

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA
AREA DE ESTUDIOS DE POSGRADO



SISTEMAS DE PRODUCCIÓN EN BASE A FERTILIZACIÓN Y ARREGLOS
TOPOLÓGICOS EN SORGO DULCE (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) PARA
LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL

POR

JESÚS ALBERTO OLVERA VARGAS

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGRÍCOLA

Marín, N. L., Febrero 2011

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN

FACULTAD DE AGRONOMÍA
AREA DE ESTUDIOS DE POSGRADO



SISTEMAS DE PRODUCCIÓN EN BASE A FERTILIZACIÓN Y ARREGLOS
TOPOLÓGICOS EN SORGO DULCE (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) PARA
LA PRODUCCIÓN DE BIOETANOL

POR

JESÚS ALBERTO OLVERA VARGAS

COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO DE
MAESTRÍA EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGRÍCOLA

Marín, N. L., Febrero 2011

ESTA TESIS FUE REVISADA Y APROBADA POR EL COMITÉ
PARTICULAR COMO REQUISITO PARCIAL PARA OBTENER EL GRADO
DE MAESTRO EN CIENCIAS EN PRODUCCIÓN AGRÍCOLA

Aprobación de la tesis

Ph. D. Francisco Zavala García
Asesor Principal

Dr. José Elías Treviño Ramírez
Co-asesor

MC. Eduardo Alejandro García Zambrano
Co-asesor

Dra. Hilda Gámez González
Co-asesor

Ph. D. Francisco Zavala García
Subdirección de Estudios de Posgrado e Investigación

AGRADECIMIENTOS

A Dios por ponerme en este camino y ayudarme a terminar esta meta.

A mi familia quienes son el pilar de mi vida.

A la Universidad Autónoma de Nuevo León y particularmente a la Facultad de Agronomía por darme la oportunidad de realizar mis estudios de Maestría

Al Dr. Francisco Zavala García, Asesor Principal de Tesis; por su conocimiento y exigencia siempre encaminados a buscar mi superación y por su orientación para el desarrollo de este trabajo.

Al maestro Eduardo Alejandro García Zambrano, los doctores José Elías Treviño Ramírez, Hilda Gámez González que realizaron valiosas aportaciones y me dedicaron su tiempo para la revisión de esta investigación.

Al Dr. Silvio Silverio da Silva por todas las facilidades que me proporcionó para poder realizar mi estancia académica en Brasil y trabajar en su laboratorio.

A Juany, Rosy, Chelita, Lulu, ,Paty, Cecy, Miryam y Claudia por las atenciones y el gran trabajo que día a día realizan en las oficinas de posgrado para ayudar a los estudiantes.

A los señores Rogelio Meza Zúñiga, Javier Sánchez Marín, Eulalio Benavides y Benjamin, por el gran apoyo y la amistad que siempre me dieron tanto en los trabajos de campo como en casa de Lalo.

A mis compañeros de la facultad de agronomía, Noe, Piñera, Chuy García, Ernesto, Yerbez y Romualdo que con su compañía fue más grata mi estancia.

RECONOCIMIENTO

Este trabajo formo parte del proyecto SWEETFUEL apoyado por la Comunidad Europea y del que forman parte las siguientes instituciones: CIRAD (Francia), ICRISAT (India), EMBRAPA (Brasil), KWS (Alemania), IFEU (Alemania), UNIBO (Italia), UCSC (Italia), ARC-GCI (Sudáfrica), WIP (Alemania) y UANL (México).

Asímismo, se desarrollo dentro del proyecto PAICYT “Evaluación del sorgo (*Sorghum bicolor* [L.] Moench) y la higuera (*Ricinus communis* L.) como cultivos con potencial para la producción de biocombustibles en México (GCT012-09).

INDICE DE CONTENIDO

Capítulo	Página
INDICE DE CONTENIDO.....	vi
INDICE DE CUADROS.....	vii
INDICE DE FIGURAS.....	xi
RESUMEN.....	Xiii
SUMMARY.....	xv
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	7
2.1. Combustibles fósiles a nivel mundial.....	7
2.2. Biocombustibles a nivel mundial.....	9
2.2.1. Bioetanol de segunda generación.....	14
2.2.2. Biocombustibles en México.....	16
2.3. El cultivo del sorgo dulce.....	18
2.3.1. Origen y clasificación botánica.....	18
2.3.2. Características energéticas del sorgo dulce.....	20
2.3.3. Bioetanol a partir de sorgo dulce.....	24
2.3.4. Sorgo dulce en México.....	27
2.4. Fertilización del sorgo dulce.....	29
2.4.1. Fertilización química.....	31
2.4.2. Fertilización orgánica.....	32
2.5. Arreglos topológicos y densidad de población en el sorgo dulce.....	35
III. MATERIALES Y METODOS.....	42
3.1. Localización del Experimento.....	42
3.2. Clima y suelo.....	43

Capítulo	Página
3.3. Establecimiento del cultivo.....	44
3.3.1. Ciclo Primavera 2009.....	44
3.3.2. Ciclos Otoño 2009 y Primavera 2010.....	47
3.4. Análisis Estadístico.....	49
3.5. Variables evaluadas.....	51
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	56
4.1. Ciclo Primavera 2009.....	56
4.2. Ciclo Otoño 2009.....	61
4.3. Ciclo Primavera 2010.....	67
V. CONCLUSIONES.....	72
VI. BIBLIOGRAFIA.....	74

INDICE DE CUADROS

Cuadro	Título	Página
1	Fuentes de fertilizantes utilizadas para los ciclos Primavera y Otoño 2009 y primavera 2010. Marín, N. L....	46
2	Cuadrados medios de los análisis de varianza de las variables consideradas en el estudio. Sistema de siembra con riego por goteo. Marín, N. L. Primavera 2009.....	56
3	Comparación de medias de peso fresco y peso de hojas. Sistema de siembra doble hilera con riego por goteo. Marín, N. L. Primavera 2009.....	57
4	Cuadrados medios de los análisis de varianza de las variables consideradas en el estudio. Sistema de siembra surcos con riego por gravedad. Marín, N. L. Primavera 2009.....	58
5	Comparación de medias de altura de planta . Sistema de siembra surcos sencillos con riego por gravedad. Marín, N.L. Primavera 2009.....	59
6	Cuadrados medios del Análisis de Varianza de bloques al azar en localidades (lotes) para las variables peso fresco total (PFT) y grados Brix (°B). Sistemas de siembra surcos sencillos con riego por gravedad y doble hilera con riego por goteo. Marín, N.L., Primavera 2009.....	60

7	Comparación de medias para la variable peso fresco total (PFT). Sistema de siembra surcos sencillos con riego por gravedad vs sistema de siembra doble hilera con riego por goteo. Marín, N.L. Primavera 2009.....	60
8	Cuadrados medios de tratamientos de fertilización los análisis de varianza para las variables consideradas en los tres sistemas de siembra. Marín, N.L. Otoño 2009.....	61
9	Comparación de medias de las variables peso fresco total (PFT), peso de tallo (PT) y peso de hojas (PH). Sistema de siembra doble hilera con riego por gravedad. Marín, N.L. Otoño 2009.....	62
10	Cuadrados medios de los sistemas de siembra de los análisis de varianza de las variables consideradas en el estudio. Marín, N.L. Otoño 2009.....	65
11	Comparación de medias de las variables consideradas en el estudio. Sistemas de siembra doble hilera con riego por goteo (1) y doble hilera con riego por gravedad (2). Marín, N.L. Otoño 2009.....	65
12	Cuadrados medios de los análisis de varianza de las fuentes de variación evaluadas en el estudio. Marín, N.L. Primavera 2010.....	67
13	Cuadro 13. Comparación de medias de las variables peso de hojas (PH), altura (ALT), diámetro (DIAM), grados Brix (°B) y jugo por hectárea (Jha). Factor de variación	

sistemas de siembra. (I) doble hilera con riego por goteo;
(II) doble hilera con riego por gravedad; (III) surcos sencillos con riego por gravedad Marín, N.L. Primavera 2010..... 68

INDICE DE FIGURAS

Figura	Título	Página
1	Rutas tecnológicas para la producción de bioetanol.....	11
2	Proceso de hidrólisis ácida de bagazo de caña para la producción de etanol de segunda generación.....	15
3	Principales cultivos considerados por la SAGARPA para la producción de biocombustibles en México.....	17
4	Espacios libres desaprovechados para la intercepción de energía solar en los surcos sencillos a 0.8 m.....	39
5	El arreglo a doble hilera permite un dosel más cerrado que mejora la captación de luz y guarda más humedad en la zona radical.....	39
6	Cosechadora de caña con simulación de cosecha de sorgo dulce a un surco (a) y a doble hilera (b). Trilladora de maíz.....	41
7	Ubicación geográfica del Campo Agrícola Experimental de la FAUANL.....	42
8	Establecimiento del lote de doble hilera con sistema de riego por goteo.....	44
9	Establecimiento del lote de doble hilera con sistema de riego por gravedad.....	45
10	Establecimiento del lote de surcos sencillos con riego por gravedad.....	45

Figura	Título	Página
11	Medición de la altura de planta.....	52
12	Medición del diámetro de tallo.....	53
13	Corte del entrenudo central. (A) medición de los °Brix (B)	53
14	Medición del peso fresco total por unidad experimental....	54
15	Separación de tallos y panoja para su medición.....	54

RESUMEN

La escasez de recursos energéticos fósiles, principalmente petróleo, ha generado a nivel mundial una crisis energética, económica y alimenticia. Además, las actividades humanas como la deforestación y el uso excesivo de energía fósil, han ocasionado problemas ambientales como el calentamiento global y alta contaminación. En este contexto, México se encuentra ante una drástica disminución de sus reservas de petróleo que es su principal fuente de energía. La generación de fuentes de energía alternativas para combatir estos problemas y buscar la independencia energética es una prioridad. El bioetanol es considerado el biocombustible más importante ya que se puede mezclar con la gasolina y actuar como agente oxigenante o bien usarse como combustible neto en máquinas de combustión interna; se crea a partir de cultivos como el maíz, usado en Estados Unidos y la caña de azúcar en Brasil. Entre los cultivos con potencial energético se encuentran las variedades de sorgo dulce (*Sorghum bicolor* L. Moench). En México, el potencial productivo del sorgo dulce es de aproximadamente dos millones de hectáreas. El objetivo del siguiente trabajo de investigación es comparar sistemas de siembra y niveles de fertilización utilizando el rendimiento de forraje y características asociadas con el contenido de azúcares en el jugo de los tallos del sorgo dulce. Para este propósito se evaluaron seis tratamientos de fertilización y tres sistemas de siembra en tres ciclos agrícolas (Primavera

y Otoño 2009 y Primavera 2010). El material genético que se utilizó fue: sorgo dulce FAUANL 1. Los resultados demostraron que se obtuvieron los mejores rendimientos con los tratamientos de fertilización más bajos, debido al efecto negativo de la alta fertilización ocasionado por el tipo de suelo existente en la región donde se desarrolló el experimento. El sistema de siembra a doble hilera con riego por gravedad presentó los mejores resultados para las características de PFT y PT mientras que el sistema de doble hilera con riego por goteo fue mejor para ALT, DIAM y °B. En general, el sistema de siembra a doble hilera presentó las mayores ventajas, ya que además de los efectos en las características mencionadas, se realiza una cosecha más eficiente al disminuir los gastos energéticos y uso de equipo agrícola al cosechar el doble de material vegetativo, aprovechando este arreglo topológico.

SUMMARY

The scarcity of fossil fuels, mainly oil, has generated a worldwide energy, economic and food crisis. In addition, human activities like deforestation and excessive use of fossil energy have caused environmental problems like global warming and high pollution. In this context, Mexico is facing a sharp decline in its oil's reserves, which is his main energy source. The generation of alternative energy sources to combat these problems and seeking energy independence is a priority. Bioethanol is considered the most important biofuel and it can be mixed with gasoline and to act as an oxygenated agent or used as a net fuel in internal combustion engines; this biofuel is created from crops such as corn, used in the U. S. and sugarcane in Brazil. Among the potential energy crops are varieties of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench). In Mexico, the productive potential of sweet sorghum is about two million hectares. The aim of this research is to compare different planting systems and fertilization levels using forage yield and characteristics associated with the sugar content in the juice of the sweet sorghum stalks. For this purpose, we evaluated six fertilization treatments and three planting systems in three growing seasons (Spring and Fall 2009 and Spring 2010). The genetic material used was: sweet sorghum FAUANL 1. The results showed that the best yields were obtained with the lowest fertilization treatments. The system of double row planting with gravity irrigation had the

best results for the characteristics of PFT and PT while the double row with drip irrigation was best for ALT, DIAM and °B. The planting system of double row has the advantage of an efficient harvest reducing energy cost and use of agricultural equipment.

I. INTRODUCCIÓN

La población mundial está creciendo continua e indefinidamente. Este crecimiento ocasiona un incremento en la demanda de alimentos, combustibles y energéticos. Sin embargo, nuestros recursos son finitos y tienen un límite que pronto será alcanzado. De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación (FAO, 2005), los combustibles fósiles son el mayor recurso energético utilizado, donde el petróleo contabiliza más del 35 % del consumo primario de los países desarrollados. El carbón ocupa el segundo lugar (23 %), seguido por el gas natural (21 %), leña, carbón vegetal y otros biocombustibles (10 %), energía nuclear (7.6 %) e hidroeléctrica (2.7 %) y otras energías renovables como la energía geotérmica, solar y eólica (0.7 %). En el 2008, las fuentes fósiles representaron 91 % de la producción total de energía primaria en México, principalmente el petróleo (62 %) y el gas natural (27 %), seguidos por electricidad no fósil (5 %), biomasa (4 %) y carbón (2 %). La participación de fuentes limpias, incluyendo grandes hidroeléctricas, nuclear y renovables, sigue siendo reducida, y alcanza sólo el 6 % de la producción total de energía primaria (SENER, 2010 a).

La dependencia de los combustibles fósiles por parte de los países industrializados es muy grande, según datos estadísticos proporcionados por la Administración de Información de Energía de Estados Unidos, en 2005 la

cantidad consumida de petróleo crudo y sus derivados en ese país se acercó a los 21 millones de barriles por día, aproximadamente 25 % del consumo mundial (Russell *et al.*, 2009).

La preocupación radica no solo en la inestabilidad de los precios de los combustibles fósiles; el agotamiento de las reservas de los mismos y los problemas ambientales, como el cambio climático y la contaminación, son aún más graves, por lo que es urgente revertir esta situación. Dentro de este panorama, Solórzano (2010) señaló que en materia ambiental, México ocupa el lugar 13 entre las naciones con mayor emisión de contaminantes en una lista que encabezan Estados Unidos y China; siendo los automóviles la principal fuente de polución, que generan 23 % del dióxido de carbono que se emite a la atmósfera, aunque en 2030 se prevé que lo harán con 50 % de este compuesto contaminante y en 2050 con 80 %.

Cabe señalar que México es partícipe en las causas del problema del cambio climático ya que emite 1.5 % de los gases que generan este fenómeno y es especialmente vulnerable a los efectos del mismo al situarse en zonas que serán impactadas por sequías (Noroeste); por inundaciones (Sureste) y por fenómenos meteorológicos extremos en ambos litorales cuya intensidad seguramente se incrementará (PNUD, 2008).

Debido a la problemática ambiental presente en nuestro país y en todo el mundo, es necesario utilizar recursos renovables para la producción de

biocombustibles. Una opción es el uso de cultivos agrícolas para generar energía en la forma de bioetanol, considerado el biocombustible más importante, ya que este se puede mezclar con la gasolina y actuar como agente oxigenante o bien usarse como combustible neto en máquinas de combustión interna (Sun y Cheng, 2002).

El bioetanol es un combustible a base de alcohol que se crea a partir de cultivos como el maíz, usado en Estados Unidos y la caña de azúcar en Brasil. De igual forma, se está buscando la manera de producir este combustible en base a otro tipo de cultivos y biomasa, como la remolacha (*Beta vulgaris*), todo tipo de árboles y otro tipo de plantas (Garza, 2008). Su importancia como biocombustible está creciendo en todo el mundo gracias a las ventajas que ofrece comparado con otros biocombustibles como el biodiesel y el metanol.

En el 2006, solamente en Estados Unidos se produjeron cerca de 5 billones de galones de bioetanol y en el 2009 se tuvo una capacidad instalada de más de 11 billones de galones. La producción de bioetanol de Brasil en el 2005 fue de 4.4 billones de galones, seguido de China con 1 billón de galones y México con 13,200 galones de bioetanol (Renewable Fuel Association, 2007).

Entre los cultivos con potencial energético se encuentran las variedades de sorgo dulce (*Sorghum bicolor* L. Moench) que tienen un alto contenido de azúcares solubles en la savia de la planta. Estos tipos de sorgo se utilizan para la producción de jarabe, bebidas alcohólicas y azúcar cristalizado. El interés en la producción de bioenergía a partir de sorgos dulces se debe a su facilidad de

acceso a los azúcares fermentables combinado con un alto rendimiento de biomasa. El carbohidrato principal es la sacarosa (89 %) seguido de azúcares simples como glucosa, fructuosa (8 %) y almidón (3 %) (Vermerris *et al.*, 2007).

En México, no se tienen registros de superficies sembradas de sorgo dulce de manera comercial; sin embargo, el potencial productivo de este cultivo es de poco más de 2 millones de hectáreas (SAGARPA, 2009). Esto representa una oportunidad para la producción de materia prima con potencial bioenergético. Además, el sorgo dulce tiene una gran adaptación a los diferentes climas que existen en nuestro país, lo que permitiría aprovechar grandes extensiones de tierras cultivables así como tierras marginales que están sin utilizar.

Además de las bondades que brinda este cultivo, es una ventaja que su transformación a biocombustible se puede realizar en las plantas de bioetanol diseñadas para procesar caña de azúcar, ya que éstas pueden usar fácilmente los tallos del sorgo dulce como materia prima, extrayendo los azúcares del jugo y fermentándolos con levaduras para producir bioetanol (Vermerris *et al.*, 2007); cabe mencionar que en México, el sorgo dulce no se utiliza para la alimentación humana como en el caso del maíz y la caña de azúcar, por lo que su producción no representa un problema alimenticio ni social ya que no impactaría en los precios de estos alimentos.

Buscando incrementar el rendimiento de este cultivo por unidad de superficie, además del método tradicional de surco sencillo, se han adoptado otros sistemas como el de siembra a doble hilera (Rodríguez *et al.*, 1994). El arreglo topológico de este sistema busca obtener un espaciamiento entre hileras y plantas que permita un buen desarrollo morfológico del cultivo evitando una competencia desfavorable por nutrientes y radiación solar aprovechando mejor los espacios, así como la superficie del terreno, tratando a la vez, de eficientizar el uso de la maquinaria sobre todo al momento de la cosecha. Sin embargo, una parte fundamental de un buen manejo agronómico es la fertilización. El aporte de nutrientes en los tiempos óptimos y en las cantidades requeridas favorece un mejor rendimiento de los cultivos y aumenta las defensas contra plagas, malezas o agentes causales de enfermedades. Desafortunadamente, en el cultivo del sorgo dulce no existe información relacionada, lo que limita el establecer recomendaciones apropiadas para su explotación comercial.

Objetivo:

Considerando lo anterior, el objetivo del siguiente trabajo de investigación es comparar diferentes sistemas de siembra y niveles de fertilización utilizando el rendimiento de forraje y características asociadas con el contenido de azúcares en el sorgo dulce.

Hipótesis :

Existen sistemas de producción, como el de doble hilera que asociados a una buena fertilización, contribuyen a una mayor producción de forraje verde y a un mayor contenido de azúcares en el sorgo dulce, favoreciendo el uso de la maquinaria agrícola en forma mas eficiente.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1 Combustibles fósiles a nivel mundial

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, los combustibles fósiles son el mayor recurso energético utilizado, donde el petróleo contabiliza más del 35 % del consumo primario de los países desarrollados. El carbón ocupa el segundo lugar (23 %), seguido por el gas natural (21 %), leña, carbón vegetal y otros biocombustibles (10 %), energía nuclear (7.6%) e Hidroeléctrica (2.7 %) y otras energías renovables como la energía geotérmica, solar y eólica (0.7 %) (FAO, 2005).

La dependencia de los combustibles fósiles por parte de los países industrializados es muy grande según datos estadísticos proporcionados por la Administración de Información de Energía de Estados Unidos; en 2005, la cantidad consumida de petróleo crudo y sus derivados en Estados Unidos se acercó a los 21 millones de barriles por día, aproximadamente 25 % del consumo mundial (Russell *et al.*, 2009). La demanda de combustibles (gasolina y diesel) ha sido estimada aproximadamente en 80 megatoneladas (Mt) para los años 2011-2012 y 100 Mt para 2016-2017, lo que representa 1.3 y 1.6 veces más que la demanda actual; lo que indica, que si no se integran las fuentes renovables para sustituir o complementar a los combustibles fósiles, la dependencia en la

energía fósil, que en algunos lugares ya está cerca de agotarse, creará conflictos entre los países para satisfacer sus requerimientos energéticos (Prasad *et al.*, 2007).

En relación a los precios del petróleo, estos han estado aumentando con un promedio anual del 23 % desde el inicio del siglo XXI, partiendo de US\$20.95 por barril en el 2000, a US\$51.73 por barril en el 2005 y hasta US\$133.32 por barril en la segunda semana de julio del 2008 (Russell *et al.*, 2009). El incremento en los precios del petróleo observados hace pocos años es un ejemplo de la rápida volatilidad que tienen los combustibles fósiles y que su impacto a nivel mundial es en todos los sectores industriales.

Cuando se utilizan combustibles fósiles como petróleo, carbón o gas natural, es imposible reducir las emisiones de dióxido de carbono, ya que en cualquiera de los casos, este es liberado al momento de quemar el combustible o por otras formas de conversión del carbono presente en los mismos. Las emisiones de dióxido de carbono de fuentes industriales en todo el mundo actualmente constituyen 23 billones de toneladas, mientras que las captaciones totales de la atmósfera por biomasa terrestre y marina constituyen solamente 9 y 8 millones, respectivamente. Es evidente que la biósfera es incapaz de asimilar todo el dióxido de carbono descargado en la atmósfera, por lo tanto, es necesario aumentar la cantidad de biomasa generando cultivos especiales que puedan ligar el dióxido de carbono del aire y usarlo para producir energía en la forma de biocombustibles (Tret'yakow *et al.*, 2008).

Existen países que se han vuelto más eficientes en el consumo del petróleo gracias a la introducción de biocombustibles, tal es el caso de Brasil, cuyo consumo actual de petróleo *per cápita* es de cuatro barriles por año, mientras que en España y los Estados Unidos estos valores son de 12 y 25 barriles, respectivamente. Asimismo, el costo de producción en Europa y los Estados Unidos es de aproximadamente US\$80 y US\$55 por barril de petróleo crudo equivalente, mientras que en Brasil es de US\$30 a US\$35 por barril de petróleo crudo equivalente aproximadamente (Lourenco *et al.*, 2007).

2.2 Biocombustibles a nivel mundial

Se utiliza el término “Bioenergía” para abarcar a las fuentes de energía renovable derivadas directa o indirectamente del proceso fotosintético incluyendo residuos de materia orgánica (CAST, citado por Lourenco *et al.*, 2007). Las principales fuentes de bioenergía son los residuos o desperdicios de cultivos energéticos y la vegetación silvestre (Hazell y Pachauri, 2006).

Desde el punto de vista energético, la bioenergía o “energía de la biomasa” se puede aprovechar de dos maneras: quemándola para producir calor o transformándola en combustible (sólido, líquido o gaseoso) para su transporte y/o almacenamiento (SENER, 2009).

De acuerdo con la SENER (2009) para la transformación de la biomasa se utilizan varios procesos, los cuales pueden ser de cuatro tipos:

- a) Físicos, que son los procesos en los que se actúa físicamente sobre la biomasa e incluyen al triturado, astillado, compactado e incluso secado.
- b) Químicos, que son los procesos relacionados con la digestión química, generalmente mediante hidrólisis, pirolisis y/o gasificación.
- c) Biológicos, que ocurren por la acción directa de microorganismos o de sus enzimas, generalmente llamado fermentación. Son procesos relacionados con la producción de ácidos orgánicos, alcoholes, cetonas y polímeros.
- d) Termoquímicos, en los que la transformación química de la biomasa ocurre al someterla a altas temperaturas (300° C - 1500° C).

Por lo tanto, se les llama Biocombustibles a los combustibles de origen biológico, como la leña, carbón vegetal, estiércol, biogas, biohidrógeno, bioalcohol, biomasa microbiana, residuos de cosecha y subproductos, cultivos energéticos y otros (FAO, 2005).

Los principales biocombustibles enfocados a mitigar las emisiones de gases de efecto invernadero que genera el sector transporte son el bioetanol y el biodiesel. El bioetanol principalmente se deriva de los azúcares, almidones y celulosas, mientras que el biodiesel lo hace de los aceites y las grasas.

En relación a lo anterior, una ventaja de la producción de bioetanol contra la de biodiesel es que el segundo tiene fuentes de materia prima restringidas y que produce grandes cantidades de desechos en su procesamiento. El bioetanol puede producirse por la fermentación ordinaria del almidón o el azúcar contenido

en la savia y en los frutos de las plantas, además de la celulosa, la cual es un material básico de los tallos y las raíces (Figura 1). El biodiesel sólo se produce a partir del aceite de las plantas y el contenido de éste en las plantas constituye sólo del 20 al 50 %. El bioetanol se puede producir de desechos industriales, particularmente de la industria de alimentos, de los productos de los bosques y de la agricultura (Tret'yakow *et al.*, 2008).

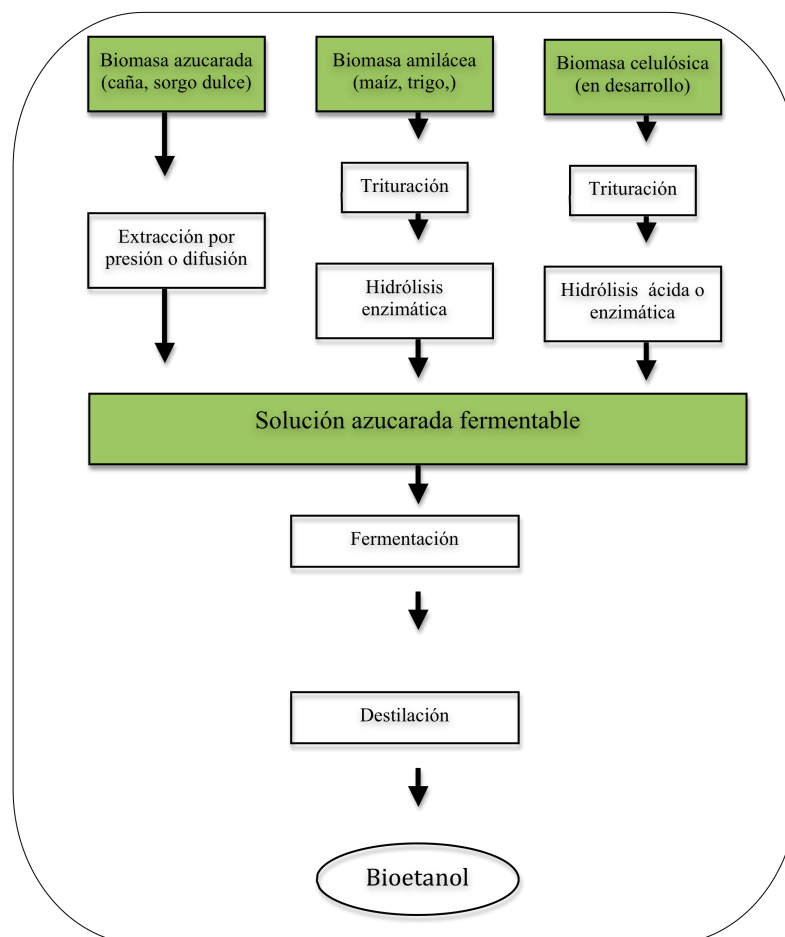


Figura 1. Rutas tecnológicas para la producción de bioetanol.

Cualquiera que sea su origen (biomasa o procesos petroquímicos y carboquímicos), el bioetanol es un combustible, es decir, libera significativas cantidades de calor al quemarse. Sin embargo, el bioetanol presenta algunas

diferencias importantes con relación a los combustibles convencionales derivados de petróleo. La principal es el elevado tenor de oxígeno, que constituye cerca del 35 % en masa del bioetanol. Las características del bioetanol posibilitan la combustión más limpia y mejor desempeño de los motores, lo que contribuye a reducir las emisiones contaminantes, aún al mezclarlo con la gasolina (BNDES, 2008).

Principalmente en Brasil, los motores de combustión interna son adaptados y usan bioetanol puro (99 %) y también mezclas con gasolina ordinaria. Sin embargo, un automóvil ordinario sin la modificación del motor puede usarlo como combustible solo en mezclas que contengan máximo un 15 % de bioetanol. Para que un vehículo trabaje con bioetanol puro o mezclado, es necesario aumentar el grado de compresión y ajustar el carburador para que trabaje con mezclas de ligeras a altas tasas. El bioetanol puro es inferior que la gasolina normal en relación al calor de combustión, pero tiene un octanaje mayor de 110 y muestra un mayor grado de combustión a menores temperaturas de combustión. Desde el punto de vista ecológico, la obtención de bioetanol no involucra la presencia de impurezas que contienen azufre y con las temperaturas bajas de combustión que requiere, disminuye las emisiones de dióxido de carbono (Tret'yakow *et al.*, 2008).

En la última década, la comunidad científica se ha interesado en cultivos de los que se puede producir biodiesel y bioetanol, debido al agotamiento de las reservas existentes de combustibles (Sakellariou-Makrantonaki *et al.*, 2007). En

el 2005, Brasil y Estados Unidos juntos contribuyeron con el 42 % de la producción global de biocombustibles líquidos, mayormente en forma de bioetanol (Simpson *et al.*, 2008); mientras que en el siguiente año, Estados Unidos tuvo una producción de bioetanol de 12.8 millones de toneladas y Brasil 16 millones de toneladas (Tret'yakow *et al.*, 2008). Recientemente en el 2008, los Estados Unidos y Brasil produjeron 34 y 22.5 billones de litros de bioetanol, respectivamente y la Unión Europea 2.7 billones de litros (principalmente de remolacha azucarera o betabel) dando una producción anual total de 65.6 billones de litros de bioetanol (Goldemberg y Guardabassi, 2010).

Debido al renovado interés en el bioetanol, la producción mundial de este biocombustible está proyectada a más del doble en los próximos 15 años hacia una capacidad mundial de más de 120,000 millones de litros en el 2020 (Bruscino, 2009). De acuerdo con Bush (citado por Simpson *et al.*, 2008), Estados Unidos se ha propuesto para el 2025 que los biocombustibles sustituyan en un 75 % a las importaciones de petróleo.

Brasil y USA han estado produciendo bioetanol a gran escala a partir de caña de azúcar y maíz, respectivamente. Sin embargo, debido a su utilidad como alimento, estos cultivos no pueden satisfacer la demanda mundial de bioetanol como combustible alternativo de transporte (Banerjee *et al.*, 2010). De acuerdo con Goldemberg y Guardabassi (2010) el volumen del bioetanol como combustible, sustituyendo a la gasolina, en la actualidad es aproximadamente de 500,000 barriles de petróleo equivalente por día, que es igual al 0.7 % del

consumo mundial de petróleo y en gasolina representa 86 millones de barriles diarios, aproximadamente 3 % del consumo mundial.

2.2.1 Bioetanol de segunda generación

Una nueva vertiente en esta área son los biocombustibles avanzados, definidos en el Acta de Independencia y Seguridad Energética 2007 (EISA por sus siglas en inglés) como el bioetanol de celulosa y otros biocombustibles derivados de materias primas alternativas como rastrojo de maíz, switchgrass (*Panicum virgatum*), astillas de madera (Sissine, 2007) y recientemente a partir de bagazo de caña en Brasil. La producción de biocombustibles a partir de carbohidratos estructurales de plantas (celulosa, hemicelulosa y lignina con porciones de tallo, hojas y raíces) ha pronosticado una producción cinco veces mayor en energía por unidad de área de superficie que usando almidón de grano y azúcar, además de que con la celulosa sólo se produce un cuarto de gases invernadero (Murray *et al.*, 2008).

Gran parte de los carbohidratos de la biomasa lignocelulósica se encuentran en la forma de celulosa y hemicelulosa. Utilizando métodos químicos, la digestión de la biomasa y subsecuente fermentación de glucosa y xilosa puede rendir significantes cantidades de bioetanol. El uso de ácido diluido permite una hidrólisis limitada de la biomasa denominada pre-hidrólisis. Esta consiste en la hidrólisis de la fracción de hemicelulosa, seguida de la liberación de la fracción de celulosa y lignina en forma casi inalterada. Los materiales lignocelulósicos constituyen una alternativa renovable y abundante para la obtención de substrato

fermentable. Diferentes tecnologías vienen siendo aplicadas para el efecto, entre las que se incluyen la pre-hidrólisis con ácido diluido y sacarificación enzimática, hidrólisis con ácido concentrado y sus variaciones, ruptura con amoníaco y ruptura con vapor (explosión con vapor) (Sarrouh *et al.* 2010).

En la Figura 2, se muestra un diagrama con los pasos para realizar la hidrólisis ácida del bagazo de caña que actualmente se realiza en Brasil. La metodología es la siguiente:

- 1) Recolección del bagazo de caña proveniente de los ingenios.
- 2) Molienda del bagazo para reducir el tamaño de las partículas a 20 mesh.
- 3) Preparación de la solución de agua y ácido sulfúrico.
- 4) Separación de las fibras (celulosa, hemicelulosa y lignina) en el reactor.
- 5) El bagazo hidrolizado se retira del reactor y se filtra.
- 6) La hemicelulosa queda lista para la hidrólisis enzimática con microorganismos, su posterior biodestoxicación con levaduras, fermentación, destilación y finalmente la obtención de bioetanol.



Figura 2. Proceso de hidrólisis ácida de bagazo de caña para la producción de bioetanol de segunda generación.

Actualmente el sistema cañero brasileño de agroenergía es considerado como el mas eficiente ya que cuentan con grandes avances en investigaciones enfocadas al desarrollo de tecnologías para producción de bioetanol de segunda generación, donde el bagazo de caña representa la principal fuente de biomasa lignocelulósica. La hidrólisis química de la biomasa del bagazo de caña es una metodología consolidada bajo condiciones de laboratorio; sin embargo, su aplicación a gran escala todavía no es económicamente viable en Brasil (Soccol *et al.*, 2010).

Las investigaciones demuestran que los biocombustibles son una alternativa para combatir los problemas de contaminación y de agotamiento de las reservas de petróleo; sin embargo, es importante considerar la cantidad de combustibles fósiles que se utilizan para la producción de bioenergéticos ya que se debe evitar que el efecto en balance neto de energía y emisiones sea negativo haciendo una correcta selección del cultivo y la tecnología adecuada para su procesamiento (SENER, 2010 b).

2.2.2 Biocombustibles en México

En México, la producción de biocombustibles se encuentra en una etapa experimental, la falta de tecnología e infraestructura y factores legales como las modificaciones a la Ley de Bioenergéticos – aprobada en el año 2008 -, han retardado su inicio. Si bien existen varios cultivos potenciales para la producción de bioenergéticos, los considerados por la SAGARPA (Figura 3), entre otros, son la caña de azúcar, sorgo dulce y remolacha para la producción de bioetanol y

Jatropha (*Jatropha curcas*), higuera (*Ricinus communis* L.) y palma de aceite (*Elaeis guineensis*) para la producción de biodiesel (SAGARPA, 2009).



Figura 3. Principales cultivos considerados por la SAGARPA para la producción de biocombustibles en México.

De acuerdo con el Programa de Producción Sustentable de Insumos para Bioenergéticos y de Desarrollo Científico y Tecnológico (SAGARPA, 2009), en una primera etapa se impulsará en México la producción de aproximadamente 2.3 millones de toneladas de biomasa bajo los criterios de sustentabilidad en agua, aire, biodiversidad y suelo (caña de azúcar, sorgo dulce, remolacha o la combinación de éstos) (SAGARPA, 2009).

La bioenergía y los biocombustibles son una oportunidad que debe ser explorada por su potencial junto con las energías renovables para ser incorporadas gradualmente en el balance energético nacional; sin embargo, se deben tomar previsiones para garantizar la seguridad energética, la solvencia

alimentaria, la biodiversidad, el desarrollo social y los recursos naturales (SENER, 2010 b).

Reducir nuestra dependencia a las actuales fuentes fósiles de energía nos permitirá fortalecer la seguridad energética de la nación. Esta dependencia se ve reflejada principalmente en el sector de transporte, el cual recibe el 42.5 % de la energía final, con un consumo de gasolina de 107 millones de litros diarios, y a pesar de ser un país productor de petróleo, importa aproximadamente el 32 %, situación que ha despertado el interés en la introducción de los biocombustibles bioetanol y biodiesel como una alternativa para depender menos de los combustibles fósiles (Sarmiento, 2007).

La diversificación de las fuentes primarias de energía es un pilar fundamental de nuestra política energética y las energías renovables presentan ventajas en este sentido. La bioenergía es un área que debe ser explorada e impulsar su participación en la mezcla energética nacional, tanto en proyectos de pequeña escala como los de gran escala.

2.3 El cultivo del sorgo dulce

2.3.1 Origen y clasificación botánica

El sorgo cultivado quizá se originó en la parte Central-Este de África, en Etiopía, Sudán o en sus cercanías, aproximadamente 3000 años a. C. Los progenitores de las actuales variedades cultivadas pueden haber sido una o más

tipos herbáceos silvestres del género *Sorghum* u otros extinguidos (Wall y Ross,1970). En América Latina se introdujo durante los años 1,800 y 1,900 d. C. (Álcala, 2009).

Clasificación para el sorgo cultivado y sus parientes silvestres más cercanos (House, 1985):

Razas básicas:

1. Raza bicolor (B)
2. Raza guinea (G)
3. Raza caudatum (C)
4. Raza Kafir (K)
5. Raza durra (D)

El cultivo del sorgo para grano fue derivado de plantas domesticadas de la subespecie *Sorghum bicolor* (L.) Moench ssp. *bicolor*, perteneciente a la especie *Sorghum bicolor*, de acuerdo a la siguiente clasificación taxonómica (USDA-ARS, 2009):

Reino: *Plantae*
Sub-reino: *Tracheobionta*
Super-división: *Spermatophyta*
División: *Magnoliophyta*
Clase: *Liliopsida*

Sub-clase:	<i>Commelinidae</i>
Orden:	<i>Poales</i>
Familia:	<i>Poaceae</i>
Subfamilia:	<i>Panicoideae</i>
Tribu:	<i>Andropogoneae</i>
Sub-tribu:	<i>Sorghinae</i>
Género:	<i>Sorghum Moench</i>
Especie:	<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench
Subespecie:	<i>Sorghum bicolor</i> (L.) Moench ssp. <i>bicolor</i>

De acuerdo con Murray *et al.* (2009), se han identificado tres grupos separados de sorgo dulce los cuales comúnmente se clasifican juntos. Se clasifican estos tres grandes tipos de sorgo como: 1) de jarabe (históricos y algunos modernos), 2) tipos modernos para azúcar y energía y 3) tipos color ámbar.

2.3.2 Características energéticas del sorgo dulce

El sorgo es una planta tipo C₄, de origen tropical (usa el ciclo del “malato”), es el quinto cereal mas importante a nivel mundial y se utiliza para la producción de forraje verde, paja y ensilaje y para la producción de jarabe y combustible (bioetanol). Crece en 99 países alrededor del mundo en 44 millones de ha, principalmente en áreas semiáridas pobres que son muy secas para el maíz. Tiene una alta eficiencia fotosintética y bajo requerimiento de fertilizantes, haciéndolo ventajoso cuando se usa en un sistema de rotación de cultivos

debido a su gran rendimiento de biomasa y de materia seca. El sorgo ha recibido una atención considerable durante los últimos años como una fuente alternativa para la producción de energía (Sakellariou-Makrantonaki *et al.*, 2007).

El sorgo está cercanamente relacionado a otros cultivos con potencial energético como la caña, principal materia prima para la producción de azúcar y el maíz, la fuente más importante de almidón. Los sorgos dulces acumulan más de 25 % de azúcar, de 1.4 a 2.7 veces más carbohidratos no estructurales en toda la planta que los sorgos de grano en el parénquima de los tallos (Vietor y Miller, 1990). La fisiología del sorgo dulce es diferente a la del sorgo de grano y sorgo forrajero; su principal característica es la acumulación de grandes cantidades de sacarosa en el tallo, proceso que se presenta principalmente durante el desarrollo de la inflorescencia gracias a que en este periodo no hay competencia entre el desarrollo del grano y la acumulación de azúcares (Massacci *et al.*, 1996). En el jugo del sorgo dulce, la concentración de azúcares al principio de la cosecha es aproximadamente 12.5°Brix y está aumentando conforme el sorgo va madurando hasta aproximadamente 17°Brix; entonces la concentración de azúcares promedio es aproximadamente 15°Brix y el rendimiento de azúcar es de 3.8 a 5.9 t h⁻¹ (Cosentino, 1997).

Además, los sorgos dulces son más eficientes en el uso de agua y de nutrientes que la caña y el maíz (Murray *et al.*, 2008). A diferencia del maíz, puede comportarse relativamente inactivo durante periodos de estrés hídrico y

luego iniciar tasas de crecimiento muy rápido después de que se le aplica la humedad adecuada (Miller y Ottman, 2010).

En virtud de las características documentadas del sorgo dulce, se ha encontrado que es competitivo con el maíz en rendimiento de bioetanol debido a una menor inversión de energía; ya que requiere solamente el 36 % de fertilizante nitrogenado (N) que necesita el maíz para lograr los mismos rendimientos de bioetanol. Los bajos requerimientos de nitrógeno (N) comparados con los de los cultivos de granos y la ventaja de no hacer la conversión del almidón a azúcares, favorece al sorgo dulce para una producción de bioetanol más eficiente (Wortmann *et al.*, 2010).

El sorgo, un perenne débil, rebrota de la base del tallo después de cada cosecha, lo que genera mas biomasa y protección del suelo. El rebrote representa una gran fuente de biomasa adicional. Gracias al rebrote, el material vegetativo está disponible tanto para el control de la erosión como fuente de materia orgánica para el suelo; al igual que la caña, el rebrote del sorgo puede ser cosechado como una fuente adicional de biomasa (Murray *et al.*, 2008).

El sorgo dulce se adapta muy bien a regiones subtropicales y templadas de todo el mundo. Tiene un alto rendimiento de biomasa, bajo requerimiento de agua y es de ciclo corto y por lo tanto es una buena opción para reemplazar a la remolacha y a la caña de azúcar bajo condiciones climáticas secas y calientes (Almodares *et al.*, 2007).

Algunas ventajas comparativas del sorgo dulce demuestran su potencial energético comparado con otros cultivos. Tiene un período de crecimiento relativamente corto (aproximadamente cuatro meses) y un requerimiento de agua de 8000 m³ en dos ciclos, que son casi cinco veces menores a los de la caña de azúcar (12 a 16 meses y 36000 m³ de agua ciclo⁻¹, respectivamente); el costo de producción es tres veces menor que el de la caña. Su propagación es con semillas. Permite un manejo mecanizado del cultivo. El proceso de producción de bioetanol de sorgo dulce es ecológicamente amigable. La calidad de combustión del bioetanol es superior, menos sulfuro que el de la caña de azúcar y una tasa de octanaje más alta (ICRISAT, 2006).

El sorgo dulce pertenece a la misma especie domesticada (*Sorghum bicolor* (L.) Moench) para grano y forraje pero ha sido seleccionado por acumular grandes niveles de sacarosa en el parénquima de los tallos (Murray *et al.*, 2009). Así mismo, tiene una naturaleza de doble propósito, debido a que ofrece la posibilidad de maximizar la producción de energía por la utilización tanto del grano como el jugo de los tallos (Murray *et al.*, 2008). Es un cereal multipropósito ya que contiene grano, forraje y derivados del azúcar, tiene de 10 a un 25 % de azúcar en el jugo del tallo, siendo la sacarosa el principal disacárido (Almodares *et al.*, 2007). Además, los residuos fibrosos obtenidos de la extracción de los azúcares de los tallos del sorgo dulce, tienen propiedades similares a los del bagazo de la caña de azúcar y pueden usarse de igual forma para producir electricidad y procesar calor y energía, mientras que la producción de bioetanol a

partir del bagazo sería económicamente y ambientalmente mejor (Prasad *et al.*, 2007).

Los °Brix del jugo del tallo del sorgo dulce son menores antes de la etapa de floración, después de ésta y durante el periodo de formación del grano, los °Brix se incrementan hasta su máximo en la etapa de cosecha. Investigaciones han indicado que el sorgo dulce se debe cosechar en la etapa de madurez del grano, donde se obtiene un alto contenido de azúcar y producción de grano (FAO, 1994) .

Además de las características energéticas que favorecen su utilización en la producción de biocombustibles, el sorgo dulce ha sido llamado “el camello de los cultivos” debido a su gran adaptabilidad, su resistencia a suelos salinos-alcalinos y a las inundaciones (FAO, 1994).

2.3.3 Bioetanol a partir de sorgo dulce

El bioetanol es un arma importante en la pelea contra la contaminación vehicular debido a su alto contenido de oxígeno, ayuda a quemar completamente el combustible y reduce sus emisiones dañinas además de disminuir emisiones particulares que representan un peligro para la salud (Sakellariou-Makrantonaki *et al.*, 2007). Estos beneficios han hecho que sustituya al éter metil tert-butílico (MTBE) como la sustancia más comúnmente utilizada para incrementar el contenido de oxígeno de la gasolina reformulada “RFG” (Russell *et al.*, 2009). El término oxigenantes de combustibles (fuel oxygenates), se refiere a los químicos

que contienen oxígeno, los cuales se agregan a la gasolina para ayudar a quemarla más eficientemente (Russell *et al.*, 2009).

Como hemos revisado, el bioetanol se puede producir a base de cualquier biomasa que contenga cantidades significativas de almidones o azúcares (BNDES, 2008). El sorgo es el segundo grano más utilizado en la producción de bioetanol en Estados Unidos (Murray *et al.*, 2008). En Brasil, el bioetanol se produce de la extracción de la sacarosa de la caña de azúcar. Este proceso es más sencillo, al eliminar la necesidad de la degradación enzimática del almidón y requiere de menos procesamiento (Murray *et al.*, 2008).

La reciente demanda de biocombustibles en virtud del éxito obtenido por Brasil con la caña de azúcar, donde actualmente se usa bioetanol puro en aproximadamente 20 % de sus vehículos, y de un 22 a 26 % de la mezcla bioetanol-gasolina en el resto de los mismos (Gobierno de India, 2003 citado por Prasad *et al.*, 2007), ha causado una re-evaluación del sorgo dulce como fuente de energía (Murray *et al.*, 2009). Ferraris y Charles-Edwards (FAO, 1994) afirmaron que el sorgo dulce se utiliza para la producción de forraje o ensilaje; además, ha sido identificado por algunos autores como Lipinsky y Kresovich (FAO, 1994), como un buen cultivo de biomasa para la fermentación de metano o bioetanol; además, el jugo de los tallos del sorgo dulce es rico en azúcares fermentables y es un material deseable para la fermentación alcohólica.

De acuerdo con Sakellariou-Makrantonaki *et al.* (2007), el sorgo dulce se caracteriza por un alto contenido de azúcar en el jugo de sus tallos, principalmente sacarosa, también fructuosa y glucosa, las cuales pueden producir fácilmente bioetanol usado como combustible en los vehículos; asimismo, la producción de bioetanol a partir del sorgo dulce puede fluctuar entre 6500 y 8000 L ha⁻¹; en el caso de la fermentación del contenido de azúcar del jugo de los tallos, aunque puede sobrepasar el límite de los 10,000 L ha⁻¹ en el caso de la fermentación de los azúcares correspondientes a la biomasa lignocelulósica que contiene toda la planta (Sakellariou-Makrantonaki *et al.*, 2007). Sakellariou-Makrantonaki *et al.* (2007) reportaron una forma teórica para calcular la producción de bioetanol a partir de biomasa fresca del sorgo dulce que se describe a continuación:

$$\text{PTE} = \text{CAMF} (\%) \times 6.5 \times 0.85 \times \text{BF}$$

Donde:

PTE= Producción total de bioetanol (L ha⁻¹)

CAMF= Contenido total de azúcar de la materia fresca (%)

6.5= Factor de conversión

0.85= La eficiencia del proceso

BF= Biomasa fresca en Mg ha⁻¹

La producción de alcohol con los tallos del sorgo dulce como materia prima, no requiere de tecnología complicada ni de equipo costoso; además, el

período de producción es corto, barato y es relativamente fácil la operación de producción de alcohol (FAO,1994).

El bioetanol también puede producirse de la biomasa lignocelulósica de materias primas como los residuos de cultivos de cereales (rastrojo) y es a lo que se llama bioetanol de segunda generación, ya que contiene ligninas, celulosa y hemicelulosa. También se ha encontrado que el rastrojo del sorgo con nervadura central café (la cual contiene menos contenido de lignina) necesita menos energía para su conversión a bioetanol (ICRISAT, 2006).

La competencia por alimentos, un obstáculo al que se enfrentan los cultivos con potencial energético, puede minimizarse si el residuo de las cosechas es usado como materia prima para la producción de bioetanol o si cultivos dedicados a la biomasa son desarrollados en tierras marginales (Murray *et al.*, 2008).

2.3.4 Sorgo dulce en México

Actualmente no se tienen registros de superficies sembradas de sorgo dulce de manera comercial; sin embargo, el potencial productivo de este cultivo es de poco más de dos millones de hectáreas (SAGARPA, 2009).

En México, el sorgo dulce se cultivó en el centro y sur de Sinaloa y en las regiones de la Laguna, Coahuila con muy buenos rendimientos bajo riego, igual

que en el Bajío con la misma tecnología. De temporal se cultiva también en Sinaloa, Chihuahua, Guerrero, Michoacán y Jalisco, lo producen principalmente para autoconsumo en las granjas que explotan ganado lechero. Las condiciones para su cultivo en temporal, se encuentran también en el centro-oriente de Tamaulipas, donde se produce sorgo de grano en grandes superficies. Tanto en el riego como en secano (temporal), se le pueden dar hasta cinco cortes en un año, con un rendimiento acumulado de hasta 100 toneladas por hectárea de material verde en el riego y de 60 toneladas por hectárea en el temporal (SENER, 2006).

La cosecha es sencilla, totalmente mecanizada y se llegan a obtener en otros países hasta 30 toneladas de materia seca por hectárea y en tal virtud, también hasta 13,000 litros de bioetanol por ha (130 litros por tonelada de sorgo) aprovechando las 13 toneladas de azúcar de sus jugos y las 10 toneladas de sus tallos y follajes. De acuerdo con la Secretaría de Energía (2006), las principales variedades híbridas en las regiones de Sinaloa y Tamaulipas seleccionadas para el cultivo de riego y de temporal respectivamente son: para Culiacán, Sinaloa Gota de Miel (Susweet Conlee) y Cowvittles; para Tamaulipas SX16, Builder y Grazer.

Con respecto al potencial energético del sorgo en México, Serna-Saldivar (2009) afirmó que es el cultivo más viable para la producción de bioetanol en México, gracias a que es más eficiente que el maíz y no representa un peligro para la producción de alimentos. Con el uso de tecnologías adecuadas y el

aprovechamiento de tierras marginales, el sorgo tiene un potencial mayor para la producción de biocombustibles que otros cultivos que se producen en México.

2.4 Fertilización del sorgo dulce

Un objetivo importante en los sistemas de producción de cultivos es la nutrición eficiente. El aporte de nutrientes en los tiempos convenientes y en las cantidades óptimas da como resultado un mejor rendimiento de los cultivos y aumenta las defensas contra plagas, malezas o agentes causales de enfermedades. Vázquez (2008) mencionó que la resistencia en muchas plantas se ve aminorada por problemas de nutrición y que una fertilización balanceada da buen desarrollo y resistencia a ciertas enfermedades. Un ejemplo de la importancia de la fertilización, se ve en el aumento de los rendimientos en maíz en los Estados Unidos después de la Segunda Guerra mundial, donde los principales factores que incrementaron los rendimientos fueron el uso de variedades mejoradas (36 %) y el uso de fertilizantes (31 %) (Foth y Ellis, 1997).

La importancia de los macronutrientes nitrógeno (N), fósforo (P) y potasio (K) está muy bien documentada por lo que se dará una breve explicación para comenzar el tema.

Entre las principales funciones del N en la planta se tiene la síntesis de proteínas de cadenas largas de amino-ácidos; además, es un constituyente esencial de todas las enzimas y coenzimas, así que de un 80-85 % del N está ligado a ácidos nucleicos, un 15 % a la clorofila y menos de 1 % se encuentra

como N libre en la planta. Una falta de N puede limitar el crecimiento celular y más directamente la división celular debido a la reducción de la tasa de actividad meristemática (Vázquez, 2008).

El fósforo (P), después del N, es el elemento más importante en la nutrición de las plantas. Entre sus funciones en la planta se tiene que es importante en el crecimiento de las raíces, en acelerar la maduración; también es importante en la calidad de los frutos así como en la adecuada formación de la semilla. Plantas bien nutridas con P presentan un alto grado de resistencia a las enfermedades. La deficiencia de este elemento reduce la producción de RNA y así la síntesis de proteínas, además de reducir el crecimiento vegetativo, el rendimiento y la calidad en los cultivos (Vázquez, 2008).

El potasio (K) es el segundo elemento en cantidad absorbido por la planta. Sus principales funciones son: actúa como un elemento de balance en el floema, participa en el control osmótico del movimiento del agua y en el cierre de los estomas, además de ser un activador enzimático. La falta de este nutriente ocasionan reducción en el crecimiento, amarillamiento seguido por una necrosis en los márgenes de las hojas, reducción en la turbidez o un incremento en el marchitamiento y pobre resistencia a la sequía (Vázquez, 2008). Tiene un papel importante como catalizador en el metabolismo de las plantas y se encuentra donde quiera que hay transformaciones de alta energía. Su presencia hace posible la formación de azúcar de los compuestos carbohidratados simples y la conversión del azúcar en almidón y otros carbohidratos de alto peso molecular.

La deficiencia de potasio en algunos cultivos como la caña de azúcar se caracteriza con un bajo contenido de azúcares y bajo rendimiento (Humbert, 1974).

A continuación se revisarán algunos métodos de fertilización en sorgo dulce hechos en varias investigaciones.

2.4.1 Fertilización química

En general, el sorgo responde bien a la fertilización química con nitrógeno. El nitrógeno disponible es el elemento más importante para el crecimiento y el contenido de proteína de los forrajes (Turgut *et al.*, 2005). Almodares *et al.*, (2007) reportaron que la aplicación de fertilizantes nitrogenados en la mayoría de los casos, incrementan los °Brix, el contenido de sacarosa, el porcentaje de proteína, la producción de tallos y la tasa de crecimiento en el sorgo dulce.

En su trabajo, Turgut *et al.*, (2005), observaron que la fertilización con nitrógeno y altas densidades de planta aumentan la producción de tallos y biomasa en el sorgo dulce; la producción más alta se obtuvo combinando una densidad de 120,000 plantas ha⁻¹ y 150 kg de N ha⁻¹; así mismo, reportaron que los incrementos en el rendimiento por la fertilización con nitrógeno fueron pequeños en la primera cosecha del sorgo dulce, pero en la segunda y tercera cosecha se obtuvieron incrementos mayores.

Turgut *et al.* (2005) utilizaron una fertilización fraccionada donde aplicaron el 50 % del nitrógeno antes de la siembra y el resto cuando las plantas alcanzaron una altura de 40-50 cm. Además, realizaron la siembra y el aclareo de forma manual. En su investigación reportaron que la cantidad de nitrógeno aplicada afectó marcadamente la producción de forraje y materia seca. El sorgo dulce tendió a producir más forraje y materia seca cuando se fertilizó con altos niveles de nitrógeno. Los niveles de 100 o 150 kg N ha⁻¹ aunque no presentaron diferencias significativas, fueron los que dieron los rendimientos de forraje más altos con 80.2 y 82.4 t ha⁻¹, respectivamente. Para la materia seca, el caso fue el mismo donde los niveles de N mencionados rindieron 29.9 y 30.8 t ha⁻¹, respectivamente.

León-Velasco *et al.* (2009) trabajaron con híbridos de sorgo tolerantes al frío, analizaron la aptitud combinatoria general (ACG) de las líneas, así como la heterosis y heterobeltiosis de los híbridos para rendimiento, peso y número de granos; utilizaron en riego 120 kg N y 60 kg P₂O₅ ha⁻¹ y en seco 80 kg N y 40 kg P₂O₅; todo el P₂O₅ y la mitad de N se aplicó a la siembra y el resto en el aporque. Los híbridos de 2^a generación presentaron más amplia heterosis y heterobeltiosis, para las tres variables en ambas condiciones de humedad.

2.4.2 Fertilización orgánica

El uso de agroquímicos en la agricultura es una práctica cultural antigua que comenzó aproximadamente hace 100 años. En las últimas décadas hemos visto un incremento acelerado en el uso de fertilizantes sintéticos como los

nitratos, superfosfatos así como los fertilizantes nitrogenados, lo cual ha aumentado el costo de producción de los cultivos y los ha hecho dependientes de los mismos. El mal manejo o abuso de estos productos ha deteriorado el medio ambiente, se han contaminado distintas fuentes de agua debido a las pérdidas por infiltración así como la salinización y erosión de grandes superficies de suelo. Ante esta situación se vuelve una necesidad el uso de fertilizantes orgánicos o biofertilizantes ya que han demostrado sus beneficios en la producción de los cultivos además de ser compatibles con el medio ambiente.

Los biofertilizantes no son un concepto nuevo y con el tiempo han tomado gran importancia en todo el mundo debido a que se producen con materias primas naturales que ayudan al mejoramiento de los suelos y a una buena nutrición de las plantas. Los más comunes son los abonos verdes, compostas, microorganismos benéficos y los biofertilizantes foliares.

De acuerdo con Díaz-Moreno *et al.* (citado por Díaz-Franco *et al.*, 2007), existe una baja productividad del sorgo en el noreste de México debido, entre otras causas, a la progresiva degradación de los agroecosistemas, lo cual ha originado graves problemas de erosión y desertificación.

Es urgente el desarrollo de prácticas agronómicas que eleven la rentabilidad de la producción de sorgo y promuevan un equilibrio agroecológico; por lo tanto, se le ha puesto especial interés al uso de microorganismos benéficos del suelo a fin de mejorar el balance biológico en el mismo y reducir el

uso de fertilizantes químicos y de otros agroquímicos en los sistemas de producción. En virtud de esto, la inoculación con hongos micorrízicos arbusculares (HMA) ha mejorado la productividad de diversos cultivos en condiciones de estrés hídrico (Díaz-Franco *et al.*, 2008).

Los organismos de la rizósfera tienen influencia en la disponibilidad y asimilación de nutrientes cerca de la zona radical. Los organismos micorrízicos extienden la longitud y el área efectiva de la mayoría de las raíces de las plantas e influyen de manera similar en la asimilación de nutrientes del suelo (Foth y Ellis, 1997).

El impacto de la colonización de HMA se ha manifestado en un mejor aprovechamiento de agua y de los nutrimentos inmóviles del suelo como fósforo, zinc y cobre, en el incremento de longitud y profundidad radical y el desarrollo de hifas externas (Díaz-Franco *et al.*, 2008).

Los hongos micorrízicos son conocidos por su habilidad para asimilar y transportar nutrientes hacia la planta huésped intercambiándolos por carbono que toma de ella (Allen, 2007). La micorriza arbuscular es la simbiosis subterránea más abundante, ya que los HMA colonizan más del 80 % de las especies de las plantas superiores. Una vez que colonizan las raíces de la planta huésped, toman los nutrientes del suelo y los intercambian con las plantas por carbón fotosintetizado, lo que aumenta la resistencia de la planta al estrés biótico y abiótico; además, juegan un papel importante en la formación y estabilidad de

agregados del suelo y contribuyen a la fertilidad y calidad del mismo (Wang *et al.*, 2010).

2.5 Arreglos topológicos y densidad de población en el sorgo dulce

La densidad de población o de siembra es una práctica agronómica que depende de las condiciones de algunos factores como el tipo de suelo, clima, tipo de cultivo y del propósito final del mismo; para el caso del sorgo, éste puede buscar rendimientos de grano, forraje o azúcares.

Rodríguez *et al.* (1994) reportaron que con el método de doble hilera se obtuvo 7.5 % más rendimiento de grano, en relación a la siembra en surco sencillo; este incremento está determinado principalmente por la menor competencia intraespecífica en los tratamientos en doble hilera, debido a una mejor distribución de las plantas en el terreno; además, esta menor competencia se refleja en menor altura de planta en comparación al surco sencillo en cuyo caso las plantas crecieron 2.3 % más, a consecuencia de mayor competencia por radiación solar, nutrimentos, agua, etc. En este método de siembra se presentó un aumento del 18.9 % en el número de granos por panoja con respecto al sencillo; esta característica se ha correlacionado más usualmente con el rendimiento de grano.

De acuerdo con Baumhardt *et al.* (2007) en sorgo para grano, con distanciamientos angostos entre surcos de 0.38 m se incrementaron las medias simuladas de rendimiento de grano en 7 % para sorgos de zonas áridas y 9 %

para sorgos bajo riego comparados con distanciamientos amplios entre surcos de 0.76 m.

En su trabajo con sorgo dulce, Almodares *et al.* (2007) utilizaron un aclareo o raleo manual dejando 0.1 m entre plantas para tener una densidad de población en el sorgo dulce de 200,000 plantas ha⁻¹.

Barbieri *et al.* (2008) reportaron en su trabajo con maíz que con surcos angostos espaciados a 0.52 y 0.35 m se incrementó la acumulación de N del cultivo y el rendimiento de grano en 24.5 y 23.7 %, respectivamente, lo que se puede explicar por varias razones: 1) una mejor captación de luz durante la etapa crítica de llenado de grano, 2) se mejoró la distribución de las raíces gracias a una mayor densidad de las mismas dentro del surco, 3) reducción de la competencia entre plantas durante el ciclo vegetativo que pudo incrementar la tasa de crecimiento del cultivo y 4) incremento de asimilación de fotoasimilados a la raíz. Todos estos efectos incrementaron el volumen de suelo explorado por las raíces en las primeras etapas y mejoraron la asimilación y acumulación de nitrógeno.

En sorgo forrajero, Caravetta *et al.* (1990) notaron que la calidad del mismo no se veía afectada con distancias entre plantas menores o iguales a 0.15 m. Turgut *et al.*, (2005) indicaron que el rendimiento de sorgo para silo fue mayor bajo condiciones de altas densidades y surcos angostos; así mismo, en relación a distancias entre surcos, reportaron que el espaciamiento angosto de 0.5 m

entre surcos fue generalmente efectivo en el incremento de la producción de rastrojo en el sorgo de grano al obtener 14.2 t ha^{-1} .

Turgut *et al.*, (2005) mencionan que se ha detectado que el sorgo dulce sembrado a una distancia entre surcos de 0.9 a 1.0 m ayuda a un control de malezas adecuado y hace la cosecha más fácil; también afirman que la tasa de siembra ideal para la mayoría de las variedades de sorgo dulce es de 9-12 semillas por metro lineal, con un distanciamiento de 0.1 m entre plantas para tener un estándar final de 6-9 plantas por metro lineal de surco .

En relación a lo anterior, Turgut *et al.* (2005) reportaron rendimientos máximos de forraje y materia seca en el sorgo dulce con distancias entre surcos de 0.65 m y distancias entre plantas de 0.05 a 0.1 m con un promedio de 82.9 t ha^{-1} de forraje y 30.5 t ha^{-1} de materia seca, respectivamente.

Bajo condiciones de riego y buena humedad, la producción de forraje, materia seca y semilla de sorgo dulce respondió significativamente en surcos de 0.65 m con distanciamientos angostos entre plantas de 0.05 m y 0.1 m y a la fertilización con nitrógeno en los niveles de 100 y 150 kg N ha^{-1} (Turgut *et al.*, 2005).

De acuerdo con la Asociación de Etanol de Sorgo Dulce (SSEA, 2007), para un espaciado entre surcos de 0.75 m, se recomienda mantener de 10 a 11 plantas m^{-1} lineal lo cual es un distanciamiento de 0.1 m entre ellas. La

densidad de población se mantendrá alrededor de las 150,000 plantas ha^{-1} para cultivos de época seca. El aclareo debe hacerse antes del aporque o la segunda fertilización. Lo anterior corresponde con León-Velasco *et al.* (2009) quienes utilizaron una densidad de plantas de 142 850 plantas h^{-1} dejando 0.1 m entre ellas.

En términos generales se pueden apreciar algunas ventajas del arreglo topológico a doble hilera como las siguientes (Twin-Row.com, 2010):

1. La doble hilera utiliza un mayor porcentaje por acre. Debido a que la doble hilera divide la población de un surco “sencillo” en dos surcos dobles distanciados a 0.55 m.

2. La doble hilera permite una masa radical más grande. En algunos cultivos como el maíz, las raíces crecen en círculo, el factor limitante en el crecimiento de la masa radical son otras raíces vecinas; ya que una vez que una raíz se encuentra con la raíz de a lado detiene su crecimiento. Debido a esto, manejar una distancia entre plantas adecuada es la mejor forma de promover el desarrollo radical.

3. La doble hilera maximiza la captación de luz y ayuda a prevenir la pérdida de humedad por evaporación. Conforme la doble hilera va creciendo, más cantidad de luz es capturada por las hojas, hay un aumento en la conversión de luz a energía la cual se necesita para el desarrollo de la planta.

Como podemos ver en la Figura 4, el arreglo topológico de surcos sencillos a 0.8 m deja muchos espacios libres, donde no se intercepta energía solar en las primeras etapas de crecimiento; por el contrario en la Figura 5 se ven los beneficios en captación de energía y en menos incidencia de malezas que aporta el arreglo a doble hilera.



Figura 4. Espacios libres desaprovechados para la intercepción de energía solar en los surcos sencillos a 0.8 m.



Figura 5. El arreglo a doble hilera permite un dosel más cerrado que mejora la captación de luz y guarda más humedad en la zona radical.

4. La doble hilera permite altas densidades de población. Las nuevas variedades tienen un mayor potencial de rendimiento si el manejo de las distancias es el adecuado. El espaciamiento en doble hilera es el medio más efectivo para maximizar el distanciamiento entre plantas. La doble hilera es la estrategia para aumentar la densidad de población e incrementar la salud de las plantas lo que promoverá un rendimiento óptimo. Surcos sencillos a 0.75 m, 0.8 m y 0.96 m no permitirán al productor incrementar las densidades de población.

5. La doble hilera incrementa el anclaje. La longitud de los tallos es mayor en la doble hilera y aumenta la masa radical dando como resultado una planta que es más resistente a los vientos fuertes y a los daños por tormentas.

6. La doble hilera aumenta la cantidad y la calidad de ensilaje. En cultivos de grano, como el maíz, sorgo, trigo, etc., los tallos más largos y el incremento en producción de grano de la doble hilera tienen un aumento promedio del 10 al 15 % en el tonelaje.

7. La doble hilera permite una cosecha más eficiente utilizando trilladoras y cosechadoras convencionales. Las trilladoras convencionales de maíz de 0.75 m, 0.91 m o 0.96 m levantan los tallos de la doble hilera juntos, de igual forma las cosechadoras de caña cortan las plantas con la facilidad de los surcos sencillos. Esta es una gran ventaja del arreglo a doble hilera porque no se tiene que hacer una inversión adicional para una cosechadora o trilladora nueva.

Anteriormente hemos mencionado que la finalidad de este sistema es aumentar el rendimiento por unidad de superficie buscando distanciamientos entre plantas que promuevan un crecimiento óptimo del cultivo, de igual forma, en esta investigación se busca generar información para realizar un manejo eficiente reduciendo los costos de producción de materias primas para la generación de biocombustibles. En este sentido, el arreglo a doble hilera, eficientiza el proceso de cosecha al cortar más volumen por superficie ahorrando combustible y tiempo (Figura 6).



(a)



(b)



(c)

Figura 6. Cosechadora de caña con simulación de cosecha de sorgo dulce a un surco (a) y a doble hilera (b). Trilladora de maíz (c).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1 Localización del experimento

La presente investigación se realizó en tres ciclos agrícolas: primavera y otoño 2009 y primavera 2010, esto con el propósito de tener registros del mayor número de ciclos agrícolas. El trabajo se llevó a cabo en el Campo Agrícola Experimental de la Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León (Figura 7) en el Km 17.5 de la carretera Zuazua-Marín, en el municipio de Marín, N.L., con una elevación de 355 msnm y por su situación geográfica corresponde a las coordenadas 25°52" N y 100°02" W, localizado al centro del estado de Nuevo León.



Figura 7. Ubicación geográfica del Campo Agrícola Experimental de la FAUANL.

3.2 Clima y suelo

Según el sistema de Koppen, modificado por García (1973), el clima imperante es el siguiente:

BS₁ (h`) hx`(e`)

Donde:

BS₁= Clima seco o árido, precipitación anual promedio de 573 mm, distribuidos principalmente en verano, siendo este el clima menos seco de los climas BS.

(h`) h= Temperatura promedio anual sobre 22° C y bajo 18° C la temperatura promedio del mes más frío.

x`= El régimen de lluvias se presenta como intermedia entre verano e invierno con un porcentaje de lluvia invernal mayor al 18%.

(e`) = Muy extremoso, oscilación anual de temperaturas medias mayor de 14° C. El tipo de suelo es calcáreo, arcilloso, café muy claro con un pH de 7.5, bajo en materia orgánica, son suelos pobres o moderadamente pobres y ligeramente alcalinos.

El material genético que se utilizó fue, sorgo dulce FAUANL 1 debido a que en anteriores investigaciones demostró altos rendimientos de forraje verde (56 t ha⁻¹) y contenido de azúcar (21° Brix). El material se sometió a prueba de germinación durante los tres ciclos, dando aproximadamente de 90 - 95 % en este parámetro.

3.3 Establecimiento del cultivo

3.3.1 Ciclo Primavera 2009: Evaluación de dosis de fertilización en tres arreglos topológicos (lotes)

Se establecieron tres lotes con medidas de 23 m de largo por 25.6 m de ancho, con un área total de 588.8 m². Cada lote se conformó por 16 unidades experimentales (cuatro tratamientos por cuatro repeticiones) de 5.0 m de largo y 6.4 m de ancho. El primero de ellos estuvo formado por 16 camas de 1.6 m de ancho con una doble hilera de plantas al centro separada a 0.6 m, con sistema de riego por goteo colocando la cintilla en medio de la doble hilera de plantas (Figura 8). Se utilizó manguera marca “plastro” de Irrigation Systems con las siguientes características: gasto de agua 0.60 L h⁻¹, con goteros a 0.3 m, máxima presión 1.2 bar, longitud 2000 m.



Figura 8. Establecimiento del lote de doble hilera con sistema de riego por goteo.

El segundo lote estuvo formado por 16 unidades experimentales (cuatro tratamientos por cuatro repeticiones) y comprende también 16 camas de 1.6 m

de ancho por 5.0 m de largo con una doble hilera de plantas separada a 0.6 m con sistema de riego por gravedad, en el que el agua va regando surco por surco aprovechando la pendiente del terreno (Figura 9).

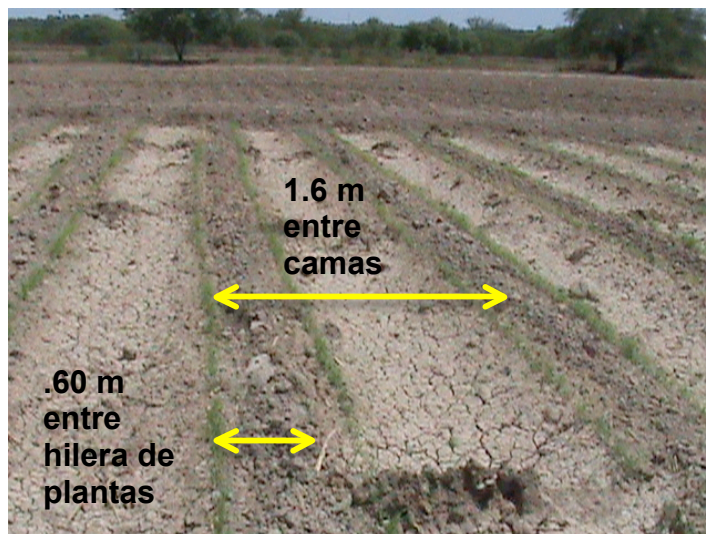


Figura 9. Establecimiento del lote de doble hilera con sistema de riego por gravedad.

El tercer lote se formó por 16 unidades experimentales (cuatro tratamientos por cuatro repeticiones) que estuvieron compuestas cada una por 8 surcos sencillos espaciados a 0.8 m y de 5.0 m de largo con una sola hilera de plantas con sistema de riego por gravedad (Figura 10).



Figura 10. Establecimiento del lote de surcos sencillos con riego por gravedad.

La siembra se realizó el 27 de marzo del 2009 en los dos lotes de camas a doble hilera, mientras que el lote de surcos sencillos se sembró el 3 de abril del mismo año. Se utilizaron sobres con cinco gramos de semilla que fueron sembrados con sembradora experimental, cada sobre equivale a un surco, usando dos sobres para cada doble hilera. La siembra se realizó utilizando el diseño experimental de bloques completos al azar con cuatro repeticiones en cada uno de los lotes. Los tratamientos dentro de cada lote fueron las cuatro dosis de fertilización y en los tres lotes se estableció una distancia de 0.1 m entre plantas manejando una densidad de población de 12 plantas m².

Para la elaboración de los tratamientos de fertilización, se utilizaron las fuentes que se presentan en el Cuadro 1.

Cuadro 1. Fuentes de fertilizantes utilizadas para los ciclos Primavera 2009, Otoño 2009 y Primavera 2010. Marín, N.L.

FUENTE	CONCENTRACIÓN (N P K)
Urea	46-00-00
Triple 17	17-17-17
Sulfato de potasio	00-00-52
Fosfato Diamónico	18-46-00
*Orgánica: micorrizas arbusculares	Cepa <i>Glomus intraradices</i> mínimo 400 esporas/g

*El biofertilizante a base de micorrizas arbusculares se utilizó solamente en los ciclos Otoño 2009 y Primavera 2010.

En cada una de las repeticiones de los tres lotes descritos se asignaron en forma aleatoria los cuatro tratamientos de fertilización (N, P, K), los cuales fueron: **T1** (140-50-50), **T2** (80-50-100), **T3** (80-00-00) y **T4** (00-00-00). El

tratamiento **T1** presento buenos resultados anteriormente a escala piloto con sorgo dulce en el campo experimental de la Facultad de Agronomía de la UANL, por lo que se decidió incluirlo en la presente investigación; con el segundo tratamiento **T2** se buscó obtener una respuesta con la aplicación de potasio (K). También se compararon los niveles **T3** y **T4** para observar la respuesta con la aplicación de nitrógeno y sin él.

3.3.2 Ciclos Otoño 2009 y Primavera 2010: Evaluación de dosis de fertilización y arreglos topológicos

En cada uno de los ciclos se establecieron tres lotes con medidas de 44.0 m de largo por 19.2 m de ancho, con un área total de 844.8 m². Cada lote se conformó por 24 unidades experimentales (seis niveles de fertilización por cuatro repeticiones) de 5.0 m de largo y 6.4 m de ancho. Los tratamientos correspondientes a los niveles de fertilización (N,P,K) que se utilizaron fueron: **T1** (140-50-100), **T2** (140-50-00), **T3** (80-50-00), **T4** (80-00-00), **T5** (00-00-00) y **T6** fertilización orgánica (hongos micorrízicos arbusculares). Con los niveles **T1** y **T2** se comparó el efecto del potasio (K). En los niveles **T3** y **T4** se comparó el efecto del fósforo (P) manteniendo fijos el N y el K; de igual forma, con los niveles **T4** y **T5** se buscó detectar efectos del N sin aplicar P y K. El nivel **T5** fue el testigo absoluto en el experimento. Por su parte, la fertilización orgánica **T6** se utilizó como alternativa a la aplicación de agroquímicos ya que es un medio para mejorar las características del suelo y buscar un balance energético positivo al no usar derivados del petróleo en los sistemas de producción.

Para el caso del experimento, que se menciona, en el lote de doble hilera con riego por goteo, las 24 unidades experimentales (cuatro repeticiones y seis tratamientos) se formaron con cuatro camas de 1.6 m de ancho y 5.0 m de largo con una doble hilera de plantas separadas 0.6 m entre ellas, con una cinta de riego por goteo colocada en medio de la doble hilera de plantas. Las plantas estuvieron separadas 0.1 m teniendo una densidad de población de 12 plantas m^2 . Se utilizó manguera marca "plastro" de Irrigation Systems con las siguientes características: gasto de agua $0.60 L h^{-1}$, con goteros a 0.3 m, máxima presión 1.2 bar, longitud 2000 m (igual que en la Figura 8).

El lote de doble hilera con riego por gravedad se diseñó de igual forma con 24 unidades experimentales compuestas cada una por cuatro camas de 1.6 m de ancho y 5.0 m de largo con doble hilera de plantas separada a una distancia de 0.6 m. Se mantuvo un distanciamiento entre plantas de 0.1 m y una densidad de 12 plantas m^2 (igual que en la Figura 9).

El lote de surcos sencillos se acomodó con 24 unidades experimentales (seis tratamientos por cuatro repeticiones), cada una formada por ocho surcos a hilera sencilla espaciados a 0.8 m y 5.0 m de largo con una distancia entre plantas de 0.1 m (igual que en la Figura 10).

Cabe mencionar, que a pesar de los cambios en los distanciamientos entre surcos la densidad de población en todos los lotes fue la misma, la cual fue de 120,000 plantas ha^{-1} .

En estos dos ciclos agrícolas se utilizaron las mismas fuentes de fertilización que en el de Primavera 2009; Urea como fuente de nitrógeno, Triple 17 como fuente de N, P y K, Sulfato de potasio como fuente única de K, Fosfato diamónico como fuente de P. Es importante mencionar que a partir del ciclo Otoño 2009 se añadió una fuente orgánica (micorrizas arbusculares) para ver su efecto en el rendimiento y buscar beneficios ambientales y de reducción de costos (Cuadro 1).

En el ciclo otoño 2009 la siembra se realizó el 16 de septiembre en el lote de doble hilera con riego por goteo. Por su parte, los lotes de surcos sencillos con riego por gravedad y doble hilera con riego por gravedad se sembraron el 22 de septiembre del mismo año.

Para el ciclo primavera 2010 la fecha de siembra fue el 2 de marzo del 2010 para los surcos a doble hilera y surcos sencillos con riego por gravedad; mientras que el lote de doble hilera con riego por goteo se sembró el 16 de marzo del mismo año.

3.4 Análisis Estadístico

El experimento se estableció bajo el diseño de bloques completos al azar con cuatro repeticiones en cada uno de los lotes.

El modelo del diseño de bloques completos al azar es:

$$Y_{ij} = \mu + T_i + \beta_j + E_{ij}$$

Donde:

Y_{ij} es la observación del tratamiento i en la repetición j .

μ es el efecto verdadero de la media general.

T_i es el efecto del i -ésimo tratamiento de fertilización.

β_j es el efecto del j -ésimo bloque.

E_{ij} es el error experimental.

Sin embargo, el objetivo fue también comparar entre los diferentes sistemas de siembra (lotes). El modelo que se utilizó para el análisis combinado (tratamientos de fertilizantes y sistemas de siembra) fue Bloques al Azar en Localidades con el siguiente modelo:

$$Y_{ijk} = \mu + L_i T_i \beta_j (i) + T_k + (LT)_{ik} + E_{ijk}$$

Donde:

Y_{ijk} es la observación del tratamiento k en el bloque j en la localidad i .

μ es el efecto verdadero de la media general.

L_i es el efecto verdadero de la i -ésima localidad (lote).

$\beta_j (i)$ es el efecto del j -ésimo bloque en la i -ésima localidad.

T_k es el efecto del k -ésimo tratamiento (fertilización).

$(LT)_{ik}$ es el efecto de la interacción entre el tratamiento k y la localidad i .

E_{ijk} es el error experimental de la ijk -ésima observación.

Con los datos de cada variable se realizaron análisis de varianza para determinar la existencia de diferencias significativas entre tratamientos de fertilización, en caso de significancia se aplicó la prueba de comparación de medias (DMS y Tukey). Los datos se analizaron en los paquetes estadísticos: SAS 9.1 (SAS Institute, 2003); Diseños Experimentales FAUANL 2.5 (Olivares, 1995).

3.5 Variables evaluadas

El protocolo para la toma de muestras en los tres ciclos agrícolas de evaluación fue:

- Cosechar 4 m lineales por unidad experimental de los surcos centrales y contar el total de plantas.
- Pesar los 4 m lineales con todas las partes: tallos, hojas y panojas.
- Pesar por separado los tallos, hojas y panojas.
- Tomar 5 plantas aleatoriamente para medir altura (cm), diámetro de tallo (cm) y °Brix.

Los muestreos destructivos se realizaron en las parcelas útiles de 5.0 m de longitud y 6.4 m de ancho; en el ciclo primavera 2009 el 9 y 10 de julio para el lote de doble hilera con riego por goteo; para el lote de surcos sencillos con riego por gravedad fueron el 15 y 21 de julio del mismo año. Debido a problemas climáticos y de falta de mano de obra, el lote de doble hilera con riego por gravedad no pudo ser cosechado en este ciclo. En el ciclo otoño 2009 los

muestreos se realizaron el 6 y 7 de enero del 2010 para los lotes de doble hilera con riego por goteo y doble hilera con riego por gravedad. En el lote de surcos sencillos se presentaron problemas de mala emergencia desde el inicio y no se pudo cosechar material suficiente para su análisis por lo cual no tenemos resultados en este ciclo.

Las variables a medir en los tres ciclos fueron:

1. Altura de la planta (cm). Se midió desde la base del tallo hasta la punta de la panoja (Figura 11).



Figura 11. Medición de la altura de planta.

2. Diámetro del tallo (cm). Se utilizó un vernier para medir el grosor de los tallos (Figura 12).



Figura 12. Medición del diámetro de tallo.

3. Contenido de azúcar (°Brix). Se extrajo el jugo del entrenudo central del tallo y se midieron directamente los °Brix con un refractómetro de mano (Figura 13).



Figura 13. Corte del entrenudo central.



Medición de los °Brix.

4. Rendimiento total (g). Se obtuvo el peso fresco total por planta de los cuatro metros lineales cosechados, además se pesaron por separado en una báscula electrónica (Figura 14 y 15):

4a. Peso fresco de tallos (kg).

4b. Peso fresco de hojas (kg).

4c. Peso fresco de panojas (kg).



Figura 14. Medición del peso fresco total por unidad experimental.



Figura 15. Separación de tallos y panoja para su medición.

Para el último ciclo (Primavera 2010) se analizaron cuatro nuevas variables:

5. Peso Fresco por hectárea (kg). Se calculó con la siguiente fórmula :

$(PFTOT \times 10000)/3.2.$

6. Jugo (g). Se calculó con la siguiente fórmula : 2000-Peso Seco.
7. Jugo Total (g). Se calculó con la siguiente fórmula : $(\text{Jugo} \times 10000)/3.2$.
8. Jugo por hectárea (L ha^{-1}). Se calculó con la siguiente fórmula :
 $[(\text{Jugo TOT} \times 10000)/3.2]/1000$.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 Ciclo Primavera 2009

El análisis de varianza de cada uno de los lotes, mostró que en el sistema de siembra a doble hilera con riego por goteo hubo diferencias significativas en las variables peso fresco y peso de hojas (Cuadro 2).

Cuadro 2. Cuadrados medios de los análisis de varianza de las variables consideradas en el estudio. Sistema de siembra doble hilera con riego por goteo. Marín, N.L. Primavera 2009.

VARIABLE	CM	P>F	CV (%)
ALTURA	1689.0625	NS	11.46
DIÁMETRO DE TALLO	0.034999	NS	15.06
PESO FRESCO	36340.168	*	26.67
PESO DE TALLO	19544.416	NS	27.87
PESO DE HOJAS	644.555	*	17.26
PESO DE PANOJAS	58.407	NS	39.50
°BRIX	2.437	NS	10.08

*Diferencia significativa Tukey, $p \leq 0.05$.

Por su parte, en la comparación de medias en el Cuadro 3, en relación a peso fresco coincide con Turgut *et al.* (2005) quienes mencionan que la fertilización con nitrógeno y altas densidades de planta aumentan la producción de tallos y de biomasa en el sorgo dulce, ya que el T2 dio el promedio más alto, incrementando el peso fresco casi al 100 % más que el T1 y 72 % que T4

(testigo absoluto); de igual forma, el peso de hojas se comporto de una manera similar con respecto a T1 y T4. El T1, a pesar de tener mayor dosis de N pero menos de K fue el que presentó la media mas baja tanto en el rendimiento total como en el peso de hojas.

Cuadro 3. Comparación de medias de peso fresco total (PFT) y peso de hojas (PH). Sistema de siembra doble hilera con riego por goteo. Marín, N.L. Primavera 2009.

TRAT.	FÓRMULA (N P K)	MEDIAS PFT (g/planta)	MEDIAS PH (g)
T2	80-50-100	430.75 a (52 t h ⁻¹)	77.725 a
T3	80-00-00	320.5 ab (38 t h ⁻¹)	56.4725 ab
T4	00-00-00	250.5 b (30 t h ⁻¹)	52.675 b
T1	140-50-50	214.25 b (25 t h ⁻¹)	49.7 b

*Medias con diferente letra en cada variable son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

De acuerdo con Vázquez (2008) un bajo suministro de potasio (K) puede provocar una reducción en el crecimiento, amarillamiento y necrosis en las hojas; reducción en la turgidez y pobre resistencia a la sequía. En este sentido, parece que el K jugo un papel determinante en una mayor expresión del rendimiento de peso fresco. En los Tratamientos T3, T4 y T1 el cultivo pudo tener deficiencia de potasio ya sea por la baja dosis de K del tratamiento o por que el fertilizante no estuvo disponible en todo el ciclo de vida ya que se aplicó el 100 % al momento de la siembra.

Contrario a lo reportado por Almodares *et al.* (2007) la fertilización no impacto en los °Brix, ya que de acuerdo al Cuadro 2 no hubo diferencia entre tratamiento de fertilización para este variable.

La forma en que se fertilizó pudo ocasionar que los resultados no coincidieran con los de Turgut *et al.* (2005), quienes reportaron que el sorgo dulce tiende a producir más forraje y materia seca cuando se fertiliza con altos niveles de nitrógeno. Sin embargo, este incremento sólo se dio en el rango de 50 a 150 kg de N ha⁻¹ y con una distribución diferente de aplicación del fertilizante comparado con el que se dio en el presente trabajo. La aplicación de todo el fertilizante al momento de la siembra, contrario a lo mencionado por Turgut *et al.* (2005), pudo ocasionar que el T1 tuviera el rendimiento más bajo debido al exceso de sales en la plántula, así como una pérdida de nutrientes por evaporación principalmente el nitrógeno (Cuadro 3). Para el caso del sistema de surcos con riego por gravedad, solamente la variable altura de planta presentó diferencias significativas (Cuadro 4).

Cuadro 4. Cuadrados medios de los análisis de varianza de las variables consideradas en el estudio. Sistema de siembra surcos con riego por gravedad. Marín, N.L. Primavera 2009.

VARIABLE	CM	P>F	CV (%)
ALTURA	248.4583	*	1.70
DIAMETRO DE TALLO	0.001318	NS	12.42
PESO FRESCO	817.791687	NS	12.84
PESO DE TALLO	443.66656	NS	0.948
PESO DE HOJAS	719.2409	NS	44.48
PESO DE PANOJAS	17.87915	NS	19.36
°BRIX	2.92867	NS	14.92

*Diferencia significativa Tukey, $p \leq 0.05$.

En la comparación de medias, todos los tratamientos resultaron estadísticamente diferentes y nuevamente el T2 registró el promedio más alto para esta variable (Cuadro 5).

Cuadro 5. Comparación de medias de altura de planta. Sistema de siembra surcos sencillos con riego por gravedad. Marín, N.L. Primavera 2009.

TRATAMIENTO	FERTILIZACIÓN (N P K)	MEDIAS (cm)
T2	80-50-100	221.5 a
T3	80-00-00	219.5 b
T4	00-00-00	201.5 c
T1	140-50-50	183.25 d

*Medias con diferente letra en cada variable son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

El acomodo idéntico de los tratamientos comparado con el sistema de siembra anterior, demuestra los efectos del K y la forma de aplicación del N discutidos anteriormente. El efecto del sistema de siembra sobre altura de planta, demostró el cuidado que se debe tener al elegir el arreglo topológico de las plantas para un sistema de producción específico. Al comparar T2 vs T3 y T4 se hace más evidente que las diferencias en rendimiento son debido a las aplicaciones de P y K en T2; para el caso de T1 posiblemente los valores bajos son por el exceso de N aplicado al inicio de la siembra.

En relación al análisis de varianza combinado entre lotes, se detectó que la única variable que presentó diferencia significativa fue PFT (Cuadro 6) y la comparación de medias demostró que el sistema de siembra de surcos sencillos con riego por gravedad tuvo la media de PFT mayor comparado con el sistema de siembra a doble hilera con riego por goteo (Cuadro 7).

Cuadro 6. Cuadrados medios del Análisis de Varianza de bloques al azar en localidades (lotes) para las variables peso fresco total (PFT) y grados Brix (°B). Sistemas de siembra surcos sencillos con riego por gravedad y doble hilera con riego por goteo. Marín, N.L. Primavera 2009.

FV	PFT	°B
Localidades	147072.25*	2.730713
R(L)	9525.62	7.681152
Tratamientos	10498.00	0.488607
Loc x Trat	5314.91	6.42334
Error	422.45	3.507935
CV (%)	16.45	13.37

*Diferencia significativa Tukey, $p \leq 0.05$.

Cuadro 7. Comparación de medias para la variable peso fresco total (PFT). Sistema de siembra surcos sencillos con riego por gravedad vs sistema de siembra doble hilera con riego por goteo. Marín, N.L. Primavera 2009.

SISTEMAS DE SIEMBRA	MEDIAS (g/planta)
SURCOS SENCILLOS CON RIEGO POR GRAVEDAD	491.62 (59 t h ⁻¹)
DOBLE HILERA CON RIEGO POR GOTEO	299.87 (36 t h ⁻¹)

Cabe mencionar que este comportamiento favorable en el sistema de surcos sencillos, puede ser a que el cultivo tuvo una mejor humedad gracias al riego por gravedad que en el lote de riego por goteo, debido a que se tuvieron problemas con el sistema de irrigación que no suministro la cantidad de riegos suficientes, aunque no se pudo cuantificar la aplicación de agua con este sistema.

4.2 Ciclo Otoño 2009

Para el caso de los resultados de los análisis de varianza para cada uno de los lotes, los que corresponden a doble hilera con riego por goteo y surcos sencillos con riego por gravedad, no se presentaron diferencias significativas entre tratamientos de fertilización; sin embargo, el análisis estadístico demostró que hubo diferencias significativas entre dosis de fertilización para el de doble hilera con riego por gravedad y únicamente para las variables de peso fresco total (PFT), peso de tallo (PT) y peso de hojas (PH) (Cuadro 8).

Cuadro 8. Cuadrados medios de tratamientos de fertilización de los análisis de varianza para las variables consideradas en los tres sistemas de siembra. Marín, N.L. Otoño 2009.

VAR	Doble hilera riego por gravedad		Doble hilera riego por goteo		Surcos sencillos riego por gravedad	
	CM	CV (%)	CM	CV (%)	CM	CV (%)
PFT	4174788.88*	13.35	3392005.56	21.48	2447216.67	10.25
PT	2396772.22*	14.66	1784605.56	22.27	1511300.00	10.83
PH	175718.72**	11.80	140464.32	22.57	51443.86	12.31
PP	10459.54	14.85	51250.50	29.19	17898.91	19.18
ALT	429.33	7.25	293.63	11.37	239.96	7.17
DIÁM	.01	7.88	0.02	14.82	0.02	5.59
°BRIX	3.26	12.85	1.91	7.21	4.14	18.35

*Medias con diferente letra en cada variable son estadísticamente diferentes (DMS, $p \leq 0.05$).

En general, las comparaciones de medias de tratamientos de fertilización para las variables PFT y PT resultaron iguales; en ambos casos, los tratamientos

con niveles bajos de N, P y K resultaron con las medias mas altas; para el caso de PFT estuvieron alrededor de los 8700 g m⁻² (Cuadro 9), los otros tratamientos fluctuaron de 6412.5 (140-50-00; T2) a 7866.6 g m⁻² para el T1 (140-50-100). Los valores mas altos de PT estuvieron alrededor de 6400 g m⁻² para los tratamientos T3, T4 y T5, mientras que los valores mas bajos fluctuaron de 4712.5 g m⁻² para T2 (140-50-100) a 5700 g m⁻² para T1 (140-50-100) (Cuadro 9).

Para el caso de PH (Cuadro 9) los valores mas altos fueron para T5 y T3 (1748.7 y 1701.7 g m⁻², respectivamente) mientras que el valor mas bajo fue para T2 (140-50-100) con 1188.5 g m⁻².

Cuadro 9. Comparación de medias de las variables peso fresco total (PFT), peso de tallo (PT) y peso de hojas (PH). Sistema de siembra doble hilera con riego por gravedad. Marín, N.L. Otoño 2009.

TRATAMIENTOS	PFT	MEDIAS (g m ⁻²)	
		PT	PH
1 (140-50-100)	7866.6 ab	5700.0 ab	1613.3 ab
2 (140-50-00)	6412.5 b	4712.5 b	1188.5 c
3 (80-50-00)	8750.0 a	6462.5 a	1701.7 a
4 (80-00-00)	8600.0 a	6350.0 a	1614.0 ab
5 (00-00-00)	8775.0 a	6437.0 a	1748.7 a
6 (micorrizas arbusc.)	6887.5 b	4987.5 b	1397.5 bc

*Medias con diferente letra en cada variable son estadísticamente diferentes (DMS, p≤0.05).

Los resultados indican que se obtuvieron los mejores rendimientos con bajas concentraciones de fertilizantes o sin la aplicación de éstos; esto es debido, a que el sorgo dulce que se utilizó no produce panojas grandes ni gran cantidad de grano que son las principales fuentes de demanda de nutrientes

(principalmente N). Por lo tanto, responde diferente que el sorgo de grano a la fertilización, tal como menciona Massacci *et al.* (1996), el sorgo dulce tiene una fisiología diferente, su principal característica es la acumulación de grandes cantidades de sacarosa en el tallo, proceso que se presenta principalmente durante el desarrollo de la inflorescencia, gracias a que en este periodo no hay competencia entre el desarrollo del grano y la acumulación de azúcares.

Otra razón posible a este comportamiento es que de acuerdo con García (1973), el tipo de suelo de la región es calcáreo, arcilloso, café muy claro con un pH de 7.5, bajo en materia orgánica, son suelos pobres o moderadamente pobres y ligeramente alcalino, lo cual pudo crear un problema de salinidad al aplicar fertilizantes químicos en exceso.

Otro aspecto que pudiera explicar este comportamiento es el agua de riego, ya que al tratarse de aguas negras, contienen materia orgánica que al ponerse en contacto con los fertilizantes químicos, los fija o neutraliza el intercambio catiónico al tener un pH ácido, limitando la disponibilidad para el cultivo. De acuerdo con Zamora *et al.* (2009), el uso de aguas residuales en zonas áridas y semiáridas para la producción agrícola puede incrementar el contenido de materia orgánica y de nutrientes en los suelos cultivados; en este sentido, la descomposición de la materia orgánica controla la disponibilidad de nutrientes e influye en la liberación de moléculas orgánicas e inorgánicas enlazadas a la materia orgánica. Estas sustancias orgánicas (CO_2 , CH_4 , SO_4^- , NH_4^+ , NO_3^- , etc.), liberadas por la descomposición de la materia orgánica, por un

lado son nutrientes que benefician el cultivo, pero por otro ocasionan la fijación de los fertilizantes químicos, por lo que las raíces no pueden tomarlos para su beneficio.

Considerando las características del suelo antes mencionadas, otro factor que pudiera ayudar a explicar este comportamiento es la fuente de nitrógeno, ya que al tratarse de urea, que es un fertilizante de residualidad alcalina, se fija con los carbonatos y bicarbonatos del suelo por lo que no es la mejor opción para las condiciones de la región. Se recomienda usar otra fuente de nitrógeno como el sulfato de amonio para futuros experimentos por ser un fertilizante de residualidad ácida y puede ser asimilado por el cultivo sin problemas de fijación. En términos generales se determina que para la región de Marín N.L., bajo un sistema de siembra de doble hilera y riego por gravedad con aguas negras el cultivo del sorgo dulce tiene un buen rendimiento de peso fresco sin la aplicación de agroquímicos, lo cual es una ventaja ya que se reducen los costos de producción además de proteger al medio ambiente.

Con respecto al análisis combinado, el cual incluyó al lote de doble hilera con riego por goteo y doble hilera con riego por gravedad, solamente la fuente de variación asociada a sistemas de siembra, presentó diferencia significativa en todas las variables a excepción de la variable peso de panoja (PP) (Cuadro 10). El lote de surcos sencillos presento problemas de poca emergencia por lo que no se pudo obtener material suficiente incluirlo en el análisis combinado de sistemas de siembra.

Cuadro 10. Cuadrados medios de los sistemas de siembra de los análisis de varianza de las variables consideradas en el estudio. Marín, N.L. Otoño 2009.

VARIABLE	CM	CV (%)
PFT	29120869.57*	25.94
PT	25501358.70*	26.35
PH	597588.02*	24.75
PP	181517.13	35.04
ALT	2896.19*	11.47
DIÁM	0.12*	12.05
°BRIX	257.80*	9.50

*Diferencia significativa DMS, $p \leq 0.05$.

En la comparación de medias para sistemas de siembra (lotes), se observó una tendencia superior en el sistema de siembra a doble hilera con riego por gravedad para todas las variables con excepción de °Brix donde el comportamiento se invirtió con respecto a las demás, ya que para esta variable el sistema de siembra a doble hilera con riego por goteo fue estadísticamente superior (Cuadro 11).

Cuadro 11. Comparación de medias de las variables consideradas en el estudio. Sistemas de siembra doble hilera con riego por goteo (1) y doble hilera con riego por gravedad (2). Marín, N.L. Otoño 2009.

S.S.	g m ⁻²				ALT (cm)	DIÁM (cm)	°BRIX
	PFT	PT	PH	PP			
1	6291.3 B*	4289.1 B	1313.0 B	689.2 A	152.3 B	1.06 B	17.8 A
2	7882.6 A	5778.3 A	1541.0 A	563.5 A	168.2 A	1.16 A	13.1 B

*Medias con diferente letra en cada variable son estadísticamente diferentes (Tukey, $p \leq 0.05$).

**Sistema de siembra (lotes).

En términos generales, el rendimiento fue superior en el sistema de siembra de doble hilera con riego por gravedad. Cabe mencionar, que una posibilidad de este comportamiento, es que en el sistema de siembra de riego por goteo se observó un exceso de humedad en todo el ciclo del cultivo, lo cual pudo provocar lixiviación de fertilizantes, además de poca oxigenación en la zona radical, ocasionando que el rendimiento fuera menor comparado con el lote de doble hilera con riego por gravedad, donde la frecuencia de riego fue menor pero más pesada, lo que pudo permitir mejor asimilación de agua por las plantas sin ocasionar lixiviación de nutrientes y dejando un buen espacio poroso para la oxigenación de las raíces.

Para el caso de °Brix, posiblemente el mayor valor en el sistema de riego por goteo, pudo ser debido a un incremento en la concentración de azúcares debido a un menor rendimiento de tallos lugar donde se almacena el jugo en el sorgo dulce.

4.3 Ciclo Primavera 2010

El análisis de varianza (ANVA) para cada uno de los sistemas de siembra no presentó diferencias significativas entre tratamientos de fertilización. En cambio, en el análisis combinado se presentaron diferencias significativas entre sistemas de siembra, únicamente para las variables de peso de hojas (PH), altura (ALT), diámetro de tallo (DIAM), grados Brix (°B) y Jugo por hectárea (Jha) (Cuadro 12).

Cuadro 12. Cuadrados medios de los análisis de varianza de las fuentes de variación evaluadas en el estudio. Marín, N.L. Primavera 2010.

	CM S.S.	CM TRAT.	CM S x T	CV (%)
VAR				
PFT	1033190.4	2732482.2	2496061.4	17.62
PT	3846354.2	2019562.5	1635604.2	19.67
PH	8753284.0**	350187.33	543711.93	23.97
PP	21036.7	10484.27	8985.95	29.59
ALT	5037.52**	291.12	374.46	11.53
DIÁM	0.57111667**	0.0201733	0.0226100	10.17
°B	469.763822**	2.648075	3.533582	13.01
PFha	100.897475	26.68439	24.37560	17.62
Jha	251552348.5**	15191955.0	12481690.2	18.42

*Diferencia significativa DMS, $p \leq 0.05$. CM S.S.= Cuadrados medios de sistemas de siembra. CM TRAT= Cuadrados Medios de Tratamientos. CM SxT= Cuadrados Medios de la interacción.

En la comparación de medias todas las variables demostraron diferencias estadísticamente (Cuadro 13). Sin embargo, los sistemas que mejor rendimiento dieron fueron doble hilera con riego por goteo y surcos con riego por gravedad. Se observó que el sistema de siembra a doble hilera con riego por goteo (I) presentó los promedios mas altos para °B, ALT y DIAM, mientras que el sistema de surcos sencillos lo fue para PH y Jha (Cuadro 13).

Cuadro 13. Comparación de medias de las variables peso de hojas (PH), altura (ALT), diámetro (DIAM), grados Brix (°B) y jugo por hectárea (Jha). Factor de variación sistemas de siembra. (I) doble hilera con riego por goteo; (II) doble hilera con riego por gravedad; (III) surcos sencillos con riego por gravedad Marín, N.L. Primavera 2010.

VARIABLES	SISTEMA DE SIEMBRA		
	I	II	III
PH	3355.0 B	2869.2 C	4069.8 A
ALT	234.4 A	207.9 B	321.4 A
DIÁM	1.7 A	1.4 B	1.4 B
°B	22.3 A	17.3 B	13.5 C
Jha	31704 B	31607 B	37262 A

*Medias con diferente letra en cada variable son estadísticamente diferentes (DMS, $p \leq 0.05$).

La no significancia detectada entre sistema de siembra para variables asociadas con el PFT y específicamente PT, demuestra que el sistema asociado con la doble hilera, pudiera representar mayores ventajas al momento de la cosecha, ya que permitiría el corte de dos surcos simultáneamente, comparados con el sistema de surcos sencillos, el cual permitiría la cosecha de un surco a la vez, de acuerdo a la maquinaria actual disponible. Esto representaría un ahorro significativo en energía y uso de maquinaria.

Considerando que aunque el sistema doble hilera con riego por gravedad (II) fue estadísticamente igual al de surcos sencillos (III) se aprecia que hay una diferencia en altura de casi un metro entre ellos (234.4 cm y 321.4 cm, respectivamente), la relativamente menor altura pudo influir en el diámetro (DIAM) y en una mayor concentración de °B en este sistema de siembra.

Considerando el buen comportamiento del sistema de doble hilera con riego por goteo para las variables asociadas con la producción de bioetanol, como son PFT, PT, °B y DIAM, los resultados coinciden con los de Siri-Prieto *et al.* (2006) quienes usaron surcos angostos de 0.5 m y una densidad similar (140,000 plantas h^{-1}) quienes bajo este sistema, obtuvieron 25 % mas rendimiento de materia verde.

De acuerdo con información técnica de las cosechadoras comerciales con las que actualmente se realiza la cosecha mecanizada de la caña de azúcar, el consumo de combustible es de 19 L por hectárea de caña, según estimaciones hechas por los proveedores de esta maquinaria el consumo para el sorgo dulce sería de 17.5 L por hectárea. Por su parte, la cantidad de tallos molederos de caña cortados es de 60 t ha^{-1} y para el sorgo dulce podría ser de 52 t ha^{-1} (información no publicada).

Adecuando estos valores a la presente investigación y a las diferencias fisiológicas entre la caña de azúcar y el sorgo dulce, podemos tomar como ejemplo que tenemos 125,000 plantas ha^{-1} de sorgo dulce (utilizando la distancia convencional de 0.8 m entre surcos) y que el consumo de combustible es de 17.5 L. El precio del combustible (diesel) cerro el año 2010 a \$9.04 (SENER, 2010 c); por lo tanto, el costo por hectárea sería de \$158.2 Mx. Por su parte, con el arreglo a doble hilera (0.6 m entre surcos) tendríamos 167,000 plantas ha^{-1} , es decir, sería posible sembrar y posteriormente cortar 42,000 plantas adicionales por hectárea (incremento de 33.6 %) con la misma cantidad

de combustible, lo que en términos monetarios equivaldría a un ahorro de \$53.15 Mx (33.6 %) por hectárea. Tomando este modelo para grandes superficies de cultivo el beneficio se incrementa considerablemente. De este modo, podemos comprobar el beneficio de ahorro de combustible y de mayor volumen cosechado gracias al sistema de siembra a doble hilera.

En consecuencia con los resultados obtenidos, las condiciones de suelo prevalecientes en la región, el sistema de siembra a doble hilera y la fertilización con bajos niveles de nitrógeno, así como la fertilización orgánica con hongos micorrízicos arbusculares, son eficientes prácticas agronómicas de producción ya que ayudan a reducir los costos relacionados al uso de fertilizantes químicos; así mismo, existe ahorro de combustible ya que el arreglo topológico a doble hilera permite cortar más volumen al momento de la cosecha; además, se protege al medio ambiente debido a que el uso de biofertilizantes es coherente con el concepto de biocombustibles al utilizar lo menos posible insumos derivados del petróleo en su producción.

Este trabajo persigue identificar sistemas de producción eficientes de materias primas para producir biocombustibles, que ayuden a mejorar la situación ambiental y socioeconómica, así como la seguridad nacional, creando nuevas oportunidades de trabajo para el campo. Asimismo, persigue reducir las emisiones de gases de efecto invernadero principalmente CO₂; ser menos dependientes de los combustibles fósiles que irremediablemente se terminarán y buscar un desarrollo económico y sustentable. De igual forma persigue crear

conciencia y generar información que demuestre a las generaciones futuras las reales condiciones de uso y las ventajas asociadas a los biocombustibles.

V. CONCLUSIONES

Con base en el objetivo planteado, la hipótesis experimental, los resultados obtenidos bajo el manejo agronómico y las condiciones climáticas en las que se desarrolló esta investigación y a la discusión de los mismos, se llegó a las conclusiones siguientes:

1. Se obtuvieron los mejores rendimientos con los tratamientos de fertilización más bajos, debido al efecto negativo de la alta fertilización ocasionado por el tipo de suelo existente en la región donde se desarrolló el experimento.
2. Comparados con el testigo absoluto (no fertilización), la fertilización tuvo un efecto positivo principalmente en las características de PFT, PT y PH.
3. En relación a los sistemas de siembra, el sistema de doble hilera con riego por gravedad presentó los mejores resultados para las características de PFT y PT. El sistema de doble hilera con riego por goteo fue mejor para las características de ALT, DIAM y °B.

4. Considerando el comportamiento de las variables asociadas con la producción de bioetanol (PFT, PS, DIAM y °B) el sistema de siembra a doble hilera presenta la ventaja adicional de una cosecha mas eficiente al disminuir los gastos energéticos y uso de equipo agrícola. Asimismo, al reducir la frecuencia del paso de la maquinaria por el terreno, se reduce la compactación del suelo, que es un problema característico del tipo de suelos (vertisoles arcillosos) de la región donde se realizó el experimento.

5. El arreglo topológico a doble hilera es un sistema de producción eficiente ya que permite incrementar la densidad de población por unidad de superficie y reducir los costos de producción gracias al ahorro de combustible al momento de la cosecha.

VI. BIBLIOGRAFIA

- Álcala S.L. 2009. Introgresión del carácter tamaño de gluma corta y menor cobertura de grano en poblaciones mejoradas y formación de líneas isogénicas de sorgo para grano. Tesis de Doctorado en Ciencias. Facultad de Agronomía de la Universidad Autónoma de Nuevo León. México. 182 p.
- Allen, M. F. 2007. Mycorrhizal fungi: highways for water and nutrients in arid soils. *Soil science society of America*. 6 (2): 291-297.
- Almodares A., M. R. Hadi, M. Ranjbar and R. Taheri. 2007. The effects of nitrogen treatments, cultivars and harvest stages on stalk yield and sugar content in sweet sorghum. *Asian Journal of Plant Sciences*. 6(2): 423-426.
- BNDES, Banco de desarrollo de Brasil. 2008. Disponible en: www.bioetanoldecanadeazucar.org.
- Banerjee, S., S. Mudliar, R. Sen, B. Giri, D. Satpute, T. Chakrabarti and R. Pandey. 2010. Commercializing lignocellulosic bioethanol: technology bottlenecks and posible remedies. *Biofuels, Bioprod. Bioref.* 4:77-93.
- Barbieri P. A., H. E. Echeverría, H. R. Saíz y F. H. Andrade. 2008. Nitrogen use efficiency in Maize as affected bye nitrógeno availability and row spacing. *Agronomy Journal*. 100 (4): 1094-1100.
- Baumhardt, R. L., J. A. Tolk, T. A. Howell and W. D. Rosenthal. 2007. Sorghum Management practices suited to varying irrigation strategies: a simulation analysis. *Agronomy Journal*. (99): 665-672.
- Bruscino, M. 2009. Biorefineries: Fact or fiction?. *Hydrocarbon Porcessing*. August: 65-69.

- Caravetta, G. J., J. H. Charney y K. D. Johnson. 1990. Within-row spacing influences on diverse sorghum genotypes: II. Dry matter yield and forage quality. *Agronomy Journal*. 82: 210-215.
- Cosentino, S. L., Copani, V., Riggi, E., Mantineo, M. 1997. Comparison of different sweet sorghum [*Sorghum Bicolor* (L.) Moench] genotypes in Mediterranean environment. *In* Proceedings of the first International sweet sorghum conference; Dajue, L., Ed; Institute of Botany, Chinese Academy of sciences: Beijing, China. Pp 444-445.
- Díaz-Franco, A. y I. Garza C. 2007. Crecimiento de sorgo y cártamo asociado a la colonización micorrízica arbuscular en suelo con baja fertilidad. *Universidad y Ciencia*. 23 (1): 15-20.
- Díaz-Franco, A., C. Hernández, M. Peña del Río. 2008. Productividad de sorgo en campo asociada con micorriza arbuscular y *azospirillum brasilense*. *Universidad y Ciencia*. 24 (3): 229-237.
- FAO. 1994. Integrated energy systems in China – The cold northeastern region experience. Ethanol production from sweet sorghum. Natural resources Management and environment departmen. Food and Agriculture Organization of the United Nations. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/T4470E/t4470e07.htm#4.%20ethanol%20production%20from%20sweet%20sorghum>
- FAO. 2005. Bioenergy. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/meeting/009/j4313e.htm>.
- Foth H. D. and B. C. Ellis. 1997. Soil fertility. 2^a. Ed. Lewis Publishers. Florida, USA. 285 p.
- García, E. 1973. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. II Ed. Instituto de Geografía, UNAM, México, D. F. 152 p.
- Garza, J. 2008. In Etanol: ¿Una Alternativa Energética para México?. Bioenergéticos (Biocombustibles). Primera Edición. ITESM-EGAP. México. Pp 13-21.

- Goldemberg J. and P. Guardabassi. 2010. The potential for first-generation ethanol production from sugarcane. *Biofuels, Bioprod. Bioref.* 4:17-24.
- Hazell, P., and R. K. Pachauri. 2006. Overview. *In* P. Hazell and R. K. Pachauri (ed.) *Bioenergy and Agriculture: Promises and Challenges*. Focus 14. Int. Food Policy Research Inst, Washinton, DC.
- House, L. R. 1985. *A guide to sorghum breeding*. 2nd edn. Patancheru, A. P. India. Pp 7.
- Humbert, R. 1974. *El cultivo de la caña de azúcar. The growing of sugar cane.* (título original). México. Compañía Editorial Continental. 719 p.
- ICRISAT. 2006. *Sweet sorghum, food, feed, fodder and fuel crop*. International Crops Research Institute for the Semi-Arid Tropics. India. 24 pp.
- León-Velasco H., L. E. Mendoza-Onofre, F. Castillo-González, T. Cervantes-Santana, A. Martínez-Garza. 2009. Evaluación de dos generaciones de híbridos y progenitors de sorgo tolerante al frío. II: Aptitud combinatorial, heterosis y heterobeltiosis. *Agrociencia*. 43: 609-623.
- Lourenco L., P. A. Arraes and D. Ellis. 2007. Biofuels in Brazil: an overview. *Crop Science*. 47: 2228-2237.
- Massacci A., A. Battistelli and F. Loreto. 1996. Effect of drought stress on photosynthetic characteristics, growth and sugar accumulation of field-grown sweet sorghum. *Aust. J. Plant Physiol.* (23): 331-340.
- Miller A. N. and M. J. Ottman. 2010. Irrigation frequency effects on growth and ethanol yield in sweet sorghum. *Agronomy Journal*. 102: 60-70.
- Murray S. C., A. Sharma, W. L. Rooney, P. E. Klein, J. E. Mullet, S. E. Mitchell and S. Kresovich. 2008. Genetic improvement of sorghum as a biofuel feedstock: I. QTL for stem sugar and grain nonstructural carbohydrates. *Crop Science*. 48: 2165-2179.

- Murray S. C., W. L. Rooney, M. T. Hamblin, S. E. Mitchell and S. Kresovich. 2009. Sweet sorghum genetic diversity and association mapping for brix and height. *The Plant Genome*. 2:48-62.
- Olivares S. E. 1995. *Métodos Estadísticos y Diseños Experimentales FAUANL*. Facultad de Agronomía, Universidad Autónoma de Nuevo León, Marín, N .L, México
- PNUD. Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo 2008. Impactos sociales del cambio climático en México. Primera edición. 73 p.
- Prasad S., A. Singh, N. Jain , H. C. Joshi. 2007. Ethanol production from sweet sorghum syrup for utilization as automotive fuel in India. *Energy & Fuels*. 21: 2415-2420.
- Renewable Fuel Association. 2007. Ethanol Industry Outlook 2007: Building New Horizons. Disponible en: http://www.ethanolrfa.org/objects/pdf/outlook/RFA_Outlook_2007.pdf
- Rodríguez, R., H. Torres, H. Williams y N. Montes. 1994. Sorgo en doble hilera *versus* surco sencillo en el noreste de México. *Agronomía Mesoamericana*. (5) 104-108.
- Russell, D. M., K. Ruamsook, E. A. Thomchick. 2009. Ethanol and the petroleum supply chain of the future: five strategic priorities of integration. *Transportation journal*. 48 (1): 5-22.
- SAGARPA. 2009. Programa de producción sustentable de insumos para bioenergéticos y de desarrollo científico y tecnológico. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación. Disponible en: www.sagarpa.gob.mx.
- Sakellariou-Makrantonaki M., D. Papalexis, N. Nakos and I. K. Kalavrouziotis. 2007. Effect of modern irrigation methods on growth and energy production of sweet sorghum (var. keller) on a dry year in Central Greece. *Agricultural Water Management*. 90: 181-189.
- Sarmiento, M. 2007. Biocombustibles, dilema para México. *Petróleo y electricidad*. Número 111. México, Septiembre.

Sarrouh B. F., J. La Prida, J. Rivaldi, S. S. da Silva. 2010. Plataforma tecnológica para la producción de etanol. *Energía: ingeniería energética y medioambiental*. Año 36 (222): 66-75.

SAS Institute. 2003. SAS OnlineDOC. v. 8.0. SAS Inst., Cary,NC.

SENER, Secretaría de Energía. 2006. Potenciales y viabilidad del uso de bioetanol y biodiesel para el transporte en México. Secretaría de Energía. 91 pp. Disponible en:
http://www.sener.gob.mx/webSener/res/169/Biocombustibles_en_Mexico_Estudio_Completo.pdf

SENER, Secretaría de Energía. 2009. Programa especial para el aprovechamiento de energía renovables. Disponible en:
<http://www.sener.gob.mx/res/0/Programa%20Energias%20Renovables.pdf>

SENER, Secretaria de Energía. 2010 (a). Estrategia Nacional de Energía. 71 Pp. Disponible en:
<http://www.sener.gob.mx/webSener/res/0/EstrategiaNacionaldeEnergia.pdf>

SENER, Secretaría de Energía. 2010 (b). Estrategia Intersecretarial de los Bioenergéticos. 27 Pp. Disponible en:
<http://www.sener.gob.mx/webSener/res/0/EstrategiaBioenergeticos.pdf>

SENER, Secretaría de Energía. 2010 (c). Precio al público de productos petrolíferos. Disponible en:
http://www.ri.pemex.com/files/dcpe/petro/epublico_esp.pdf

Serna-Saldivar, S. 2009. Producción de biocombustibles en México. Mesa redonda del Congreso Internacional de Innovación para la Agricultura en México. 8-10 Oct. 2009. ITESM. Monterrey, N. L. México

Simpson T. W., A. N. Sharpley, R. W. Howarth, H. W. Paerl and K. R. Mankin. 2008. The new gold rush: fueling ethanol production while protecting water quality. *Journal of Environmental Quality*. 37: 318-324.

Siri-Prieto G., O. Ernst, M. Martinez-Haedo, S. Albano. 2006. Productividad del sorgo dulce para la producción de etanol según variedad, época de siembra y población en el noreste uruguayo. Disponible en http://www.google.com/url?sa=t&source=web&cd=1&ved=0CBQQFjAA&url=http%3A%2F%2Fwww.iica.org.uy%2Findex.php%3Foption%3Dcom_docman%26task%3Ddoc_download%26gid%3D36%26Itemid%3D&rct=j&q=productividad%20del%20sorgo%20dulce%20art%C3%ADculo&ei=2OzuTOjwMYH98Abph8jODA&usq=AFQjCNHZ36Wa9OYE2wPUuYckf-yme4fD0w

Sissine, F. (2007). Energy independence and security act of 2007: A summary of mayor provisions, CRS Report for Congress, December 21, disponible en: <http://energy.senate.gov/public/files/RL342941.pdf>

Soccol C., L. Porto de Souza Vandenberghe, A. P. Medeiros, S. G. Karp, M. Buckeridge. 2010. Bioethanol from lignocelluloses: Status and perspectivas in Brazil. *Bioresource Technology*. (101): 4820-4825.

Solórzano O. 2010. Urgen a explotar al máximo las energías renovables en México *El Financiero-Economía*. Disponible en: <http://www.elfinanciero.com.mx/ElFinanciero/Portal/cfpages/contentmgr.cf m?docId=264277&docTipo=1&orderby=docid&sortby=ASC>

Sun, Y., and Cheng J. 2002. Hydrolysis of lignocellulosic materials for ethanol production: a review. *Biosour. Technol.* 83, 1-11.

SSEA, Sweet Sorghum Ethanol Association. 2007. Disponible en <http://www.sseassociation.org/ss-publications>.

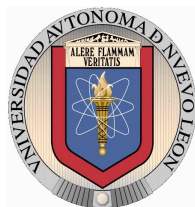
Tret'yakov V., A. S. Lermontov, Yu. I. Makarfi, M. S. Yakimova, N. A. Frantsuzova, L. M. Koval' and V. I. Erofeev. 2008. Synthesis of motor fuels from bioethanol. *Chemistry and Technology of Fuels and Oils*. 44 (6): 409-414.

Turgut I., U. Bilgili, A. Duman and E. Acikgoz. 2005. Production of sweet sorghum (*Sorghum bicolor* L. Moench) increases with increased plant densities and nitrogen fertilizer levels. *Acta Agriculturae Scandinavica. Section B-Soil and Plant*. 55: 236-240.

Twin-Row.com. 2010. Twin-Row Principles. Disponible en: <http://www.twin-row.com/twin-row-principles>

- USDA- ARS. 2009. Germplasm Resources Information Network (GRIN). National Genetic Resources Program. Disponible en:
<http://www.ars-grin.gov/cgi-bin/npgs/html>.
- Vázquez A., R. E. 2008. Fertilidad de suelos, Apuntes mimeografiados del Curso Fertilidad de suelos del programa de maestría en producción agrícola. Facultad de Agronomía, UANL. Marín, N. L., México. 150 p.
- Vermerris, W., A. Saballos, G. Ejeta, N. Mosier, M. Ladisch and N. Carpita. 2007. Production from Corn and Sorghum Stover. *Crop Sci.* 47(S3): 142-153.
- Vietor, D.M., and F. R. Miller. 1990. Assimilation, partitioning, and nonstructural carbohydrate in sweet compared with grain sorghum. *Crop Sci.* 30: 1109-1115.
- Wall, J. S., and W. Ross. 1970. Sorghum production and utilization: major feed and food crop in agriculture and food series. Avi Pub. Connecticut, U. S. A. pp.8.
- Wang, P., J. Hong, R. Xia, Q. Wu, M. Wang and T. Dong. 2010. Arbuscular mycorrhizal development, glomalin-related soil protein (GRSP) content, and rhizospheric phosphatase activity in citrus orchards under different types of soil Management. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 000:1-8.
- Wortmann, C., A. J. Liska, R. B. Ferguson, D. J. Lyon, R. N. Klein and I. Dweikat. 2010. Dryland Performance of sweet sorghum and grain crops for biofuel in Nebraska. *Agronomy Journal.* 102 (1): 319-326.
- Zamora F., R., N. Rodríguez., D. Torres, H. Yendis. 2009. Uso de agua residual y contenido de materia orgánica y biomasa microbiana en suelos de la llanura de Coro, Venezuela. *Agricultura Técnica en México.* 35 (2): 211-218.

ANEXOS



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA**



LABORATORIO DE SUELOS, AGUAS Y TEJIDO VEGETAL

MUESTRA PROCEDENTE DE: MARÍN, NUEVO LEÓN

REMITIDA POR: JESÚS OLVERA VARGAS

ESPECIFICACIONES: MUESTRA DE SUELO "A-1"

DETERMINACIÓN	ANÁLISIS	CLASIFICACIÓN AGRONÓMICA
REACCIÓN (Relación Suelo-Agua 1:2)	pH 8	Moderadamente alcalino
FÓSFORO EXTRAÍBLE (Método Olsen Modificado)	.3070 ppm	Óptimo
TEXTURA	Análisis Granulométrico	Arcillo Limoso
MATERIA ORGÁNICA (Método Walkley-Black)	2.06 %	Mediano
SALES SOLUBLES TOTALES (Método Extracto de Saturación)	Conductividad Eléctrica 2.22 mS/cm a 25° C	Ligeramente salino

Marín, N. L., a 14 de Junio de 2010



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA**



LABORATORIO DE SUELOS, AGUAS Y TEJIDO VEGETAL

MUESTRA PROCEDENTE DE: MARÍN, NUEVO LEÓN

REMITIDA POR: JESÚS OLVERA VARGAS

ESPECIFICACIONES: MUESTRA DE SUELO "A-2"

DETERMINACIÓN	ANÁLISIS	CLASIFICACIÓN AGRONÓMICA
REACCIÓN (Relación Suelo-Agua 1:2)	pH 7.9	Moderadamente alcalino
FÓSFORO EXTRAÍBLE (Método Olsen Modificado)	.2280 ppm	Óptimo
TEXTURA	Análisis Granulométrico	Arcillo Limoso
MATERIA ORGÁNICA (Método Walkley-Black)	1.90 %	Mediano
SALES SOLUBLES TOTALES (Método Extracto de Saturación)	Conductividad Eléctrica 2.24 mS/cm a 25° C	Ligeramente salino

Marín, N. L., a 14 de Junio de 2010



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA**



LABORATORIO DE SUELOS, AGUAS Y TEJIDO VEGETAL

MUESTRA PROCEDENTE DE: MARÍN, NUEVO LEÓN

REMITIDA POR: JESÚS OLVERA VARGAS

ESPECIFICACIONES: MUESTRA DE SUELO "B-1"

DETERMINACIÓN	ANÁLISIS	CLASIFICACIÓN AGRONÓMICA
REACCIÓN (Relación Suelo-Agua 1:2)	pH 8.21	Moderadamente alcalino
FÓSFORO EXTRAÍBLE (Método Olsen Modificado)	.2094 ppm	Óptimo
TEXTURA	Análisis Granulométrico	Arcillo Limoso
MATERIA ORGÁNICA (Método Walkley-Black)	1.74 %	Medianamente pobre
SALES SOLUBLES TOTALES (Método Extracto de Saturación)	Conductividad Eléctrica 3.17 mS/cm a 25° C	Ligeramente salino

Marín, N. L., a 14 de Junio de 2010



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVO LEÓN
FACULTAD DE AGRONOMÍA**



LABORATORIO DE SUELOS, AGUAS Y TEJIDO VEGETAL

MUESTRA PROCEDENTE DE: MARÍN, NUEVO LEÓN

REMITIDA POR: JESÚS OLVERA VARGAS

ESPECIFICACIONES: MUESTRA DE SUELO "B-2"

DETERMINACIÓN	ANÁLISIS	CLASIFICACIÓN AGRONÓMICA
REACCIÓN (Relación Suelo-Agua 1:2)	pH 8.13	Moderadamente alcalino
FÓSFORO EXTRAÍBLE (Método Olsen Modificado)	.2486 ppm	Óptimo
TEXTURA	Análisis Granulométrico	Arcillo Limoso
MATERIA ORGÁNICA (Método Walkley-Black)	1.80 %	Mediano
SALES SOLUBLES TOTALES (Método Extracto de Saturación)	Conductividad Eléctrica 3.27 mS/cm a 25° C	Ligeramente salino

Marín, N. L., a 14 de Junio de 2010