



COLEGIO DE POSTGRADUADOS

INSTITUCIÓN DE ENSEÑANZA E INVESTIGACIÓN EN CIENCIAS AGRÍCOLAS

CAMPUS MONTECILLO

POSTGRADO DE RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD

GANADERÍA

ANÁLISIS DE CRECIMIENTO Y RENDIMIENTO DE CUATRO CULTIVARES DE SORGO FORRAJERO [*Sorghum* spp. (L.) Moench.]

ALEJANDRA PÉREZ HERNÁNDEZ

T E S I S

PRESENTADA COMO REQUISITO PARCIAL
PARA OBTENER EL GRADO DE:

MAESTRA EN CIENCIAS

MONTECILLO, TEXCOCO, EDO. DE MEXICO

2015

La presente tesis, titulada: **Análisis de Crecimiento y Rendimiento de Cuatro Cultivares de Sorgo Forrajero [*Sorghum Spp. (L) Moench.*]**, realizada por la alumna: **Alejandra Pérez Hernández**, bajo la dirección del Consejo Particular indicado, ha sido aprobada por el mismo y aceptada como requisito parcial para obtener el grado de:

**MAESTRA EN CIENCIAS
RECURSOS GENÉTICOS Y PRODUCTIVIDAD
GANADERÍA**

CONSEJO PARTICULAR

CONSEJERO



DR. ADRIÁN RAYMUNDO QUERO CARRILLO

ASESOR



DR. JOSÉ ALBERTO SALVADOR ESCALANTE ESTRADA

ASESOR



MC. MARÍA TERESA RODRÍGUEZ GONZÁLEZ

ASESOR



DR. SANTIAGO GARDUÑO VELÁZQUEZ

ASESOR



DRA. LEONOR MIRANDA JÍMENEZ

Montecillo, Texcoco, Estado de México, Julio de 2015

Análisis de Crecimiento y Rendimiento de Cuatro Cultivares de Sorgo Forrajero [*Sorghum* spp. (L.) Moench.]

Alejandra Pérez Hernández, MC.

Colegio de Postgraduados, 2015

RESUMEN

El estudio se desarrolló con dos fechas de siembra: punta de riego y temporal, durante dos ciclos agrícolas, 2013 y 2014, con cuatro cultivares de sorgo forrajero: Esmeralda, Fortuna, Silo miel y Caña dulce; con distancia entre surcos de 70 cm, 17 plantas m² y fertilización a razón de 80 kg N ha⁻¹, en ambos experimentos. Durante 2014, se realizó un análisis de crecimiento, donde se reportaron etapas fenológicas y mediante muestreos periódicos, acumulación de materia seca, índice de área foliar (IAF), duración de área foliar (DAF), tasa de crecimiento del cultivo (TCC) y tasa de asimilación neta (TAN). En los ciclos 2013 y 2014 se realizó el corte de forraje cuando el dosel vegetal interceptó 90% de luz y se registró rendimiento de materia seca (BT o RMS), número de plantas por m² (NDP), índice de área foliar (IAF) y razón de peso foliar (RPF). En los dos experimentos se registró altura de planta (AP) y número de nudos por planta (NNP). Existieron diferencias significativas en las variables AP, BT, IAF, DAF, TCC y TAN entre cultivares, donde los mayores valores los presentaron Caña dulce y Silo miel. Caña dulce presentó mayor AP (202 cm) y BT (1435 gm⁻²); en contraste, Fortuna presentó menor AP (90 cm) y BT (424 gm⁻²). A 115 días después de la siembra (dds), Caña dulce presentó mayor IAF (3.8), Silo miel DAF (134 días); Fortuna, el menor en IAF (2.1) y DAF (63 días). Caña dulce en el periodo 25-55 dds, presentó mayor TCC (24.2 g m⁻²día⁻¹) y TAN (10.2 g m⁻²día⁻¹), Fortuna la menor TCC y TAN (5 g m⁻²día⁻¹, para ambos valores). La BT se correlacionó positivamente con AP, IAF, TCC (P≤0.001) y TAN con TCC (P≤0.001). El mejor cultivar para las condiciones de Montecillo fue Caña dulce debido a mayor AP, BT, IAF, TCC y TAN. En el experimento de corte a 90% de radiación interceptada, el rendimiento de forraje en punta de riego fue 11,305 kg MS ha⁻¹; mientras que, en siembra de temporal 5,707 kg MS ha⁻¹. Los cultivares que presentaron mayor rendimiento de forraje (P≤0.05) fueron Caña dulce con 11,808 y Silo miel con 11,066 kg

MS ha⁻¹. Caña dulce presentó mayor número de plantas por macollo (77 m²) y altura de planta (165 cm); sin embargo, Silo miel presentó un IAF superior, con 4. El uso de siembras con punta de riego al finalizar la época de heladas duplica la BT en los cultivares mejor adaptados; los cuales fueron, Caña dulce y Silo miel ante las menores temperaturas nocturnas, predominantes en el altiplano central de México.

Palabras clave: Fechas de siembra, punta de riego, temporal, cultivares.

Growth Analysis of Four Varieties of Forage Sorghum [*Sorghum* spp. (L.) Moench.]

Alejandra Pérez Hernández, MC.

Colegio de Postgraduados, 2015

ABSTRACT

The study was conducted with two planting dates: tip of irrigation and temporary, for two crop seasons, 2013 and 2014, with four cultivars of forage sorghum: Esmeralda, Fortuna, Silo miel and Caña dulce; with row spacing of 70 cm, 17 plants m² and fertilization at 80 kg N ha⁻¹, in both experiments. During 2014, an analysis of growth, where growth stages were reported and by periodic samplings, dry matter accumulation, leaf area index (LAI), duration of leaf area (DAF), crop growth rate (CGR) and was conducted net assimilation rate (NAR). In 2013 and 2014 cycles forage cutting was done when the plant canopy intercept 90% of light and dry matter yield (TB or RMS), number of plants per m² (NDP), leaf area index (LAI) was recorded and leaf weight ratio (RPF). In both experiments plant height (PH) and number of nodes per plant (NNP) was recorded. There were significant differences in the PH, TB, LAI, DAF, TCC and NAR among cultivars, variables which presented the highest values the Caña dulce and Silo miel. Caña dulce presented greater PH (202 cm) and TB (1435 gm⁻²); in contrast, showed lower PH Fortuna (90 cm) and TB (424 gm⁻²). At 115 days after sowing (das), Caña dulce, showed higher LAI (3.8), Silo miel DAF (134 days); Fortuna tell, the least in LAI (2.1) and DAF (63 days). Caña dulce in the period 25-55 dds, had higher (24.2 g m⁻²day⁻¹) and NAR (10.2 g m⁻²day⁻¹), Fortuna lower CGR and NAR (5 g m⁻²day⁻¹, for both values). The TB was positively correlated with PH, LAI, CGR (p≤0.001) NAR and CGR (p≤0.001). The best cultivating conditions for Montecillo was Caña dulce because higher PH, TB, LAI, CGR and NAR. In the experiment of cutting 90% of intercepted radiation, forage yield in irrigated tip was 11,305 kg DM ha⁻¹; while in temporary planting 5,707 kg DM ha⁻¹. Cultivars showed higher forage yield (P≤ 0.05) were sweet cane with Silo miel 11,808 and 11,066 kg DM ha⁻¹. Caña dulce presented greater number of tillers (77 m²) and plant height (165 cm); however, Silo miel presented a top LAI with 4. The use of crops with irrigated tip at the end of the period of frost doubles, the BT in the best adapted

cultivars; which was, Caña dulce and Silo miel to the lower night temperatures, predominant in the central highlands of Mexico.

Keywords: Planting dates, irrigated tip, temporal, cultivars.

AGRADECIMIENTOS

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACyT), por la beca otorgada (506812) para la realización de mis estudios de Posgrado.

Al Colegio de Postgraduados, por abrir sus puertas y brindarme las facilidades para mi formación académica.

Al Dr. Adrián Raymundo Quero Carrillo, por ser mi tutor, ejemplo de investigador y sobretodo, persona con gran calidad humana.

Al Dr. José Alberto Salvador Escalante Estrada, por ayudarme durante todo el trayecto de mi investigación.

A la M.C. María Teresa Rodríguez González, por sus sabios consejos, acertadas observaciones y por brindarme su amistad.

Al Dr. Santiago Garduño Velázquez, por su gran apoyo durante mi formación académica y de investigación.

A la Dra. Leonor Miranda Jiménez, por formar parte de mi Comité Particular.

A la Sra. Agustina Hernández Ibarra, por apoyarme en el trabajo de campo durante el tiempo que duro la investigación.

Al MC. Antonio García Esteva y al Dr. Josue Kohashi Shibata por apoyarme en el préstamo de estufa de secado.

DEDICATORIAS

A mi hija Haydeé Elizabeth, que desde el primer momento que la ví, mi vida se llenó de alegría y ahora es el gran motor que impulsa a la familia.

A Santiago, por ser ejemplo de esposo y padre de gran calidad humana, gracias porque nunca has dudado en apoyarme para poderme superar académicamente. Te amo.

A mi mamá Fausta, que me enseñó a trabajar y a superarme ante cualquier circunstancia, eres ejemplo de madre y padre.

A mi hermano Pablo, que ha sido siempre mi ejemplo a seguir, gracias por estar a mi lado apoyándome incondicionalmente.

A mis amigas: Yadira Guadalupe, Luz Elena, Sharain Guadalupe y Agustina, en quien he descubierto magníficas personas que, en las buenas y en las malas, están ahí para apoyarte.

CONTENIDO

	Página
RESUMEN.	iii
ABSTRACT.	v
AGRADECIMIENTOS.	vii
DEDICATORIAS.	viii
ÍNDICE DE CUADROS.	xiii
ÍNDICE DE FIGURAS.	xiv
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN GENERAL.	1
1.1. Introducción.	2
1.2. Objetivos.	4
CAPÍTULO II. REVISIÓN DE LITERATURA.	5
2.1. Origen del sorgo.	6
2.2. Sorgo para grano en México.	6
2.3. Utilización del sorgo como forraje.	8
2.4. Preservación de forraje.	10
2.4.1. Heno.	11
2.4.2. Ensilado.	12
2.5. Calidad nutricional del sorgo forrajero.	13
2.6. Requerimientos climáticos del sorgo forrajero.	14
2.7. Descripción morfológica del sorgo.	15
2.7.1. Raíz.	15
2.7.2. Tallo.	15
2.7.3. Hojas.	15
2.7.4. Inflorescencia.	16
2.7.5. Semilla.	16
2.8. Etapas fenológicas del sorgo.	16
2.8.1. Etapa vegetativa.	17
2.8.2. Etapa reproductiva.	18
2.9. Descripción de cultivares.	18

2.9.1. Caña dulce.	18
2.9.2. Esmeralda.	19
2.9.3. Fortuna.	20
2.9.4. Silo miel.	21
CAPÍTULO III. MATERIALES Y MÉTODOS.	23
3.1. Localización del área experimental.	24
3.2. PRIMER EXPERIMENTO: ANÁLISIS DE CRECIMIENTO CON PUNTA DE RIEGO.	24
3.2.1. Establecimiento del cultivo.	24
3.2.2. Elementos del clima.	24
3.2.3. Variables determinadas en el cultivo.	24
3.2.3.1. Altura de planta (AP).	24
3.2.3.2. Número de nudos por planta (NNP).	25
3.2.4. Etapas fenológicas.	25
3.2.5. Rendimiento de biomasa (BT).	25
3.2.6. Variables calculadas.	25
3.2.6.1. Índice de área foliar (IAF).	25
3.2.6.2. Duración del área foliar (DAF, días).	25
3.2.6.3. Tasa de crecimiento del cultivo (TCC, g m ⁻² día ⁻¹). ...	26
3.2.6.4. Tasa de asimilación neta (TAN, g m ⁻² día ⁻¹).	26
3.2.7. Análisis estadístico.	26
3.3. SEGUNDO EXPERIMENTO: CORTE A 90% DE RADIACIÓN INTERCEPTADA.	26
3.3.1. Establecimiento del cultivo.	26
3.3.2. Elementos del clima.	27
3.3.3. Variables determinadas en el cultivo.	27
3.3.3.1. Altura de planta (AP).	27
3.3.3.2. Número de hojas por planta (NH).	27
3.3.3.3. Número de nudos por planta (NNP).	27
3.3.3.4. Número de plantas por metro (NDP).	27

3.3.4. Rendimiento de materia seca (RMS).	27
3.3.5. Componentes morfológicos.	28
3.3.6. Variables calculadas.	28
3.3.6.1. Índice de área foliar (IAF).	28
3.3.6.2. Razón de peso foliar (RPF, %).	28
3.3.7. Análisis estadístico.	28
CAPÍTULO IV. RESULTADOS DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.	29
4.1. PRIMER EXPERIMENTO: ANÁLISIS DE CRECIMIENTO CON PUNTA DE RIEGO.	30
4.1.1. Elementos del clima.	30
4.1.2. Etapas fenológicas.	31
4.1.3. Variables determinadas en el cultivo.	32
4.1.3.1. Altura de planta (AP) y número de nudos por planta (NNP).	32
4.1.4. Rendimiento de biomasa (BT, g m ⁻²).	32
4.1.5. Variables calculadas.	33
4.1.5.1. Índice de área foliar (IAF).	33
4.1.5.2. Duración de área foliar (DAF, días).	34
4.1.5.3. Tasa de crecimiento del cultivo (TCC, g m ⁻² día ⁻¹). ...	35
4.1.5.4. Tasa de asimilación neta (TAN, g m ⁻² día ⁻¹).	36
4.1.6. Análisis de correlación.	37
4.2. SEGUNDO EXPERIMENTO: CORTE A 90% DE RADIACIÓN INTERCEPTADA.	38
4.2.1. Elementos del clima.	38
4.2.2. Variables determinadas en el cultivo.	38
4.2.2.1. Altura de planta (AP), número de hojas (NH), número de nudos por planta (NNP), número de plantas por metro (NDP) e índice de área foliar (IAF).	38
4.2.3. Rendimiento de materia seca (RMS, Kg ha ⁻¹).	40
4.2.4. Componentes morfológicos.	41

4.2.5. Variables calculadas.	43
4.2.5.2. Razón de peso foliar (%).	43
4.2.6. Análisis de correlación.	44
4.3. CONCLUSIONES.	45
4.3.1. Primer experimento: Análisis de crecimiento con punta de riego.	45
4.3.2. Segundo experimento: Corte a 90% de radiación interceptada.	45
5. LITERATURA CITADA.	46

ÍNDICE DE CUADROS

	Página
Cuadro 1. Etapas consideradas en el desarrollo de <i>Sorghum</i> spp.	18
Cuadro 2. Etapas fenológicas en cuatro cultivares de sorgo forrajero en Montecillo Edo. de México.	31
Cuadro 3. Altura de planta (cm) y número de nudos por planta a 55 y 115 dds, en cuatro cultivares de sorgo forrajero en Montecillo, Edo. de México.	32
Cuadro 4. Duración de área foliar (DAF), en cuatro cultivares de sorgo forrajero en Montecillo, Edo. de México.	35
Cuadro 5. Tasa de crecimiento del cultivo (TCC, g m ⁻² día ⁻¹), en cuatro cultivares de sorgo forrajero en Montecillo, Edo. de México.	36
Cuadro 6. Tasa de asimilación neta (TAN, g m ⁻² día ⁻¹), en cuatro cultivares de sorgo forrajero en Montecillo, Edo. de México.	37
Cuadro 7. Análisis de correlación de Pearson a 85 dds, entre biomasa (BT), índice de área foliar (IAF), duración del área foliar (DAF), tasa de asimilación neta (TAN), tasa de crecimiento del cultivo (TCC), altura de planta (AP) y número de nudos por planta (NNP).	37
Cuadro 8. Número de hojas (NH), índice de área foliar (IAF), número de plantas por m ² (NDP) y altura planta (AP), en condiciones de punta de riego y temporal, en el ciclo agrícola 2013 y 2014.	39
Cuadro 9. Rendimiento anual (kg MS ha ⁻¹) de cuatro cultivares de sorgo forrajero en condiciones de punta de riego y temporal, en Montecillo, Edo. de México durante los ciclos agrícolas 2013 y 2014.	41
Cuadro 10. Correlación de Pearson entre variables morfológicas y de rendimiento de cuatro cultivares de sorgo forrajero en condiciones de punta de riego y temporal, en los ciclos agrícolas 2013 y 2014.	44

ÍNDICE DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Superficie sembrada y producción de sorgo para grano en México de 1980 a 2013 (SIAP, 2015).	8
Figura 2. Superficie sembrada y producción de forraje (t MS) de 1980 a 2013 de sorgo forrajero en México (SIAP, 2015).	10
Figura 3. Etapas fenológicas del sorgo (Solórzano, 2007).	17
Figura 4. Fotografías de sorgo cultivar Caña dulce.	19
Figura 5. Fotografías de sorgo cultivar Esmeralda.	20
Figura 6. Fotografías de sorgo cultivar Fortuna.	21
Figura 7. Fotografías de sorgo cultivar Silo miel.	22
Figura 8. Fenología, media semanal de temperatura máxima, mínima y suma semanal de la precipitación, durante el desarrollo de cuatro cultivares de Sorgo forrajero [<i>Sorghum</i> spp. (L.) Moench], en Montecillo, Edo. de México.	30
Figura 9. Dinámica de producción de biomasa (BT, g m ⁻²), en cuatro cultivares de sorgo forrajero en Montecillo, Edo. de México.	33
Figura 10. Dinámica del índice de área foliar (IAF), durante el desarrollo de cuatro cultivares de sorgo forrajero en Montecillo, Edo. de México.	34
Figura 11. Temperatura mínima, máxima y precipitación acumulada mensual registrada de abril de 2013 a diciembre de 2014.	38
Figura 12. Distribución de los componentes morfológicos (kg MS ha ⁻¹) en cuatro cultivares de sorgo forrajero, en condiciones de punta de riego y temporal, durante los ciclos agrícolas 2013 y 2014.	42
Figura 13. Razón de peso foliar de cuatro cultivares de sorgo forrajero en condiciones de punta de riego y temporal, en Montecillo, Edo. de México durante los ciclos agrícolas 2013 y 2014.	43

CAPÍTULO I.
INTRODUCCIÓN GENERAL

1.1. INTRODUCCIÓN

El sorgo [*Sorghum* spp. (L.) Moench.], fue domesticado en el noreste de África, en una zona que se extiende desde la frontera entre Etiopía con Sudán, hasta Chad (De Wet 1978; Mann *et al.*, 1983; Doggett, 1988); en la actualidad, se siembra en la mayor parte del mundo, principalmente para producción de grano y forraje, siendo el quinto cereal más importante después del trigo, maíz, arroz y cebada; ya que en 2013, se sembraron 42.2 millones de hectáreas y se cosecharon 62.2 millones de toneladas (Dahlberg *et al.*, 2011; FAOSTAT, 2015).

En México, durante 2013 se sembraron 2.36 millones de hectáreas; de las cuales, dos millones fueron de sorgo para grano; principalmente para alimentos balanceados, donde también se aprovecha el rastrojo en la alimentación de rumiantes; mientras que 236 mil hectáreas fueron de sorgo forrajero, con una producción aproximada de 4.7 millones de t MS año⁻¹ con un valor de producción de \$2,400 millones de pesos. La producción de forrajes de gran utilidad en sistemas de ganadería intensiva, principalmente como ensilado, para ser utilizado en periodos de escasez de forraje.

Con la creciente demanda de productos pecuarios (cárnicos y lácteos) en México, se ha incrementado la demanda de forrajes; entre ellos, ensilado para corrales de engorda e industrias lácteas (Jones *et al.*, 2009). El maíz forrajero es el más utilizado, dado su valor nutritivo y en particular, su elevada digestibilidad, con respecto a otros cultivos forrajeros; sin embargo, el maíz necesita riegos de auxilio en períodos secos del año, para mantener elevada la producción de materia seca (Oliver *et al.*, 2005), lo que implica un aumento en los costos de energía y disminución del suministro de los mantos freáticos, por lo que se buscan alternativas como el sorgo, el cual, tiene mayor capacidad para soportar sequía y produce mayor biomasa por unidad de agua consumida (Borrell y Hammer, 2000).

Bolaños y Emile (2011), encontraron que el sorgo puede superar al maíz en rendimientos y contenido de proteína en situaciones limitantes de agua; sin embargo, el maíz presenta mayores rendimientos en comparación al sorgo y mejor digestibilidad, en ambientes favorables de riego. Por tanto, el maíz posee mayor vulnerabilidad a las variaciones del ambiente. Se deben investigar factores agronómicos como fenología, crecimiento y rebrote del sorgo, para mejorar las prácticas agrícolas y determinar el momento óptimo de corte, para la expresión de su rendimiento

potencial, así como evaluar sistemáticamente cultivares existentes en el mercado, para determinar cuales se adaptan mejor a la región y oportunidades de manejo. Sin embargo, existen escasos estudios en México relacionados con fenología y análisis de crecimiento en sorgo forrajero, la mayoría de los trabajos se han enfocado a sorgo para grano (Carrillo y Ruiz, 2004).

Para mejor comprensión de los factores fisiológicos que determinan la producción de materia seca entre cultivares y manejo agronómico, se requiere aplicar análisis de crecimiento por etapas fenológicas (Beadle, 1988). Hunt (1978), menciona que el análisis de crecimiento establece el patrón de crecimiento de un organismo a una aproximación cuantitativa, que usa datos simples y básicos, para la descripción e interpretación del comportamiento vegetal bajo ambiente natural o controlado. El análisis de crecimiento usa medidas directas, tal como producción de biomasa, área foliar (AF) y medidas derivadas, como índice del área foliar (IAF), duración de área foliar (DAF), tasa de crecimiento del cultivo (TCC) y tasa de asimilación neta (TAN), las cuales, pueden ser obtenidas a partir de mediciones directas o calculadas (Hunt, 1978; Hunt *et al.*, 1984).

El análisis de crecimiento sirve como base para definir prácticas agrícolas que pueden incrementar el área foliar, IAF y DAF, ocasionado por el mayor número de hojas por unidad de superficie; lo anterior, debido a que el tamaño y la duración del aparato fotosintético están relacionados con el rendimiento del cultivo (Rodríguez y Leihner, 2005). Asimismo, el mayor crecimiento del dosel vegetal proporciona mayor oportunidad de interceptación de luz; lo cual, incrementa la fotosíntesis y producción de biomasa, aprovechando mejor los recursos hídricos y nutrimentales (Escalante, 1999). Similarmente, esta información es valiosa para definir el momento óptimo de cosecha, donde se maximice la producción de forraje y por tanto, la producción animal (Hodgson, 1990; Hernández y Martínez, 1997).

La información de la presente investigación se divide en dos experimentos:

El primer experimento fue un análisis de crecimiento en cuatro cultivares de sorgo forrajero: Caña dulce, Silo miel, Esmeralda y Fortuna en condiciones de punta de riego, en el año 2014.

Segundo experimento, se realizó el corte cuando alguno de los cuatro cultivares intercepto 90% de radiación y se comparó el rendimiento en dos condiciones de siembra: punta de riego y temporal, durante los años 2013 y 2014.

1.2. OBJETIVOS

1. Evaluar y comparar mediante análisis de fenología y crecimiento, la acumulación de materia seca en el tiempo (BT), altura de planta (AP), número de nudos por planta (NNP), índice de área foliar (IAF), duración del área foliar (DAF), tasa de crecimiento del cultivo (TCC) y tasa de asimilación neta (TAN), en cuatro cultivares de sorgo forrajero: Caña dulce, Silo miel, Esmeralda y Fortuna.

2. Determinar el rendimiento (RMS), altura de planta (AP), número de hojas (NH), número de nudos por planta (NNP), número de plantas por metro (NDP) e índice de área foliar (IAF) del sorgo forrajero cortado a 90% de radiación interceptada bajo dos condiciones de siembra: punta de riego y temporal, durante 2013 y 2014.

CAPÍTULO II.
REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Origen del sorgo

El sorgo es una gramínea C₄, nativa del Noreste de África, allí es donde se encuentra la mayor diversidad (Doggett 1970; De Wet y Harlan 1971; de Wet 1977). Su domesticación ocurrió en la zona comprendida entre el sur del Sahara, entre el Lago Chad y el Oeste de Sudán, hace de tres a cinco mil años; posteriormente, se introdujo a Egipto y otras partes del mundo (Mann *et al.*, 1983; Dogget, 1988). El cultivo de sorgo se extendió a lo largo del río Nilo y es probable que haya sido introducido a Arabia de 1000 a 800 AC; se sabe que era cultivado en Asiria, 700 AC; posteriormente, llevado a la India por las rutas de comercio, tanto marinas como terrestres, a través de la costa, en donde ya se cultivaba un siglo AC. De India pasó a Italia en el siglo I DC. (Karper y Quinby, 1982; House, 1985).

La gran diversidad de *Sorghum* spp cultivado fue desarrollado a través de selección, aislamiento y recombinación en hábitats contrastantes y variados del noreste de África y la migración humana llevo la especie a todo el continente (Doggett, 1970). Los restos más antiguos conocidos de domesticación de sorgo que se encuentra en Playa Nabtaal Sur de Egipto, con una calibración a base de ¹⁴C, de 8000 años (Dahlberg y Wasylikowa, 1996), pero el evento de domesticación también puede haber tenido múltiples lugares y ocasiones.

No se sabe cuándo se introdujo el sorgo por primera vez en América, pero se supone con bases lógicas, que éste llegó en barcos que transportaron esclavos procedentes de África, con el nombre de maíz de Guinea a las Antillas, son ellos los que realizaron su posterior diseminación por los países de la cuenca del Caribe (Doggett, 1988). Introducido a Estados Unidos en 1857 y usado en forma exclusiva, a principios de 1900, para fabricar jarabe (Doggett, 1965). Actualmente, se cultiva en todas las regiones templadas y tropicales del mundo, desde Australia hasta Rusia y desde las grandes llanuras de los Estados Unidos hasta Argentina (Bogdan, 1997).

2.2. Sorgo para grano en México

El sorgo [*Sorghum* spp. (L.) Moench.] es el segundo cereal más cultivado, después del maíz, en México. En 2013, ocupó el tercer lugar mundial en producción promedio de grano con 6.3 millones de toneladas, solamente superado por Nigeria (6.7) y Estados Unidos (9.88). México

fue el principal importador con 2.3 millones de toneladas, lo que representó el 33.7% de las importaciones mundiales (FAOSTAT, 2015).

En México, el cultivo de sorgo se inició a principios del siglo pasado, sin embargo, su producción comercial data de fines de los años cincuenta (Galarza *et al.*, 2003). El desarrollo comercial a gran escala de este grano se encuentra íntimamente vinculado a la política pública de irrigación, establecida durante los años cuarenta, que originó el surgimiento de nuevas zonas agrícolas en el país (ASERCA, 1997). Como resultado, a fines de la década de los cincuenta y parte de los sesenta, se optó por transformar los granos en insumos para generar productos de consumo regional y local, los excedentes de grano se orientaron hacia actividades empresariales avícolas y porcícolas, ubicadas al norte del país y también fueron consumidas por explotaciones ubicadas en las proximidades de los centros urbanos y áreas rurales (Galarza *et al.*, 2003). El 92% del sorgo se destina a la producción de alimentos para ganado; 7%, son mermas por diferentes circunstancias y el 1%, es utilizado para semilla de siembra (ASERCA, 1997).

La superficie cultivada de sorgo de 1980 a 1990 se mantuvo entre 1.6 y 2.1 millones de hectáreas; de 1991 a 1995, la superficie sembrada disminuyó a 0.9-1.5 millones de hectáreas; 1996 a 2013, se han sembrado de 1.8-2.3 millones de hectáreas; mientras que, la producción ha sido proporcional a la superficie sembrada: a mayor superficie sembrada, mayor producción. De 1996 a 2013 la producción fue de 5000 a 7000 millones de toneladas anuales (Figura 1). En 2013 se cultivaron 2 millones de ha, en casi todas las entidades federativas del país, pero se manifiesta alto grado de concentración en dos zonas productoras importantes: Tamaulipas como primer productor a nivel nacional con 977 mil ha cultivadas y (1.8 millones de toneladas de grano); seguido del Bajío (Guanajuato, Jalisco y Michoacán), donde se siembran 454 mil ha y se produce un millón de toneladas, aportando estos cuatro estados el 71% a la producción nacional de grano de sorgo (SIAP, 2015). En estas regiones también se aprovechan 6 millones de toneladas de rastrojo en la alimentación del ganado ovino, bovino y caprino proveniente del sorgo cosechado (Villegas *et al.*, 2001).

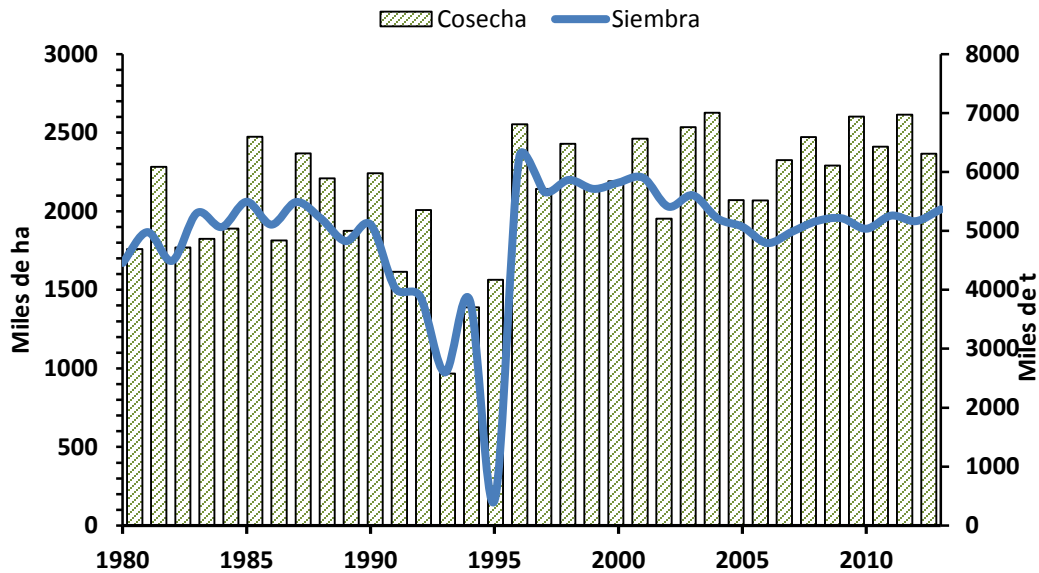


Figura 1. Superficie sembrada y producción de sorgo para grano en México de 1980 a 2013 (SIAP, 2015).

2.3. Utilización del sorgo como forraje

El sorgo se utiliza principalmente para producción de grano; como alimento para ganado, en la industria avícola (huevo y pollo de engorda); engorda de cerdos, bovinos carne, bovinos leche, producción de etanol y como cultivo forrajero (House, 1985; Umphres, 2013). Los sorgos forrajeros son distintos a los modernos híbridos enanos para grano, las plantas son altas, con tallos suculentos, hojas finas y abundantes, además de poder rebrotar con facilidad (Muslera y Ratera, 1991).

La producción pecuaria se ve ampliamente beneficiada por la utilización del sorgo en la producción de forraje, éste adquirió desde su introducción gran importancia por su adaptabilidad, rendimiento y eficiencia en el aprovechamiento de agua, además de que su follaje es muy apetecido por el ganado (Galindo, 1975; Bogdan 1997). Los sorgos más demandados como alimento forrajero son los sacarinos, debido a que sus tallos o cañas contienen jugo dulce y es preferido por los animales, aunque en valor nutritivo es inferior al sorgo de grano; son plantas precoces, con gran abundancia de hoja y de ahí radica su importancia (Marsalis, 2011).

El sorgo puede ser consumido directamente por el ganado en pastoreo como forraje verde o henificarse, pero al consumirse como forraje verde tiene alto contenido de ácido cianhídrico que puede ocasionar graves intoxicaciones al ganado; sin embargo, se ha encontrado que a medida que va madurando la planta va disminuyendo la cantidad de ácido cianhídrico (Osechas, 1987). Es preciso que transcurran algunos días a partir del corte para que el forraje deje de ser tóxico, en estado de ensilaje o henificado, pierde su toxicidad (Snapp y Newman, 1962).

Para utilizarlo como forraje, es conveniente cortar la planta cuando la floración (anthesis) sea de 10%, así se logrará un corte de 8 a 10 semanas y una producción promedio de 50 toneladas de forraje verde por corte en una hectárea (Bogdan, 1997). Normalmente se obtienen cinco cortes, después la producción disminuye; sin embargo, con aplicaciones de nitrógeno y riego, se pueden obtener mayor número de cortes. Lo anterior, representa otra ventaja de este cultivo, no presenta dominancia apical (como en el caso del maíz), por lo que pueden realizarse varios cortes cuando las condiciones de crecimiento son adecuadas; por tanto, se tiene un buen efecto sobre la disponibilidad de forraje de calidad a lo largo de la temporada de crecimiento. Si se va a utilizar para ensilaje, se recomienda que tenga humedad cercana a 70% (Cerutti, 2011). Al ensilarlo, el forraje se debe picar para que compacte debidamente, saliendo la mayor cantidad de aire posible y se evite la descomposición de una parte del ensilaje. La planta se puede cortar en trozos de un centímetro para facilitar el llenado del silo y la reducción del oxígeno con el apisonado (Tabosa *et al.*, 2002).

La superficie sembrada de sorgo forrajero se ha incrementado de 41 mil hectáreas, en 1980, a 236 mil hectáreas, en 2013. La producción se ha incrementado de acuerdo a la superficie establecida; de 2001 a 2013, la producción ha variado de 4.2 a 5.5 millones de t MS (Figura 2). Mientras en 2013 se sembraron 236 mil hectáreas de sorgo forrajero, con una producción aproximada de 4.7 millones de t MS año⁻¹, los estados con mayor superficie sembrada son Chihuahua, Sinaloa y Coahuila con 46.8, 37, 35.5 mil hectáreas y producciones de 637 393, 280 272, 1 168 077 t MS año⁻¹, respectivamente (SIAP, 2015).

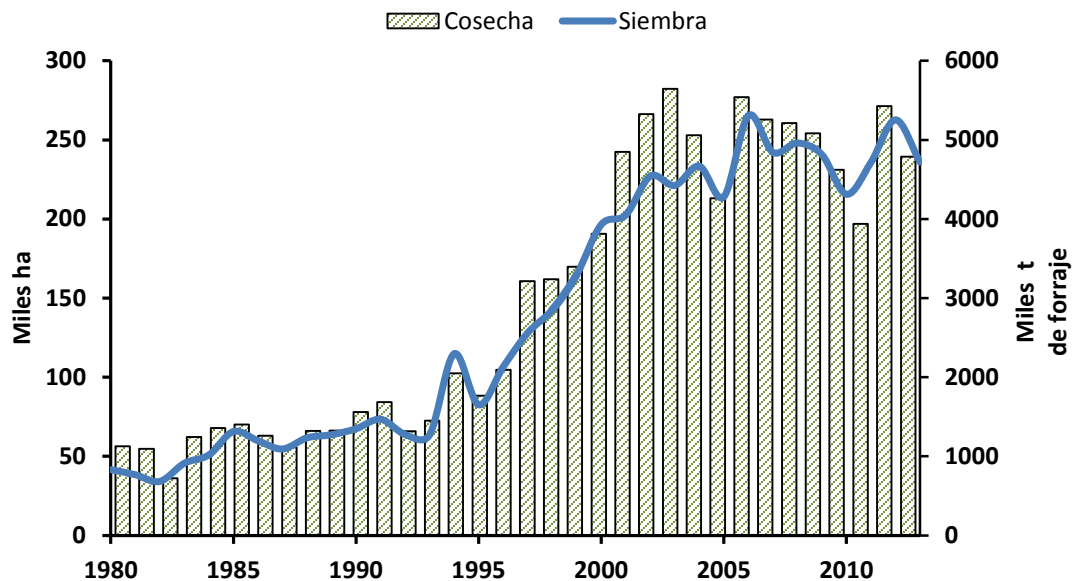


Figura 2. Superficie sembrada y producción de forraje (t MS) de 1980 a 2013 de sorgo forrajero en México (SIAP, 2015).

2.4. Preservación de forraje

La preservación de forraje por ensilado y henificado es una práctica común en México, en los sistemas ganaderos que basan la alimentación en forrajes, se caracterizan por una fuerte estacionalidad productiva, ya que a lo largo del año donde hay una estación de crecimiento abundante, normalmente durante las lluvias de verano, es cuando ocurre un excedente, cuyo destino generalmente es corte y conservación, para utilizarlo en las épocas de invierno y sequía donde hay un déficit en el crecimiento de forraje (Cárdenas *et al.*, 2004; Bragachini *et al.*, 2008).

La henificación y ensilado son sistemas de conservación al alcance de cualquier unidad de producción pecuaria y la decisión de utilizar uno u otro cultivo, está en razón de motivos prácticos: clima, tradición regional, cultivos disponibles, disponibilidad de maquinaria, etc. (Caravaca *et al.*, 2003). El ensilado se utiliza más en regiones de clima templado húmedo, ya que es difícil llevar a cabo la henificación a causa del clima, ya que las lluvias pueden deteriorar la calidad del forraje e incrementar las pérdidas (Muslera y Ratera, 1991). El henificado se utiliza

en forrajes poco succulentos y donde el clima es cálido. Tal que permite el secado rápido del forraje, hasta alcanzar a 15% de humedad (Bragachini *et al.*, 2008).

En ensayos de comparación entre heno y ensilado, realizados con los mismos cultivares, se han indicado resultados variables, pero en general, en ovinos y bovinos para carne, la ingestión de materia seca de heno es mayor en comparación con la de ensilado y por tanto, se tuvo mayor incremento de peso al consumir heno; sin embargo, en bovinos lecheros se incrementó la producción utilizando ensilado (Wickes, 1978). El heno tiene la ventaja que incrementa el consumo de materia seca de las raciones y puede mejorar el consumo voluntario de las raciones, y en dietas altas en grano normaliza la función digestiva y evita la acidosis ruminal en bovinos (Bragachini *et al.*, 2008). Mientras que el ensilado cumple un rol esencial para el aumento de la carga animal en las unidades de producción pecuaria, es apropiado para complementar el pastoreo en épocas de poco crecimiento de los forrajes, utilizarlo cuando sobrevienen contingencias y se reduce la producción de forrajes (Cañeque y Sancha, 1998).

2.4.1. Heno

La henificación del forraje tiene por objetivo reducir el contenido de agua, al menos, a un 15%. Los factores que determinan la rapidez en pérdida de agua del forraje a henificar incluyen clima, cantidad y disposición de las plantas por hilera y tipo de planta (Muslera y Ratera, 1991). Para la preservación del sorgo forrajero, los productores deben considerar varios factores: densidad de siembra, distancia entre surcos, disponibilidad de agua, cultivares de *Sorghum bicolor*; que normalmente poseen mayores rendimientos que aquellas de *Sorghum sudanense*, pero sus tallos son de mayor diámetro, por los que requieren mayor tiempo de secado (Butler y Bean, 2005). Es recomendable utilizar cultivares para heno de pasto Sudán (*Sorghum sudanense*), ya que se pueden obtener varios cortes debido a su capacidad de rebrote, sus tallos son delgados por lo cual pierden humedad rápidamente y pueden ser empacados (Butler y Bean, 2005; Marsalis, 2011).

Los sorgos forrajeros, pueden utilizarse además como reserva forrajera en otro momento del año en que no están en producción, a través de su henificación (generalmente como rollos). Los cultivares más apropiados para la preparación de heno, es el sorgo forrajero tipo Sudán, sembrado con densidades de entre un 10-15% más alta a las habituales en cada zona, para lograr

cañas y hojas más finas y flexibles, y facilitar así el secado y su posterior enrollado. El heno de sorgo cortado en estado vegetativo antes de que emerjan las primeras panojas, tiene un valor nutritivo ligeramente inferior al de un buen heno de alfalfa, en cuanto más temprano sea el corte, mayor será el contenido proteico y mayor la digestibilidad del forraje pero se obtiene menor cantidad de materia seca (Gallarino, 2008).

2.4.2. Ensilado

Ensilar es el proceso de conservación en verde del forraje, basado en la fermentación láctica, a través de reacciones bioquímicas debidas a la actuación de enzimas producidas por la propia planta en la fase de respiración aerobia inicialmente y anaerobia o intracelular, posteriormente; similarmente, por la actividad enzimática de bacterias anaerobias lácticas, disminución rápida de pH, inferior a cinco, que transforman los carbohidratos solubles en agua y ácidos orgánicos, lo que permite preservar las cualidades nutritivas y materia seca del forraje original (Cárdenas *et al.*, 2004; Schroeder, 2004).

Las plantas de sorgo producen grandes cantidades de ácido cianhídrico (HCN), posteriormente a un evento de estrés por sequía, lluvia torrencial, granizo, etc; el cual es peligroso bajo consumo directo. Al ensilar, los niveles de HCN descienden, por lo que ya no resulta dañino para los animales (Bogdan, 1997). Sorgo forrajero para ensilaje se ha producido en zonas de regiones áridas, donde la lluvia es escasa para la producción de ensilaje de maíz y éste sirve como alternativa excepcional, debido a sus altos rendimientos y valor nutritivo, que resulta de 80 a 90% con respecto al ensilaje de maíz (Schroeder, 2013). Generalmente, el sorgo forrajero se cosecha para ensilaje cuando los rangos de humedad en la planta van de 60 a 70%, o cuando el grano se encuentra en estado lechoso masoso, momento en que la calidad y rendimiento son óptimas, con un tamaño de partícula de un centímetro (Marsalis, 2011; Schroeder, 2013).

Durante el proceso, varios factores afectan la fermentación y calidad del ensilaje. Los principales factores incluyen contenido de humedad, tamaño de partícula, compactación del forraje, tipo de almacenamiento y método de ensilado; los cuales, son factores cruciales que influyen en la fermentación del forraje (Schroeder, 2004). Los forrajes cosechados con alto contenido de humedad (>75%) pueden dar lugar a pérdida de nutrimentos por lixiviación de ensilado pueden

sufrir una "fermentación secundaria", conocida como fermentación clostridial (Weinberg y Muck, 1996); en la cual, se produce ácido butírico y resulta en producción de amoníaco, aminos, dióxido de carbono y otros ácidos indeseables (Stone y Chase, 2004). Si el forraje se cosecha con bajo contenido de humedad (<60%) puede resultar en aumento de temperatura y reducción de la digestibilidad (Schroeder, 2004). La introducción o permanencia de oxígeno en el ensilado, incrementa el desarrollo de microorganismos tales como levaduras, bacilos, enterococos y mohos, que producen calor y disminuyen la digestibilidad, que en última instancia, pone en peligro la calidad del ensilaje; además, estos microorganismos son responsables de cambios de textura, decoloración, disminución de apetencia e ingesta del ensilado por los animales (Weinberg y Muck, 1996).

2.5. Calidad nutricional del sorgo forrajero

Depende principalmente de la etapa de crecimiento en que se coseche y en menor grado, de la cantidad de fertilizante nitrogenado aplicado. Cuando el sorgo tiene tres semanas, se encontró un contenido en proteína cruda (PC) de 29.9%, 24.4% de fibra cruda (FC), Ca 1.06%, P 1.29%; mientras que, a 13 semanas después de la siembra, se redujo a 11.4% de PC, Ca 0.78% y P 0.78% y la FC se incrementó a 33.4%, (Bogdan, 1997). Bolaños y Emile (2013), evaluaron la calidad de sorgo, sembrado a distancias entre surcos de 75 y 20 cm y densidades de 33 y 65 semillas m², indicando niveles de digestibilidad de 60 a 68% y PC de 8.8 a 10.4%; asimismo, indican que sembrado en surcos estrechos (20 cm) a baja densidad de siembra (33 semillas m²), se incrementa el rendimiento y concentración de PC del forraje de sorgo. Núñez *et al.* (2010), al comparar el rendimiento y calidad de forraje en cultivares de maíz y sorgo, encontraron un rendimiento promedio de 18.5 t MS ha⁻¹, PC 7.4%, lignina 6.1%, digestibilidad *in vitro* de 71.5% (maíz) y para sorgo, rendimiento promedio de 18.4 t MS ha⁻¹, PC 6.1%, lignina 8% y digestibilidad *in vitro* de 65%. En general, la producción de forraje fue similar y el contenido nutricional, ligeramente superior en maíz. Núñez y Cantú (2001), evaluaron el rendimiento de materia seca, composición química y digestibilidad *in vitro* de cultivares de sorgo x Sudán de nervadura café y normal (*Sorghum bicolor* (L.) x *Sorghum sudanense*), encontrando que el sorgo de nervadura café tuvo menor rendimiento 4.1 t MS ha⁻¹ por corte y PC 11.4%, 70% de digestibilidad *in vitro* y el sorgo normal produjo más materia seca 5.35 t MS ha⁻¹, PC de 12.7% y 66% de digestibilidad *in vitro*.

Las plantas de sorgo pueden contener grandes cantidades de HCN en forma del glucósido cianogénico durrina, el cual, es peligroso cuando excede 750 ppm (Bogdan, 1997). Doggett (1970), menciona que el contenido de HCN en hojas de tres cultivares fluctuaron de 170 a 1390 ppm, estas mismas pruebas realizadas bajo condiciones de riego fueron mayores de 876-2006 ppm y en plantas fertilizadas con N son mayores que en plantas sin fertilizar, pero en sorgo ensilado y henificado, los contenidos de HCN descendieron marcadamente, por lo que el ensilado o henificado no resultan dañinos para los animales.

2.6. Requerimientos climáticos del sorgo forrajero

Debido a su origen tropical, el sorgo se adapta bien a temperaturas que oscilan entre 20 y 40 °C; para germinar, requiere de 12 a 13 °C. El crecimiento de la planta se activa cuando sobrepasan los 15 °C, con un óptimo de 32 °C; las temperaturas muy altas, durante los días posteriores a la floración, reducen el peso final del grano (Bogdan, 1997). Correa (2001), plantea que la temperatura está relacionada con la época de siembra, pues altas temperaturas aumentan las pérdidas, si coinciden con el periodo reproductivo. Crece bien en suelos con pH entre 5.5 y 8.5; sin embargo, el pH ideal está entre 5.5 y 6.5. Tiene tolerancia a suelos salinos y los cultivares de sorgo dulce requieren la presencia de carbono cálcico en el suelo, que aumenta el contenido de sacarosa en tallos y hojas, sin embargo, es susceptible a deficiencia de hierro, zinc y magnesio (Muslera y Ratera, 1991).

El sorgo se considera uno de los cultivos más eficiente en el uso del agua (Graveros, 2003). De acuerdo a Taylor *et al.* (2006), es el cereal con mayor tolerancia a la sequía, capaz de sufrir escasez de agua durante periodos prolongados y reemprender su crecimiento cuando ésta cesa; sin embargo, el ciclo del cultivo se alarga cuando el estrés ocurre durante la etapa vegetativa, mientras que en estado reproductivo acelera la madurez. El periodo crítico de necesidad de agua comprende desde el momento que aparece la panícula entre las hojas del vértice de las plantas, hasta el final del estado lechoso del grano, debido a que esto puede disminuir el rendimiento del grano (Marsalis *et al.*, 2011). La enzima fosfoenil piruvato carboxilasa es responsable de que la planta tenga la habilidad de mantener la eficiencia fotosintética bajo estrés (Maranville y Madhavan, 2002). También se indica que cuando el tejido experimenta estrés hídrico produce el cierre estomático para restringir la pérdida de agua y ajustan el tamaño de la célula y el potencial

osmótico; de manera tal, que el potencial hídrico de la célula baja para mantener la fluidez del agua (Krieg, 2000). Por otra parte, el sorgo necesita menos cantidad de agua que otros cultivos para formar un kilogramo de materia seca (Castro *et al.*, 2000).

2.7. Descripción morfológica del sorgo

2.7.1. Raíz

Sistema radical adventicio fibroso el cual se desarrolla por debajo del tallo, presenta numerosas raicillas laterales por unidad de superficie (Pérez *et al.*, 2010). La profusa ramificación y amplia distribución del sistema radical es una de las razones por las que los sorgos son tan resistentes a la sequía. La planta crece lentamente hasta que el sistema radical está bien establecido; la profundidad de enraizamiento es generalmente, de 1 a 1.3 metros, con 80% de raíces en los primeros 30 cm (Mayers, 1980).

2.7.2. Tallo

Erectos y sólidos, están formados modularmente, por una serie de nudos y entrenudos, su consistencia es sólida con corteza o tejido exterior duro y médula suave, adquieren alturas que van de 40 cm a más de 3 metros. Hay una yema lateral en cada nudo; en algunos cultivares, se desarrollan de una a tres yemas de nudos inferiores y este “ahijamiento” o “amacollamiento” no se considera indeseable, sobre todo si se desea para producción de forraje (Saballos, 2008; Turhollow *et al.*, 2010), aunque esta capacidad de ahijamiento está genéticamente condicionada, depende del cultivar, ambiente y manejo. Por tanto, la importancia de comparar cultivares analizando, sistemáticamente y en periodos regulares, los componentes del rendimiento y crecimiento utilizando técnicas cuantitativas de análisis de crecimiento. La longitud de entrenudos determina la altura de planta. La diferencia se debe totalmente a la longitud y no al número de entrenudos (Estrada, 1974).

2.7.3. Hojas

El número varía de 7 a 24, según el cultivar y periodo de crecimiento. Son desde erectas hasta casi horizontales y se encorvan conforme avanza la madurez. La longitud de la hoja madura oscila de 30 a 100 cm y su ancho, de 1.5 a 10 cm; son alternas, lanceoladas o lineal-lanceoladas, superficie lisa y cerosa. El tamaño de hoja es variable, siempre más pequeño que el del maíz,

aunque de forma similar. Las hojas disminuyen la transpiración durante la época de sequía, enrollándose y protegiéndose con sus ceras (Karper y Quinby, 1982).

2.7.4. Inflorescencia

Panícula abierta ramificada, con raquis central oculto por la densidad de sus ramas, ésta es corta o larga, suelta, abierta, compacta o semicompacta. Puede tener de 4 a 25 cm de largo, 2 a 20 cm de ancho y contener de 400 a 800 granos, según el tipo de panícula. Las espiguillas son de dos clases: sésiles o pediceladas y contienen un óvulo que desarrollará una semilla después de la fecundación. Una panícula puede llevar hasta 6000 florecillas cuyas anteras pueden producir más de 24 millones de granos de polen (Pérez *et al.*, 2010). La polinización se lleva a cabo durante 5 a 7 días, si las mañanas son frescas. El sorgo generalmente se autopoliniza pero no existen barreras para la fecundación cruzada, siendo ésta de 5% o más, cuando los cultivares se siembran juntos (Karper y Quinby, 1982).

2.7.5. Semilla

Pequeñas en comparación al maíz, de 25,000 a 60,000 por kilogramo. Cada semilla en realidad es un cariósipide cubierto en mayor o menor grado por glumas de color negro, café, rojo o paja. El color de la semilla puede ser blanco, rojo, amarillo o café; los colores son resultado de complejos genéticos que involucran el pericarpio y la testa. Gran parte de cariósipide es el endospermo, constituido casi totalmente por almidón. Ciertas capas, en algunas semillas, contienen considerables cantidades de taninos y los cultivares forrajeros normalmente producen semilla de este tipo, atributo que ha sido una defensa para reducir el daño por las aves (Estrada, 1974; Karper y Quinby, 1982).

2.8. Etapas fenológicas del sorgo

Gardner *et al.* (1985), definen el crecimiento como un proceso de incremento irreversible del tamaño de órganos de la planta, resultado de un proceso fisiológico complejo, dependiente de la fotosíntesis, respiración, división celular, elongación, diferenciación, entre otros y además, influenciado por factores como temperatura, intensidad y calidad de luz, densidad de población, calidad de semilla, disponibilidad de agua y nutrientes.

La fenología estudia los eventos periódicos naturales involucrados en el ciclo de vida vegetal (Volpe, 1992; Villalpando y Ruiz, 1993; Schwartz, 1999). El ciclo biológico cambia con el genotipo y factores del clima; lo que quiere decir, que las plantas del mismo genotipo bajo diferentes condiciones climáticas pueden presentar variación en los estados de desarrollo, después de transcurrido un mismo tiempo cronológico (Solórzano, 2007).

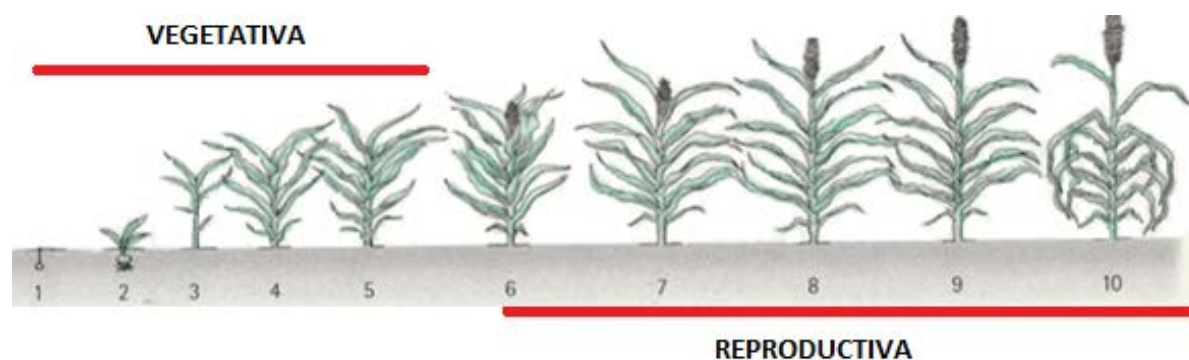


Figura 3. Etapas fenológicas del sorgo (Solórzano, 2007).

El conocimiento de la fenología es importante para el manejo del cultivo (Soto *et al.*, 2006; Soto y Silvertooth, 2008). Las etapas fenológicas permiten la ejecución oportuna y óptima de prácticas agrícolas, susceptibilidad ante la incidencia de plagas, fertilización específica, control de maleza, etc., (Cautín y Agustí, 2005). Comprende dos grandes etapas bien definidas (Figura 3), etapa vegetativa y reproductiva (Castleberry, 1973).

2.8.1. Etapa vegetativa

Comprende los eventos entre germinación y diferenciación del área foliar total. Las hojas se diferencian antes de la iniciación de la panoja (Castleberry, 1973; Cuadro 1). Durante esta etapa se forma la maquinaria fotosintética, cuya producción de fotosintatos dependerá del tamaño y eficiencia de la misma (Cruz y Garay, 2012). Cualquier alteración ambiental dada por factores bióticos (plagas y enfermedades) y abióticos (alteraciones de temperatura, luminosidad, déficit hídrico, disponibilidad de nutrientes, etc.), afectarán el tamaño de la maquinaria fotosintética y su actividad, influenciando así, la producción de fotosintatos para abastecer estructuras vegetales de interés económico (Marsalis, 2011).

Cuadro 1. Etapas consideradas en el desarrollo de *Sorghum* spp.

Etapa	Descripción
1	Emergencia: Coleóptilo visible en la superficie del suelo
2	Collar: En lígula de tercer hoja, visible
3	Collar: En lígula de quinta hoja, visible
4	Diferenciación del punto de crecimiento, cerca de la octava hoja
5	Hoja final visible, en verticilo
6	Panícula extendida dentro de vaina de la hoja bandera
7	Mitad de la floración: Mitad de las plantas en etapa de floración (antesis)
8	Grano masoso suave
9	Grano masoso duro
10	Madurez fisiológica: Máxima acumulación de peso seco

Solórzano (2007).

2.8.2. Etapa reproductiva

En esta etapa ocurre la formación de las estructuras de perpetuación y dispersión de la especie y usualmente, de interés económico. Cualquier alteración en el medio causada por factores bióticos o abióticos afecta el número, tamaño de frutos o semillas y directamente, el rendimiento en grano (Cuadro 1; Marsalis, 2011).

2.9. Descripción de cultivares

2.9.1. Caña dulce

Híbrido de sorgo [*Sorghum* spp. (L.) Moench.] con pasto Sudán (*Sorghum sudanense*), con tallos dulces, delgados y suaves (Figura 4). Se usa para corte en verde, pacas y pastoreo. Resistente a la sequía y tolerante a enfermedades de la hoja. Se adapta de cero hasta 2000 msnm. De acuerdo a la fecha de siembra, se pueden obtener de tres a cinco cortes. Días al primer corte 70-80; intervalo entre cortes, 45-60 días; altura, 1.90-2.10 m; PC, 9.96%; FDN, 62.51%; FDA 42.1%; total de nutrientes digestibles, 62.4%; energía neta para lactancia, 1.42; rendimiento potencial, 14.5 t MS ha⁻¹, en dos cortes (información del productor de semilla).



Figura 4. Fotografías de sorgo cultivar Caña dulce.

2.9.2. Esmeralda

Sorghum bicolor (L.) Moench, sorgo de doble propósito, buen rendidor de grano en condiciones de riego (6 t ha^{-1}); a madurez fisiológica, se obtiene un forraje verde, tallos jugosos y dulces; por tanto, nutritivos para la alimentación animal, con rendimientos de $30\text{-}35 \text{ t ha}^{-1}$ (Figura 5). Ciclo precoz, grano blanco cremoso, altura de planta $1.80\text{-}1.90 \text{ m}$, 70 días a floración, panoja compacta, tolerancia a enfermedades, días promedio a cosecha 85 para forraje y 120 para grano, proteína $11\text{-}12\%$ (información del productor de semilla).



Figura 5. Fotografías de sorgo cultivar Esmeralda.

2.9.3. Fortuna

Sorghum bicolor (L.) Moench. Buen rendidor de forraje, con rendimientos de 50 a 66 t ha⁻¹ de forraje verde, en el primer corte (Figura 6). Libre de toxinas y fenoles. Excelente rendidor de grano en condiciones de riego, superando 8 t ha⁻¹. Ciclo intermedio a tardío, altura de planta 2.2 a 2.3 m, 78 días a floración; color de grano blanco cremoso; panoja abierta; muy buena tolerancia a enfermedades; días promedio a cosecha 92 para forraje y 130 para grano; proteína, 12.6% base seca y 5.6% en base húmeda (información del productor de semilla).

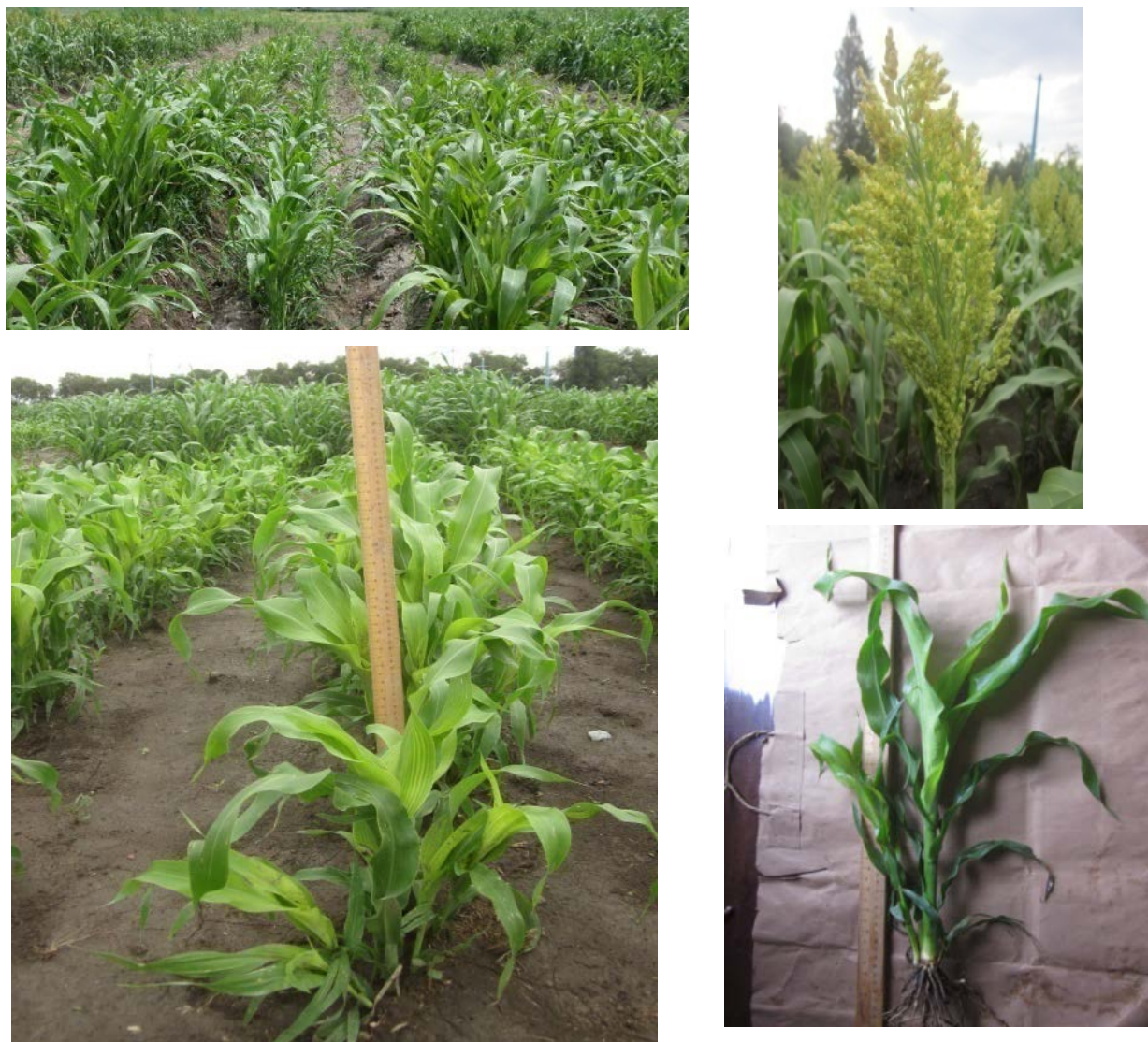


Figura 6. Fotografías de sorgo cultivar Fortuna.

2.9.4. Silo miel

Semilla híbrida de sorgo forrajero [*Sorghum bicolor* (L.) Moench]. Cultivo forrajero anual para picado verde o ensilado, de ciclo intermedio (Figura 7). Produce panoja compacta de grano blanco con excelente relación de grano-follaje y nivel de nutrientes totales digestibles. Es adecuada para el ciclo primavera-verano, por ser sensible a fotoperiodo corto. Crece de 2 a 3.5 m, en el ciclo primavera-verano y de 1.50 a 2 m en otoño-invierno, sin presencia de temperaturas bajas, heladas o días muy nublados. Se debe cortar después de 4 a 5 horas de luz matutina, para reducir nitritos y nitratos en forraje; para picado verde, cuando la planta haya alcanzado un metro

o más de altura y para ensilar, cuando el grano se encuentre en estado lechoso-masoso (información del productor de semilla).



Figura 7. Fotografías de sorgo cultivar Silo miel.

CAPÍTULO III.
MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Localización del área experimental

El estudio se realizó en el Colegio de Postgraduados, *Campus* Montecillo, Montecillo, Estado de México, México (19° 29' N, 98° 51' O, 2250 msnm), en dos años 2013 y 2014. En un suelo franco arcilloso, alcalino con pH 9.0, CE 3.44 dSm⁻¹ y pobre en MO 1.29%. Clima BS1, indica que es el menos seco de los áridos con lluvias en verano, temperatura media anual 14.6 °C, 559 mm de precipitación anual (García, 2005).

3.2. PRIMER EXPERIMENTO: ANÁLISIS DE CRECIMIENTO CON PUNTA DE RIEGO

3.2.1. Establecimiento del cultivo

La siembra se realizó en el año 2014, el 22 de abril, con una lámina de riego de 18 cm únicamente para la emergencia a una distancia entre surcos de 70 cm. Las unidades experimentales consistieron de cinco surcos de 5 metros de longitud y como parcela útil se tomaron 3 m de los 3 surcos centrales. El diseño experimental fue bloques al azar con cuatro repeticiones. Veinticinco días después de la siembra (dds) se realizó un aclareo para lograr una densidad de 17 plantas por m²; 40 dds, se aplicaron 80 kg N ha⁻¹ en el aporque.

3.2.2. Elementos del clima

Durante el desarrollo del ciclo de crecimiento del cultivo, se registró la temperatura semanal máxima (T máx °C) y mínima (T mín °C) y la suma semanal de la precipitación (PP, mm), con lo cual fue posible saber la cantidad de precipitación que se presentó durante la fase vegetativa y reproductiva.

3.2.3. Variables determinadas en el cultivo

3.2.3.1. Altura de planta (AP)

Se cosecharon tres macollos por parcela experimental y se llevaron al laboratorio para medir la planta, desde el área basal hasta la punta de la última hoja visible o panoja, y únicamente se reportó la altura de la planta principal en centímetros.

3.2.3.2. Número de nudos por planta (NNP)

El número de nudos por planta se determinó al tacto, una vez que se le quitaron todas las hojas al tallo principal.

3.2.4. Etapas fenológicas

Consistió en el registro de etapas fenológicas durante todo el ciclo del cultivo, cada 25, 55, 85, 115 y 145 dds. Se registró los días a ocurrencia a etapa vegetativa (V-1 = emergencia, V-2 = tercer hoja ligulada, V-3 = quinta hoja ligulada, V-4 = octava hoja ligulada, V-5 = hoja bandera visible) y reproductiva (R-6 = panícula extendida dentro de la vaina de hoja bandera, R-7 = floración, R-8 = grano masoso suave, R-9 = grano masoso duro), de acuerdo al criterio presentado por Solórzano (2007).

3.2.5. Rendimiento de biomasa (BT)

Mediante muestreos periódicos cada 25, 55, 85, 115 y 145 días después de la siembra, se tomaron tres macollos de cada parcela experimental y se separó en sus componentes: hoja, tallo, inflorescencia y material muerto. El peso de la biomasa en base seca se obtuvo al colocar el material vegetal cosechado en una estufa con circulación forzada de aire, a 80 °C, por 72 h.

3.2.6. Variables calculadas

3.2.6.1. Índice de área foliar (IAF)

Una vez separado el forraje en sus componentes cada 25, 55, 85, 115, 145 días después de la siembra, se procedió a pasar las hojas del sorgo por el integrador electrónico de área foliar (LICOR 3100), el cual proporcionó el área foliar en cm². Se calculó el índice de área foliar (IAF) a partir de la siguiente relación:

$$\mathbf{IAF = (AF / NP) * DP / 10,000 \text{ cm}^2}$$

Donde: AF = área foliar (cm²), NP = número de plantas y DP = número de plantas por m².

3.2.6.2. Duración de área foliar (DAF, días)

La duración del área foliar (DAF), se calculó mediante el planteamiento:

$$\mathbf{DAF = (IAF_1 + IAF_2) (T_2 - T_1) / 2}$$

Donde: IAF_1 = índice de área foliar en un tiempo inicial, IAF_2 = índice de área foliar en un tiempo final, T_2, T_1 = tiempo inicial y final del intervalo (días).

3.2.6.3. Tasa de crecimiento del cultivo (TCC, $g\ m^{-2}día^{-1}$)

Con los datos de rendimiento de materia seca cada 25, 55, 85, 115 y 145 días después de la siembra se calculó la tasa de crecimiento del cultivo, en cada cultivar mediante la siguiente fórmula (Escalante y Kohashi, 2015):

$$TCC = [(PS_2 - PS_1) / (T_2 - T_1)]$$

Donde: PS_2 y PS_1 representan el peso de la materia seca de la planta en el tiempo T_2 y T_1 respectivamente.

3.2.6.4. Tasa de asimilación neta (TAN, $g\ m^{-2}día^{-1}$)

Con los datos de rendimiento de materia seca cada 25, 55, 85, 115 y 145 días después de la siembra se calculó la tasa de crecimiento del cultivo, en cada cultivar mediante la siguiente fórmula (Escalante y Kohashi, 2015):

$$TAN = [(PS_2 - PS_1) / (AF_2 - AF_1)] / [(ln AF_2 - ln AF_1) / (T_2 - T_1)]$$

Donde: PS_2 y PS_1 representan el peso de materia seca, $ln AF_2$ y $ln AF_1$ logaritmo natural del área foliar en el tiempo T_2 y T_1 , respectivamente.

3.2.7. Análisis estadístico

Los datos de las variables estudiadas se analizaron mediante análisis de varianza y aquellas que mostraron diferencias significativas se les realizó una prueba de comparación de medias (Tukey; $\alpha = 0.05$) y un análisis de correlación de Pearson, con el paquete para análisis estadístico InfoStat, para computadoras (InfoStat, 2008).

3.3. SEGUNDO EXPERIMENTO: CORTE A 90% DE RADIACIÓN INTERCEPTADA

3.3.1. Establecimiento del cultivo

Los tratamientos incluyeron cuatro cultivares de sorgo forrajero: Caña dulce, Silo miel, Esmeralda y Fortuna; bajo dos condiciones de siembra: 1) punta de riego, aplicación de una

lámina de riego de 18 cm, para la emergencia de las plántula y 2) siembra en lluvias estacionales, una vez establecida la época de lluvias. La siembra para punta de riego se realizó el 12 de abril (2013) y 23 de abril (2014); por su parte, en lluvias estacionales, el 17 de junio (2013) y 25 de junio (2014). En ambas condiciones, las siembras se realizaron a 70 cm entre surcos, con una densidad de siembra de 17 plantas m² y 40 días después de la siembra, se fertilizó, al momento del aporque, a razón de 80 kg N ha⁻¹.

3.3.2. Elementos del clima

Durante el desarrollo del experimento, se registró la temperatura semanal máxima (T máx °C) y mínima (T mín °C) y la suma semanal de la precipitación (PP, mm), durante los dos años de evaluación. Estos datos fueron proporcionados por la estación agrometeorológica del Colegio de Postgraduados.

3.3.3 Variables determinadas en el cultivo

3.3.3.1. Altura de planta (AP)

Se cortaron 17 macollos a una altura de 10 cm, para dejarlo como material de rebrote y se midió la altura de la planta principal de cada macollo desde la parte basal hasta donde llegó la última hoja o en su caso la panoja, se reportó en cm.

3.3.3.2. Número de hojas por planta (NH)

En la planta principal de cada macollo se contó el número de hojas totales que presentó.

3.3.3.3. Número de nudos por planta (NNP)

En la planta principal de cada macollo una vez contadas las hojas y desprendidas con la mano, se procedió a pasar la mano por el tallo y así se contó el número de nudos al tacto.

3.3.3.4. Número de plantas por metro cuadrado (NDP)

Para reportar el número de plantas por metro se contaron todas las plantas encontradas por cada uno de los 17 macollos, considerando como planta aquel tallo que presentó al menos una hoja.

3.3.4. Rendimiento de materia seca (RMS)

Se fue tomando la RI en campo hasta que el primer cultivar alcanzó una RI del 90% y se procedió al corte de 17 macollos en todas las parcelas experimentales, a una altura de 10 cm, y se

separó en sus componentes: hoja, tallo, inflorescencia y material muerto. El peso de la materia seca se obtuvo al colocar el material vegetal cosechado en una estufa con circulación forzada de aire, a 80 °C, por 72 h.

3.3.5. Componentes morfológicos

Una vez que la cubierta vegetal interceptó el 90% de radiación, se cortaron 17 macollos de cada parcela, una vez tomados todos los datos de los macollos del sorgo se separaron en componentes: hoja, tallo, inflorescencia y material muerto, se secaron en la estufa de circulación forzada durante 72 horas por 3 días y se reportó el peso seco por componente.

3.3.6. Variables calculadas

3.3.6.1. Índice de área foliar (IAF)

Una vez separado el forraje en sus componentes cada 25, 55, 85, 115, 145 dds, se procedió a pasar las hojas del sorgo por el integrador electrónico de área foliar (LI-COR 3100), el cual proporcionó el área foliar en cm². Se calculó el índice de área foliar (IAF) a partir de la siguiente relación:

$$\text{IAF} = (\text{AF} / \text{NP}) * \text{DP} / 10,000 \text{ cm}^2$$

Donde: AF = área foliar (cm²), NP = número de plantas y DP = número de plantas por m².

3.3.6.2. Razón de peso foliar (RPF, %)

Se calculó la razón de peso foliar con la siguiente formula:

$$\text{RPF} = (\text{Peso seco de hoja} / \text{Peso seco total}) * 100$$

3.3.7. Análisis estadístico

Los datos de las variables estudiadas se analizaron mediante un análisis de varianza y aquellas que mostraron diferencias significativas se les realizó la prueba de comparación de medias (Tukey $\alpha = 0.05$) y un análisis de correlación de Pearson, con el paquete para análisis estadístico InfoStat, para computadoras (InfoStat, 2008).

CAPÍTULO IV.
RESULTADOS, DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1. PRIMER EXPERIMENTO: ANÁLISIS DE CRECIMIENTO CON PUNTA DE RIEGO

4.1.1. Elementos del clima

En la Figura 8 que presenta los datos promedio semanales de temperaturas máximas, mínimas y suma de la precipitación, se observa que fluctuó entre 24 °C y 31 °C de T máx y entre 5 °C y 14 °C de T. mín durante el ciclo de desarrollo del sorgo forrajero. La PP estacional fue de 765 mm, 90% (624 mm) ocurrió durante el ciclo de cultivo, de los cuales: el 55% (377 mm) ocurrió durante la etapa vegetativa y 36% (247 mm) durante la etapa reproductiva respectivamente (empezando dicha etapa con panícula extendida dentro de la vaina de hoja bandera). Al respecto, Cordovés y Grizel (2009), reportan que el sorgo requiere lluvias moderadas (450-500 mm, con óptimo entre 600-750 mm) y temperatura promedio 27 °C para un óptimo crecimiento. En el sitio experimental el sorgo sufrió estrés hídrico en el mes de mayo y hasta mediados de junio, donde únicamente se tuvo una precipitación 122 mm y temperaturas máximas de 32 °C, lo que provocó un atraso en la fase vegetativa.

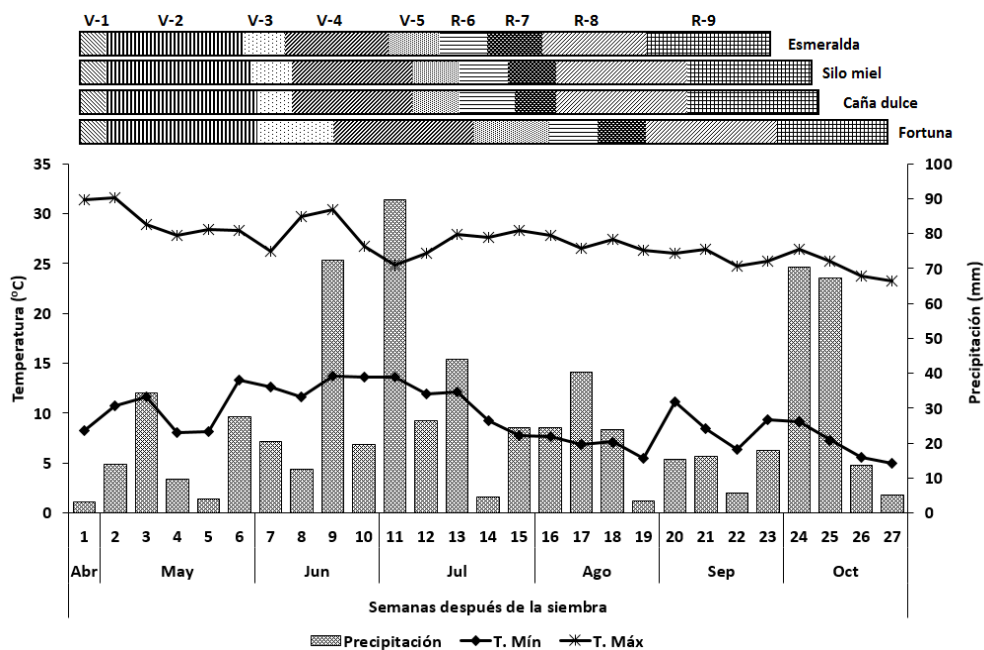


Figura 8. Fenología, media semanal de temperatura máxima, mínima y suma semanal de la precipitación, durante el desarrollo de cuatro cultivares de sorgo forrajero [*Sorghum* spp. (L.) Moench], en Montecillo, Edo. de México.

4.1.2. Etapas fenológicas

Los cultivares de sorgo evaluados presentaron diferencias en cuanto a la ocurrencia de fases fenológicas. La emergencia fue de 8 dds en los cuatro cultivares. Los cultivares Caña dulce, Silo miel y Esmeralda terminaron su etapa vegetativa entre 90 y 95 dds, Fortuna a los 114 dds. La etapa reproductiva para los tres primeros cultivares fue de 160 a 170 dds y en Fortuna a los 189 dds (Cuadro 2). Soto y Hernández (2012), al estudiar la fenología de sorgo cultivar ISIAP-Dorado, durante tres temporadas, encontraron que la etapa de emergencia a floración fluctuó entre 56 a 71 dds y la etapa de floración a madurez fue de 35 a 37 dds. González *et al.* (2005), reportan 57-69 dds a inicio de floración en nueve cultivares de sorgo forrajero. Los resultados del cultivar Esmeralda del presente estudio se acercan a los reportados por Mohankumar *et al.* (2013), al evaluar 48 líneas de sorgo en Hays, Kansas en siembra temprana (02 mayo), reportan días a floración de 67 a 95 dds. La duración en las fases fenológicas del sorgo están determinadas por el genotipo y el ambiente, dentro del cual, la temperatura y precipitación, muestran mayor influencia y pueden atrasar o alargar el ciclo de vida de las plantas (Solórzano, 2007). El amacollamiento en Caña dulce y Silo miel se observó a partir de la cuarta semana después de la emergencia, Esmeralda y Fortuna presentaron menor amacollamiento. Los cultivares Silo miel, Esmeralda y Fortuna presentaron hoja ancha y tallo grueso; mientras que Caña dulce hojas y tallos delgados.

Cuadro 2. Etapas fenológicas en cuatro cultivares de sorgo forrajero en Montecillo, Edo. de México.

Cultivares	Etapa vegetativa (dds)					Etapa reproductiva (dds)			
	V-1	V-2	V-3	V-4	V-5	R-6	R-7	R-8	R-9
Caña dulce	8	35	48	74	84	95	106	137	169
Silo miel	8	35	48	74	84	95	106	137	167
Esmeralda	8	34	46	70	80	90	102	129	158
Fortuna	8	35	58	87	102	114	125	160	189

Etapas fenológicas: vegetativas (V-1 = emergencia, V-2 = tercer hoja ligulada, V-3 = quinta hoja ligulada, V-4 = octava hoja ligulada, V-5 = hoja bandera visible) y reproductivas (R-6 = panícula extendida dentro de la vaina de hoja bandera, R-7 = floración, R-8 = grano masoso suave, R-9 = grano masoso duro).

4.1.3. Variables determinadas en el cultivo

4.1.3.1. Altura de planta (AP) y número de nudos por planta (NNP)

En las fechas evaluadas, la altura de planta (AP) y el número de nudos por planta (NNP) presentaron diferencias significativas entre cultivares (Cuadro 3). A los 55 y 115 dds, Caña dulce presentó mayor AP y NNP, seguido de Silo miel, Esmeralda y Fortuna al cuál perteneció el valor más bajo. La AP de todos los cultivares es inferior a la reportada por Amador y Boschini (2000), para sorgo negro (*Sorghum almum*), 274 cm a los 150 dds. Así mismo, Afzal *et al.* (2012), reportan AP de 194 cm en sorgo forrajero, que es inferior al máximo encontrado en el presente trabajo en Caña dulce a los 115 dds. Dichas discrepancias pueden deberse a las diferencias en los genotipos y condiciones climáticas de cada estudio, así como a las condiciones de pH y niveles de salinidad que presentó el suelo en el que se realizó la presente investigación.

Cuadro 3. Altura de planta (cm) y número de nudos por planta a 55 y 115 dds, en cuatro cultivares de sorgo forrajero en Montecillo, Edo. de México.

Cultivares	AP	NNP	AP	NNP
	55 dds		115 dds	
Caña dulce	111 a	3 a	202 a	8 a
Silo miel	92 b	3 a	142 b	6 a
Esmeralda	94 ab	2 ab	110 c	6 a
Fortuna	63 c	1 b	90 c	3 b
Media	72.5	2.2	136	6
CV (%)	9.3	23.5	9.4	19.1
Cultivar	***	***	***	***

Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según Tukey ($\alpha = 0.05$)
* = $P \leq 0.05$, ** = $P 0.01$, *** = $P 0.001$. NS : no significativo. CV : coeficiente de variación. AP : altura planta. NNP : número de nudos por planta.

4.1.4. Rendimiento de biomasa (BT, g m⁻²)

En la Figura 2 se observa que en los cultivares bajo estudio, la BT se incrementó conforme avanzó la estación de crecimiento. La máxima BT se observó en el período de 125 a 145 dds en todos los cultivares. Los cultivares Caña dulce, Silo miel y Esmeralda presentaron su máximo crecimiento en el periodo 55-85 dds con acumulación de 724, 490 y 305 g m⁻² respectivamente,

mientras que en el cultivar Fortuna fue hasta los 85-115 dds. Esto está relacionado con la etapa de elongación de los entrenudos en el sorgo, debido a que a partir de la quinta hoja ligulada, el sorgo presentó un aumento significativo en AP, tal como también lo reporta Ahmad *et al.* (2012). El cultivar Caña dulce presentó la mayor BT en menor tiempo, al tener su máxima producción a los 115 dds con 1427 g m⁻² (Figura 9). Esto es importante debido a que, entre más corto y alta producción de BT sea el ciclo del cultivo, más cortes se pueden realizar en un año. Vargas (2005), al evaluar 15 cultivares de sorgo observó diferencias ($p \leq 0.05$) en cuanto a la BT; los cuales, tuvieron un rango entre 3.3 a 6.1 t MS ha⁻¹, siendo el cultivar CIAT 138 el de mayor BT. Bolaños *et al.* (2012), obtuvo 17.1, 16.1 y 13.8 t ha⁻¹ año⁻¹ en sorgo forrajero Sweet Virginia, Big Kahuna y Sucro-sorgo, respectivamente. El uso de siembras con un riego para la emergencia, representa una oportunidad para obtener varios cortes durante el ciclo y aprovechar la presencia de temperatura y precipitación apropiadas para el crecimiento del sorgo forrajero.

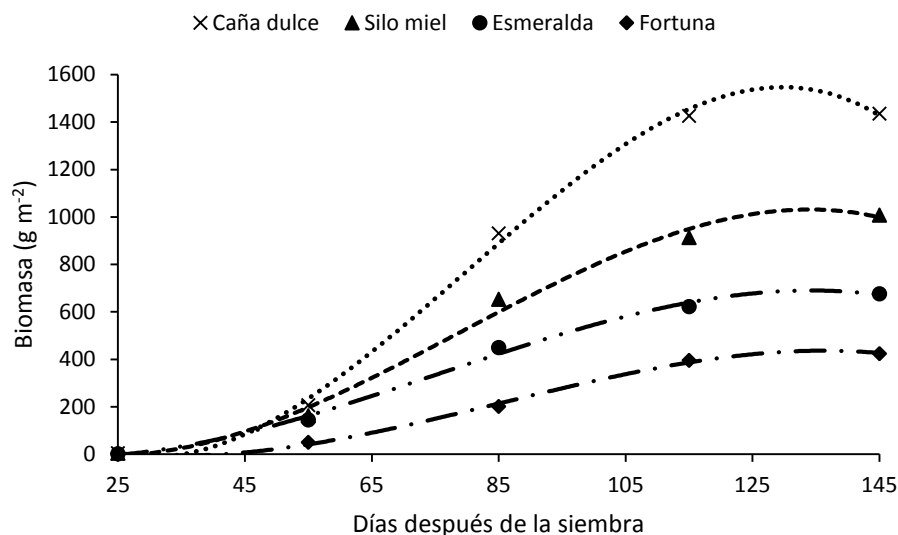


Figura 9. Dinámica de producción de biomasa (BT, g m⁻²), en cuatro cultivares de sorgo forrajero en Montecillo, Edo. de México.

4.1.5. Variables calculadas

4.1.5.1. Índice de área foliar (IAF)

Cómo se observa en la Figura 10, el IAF de los cultivares en estudio se incrementó conforme avanzó la estación de crecimiento, hasta alcanzar un máximo en el periodo 85-115 dds. Caña

dulce presentó el IAF más alto (4) a los 100 dds. Shenkut *et al.* (2013), evaluaron el cultivar Gambella-1107 y reportan IAF de 4.2, 4.9 y 1.6 para la etapa vegetativa, floración y madurez fisiológica del sorgo, respectivamente. En el presente estudio solo Caña dulce presentó valores similares al cultivar Gambella-1107, esto se debió a que presentaron un ciclo similar.

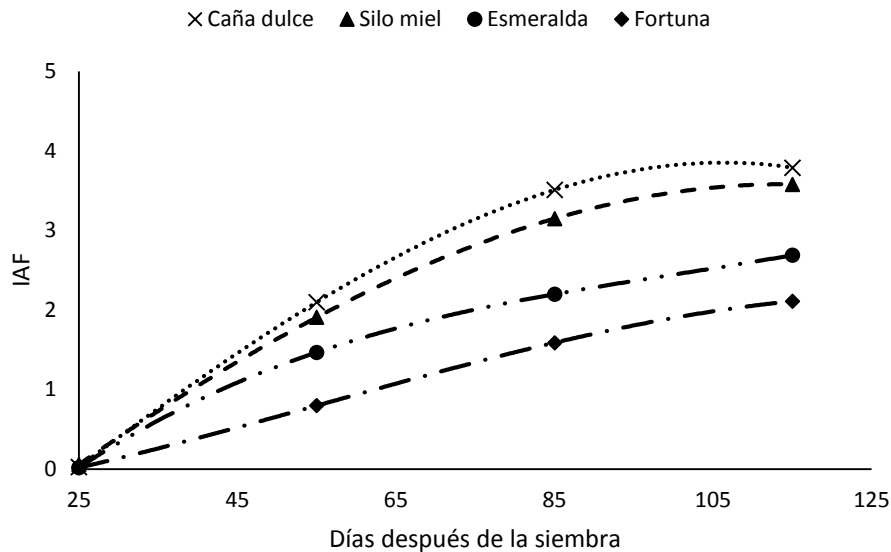


Figura 10. Dinámica del índice de área foliar (IAF), durante el desarrollo de cuatro cultivares de sorgo forrajero en Montecillo, Edo. de México.

4.1.5.2. Duración del área foliar (DAF, días)

Para la DAF en todos los periodos de evaluación se encontraron diferencias ($P \leq 0.05$) entre cultivares (Cuadro 4). En el periodo 85-115 dds, Silo miel presentó la mayor DAF con 135 días mientras que Fortuna presentó la más baja con 63 días. El mayor tamaño y duración el dosel vegetal se ve reflejado en el incremento en producción de biomasa, debido a mayor radiación interceptada. Hernández y Soto (2013), evaluaron sorgo cultivar ISIAP Dorado, donde la DAF fue 130 días, implicando mayor aprovechamiento de la radiación solar, lo cual se manifiesta en mayor crecimiento de las plantas y mayor rendimiento de MS. Estos valores son semejantes a los encontrados en el presente estudio en los cultivares Silo miel (135 días) y Caña dulce (126 días) en el periodo 85-115 dds.

Cuadro 4. Duración de área foliar (DAF), en cuatro cultivares de sorgo forrajero en Montecillo, Edo. de México.

Cultivares	0-25	25-55	55-85	85-115
	Días después de la siembra			
Caña dulce	23 a	76 a	109 a	126 a
Silo miel	30 a	76 a	101 a	135 a
Esmeralda	22 a	55 b	73 b	105 b
Fortuna	7 b	31 c	56 c	63 c
Media general	20.6	59.4	84.8	107.1
CV (%)	18.9	5.4	5.5	6.9
Cultivar	***	***	***	***

Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según Tukey ($\alpha = 0.05$)
 * = $P \leq 0.05$, ** = $P \leq 0.01$, *** = $P \leq 0.001$. NS : no significativo. CV : coeficiente de variación.

4.1.5.3. Tasa de crecimiento del cultivo (TCC, $\text{g m}^{-2}\text{día}^{-1}$)

En el Cuadro 5, se observa que en todos cultivares bajo estudio, la TCC se incrementó conforme avanzó la estación de crecimiento hasta el periodo 25-55 dds, posteriormente empezó a disminuir hasta alcanzar el final del ciclo de cultivo. Los cultivares Caña dulce, Silo miel y Esmeralda presentaron su máxima TCC en el periodo 25-55 dds con 24, 16 y 10 $\text{g m}^{-2}\text{día}^{-1}$, respectivamente; Fortuna presentó su máxima TCC en el periodo 55-85 dds con 6.5 $\text{g m}^{-2}\text{día}^{-1}$. Carrillo y Ruiz (2004), también reportan diferencias significativas en la TCC de sorgo forrajero de la siembra hasta antes de la floración. Así, reportan TCC en los cultivares Cow Vitles, Dinea Mite, Grazer, Sweet sioux y Domor (14, 18, 19, 24 $\text{g m}^{-2}\text{día}^{-1}$, respectivamente), bajo riego. En el presente estudio, solamente Caña dulce mostró TCC comparables a Domor y Silo miel comparable con Cow Vitles, debido a que también las plantas de presente estudio se encontraban en etapa vegetativa. Por otra parte, Fazeli *et al.* (2012), al evaluar la producción de pasto Sudán en regiones áridas y semiáridas con riego y una densidad de siembra de 37 plantas por m^2 , reportan TCC de 40 $\text{g m}^{-2}\text{día}^{-1}$, las diferencias se deben principalmente que en el presente trabajo se utilizó una menor densidad de siembra y un único riego para lograr la emergencia de las plantas.

Cuadro 5. Tasa de crecimiento del cultivo (TCC, g m⁻²día⁻¹), en cuatro cultivares de sorgo forrajero en Montecillo, Edo. de México.

Cultivares	0-25	25-55	55-85	85-115
	Días después de la siembra			
Caña dulce	6.8 a	24.2 a	16.4 a	0.3 a
Silo miel	5.3 ab	16.4 b	8.7 b	3.1 a
Esmeralda	4.8 b	10.2 c	5.7 b	1.8 a
Fortuna	1.6 c	5.0 d	6.5 b	1 a
Media general	4.6	13.9	9.3	1.5
CV (%)	18.9	8.5	28.8	4.6
Cultivar	***	***	***	NS

Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según Tukey ($\alpha = 0.05$)
 * = $P \leq 0.05$, ** = $P \leq 0.01$, *** = $P \leq 0.001$. NS : no significativo. CV : coeficiente de variación.

4.1.5.4. Tasa de asimilación neta (TAN, g m⁻²día⁻¹)

En el Cuadro 6, se observa que en los cultivares bajo estudio la TAN disminuyó conforme avanzó el ciclo de crecimiento. Los cultivares Caña dulce, Esmeralda, Fortuna y Silo miel presentaron su máxima TAN en el periodo 0-25 dds con 17, 14, 12, 10 g m⁻²día⁻¹, en los periodos siguientes la TAN disminuyó en todos los cultivares. Al respecto, Carrillo y Ruiz (2004), evaluaron seis cultivares de sorgo forrajero para ensilado manejado bajo riego, el cual fue cortado antes de floración (63 dds), reportaron la TAN en el cultivar Sweet Sioux de 6.7 y Dinea Mite 7 g m⁻²día⁻¹, por lo que el periodo que abarca la TAN es de 0-63 dds; sin embargo en el presente estudio en el periodo 25-55 dds se tuvieron valores similares en el cultivar Silo miel (6.7 g m⁻²día⁻¹). Mientras que Ahmad *et al.* (2013), en un experimento bajo condiciones controladas en fase vegetativa, encontraron en los cultivares JS-202, Chakwal S y JS-263 una TAN de 5.8, 5.2 y 4.1 g m⁻²día⁻¹ respectivamente, estos valores son similares a los encontrados en los cultivares Esmeralda y Fortuna en etapa vegetativa.

Cuadro 6. Tasa de asimilación neta (TAN, g m²día⁻¹), en cuatro cultivares de sorgo forrajero en Montecillo, Edo. de México.

Cultivares	0-25	25-55	55-85	85-115
	Días después de la siembra			
Caña dulce	17.3 a	10.2 a	4.5 a	0.1 a
Silo miel	10 b	6.7 b	2.5 b	0.7 a
Esmeralda	14.2 b	5.6 b	2.4 b	0.5 a
Fortuna	11.5 bc	5.5 b	3.6 ab	0.4 a
Media general	13	7	3	0.4
CV (%)	10	11.9	27	4.9
Cultivar	***	***	*	NS

Letras distintas en la misma columna indican diferencias significativas, según Tukey ($\alpha = 0.05$)
 * = $P \leq 0.05$, ** = $P \leq 0.01$, *** = $P \leq 0.001$. NS : no significativo. CV : coeficiente de variación.

4.1.6 Análisis de correlación

En el Cuadro 7, se muestra que la BT presentó un alto grado de correlación con IAF, DAF, seguido con AP, NNP y TCC.

Cuadro 7. Análisis de correlación de Pearson a 85 dds, entre biomasa (BT), índice de área foliar (IAF), duración del área foliar (DAF), tasa de asimilación neta (TAN), tasa de crecimiento del cultivo (TCC), altura de planta (AP) y número de nudos por planta (NNP).

	BT	IAF	DAF	TAN	TCC	NNP
IAF	0.96***					
DAF	0.95***	0.99				
TAN	0.31	0.27	0.26			
TCC	0.77***	0.75***	0.75***	0.83***		
NNP	0.79***	0.82***	0.81***	0.11	0.54*	
AP	0.89***	0.89***	0.87***	0.44*	0.82***	0.84***

Significancia de correlación * = $P \leq 0.05$, ** = $P \leq 0.01$ y *** = $P \leq 0.001$.

Esto indica que para lograr una mayor BT se requiere un mayor tamaño y duración de la maquinaria fotosintética, una TCC más alta, generada por plantas de mayor altura y con mayor número de nudos. Relaciones semejantes entre BT, IAF y DAF han sido reportadas en pasto Sudán por Fazeli *et al.* (2012), así mismo la correlación positiva entre DAF, IAF con AP y NNP indican que se requiere plantas de mayor altura para lograr un mayor tamaño y duración del dosel vegetal; y que una TAN más alta conduce a mayor TCC.

4.2. SEGUNDO EXPERIMENTO: CORTE A 90% DE RADIACIÓN INTERCEPTADA

4.2.1. Elementos del clima

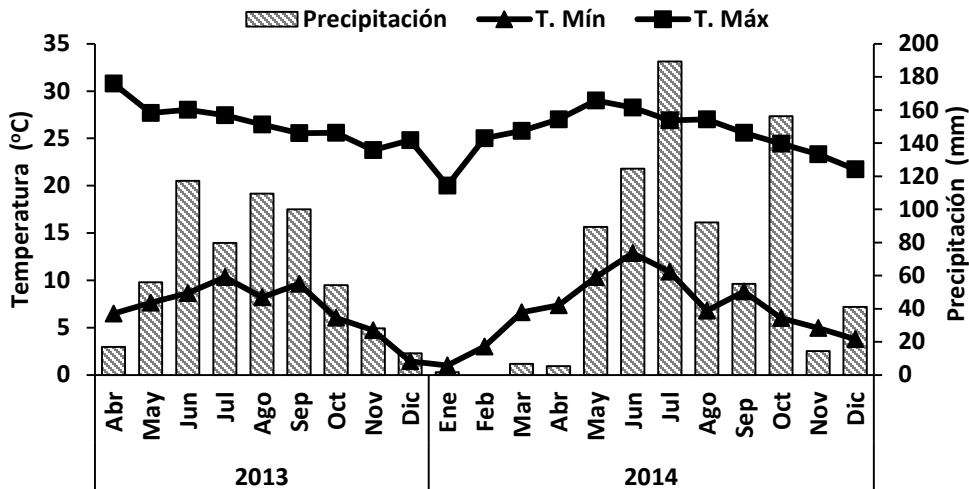


Figura 11. Temperatura mínima, máxima y precipitación acumulada mensual registrada de abril de 2013 a diciembre de 2014.

4.2.2. Variables determinadas en el cultivo

4.2.2.1. Altura de planta (AP), número de hojas (NH), número de nudos por planta (NNP), número de plantas por metro (NDP) e índice de área foliar (IAF)

No se observaron diferencias ($P \leq 0.05$; Cuadro 8) en número de hojas en condiciones de temporal y punta de riego, mientras que Moankumar *et al.* (2013), encontraron diferencias al evaluar número de hojas por planta, de 48 genotipos de sorgo [*Sorghum* spp. (L.) Moench], atributo que varió en un rango de 6 a 7 hojas por planta. El mayor IAF se observó en Silo miel: 2.8 y 3.9 para punta de riego y temporal, respectivamente, debido a hojas largas y anchas; mientras que, el

menor fue para Fortuna con 1.1 y 1.8. Sin embargo, Fazeli *et al.* (2012) al evaluar la producción de *Sorghum sudanense* en regiones áridas y semi áridas con cuatro regímenes de riego, proporcionando 100, 80, 60 y 40% de las necesidades de agua; el porcentaje de agua suministrada influyó positivamente, reportaron IAF de 6.1, 5.9, 5.3 y 4.8 respectivamente; de tal manera que, a medida que disminuyó la cantidad de agua en el suelo se redujo también el IAF. Caña dulce presentó el mayor número de plantas por m² con 73 y 65 en punta de riego y temporal, respectivamente; mientras que el menor, ocurrió en Fortuna con 26 y 20, respectivamente, por su parte Bolaños y Emile (2013), determinaron el número de plantas por m² de sorgo forrajero, sembrado en surcos distanciados a 75 y 20 cm a densidades de 33 y 65 semillas m², encontraron diferencias entre años evaluados; en 2007, tuvieron 38; mientras que, en 2008 solamente 21.

Cuadro 8. Número de hojas (NH), índice de área foliar (IAF), número de plantas por m² (NDP) y altura planta (AP), en condiciones de punta de riego y temporal, en el ciclo agrícola 2013 y 2014.

Cultivares	AP		NH		NDP		IAF	
	P. Riego	Temporal	P. Riego	Temporal	P. Riego	Temporal	P. Riego	Temporal
Silo miel	121 b	109 b	6 a	8 a	42 b	33 b	2.8 a	3.9 a
Caña dulce	170 a	165 a	6 a	8 a	73 a	65 a	2.07 b	2.6 b
Esmeralda	87 c	90 c	6 a	9 a	40 b	24 bc	1.68 b	2.9 b
Fortuna	76 c	67 d	6 a	7 a	26 c	20 c	1.13 c	1.8 c
Media	113	107	6	8	45	35	1.9	2.8
CV (%)	11.81	12.1	20.2	48.4	58.61	19.26	32.91	16.6
Cultivar	***	***	NS	NS	***	***	***	***

abcd = diferentes letras minúsculas en la misma columna de cada variable, indican diferencias significativas Tukey ($\alpha = 0.05$). Significancia * = $P \leq 0.05$, ** = $P \leq 0.01$, *** = $P \leq 0.001$, NS = No significativo.

El cultivar Caña dulce presentó mayor altura de planta ($P \leq 0.05$) con 170 cm en punta de riego y 165 cm en temporal, esto se debió a que es un cultivar de porte alto y que presentó un mayor número de plantas m², lo que ocasiono una mayor elongación de los entrenudos por competencia

por el espacio y nutrientes (Rodríguez *et al.*, 1994), mientras que Fortuna fue la que presentó menor altura con 76 cm y 67 para punta de riego y temporal, respectivamente, mientras que Abzal *et al.* (2012), evaluaron la altura de planta de sorgo a diferentes niveles de fertilización de nitrógeno 0, 50, 75 y 100 kg de N ha⁻¹ en forma de urea, encontraron que a medida que se incrementó el nitrógeno (0 kg N ha⁻¹), aumentó la altura de planta de 155 cm, a 194 cm, con 100 kg N ha⁻¹. Por su parte Moankumar *et al.* (2013), encontraron diferencias al evaluar altura de planta de 48 genotipos de sorgo, la cual varió de 73 cm, en el genotipo ARCH10731 (PI574578 R/3/KS118B-1), a 207 cm el genotipo Hong KeZi.

4.2.3. Rendimiento de materia seca (RMS, Kg ha⁻¹)

Se observaron diferencias ($P \leq 0.001$; Cuadro 9) para RMS entre cultivares para ambas condiciones de siembra: punta de riego y temporal. En promedio los dos años evaluados, la siembra de punta de riego presentó un rendimiento de 11,305 kg MS ha⁻¹, mientras que en temporal 5,707 kg MS ha⁻¹, esto se debió a que punta de riego tuvo un ciclo de cultivo mayor (abril-noviembre) lo que permitió que se realizaran 3 cortes por año y para temporal (junio-noviembre), solamente se realizaron dos cortes por año, durante los dos años evaluados. Los cultivares que presentaron mayor rendimiento ($P \leq 0.05$) en ambas condiciones de siembra fueron: Caña dulce con 11,808 y Silo miel 11,066 kg MS ha⁻¹, mientras que el cultivar que presentó menor rendimiento fue Fortuna con 3631 kg MS ha⁻¹. Los cultivares Caña dulce y Silo miel fueron los que mejor se adaptaron a condiciones de suelo con pH alcalino, pobre en materia orgánica del ex lago de Texcoco y temperaturas nocturnas por debajo de 10 °C. Bolaños *et al.* (2012), encontraron rendimientos similares al evaluar tres cultivares de sorgo para grano (Solarius, Aralba y Topsilo) y tres cultivares de sorgo forrajero (Sweet Virginia, Big Kauna y Sucrosorgho), en donde el RMS varió de 11,100 kg MS ha⁻¹ del cultivar Toposilo a 17,120 kg MS ha⁻¹ de Sweet virginia. Por su parte, Bean *et al.* (2013), compararon seis tipos de sorgo: SS pasto Sudán, SS-PS pasto Sudán sensible al fotoperiodo, FS sorgo forrajero, FS sorgo forrajero con nervadura café, FS-PS-BMR, sorgo forrajero sensible al fotoperiodo con nervadura café y sorgo para grano; el pasto Sudán presentó menor RMS con 12,600 kg MS ha⁻¹ y el cultivar de mayor RMS, con fotoperiodo sensible, fue pasto Sudán, con 21,100 kg MS ha⁻¹.

Cuadro 9. Rendimiento anual (kg MS ha⁻¹) de cuatro cultivares de sorgo forrajero en condiciones de punta de riego y temporal, en Montecillo, Edo. de México durante los ciclos agrícolas 2013 y 2014.

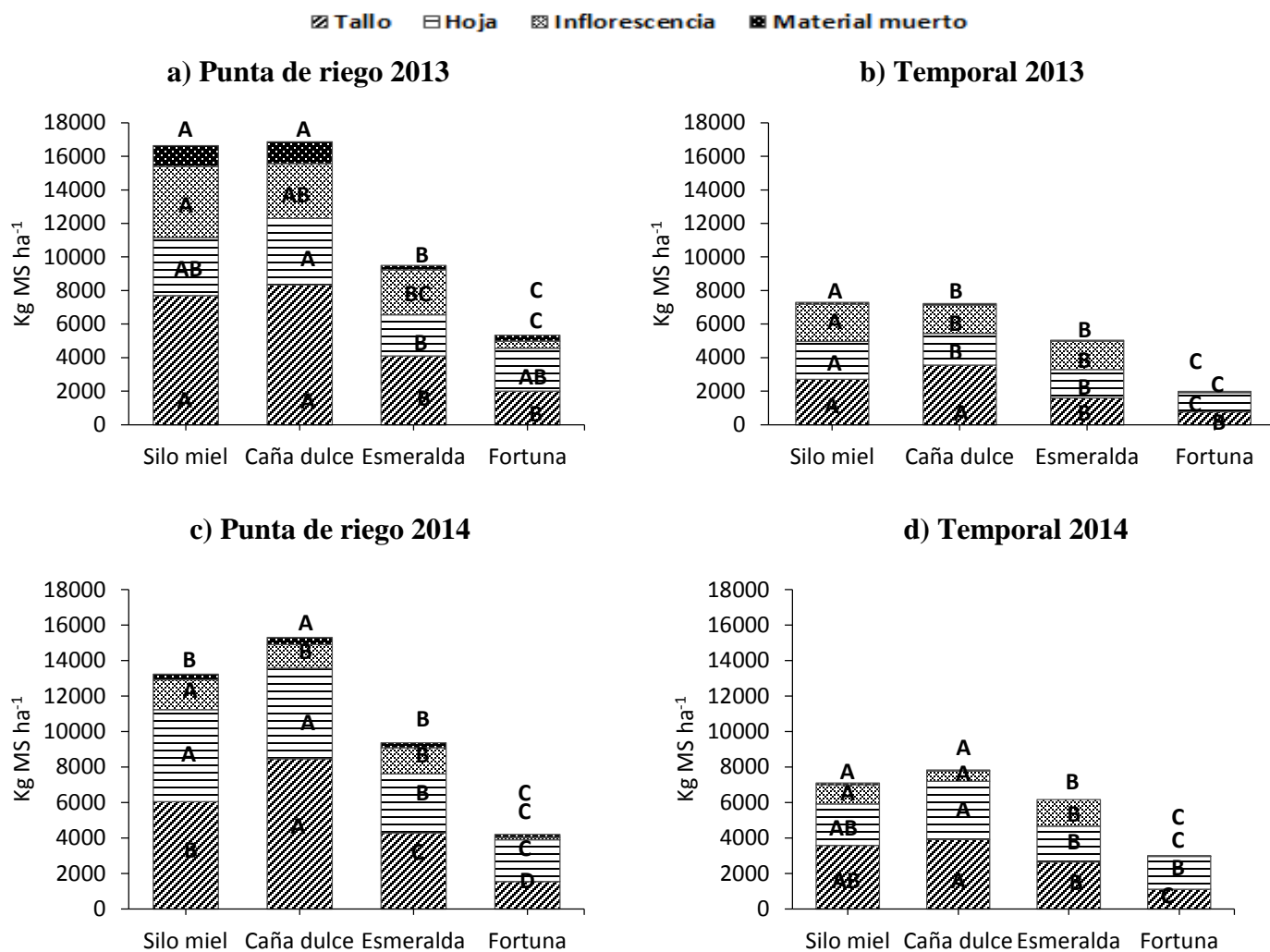
Cultivares	Punta de riego	Temporal	Media	EE	Significancia
Silo miel	14 930 Aa	7 203 Ab	11 066 A	461	***
Caña dulce	16 087 Aa	7 528 Ab	11 808 A	310	***
Esmeralda	9 434 Ba	5 603 Bb	7 519 B	195	***
Fortuna	4 768 Ca	2 494 Cb	3 631 C	582	*
Media	11 305 a	5 707 b			
EEM	1023	308			
Significancia	***	***			

ABCD = diferentes letras mayúsculas en la misma columna de cada variable, indican diferencias significativas en condición de punta de riego y temporal Tukey ($\alpha = 0.05$). ab = diferentes letras minúsculas en la misma fila de cada cultivar, indican diferencias significativas Tukey ($\alpha = 0.05$). EEM : Error Estándar de la Media. Significancia * = $P \leq 0.05$, ** = $P \leq 0.01$, *** = $P \leq 0.001$.

4.2.4. Componentes morfológicos

En promedio, el total del RMS se distribuyó en 44% tallo, 38% hoja, 16% inflorescencia y 3% material muerto (Figura 12). En punta de riego 2013, el cultivar Caña dulce fue el que presentó mayor RMS de hoja (5,088 kg MS ha⁻¹), Silo miel y Caña dulce (3,468 y 3,980 kg MS ha⁻¹), siendo las hojas el componente más importante en el consumo de forraje ya que tiene mayor digestibilidad, proteína, minerales y menor contenido de lignina, fibra detergente neutro y ácido (Gutiérrez *et al.*, 2013). El cultivar que presentó menor RMS de hoja fue Esmeralda (2,455 kg ha⁻¹); mientras que en 2014, fue Fortuna (2,353 kg ha⁻¹). En temporal 2013, Silo miel fue el que mostró mayor RMS de hoja con (2,260 kg ha⁻¹) y el de menor rendimiento, Fortuna (1,154 kg ha⁻¹); mientras que, en temporal 2014 Caña dulce registró el mayor RMS de hoja 3,282 kg ha⁻¹ y Fortuna, la que obtuvo el menor RMS de hoja, con 1,843 kg MS ha⁻¹. Amador y Boschini (2000), determinaron la distribución de los componentes morfológicos del sorgo negro (*Sorghum*

almum), encontraron que a 57 dds el RMS fue de 1,395 kg ha⁻¹, 50% en hoja y 50% tallo; posteriormente, el rendimiento del cultivo se incrementó con mayor aporte de tallos.



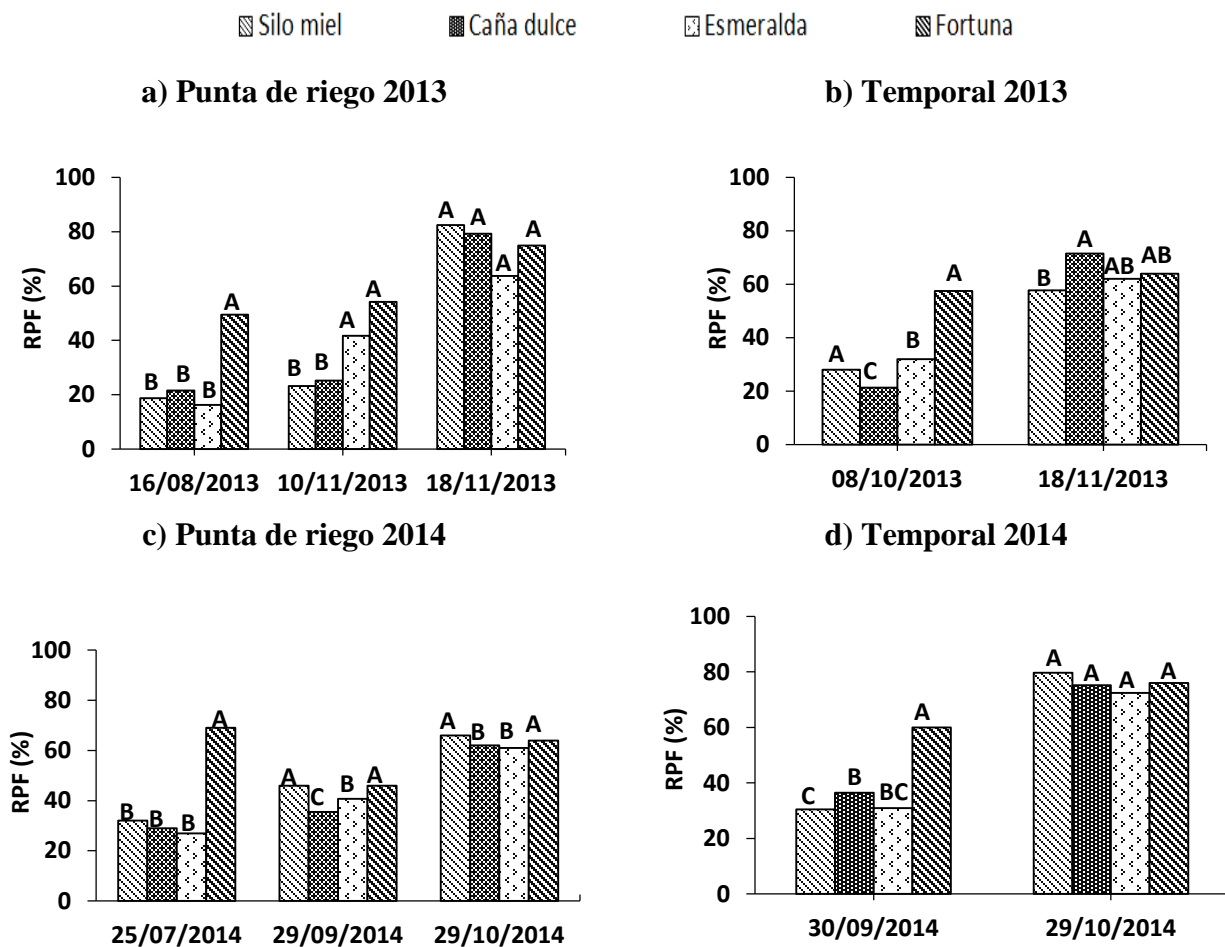
Letras diferentes en los mismos colores de las misma figura indican diferencias estadísticas Tukey ($\alpha = 0.05$)

Figura 12. Distribución de los componentes morfológicos (kg MS ha⁻¹) en cuatro cultivares de sorgo forrajero, en condiciones de punta de riego y temporal, durante los ciclos agrícolas 2013 y 2014.

4.2.5. Variables calculadas

4.2.5.2. Razón de peso foliar

La razón de peso foliar fue mayor ($P \leq 0.05$) en el primer corte en temporal y para condiciones de punta de riego se observó en Fortuna (Figura 13); mientras que, para el segundo corte, en 2013, la RPF observada fue para Fortuna (54%), Esmeralda (41%) y en 2014 Fortuna (46%) y Silo miel (46%), en el tercer corte en 2013 no existieron diferencias ($P \leq 0.05$), mientras que en 2014 Silo miel (66%) y Fortuna (64%) presentaron mayor razón de peso foliar.



Las letras sobre las barras indican diferencias estadísticas sobre cada fecha de corte Tukey ($\alpha = 0.05$)

Figura 13. Razón de peso foliar de cuatro cultivares de sorgo forrajero en condiciones de punta de riego y temporal, en Montecillo, Edo. de México durante los ciclos agrícolas 2013 y 2014.

En temporal en el último corte Caña dulce (71%) presentó mayor razón de peso foliar ($P \leq 0.05$) y la menor fue para Silo miel (57%), en 2014 no se encontraron diferencias ($P \leq 0.05$) entre los cuatro cultivares. Carrillo y Ruiz (2004), encontraron que la razón de peso foliar se correlacionó negativamente ($r = -0.783$, $P \leq 0.01$) con producción de materia seca total, indicando que a medida que se asigna más materia seca a hojas, menor es la producción.

4.2.6. Análisis de correlación

Se observó una correlación positiva (Cuadro 10) entre número de hojas, altura de planta, IAF, RPF, MST, RMS ($P \leq 0.001$) y NP, MSF ($P \leq 0.05$); altura de planta con IAF, RPF, MSH, MSI ($P \leq 0.01$), NP, MM ($P \leq 0.05$); número de plantas m^2 con MSF ($P \leq 0.001$) y MM ($P \leq 0.05$), lo cual es indicativo de la importancia de la dinámica de amacollamiento para la mayor producción de hoja; índice de área foliar con MSI ($P \leq 0.001$), MM ($P \leq 0.01$); razón de peso foliar con MM ($P \leq 0.001$); materia seca de tallo con MSI, MM ($P \leq 0.001$); materia seca de hoja con MSI, MM ($P \leq 0.05$); materia muerta con RMS ($P \leq 0.001$).

Cuadro 10. Correlación de Pearson entre variables morfológicas y de rendimiento de cuatro cultivares de sorgo forrajero en condiciones de punta de riego y temporal, en los ciclos agrícolas 2013 y 2014.

	NH	AP	NP	IAF	RPF	MST	MSH	MSI	MM
AP	0.25***								
NP	-0.05*	0.07*							
IAF	0.52***	0.41***	-0.04						
RPF	-0.46***	-0.48***	0.14	-0.74					
MST	0.43***	0.56	0.01	0.83	-0.85				
MSH	0.53	0.43***	0.02	0.96	-0.74	0.87			
MSI	0.18*	0.34***	-0.16**	0.33***	-0.86	0.6***	0.2*		
MM	-0.17**	0.13*	0.49***	0.15**	-0.35***	0.34***	0.18*	0.2*	
RMS	0.48***	0.55	-0.02	0.88	-0.88	0.98	0.89	0.74	0.42***

RMS : rendimiento de materia seca, NH : número de hojas, AP : altura planta, NDP : número de plantas por m^2 , IAF : índice de área foliar, RPF : razón de peso foliar, MST : materia seca de tallo, MSH : materia seca de hoja, MSI : materia seca de inflorescencia, MM : materia muerta. Significancia de correlación * = $P \leq 0.05$, ** = $P \leq 0.01$ y *** = $P \leq 0.001$.

Carrillo y Ruiz (2004), reportan una correlación negativa ($r = -0.624$, $P \leq 0.01$) entre IAF y RPF; por otra parte, producción de materia seca con RPF ($r = -0.784$, $P \leq 0.01$). Moghaddam *et al.* (2007), evaluaron la aplicación de urea en dos cultivares de sorgo Sepideh y Kirnia donde se correlacionan materia seca de hoja con área foliar ($r = 0.508$, $P \leq 0.01$), área específica foliar con área foliar ($r = 0.628$, $P \leq 0.01$), altura de planta con materia seca total ($r = 0.402$, $P \leq 0.05$) y área específica foliar con materia seca de hoja ($r = -0.561$, $P \leq 0.05$).

4.3. CONCLUSIONES

4.3.1. Primer experimento: Análisis de crecimiento con punta de riego

El cultivar Esmeralda presentó el ciclo de cultivo más corto. El cultivar Caña dulce presentó mayor altura de planta (AP), biomasa (BT), índice área foliar (IAF), tasa de asimilación neta (TAN) y tasa de crecimiento del cultivo (TCC), mientras que Silo miel presentó mayor duración de área foliar (DAF). La biomasa se correlacionó positivamente con AP, IAF, DAF y TCC. Para las condiciones climáticas y del suelo de Montecillo, se recomienda el cultivar Caña dulce debido a mayor AP, BT, IAF, TCC y TAN.

4.3.2. Segundo experimento: Corte a 90% de radiación interceptada

El rendimiento de forraje se duplicó cuando se sembró con punta de riego, con respecto a siembras en temporal; similarmente, la distribución de la disponibilidad de forraje se amplió. Los cultivares que presentaron mayor rendimiento de forraje fueron Caña dulce y Silo miel, tanto en punta de riego como temporal. Caña dulce fue el que presentó mayor número de plantas por m^2 y altura de planta. Sin embargo, Silo miel presentó un IAF superior. La altura de planta se correlacionó positivamente con IAF, RPF y rendimiento de hoja, y RMS con número de hojas por planta. La siembra a punta de riego es una opción para aprovechar las épocas de mayor temperatura y mejorar el rendimiento y distribución de la producción de forraje en sorgo en el Altiplano Central de México.

5. LITERATURA CITADA

- Afzal, M., Ahmad, A. and Ahmad, A. U. H. 2012. Effect of nitrogen on growth and yield of sorghum forage (*Sorghum bicolor* (L.) Moench CV). Under three cuttings system. *Cercetari Agronomice in Moldova* 45(4): 152.
- Agencia de Servicios a la Comercialización y Desarrollo de Mercados Agropecuarios. (ASERCA). 1997. El sorgo mexicano: entre la autosuficiencia y la dependencia externa. *Revista Claridades Agropecuarias* 46: 3-13.
- Ahmad, S., Lorenzo, B., Muhammad. A. and Muhammad, A. M. 2013. Growth response and plant water status in forage sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) cultivars subjected to decreasing levels of soil moisture. *Australian Journal of Crop Science* 7 (6): 801-808.
- Amador, A. L. y Boschini, C. 2000. Calidad nutricional de la planta de sorgo negro forrajero (*Sorghum alnum*) para alimentación animal. *Agronomía Mesoamericana* 11(2): 79-84.
- Barbanti, L., Grandi, S., Vecchi, A. and Venturi, G. 2006. Sweet and fiber sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench), energy crops in the frame of environmental protection from excessive nitrogen loads. *European Journal of Agronomy* 25: 30–39.
- Beadle, C. L. 1988. Análisis de crecimiento vegetal. *In: J. Coombs et al.* (eds.) *Técnicas en Fotosíntesis y Bioproductividad*. Colegio de Postgraduados, Texcoco, Méx. pp: 17-21.
- Bean, B. W., Baumhardt, R. L., McCollum III, F.T. and McCuistion, K. C. 2013. Comparison of sorghum classes for grain and forage yield and forage nutritive value. *Field Crops Research* 142: 20–26.
- Bogdan, A. V. 1997. Pastos tropicales y plantas de forraje. A. G. T. Editor, S. A. México, D. F. 461p.
- Bolaños, A. E. D. y Emile, J. C. 2011. Distancia entre surcos en el rendimiento y calidad de la materia seca de maíz y de sorgo. *Rev Mex Cienc Pecu* 2: 299-312.
- Bolaños, A. E. D., Emile, J. C. y Audebert, G. 2012. Rendimiento y calidad de sorgo con y sin nervadura café. *Rev. Mexicana de Ciencias Agrícolas* 3: 441-449.
- Bolaños, A. E. D., Claude, E. J. y Guillaume, A. 2012. Rendimiento y calidad de híbridos de sorgo con y sin nervadura café. *Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas* 3(2): 441-449.
- Bolaños, A. E. D. y Emile, J. C. 2013. Efecto de la distancia entre surcos y densidad de siembra en el rendimiento y calidad del forraje de sorgo. *Rev Mex Cienc Pecu* 4(2): 161-176.

- Borrell, A. K. and G. L. Hammer. 2000. Nitrogen dynamics and the physiological basis of stay-green in sorghum. *CropSci* 40: 1295-1307.
- Bragachini, M., Cattani, P., Gallardo, M. y Peireti, J. Forrajes conservados de alta calidad y aspectos relacionados al manejo nutricional. Inta. Cordova, Argentina. 325 p.
- Butler, T. and Bean. 2005. Forage sorghum production guide. Stephenville: Texas Agricultural Experiment Station. Available from. <http://www.soilcropandmore.info/crops/Annual-Forage-Sorghum/ForageSorghumProdGuide.pdf>
- Cañeque, M. V. y Sancha, S. J. L. 1998. Ensilado de forraje y su empleo en la alimentación de rumiantes. Mundiprensa. Madrid, España. 260 p.
- Caravaca, R. F. P., Castel, G. J. M., Guzmán, G. J. L., Delgado, P. M., Mena, G. Y. M., Alcalde, J. A. y González, P. R. 2005. Bases de la producción animal. Manuales Universitarios. Universidad de Sevilla. Sevilla, España. 511p.
- Cárdenas, M. J. V., Solorio, S. F. J. y Sandoval, C. C. A. 2004. Ensilaje de Forrajes: alternativa para la alimentación de rumiantes en el trópico. Edición de la Universidad Autónoma de Yucatán. 51 p.
- Carrillo, J. C. y Ruiz, J. 2004. Producción de forraje en sorgo y mijo: variables de crecimiento. *Agronomía Mesoamericana* 15(1): 69-76.
- Castleberry, R. M. 1973. Effects on thinnings at different growth stages on morphology and yield of grain sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). Lincoln, University of Nebraska. Annual report, No.7. pp: 104-112.
- Castro, N. S., Ortiz, C. J., Mendoza, C. M. y Zavala G. F. 2000. Producción de biomasa en líneas de sorgo como respuesta al estrés hídrico. *Rev. Fitotec. Mex* 23(2): 321-334.
- Cautín, R. y Agusti, M. 2005. Phenological growth states of the cherimoya tree (*Annona cherimola* Mill.) *Scientia Horticultura* 105: 491-597.
- Cerutti, A. 2011. Maíz y sorgo caracterización de cultivares. Ed. Eduvim. Argentina. 70 p.
- Cerutti, A. F. 2011. Maíz y sorgo para Silage: Caracterización de Cultivares. Ed. Eduvim. Argentina. 70 p.
- Cordovés, B. G. y Grizel, M. D. 2009. Sorgo dulce: sus potencialidades productivas. *ICIDCA* 48: 15-21.

- Correa, U. A. 2001. El sorgo en la producción animal. CREAS zona Oeste, Gacetilla Informativa No. 166. P.4. (http://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/maiz_sorgo/39-Sorgo_forrajero_en_produccion_animal.pdf). Revisado 10 de junio de 2015).
- Cruz, C. J. y Garay, J. 2012. Fenología y fisiología del sorgo. *In*: Cruz C. J., J. A. Garay, J. H. Veneciano. El cultivo de sorgo en San Luis. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Anguil, Argentina. Pp: 15-18.
- Da Silva, S. C. y Hernández, G. A. 2010. Manejo del pastoreo en praderas tropicales. En: Los forrajes y su impacto en el trópico. Velasco ME editor. Chiapas, México: UNACH. Pp: 63-95.
- Da Silva, S. C., Oliveira, B. A. A. and Carnevalli, R. A., Castro, U. M., Oliveira, B. F., Hodgson, J. C., Matthew, G. C., Arnold, J. P. and Morais, G. 2009. Sward structural characteristics and herbage accumulation of *Panicum maximum* cv. mombaça subjected to rotational stocking managements. *Sci. Agric* 66 (1): 8-19.
- Dahlberg, J. A. and Wasylkova, K. 1996. Image and statistical analyses of early sorghum remains (8000 B. P.) from the Nabta Playa archaeological site in the Western Desert, southern Egypt. *Veg Hist Archaeobot* 5: 293-299
- Dahlberg, J., Berenji, J., Sikora, V. and Latkovic, D. 2011. Assessing sorghum [*Sorghum bicolor* (L) Moench.] germplasm for new traits: food, fuels & unique uses. *Maydica* 56: 85-92.
- De Wet, J. M. J. and Harlan, J. R. 1971. The origin and domestication of *Sorghum bicolor*. *Econ Bot* 25: 128-135.
- De Wet, J. M. J. 1977. Domestication of African cereals. *Afr Econ Hist* 3: 15-32
- De Wet, J. M. J. 1978. Systematics and evaluations of *Sorghum* sect. *Sorghum* (Gramineae). *Amer. Journal of Botany* 65: 477-484.
- Di, R. J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., González, L., Tablada, M. y Robledo, C. W. 2008. InfoStat. Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. 336 p.
- Doggett, H. 1965. Disruptive selection in crop development. *Nature* 206(4981): 279-280.
- Doggett, H. 1970. Sorghum, Tropical Agriculture Series Scientific and Technical, USA. Longmans. 420 p.

- Doggett, H. 1988. *Sorghum* – Second edition. Tropical Agriculture Series. UK, IDRC. Canada: Longman Scientific and Technical Publishers. 512 p.
- Escalante, E. J. A. 1999. Área foliar, senescencia y rendimiento del girasol de humedad residual en función del nitrógeno. *Terra Latinoamericana* 17: 149-157.
- Escalante, E. J. A. y Kohashi, S. J. 2015. El rendimiento y crecimiento del frijol. Manual para la toma de datos. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco. México. 84 p.
- Estrada, M. A. 1974. Evaluación de nuevos sorgos híbridos experimentales para granos del INIA. En el municipio de Zapopan, Jalisco. Tesis Licenciatura.
- Fazeli, R. M., Yarnian, M. and Rahimzadeh, K. F. 2012. Effect of polymer and irrigation regimes on matter yield and several physiological traits of forage sorghum. *African Journal of Biotechnology* 11(48): 10834-10840.
- Food and Agriculture Organization of the United Nations Statistics Division (FAOSTAT). <http://faostat3.fao.org/download/Q/QC/E>. Revisada, 23 de Marzo de 2015.
- Galarza, M., Miramontes J. M., Castillo, M. J. y Rebolledo, V. M. A. 2003. Situación actual y perspectivas de la producción de sorgo en México 1992-2004. Servicio de información y estadística agroalimentaria y pesquera. (<http://www.siap.sagarpa.gob.mx>, revisada el 12 de Enero de 2015).
- Galindo, T. M. 1975. Estudio y comparación de cultivares de sorgo para ensilaje bajo condiciones de riego en el Valle de Juchitan, Oaxaca. Tesis de Licenciatura. Universidad de Guadalajara. 31 p.
- Gallarino, H. E. 2008. Manejo de sorgos forrajeros, su aprovechamiento. Sitio argentino de producción animal. 2 p. (http://www.produccion-animal.com.ar/produccion_y_manejo_pasturas/maiz_sorgo/113-Sorgos.pdf. Revisada 20 Mayo de 2015).
- García, E. L. 2005. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Cuarta Edición. UNAM, D. F. 217 p.
- Gardner, F. R., Pearce, B. and Mitchel, R. 1985. *Physiology of Crop Plants*. Iowa State University Press: Ames, IA, USA. pp: 187-208.
- González, T. R. O., Sequera, M. W. Y. y Graterol, E. Y. 2005. Comportamiento de nueve cultivares de sorgo forrajero en Portuguesa, Venezuela. *Pastos* 35(2): 151-162.

- Graveros, I. E. 2003. Cultivos sorgos graníferos. (en línea). [http:// www. Produccion.com.ar/2003/03ago-10.htm](http://www.Produccion.com.ar/2003/03ago-10.htm). Revisada 2 enero 2015.
- Gutiérrez, P. N., Chow, W. Z., Bastianelli, D. L., Bonnal, R., Obando, S. y Trouche. G. 2013. Productividad y calidad nutricional de genotipos de sorgo para doble propósito. *Agronomía Mesoamericana* 24(1): 119-131.
- Hernández, G. A. y Martínez, H. P. A. 1997. Utilización de pasturas tropicales. *In*: Torres H. G. y P. Díaz R. (eds). *Producción de Ovinos en Zonas Tropicales*. Fundación Produce-INIFAP. pp: 8-24.
- Hernández, M. M., Mendoza, O. L. E., Solís, M. E., Aguilar, A. J. L. y Grageda, C. O. A. 2005. Caracterización epidemiológica de la tolerancia al Cornezuelo (*Claviceps africana* Frederickson, Mantle y de Milliano) en diez líneas de sorgo [*Sorghum bicolor* (L.) Moench.]. *Revista Mexicana de Fitopatología* 23(1): 42-48.
- Hernández, C. N. y Soto, C. F. 2013. Determinación de índices de eficiencia en los cultivos de maíz y sorgo establecidos en diferentes fechas de siembra y su influencia sobre el rendimiento. *Cultivos Tropicales* 34(29): 24-29.
- Hodgson, J. 1990. *Grazing management. Science into practice*. Logman Scientific & Technical. Ed. Harlow. England. 204 p.
- House R. L. 1985. *A guide to Sorghum breeding*. 3ra Edition. ICRISAT. Andhra Pradesh, India. 206 <http://www.ag.ndsu.edu/pubs/ansci/range/as1252.pdf>
- Hunt, W. F. 1970. The influence of leaf death on the rate of accumulation of green herbage during pasture regrowth. *Journal of Applied Ecology* 7: 41-50.
- Hunt, R. 1978. *Plant Growth Analysis*. Studies in biology 96. Edward Arnold Publishers, London. 67 p.
- Hunt, R. J. W., Wilson, D., Handy, W. and Sweeney, D. G. 1984. Integrated analysis of growth and light interception in winter lettuce. *Analytical methods and environmental influences*. *Ann. Bot* 54: 743-757.
- InfoStat. 2008. *Manual del usuario*. Ed. Brujas. Córdoba Argentina. 336 p.
- Jones, J. J. M., Ochoa, R. F., Sherwell, C. P., Cruz, F. C., Knutson, R. D., Westhoff, P. C. y Scott, D. B. 2009. *Escenario Base del Sector Agropecuario en México, Proyecciones 2009*

- 2018.<http://www.sagarpa.gob.mx/agronegocios/Documents/EBespa%C3%B1ol300909.pdf>. Revisada 26 de Marzo de 20015.
- Kapanigowda, M. H., Perumal, R., Aiken, R. M., Herald, T. J., Bean, S. R. and Little, C. R. 2013. Analyses of sorghum [*Sorghum bicolor* (L.) Moench] lines and hybrids in response to early-season planting and cool conditions. *Can. J. Plant Sci* 93: 773-784.
- Karper, R. E. and Quinby, J. R. 1982. Sorghum its production utilization and breeding. *Econ, Botany Journal* 1(4): 355-371.
- Korte, C. J., Watkin, B. R. and Harris, W. 1982. Use of residual leaf area index and light interception as criteria for spring-grazing management of a ryegrass-dominant pasture. *New Zealand Journal of Agricultural Research* 25: 309-319.
- Krieg, D. R. 2000. Cotton water relations. *In: D.M. Oosterhuis (ed.) Proceeding of the 2000 Cotton Research Meeting and Summaries of Cotton Research Progress*. Agricultural Experiment Station, University of Kansas. USA. p. 7.
- Landers, J. N. 2007. Tropical crop-livestock systems in conservation agriculture. The Brazilian experience. *FAO. Rome, Italy*. 92 p.
- León, V. H., Mendoza, O. L. E., Castillo, G. F., Cervantes, S. T. y Martínez, G. A. 2009. Evaluación de dos generaciones de híbridos y progenitores de sorgo tolerantes al frío. II: aptitud combinatoria, heterosis y heterobeltiosis. *Agrociencia* 43(6): 609-623.
- Mann, J. A., Kimber, C. T., and Miller, F. R. 1983. The origin and early cultivation of sorghums in Africa. *Bulletin* 1454. Texas A&M. University. College Station. pp: 17-21.
- Maranville, J. W. and Madhavan, S. 2002. Physiological adaptations for nitrogen use efficiency in sorghum. *Plant and soil* 245: 25-34.
- Marsalis, M. A. 2011. Sorghum forage production in New Mexico. New Mexico State University -Cooperative Extension Service. Revisado el 10 de Marzo de 2015. http://aces.nmsu.edu/pubs/_a/a-332.pdf.
- Marsalis, M. A., Angadi, S. V. and Contreras, G. F. E. 2010. Dry matter yield and nutritive value of corn, forage sorghum, and BMR forage sorghum at different plant populations and nitrogen rates. *Field Crops Research* 116: 52–57.

- Martínez, V. J.; Silva, R. S y Cuellar, V. E. 2005. Guía para cultivar sorgo forrajero de riego para pastoreo, verdeo y henificado en el norte y centro de Coahuila. Folleto para productores no. 7. Inifap. 10 p.
- Mattera, J. L., Romeroa, A. L., Cuatrína, P. S., Cornaglia, A. A. and Grimoldi, A. 2013. Yield components, light interception and radiation use efficiency of lucerne (*Medicago sativa* L.) in response to row spacing. *European Journal of Agronomy* 45: 87–95
- Mayers, R. J. K. 1980. The root system of a grain sorghum crop. *Field Crops Research* 3: 53-64.
- Moghaddam H., Reza, C. M., Rhimian M. H., Savagheby, F. G. and Hosein Z. A. 2007. Effect of method and time of nitrogen fertilizer application on growth, development and yield of grain sorghum. *Asian Journal of Plant Sciences* 6(1): 93-97.
- Mohankumar, H. K., Ramasamy, P., Robert, M. A., Thomas, J. H., Scott, R. B. and Christopher, R. L. 2013. Analyses of sorghum (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) lines and hybrids in response to early-season planting and cool conditions. *Canadian Journal of Plant Science* 93: 773-784.
- Muslera, P. E. y Ratera G. C. 1991. Praderas y Forrajes Producción y Aprovechamiento 2ª. Edición Ed. Ediciones Mundi-Prensa. Madrid. 702 p.
- Narayanan, S., Aiken, M. R., Prasad, V. P., Xin, Z. G. P. and Yu, J. 2013. A simple quantitative model to predict leaf area index in sorghum. *Crop Ecology & Physiology* 106(1): 219-226.
- Núñez, H. G. y Cantú, B. J. 2001. Producción, composición química y digestibilidad del forraje de sorgo x Sudán de nervadura café en la región norte de México. *Téc. Pecu. Méx* 38(3): 177-187.
- Núñez H. G., Payán, G. J. A., Pena, R. A., González, C. F., Ruiz, B. O. y Arzola, C. A. 2010. Caracterización agronómica y nutricional del forraje de cultivares de especies anuales en la región norte de México. *Rev Mex Cienc Pecu* 1: 85-98.
- Oliver, A. L., Pedersen, J. F., Grant, R. J. and Klopfenstein T. J. 2005. Comparative effects of the sorghum bmr-6 and bmr-12 genes: I. Forage sorghum yield and quality. *CropSci* 45: 2234-2239.

- Osechas, D. 1987. Contenido de ácido cianhídrico en hojas y tallos de sorgo Yucatan a diferentes semanas de edad. 12 Jornadas Agronómicas, 33. Resúmenes de trabajos. Maracay (Venezuela).
- Pérez, A., Saucedo, O., Iglesias, J., Wencomo, H. B., Reyes, F. G. y Milián, O. I. 2010. Caracterización y potencialidades del grano de sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench). *Pastos y Forrajes* 33. pp. 1-17.
- Rocateli, A. C., Raper, R. L., Balkcom, K. S., Arriaga, F. J. and Bransby, D. I. 2012. Biomass sorghum production and components under different irrigation/tillage systems for the southeastern U.S. *Industrial Crops and Products* 36: 589-598.
- Rodríguez R., H. Torres, H. Williams, N. Montes. 1994. Sorgo en doble hilera versus surco sencillo en el noreste de México. *Agronomía Mesoamericana* 5: 104-108.
- Rodríguez, W. y Leihner, D. 2005. Análisis de crecimiento vegetal. Ed. UCR. Costa Rica. 39 p.
- Rosenthal, W. and Vanderlip. R. 2004. Simulation of individual leaf areas in grain sorghum. *Agronomie Sciences* 24(8): 493-501.
- Saballos, A. 2008. Development and utilization of sorghum as a bioenergy crops. (Vermerris, W., Ed.) Springer. USA. pp. 211-248.
- Saberi, A. R., Siti, A. H., Halim, R. A. and Zaharah, A. R. 2011. Morphological responses of forage Sorghums to salinity and irrigation frequency. *African Journal of Biotechnology* 10: 9647-9656.
- Sato, S. C. and Dweikat, T. I. 2004. Identification of an elite sorghum genotype with high in vitro performance capacity. *In Vitro Cell Dev Biol* 40: 57-60.
- Schroeder, J. W. 2004. Haylage and other fermented forages. North Dakota State University Cooperative Extension. Revisada el 15 de Febrero de 2015.
- Schroeder, J. W. 2013. Silage fermentation y preservation. North Dakota State University - College of Agriculture, Food Science, and Natural Resources. Revisada el 15 de Febrero de 2015. <http://www.ag.ndsu.edu/pubs/ansci/dairy/as1254.pdf>
- Schwartz, M. D. 1999. Advancing to full bloom: planning phonological research for the 21 st century. *American Society of Agronomy* 42: 113-118.
- Servicio de Información Agroalimentaria y Pesquera (SIAP). 2012 <http://www.siap.gob.mx/> Revisada el 1 de marzo de 2013.

- Shenkut, A., Tesfaye, K. and Abegaz, F. 2013. Determination of water requirement and crop coefficient for sorghum (*Sorghum bicolor* L.) at Melkassa, Ethiopia. Science, Technology and Arts Research Journal 2(3): 16-24.
- Snapp, R. R. and Newman, A. L. 1962. Beef Cattle. Ed. 5^a. J. Wiley Co. Sons York. 683 p.
- Solórzano, E. V. 2007. Guías Fenológicas para Cultivos Básicos. 1ra Ed. Editorial Trillas. México, D. F. 152p.
- Soto, O. R., Silvertooth, J. and Galadima, C. A. 2006. Crop phenology for irrigated chiles (*Capsicum annum* L.) in Arizona and New Mexico. College of Agriculture and Life Sciences. The University of Arizona. Vegetable Report. Página electrónica: <http://ag.arizona.edu/pubs/crops/az1419/contents.html>
- Soto, O. R. and Silvertooth, J. C. 2008. A crop Phenology Model for Irrigated New Mexico Chile (*Capsicum annum* L.) Type Varieties. College of Agriculture and Life Sciences. The University of Arizona. pp. 104-112.
- Soto, F., Plana, R. y Hernández, N. 2009. Influencia de la temperatura en la duración de las fases fenológicas del trigo harinero (*Triticum aestivum* ssp. *aestivum*) y triticale (*Triticum secale* Wittmack) y su relación con el rendimiento. Cultivos Tropicales 30: 32-36.
- Soto, C. F. y Hernández, C. N. 2012. Influencia de tres fechas de siembra en el crecimiento y rendimiento de especies de cereales cultivadas en condiciones tropicales. Parte II. Cultivo del sorgo (*Sorghum bicolor* L. Moench var. ISIAP Dorado). Cultivos Tropicales 33: 50-55.
- Statistical Analysis System (SAS). 2002. Proceeding Guide, Version 9.0. SAS Institute. Cary N. C. USA. Page 4975.
- Stone, W. C. and Chase, L. E. 2004. Dealing with problem silages: focus on clostridium. In: Proceedings. Departments of Poultry Husbandry, Animal Husbandry, and Biochemistry and Nutrition, New York State College of Agriculture, and the Graduate School of Nutrition, Cornell University. 205 p.
- Tabosa, J. N., Reis, O. V., Brito, A. R., Monteivo, M. C. D., Simplicio, J. B. and Oliveira, J. A. 2002. Forage sorghum cultivars performance in different soil and climate environments in Pernambuco and Alagoas, North- Eastern Brazil. Revista Brasileira de Milho e sorgo 1(2): 47-58.

- Tainton, N. M. 1974. Effects of different grazing rotations on pasture production. *Journal of the British Grassland Society* 29: 191-202.
- Taylor, J. R. N., Schober, T. J. and Bean, S. R. 2006. Novel food and nonfood uses for sorghum and millets. *Journal of Cereal Science* 44: 252-271.
- Titterton, M. y Bareeba, F. 2001. Ensilaje de gramíneas y leguminosas en los Trópicos. Ed. Mannetje. *Uso del ensilaje en el trópico privilegiando opciones para pequeños campesinos. Serie Estudios FAO. Producción y protección vegetal* 161. FAO, Roma 189 p.
- Tsaftaris, A. S. 1997. Genetics, biotechnology and breeding of maize and *Sorghum*. Royal Society of Chemistry. Cambridge, UK. 217 p.
- Turhollow, A. F., Webb, E. G. and Downing, M. E. 2010. Review of sorghum production practices: applications for bioenergy. Oak Ridge National Laboratory. Department of Energy. USDA Foreign Agricultural Service. Page. 23. Disponible en: <http://info.ornl.gov/sites/publications/files/Pub22854.pdf>. Revisada 19 febrero 2015.
- Umphres, L. A. 2013. Agronomic and Nutritional Attributes of Forage Sorghum, Sorghum x Sudángrass, and Grain Sorghum Cultivars Used for Silage Production in South Texas. Thesis Master of Science. Texas A&M University-Kingsville. 96 p.
- Valentine, S. C. and Wickes, R. V. 1978. A comparison of hay, wilted silage and formaldehyde-prepared silage fed to lactating dairy cows. *Proc. Aust. Soc. of An. Prod* 10: 170-177.
- Vargas, R. C. F. 2005. Valoración nutricional y degradabilidad ruminal de genotipos de sorgo forrajero (*Sorghum* spp). *Agronomía Mesoamericana* 16: 215-223.
- Vermerris, W. 2013. Genetic improvement of bioenergy crops. Springer. Florida, USA. 423 p.
- Villalpando, J. y Ruiz, A. 1993. Observaciones Agrometeorológicas y su uso en la agricultura. Ed. Limusa, México. 133 p.
- Villegas, D. G., Bolaños, M. A. y Olguín, P. L. 2001. La ganadería en México. 1.5.1. I. Textos monográficos: 5 Economía. Temas selectos de geografía de México. Instituto de geografía. UNAM. 158 p.
- Volpe, C. A. 1992. Citrus Phenology. *In: Proceedings of the Second International Seminar on Citrus Physiology*. pp. 103-122.

- Weinberg, Z. G. and Muck, R. E. 1996. New trends and opportunities in the development and use of inoculants for silage. *FEMS Microbiology Reviews* 19: 53- 68.
- Zerbini, E. and Thomas, D. 2003. Opportunities for improvement of nutritive value in sorghum and pearl millet residues in south Asia through genetic enhancement. *Field Crops Research* 84: 3–15.