum temperature)/2 - 11], according Hammer et al., 1993, 7β: Experiment 2013: 128 kg N ha^{-1} were applied in soil with a minimum tillage agriculture system, which consisted of carrying out two steps harrowing at a depth of 25 cm and reforming the seedbed.

la base del tallo. Lo mismo sucedió en el Experimento 2, aunque adicionalmente se incluyó el tratamiento de 128 kg N ha^{-1} LM.

Las mediciones de la clorofila (índice SPAD) y determinación de concentración de nitratos en la base del tallo (NBT) se tomaron a los 35, 58 y 83 días después de la siembra (DDS) en el Experimento 1, y a los 80 y 127 DDS en el Experimento 2. El índice SPAD (índice de clorofila) se identificó en la hoja más recientemente madura de tres plantas por tratamiento con el medidor Minolta SPAD-502 (Spectrum Technology, East Plainfield, IL, U.S.A.). La determinación de nitratos se realizó siguiendo el protocolo empleado en maíz (*Zea mays*) por Heckman et al. (2002), el cual consiste en extraer el líquido citoplasmático en los primeros 10 cm de la base del tallo de las plantas y medir la concentración de nitratos. Para esta medición se utilizó el medidor de iones Cardy Horiba (Inc. Japan) (Santillano-Cázarez et al., 2019).

Al final del estudio, se cosecharon cinco plantas completas de cada unidad experimental y se determinó el área foliar (AF), el peso seco del follaje (PS_f), del grano (PS_g) y de la planta completa (PS_t), así como el índice de cosecha (IC). Para obtener el AF se utilizó el medidor de área foliar Licor-3100C, mientras que el peso seco de las muestras se obtuvo sometiendo las plantas a secado en estufa a aire forzado a 60 °C por tres días. El rendimiento se obtuvo de los surcos centrales de cada parcela experimental y se expresó como grano en kg ha^{-1}.

Los resultados obtenidos de las variables índice SPAD y NBT, se correlacionaron con el rendimiento de grano del cultivo. Se realizó comparación estadística de las variables entre años. Las variables de AF, PS_f, PS_g, PS_t, IC y rendimiento total se sometieron a análisis de varianza. Las variables de los tratamientos 128 kg N ha^{-1} LM y LC se compararon por separado a través de la prueba T Student. En todos los casos, cuando las medias resultaron diferentes, se realizó prueba de Tukey ($p \leq 0,05$). La comparación de medias y el análisis de varianza se realizó con el paquete estadístico MINITAB®14.

Agron. Mesoam. 32(1):293-305, enero-abril, 2021
ISSN 2215-3608 doi:10.15517/am.v32i1.39712

Resultados

Clima

Las condiciones de temperatura días después de la siembre (DDS), unidades de calor por mes (UCA $_{mes}$) y unidades de calor acumuladas (UCA $_{acum}$), ocurridas durante los periodos de los experimentos 1 y 2, se presentan en el Cuadro 2. Las temperaturas ocurridas durante el Experimento 1, fueron en orden decreciente, iniciaron con mínimas de 25,8 °C y finalizaron con 7,1 °C. Mientras que las temperaturas máximas fueron de 38,8 °C a 23,4 °C. Lo mismo sucedió con las temperaturas promedio, iniciando con 32,3 °C y finalizando con 15,2 °C. Durante el Experimento 1, la cosecha se realizó a los 123 DDS y se acumularon un total de 1601 UCA $_{acum}$ (Cuadro 2).

Cuadro 2. Condiciones de temperatura y unidades calor ocurridas en el valle de Mexicali durante el verano de 2012 y la primavera de 2013, Baja California, México.

Table 2. Temperature conditions and degree days that occurred during the summer of 2012 and the spring of 2013, in the Mexicali Valley, Baja California, Mexico.

Año	Mes	T $_{min}$ †	T $_{max}$	T $_{prom}$	DDS	UCA $_{mes}$	UCA $_{acum}$
2012							
	Agosto‡	25,8	38,8	32,3	15	341	341
	Septiembre	22,6	38,3	30,4	45	584	926
	Octubre	14,7	33,4	24,1	76	406	1333
	Noviembre	8,5	26,7	17,6	106	200	1533
	Diciembre	7,1	23,4	15,2	123	68	1601
2013							
	Marzo	11,3	30,5	20,9	8	69	69
	Abril	11,5	31,2	21,4	38	312	381
	Mayo	11,5	35,2	25,4	69	447	829
	Junio	19,7	39,7	29,7	99	562	1391
	Julio	25,6	40,3	32,9	130	681	2073
	Agosto	23,7	39,4	31,6	161	638	2711
	Septiembre	22,9	38,6	30,8	178	356	3077

†: T $_{min}$, T $_{max}$, T $_{prom}$, DDS, UCA $_{mes}$, y UCA $_{acum}$, significan temperatura mínima, temperatura máxima, temperatura promedio, días después de la siembra, unidades calor por mes y unidades calor acumuladas, respectivamente. ‡: Los meses de agosto y diciembre de 2012, y marzo y septiembre de 2013, se consideraron solo los días de cultivo.

†: T $_{min}$, T $_{max}$, T $_{prom}$, DDS, UCA $_{mes}$, y UCA $_{acum}$: minimum temperature, maximum temperature, average temperature, days after seeding, and accumulated heat units, respectively. ‡: In August and December 2012, and March and September 2013, only the days with crops were considered.

En el Experimento 2 el comportamiento de la temperatura fue de orden creciente, iniciando con mínimas de 11,3 °C y finalizando con 23,7 °C. Las máximas fueron de 30,5 °C a 38,6°C, mientras que las temperaturas promedio fueron de 20,9 °C a 30,8 °C. En el Experimento 2 la cosecha se realizó a los 178 DDS y se acumularon 3077 UCA $_{acum}$.

Crecimiento y desarrollo

Las plantas de sorgo de los tratamientos evaluados durante el Experimento 1 (0, 128 y 320 kg N ha^{-1}), presentaron la misma altura y número de hojas durante los primeros 28 DDS (Figura 1). Después de los 35 DDS, las plantas fertilizadas con nitrógeno superaron en altura y diámetro del tallo a las plantas no fertilizadas. En la

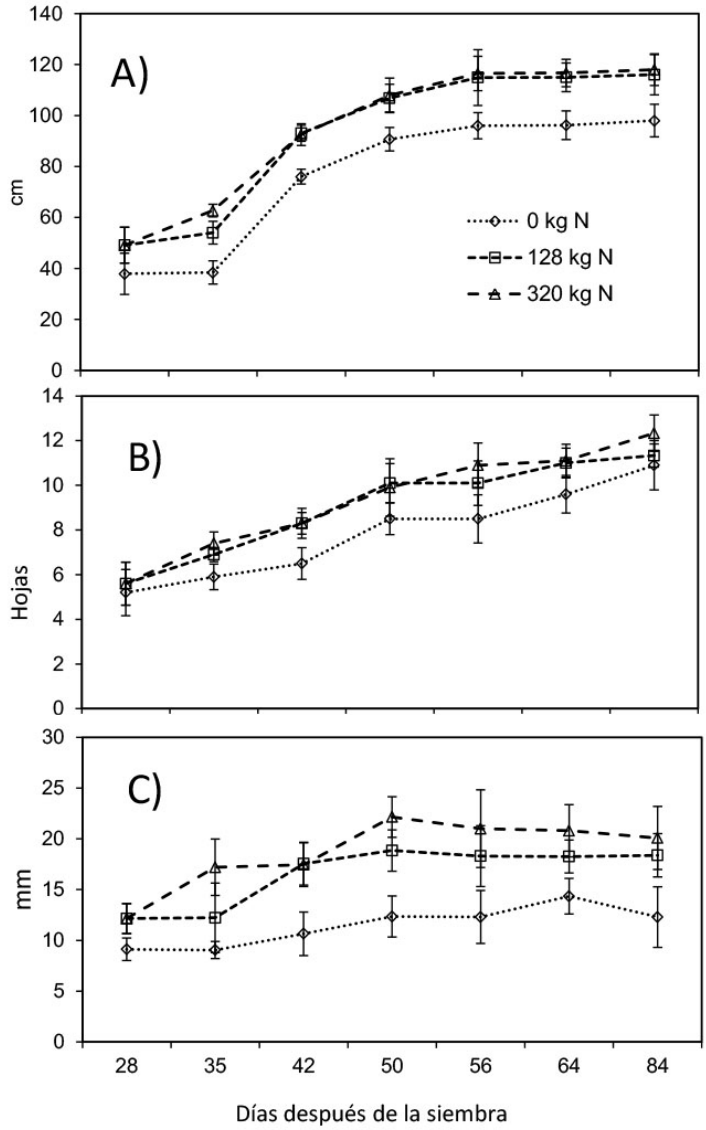

Figura 1. Crecimiento del cultivo de sorgo grano (*Sorghum bicolor* L. Moench) variedad Pioneer 82G63, en función del nitrógeno aplicado; A) altura, B) número de hojas y C) diámetro del tallo, durante el verano de 2012, en el valle de Mexicali, Baja California, México.

Figure 1. Growth of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) grain crop Pioneer 82G63 variety depending on the nitrogen applied; A) height, B) leaves number, and C) stem diameter, during the summer of 2012, in the Mexicali Valley, Baja California, Mexico.

Agron. Mesoam. 32(1):293-305, enero-abril, 2021
ISSN 2215-3608 doi:10.15517/am.v32i1.39712

mayoría de las ocasiones el número de hojas, no resultó afectado por la fertilización nitrogenada (p>0,05; Figura 1 B). Al final del estudio, las plantas fertilizadas con nitrógeno alcanzaron una altura de 118 cm mientras que las no fertilizadas solo los 98 cm; Las plantas fertilizadas alcanzaron un diámetro de tallo de 19,8 mm, mientras que las no fertilizadas solo 10,2 mm; el número de hojas en todos los tratamientos fue de 11,2.

El crecimiento del cultivo de sorgo en función del nitrógeno aplicado durante la primavera de 2013 (Experimento 2), mostró que durante los primeros 39 DDS, ninguna de las variables medidas (diámetro del tallo, número de hojas y altura) presentaron diferencia entre los tratamientos evaluados (0, 128, 320 y 128LM kg N ha^{-1}) (Figura 2). Fue a los 46 DDS que la altura del tratamiento sin fertilizante nitrogenado, resultó con los valores más bajos que el resto de los tratamientos evaluados, esta diferencia se mantuvo hasta el final del estudio. A los 67 DDS, que el tratamiento

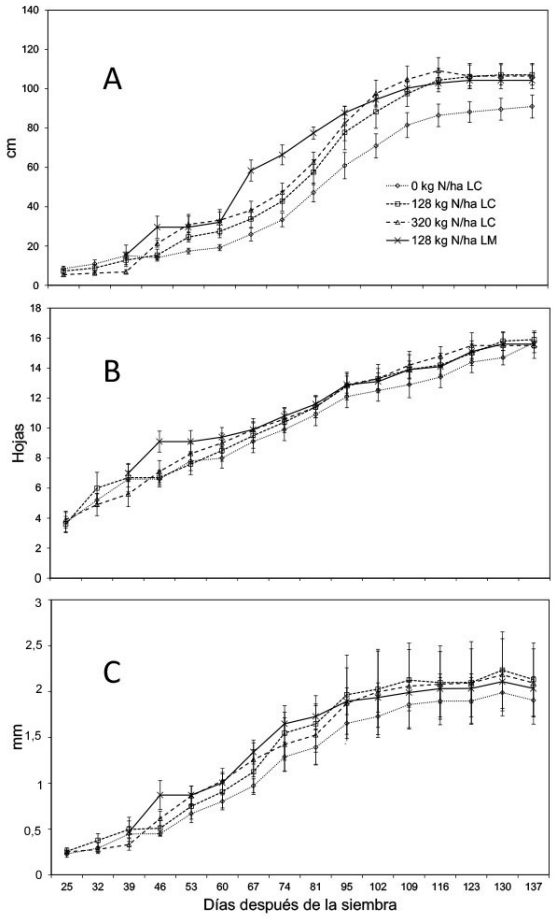

Figura 2. Crecimiento del cultivo de sorgo de grano (*Sorghum bicolor* L. Moench) variedad Asgrow AZ400 en función del nitrógeno aplicado; A) altura, B) número de hojas y C) diámetro del tallo durante la primavera de 2013, en el valle de Mexicali, Baja California, México.

LC: labranza de conservación; LM: labranza mínima.

Figure 2. Growth of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) grain crop Asgrow AZ400 variety depending on the nitrogen applied; A) height, B) leaves number and C) stem diameter, during the spring of 2013, in the Mexicali Valley, Baja California, Mexico.

LC: conservation tillage; LM: minimum tillage.

ISSN 2215-3608 doi:10.15517/am.v32i1.39712

128 LM kg N ha^{-1}, se obtuvo un incremento en la altura en comparación con los tratamientos manejados bajo LC. Sin embargo, a los 95 DDS, los tratamientos con 128 y 320 kg N LC igualaron en altura al tratamiento 128 kg N ha^{-1} LM.

Durante la mayoría de las mediciones realizadas, el número de hojas no resultó afectado por ninguna de las dosis de nitrógeno aplicado ni por el sistema de labranza LM y LC. No obstante, el diámetro de tallo mostró valores muy variados entre las plantas, lo que repercutió en una desviación estándar amplia y, por lo tanto, resultó en igualdad entre los tratamientos evaluados. Al final del estudio las plantas de los cuatro tratamientos alcanzaron en promedio un diámetro de tallo de 21,0 mm.

Rendimiento

El Cuadro 3, muestra el análisis de varianza para las dosis de nitrógeno, la comparación entre los dos tipos de labranza, así como la interacción entre las estaciones del año. Se observa que durante el Experimento 1, el nitrógeno tuvo efecto significativo en el PS_g, PS_t, IC y el rendimiento de grano ($p \leq 0,05$). El mayor PS_g, PS_t, IC y rendimiento de grano se obtuvo con la dosis de 192 kg N ha^{-1} (Cuadro 4). En cambio, el AF alcanzó su mayor valor a la dosis de 256 kg N ha^{-1}. Por otro lado, el PS_f no resultó afectado por ninguna de las dosis evaluadas ($p > 0,05$).

Cuadro 3. Análisis de varianza para PS_g, PS_f, PS_t, IC, AF y rendimiento de grano de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench), en función del nitrógeno aplicado y sistema de labranza en el cultivo de sorgo de grano, en el valle de Mexicali, Baja California, México. 2012-2013.

Table 3. Analysis of variance for PS_g, PS_f, PS_t, IC, AF, and grain yield of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench), as a function of applied nitrogen and tillage system in the grain sorghum crop, in the Mexicali Valley, Baja California, Mexico. 2012-2013.

Fuente de variación	PS_g †	PS_f	PS_t	IC	AF (cm²)	Rendimiento (kg ha^{-1})
Dosis de N, Experimento 1: (verano 2012)	**	NS	*	***	***	***
Dosis de N, Experimento 2: (primavera 2013)	*	NS	*	*	-	*
Interacción 2012 X 2013	***	NS	*	**	-	***
β128 LC vs 128 LM kg de N ha^{-1}	NS	NS	NS	NS	-	NS

†: PS_g, PS_f, PS_t, IC, AF: peso seco del grano, peso seco del follaje, peso seco de la planta completa, índice de cosecha y área foliar. β: LC, LM: labranza de conservación y labranza mínima. Esta última consistió en dos pasos de rastra y reformación de camas. * Significante a $p \leq 0,05$; ** Significante a $p \leq 0,01$; *** Significante a $P \leq 0.001$; NS, no significante / †: PS_g, PS_f, PS_t, IC, AF: Grain dry weight, foliage dry weight, complete plant dry weight, harvest index, and foliar area. β: LC: conservation tillage; LM: minimum tillage. The latter consisted of two steps of harrowing and reforming the beds. * Significant at $p \leq 0.05$; ** Significant at $p \leq 0.01$; *** Significant at $p \leq 0.001$; NS, not significant.

Durante el Experimento 2, el PS_g y PS_t, obtuvieron los mayores valores a dosis de 256 kg N ha^{-1}, mientras que el rendimiento de grano se incrementó conforme la dosis de nitrógeno aumentó, alcanzando valores de 1960 kg de grano ha^{-1} (320 kg N ha^{-1}). El PS_f y el IC, no mostraron respuesta a la aplicación de nitrógeno. Al comparar Experimento 1 (verano 2012) versus Experimento 2 (primavera 2013), se identificó un mayor PS_g, PS_t, IC y rendimiento en las plantas cultivadas durante el verano. Para el caso de la variable PS_f no se encontró diferencia estadística entre años ($p > 0,05$). Sin embargo, al comparar los dos sistemas de labranza 128 LC versus 128 LM kg de N ha^{-1}, no se encontró respuesta significativa en ninguna de las variables evaluadas ($p > 0,05$).

Agron. Mesoam. 32(1):293-305, enero-abril, 2021
ISSN 2215-3608 doi:10.15517/am.v32i1.39712

Cuadro 4. Comparación de medias para PS_g, PS_f, PS_t, IC, AF y rendimiento de grano de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench), en función del nitrógeno y sistema de labranza en el cultivo de sorgo de grano, en el valle de Mexicali, Baja California, México. 2012-2013.
Table 4. Means comparisons for PS_g, PS_f, PS_t, IC, AF, and grain yield of sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench), as a function of nitrogen and tillage system in the grain sorghum crop, in the Mexicali valley, Baja California, Mexico. 2012-2013.

	kg N ha^{-1}	PS_g †	PS_f	PS_t	ÍC	AF (cm^2)	Rendimiento (kg ha^{-1})
2012	0	333,2 a‡	326,7	659,9 a	0,49 a	2452 a	3440 a
	64	301,2 a	323,8	625,0 a	0,48 a	2850 a	4950 a
	128	427,6 b	327,3	754,9 b	0,56 ab	5155 b	6260 b
	192	607,4 c	402,5	1009,9 c	0,60 b	5087 b	7760 c
	256	408,8 b	296,1	704,9 ab	0,57 ab	5514 c	6660 bc
	320	407,3 b	299,5	706,8 b	0,57 ab	5392 bc	6810 bc
	C.V.	28,52	19,59	23,08	8,96	21,59	18,44
2013	0	19,9 a	247,5	267,4 a	0,07	-	62 a
	64	12,0 a	267,0	279,0 a	0,04	-	929 b
	128	22,0 b	341,6	363,6 b	0,06	-	1050 bc
	192	26,4 b	287,7	314,1 ab	0,08	-	1130 cd
	256	39,0 c	420,0	459,0 c	0,08	-	1497 de
	320	33,3 bc	315,6	348,9 bc	0,09	-	1690 e
	C.V.	23,09	17,02	16,78	21,28		19,32
Sistemas de labranza							
	128 LC β	22,0	341,6	363,6	6,0	-	1050
	128 LM	20,9	346,1	367,0	5,6	-	1450

†: PS_g, PS_f, PS_t, IC, AF: gramos de peso seco del grano, peso seco del follaje, peso seco de la planta completa, índice de cosecha y área foliar. ‡: Medias con letras diferentes dentro de la misma columna denotan diferencia entre los tratamientos (Tukey, p≤0,05). β: LC, LM: labranza de conservación y labranza mínima año 2013. Esta última consistió en dos pasos de rastra y reformación de camas / †: PS_g, PS_f, PS_t, IC, AF: grain dry weight, foliage dry weight, complete plant dry weight, harvest index, and foliar área. ‡: Means with different letters within the same column denote difference between treatments (Tukey, p≤0.05). β: LC: conservation tillage, and LM: minimum tillage, year 2013. The latter consisted of two steps of harrowing and reforming the beds.

Índice SPAD y NBT

La relación encontrada entre la concentración de NBT y el índice SPAD con el rendimiento del cultivo de sorgo se presenta en el Cuadro 5. En ambos experimentos las determinaciones correlacionaron significativamente con el rendimiento (p<0,05). Los coeficientes de determinación (R^2) estuvieron entre 0,23 y 0,85. Los mayores valores se obtuvieron al relacionar la variable de índice SPAD y el rendimiento. Durante el Experimento 1 todas las ecuaciones encontradas resultaron ser de tendencia lineal. Durante el Experimento 2, la relación entre NBT con el rendimiento a los 80 DDS resultó con tendencia cuadrática, mientras que el índice SPAD resulto con tendencia lineal. A los 127 DDS, la relación entre el rendimiento y el índice SPAD presentó una tendencia cuadrática.

ISSN 2215-3608 doi:10.15517/am.v32i1.39712

Cuadro 5. Relación entre la concentración de NBT y el índice SPAD, y el rendimiento del cultivo de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench) (verano 2012 y primavera 2013), en el valle de Mexicali, Baja California, México. 2012-2013.

Table 5. Relationship between the NBT concentration and the SPAD index and the yield of the grain sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) (summer 2012 and spring 2013), in the Mexicali valley, Baja California, México.

		Ecuación	R^2	Probabilidad
Verano 2012				
35 DDS†	Índice SPAD	Rendimiento = -7,17 + 0,313 SPAD	0,47	<0,001
58 DDS	NBT‡	Rendimiento = 5,16 + 0,00182 NBT	0,23	0,050
	Índice SPAD	Rendimiento = -2,85 + 0,203 SPAD	0,52	<0,001
83 DDS	NBT	Rendimiento = 4,15 + 0,00572 NBT	0,27	0,049
	Índice SPAD	Rendimiento = -0,94 + 0,142 SPAD	0,38	<0,001
Primavera 2013				
80 DDS	NBT	Rendimiento = -0,00001 NBT^2 + 0,012 NBT - 0,7302	0,73	0,034
	Índice SPAD	Rendimiento = 0,0952 - 2,2643 SPAD	0,56	0,048
127 DDS	Índice SPAD	Rendimiento = -0,028 $SPAD^2$ + 2,1294 SPAD - 38,942	0,85	0,035

DDS†:días después de la siembra. ‡: NBT: nitratos en la base del tallo / DDS†: days after seeding. ‡: NBT: nitrates on stem base.

Discusión

De acuerdo con los resultados obtenidos, las condiciones ambientales ocurridas durante los dos experimentos afectaron en mayor medida las variables de crecimiento y desarrollo del cultivo que la aplicación de dosis de nitrógeno. La cantidad de tiempo que utilizó la planta para llegar a cosecha marcó la diferencia entre las dos estaciones del año. En el Experimento 1, la cosecha de sorgo se realizó a los 123 DDS, mientras que en el Experimento 2, fue a los 178 días. Lo anterior se debió al retraso en la aparición de las etapas fenológicas del cultivo ocurridas durante el Experimento 2. La cantidad de tiempo necesario para que ocurra cada etapa fenológica en sorgo depende principalmente del genotipo y de las condiciones ambientales que ocurren a lo largo del ciclo vegetativo (Alam et al., 2014).

Durante el Experimento 2, en el mes de mayo las temperaturas máximas se incrementaron a valores por encima de 35 °C, lo que repercutió en un retraso en la excersión de la panoja y en consecuencia incrementó el tiempo a cosecha (Prasad et al., 2008). Algunas investigaciones indicaron que las temperaturas óptimas para el crecimiento y desarrollo vegetativo en sorgo son entre los 25 y 28 °C (Gerik et al., 1993; Razmi et al., 2013). Temperaturas por encima de los 36 °C durante el período reproductivo del sorgo, como las que ocurrieron en el Experimento 2, reducen la producción y viabilidad del polen, así como el rendimiento y el IC (Tari et al., 2013).

Durante el Experimento 1, las plantas fertilizadas con nitrógeno (128 y 320 kg N ha^{-1}) afectaron el desarrollo vegetativo del cultivo al alcanzar una mayor altura y diámetro del tallo que las plantas no fertilizadas (Figura 1). Las plantas fertilizadas alcanzaron una mayor área foliar que las no fertilizadas, aunque la relación grano-follaje entre ellas no se afectó al obtener igual índice de cosecha (Cuadro 4). Una excepción fue el tratamiento 256 kg N ha^{-1}, el cual obtuvo el mayor índice de cosecha que el resto de los tratamientos.

Los factores más importantes en la modificación de la relación entre grano y follaje después del genotipo, son la temperatura y la cantidad de radiación solar recibida por el cultivo. Además, destacan que entre mayor sea el

Agron. Mesoam. 32(1):293-305, enero-abril, 2021
ISSN 2215-3608 doi:10.15517/am.v32i1.39712

tiempo requerido para alcanzar la cosecha, es mayor la tendencia a la reducción del IC (Hammer & Broad, 2003). Lo anterior quedó comprobado, debido a que durante el Experimento 2, las plantas resultaron afectadas al obtener un menor IC, sobre todo por la menor producción de grano cosechado.

Durante los primeros 46 DDS y en el período de los 67-81 DDS, las plantas crecidas bajo el sistema de LM (128 kg N ha^{-1}), reflejaron un mayor número de hojas que las plantas cultivadas bajo LC. Este hecho se explicaría debido a que, durante los primeros días de establecimiento del cultivo, la labranza del suelo incrementa su temperatura y promueve un mayor desarrollo radicular que suelos no trabajados (Varsa et al., 1997; Zwirtes et al., 2017). Sin embargo, al trascurso del tiempo, la aparición de hojas en las plantas resultó igual entre tratamientos y no afectó el rendimiento. Lo sucedido en este estudio son situaciones que regularmente ocurren cuando se utiliza la tecnología de LC en la producción de cultivos.

En ambos experimentos el cultivo respondió favorablemente a la aplicación de nitrógeno. Sin embargo, las condiciones de clima permitieron obtener una mayor respuesta al sorgo cultivado durante el verano. El mayor rendimiento se alcanzó con la dosis de 192 kg N ha^{-1}. La obtención de rendimientos por encima de las 6,0 t ha^{-1} con la aplicación de 128 kg de N ha^{-1}, superó al reportado por Mahama et al. (2014) y al que actualmente se obtiene en sorgo cultivado con labranza tradicional en el valle de Mexicali. En este lugar, el rendimiento está entre los 4,5 y 6,0 t ha^{-1} aplicando dosis de 240 kg N ha^{-1} (Loza, 2015; Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera, 2012).

La acumulación de NBT y el índice SPAD en respuesta a la aplicación de fertilizante nitrogenado ya ha sido documentada en otros cultivos como el de maíz (Forrestal et al., 2012; Schmidt et al., 2009; Varvel et al., 1997). Los datos obtenidos han indicado que dichas técnicas de diagnóstico representan una estrategia útil de monitoreo de la nutrición nitrogenada del cultivo. En este estudio, ambas determinaciones resultaron significativamente asociadas al rendimiento del cultivo de sorgo, lo que sugiere posibilidad de uso en este cultivo (Cuadro 5). Sin embargo, debido al valor mayor del coeficiente de determinación R^2 alcanzado por el índice SPAD, resultaría mucho más confiable la utilización de esta última técnica que la determinación de NBT.

En la siembra de sorgo en la estación de verano se obtuvo el mayor rendimiento y la dosis de nitrógeno a la cual se obtuvo fue de 192 kg N ha^{-1}. Más estudios son necesarios con el fin de identificar rangos o valores de referencia para índice SPAD y NBT, que permitan monitorear la nutrición nitrogenada en el cultivo y poder hacer un mayor uso eficiente de dicho nutriente. Lo anterior pudiera ser válido para este cultivo manejado bajo las condiciones de clima, suelo y agua del valle de Mexicali, lo que aunado a la producción bajo agricultura de conservación permitiría un mayor retorno económico de la inversión realizada por los productores.

Conclusiones

El cultivo de sorgo respondió a la aplicación de nitrógeno en todas las variables evaluadas, excepto en el peso seco del follaje. El mayor rendimiento de grano se obtuvo en la siembra en verano. La dosis de nitrógeno con la cual se obtuvo el mayor rendimiento fue 192 kg N ha^{-1}. Al inicio del experimento, las plantas cultivadas bajo labranza de conservación presentaron menor crecimiento que las manejadas bajo labranza mínima, sin embargo, al final se igualó el crecimiento y no se afectó el rendimiento. El índice SPAD y el análisis de NBT se relacionaron significativamente con el rendimiento.

Agradecimiento

Los autores agradecen infinitamente al grupo de revisores, quienes enriquecieron con sus profesionales, acertadas y éticas observaciones, este trabajo de investigación.

Referencias

Akwasi, A. A., Richard, B. F., Charles, S. W., & Stephen, C. M. (2016). Grain sorghum leaf reflectance and nitrogen status. *African Journal of Agricultural Research*, *11*(10), 825-836. https://doi.org/10.5897/AJAR2015.10495

Alam, M. M., Hammer, G. L., Van-Oosterom, E. J., Cruickshank, A. W., Hunt, C. H., & Jordan, D. R. (2014). A physiological framework to explain genetic and environmental regulation of tillering in sorghum. *New Phytologist*, *203*(1), 155–167. https://doi.org/10.1111/nph.12767

Aziz, I., Mahmood, T., & Islam, K. R. (2013). Effect of long-term no-till and conventional tillage practices on soil quality. *Soil Tillage Research*, *131*, 28–35. https://doi.org/10.1016/j.still.2013.03.002

Forrestal, P. J., Kratochvil, R. J., & Meisinger, J. J. (2012). Late-season corn measurements to assess soil residual nitrate and nitrogen management. *Agronomy Journal*, *104*(1), 148–157. https://doi.org/10.2134/agronj2011.0172

Gerik, T., Bean, B., & Vanderlip, R. (1993). *Sorghum growth and development*. Texas Cooperative Extension. The Texas A&M University System. http://amarillo.tamu.edu/files/2010/11/sorghum_growth_development.pdf

Hammer, G. L., Carberry, P. S. & Muchow, R. C. (1993). Modelling genotypic and environmental control of leaf area dynamic in grain sorghum. I. Whole plant level. *Field Crops Research*, *33*(3), 293–310. https://doi.org/10.1016/0378-4290(93)90087-4

Hammer, G. L., & Broad, I. J. (2003). Genotype and environment effects on dynamics of harvest index during grain filling in sorghum. *Agronomy Journal*, *95*(1), 199–206. https://doi.org/10.2134/agronj2003.1990

Heckman, J. R., Samulis, R., & Nitzsche, P. (2002). Sweet corn crop nitrogen status evaluation by stalk testing. *HortScience*, *37*(5), 783–786. https://doi.org/10.21273/HORTSCI.37.5.783

Loza, V. E. (2015). Sorgo grano. En Secretaria de Agricultura y Recursos Hidráulicos (Ed.), *Agenda Técnica Agrícola Baja California* (2da ed., 97–101). Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. http://acervo.siap.gob.mx/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=6155

Modernización Suatentable de la Agricultura Tradicional. (2014). *Modernización sustentable de la agricultura tradicional*. http://masagro.mx/es/que-es-masagro/descripcion-general

Mahama, G. Y., Prasad, P. V. V., Mengel, D. B., & Tesso, T. T. (2014). Influence of nitrogen on growth and yield of grain sorghum hybrids and inbred lines. *Agronomy Journal*, *106*(5), 1623–1630. https://doi.org/10.2134/agronj14.0092

Montes, G. N., Williams, A. H., Arco, C. G., Vargas, V. E., Pecina, Q. V., & Espinosa, R. M. (2014). RB-Norteño, sorgo de grano para áreas con sequía. *Revista Mexicana de Ciancias Agrícolas*, *5*(7), 1337–1342.

Parihar, C. M., Jat, S. L., Singh, A. K., Kumar, B., Rathore, N. S., Jat, M. S., Saharawat, Y. S., & Kuri, B. R. (2018). Energy auditing of long-term conservation agriculture based irrigated intensive maize systems in semi-arid tropics of India. *Energy*, *142*, 289–302. https://doi.org/10.1016/j.energy.2017.10.015

Prasad, P. V. V., Pisipati, S. R., Mutava, R. N., & Tuinstra, M. R. (2008). Sensitivity of grain sorghum to high temperature stress during reproductive development. *Crop Science*, *48*(5), 1911–1917. https://doi.org/10.2135/cropsci2008.01.0036

Razmi, Z., Hamidi, R., & Pirasteh-Anoshehg, H. (2013). Seed germination and seedling growth of three sorghum (*Sorghum bicolor* L.) genotypes as affected by low temperatures. *International Journal of Farming and Allied Sciences, 2*(20), 851-856.

Agron. Mesoam. 32(1):293-305, enero-abril, 2021
ISSN 2215-3608 doi:10.15517/am.v32i1.39712

Rekha, R. C., Reema, C., Alka, S., & Singh, P. K. (2012). Salt tolerance of *Sorghum bicolor* cultivars during germination and seedling growth. *Research Journal of Recent Sciences*, *1*(3), 1–10.

Ruiz-Corral, J. A., Díaz-Padilla, G., Guzmán-Ruiz, S. D., Medina-García, G., & Silva-Serna. M. M. (2006). *Estadísticas Climatológicas Básicas del Estado de Baja California (Período 1961-2003)*. Instituto Nacional de Investigaciones, Forestales, Agrícolas y Pecuarias. http://www.simarbc.gob.mx/descargas/estadclimatologica-inifap.pdf

Santillano-Cázares, J., Roque-Díaz, L. G., Núñez-Ramírez, F., Grijalva-Contreras, R. L., Robles-Contreras, F., Macías-Duarte, R., Escobosa-García, I., & Cárdenas-Salazar, V. (2019). La fertilidad del suelo afecta el crecimiento, nutrición y rendimiento de algodón cultivado en dos sistemas de riego y diferentes dosis de nitrógeno. *Terra Latinoamericana*, *37*(1), 7–14. https://doi.org/10.28940/terra.v37i1.304

Schmidt, J. P., Dellinger, A. P., & Beegle, D. B. (2009). Nitrogen recommendations for corn: an on-the-go sensor compared with current recommendation methods. *Agronomy Journal, 101*(4), 916-924. https//doi.org/10.2134/agronj2008.0231x

Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera. (2012). Avance de siembras y cosechas. Resumen nacional por cultivo. http://infosiap.siap.gob.mx:8080/agricola_siap_gobmx/AvanceNacionalSinPrograma.do

Sun, Y., Niu, G., Osuna, P., Zhao, L., Ganjegunte, G., Peterson, G., Peralta-Videa, J. R., & Gardea-Torresdey, J. L. (2014). Variability in salt tolerance of *Sorghum bicolor* L. *Agricultural Science*, *2*(1), 9–21.

Tari, I., Laskay, G., Takács, Z., & Poór, P. (2013). Response of sorghum to abiotic stresses: A review. *Journal of Agronomy and Crop Science*, *199*(4), 264–274. https://doi.org/10.1111/jac.12017

Uchino, H., Watanabe, T., Ramu, K., Sahrawat, K. L., Marimuthu, S., Wani, S. P & Ito, O. (2013). Calibrating chlorophyll meter (SPAD-502) reading by specific leaf area for estimating leaf nitrogen concentration in sweet sorghum. *Journal of Plant Nutrition, 36*(10), 1640–1646. https://doi.org/10.1080/01904167.2013.799190

Varsa, E. C., Chong, S. K., Abolaji, J. O., Farquhar, D. A., & Olsen, F. J. (1997). Effect of deep tillage on soil physical characteristics and corn (*Zea mays* L.) root growth and production. *Soil and Tillage Research, 43*(3–4), 219–228. https://doi.org/10.1016/S0167-1987(97)00041-X

Varvel, G. E., Schepers, S. J., & Francis, D. D. (1997). Chlorophyll meter and stalk nitrate techniques as complementary indices for residual nitrogen. *Journal of Production Agriculture, 10*(1), 147–151. https://doi.org/10.2134/jpa1997.0147

Wilhelm, W. W., Arnold, S. L., & Schepers, J. S. (2000). Using a nitrate specific ion electrode to determine stalk nitrate-nitrogen concentration. *Agronomy Journal, 92*(1), 186–189. https://doi.org/10.2134/agronj2000.921186x

Williams-Alanís, H., & Arcos-Cavazos, G. (2015). Comportamiento agronómico de híbridos y progenitores de sorgo para grano en las Huastecas. *Agronomia Mesoamericana, 26*(1), 87–97. https://doi.org/10.15517/AM.V26I1.16926

Zwirtes, A. L., Reinert, D. J., Gubiani, P. I., Rodrigues, S. V., & Pivoto M. R. (2017). Temperature changes in soil covered by black oat straw. *Pesquisa Agropecuaria Brasileira, 52*(11), 1127–1130. https://doi.org/10.1590/S0100-204X2017001100020