TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE TORREÓN

DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN

MONITOREO DEL ÍNDICE DE VEGETACIÓN EN SORGO FORRAJERO BAJO DIFERENTES NIVELES DE EVAPOTRANSPIRACIÓN

Tesis que presenta:

BRENDA DEL ROCIO NAVA JOACHIN

Como requisito parcial para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN IRRIGACIÓN

Director de tesis:

DR. PABLO YESCAS CORONADO

Torreón Coahuila, México.

Febrero 2020.

Tesis elaborada bajo la supervisión del comité particular de tesis la cual ha sido aprobada y aceptada como requisito para obtener el grado de:

MAESTRO EN CIENCIAS EN IRRIGACIÓN

COMITÉ PARTICULAR

DIRECTOR DE TESIS: _____

DR. PABLO YESCAS CORONADO

CO-DIRECTOR: _____

Ph.D. ARTURO REYES GONZÁLEZ

ASESOR: _____

DR. JOSÉ ALFREDO MONTEMAYOR TREJO

ASESOR: _____

Ph.D. JOSÉ ERNESTO FRÍAS RAMÍREZ

Febrero 2020. **Torreón, Coahuila, México.**

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, a **Dios todo poderoso y a la virgen de Guadalupe** por haberme acompañado y guiado, por ser mi fortaleza en los momentos de debilidad y brindarme una vida llena de aprendizajes, experiencias y sobre todo felicidad.

Al **Instituto Tecnológico de Torreón (ITT)** por brindarme la oportunidad de poder superarme y de permanecer a dicha institución.

Al **Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT)** por el apoyo económico aportado para la realización de mis estudios de Maestría.

A mi comité de asesores

Especialmente mencionar al **PhD. Arturo Reyes González** por su confianza, apoyo y dedicación de tiempo de haber compartido conmigo sus conocimientos para llevar a cabo esta investigación.

Al **Dr. Pablo Yescas, PhD. José Ernesto Frías Ramírez y a Dr. José Alfredo Montemayor** por sus aportaciones de conocimientos enseñanzas brindadas.

DEDICATORIA

Primeramente, a Dios, por darme la oportunidad de vivir, por fortalecer e iluminar mi mente y por haber puesto en mi camino a aquellas personas que han sido mi soporte y compañía durante todo el periodo de estudio.

A mis padres FORTUNATO NAVA ESCOBAR Y ODILIA JOACHIN PASTRANA por apoyarme en todo momento, por los valores que me ha inculcado, y por haberme dado la oportunidad de tener excelente educación en el transcurso de mi vida.

A mis hermanos por ser parte importante de mi vida y representan la unidad familiar, a Ángel y Naty por ser un ejemplo de desarrollo profesional a seguir. Fortunato, Dania, y Bexani por llenar mi vida de alegría.

Amador Méndez Pérez por siempre apoyarme, tu ayuda ha sido fundamental, has estado conmigo incluso en los momentos más turbulentos.

A mis amigos (Tanaita, Oscar, Guillermo, Angeles, Yubi, Elvia, Yaqui) y compañeros por su amistad que me brindaron por todos los momentos felices que pasamos.

ÍNDICE

AGRADECIMIENTOS iii

DEDICATORIA iv

ÍNDICE DE FIGURAS ix

RESUMEN xii

SUMMARY xiii

1. INTRODUCCION 1

1.1. Objetivo general 3

1.1.1. Objetivos específicos 3

1.2. Hipótesis 3

2. REVISIÓN DE LITERATURA 4

2.1. Importancia de los cultivos forrajeros 4

2.1.1. Importancia del cultivo de sorgo 4

2.2. Descripción de la planta 5

2.3. Características botánicas 5

2.3.1. Raíz 5

2.3.2. Tallo 6

2.3.3. Hojas 6

2.3.4. Inflorescencia 6

2.4. Etapas fenológicas 7

2.5. Densidad de sorgo 8

2.6. Importancia del agua en la Comarca Lagunera 8

2.7. Riegos 9

2.7.1. Riego por goteo subsuperficial 10

2.7.2. Ventajas del Riego por Goteo 11

2.7.3. Desventajas de riego por goteo 12

2.7.4. Uso de cintillas para riego por goteo 13

2.8. Evapotranspiración 13

2.8.1. La transpiración 14

2.8.2. La evaporación 15

2.8.3. Unidades de evapotranspiración 15

2.8.4. Factores que afectan la evapotranspiración 15

2.8.5. Variables climáticas 16

2.8.6. Manejo 16

2.8.7. Factores de cultivo 16

2.8.8. Estimación de evapotranspiración 17

2.9. Coeficiente de cultivo 17

2.10. Índice de vegetación 19

2.10.1. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)..... 19

2.10.2. Equipo para medir NDVI 19

3. MATERIALES Y MÉTODOS 21

3.1. Localización geográfica de la Comarca Lagunera 21

3.2. Localización del sitio experimental 21

3.3. Diseño experimental 22

3.4. Preparación del terreno 24

3.4.1. Subsuelo 24

3.4.2. Barbecho: 25

3.4.3. Rastra: 25

3.4.4. Nivelación: 25

3.4.5. Instalación del sistema de riego 25

3.5. Riego 26

3.6. La siembra 26

3.7. Fertilización 27

3.8. Plagas en el cultivo 27

3.9. Variables evaluadas 28

3.9.1. Altura de planta: 28

3.9.2. Número de hojas 28

3.9.3. Diámetro de tallo 28

3.9.4. Las mediciones de NDVI 28

3.9.5. La cobertura vegetal: 29

3.9.6. Producción de forraje verde y seco 30

3.9.7. Productividad del agua 30

3.10. Análisis estadístico 30

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 31

4.1. Altura de planta 31

4.2. Número de hojas 33

4.3. Diámetro de tallo 35

4.4. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) 38

4.5. Cobertura Vegetal 41

4.6. Forraje Verde 42

4.7. Forraje Seco 45

4.8. Lámina total aplicada 47

4.9. Eficiencia en el uso del agua 48

5. CONCLUSIONES 51

6. LITERATURA CITADA 52

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.4. Fenología del sorgo. Fuente: (Carrasco *et al*., 2011)..... 8

Figura 3.2. Localización del sitio experimental a) mapa de México, b) mapa de la Comarca Lagunera y c) Campo Experimental La Laguna, parcela experimental. 22

Figura 3.3. Atmómetro para lecturas de ET. 23

Figura 3.4.5. Instalación de cintilla. 26

Figura 3.9.4. Medición de NDVI con el equipo GreenSeeker..... 29

Figura 4.1. Altura de planta para las dos variedades de sorgo forrajero evaluadas con diferentes niveles de ET. CICLO VERANO 2019. INIFAP. 32

Figura 4.4.1. Comparación de altura de planta para las dos variedades de sorgo forrajero evaluadas bajo diferentes niveles de ET e inundación. CICLO VERANO 2019. INIFAP. 33

Figura 4.2. Número de hoja de las dos variedades de sorgo forrajero evaluadas con diferentes niveles de ET. CICLO VERANO 2019. INIFAP. 34

Figura 4.2.1. Comparación de número de hoja de las dos variedades de sorgo forrajero evaluadas bajo diferentes niveles de ET e inundación. CICLO VERANO 2019. INIFAP. 35

Figura 4.3. Diámetro de tallo de las dos variedades de sorgo forrajero evaluadas con diferentes niveles de ET. CICLO VERANO 2019. INIFAP. 37

Figura 4.3.1. Comparación de diámetro de tallo de las dos variedades de sorgo forrajero evaluadas bajo diferentes niveles de ET e inundación. CICLO VERANO 2019. INIFAP. 37

Figura 4.4. Progresión de NDVI de las dos variedades de sorgo forrajero evaluadas con diferentes niveles de ET. CICLO VERANO 2019. INIFAP. 40

Figura 4.4.1. Comparación de NDVI de las dos variedades de sorgo forrajero evaluadas bajo diferentes niveles de ET e inundación. CICLO VERANO 2019. INIFAP. 40

Figura 4.5. Porcentaje de Cobertura Vegetal de las dos variedades de sorgo forrajero evaluadas con diferentes niveles de ET. CICLO VERANO 2019. INIFAP. 41

Figura 4.5.1. Comparación de porcentaje de Cobertura Vegetal de las dos variedades de sorgo forrajero evaluadas bajo diferentes niveles de ET e inundación. CICLO VERANO 2019. INIFAP. 42

Figura 4.6. Rendimiento de forraje verde de sorgo (t ha^{-1}) bajo diferentes niveles de evapotranspiración durante el ciclo VERANO 2019 INIFAP. 44

Figura 4.6.1. Rendimiento de forraje verde de sorgo (t ha^{-1}) en las variedades evaluadas durante el ciclo VERANO 2019 INIFAP. 44

Figura 4.7. Rendimiento de forraje seco de Sorgo (T ha^{-1}) bajo diferentes niveles de evapotranspiración durante el ciclo verano 2019 INIFAP. 46

Figura 4.7.1. Rendimiento de forraje seco de sorgo (t ha^{-1}) en las variedades evaluadas durante el ciclo verano 2019 INIFAP. 46

Figura 4.8. Lámina total aplicada bajo diferentes niveles de evapotranspiración durante el ciclo verano 2019 INIFAP. 48

Figura 4.9. Eficiencia en el uso de agua (kg FS m^{-3}), bajo diferentes niveles de evapotranspiración durante el ciclo verano INIFAP 2019. 50

Figura 4.9.1. Eficiencia en el uso de agua (kg FS m^{-3}), en las variedades evaluadas durante el ciclo verano 2019 INIFAP. 50

RESUMEN

La Comarca Lagunera es la principal cuenca lechera del país. Esta tiene un inventario de 490 mil cabezas de ganado bovino, por lo tanto, la producción de forraje es de vital importancia. Sin embargo, los forrajes son irrigados con riego por gravedad y bombeo siendo el agua el recurso limitante en la región por lo que debe ser aplicada con mayor eficiencia. El presente estudio se realizó en el campo experimental la Laguna (INIFAP), en el ciclo de verano 2019. El experimento se estableció con un diseño de bloques al azar con cuatro repeticiones en un arreglo de parcelas divididas. La parcela grande fueron tres tratamientos de riego y la chica dos cultivares de sorgo. Las variables a evaluar fueron: altura de planta, número de hojas, diámetro de tallo, Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), cobertura vegetal, forraje verde, forraje seco y eficiencia en el uso del agua. El análisis estadístico se realizó con el programa estadístico SAS. Para la comparación de medias se utilizó la prueba de Tukey ($P \leq 0.05$). Los resultados que presentaron mayores rendimientos de forraje verde y seco fueron los tratamientos 80% y 100%*Kc de ET, con 94.56, 33.66 t ha^{-1} y 89. 69 t ha^{-1}, 33.26 t ha^{-1}, respectivamente. El tratamiento del 100% multiplicado por un Kc proveniente de índice de vegetación fue el que presentó mayor eficiencia en el uso del agua (6.0 kg FS/m^3).

Palabras claves: NDVI, evapotranspiración, coeficiente de cultivo, eficiencia en el uso del agua.

SUMMARY

The Comarca Lagunera is the main dairy producer of the country, since there are 49 thousands heads of dairy livestook in production; so it is needed to maintain the forage production. However, for irrigation forage crops use most of surface and ground water, which is the most limited resource in the región forcing to have a greater irrigation application efficiency The present research study was carried out in the Laguna experimental field of the national research Institute (INIFAP) during the summer growing season. The experiment was established with a randomized block design with four replications under as split plot arragement. The main plot consisted in three irrigation treatments and the small plot two sorghum cultivars. The evaluated variables were: plant height, number of leaves, stem diameter, normalized vegetation index (NDVI), percentage of soil surface covered by crop, fresh forage yield, dry mater production and water use efficiency. The statistical analysis was performed by using the SAS software, and the mean comparison test was done by Tuckey test with a $P \leq 0.05$. The results shown that the irrigation treatments 80% and 100%*Kc of ET obtained the greater values of fresh and dry forage yield with 94.56, 33.66 t ha^{-1} y 89. 69 t ha^{-1}, 33.26 t ha^{-1}, respectively. The irrigation treatment of 100% times a Kc obtained from the NDVI showed the greater water use efficiency with a value of 6.0 kg of dry matter per cubic meter of water used.

Key words: NDVI, evapotranspiration, crop coefficient and water use efficiency

1. INTRODUCCION

La Comarca Lagunera es la principal cuenca lechera del país con una producción de 2 millones 507 mil 511 litros de leche en 2018 (SADER 2019) y se tiene un inventario de 490 mil cabezas de ganado bovino. Por lo tanto, el establecimiento de cultivos forrajeros ejerce la mayor presión para la explotación de los recursos hídricos en esta región (Montemayor *et al*., 2018). En primavera-verano del 2018 se sembraron 11 mil 684 hectáreas de sorgo forrajero las cuales fueron irrigadas mediante el riego por gravedad y el riego por bombeo (SADER, 2019), sin embargo, este sistema de riego aplica el riego con bajas eficiencias.

El sistema de riego por goteo subsuperficial (RGS) es una alternativa para incrementar la eficiencia o productividad del agua en la agricultura, en virtud de que minimiza la evaporación superficial e incrementa la eficiencia de aportación hídrica en la raíz (Lucero *et al*., 2017). Con el RGS el ahorro de agua puede ser de 37 % (Montemayor *et al*., 2012) hasta un 55 % con respecto al riego tradicional por inundación (Godoy *et al*., 2005).

En la Comarca Lagunera al igual que otras partes del país se ha utilizado el sistema de riego por goteo para irrigar los cultivos forrajeros, incluyendo al cultivo de sorgo (González *et al*., 2005), sin embargo, estas investigaciones se basan solo en el porcentaje de evapotranspiración de referencia (ETo) (100, 80, y 60 %) la cual es afectada principalmente por las condiciones climáticas, sin tomar en cuenta las etapas de desarrollo del cultivo o coeficiente del cultivo (Kc).

Uno de los métodos más usados y aceptados para estimar la evapotranspiración (ET) de los cultivos, es el de multiplicar el valor de la evapotranspiración de referencia (ETo) por un coeficiente de cultivo (Kc) (ET =ETo * Kc) (Allen *et al*., 2006). La ETo es estimada con base a datos meteorológicos de: temperatura del aire, velocidad del viento, radiación solar y humedad relativa. Dada la naturaleza cambiante de los factores que intervienen en su cálculo, el Kc puede ser tomado como referencia de la literatura o bien calculado utilizando índices de vegetación.

En la actualidad el uso de los Índices de vegetación (IV) tal como el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) se ha propuesto para monitorear el desarrollo del cultivo, predecir los rendimientos y estimar el consumo de agua mediante Kc´s (Castañeda *et al*., 2015). Por tal motivo el objetivo general de este trabajo es el siguiente.

1.1. Objetivo general

- Monitorear el índice de vegetación del cultivo de sorgo forrajero bajo diferentes niveles de evapotranspiración en la Comarca Lagunera

1.1.1. Objetivos específicos

- Medir la altura, diámetro del tallo y cobertura vegetal del sorgo forrajero con diferentes niveles de ET

- Evaluar el forraje verde, forraje seco y eficiencia en el uso del agua del sorgo bajo diferentes tratamientos de ET

1.2. Hipótesis

- El índice de vegetación será afectado por los diferentes niveles de evapotranspiración, afectando el Kc del cultivo.

2. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. Importancia de los cultivos forrajeros

Los cultivos forrajeros son utilizados fundamentalmente para la alimentación animal (Sánchez *et al*., 2005). La alfalfa, el maíz y el sorgo, son los principales cultivos forrajeros en la Comarca Lagunera de los estados de Coahuila y Durango, conocida como la principal cuenca lechera del país (SIAP-SAGARPA, 2012). Estos forrajes complementan la alimentación de los animales tanto en el contenido de fibra para la digestión y las proteínas para la producción de leche (Pedroza *et al*., 2014). Las características de un forraje deben ser alta producción de materia seca, índice de cosecha, estabilidad, contenido de carbohidratos, proteínas, y digestibilidad (Ozuna *et al*., 2017).

2.1.1. Importancia del cultivo de sorgo

La producción de sorgo forrajero en México varía de 13 a 30 t ha^{-1} de materia seca (MS) (Martínez *et al*., 2005, Bolaños *et al*. 2012), en el ciclo agrícola 2015, se sembraron 192 mil ha de sorgo con producción de 3,8 millones de t MS, Los principales estados productores por superficie cultivada fueron Sinaloa, Chihuahua, Coahuila y Durango, con 38, 33, 30, 20 mil ha respectivamente, 63% de la superficie cultivada y rendimiento promedio de 19,7 t ha^{-1} MS (SIAP 2018).

En la región la superficie sembrada de sorgo en el 2017 fue 16,502 ha con una producción de 735, 838 ton (SADER, 2019).

El sorgo es una planta de ciclo fotosintético tipo C4, lo que le facilita ser más eficiente en el uso de agua, bióxido de carbono y nutrimentos (Chuck *et al*., 2011). Por esta razón se consideran las plantas del futuro, dado su poco requerimiento de agua y altos niveles de CO^2 en el ambiente (Serna *et al*., 2012). Además, esta planta logra una alta acumulación de azúcar en los tallos, que puede utilizarse para la industria alimenticia, forraje, combustible y fibras (Ashok, *et al*., 2010). Asimismo, el sorgo es una planta con más tolerancia a la salinidad con respecto a otros cultivos.

2.2. Descripción de la planta

El sorgo forrajero como cultivo energético podría ser una alternativa de cultivo interesante en zonas donde las dotaciones de agua de riego son limitadas, ya que tiene mayor eficiencia hídrica que el maíz (Lloveras *et al*., 2006). El uso de su cosecha para producción de forraje puede verse mejorada por su capacidad de rebrote tras su corte (Simoneti *et al*., 2008).

2.3. Características botánicas

2.3.1. Raíz

El sistema radical adventicio fibroso se desarrolla de los nudos más bajos del tallo; la profundidad de enraizado es generalmente de 1 a 1.3 metros, con 80% de las

raíces en los primeros 30 centímetros. El número de pelos absorbentes puede ser el doble que, en maíz, las raíces de soporte pueden crecer de brotes radicales, pero no son efectivas en la absorción de agua y nutrientes.

2.3.2. Tallo

El sorgo es una planta de un solo tallo, pero puede desarrollar otros brotes (hijos) dependiendo de la variedad y el ambiente. Está formado de una serie de nudos y entrenudos, su altura varía de 0.5 a 4 metros, su diámetro de 0.5 a 5 cm cerca de la base, volviéndose más angosto en el extremo superior; su consistencia es sólida con una corteza o tejido exterior duro y una médula suave. Los tallos tienen de 7 a 24 nudos y son erectos.

2.3.3. Hojas

El número de hojas varía de 7 a 24 según la variedad y el período de longitud de crecimiento, son erectas hasta casi horizontales y se encorvan con la edad. La longitud de una hoja madura oscila entre 30 a 35 cm y su ancho entre 5 a 15 cm; son alternas con una superficie lisa y cerosa.

2.3.4. Inflorescencia

Es una panícula de racimo con un raquis central completamente escondido por la densidad de sus ramas o totalmente expuesto, cuando está inmadura es forzada hacia arriba dentro de la vaina más alta (buche), después que la última hoja (bandera). La emersión es importante para la cosecha mecanizada y para la

tolerancia de plagas y enfermedades. La panícula es corta o larga, suelta y abierta, y compacta o semi-compacta, puede tener de 10 a 35 cm de largo, 5 a 20 cm de ancho y tiene entre 400 a 1000 granos, según el tipo de panícula y variedad (CENTA, 2018).

2.4. Etapas fenológicas

Se reconocen tres etapas básicas de crecimiento (Figura 2.4):

- La fase vegetativa o etapa de crecimiento (EC1), que va de la emergencia al inicio de la formación de la panoja.
- La fase reproductiva o etapa de crecimiento (EC2), que va del inicio de la formación de la panoja hasta la floración.
- La fase de llenado del grano o etapa de crecimiento (EC3), que va de la floración a la madurez fisiológica del grano, determinada por la aparición del punto negro en el sitio de inserción del grano (Carrasco *et al*., 2011).

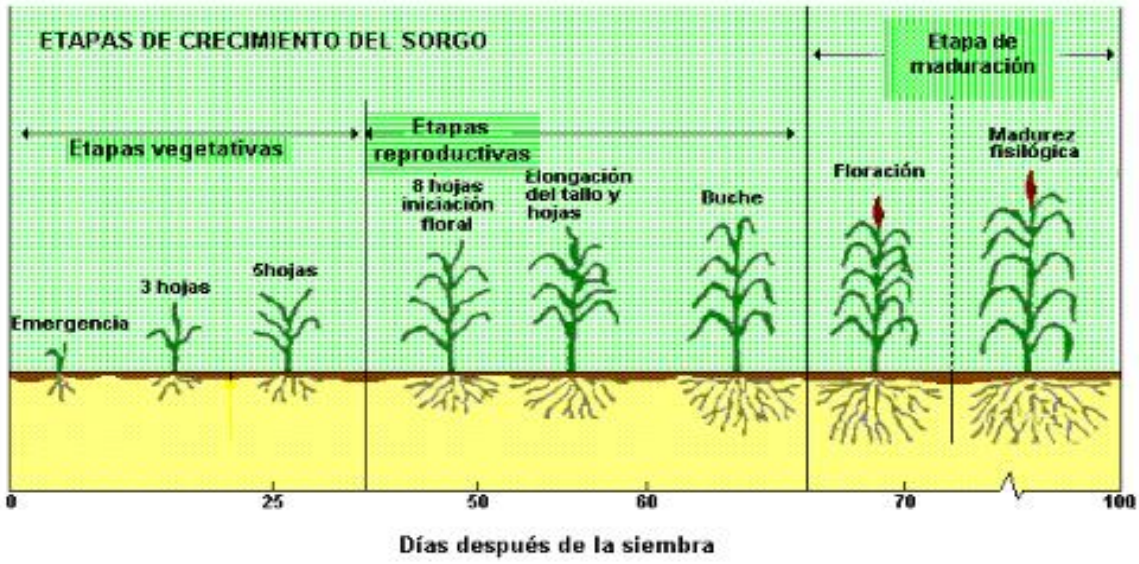

Figura 2.4. Fenología del sorgo. Fuente: (Carrasco *et al.,* 2011).

2.5. Densidad de sorgo

El sorgo expresa de manera óptima su potencial con 10 plantas / metro lineal, sembrado a 70 cm entre hileras. Aunque el acortamiento entre hileras (52 o 35 cm) es una técnica recomendable para este cultivo (CENTA, 2018).

2.6. Importancia del agua en la Comarca Lagunera

El uso eficiente de agua, en la producción de forraje de alta calidad es una necesidad en áreas donde la limitación de recursos naturales es limitada (Salazar *et al*., 2007). En el caso de la Comarca Lagunera una de las actividades socioeconómicas es la agropecuaria, donde sobresale la producción de forraje y la principal limitante es disponibilidad de agua (Sagarpa *et al*., 2003).

En la región, el distrito 017 cuenta con agua de gravedad y agua del subsuelo, las cuales suman alrededor de 1, 500 millones de metros cúbicos. En la región como en otras partes del mundo la agricultura, es el mayor consumidor del agua con un porcentaje reportado entre 87 y 90%, regándose aproximadamente 94,752 hectáreas anuales (Sagarpa, 2003).

2.7. Riegos

En la actualidad existen cuatro tipos de sistemas de riego en la región: sistema de riego por gravedad, sistema de riego de pivote central, sistema de riego por micro aspersión y el sistema de riego por goteo, este último incluye el sistema de riego por cinta o cintilla (FAO, 2011).

El sistema tradicional y más antiguo es el riego por inundación o gravedad, en el cual agua es llevada a los cultivos por una diferencia de alturas o desniveles entre las fuentes de almacenamiento (Presas) a través de canales principales y secundarios, de aquí la importancia de que la red de estos canales de riego se encuentre en buen estado para evitar pérdidas por filtración (Montemayor 2006). Sin embargo, este sistema no es el más eficiente en el uso del agua. Una alternativa para incrementar la eficiencia, y aprovechamiento del agua en el cultivo es mediante el riego por goteo subsuperficial (Yescas *et al*., 2015).

2.7.1. Riego por goteo subsuperficial

El sistema de riego subsuperficial (RGS) es sin duda uno de los más eficiente en el uso del agua, ya que incrementa la producción y calidad de los cultivos (Rivera *et al*., 2007).

Este sistema consiste en aplicar el agua directamente en la zona radicular a través de mangueras de goteo enterradas a una profundidad de 30 a 40 cm, (Shock *et al*., 2013). El agua es transportada por tuberías a presiones bajas, de donde sale en forma de gotas. El sistema utiliza caudales pequeños y se riega con mayor frecuencia, desde un día o más, así como también con tiempos muy cortos desde una hora hasta dos horas pudiendo variar según el cultivo (Rivera *et al*., 2003). Esto con el objetivo de mitigar los problemas de drenaje y pérdidas por altas tasas de evaporación del agua de riego, (Ayars *et al*., 2015) ya que cuando los emisores se colocan en forma subsuperficial, la evapotranspiración es menor hasta de 81 mm (Delphine *et al*., 2005). Lo que permite una alta eficiencia en el uso del agua, con un ahorro del 46% en el volumen utilizado y un incremento de forraje seco del 33% con respecto al riego por inundación (Godoy *et al*., 2003).

El uso del RGS evita la saturación del suelo después de la aplicación de un riego por inundación, y el estrés de humedad en el cultivo antes de la aplicación del siguiente riego. Estas dos situaciones, que son comunes cuando los cultivos se riegan con el método superficial, ocasionan el cierre de estomas, los cuales se encargan de regular el intercambio de vapor de agua (transpiración), CO^2

(asimilación de CO^2) y oxígeno (Camp, 1998). Debido a que en el riego por goteo se dosifica el agua y nutrimentos de acuerdo con la demanda del cultivo, quedando disponibles para la planta, lo que permite que la fotosíntesis neta sea alta, lo cual se refleja en incrementos en el rendimiento y calidad del cultivo (Rivera *et al*., 2003)

Además, con el riego por goteo subsuperficial la superficie del suelo se conserva seca y la humedad en las capas inferiores se mantiene por debajo del estado de saturación, por lo que la evaporación del suelo y la percolación profunda, que representan las pérdidas de agua más importantes por el sistema de riego superficial, se minimizan; con lo que puede disminuir hasta 50% el volumen de agua utilizado en este cultivo (Zermeño *et al*., 2014).

2.7.2. Ventajas del Riego por Goteo

- Mejor aprovechamiento del agua.
- Uso de terrenos con topografía accidentada, suelos pedregosos y de baja. infiltración.
- Explotación de cultivos de alta rentabilidad.
- Mayor uniformidad de riego.
- Acelera el inicio de la producción de cultivos.
- Mejor aprovechamiento de riego.

- Aumento en la cantidad y calidad de las cosechas.
- Reduce los problemas de malezas, debido a la menor superficie húmeda.
- Aplicaciones de fertilizantes, pesticidas y correctores con el agua de riego.
- No impide las labores agrícolas.
- Los costos de operación y mantenimiento son mínimos (Paz, 2015).

2.7.3. Desventajas de riego por goteo

- Inversión inicial elevada.
- Tratamiento y filtración del agua.
- Daños de animales.
- Se necesita riego de germinación.
- Adquisición de repuestos.
- Se necesita personal calificado
- Es preciso hacer un control de la dosis de agua, fertilizantes, pesticidas y productos aplicados al agua de riego (Paz, 2015).

2.7.4. Uso de cintillas para riego por goteo

El sistema de riego subterráneo se utiliza cinta de goteo con espesor de pared de 0.381mm colocada a una profundidad de 5 hasta 50 cm. El espaciamiento entre líneas de goteros varía de acuerdo a la textura del suelo y esos pueden colocarse en un rango de 50 a 100 cm de distancia entre ellas, se recomienda reponer cada tres días el 80% de la evapotranspiración potencial (ET) en cada riego (Godoy *et al*., 2003). Sin embargo, para hacer más eficiente el uso del agua se sugiere hacer una estimación precisa de las necesidades hídricas de los cultivos o evapotranspiración ya que esto permite una gestión del riego adecuada y mayor conservación del recurso hídrico. Un método comúnmente utilizado y recomendado a nivel mundial para la estimación de los requerimientos de agua de los cultivos es el uso de la evapotranspiración (ETo) y el coeficiente de cultivo (Kc) (Allen *et al*., 2006).

2.8. Evapotranspiración

El concepto de evapotranspiración incluye tres diferentes definiciones: evapotranspiración del cultivo de referencia (ETo), evapotranspiración del cultivo bajo condiciones estándar (Etc.) y evapotranspiración del cultivo bajo condiciones no estándar (Etc. aj) (Domingo *et al*., 2002).

Se conoce como evapotranspiración (ET) a la combinación de dos procesos separados por los que el agua se pierde a través de la superficie del suelo hacia la atmosfera por evaporación y mediante transpiración del cultivo.

La evaporación y la transpiración ocurren simultáneamente y no hay una manera sencilla de distinguir entre estos dos procesos (Er-Raki *et al*., 2010). Por lo tanto, se necesita una división exacta de los modelos entre la evaporación del suelo y la transpiración para comprender mejor el ciclo hidrológico, desarrollar una planificación precisa del riego, mejorar la productividad de los cultivos y mejorar la eficiencia del uso del agua (Ding *et al*., 2013).

Más del 90% del agua utilizada en la agricultura se pierde por evaporación del suelo y transpiración de los cultivos, refiriéndose a la evapotranspiración del cultivo. La función de evaporación y transpiración son diferentes, la transpiración está asociada con la productividad de los cultivos, mientras que evaporación no contribuye directamente (Kool *et al*., 2014).

2.8.1. La transpiración

Es el transporte y evaporación del agua desde el suelo a la atmosfera, a través del tejido de las plantas. Un cultivo pierde agua por las estomas, que son pequeñas aberturas en las hojas de las plantas por donde atraviesan gases y vapor de agua. El agua y los nutrientes se absorben por la raíz, pero gran parte

del agua absorbida se pierde por la transpiración y solo una pequeña parte se queda en los tejidos vegetales (Allen *et al*., 2006).

2.8.2. La evaporación

Es el agua contenida en el suelo que se vaporiza por acción de la energía que llega a la superficie del suelo en forma de radiación solar y por la temperatura del aire (Domingo *et al*., 2002).

2.8.3. Unidades de evapotranspiración

La evapotranspiración se expresa normalmente en milímetros (mm) por unidad de tiempo. Esta unidad expresa la cantidad de agua perdida de una superficie cultivada en unidades de altura de agua. La unidad de tiempo puede ser una hora, día, 10 días, mes o incluso un ciclo de cultivo o un año. Por ejemplo, una hectárea tiene una superficie de 10 000 m^2 y 1 milímetro es igual a 0,001 m, una pérdida de 1 mm de agua corresponde a una pérdida de 10 m^3 de agua por hectárea. Es decir 1 mm $día^{-1}$ es equivalente 10 m^3 ha^{-1} $día^{-1}$ (Allen *et al*., 2006).

2.8.4. Factores que afectan la evapotranspiración

El clima, las características del cultivo, el manejo y el medio de desarrollo son factores que afectan la evaporación y la transpiración (Santana, 2008).

2.8.5. Variables climáticas

Los principales parámetros climáticos que afectan la evapotranspiración son la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad atmosférica y la velocidad del viento. La fuerza valorativa de la atmósfera puede ser expresada por la evapotranspiración del cultivo de referencia (ET_0) (Domingo *et al*., 2002).

2.8.6. Manejo

Uno de los elementos de mayor efecto es la disponibilidad de agua en el suelo, misma que está relacionada con las características del suelo (textura, estructura, densidad aparente, etc.). De igual forma, la incidencia de plagas y enfermedades, saturación del perfil, prácticas culturales, entre otros, pueden aumentar o disminuir la tasa de evaporación (Allen *et al*., 2006).

2.8.7. Factores de cultivo

El tipo de cultivo, la variedad y la etapa de desarrollo deben ser considerados cuando se evalúa la evapotranspiración de cultivos que se desarrollan en áreas grandes. Las diferencias en resistencias a la transpiración, la altura del cultivo, la rugosidad del cultivo, el reflejo, la cobertura del suelo y las características radiculares del cultivo dan lugar a diferentes niveles de ET en diversos tipos de cultivos, aunque se encuentren bajo condiciones ambientales idénticas (Santana, 2008).

2.8.8. Estimación de evapotranspiración

La evapotranspiración (ET) representa el agua removida desde el suelo y la vegetación hacia la atmósfera y que ya no estará disponible para otros usos, cobrando mayor importancia en zonas áridas y semiáridas. Por tal motivo, la estimación de este parámetro es esencial en el estudio de los procesos hidrológicos. En virtud de esta utilidad, en los últimos años se han venido desarrollando y perfeccionando distintos modelos de diversa complejidad y aplicación que permiten su estimación (Marini, 2006).

Uno de estos métodos lo constituyen aquellos modelos basados en las relaciones entre la ET y determinadas características de la vegetación como las expresadas a través de ciertos índices, particularmente el NDVI (Normalized Difference Vegetation Index – Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada). En todos ellos se han obtenido óptimas correlaciones entre los valores del NDVI y la ETr y la ETp que parecerían proporcionar los resultados más aproximados a la realidad. Teniendo en cuenta que los resultados de este tipo de regresiones han demostrado ser satisfactorios utilizando dichos parámetros para la estimación de la ET (Marini, 2006).

2.9. Coeficiente de cultivo

El coeficiente de cultivo (Kc) es específico para cada cultivo y varia en su desarrollo fenológico, por lo que sus valores son necesarios para ajustarse a

diferentes regiones climáticas y condiciones de tipo de suelo, sobre todo considerando futuras proyecciones de cambio climático que pueden alterar la duración de las etapas fenológicas (Moriondo *et al*., 2015).

La variación durante el periodo de crecimiento del cultivo es representada por la curva del coeficiente del cultivo. Para describir y construir la curva se necesitan solamente tres valores de Kc: los correspondientes a la etapa inicial (Kc ini), la etapa de mediados de temporada (Kc med) y la etapa final (Kc fin).

Una de las ventajas de utilizar los coeficientes reales de los cultivos basados en índices de vegetación (IV) es la capacidad de explicar las variaciones en el crecimiento de las plantas debido a condiciones climáticas anormales; además permite obtener la variación espacial del Kc real (o Kcb) dentro del campos de cultivo. Existen varios estudios reportados en la literatura que relacionan Kc (o Kcb) con IV para diferentes tipos de vegetación. Los más recientes se enfocan en la estimación de Kcb debido a que la transpiración de la planta está directamente más relacionada con el IV. Existen estudios que consideran una relación lineal entre Kc y NDVI (Farg *et al*., 2012; Kamble *et al*., 2013), Kcb y NDVI (Campos *et al*., 2010; Johnson, 2012; Navarro *et al*., 2016), Kcb y SAVI (Odi-Lara *et al*., 2016) y una relación exponencial entre Kc y NDVI.

2.10. Índice de vegetación

Los índices de vegetación son utilizados para monitorear el desarrollo del cultivo, predecir los rendimientos y estimar el consumo de agua, los índices más utilizados son NDVI, LAI, SAVI (Rouse, 1973).

2.10.1. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Es el índice de vegetación bidimensional más utilizado en las aplicaciones agrícolas ya que reúne tres características importantes: su sencillez matemática, su fácil interpretación y su poder de normalización de la respuesta espectral de sistemas de vegetación. (Huete *et al*., 2010).

El NDVI se ha utilizado ampliamente para el monitoreo de la vegetación, la evaluación del rendimiento de los cultivos y la detección de sequías (Ianle *et al*., 2013). Con el cual se puede contribuir a disminuir los costos de producción, ya que permitiría aplicar la cantidad exacta de fertilizantes, de agua, y mitigar el estrés en el momento apropiado y en el lugar correcto reduciendo gasto de insumos agrícolas de alto costo financiero y ambiental. (Verhulst *et al*., 2009).

2.10.2. Equipo para medir NDVI

El GreenSeeker (green = verde y seek = buscar) es un instrumento que provee un índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), cuya interpretación puede contribuir al diagnóstico rápido y dirigido de las condiciones nutricionales, el estado fisiológico, la incidencia de estrés, y el rendimiento potencial de los

cultivos (Inman *et al*., 2005). Este índice es adjetivado como “normalizado” porque produce valores en el rango del -1 a 1, donde los máximos valores provienen de una densa vegetación y los valores negativos son tomados en lugares donde hay agua tales como canales, estanques, lagunas, etc.

Las aplicaciones del GreenSeeker han sido evaluadas en diversos cultivos como arroz, maíz, trigo y algodón. El GreenSeeker forman parte de las herramientas disponibles en la agricultura de precisión (Lawton, 2008).

El NDVI calculado con el GreenSeeker a diferencia de las imágenes aéreas satelitales, este provee información obtenida localmente y de forma rápida mediante determinaciones terrestres o in-situ (Lan *et al*., 2009).

Aunque a nivel local se ha comparado los valores de NDVI tomados con el equipo GreenSeeker y valores de NDVI estimados con imágenes provenientes de plataformas satelitales, mostrando curvas similares de NDVI durante el ciclo de cultivo para maíz forrajero (Reyes-González *et al*., 2019).

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. Localización geográfica de la Comarca Lagunera

La Comarca Lagunera está ubicada en el norte- centro de México (Figura 3.2.) y está conformada por los Estados de Coahuila y Durango. La Comarca se localiza a 24° 22´ de latitud norte y 102° 22´ de longitud oeste, a una altura de 1,120 metros sobre el nivel del mar (msnm). Geográficamente la región lagunera está formada por una enorme planicie semidesértico de clima caluroso y con un alto grado de aridez.

3.2. Localización del sitio experimental

El presente estudio se realizó en el lote No. 6 del Campo Experimental La Laguna perteneciente al Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP) de Matamoros Coahuila, México (Figura 3.2 (c)). Ubicado a 25º 32' N y 103º 14' O, con altitud de 1100 msnm. El tipo de suelo es de textura migajón arcillosa-arenosa con un contenido de materia orgánica por debajo de 1%.

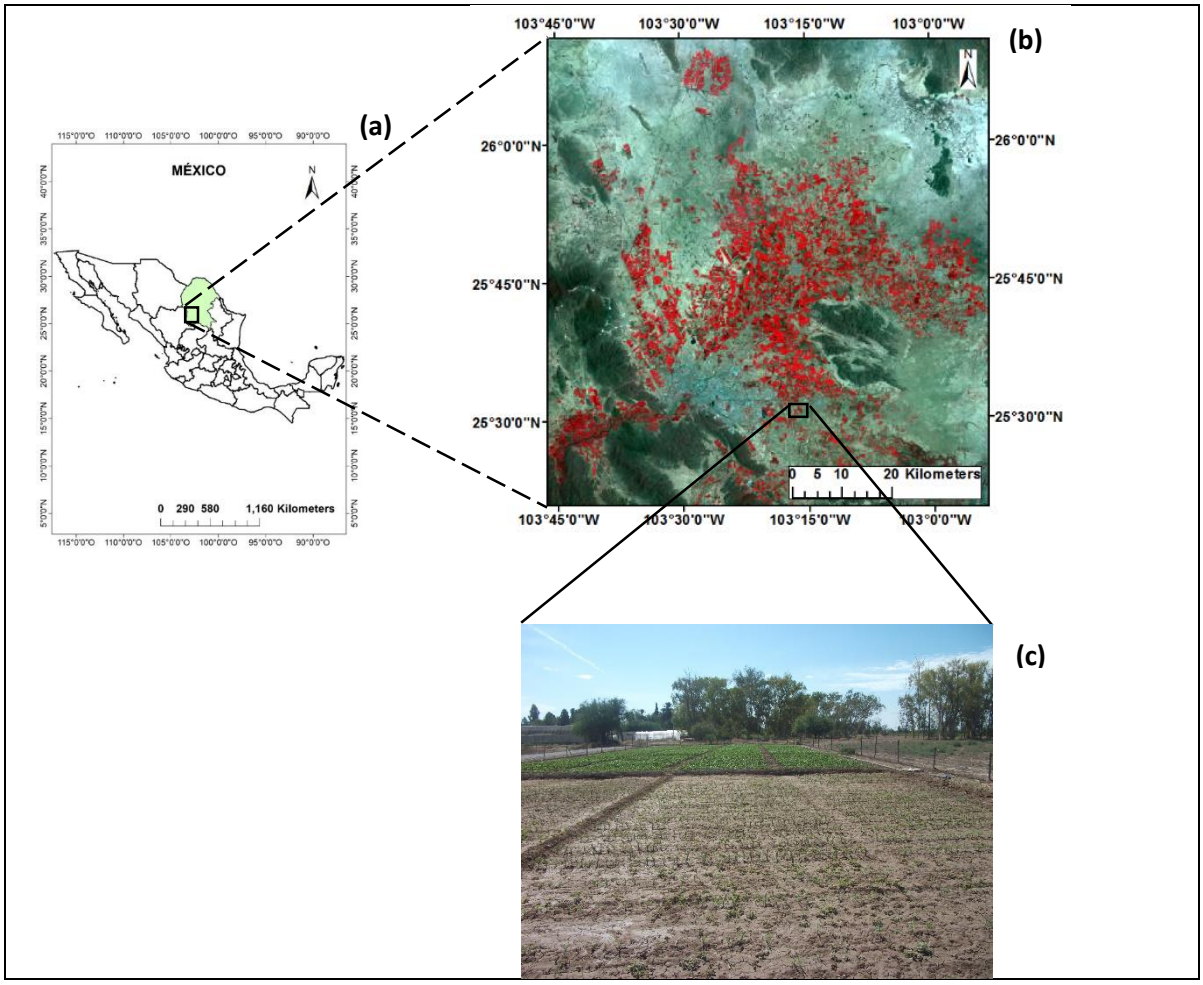

Figura 3.2. Localización del sitio experimental a) mapa de México, b) mapa de la Comarca Lagunera y c) Campo Experimental La Laguna, parcela experimental.

3.3. Diseño experimental

El trabajo de investigación se estableció en un arreglo de parcelas divididas bajo un diseño de bloques al azar con cuatro repeticiones donde la parcela grande fue el tratamiento de riego y las parcelas chicas fueron los cultivares de sorgo. Las

parcelas chicas consistieron en cuatro surcos distanciados a 0.76 m por 5 m de largo (15 m^2). Por lo tanto, se obtuvieron 8 combinaciones con cuatro repeticiones, resultando un total de 32 unidades experimentales, en una superficie de 480 m^2.

Los tratamientos evaluados fueron:

a) Tres tratamientos de riego por goteo subsuperficial (RGS) en las que se aplicó el 100, 80, y 60 % de la evapotranspiración (ET) y un testigo que fue el riego por inundación.

El tratamiento del 100% de ET se multiplico por un Kc estándar del maíz para aplicar la ET actual.

La ET de referencia se tomó de un atmómetro (Figura 3.3) instalado a 10 m de la parcela experimental.

Figura 3.3. Atmómetro para lecturas de ET.

b) Para el experimento se utilizaron dos híbridos de sorgo, el Sorgo Silo Miel y el Súper Sorgo ambos con un ciclo vegetativo intermedio tardío.

- Súper Sorgo

Son plantas de crecimiento rápido y alto valor nutricional con un promedio de 18% de proteína cruda y 76% de digestibilidad (González *et al*., 2011), Debido a su alto potencial de crecimiento, los híbridos de Súper Sorgo, pueden alcanzar alturas superiores a los 4 metros.

- Sorgo Silo Miel

Su follaje es de color verde intenso y vigoroso con buen rebrote ya que permite dos cortes, el cual alcanza una altura aproximadamente de 2.00 a 3.50 metros con un promedio 11-20 hojas este tiene un ciclo intermedio tardío.

3.4. Preparación del terreno

La preparación del terreno consistió de:

3.4.1. Subsuelo

Consiste en romper la tierra, a profundidades por debajo de las corrientes, con el fin de aumentar la infiltración y la penetración del aire y las raíces.

3.4.2. Barbecho:

Su finalidad es romper, aflojar y voltear la capa del suelo, enterrar los residuos y maleza para su descomposición y aumentar la fertilidad y contenido de materia orgánica en el suelo.

3.4.3. Rastra:

Consiste en mover la capa superficial del terreno, desmenuzando terrones, dejando la tierra suelta, aireada y mullida lo cual se obtiene pasando la rastra las veces que sean necesarias de acuerdo al terreno y al cultivo a sembrar.

3.4.4. Nivelación:

Consiste en eliminar principalmente los “altos” o “bajos” que existen en un determinado terreno con la finalidad de tener una uniformidad de la superficie del mismo para una mejor distribución del agua de riego.

3.4.5. Instalación del sistema de riego

Para la instalación del RGS se colocaron las cintas de riego a una profundidad de 0.3 m, con un espaciamiento entre ellas de 0.76 m. la cinta utilizada fue la Aqua-Traxx 8 mil con espesor de pared de 0.20 mm y un diámetro interior de 16 mm, con emisores a 0.20 m y un caudal de 2.5 L h^{-1} por metro lineal. La presión de operación del sistema de riego fue de 8 PSI.

Figura 3.4.5. Instalación de cintilla.

3.5. Riego

La frecuencia de riego con el RGS fue cada tercer día. En el riego por gravedad se diseñó una melga de 15 m de ancho por 30 m de largo. Al cual se le dio siete riegos de auxilio con una lámina promedio de 10 cm cada uno.

3.6. La siembra

La siembra se realizó en suelo seco el 18 de junio colocando una semilla a una distancia de 12 cm entre ellas, para lograr una densidad de población de 105 mil plantas por hectárea.

3.7. Fertilización

La dosis de fertilización que se utilizo fue: 200-100-00 (NPK), utilizando como fuente de nitrógeno urea y sulfato de amonio y como fuente de fósforo el MAP. Se aplicó todo el fósforo y la mitad del nitrógeno con urea al momento de la siembra y el resto del nitrógeno con sulfato de amonio inyectándose cada 15 días durante el desarrollo del cultivo mediante el sistema de riego utilizando un inyector Venturi, y en cuanto al riego por inundación a los 35 DDS se aplicó la otra mitad de nitrógeno manualmente, utilizando el sulfato de amonio.

3.8. Plagas en el cultivo

El monitoreo para la detección de plagas se realizó visualmente a la planta, unas de las plagas encontradas durante el desarrollo fue el gusano cogollero, el cual se encontró en las primeras etapas del cultivo, el pulgón amarillo se encontró durante la madurez y la araña roja en las etapas finales del cultivo. Sin embargo, estas plagas fueron controladas con los productos enlistados:

-Gusano cogollero: fue controlado con Clorver granular al 5% a una dosis de 2.0 - 2.5 Kg/ha.

-Pulgón amarillo: Controlado con Dimetoato a una dosis de 0.5 a 1 L/Ha

-Araña roja : controlado con Abamectina a una dosis de 100 cc/hl (100 L de agua).

3.9. Variables evaluadas

3.9.1. Altura de planta:

La altura se midió con una cinta métrica en dos plantas escogidas al azar en cada parcela y tratamiento durante todo el ciclo del cultivo. Las mediciones se realizaron desde la superficie del suelo hasta la penúltima hoja del cultivo y estas se tomaron semanalmente a partir de los 15 DDS. Los datos de altura se reportaron en metros.

3.9.2. Número de hojas

Se contabilizaron las hojas en dos plantas escogidas al azar en cada parcela y tratamiento durante todo el ciclo del cultivo estas se tomaron semanalmente a partir de los 15 DDS.

3.9.3. Diámetro de tallo

Se tomó lectura de diámetro en dos plantas escogidas al azar en cada parcela y tratamiento durante todo el ciclo del cultivo, estas se tomaron semanalmente a partir de los 15 DDS. Los datos se tomaron con la ayuda de un vernier.

3.9.4. Las mediciones de NDVI

El NDVI se realizó por la mañana con el equipo GreenSeeker, el cual fue diseñado por la Universidad Estatal de Oklahoma y comercializado por (NTech Industries Inc., Ukiah, CA, EE. UU) Las lecturas se tomaron en dos surcos por tratamiento y

repetición a una altura de 0.6 m sobre el dosel del cultivo. Esta se empezó a medir a los 15 DDS.

Figura 3.9.4. Medición de NDVI con el equipo GreenSeeker

3.9.5. La cobertura vegetal:

Se midió con una cinta métrica, haciendo dos mediciones por parcela y por tratamiento, donde se midió la proyección perpendicular del follaje del cultivo, este valor se dividió entre el ancho del surco (0.76 m) y se multiplico por cien para determinar el porcentaje de cobertura vegetal. La medición de cobertura vegetal se realizó semanalmente entre 12:00 y 14:00 horas. Esta se empezó a medir a partir de los 15 DDS hasta los 36 DDS.

3.9.6. Producción de forraje verde y seco

La producción de **forraje verde** se estimó pesando 3 metros lineal en los 2 surcos centrales de cada tratamiento (4.56 m^2), después se tomó una muestra de 700 gr y se secó en una estufa de aire forzado a una temperatura de 65°C durante 72 horas, para posteriormente determinar la producción de **forraje seco,** la cual se determinó con el porcentaje de materia seca y la producción de forraje verde

3.9.7. Productividad del agua

Se obtuvo dividiendo el peso de forraje seco cosechado (kg ha^1) entre el volumen total de agua aplicado (m^3) en cada tratamiento.

3.10. Análisis estadístico

Los análisis estadísticos se realizaron para un diseño experimental de bloques al azar, en arreglo de parcelas divididas utilizando el programa estadístico SAS.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Altura de planta

En la Figura 4.1. se muestra la dinámica de crecimiento de altura de planta de los dos cultivares de sorgo evaluados durante el verano 2019. En la que los cultivares desde los 15 DDS hasta los 45 DDS presentaron una tendencia similar en los tratamientos T1 (100%*Kc), T2 (80%) y T3 (60%) posteriormente empiezan a sobresalir los T1 y T2, mientras el T3 se retrasa en su crecimiento, lo mismo pasa con el riego por inundación a los 55 DDS. Finalmente, a los 100 DDS antes de la cosecha para ambos híbridos, la altura de planta en el Súper Sorgo fue mayor con el T1, T2 e inundación con valores de 3.74, 3.58 y 3.15 m, respectivamente. Esto se debió al mayor contenido de humedad en el suelo o a la mejor distribución del riego; por el contrario, el T3 fue el que presentó mayor estrés hídrico y el que presento una menor altura (3 m), inferior con respecto a los tratamientos antes mencionados.

En la altura final de Sorgo Silo Miel al igual que en el Súper Sorgo los tratamientos que presentaron la mayor altura fueron T1, T2 e Inundación con valores de 3.10 m, mientras que el T3 presentó una altura de 2.50 m.

La Figura 4.1.1. muestra el comportamiento de las dos variedades de sorgo en cada uno de los tratamientos en donde el Súper Sorgo presentó un 17, 16 y 13 % mayor altura con respecto al Sorgo Silo Miel en los tratamientos T1, T2 y T3

respectivamente, así mismo en el T4 (Inundación) sobresalió solo en un 1.16%. La diferencia observada entre los dos híbridos de sorgo fue más visible al final del ciclo del cultivo.

Los resultados de esta investigación referente al cultivar Súper Sorgo se encuentran dentro del rango de altura de esa variedad según (Arroyo, 2015), ya que puede alcanzar alturas desde 3 m hasta más 4 m según la fecha de siembra, manejo agronómico y condiciones climáticas. En trabajos anteriores Rivera *et al*., 2014, Núñez *et al*., 2015, Arias *et al.,* 2018, Reyes, *et al*., 2019b reportan alturas similares de sorgo a los 91 DDS. Sin embargo, García *et al.,* 2016, presenta altura de planta con valores de 4.30 y 5.18 m. las cuales son superiores a las alturas encontradas en el presente trabajo. Por otro lado, Pérez *et al*., 2008 menciona, que diferentes procesos fisiológicos incluido la altura puede ser afectado por la disminución del riego, tal y como sucedió con los tratamientos de riego aquí estudiados.

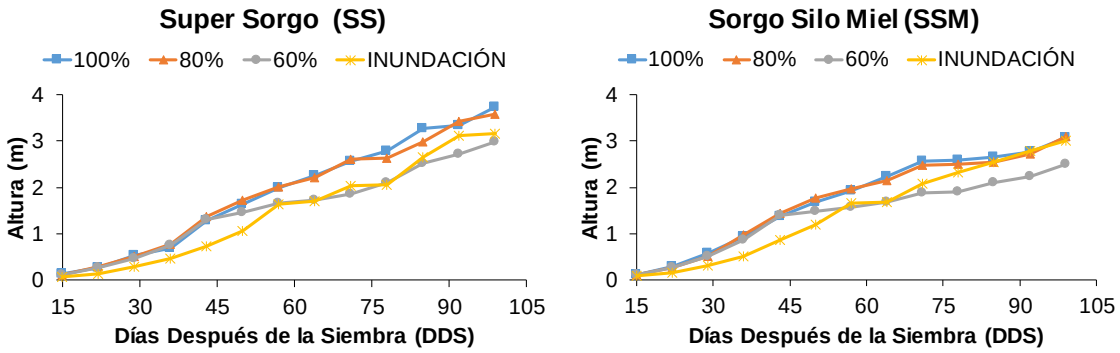

Figura 4.1. Altura de planta para las dos variedades de sorgo forrajero evaluadas con diferentes niveles de ET. CICLO VERANO 2019. INIFAP.

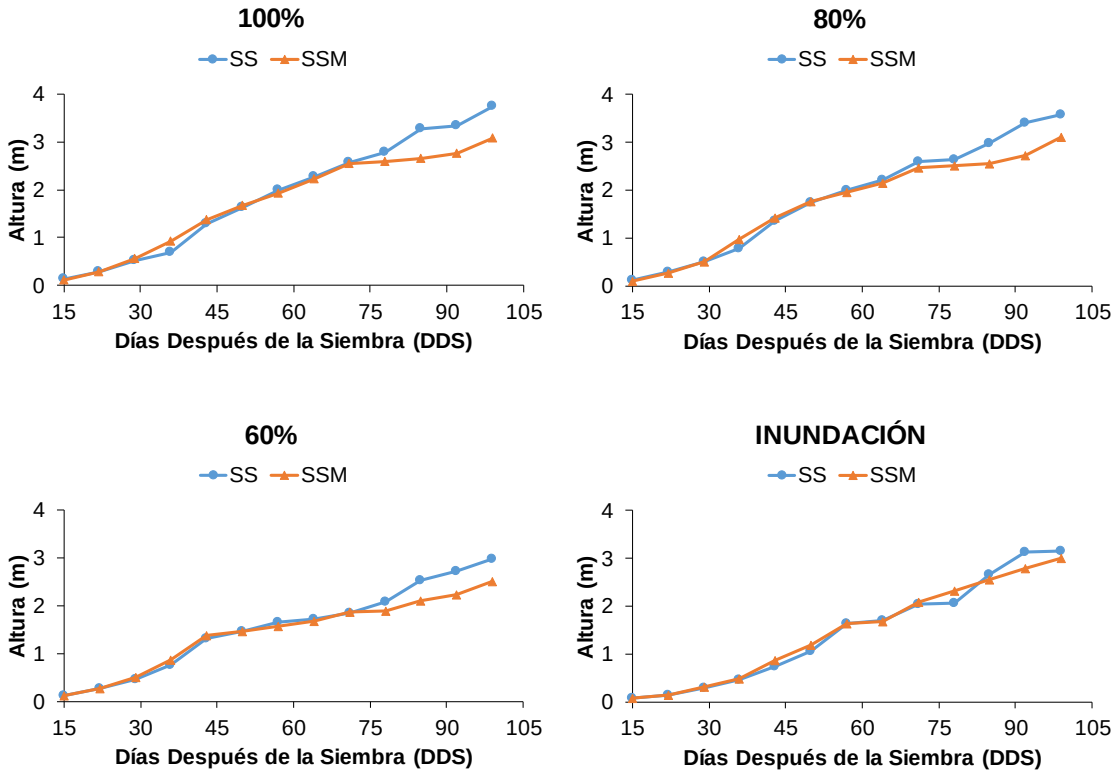

Figura 4.1.1. Comparación de altura de planta para las dos variedades de sorgo forrajero evaluadas bajo diferentes niveles de ET e inundación. CICLO VERANO 2019. INIFAP.

4.2. Número de hojas

En la Figura 4.2. se observa el incremento de número de hojas de las dos variedades evaluadas de sorgo forrajero en cada tratamiento. En el cual hasta los 35 DDS mostraban prácticamente el mismo número de hojas en los T1(100%*Kc), T2 (80%) y T3 (60%). En cuanto al T4 (Inundación) el crecimiento fue más lento por lo tanto el número de hojas también se vio afectado, donde la variedad Súper

Sorgo fue el que presento 17 hojas a los 100 DDS, mientras que los tratamientos irrigados por cintilla presentaron un total de 19 hojas. En cuanto a la variedad de Sorgo Silo Miel los tratamientos irrigados por cintilla e inundación mostraron el mismo número de hojas con un total de 19 hojas.

En la Figura 4.2.1. se observa el incremento de hojas de Súper Sorgo y Sorgo Silo Miel en cada uno de los tratamientos en la que ambos híbridos tienen un mismo comportamiento. En cuanto al número de hojas en los tratamientos de riego solo en el de inundación existió una diferencia de 2 hojas más en el Sorgo Silo Miel. Suhas *et al*., 2012 menciona que la cantidad de hojas por planta de sorgo varía ampliamente, desde 7 hasta 24, dependiendo de la variedad y de las condiciones climáticas.

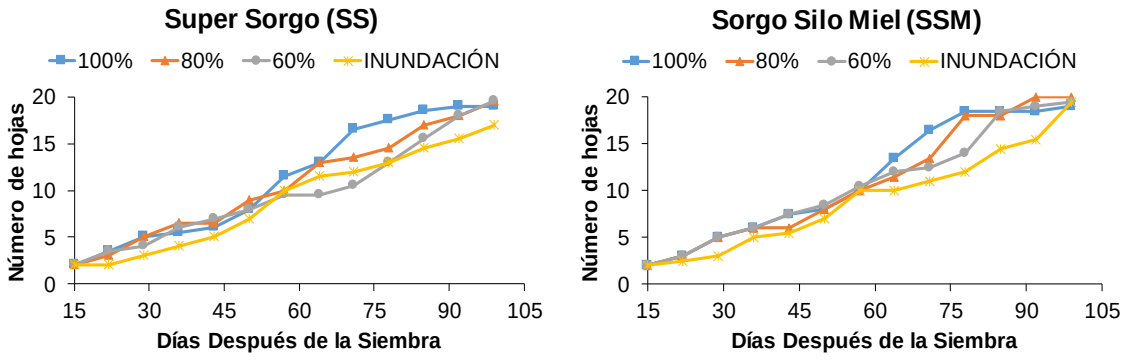

Figura 4.2. Número de hoja de las dos variedades de sorgo forrajero evaluadas con diferentes niveles de ET. CICLO VERANO 2019. INIFAP.

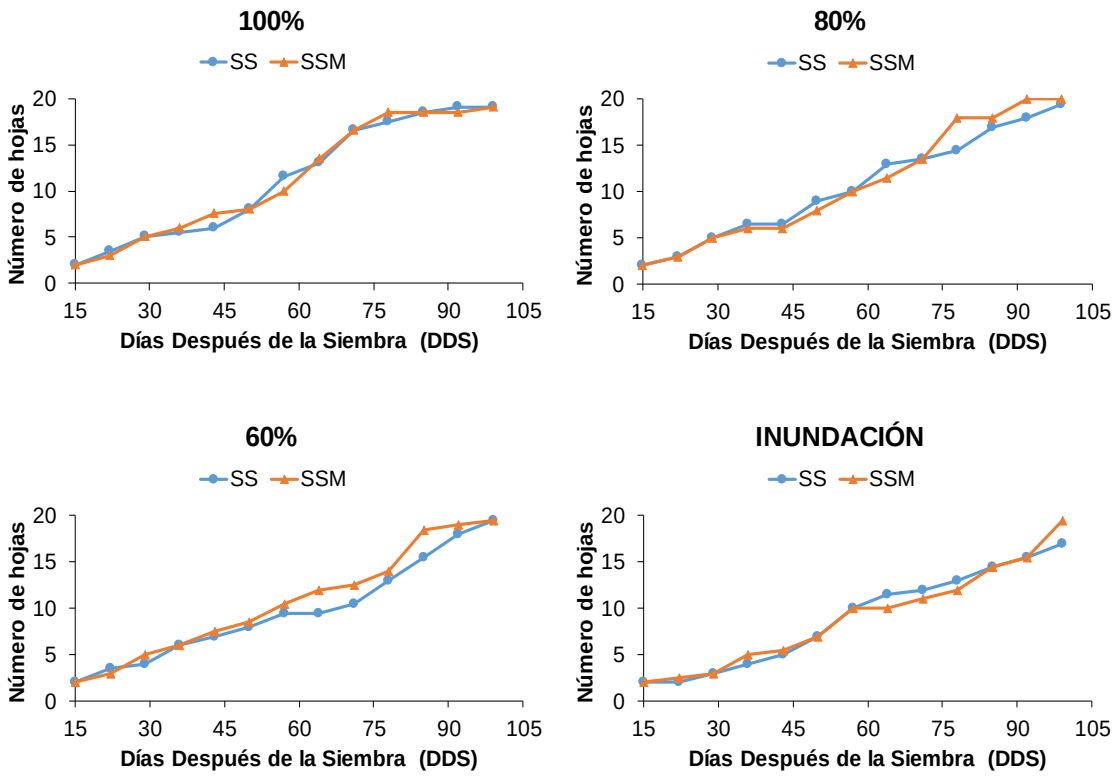

Figura 4.2.1. Comparación de número de hoja de las dos variedades de sorgo forrajero evaluadas bajo diferentes niveles de ET e inundación. CICLO VERANO 2019. INIFAP.

4.3. Diámetro de tallo

En la Figura 4.3. se observa el incremento de diámetro de tallo de las dos variedades evaluadas de sorgo forrajero en cada tratamiento, donde en la variedad de Súper Sorgo a los 30 DDS el T1 (100%*Kc), T2 (80%), T3 (60%) presentaron una tendencia muy similar con respecto al T4 (Inundación), sin embargo, a los 40 DDS los tratamientos que sobresalen más son el T2 y T3 con valor de 2.23 cm, mencionando que a los 50 DSS los cuatros tratamientos

mostraron un diámetro igual con valor de 2.30 cm, que desde ahí empezó a ascender el T4 (inundación) que fue el que presentó mayor diámetro de tallo con 2.60 cm esto hasta los 90 DDS.

En cuanto al Sorgo Silo Miel, de los 15 a 30 DDS el tratamiento que sobre sale más es el T2 (80%) con 1.90 cm, posteriormente a los 35 DDS los tres tratamientos irrigados con cintilla presentaron el diámetro similar, mientras que el tratamiento T4 (Inundación) en su etapa inicial presentó un diámetro de tallo más delgado, pero a los 50 DDS iguala a los tratamientos irrigados por cintilla, y juntos con T3 fueron los que empezaron a sobresalir con diámetro mayor hasta los 90 DDS con valor de 2.75 cm.

Así mismo, en la Figura 4.3.1. se muestra el comportamiento de la progresión de diámetro las dos variedades de sorgo en cada uno de los tratamientos, donde la variedad que sobre sale con un diámetro de mayor tamaño es Sorgo Silo Miel respecto al Súper Sorgo.

Los resultados obtenidos son inferiores a los reportados por Martínez *et al*., 2016 quien reporta en su trabajo de investigación diámetro de tallo de 2.80 cm, sin embargo, se encuentra dentro del rango de diámetro de tallo del sorgo forrajero ya que menciona Salvador *et al*., 2007 que el diámetro de sorgo es de 0.5 hasta 5 cm, el cual varía dependiendo de la variedad y el ambiente que se encuentre.

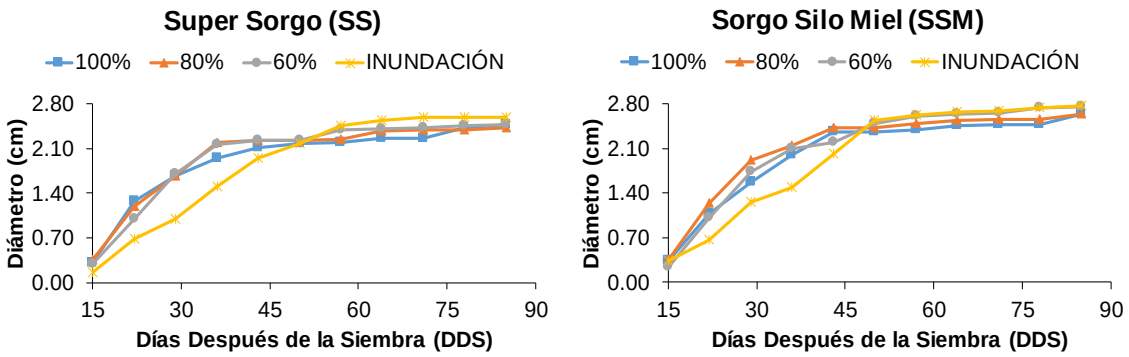

Figura 4.3. Diámetro de tallo de las dos variedades de sorgo forrajero evaluadas con diferentes niveles de ET. CICLO VERANO 2019. INIFAP.

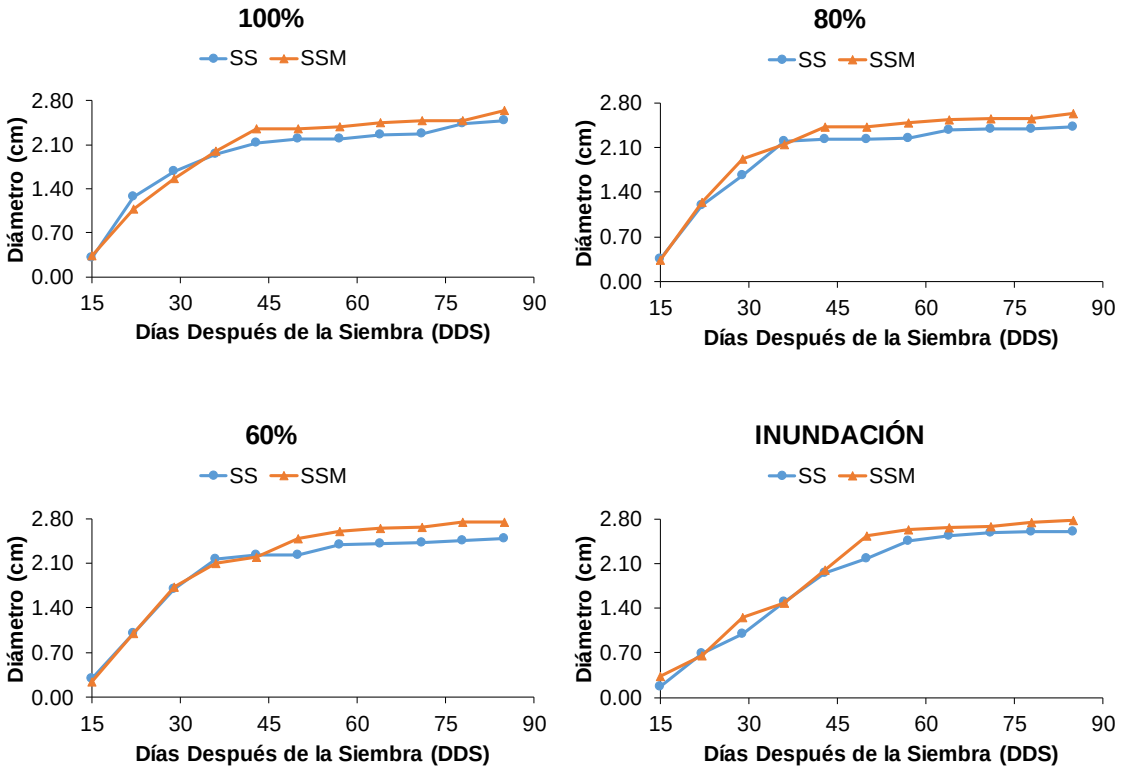

Figura 4.3.1. Comparación de diámetro de tallo de las dos variedades de sorgo forrajero evaluadas bajo diferentes niveles de ET e inundación. CICLO VERANO 2019. INIFAP.

4.4. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Las curvas de NDVI para sorgo forrajero se muestran en la Figura 4.4. Donde las dos variedades muestran la misma tendencia a lo largo del ciclo. Los valores de NDVI fueron bajos al inicio del ciclo para los tratamientos T2 (80%) y T3 (60%) los valores fueron de 0.20 y 0.13 para el T1 (100% *Kc). En este último tratamiento el valor fue menor ya que es la etapa donde se aplicó menor cantidad de agua y a la vez es el mismo que es afectado por el Kc actual proveniente de NDVI.

Los valores máximos de NDVI fueron alcanzados a los 45 DDS alcanzando el máximo valor de 0.8 en el T1 (100*Kc) mientras que para el T2 y T3 su valor máximo fue de 0.79. En lo que respecta al tratamiento T4 (Inundación) se inició con un valor de 0.15 y un valor máximo de 0.80, el cual fue alcanzado a los 60 DDS llevando un retraso de 15 días en su desarrollo en comparación con los tratamientos de riego por cintilla. Debido a lo anterior podemos mencionar que los cultivos que son regados con cintillas fueron más precoces para alcanzar su mayor cobertura vegetal y a la vez el NDVI, comparándolos con los que son regados por inundación. Esta precocidad ayudaría al productor a obtener la cosecha en menor tiempo y por consecuencia obtener un ahorro de agua.

En la Figura 4.4.1 se observa el comportamiento de las dos variedades de sorgo en cada uno de los tratamientos de riego. Los tratamientos irrigados con cintillas muestran una tendencia muy similar, por el contrario, en el riego por inundación ambas variedades una vez que alcanzan su máximo valor a 60 DDS tiende a

disminuir o aumentar su valor. Los valores que disminuyen, es debido a que el cultivo presentó un ligero estrés hídrico y al aplicar el riego las hojas del sorgo se expanden y como resultado los valores de NDVI aumentan.

Allen *et al*., 1998, menciona que las curvas de los índices de vegetación como el NDVI pueden variar de acuerdo con la cantidad de agua suministrada, prácticas de manejo y sobre todo a las condiciones climáticas de cada región.

La tendencia que muestran las gráficas de NDVI en las variedades de sorgo del presente trabajo son similares a las reportadas por Hong *et al*., 2007. Olivan, 2018. Reyes *et al*., 2019a, en el cultivo de maíz alcanzando su máximo valor de 0.8, así mismo González *et al*., 2015 encuentra valores máximos de NDVI de 0.8 en el cultivo de Trigo y cebada.

Los resultados de este trabajo fueron ligeramente superiores a los valores máximos de NDVI reportados por Reyes *et al*., 2019b, quienes encontraron valores máximos de 0.7 y posteriormente empiezan a decrecer al final del ciclo del cultivo de Súper Sorgo, cuando este empieza la etapa de senescencia.

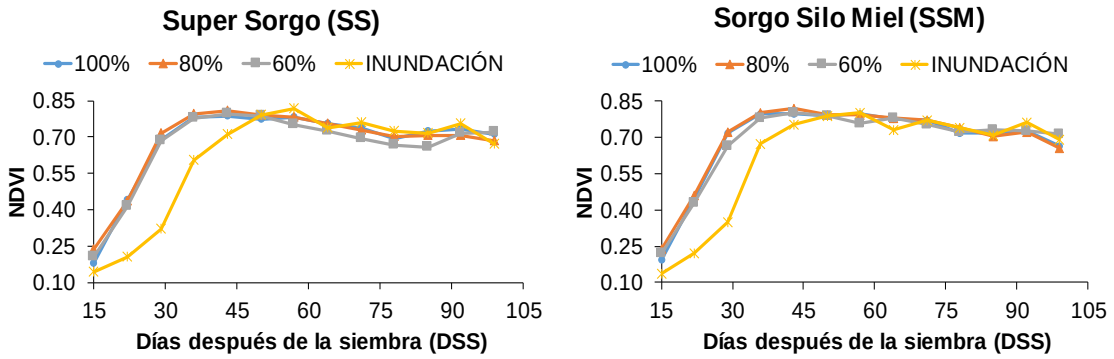

Figura 4.4. Progresión de NDVI de las dos variedades de sorgo forrajero evaluadas con diferentes niveles de ET. CICLO VERANO 2019. INIFAP.

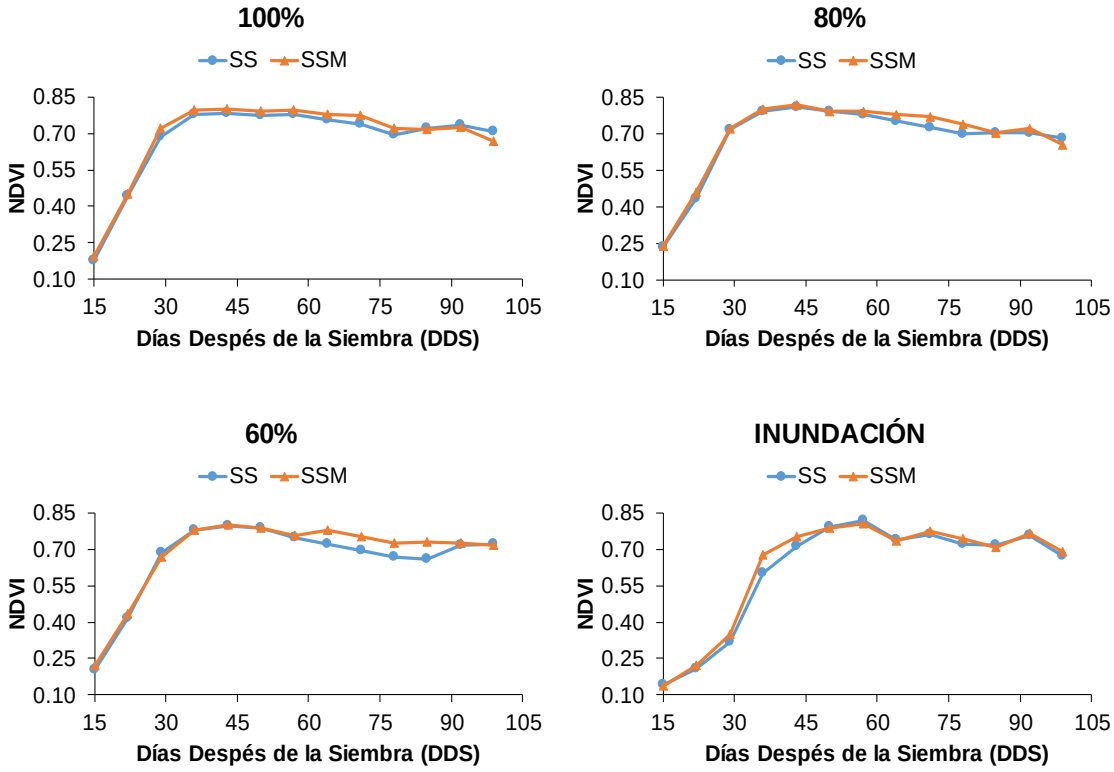

Figura 4.4.1. Comparación de NDVI de las dos variedades de sorgo forrajero evaluadas bajo diferentes niveles de ET e inundación. CICLO VERANO 2019. INIFAP.

4.5. Cobertura Vegetal

En la Figura 4.5. se muestra la progresión de cobertura vegetal de Súper Sorgo y Sorgo Silo Miel donde los tratamientos T1 (100% *Kc), T2 (80%) y T3 (60%) mantienen una tendencia similar alcanzando su máximo valor de 100% a los 36 DDS, mientras que el T4 (Inundación) alcanza el 100% de cobertura una semana después (43 DDS). La variedad de Súper Sorgo en el T1 hasta los 25 DDS mantenían una tendencia similar al Sorgo Silo Miel mientras que en el T2 desde los 17 DDS sobresale más el Silo Miel para finalmente alcanzar su 100% más rápido. Sin embargo, en el T3 y T4 los valores se mantienen iguales (Figura 4.5.1). Según la FAO, 2012. Los sorgos forrajeros alcanzan su máximo valor de cobertura vegetal a los 50 DDS en condiciones adecuadas. En nuestro trabajo los valores de cobertura fueron más precoces debido principalmente al sistema de riego que se utilizó (RGS).

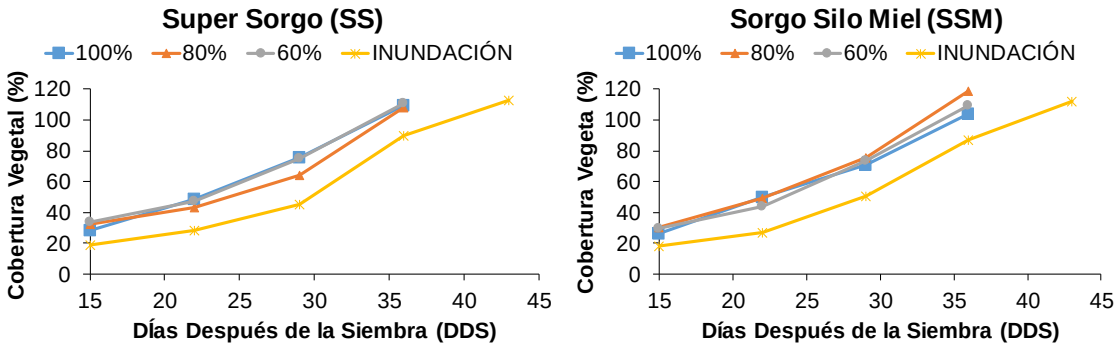

Figura 4.5. Porcentaje de Cobertura Vegetal de las dos variedades de sorgo forrajero evaluadas con diferentes niveles de ET. CICLO VERANO 2019. INIFAP.

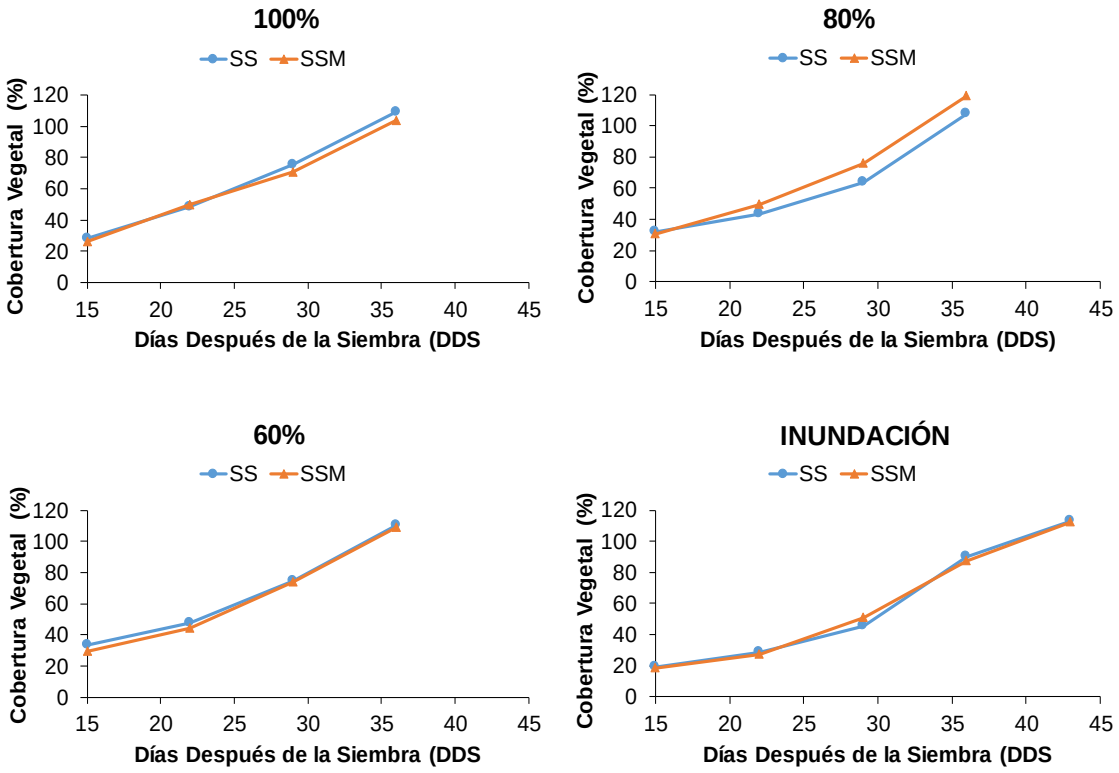

Figura 4.5.1. Comparación de porcentaje de Cobertura Vegetal de las dos variedades de sorgo forrajero evaluadas bajo diferentes niveles de ET e inundación. CICLO VERANO 2019. INIFAP.

4.6. Forraje Verde

En la producción de forraje verde la mayor producción se presentó en el T2 (80%) y T1(100%*Kc) con 94.56 t ha^{-1} y 89. 68 t ha^{-1} respectivamente siendo estos estadísticamente iguales, el tratamiento que presento menor rendimiento fue T3 (60%) el cual fue estadísticamente igual al el T4 (inundación) con producciones de 72.30 t ha^{-1} y 76. 33 t ha^{-1}, respectivamente (Figura 4.6).

En cuanto a las variedades evaluadas la mayor producción se presentó en el Súper Sorgo con 89.85 t ha^{-1} ya que esta variedad presentaba tallos de mayor diámetro y la menor con la variedad Sorgo Silo Miel con 69.50 t ha^{-1}, siendo estadísticamente diferentes los rendimientos de forraje verde (Figura 4.6.1).

Los resultados obtenidos de producción de forraje verde en el presente trabajo son similares a los reportados por (Alvarado *et al*., 2011, Faz *et al*., 2009, Rivera *et al*., 2014), quienes adquirieron producción de 72, 78 y 81 t ha^{-1} respectivamente de forraje verde en la Comarca Lagunera, sin embargo, Los resultados obtenidos fueron superior a los reportados por Hernández *et al*., 2010, González *et al*., 2014, Anaya *et al*., 2017, Nava *et al*., 2017 Anaya *et al*., 2018 quienes reportaron rendimientos de forraje verde menores, no obstante cabe mencionar que estos trabajos fueron irrigados con el riego tradicional (inundación).

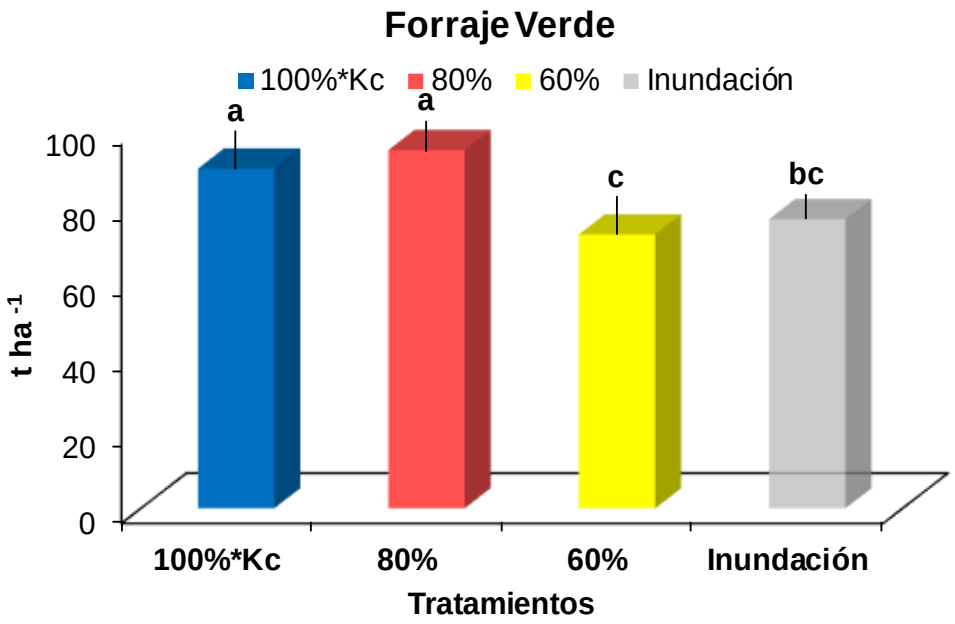

Figura 4.6. Rendimiento de forraje verde de sorgo (t ha^{-1}) bajo diferentes niveles de evapotranspiración durante el ciclo VERANO 2019 INIFAP.

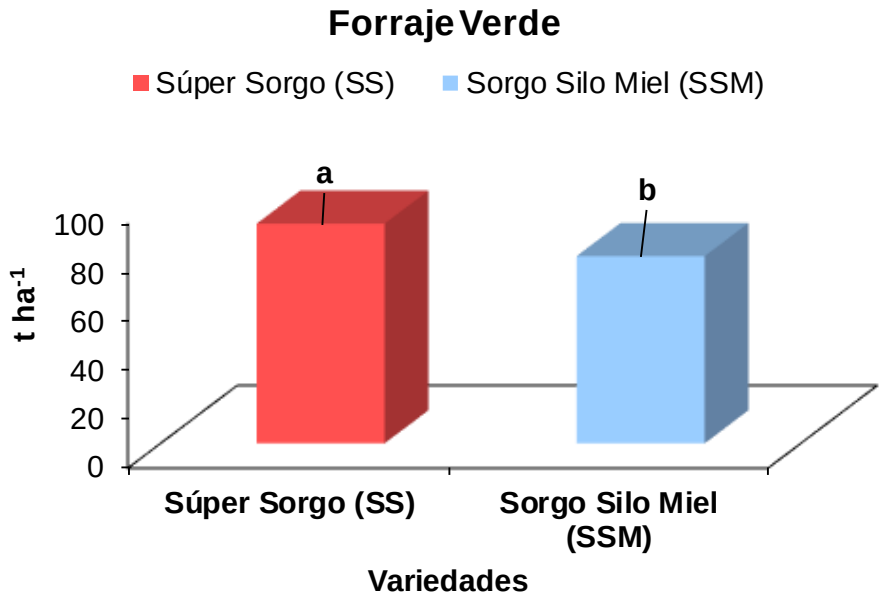

Figura 4.6.1. Rendimiento de forraje verde de sorgo (t ha^{-1}) en las variedades evaluadas durante el ciclo VERANO 2019 INIFAP.

4.7. Forraje Seco

Con respecto a la producción de forraje seco se presentó diferencia significativa entre tratamientos (Figura 4.7). Los tratamientos que sobresalieron fueron el T2 (80%) y T1 (100%* Kc) con producciones de 33.66 t ha^{-1} y 33.26 t ha^{-1}, respectivamente, seguido por el T4 (Inundación) con 28.32 t ha^{-1} siendo estos estadísticamente iguales, sin embargo, el tratamiento con menor producción de forraje seco se mostró en el T3 (60%) 24.95 t ha^{-1}, el cual fue diferente estadísticamente a los demás tratamientos.

Con respecto a las variedades evaluadas la mayor producción se presentó en Súper Sorgo con 30.68 t ha^{-1} y el menor en el Sorgo Silo Miel 29.63 t ha^{-1}, sin embargo, los rendimientos fueron estadísticamente iguales. Figura 4.7.1.

En lo que respecta a los rendimientos encontrados en este trabajo, podemos decir que estos rendimientos se encuentran dentro del rango de producción de materia seca de sorgo forrajero a nivel nacional. Martínez *et al*., 2005 mencionan que la producción de forraje seco de sorgo forrajero varia de 13 t ha^{-1} a 40 t ha^{-1}; sin embargo, en la presente investigación se encontraron rendimientos inferiores a los reportados por Vargas *et al.,* 2005., Pérez *et al*., 2010, Bolaños *et al.,* 2015, Anaya *el al.,* 2017. Nava 2017, Anaya *et al*., 2018, Reyes et al., 2019b. Sin embargo, Ríos *et al*., 2010, y Ríos *et al*., 2015 reportan rendimientos superiores de 37.65 t ha^{-1} hasta 48.65 t ha^{-1} no obstante que estos rendimientos son de ciclo de primavera.

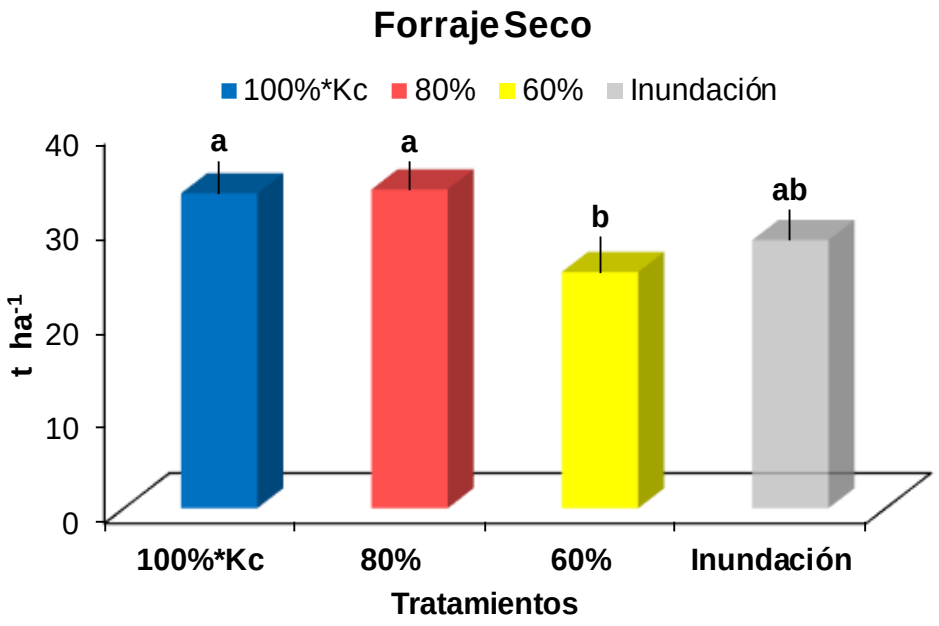

Figura 4.7. Rendimiento de forraje seco de sorgo (t ha^{-1}) bajo diferentes niveles de evapotranspiración durante el ciclo verano 2019 INIFAP.

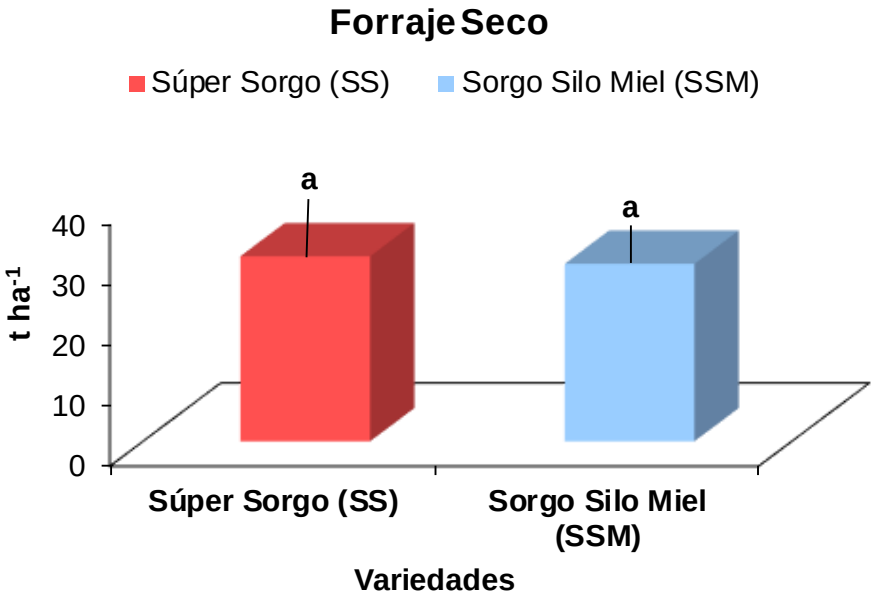

Figura 4.7.1. Rendimiento de forraje seco de sorgo (t ha^{-1}) en las variedades evaluadas durante el ciclo verano 2019 INIFAP.

4.8. Lámina total aplicada

La Figura 4.8. muestra la lámina total aplicada, donde existe diferencia significativa entre los tratamientos en el cual el T4 (Inundación) fue al que se le aplicó mayor cantidad de agua con una lámina de 71 cm, seguido de T2 (80%) con 58.8 cm, posteriormente T1 (100%* Kc) con 56.1 cm y finamente T3 (60%) 46.6 cm.

La lámina total aplicada de los tratamientos coincide con lo mencionado por la FAO, 2012, donde señala que el cultivo de sorgo requiere de 45 cm a 75 cm de agua aplicada para su producción, en los resultados obtenidos la mayor lámina fue con el riego por Inundación con 71 cm, la cual es similar a la reportada por Alvarado *et al.,* 2011 y Rodríguez *et al*., 2017.

Sin embargo, Klocke *et al*., (1996), señalan que el agua aplicada más allá de la ET, no necesariamente se traducirá en mayor rendimiento, algo similar resultó con el T4 (Inundación) que fue el de mayor lámina (Figura 4.8) y menor rendimiento (Figura 4.7) que el T1 (100%*Kc), el cual su lámina aplicada fue menor y su rendimiento mayor respecto al de Inundación, mencionando que se tomó en cuenta la ETo, tomada del atmómetro y Kc proveniente de NDVI.

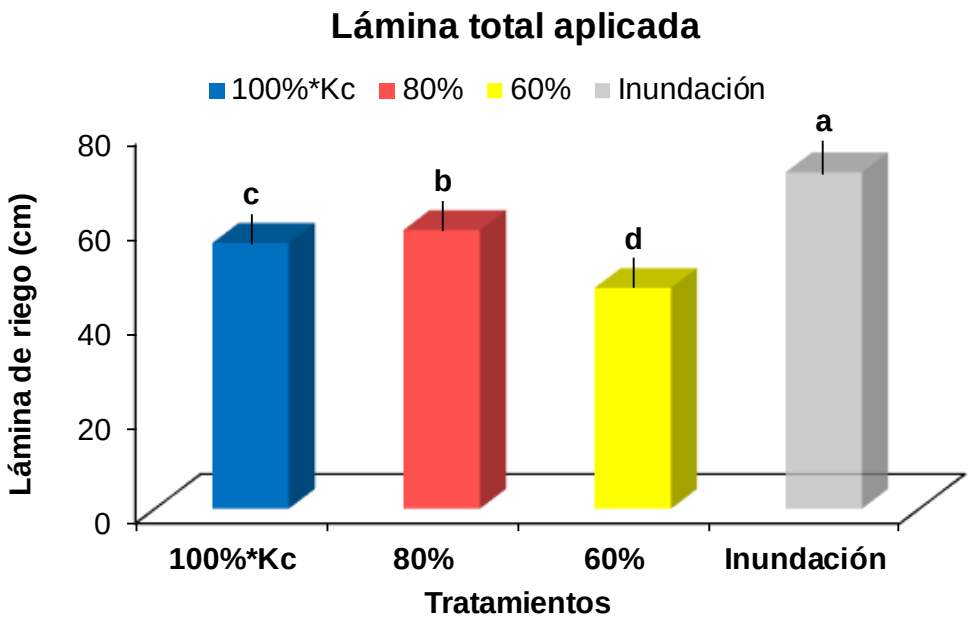

Figura 4.8. Lámina total aplicada bajo diferentes niveles de evapotranspiración durante el ciclo verano 2019 INIFAP.

4.9. Eficiencia en el uso del agua

La mayor eficiencia en el uso del agua se presentó en el T1 (100% *Kc) el cual fue afectado por el Kc obtenido del NDVI, monitoreado durante el desarrollo del cultivo. Este tratamiento mostro una eficiencia de 6 kg fs/m^3, seguido del T2 (80%) con 5.65 kg fs/m^3 y el T3 (60%) con 5.35 kg fs/m^3 siendo estos los tratamientos irrigados con cintilla, los cuales fueron estadísticamente iguales. El T4 (Inundación) fue el que presentó la menor eficiencia en el uso del agua con un valor de 3.98 kg fs/m^3 (Figura 4.9).

Con respecto a las variedades evaluadas no existió diferencia significativa sin embargo el Súper Sorgo sobresale con 5. 35 kg fs/m^3 y Sorgo Silo Miel 5. 15 kg fs/m^3. (Figura 4.9.1).

Los rendimientos de los cultivares irrigados mediante RGS, fueron similares a los que reporta Barrera *et al*., 2007, quien en su trabajo de investigación con sorgo forrajero irrigado por cintilla presenta eficiencias en el uso de agua de 5.2 kg fs/m^3 a 6.2 kg fs/m^3, mientras que en el riego por inundación los resultados fueron superiores a los reportados por Rivera *et al*., 2014 y Reta *et al*., 2017, quienes reportaron eficiencias de 2.2 y 2.06 kg fs/m^3, respectivamente, sin embargo Osuna *et al*., 2017 reportan una mayor eficiencia en el uso de agua, con un valor de 4.02 en el riego por inundación.

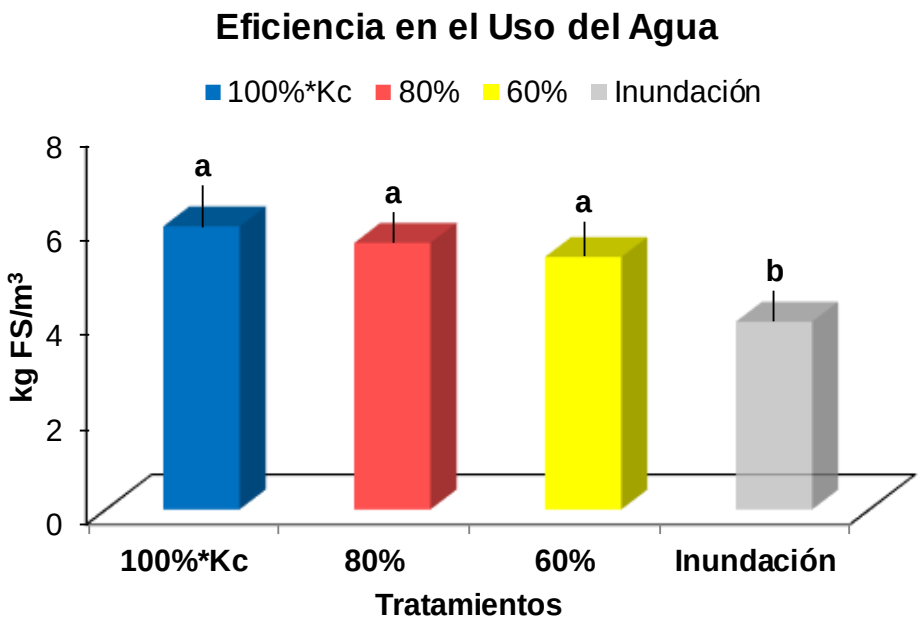

Figura 4.9. Eficiencia en el uso de agua (kg FS m^{-3}), bajo diferentes niveles de evapotranspiración durante el ciclo verano INIFAP 2019.

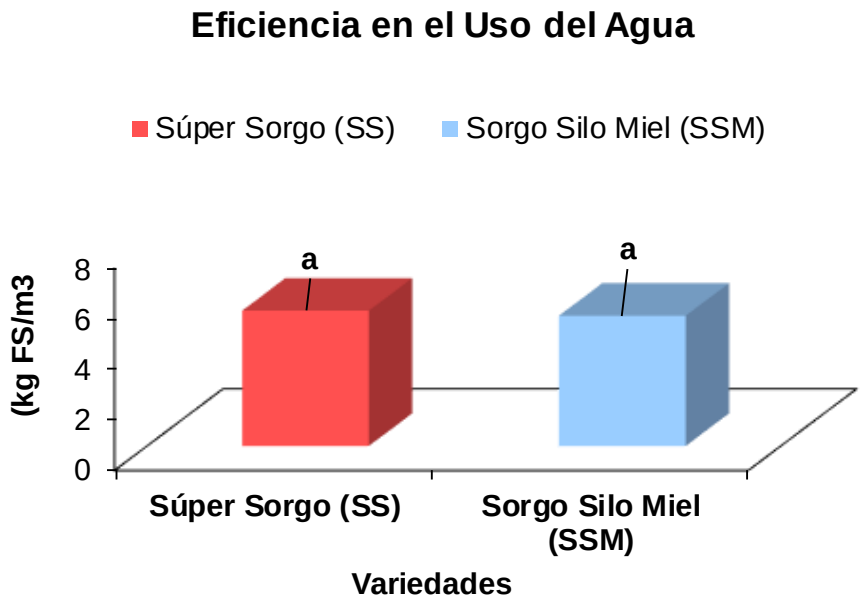

Figura 4.9.1. Eficiencia en el uso de agua (kg FS m^{-3}), en las variedades evaluadas durante el ciclo verano 2019 INIFAP.

5. CONCLUSIONES

- Los valores de índice de vegetación fueron afectados por los diferentes niveles de evapotranspiración en el sorgo forrajero en el ciclo de verano 2019.
- En cuanto a los rendimientos de forraje verde y seco, los tratamientos del 100 y 80% fueron los que presentaron los mayores rendimientos.
- El tratamiento del 100% afectado por un Kc proveniente de índice de vegetación fue el que presentó mayor eficiencia en el uso del agua (6.0 kg FS/m^3), lo que demuestra que Aplicando los requerimientos hídricos de acuerdo a la etapa fenológica del cultivo se obtienen las mayores eficiencias en el uso del agua.

6. LITERATURA CITADA

Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, and M. Smith. (1998). Crop evapotranspiration. FAO Irrigation and Drainage Paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Rome. Pag. 300. ISBN 92-5-104219-5

Allen, R. G., L. S. Pereira, D. Raes, y M. Smith. (2006). Evapotranspiración del cultivo - Guías para la determinación de los requerimientos de agua de los cultivos. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO). Roma, Italia. Pag.298.

Alvarado P., J.V. Hernández, V., B. Morales, M., A. Ávila, C. E. Payan, O., S. Camarillo, P., M. (2011). Genotipos de sorgo dulce potenciales para producción de bioetanol en el Valle de Mexicali. Universidad. Autónoma de Aguascalientes. Investigación y Ciencia. Vol. 52 pag. 15-20.

Anaya, S., A. Núñez, H. G., Martínez, R. J.G. Isidro, R. L. M., Torres, H. D., (2017). Comportamiento del potencial de producción de leche bovino en dos variedades de sorgo de diferente propósito. Agrofaz. Vol.17. Núm.1. Pag. 1033-1038.

Anaya, S., A. Reyes, G., A. Torres, H., D.M. Requejo, I. Martínez, R., J.G. (2018). Producción de forraje y calidad en sorgo y mijo en condiciones agroclimática de la región Lagunera en cicli primavera verano. Memoria de Semana Internacional de Agronomía FAZ-UJED. Pag.237-243

Arias, C., Villareal, R, J., H. Pérez, D., JT. Díaz, M. P . (2018). Contenido de azucares en tallo y crecimiento del sorgo dulce asociado con tres leguminosas forrajeras. Agrofaz.Vol.17. Núm. 1.

Arroyo, G., J. G, (2015). Súper Sorgo una alternativa para agronegocio en México. SAGARPA. Tecomán. Colima.

Ashok, K. A. (2010). Enhancing the harvest window for supply chain management of sweet sorghum for ethanol production. Journal of SAT Agricultural Research. Vol.8.Núm.1. pag.1-5.

Ayars, J.E., A. Fulton, and B. Taylor. (2015). Subsurface drip irrigation in California - Here to stay?. Agric. Water Manage. Vol. 157 pag.39-47

Becerra, J. (2007). Arreglos espaciados de bloques compactos: una alternativa para mejorar la eficiencia del agua de riego y la rentabilidad de los cultivos. Reporte Anual de Investigación e Innovación Tecnológica. Inifap.

Bolaños, A., E. Claude, E., J. Guillaume, A. (2012). Rendimiento y calidad de híbridos de sorgo con y sin nervadura café. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. Vol.3. Núm.2. Pag.441-449.

Camp, C. R. (1998). Subsurface drip irrigation: a review. Trans. Of the ASAE Vol. 41 Núm. 5 Pag.1353-1367.

Campos, I., Neale, C. M., Calera, A., Balbontín, C., González, P., J. (2010). Assessing satellite-based basal crop coefficients for irrigated grapes (*Vitis vinifera* L.). Agricultural Water Management. Vol.98. Núm.1. pag. 45-54.

Carrasco, N. Zamora, M. Melin, M. (2011) Manual de sorgo. Manual de Sorgo. INTA Buenos Aires, Argentina. Pag. 112.

Castañeda, I., C. R., Martínez, M., M. Pascual, R., F. Flores, M., H. Fernández, R., D. Esparza, G., S. (2015). Estimación de coeficientes de cultivo mediante sensores remotos en el distrito de riego Río Yaqui, Sonora, México. Agrociencia Vol.49 Núm. 2. Pag. 221-232.

CENTA (Centro Nacional de Tecnología Agropecuaria y Forestal). (2018). Guía Técnica del cultivo de Sorgo. San Andrés, La Libertad, El Salvador. CENTA.pag.31.

Chuck, H, C. Pérez, C., E. Heredia, E. Olea S. S., (2011). Sorgo como un cultivo multifacético para la producción de bioetanol en México: Tecnologías, avances y áreas de oportunidad. Revista Mexicana de Ingeniería Química. Vol.10. Núm.3. Pag. 529-549.

Delphine, L., A. Vidal, M. Smith, and J. Dauzat. (2005). More crop per drop: how to make it acceptable for farmers? Agric. Water Manage. 76: 108-119.

Ding, R. Kang, S., Zhang, Y. Hao, X. Tong, L., Du, T. (2013). Partitioning evapotranspiration into soil evaporation and transpiration using a modified dual crop coefficient model in irrigated maize field with ground-mulching. Agricultural Water Management, 127, Pag.85-96.

Domingo, F. Villa, G., L. Were, A. (2002). Cómo se puede medir y estimar la evapotranspiración. estado actual y evolución. Ecosistemas. Revista científica y técnica de ecología y medio ambiente. Pag. 15.

Er-Raki, S., Chehbouni, A., Boulet, G., & Williams, D.G. (2010). Using the dual approach of FAO56 for partitioning ET into soil and plant components for olive orchards in a semi-arid region. Agricultural Water Management. Vol.97. Núm.11. Pag. 1769–1778.

Fao. (2012). Respuesta del rendimiento de los cultivos al agua. Riego Y Drenaje

Farg, E., Arafat, S. M., El-Wahed, M. A., El-Gindy, A. M. (2012). Estimation of Evapotranspiration ETc and crop coefficient Kc of wheat, in south Nile Delta of Egypt using integrated FAO-56 approach and remote sensing data. The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science. Vol.15. Vol.1. Pag. 83-89.

Faz C., R. Núñez H.G. Figueroa V.U. (2009). Suspencion de ultimo riego de auxilio, sobre la madurez de los cultivos de maíz y sorgo forrajero Memoria de la XXI Semana Internacional de Agronomía FAZ-UJED. Pag 77-83.

Food and Agriculture Organization (FAO). (2011). El estado de los recursos de tierras y aguas del mundo para la alimentación y la agricultura. Cómo gestionar los sistemas en peligro. Roma, Italia. Pag. 22-23.

García, B., A. Ramírez, V., F. Santosco, P., A. (2016). Super Sorgo: El sorgo dulce como una alternativa rentable para algunas regiones del trópico mexicano. INIFAP (Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias). Tecomán, Colima, México. Pag. 21-29.

Godoy, A. C., Pérez, G. A., Ciria, A. Torres E., Hermosillo, L. J., Reyes J. I., (2003). "Uso de agua, producción de forraje y relaciones hídricas en alfalfa con riego por goteo subsuperficial. Revista Agrociencia Vol.3. Núm.2. Pag.107-115.

Godoy, A., C. I. Reyes J. Torres, E. C. (2005). Riego por goteo subsuperficial en nogal pacanero (*Carya illinoensis K*.) con diferente número de laterales de riego. Revista Agrícola Técnica. México. Vol.31 pag. 203-212.

González, J. P., Rubio, E. Calera, A. Cuesta, G. A., Moratalla, A. Gilabert, M.(2005). Seguimiento de la Evapotranspiración mediante los Coeficientes de Cultivo desde Teledetección. Aplicación a Maíz y Trigo. XI Congreso Nacional de Teledetección. Puerto de la Cruz. Tenerife. Pag. 81-84.

González, R. F., Herrera, P. J., López, S. T., Cid, L. G., (2011). Respuesta del sorgo al riego en dos épocas de siembra. Función agua rendimiento. Revista Ciencias Técnicas Agropecuarias. Vol. 20. Núm.1. pag. 40-46.

González, L. M. González, L. Ma. (2015). Secuencias temporales de imágenes y datos meteorológicos para caracterizar variabilidad en parcelas de trigo y maíz. Congreso XVI Sevilla, 13.

Hernández, E., L. A. Moreno, G., T. Loaiza, M., A. Reyes, J., J.E. (2010). Sinaloense, 202, nueva variedad de sorgo para el estado de Sinaloa. Revista. Mexicana Ciencias Agrícola. Vol.1 Núm.5. pag 733-737.

Hong, S., J. S. Schepers, D. D. Francis, and M. R. Schlemmer. (2007). Comparison of ground-based remote sensors for evaluation of corn biomass affected by nitrogen stress. Soil Sci. Plant Anal. 38: 2209-2226. doi: 10.1080/00103620701549157.

Huete A., Didan K., Leeuwen W., Miura T., Glenn, E. (2010). MODIS vegetation indices. Land Remote Sensing and Global Environmental Change. Vol.26. Pag. 579-602.

Inman, D. Khosla, R. Mayfi, T. (2005). On-the-go active remote sensing for effi cient crop nitrogen management. Sensor Review. Vol.25. Núm.3. Pag. 209-214.

Johnson, L.F., Trout, T.J. (2012). Satellite NDVI assisted monitoring of vegetable crop evapotranspiration in California's San Joaquin Valley. Remote Sensing. Vol.4. Núm.2. Pag.439–455.

Kamble, B., Kilic, A., & Hubbard, K. (2013). Estimating crop coefficients using remote sensing-based vegetation index. Remote Sensing. Vol. 5. Núm.4. Pag.1588-1602.

Klocke, L.N 1996.Evapotranspiration (ET) or Crop Water Use Neb Guide G90-992-A. Institute of Agriculture and Natural Resourses. University of Nebraska-Lincoln. USA

Lan, Y; Zhang, H; Lacey, R; Hoffmann, WC; Wu, W. 2009. Development of an integrated sensor and instrumentation system for measuring crop conditions. Agricultural Engineering International, The CIGR E-Journal 11:1-16.

Lawton, K. 2008. Crop sensors come of age. The Progressive Farmer (2008). Pag.1-4.

Lloveras J., López F., A. Bagá M. Betbese J.A. López, Q., A. (2006). Producción de biomasa de sorgo forrajero en regadíos del Valle del Ebro. Agricultura. Pag. 804-807

Lucero, V., G. Troyo, D., E. Murillo, A., B. Nieto, G., A. Ruíz, E., F. Beltrán, M., F. Zamora, S., S. (2017). Diseño de un sistema de riego subterráneo para abatir la

evaporación en suelo desnudo comparado con dos métodos convencionales. Agrociencia. Vol.51 Núm.5. pag.487-505.

Marini, F. (2016). Modelo para la obtención de la Evapotranspiración Real (ETR) y Potencial (ETP) para el sudoeste bonaerense. INTA.

Martínez, V., J. Silva, S., R.A. 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. Coahuila, México. Inifap. Pag.10 .

Martínez, M., S.J. Gómez, K., R. Rodríguez, V., G. Veitia, R., N. Saucedo, C., O. Gil, D., V. (2016). Caracterización morfoagronómica de plantas de sorgo granífero variedad CIAP 132R-05 regeneradas vía embriogénesis somática en condiciones de campo. Centro Agrícola, *43* (3), 73-79.

Montemayor, T., J. A., (2006) Avances de la irrigación en la Comarca Lagunera. Cía. Editora de la Laguna S.A de C.V. Torreón, Coahuila, México. Pag. 8.

Montemayor, T., J. A., Lara, M., J. L., Woo, R., J. L. Munguía, L., J. Rivera, G., M. Trucíos, C. R. (2012). Producción de maíz forrajero (*Zea mays* L.) en tres sistemas de irrigación en la Comarca Lagunera de Coahuila y Durango, México. Agrociencia. Vol.46. Núm.3. Pag. 267-278.

Montemayor, T., J. A., Suárez, G., E. Munguía, L., J., Segura, C., M. Mendoza, V., R. Woo, R., J. (2018). Acolchados plásticos para la producción de maíz (*Zea mays*

L.) forrajero en la Comarca Lagunera. Revista Mexicana De Ciencias Agrícolas. Vol.20. pag. 4107-4115.

Moriondo, M. Ferrise, R. Trombi, G. Brilli, L. Dibari, C. Bindi, M. (2015). Modelling olive trees and grapevines in a changing climate. Environmental Modelling & Software. Vol. 72. Pag. 387-401.

Nava, B., C.C. Rosales, S., R. Jimenez, O., R. Carrete, C., F.O. Dominguez, M., P.A. Murillo, O., M. (2017). Rendimiento y valor nutricional de tres variedades de sorgo dulce cultivadas en cuatro ambientes de Durango. Revista Mexicana Ciencias Pecuarias Vol.8 Núm. 2 pag.147-155

Navarro, A. Rolim, J. Miguel, I. Catalão, J. Silva, J. Painho, M. Vekerdy, Z. (2016). Crop monitoring based on SPOT-5 Take-5 and Sentinel-1A data for the estimation of crop water requirements. Remote Sensing. Vol.8. Núm. 6. Pag.525.

Núñez, H., G. Anaya, S., A. Faz, C., R. Serrano, M., H. S. (2015). Variedades de sorgo forrajero con alto potencial de producción de leche. Agrofaz. Vol. 15. Num. 1 pag. 39-45.

Odi, L., M. Campos, I., Neale, C., M. Ortega, F., S. Poblete, E., C. Balbontín, C. Calera, A. (2016). Estimating evapotranspiration of an apple orchard using a remote sensin based soil water balance. Remote Sensing, Vol.8. Núm.3. Pag. 253.

Olivan, B. (2018). Caracterización de la dinámica de las dobles cosechas en el Canal de Aragón y Cataluña mediante series temporales de NDVI. TESIS. Escuela Politécnica Superior Universidad de Zaragoza.

Osuna, C., E. Martínez, G., M. (2017). Rendimiento y calidad de forraje de maíz y sorgo de temporal a cuatro y seis hileras en Aguascalientes, México. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas. Vol.8. Núm.6. Pag. 1259-127

Paz, M.L. (2015). Riego por goteo. Buenos Aires, Argentina: INTA.

Pedroza, S., A. Ríos, F., J. Torres, M., M. Cantú, B., J. Piceno, S., C. Yáñez. L. (2014). Eficiencia del agua de riego en la producción de maíz forrajero (*Zea mays* L.) y alfalfa (*Medicago sativa*) impacto social y económico. Terra Latinoamericana. Vol.32. Núm.3. Pag. 231-23.

Pérez, G., A.A. Pineda, D., L. Latournerie, M., W. Pam, P., Godoy, A., C. (2008). Niveles de evapotranspiración potencial en la producción de chile habanero. TERRA Latinoamérica. Vol.26 Núm.1. Pag.53-59.

Pérez, A., S. O. Iglesias, J. Wencomo, H. B. Reyes, F. Oquendo, G. Milián, I.(2010). Caracterización y potencialidades del grano de sorgo (*Sorghum bicolor L. Moench).* Pastos y Forrajes. Vol.*33.* Núm.1), 1.

Reta, S., D.G. Figueroa, V., U. Faz, C., R. Núñez, H., G. Gaytán, M., A. Serrato, C., J.S. Payán, G., J.A. (2010). Sistemas de producción de forraje para incrementar la productividad del agua. Revista Fitotecnia Mex. Vol.33. Núm. 4. Pag. 83-87.

Reta, S., D. G. Serrato, C., J.S. Quiroga, G., H.M. Gaytán, M., A. Figueroa, V., U. (2017). Secuencias de cultivo alternativas para incrementar el potencial forrajero y productividad del agua. Revista Mexicana Ciencias Pecuarias, Vol. 8 Núm. 4. Pag. 397-406.

Reyes, G., A. Reta, S., D. G. Sánchez, D., J. I. Ochoa, M. E., Rodríguez, H. K., Preciado, R., P. (2019a). Estimación de la evapotranspiración de maíz forrajero apoyada con sensors remotos y mediciones in situ. Terra Latinoamericana. Vol.37. Núm. 3. Pag. 279-290.

Reyes, G., A. Rivera, G., M. Delgado, R., G. Reta, S., D.G. Sánchez, D.,J.I.(2019b). Programación del riego mediante el uso de un atmómetro. Agrofaz – Journal of Environmental and Agroecological Sciences. Vol.1 Núm.1. pag. 68-79

Ríos, F., J. L. Torres, M., M. Ruiz, T., J. Navarrete, M., C. López, M., J. I. Susano, G., J. L. (2010). Producción, productividad, rentabilidad y empleo en el cultivo de sorgo forrajero (*Sorghum vulgare*) regado por bombeo en la laguna, México de 1990 a 2006. Revista Chapingo Serie Zonas Áridas. Vol.10. Pag. 33-41.

Ríos, F., J. L. Torres, M., Castro, F., M. Torres, M., M.A. Ruiz, T.,J. (2015). Determinación de la huella hídrica azul en los cultivos forrajeros del DR-017, Comarca Lagunera, México. Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias, vol. 47, núm. 1. pag. 93-107

Rivera, G., M. Godoy, A., C. Faz, C., R. (2003). Uso eficiente de riego subterráneo por goteo para incrementar la producción de alfalfa. INIFAP, Matamoros Coahuila. Pag 2.

Rivera, M. G., Estrada, A. J., Orona, C. I. y Sanchez, O. I. (2007). Producción De Alfalfa Con Riego Por Goteo Subsuperficial. Una opción para regiones con escasa disponibilidad de agua. CENID – RASPA, INIFAP.pag.5.

Rivera, E., G. Esquivel, J., A. Muñoz, M., Velásquez, H., M. (2014). Generación de tecnología para aumentar la eficiencia en el aprovechamiento del agua y nutrientes en sorgo forrajero con tres riegos de auxilio. Agrofaz, vol 14 No. 2.

Rodríguez, P., Richard. Cánepa. P. Burgos, M. Martinol, G.. (2017). Necesidades hídricas y programación de riego en los cultivos de maíz, soya y sorgo en la localidad de Salto, Uruguay. Acta Iguazu. 6. 23-32.

Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1973). Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In. Proceedings 3rd Earth Resources Technology Satellite (ERTS) symposium, Vol. 1, pp. 309–317. Washington, DC, USA: NASA SP-351, NASA.

Ruz, R., R. Escalona, P., A. Romero, A., A. (2018). Evaluación de tres cultivares de sorgo *Sorghum bicolor* (L.) Moench para la alimentación animal. Pastos y Forrajes. Vol.*41.* Núm.2. Pag. 93-96.

SADER. 2019. Delegación en la Región Lagunera, Subdelegación Ganadería 2019. El Siglo de Torreón. Suplemento especial. Enero 1. 2019. p. 28

SAGARPA-CEIEGDRS (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación Comités Estatales de Información Estadística y Geográfica para el Desarrollo Rural Sustentable). 1990-2003. Anuario Estadístico de la Producción Agropecuaria de la Región Lagunera Durango-Coahuila. Delegación en la Región Lagunera Durango-Coahuila. Subdelegación de Planeación y Desarrollo Social. Cd. Lerdo. Durango. 163 p.

Salvador, Z., H. Hernández, M.A. Ayala, M., J.E. Guzmán, S., R.F. Borja, C.A. Alvarado, T., M. Calderón, V.R. (2007). Guía Técnica del Sorgo. CENTA, San Andrés El Salvador. Pág. 7.

Sánchez M. L. (2005). Estrategias modernas para la conservación de forrajes en sistemas deproducción bovina tropical. Revista CORPOICA, Vol.6 Núm.2. Pp:15-21

Santana, P. L. M., (2008). Evapotranspiración Penman-Monteith. Agrocabildo., 1:77.

Serna, S., S. Chuck, H., C. Peréz, C., E. Eredia, O., E. (2012). Sorghum as a Multifunctional Crop for the Production of Fuel Ethanol: Current Status and Future Trends. Bioethanol ed. Monterrey(Nuevo Leon): BOARDS.

Shock, C.C., & Welch, T. (2013). El riego por goteo: Una introducción. Departamento de Agricultura de los Estados Unidos. Pag. 9.

SIAP-SAGARPA (Servicio de Información Agroalimentaria-Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación).2012.

Simoneti J.S., Tiritan C.S., Calonego J.C. y Rodríguez L. (2008). Rebrota de soqueiras de sorgo emfunçao da altura de corte e da adubaçao nitrogenada. Ceres Vol.55 pag. 102–108.

Suhas P., W. A. (2012). Respuesta del rendimiento de los. Organización De Las Naciones Unidas para la alimentación y la agricultura. Pag.141-151

Vargas, RF. (2005). Valoración nutricional y degradabilidad ruminal de genotipos de sorgo forrajero (*Sorghum sp*). Agronomía Mesoamericana Núm.16. Vol.2. Pag. 215-223.

Verhulst, N; Govaerts, B; Sayre, KD; Deckers, J; Francois IM; Dendooven, L. 2009. Using NDVI and soil quality analysis to assess infl uence of agronomic management on within-plot spatial variability and factors limiting production. Plant & Soil 317:41-59.

Yescas., P. (2015). Forrajero bajo riego por goteo subsuperficial. Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro Unidad Laguna

Zermeño, G., A. Cruz, S., C. I. Munguía, L., J. P. Catalán, V., E. A. Campos, M., S. G. Cortés, B., J. J. (2014). Efecto del sistema de riego y clima en la eficiencia del uso de agua de nogal pecanero. *Terra Latinoamericana*. Vol.*32* Núm.1 pag. 23-33.