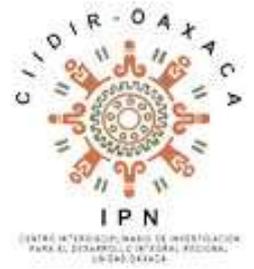




**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**

**CENTRO INTERDISCIPLINARIO DE INVESTIGACIÓN  
PARA EL DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL  
UNIDAD OAXACA**



**MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO  
DE RECURSOS NATURALES**

**ESPECIALIDAD EN PROTECCIÓN Y PRODUCCIÓN VEGETAL**

**TENSIÓN DE HUMEDAD DEL SUELO Y EFECTO DE  
FERTILIZANTES DE LIBERACIÓN LENTA EN MAGUEY  
MEZCALERO (*Agave angustifolia* Haw.)**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL GRADO DE  
MAESTRO EN CIENCIAS  
PRESENTA**

**SAÚL SÁNCHEZ MENDOZA**

**Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca.**

**Mayo de 2010**



**INSTITUTO POLITECNICO NACIONAL**  
**SECRETARIA DE INVESTIGACION Y POSGRADO**

*ACTA DE REVISION DE TESIS*

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez siendo las 13:00 horas del día 04 del mes de mayo del 2010 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de Tesis designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación del Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca (CIIDIR-OAXACA) para examinar la tesis de grado titulada: "Tensión de humedad del suelo y efecto de fertilizantes de liberación lenta en maguey mezcalero (*Agave angustifolia* Haw.)"

Presentada por el alumno:

**Sánchez**

Apellido paterno

**Mendoza**

materno

**Saúl**

nombre(s)

Con registro: 

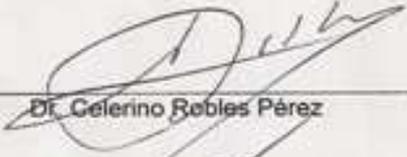
A	0	8	0	3	6	5
---	---	---	---	---	---	---

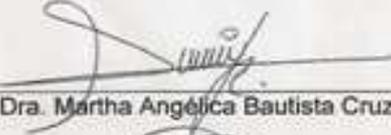
aspirante al grado de: **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES**

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **SU APROBACION DE LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

**LA COMISION REVISORA**

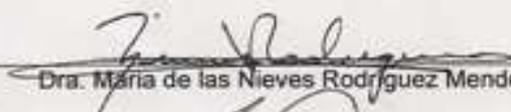
Directores de tesis:

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Celerino Robles Pérez

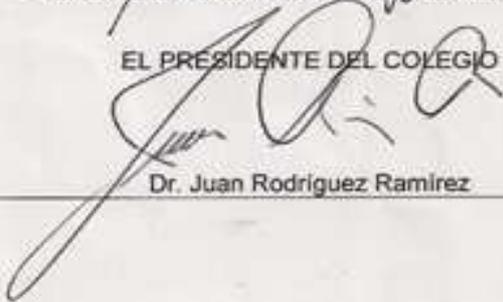
  
\_\_\_\_\_  
Dra. Martha Angélica Bautista Cruz

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Jaime Ruiz Vega

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Rafael Pérez Pacheco

  
\_\_\_\_\_  
Dra. María de las Nieves Rodríguez Mendoza

EL PRESIDENTE DEL COLEGIO

  
\_\_\_\_\_  
Dr. Juan Rodríguez Ramírez



CENTRO INTERDISCIPLINARIO  
DE INVESTIGACION PARA EL  
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL  
CIIDIR  
UNIDAD OAXACA  
IPN



**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

**CARTA CESION DE DERECHOS**

En la Ciudad de Oaxaca de Juárez el día **04** del mes **mayo** del año **2010**, el (la) que suscribe **Sánchez Mendoza Saúl** alumno (a) del Programa de **MAESTRÍA EN CIENCIAS EN CONSERVACIÓN Y APROVECHAMIENTO DE RECURSOS NATURALES** con número de registro **A080365**, adscrito al Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional, Unidad Oaxaca, manifiesta que es autor (a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección de los Drs. Celerino Robles Pérez y Martha Angélica Bautista Cruz y cede los derechos del trabajo titulado: "**Tensión de humedad del suelo y efecto de fertilizantes de liberación lenta en maguey mezcalero (*Agave angustifolia* Haw.)**", al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del autor y/o director del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a la siguiente dirección **Calle Hornos 1003, Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca**, e-mail: [posgradoax@ipn.mx](mailto:posgradoax@ipn.mx) ó [saul\\_sm@live.com.mx](mailto:saul_sm@live.com.mx) Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

**Sánchez Mendoza Saúl**



**CENTRO INTERDISCIPLINARIO  
DE INVESTIGACION PARA EL  
DESARROLLO INTEGRAL REGIONAL  
C.I.D.I.R.  
UNIDAD OAXACA  
I.P.N.**

## RESUMEN

El maguey mezcalero (*Agave angustifolia* Haw.) es un cultivo de gran importancia económica para el estado de Oaxaca (México) porque constituye la materia prima para la elaboración del mezcal. No obstante, la tecnología agronómica para su producción es escasa. En este estudio se evaluó el efecto de la aplicación de fertilizantes de liberación lenta (FLL) (Mutigro (6)®, M6; Multigro (3)®, M3; y Turf Builder®, TB) y la disponibilidad continua de humedad en el suelo (HA) (80%, 50% y 20%), así como la interacción de ambos factores sobre el crecimiento, contenido nutrimental y fisiología de plantas de maguey mezcalero. Las variables medidas para evaluar el crecimiento fueron: altura de planta (AP), número de hojas desplegadas (NHD), diámetro de tallo (DT), área foliar (AF), grados Brix (GB), longitud de raíces (LR), grosor de raíces (GR), volumen radical (VR), densidad de raíces (DR), peso fresco de hojas (PFH), tallo (PFT) y raíces (PFR), peso seco de hojas (PSH), tallo (PST) y raíces (PSR). El análisis foliar incluyó la determinación del contenido de N, P, K, Ca y Mg. Una vez que se inició la aplicación de riegos se determinaron algunas variables fisiológicas como la tasa de asimilación de CO<sub>2</sub> (FS NETA), temperatura de la hoja (TH), conductancia estomática (CS), resistencia estomática (RS) y concentración intracelular de CO<sub>2</sub> (CIN). Los FLL M3 y M6 presentaron los valores más altos para AP, NHD, AF, DR, DT, GB, LR, GR, PFH, PFT, PFR, PSH, PST y PSR, con M6 se obtuvieron también las concentraciones más altas de N, P, Ca y Mg. Los tratamientos al 80 y 20% de HA mostraron los valores más altos para las variables AP, DT, VR, GR, PFT, PFR, PSH, PST, PSR, NHD, AF, PFH y LR, con el nivel de HA al 80% se obtuvieron las mayores concentraciones de N y P, con 50% de HA se presentaron los valores más altos de GB, K y Mg. El testigo mostró los valores más altos para DR y Ca. Las variables que respondieron significativamente a la interacción FLL\*HA fueron NHD, DT, GB, PFH. El tratamiento con 80% de HA combinado con M6 presentó los valores más altos para DT y PFH, el mismo nivel de humedad combinado con M3 mostró el mayor NHD. La HA al 50% combinada con M3 y TB reportó los mejores resultados para GB. El tratamiento con 80% de HA combinado con TB mostró las concentraciones más altas de Ca y Mg, caso contrario para N y P donde los tratamientos sin riego y fertilizados tuvieron las concentraciones más altas. En la evaluación de las variables fisiológicas los FLL de manera individual no tuvieron un efecto significativo sobre las variables evaluadas. En cambio, los tratamientos con 80% y 50% de HA fueron los tratamientos que presentaron los valores más altos de FS NETA. A mayor HA se obtuvo mayor TH y CS, a menor HA se tuvo menor RS y mayor CIN.

**Palabras clave:** maguey mezcalero, fertilizantes de liberación lenta, humedad aprovechable del suelo, crecimiento, fisiología.

## ABSTRACT

The maguey mezcalero (*Agave angustifolia* Haw) is a culture of great economic importance to the Oaxaca State (México) because it constitutes the raw material for the elaboration of the mezcal. Despite, the agronomic technology for its production is little. In this studio I evaluate the effect of the application of slow release fertilizers (FLL) (Mutigro (6)®, M6; Multigro (3)®, M3; and Turf Builder®, TB) and the availability continues of humidity in the ground (Ha)(80%,50% and 20%), as well of the interaction of both factors on the growth, nutrimental content and physiology of plants of maguey mezcalero. The measured variables to evaluate the growth were : height of the plant (AP), number of unfolded leaves (NHD), diameter of stem (DT), leaf area (AF), °Brix (GB), length by roots (LR), thickness of roots (GR), radical volume (VR), density of roots (DR), fresh weight of leaves (PFH), stem (PFT), and roots (PFR), dry weight of leaves (PSH), stem (PST), and roots (PSR). The leaf analyzis included the determination of the content of N,P,K, Ca y Mg. Once started the application of irrigation some physiological variables as the rate of assimilation of CO<sub>2</sub> were determined (FS NETA), temperature of the leaf (TH), stomatal conductance (CS), stomatal resistance (RS), and intracellular concentration of CO<sub>2</sub> (CIN). The FLL M3 and M6 presented the highest values for AP,NHD,AF,DR,DT,GB,LR, GR, PFH, PFT,PFR, PSH, PST AND PSR, with M6 the highest concentrations were also obtained of N,P, Ca and Mg. The treatments to 80 and 20% of HA showed the highest values for the variables AP, DT,VR, GR, PFT, PFR, PSH, PST, PSR, NHD, AF,PFH, and LR, with the 80% of the level of HA showed the highest concentrations of N and P, with 50% of HA the highest values were presented of GB, K and Mg. The control showed the highest values to DR and Ca. The variables that significantly responded to the interaction FLL\*HA were NHD, DT ,GB ,PFH. The treatment with 80% of HA combined with M6 presented the highest values to DT and PFH, the same level of humidity combined with M3 showed the mayor NHD. The HA to 50% combined with M3 and TB reported the best results to GB. The treatment with 80% of HA combined with TB showed the highest concentrations of Ca and Mg, otherwise to N and P where the treatments without risk and fertilizers had the highest concentrations. In the evaluations of the physiological variables the FLL of individual way did not have a significant effect on the evaluated variables.However, the treatments with 80% and 50% of HA were the treatments that displayed the highest values of FS NETA. To mayor HA is obtained major TH and CS, to minor HA had minor RS and major CIN.

**Key words:** maguey mezcalero, slow release fertilizer, usable humidity of the ground, growth, physiology.

## **AGRADECIMIENTOS**

Al CONACYT por su valioso apoyo para realizar los estudios de maestría.

A la Dra. M. Angélica Bautista Cruz por su gran ayuda en este trabajo, por sus valiosos consejos y sobre todo por su buena amistad.

Al Dr. Celerino Robles Pérez por sus consejos, sugerencias, por su agradable carácter y por la gran disposición que tuvo para apoyarme en todo momento.

A la Dra. Ma. De las Nieves Rodríguez Mendoza, por su paciencia y por las valiosas sugerencias para mejorar este trabajo.

Al Dr. Rafael Pérez Pacheco por sus valiosas sugerencias.

Al Dr. Jaime Ruiz Vega por la atención brindada para la revisión de este escrito.

Agradecimientos especiales a las prestadoras de servicio social por su valiosa cooperación en el trabajo de laboratorio y sobre todo por la gran amistad brindada.

## **DEDICATORIA**

A Dios por darme la oportunidad de tener la fuerza y el coraje para cumplir con todas mis metas, siendo la maestría una de las metas mas importantes en mi vida.

A mis padres por darme la vida y por apoyarme siempre en todo momento.

A mis hermanas por entenderme y apoyarme en todo momento.

A todos aquellos que directa e indirectamente contribuyeron a la realización de este trabajo de investigación.

## INDICE

### RESUMEN

### ABSTRACT

Página.

I. CAPITULO 1: INTRODUCCIÓN GENERAL.....	14
<b>II. CAPITULO 2:</b> Efecto de la interacción tensión de humedad del suelo y fertilizantes de liberación lenta sobre el crecimiento y nutrición de maguey mezcalero ( <i>Agave angustifolia</i> Haw.).....	16
4.1 INTRODUCCION.....	16
4.2 MATERIALES Y MÉTODOS.....	18
4.2.1 Variables de crecimiento y contenido nutrimental.....	22
4.2.2 Análisis estadístico.....	23
4.3 RESULTADOS Y DISCUSION.....	23
4.3.1 Efecto de fertilizantes de liberación lenta sobre el crecimiento de maguey mezcalero.....	23
4.3.1.1 Altura de planta .....	23
4.3.1.2 Número de hojas desplegadas .....	24
4.3.1.3 Diámetro de tallo, área foliar, grados brix, longitud de raíces, volumen de raíces, grosor de raíces y densidad de raíces .....	25
4.3.2 Efecto de diferentes niveles de humedad aprovechable del suelo sobre el crecimiento de maguey mezcalero.....	28
4.3.2.1 Altura de planta .....	28
4.3.2.2 Número de hojas desplegadas .....	29
4.3.2.3 Diámetro de tallo, área foliar, grados brix, longitud de raíces, volumen de raíces, grosor de raíces y densidad de raíces .....	30
4.3.3 Interacción fertilizantes de liberación lenta y niveles de humedad.....	32
4.3.4 Contenido nutrimental en hojas.....	35
4.4 CONCLUSIONES.....	39
4.6 LITERATURA CITADA.....	40
<b>V. CAPITULO 3:</b> Respuesta fisiológica de maguey mezcalero ( <i>Agave angustifolia</i> Haw.) a diferentes niveles de humedad aprovechable del suelo y fertilizantes de liberación lenta.....	46
5.1 INTRODUCCION.....	46
5.2 MATERIALES Y METODOS.....	47
5.2.1 Evaluación de variables fisiológicas.....	47
5.3 RESULTADOS Y DISCUSION.....	48
5.3.1 Tasa de asimilación de CO <sub>2</sub> .....	48
5.3.2 Temperatura de la hoja .....	54
5.3.3 Resistencia estomática .....	57
5.3.4 Conductancia estomática.....	59
5.3.5 Concentración intracelular de CO <sub>2</sub> .....	62
5.3.6 Tasa fotosintética y crecimiento de maguey mezcalero.....	64
5.3.7 Interacción niveles de humedad aprovechable y fertilizantes de liberación lenta.....	65
5.4 CONCLUSIONES.....	69

5.5 LITERATURA CITADA.....	70
RECOMENDACIONES Y PERSPECTIVAS.....	73

## INDICE DE CUADROS CAPITULO 2

Página.

Cuadro 1. Características físicas y químicas del suelo donde se estableció el experimento.....	19
Cuadro 2. Composición química de los fertilizantes de liberación lenta utilizados en el experimento. ....	20
Cuadro 3. Número de hojas desplegadas en maguey mezcalero ( <i>Agave angustifolia</i> Haw) con la aplicación de fertilizantes de liberación lenta.....	25
Cuadro 4. Respuesta de las variables de crecimiento de plantas de maguey mezcalero ( <i>Agave angustifolia</i> Haw) a la aplicación de tres fertilizantes de liberación lenta.....	26
Cuadro 5. Respuesta en la acumulación de biomasa de maguey mezcalero ( <i>Agave angustifolia</i> Haw) a la aplicación de tres fertilizantes de liberación lenta.....	27
Cuadro 6. Respuesta del crecimiento de maguey mezcalero ( <i>Agave angustifolia</i> Haw) a la aplicación de tres niveles de humedad aprovechable en el suelo.....	29
Cuadro 7. Respuesta de las variable número de hojas desplegadas en maguey mezcalero ( <i>Agave angustifolia</i> Haw) a la aplicación de tres niveles de humedad aprovechable en el suelo.....	30
Cuadro 8. Respuesta de las variables de crecimiento de plantas de maguey mezcalero ( <i>Agave angustifolia</i> Haw) a la aplicación de tres niveles de humedad aprovechable en el suelo.....	31
Cuadro 9. Respuesta en la acumulación de biomasa de maguey mezcalero ( <i>Agave angustifolia</i> Haw) a la aplicación de tres niveles de humedad aprovechable en el suelo.....	31
Cuadro 10. Respuesta de las variables de crecimiento a la interacción humedad y fertilizante en maguey mezcalero ( <i>Agave angustifolia</i> Haw).....	33

Cuadro 11. Efecto de diferentes fertilizantes de liberación lenta en el contenido nutrimental en hojas de maguey mezcalero ( <i>Agave angustifolia</i> Haw).....	35
Cuadro 12. Efecto de diferentes niveles de humedad aprovechable del suelo en el contenido nutrimental en hojas de maguey mezcalero ( <i>Agave angustifolia</i> Haw).....	37
Cuadro 13. Respuesta de la concentración nutrimental a la interacción humedad y fertilizante en hojas de maguey mezcalero ( <i>Agave angustifolia</i> Haw).....	38

## INDICE DE FIGURAS CAPITULO 2

	Página.
Figura 1. Comportamiento de los diferentes niveles y tensiones de humedad del suelo donde se estableció el experimento .....	21
Figura 2. Curva de secado del suelo donde se estableció el experimento.....	22
Figura 3. Efecto de fertilizantes de liberación lenta sobre la altura de planta en maguey mezcalero ( <i>Agave angustifolia</i> Haw).....	24

### INDICE DE CUADROS CAPITULO 3

	Página.
Cuadro 1. Tasa de asimilación de CO <sub>2</sub> en plantas de maguey mezcalero ( <i>Agave angustifolia</i> Haw) en función de la humedad aprovechable.....	52
Cuadro 2. Respuesta de variables fisiológicas a la interacción humedad y fertilizante en maguey mezcalero <i>Agave angustifolia</i> Haw. Primera medición.....	66
Cuadro 3. Respuesta de variables fisiológicas a la interacción humedad y fertilizante en maguey mezcalero <i>Agave angustifolia</i> Haw. Segunda medición.....	67
Cuadro 4. Continuacion de la Respuesta de variables fisiológicas a la interacción humedad y fertilizante en maguey mezcalero <i>Agave angustifolia</i> Haw. Segunda medición.....	64

### INDICE DE FIGURAS CAPITULO 3

	Página.
Figura 1. Radiación fotosinteticamente activa para cada una de las mediciones e intervalos estudiados, primera medición (a), segunda medición (b)..	49
Figura 2. Temperatura ambiental y humedad relativa para cada una de las mediciones e intervalos estudiados, primera medición (a), segunda medición (b).	49
Figura 3. Tasa de asimilación neta de CO <sub>2</sub> en plantas de maguey mezcalero ( <i>Agave angustifolia</i> Haw.). Primera medición (28/04/09).....	51
Figura 4. Influencia de la temperatura de la hoja sobre la tasa de asimilación neta de CO <sub>2</sub> en plantas de maguey mezcalero ( <i>Agave angustifolia</i> Haw.). Primera medición (28/04/09).....	55

Figura 5. Influencia de la temperatura de la hoja sobre la tasa de asimilación neta de CO <sub>2</sub> en plantas de maguey mezcalero ( <i>Agave angustifolia</i> Haw.).Segunda lectura (28/07/09).....	56
Figura 6. Influencia de la resistencia estomática sobre la tasa de asimilación neta de CO <sub>2</sub> en plantas de maguey mezcalero ( <i>Agave angustifolia</i> Haw.). Primera lectura (28/04/09).....	58
Figura 7. Influencia de la resistencia estomática sobre la tasa de asimilación neta de CO <sub>2</sub> en plantas de maguey mezcalero ( <i>Agave angustifolia</i> Haw.). Segunda lectura (28/07/09).....	59
Figura 8. Influencia de la conductancia estomática sobre la tasa de asimilación neta de CO <sub>2</sub> en plantas de maguey mezcalero ( <i>Agave angustifolia</i> Haw.). Primera lectura (28/04/09).....	60
Figura 9. Influencia de la conductancia estomática sobre la tasa de asimilación neta de CO <sub>2</sub> en plantas de maguey mezcalero ( <i>Agave angustifolia</i> Haw.). Segunda lectura (28/07/09).....	61
Figura 10. Influencia de la concentración interna de CO <sub>2</sub> sobre la tasa de asimilación neta de CO <sub>2</sub> en plantas de maguey mezcalero ( <i>Agave angustifolia</i> Haw.). Primera lectura (28/04/09)...	62
Figura 11. Influencia de concentración interna de CO <sub>2</sub> sobre la tasa de asimilación neta de CO <sub>2</sub> en plantas de maguey mezcalero ( <i>Agave angustifolia</i> Haw.). Segunda lectura (28/07/09).....	63
Figura 12. Influencia de la tasa de asimilación neta de CO <sub>2</sub> sobre el crecimiento de plantas de maguey mezcalero ( <i>Agave angustifolia</i> Haw.). .....	64
Figura 13. Influencia de la tasa de asimilación neta de CO <sub>2</sub> sobre la producción de materia seca de plantas de maguey mezcalero ( <i>Agave angustifolia</i> Haw.).....	65

## I. INTRODUCCIÓN GENERAL

En México, los magueyes han tenido y tienen una gran importancia económica y cultural para numerosos pueblos indígenas y mestizos, que los han aprovechado durante siglos como fuente de alimento, bebida, medicina, combustible, cobijo, ornato, entre otros usos (García-Mendoza, 2007). Dentro de las especies más importantes del género *Agave* por su utilización para la elaboración de bebidas destiladas como el mezcal, se encuentra el *Agave angustifolia* Haw. (“maguey espadín” o “maguey mezcalero”). Esta especie presenta una distribución ecológica amplia en Oaxaca, ya que se localiza en 21 distritos del estado, en un rango altitudinal que va de 50 a 2300 msnm y crece al menos en cuatro tipos de vegetación dependiendo del tipo de clima (semicálidos, templados, subhúmedos y semidesérticos) (García-Mendoza *et al.*, 2004). A pesar de su amplia distribución, la mayor producción se obtiene en la “región del mezcal”, zona localizada en parte de las regiones de los Valles Centrales y la Sierra Sur, principalmente en los distritos de Yautepec, Miahuatlán, Sola de Vega, Tlacolula, Ejutla, Ocotlán y Zimatlán, lugares donde el *A. angustifolia* se encuentra cultivado de forma intensiva (Palma, 1998; Espinoza *et al.*, 2002). Granados (1993) reportó que la especie *A. angustifolia*, al ser la más utilizada como materia prima para la elaboración del mezcal, ha desplazado a muchas otras especies de maguey mezcalero. La tendencia al empleo generalizado de *A. angustifolia* para el establecimiento de plantaciones se explica por su precocidad, mayor rendimiento y por la preferencia que goza entre los productores de mezcal por la calidad del producto obtenido (Granados, 1993). No obstante la gran importancia que el cultivo de esta especie representa para el estado de Oaxaca, se ha reportado que de 256 productores de maguey (cantidad que representa 4% del total de productores) sólo 52% aplica algún fertilizante; de este total, 80% aplica fertilizante orgánico y 20% aplica fertilizante mineral. Las dosis de fertilización están de acuerdo con el ingreso económico de los productores, pero no se derivan de un análisis químico de suelo o de resultados experimentales que permitan conocer los requerimientos nutrimentales del cultivo (Chagoya-Méndez, 2004). Los fertilizantes más utilizados son los de alta solubilidad (Peña *et al.*, 2002). El empleo de estos productos ofrece algunas ventajas como la rápida disponibilidad de los nutrimentos y la facilidad para adquirirlos y aplicarlos, pero también ciertas desventajas como la reducida eficiencia de aprovechamiento de los nutrimentos, las pérdidas que de ellos ocurren y que ocasionan contaminación del aire, del suelo y del agua, además de los riesgos potenciales de afectación a la salud humana (Peña *et al.*, 2002). Para reducir o eliminar los riesgos que pueden ocasionar estos tipos de fertilizantes debido a la contaminación que generan, destaca la utilización de fertilizantes de liberación lenta (FLL) los cuales presentan ventajas con respecto a los fertilizantes hidrosolubles de rápida entrega (Bustos *et al.*, 2008). Los FLL tienen la habilidad de suministrar nutrimentos en forma gradual a las plantas en períodos más prolongados mediante una

sola aplicación, lo cual reduce la probabilidad de causarles toxicidad y adicionalmente disminuye su pérdida por lixiviación (Bustos *et al.*, 2008). Por otra parte, las especies con metabolismo fotosintético ácido de las crasuláceas (CAM), como las Agaváceas son más eficientes en el uso de agua que las de metabolismo fotosintético C3, como el frijol, y C4, como el maíz, de esta manera una planta CAM es cuatro veces mas eficiente que una planta C3 y tres veces mas eficiente que una planta C4 (Ruiz *et al.*, 2007). Las bases fisiológicas del éxito ecológico y la utilidad agrícola de las plantas CAM son en gran medida el reflejo de su modalidad diaria de apertura de los estomas (Nobel, 1992). La mayoría de las plantas tienen un patrón diurno de apertura estomatal, de tal manera que la entrada de CO<sub>2</sub> ocurre simultáneamente con la fotosíntesis, la cual usa la energía de la luz para incorporar el CO<sub>2</sub> de la atmósfera y producir carbohidratos que serán utilizados en diferentes procesos metabólicos. Las plantas CAM, sin embargo, abren sus estomas en la noche, de modo que la entrada de CO<sub>2</sub> y la pérdida de vapor de agua asociada ocurren en la parte más fresca del ciclo de 24 horas. Las plantas CAM son nativas de regiones áridas y semiáridas (Nobel, 1992), sin embargo, estas especies responden positivamente a la disponibilidad continua de humedad en el suelo para las variables altura de planta, diámetro de tallo, número de hojas desplegadas, y acumulación de biomasa (José, 1995; Enríquez-del Valle, 2006; Zúñiga *et al.*, 2007). Con base en lo anterior el objetivo general del presente trabajo fue evaluar el efecto de la disponibilidad continua de humedad en el suelo y la aplicación de FLL sobre el crecimiento, contenido nutrimental y fisiología de plantas de *A. angustifolia* Haw. La hipótesis planteada fue que diferentes tensiones de humedad en el suelo y la adición simultánea de FLL incrementan el crecimiento, la absorción de nutrimentos y la asimilación de CO<sub>2</sub> de plantas de *A. angustifolia* Haw.

## IV. CAPITULO 2

### EFECTO DE LA INTERACCION TENSIÓN DE HUMEDAD DEL SUELO Y FERTILIZANTES DE LIBERACIÓN LENTA SOBRE EL CRECIMIENTO Y NUTRICIÓN DE MAGUEY MEZCALERO (*Agave angustifolia* Haw.)

#### 4.1 INTRODUCCION

El maguey mezcalero (*Agave angustifolia* Haw.) es un cultivo de gran importancia económica para el estado de Oaxaca, ya que es la materia prima para la producción del mezcal y presenta un gran potencial para la elaboración de edulcorantes (Palma, 1998) y otros productos de alto valor agregado tales como extracción de saponinas para la producción de jabón, esteroides u otras hormonas sexuales, elaboración de cordeles, fibras, canastos, cepillos, ropa y sandalias; las flores son comestibles, además se puede utilizar como remedio para torceduras o huesos rotos (CONAFOR, 2003). Debido a las adaptaciones fisiológicas y anatómicas de esta especie, las plantas pueden proliferar en condiciones ambientales tan restrictivas como son las zonas con escasa precipitación y suelos de baja fertilidad (Castro, 2007). Sin embargo, investigaciones que se han realizado en *A. angustifolia* sobre aspectos de fertilización y aplicación de riegos han demostrado que responden de manera positiva a estos estímulos (Nobel *et al.*, 1989), variables como altura de planta, número de hojas y diámetro de tallo son las que mejor respuesta han presentado (Nobel *et al.*, 1989; Pacheco, 2007). En la actualidad son pocas las investigaciones que reportan análisis químicos de suelo o de tejido vegetal que permitan conocer los requerimientos nutrimentales del maguey mezcalero (Chagoya-Méndez, 2004), en la mayoría de los casos, la dosis de fertilización está en función del ingreso económico de los productores (Chagoya-Méndez, 2004). La mayoría de los suelos donde se cultiva maguey en Oaxaca, son pobres en materia orgánica, nitrógeno y fósforo disponible (Bautista-Cruz *et al.*, 2007). Una opción para incorporar nutrimentos al cultivo de maguey y promover su crecimiento y producción es la adición de fertilizantes minerales de alta solubilidad (Peña *et al.*, 2002). El empleo de estos productos ofrece algunas ventajas como la rápida disponibilidad de los nutrimentos y la facilidad para adquirirlos y aplicarlos. Pero también ciertas desventajas como la reducida eficiencia de aprovechamiento de los nutrimentos, las pérdidas que de ellos ocurren y que ocasionan contaminación del aire, del suelo y del agua, además de los riesgos potenciales de afectación a la salud humana (Peña *et al.*, 2002). Para reducir o eliminar los riesgos que pueden ocasionar estos tipos de fertilizantes (debido a la contaminación que generan) destaca la utilización de fertilizantes de liberación lenta (FLL) que se caracterizan principalmente por liberar

los nutrimentos de manera paulatina, sincronizada con los requerimientos nutrimentales de la planta, lo cual representa una menor lixiviación de nitratos y volatilización del amonio, contribuyendo así a reducir la emisión de gases ( $N_2O$ ) a la atmósfera (Wang y Alva, 1996). Otro de los factores que está fuertemente relacionado con el crecimiento y desarrollo más rápido de un cultivo, es la aplicación de riegos en diferentes intervalos de tiempo (Nobel *et al.*, 1989). El déficit de humedad en el suelo afecta la división celular, proceso indispensable en el crecimiento de las plantas y el daño ocasionado se relaciona directamente con la intensidad, duración y etapa fenológica del cultivo. Su efecto se manifiesta en la reducción de la transpiración, fotosíntesis y, finalmente, en la producción de biomasa (Chalmers *et al.*, 1985), por lo que el rendimiento y la calidad del fruto se verán afectados (Shock *et al.*, 1998). Los magueyes presentan respuestas anatómicas interesantes al manejar un calendario de riegos, por ejemplo, Ruiz *et al.* (2007) encontraron que en *A. salmiana* al hacer suspensión del riego durante treinta días, se incrementaron significativamente la biomasa de la raíz y la longitud de hojas, posiblemente por entrar en condiciones restrictivas tuvieron que generar mecanismos para poder seguir suministrando agua y nutrimentos de manera más eficiente, sin embargo al hacer una segunda suspensión tres meses después, disminuyó notablemente la tasa de crecimiento. El agua es un disolvente para muchas sustancias como sales inorgánicas, azúcares y aniones orgánicos y constituye un medio en el cual tienen lugar todas las reacciones bioquímicas, también el agua, en su forma líquida, permite la difusión y el flujo masivo de solutos y, por esta razón, es esencial para el transporte y distribución de nutrimentos y metabolitos en toda la planta, lo cual influye de manera directa en el crecimiento y contenido nutrimental. El efecto de la interacción de la tensión de humedad del suelo y la aplicación de fertilizantes ya se ha estudiado en diferentes cultivos, en su mayoría, frutales (melón, limón, plátano, vid) y su resultado en el rendimiento y mejoramiento en la calidad de los frutos en todos los casos ha sido positivo (Orozco-Romero *et al.*, 2006). Sin embargo, para los cultivos de maguey, particularmente, de *A. angustifolia* Haw. hay pocos estudios que revelen como influye la tensión de humedad en el suelo y la aplicación de FLL en el crecimiento y absorción nutrimental de esta especie. El objetivo del trabajo fue evaluar el efecto de la interacción tensión de humedad del suelo y FLL sobre el crecimiento y contenido nutrimental en plantas de maguey mezcalero.

## 4.2 MATERIALES Y METODOS

El estudio se desarrolló en el campo experimental del CIIDIR-IPN Oaxaca, situado en el municipio de Santa Cruz Xoxocotlán, Oaxaca (México) a 17° 03' y 16° 58' de latitud norte y 96° 43' y 96° 48' de longitud oeste, a una altura promedio de 1550 m (INEGI, 1998). Las plantas de *A. angustifolia* se obtuvieron de una plantación de 6 años de edad, ubicada en la comunidad de Reyes Mantecón, municipio de San Bartolo Coyotepec, Oaxaca. Se seleccionaron plantas provenientes de hijuelos rizomatosos que presentaban características similares en edad, con una altura que oscilo entre 20 y 25 cm, libres de plagas y enfermedades. A las plantas se les elimino la raíz con tijeras de podar con la finalidad de generar raíces más vigorosas para favorecer el desarrollo en campo al momento del trasplante, así mismo se desinfectaron mediante su inmersión durante cinco minutos en una solución de hipoclorito de sodio al 0.624% (Pacheco, 2007).

Las plantas de maguey se colocaron verticalmente con la base de su tallo sobre arena húmeda (previamente solarizada durante tres semanas) durante un periodo de una semana para formación de callo. Posteriormente se plantaron en arena húmeda (solarizada) por dos semanas para la brotación de primordios radicales, se regaron ligeramente cada tercer día (Arredondo y Espinosa, 2005).

Antes del establecimiento de las plantas en campo se determinaron algunas propiedades físicas y químicas del suelo donde se realizo la plantación (Cuadro 1). La metodología que se utilizo fue la sugerida por la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 (Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales, 2002). Los parámetros evaluados fueron: densidad aparente (método del cilindro), capacidad de retención de humedad (gravimetría, columnas de percolación), textura (Bouyoucos), materia orgánica (Walkley y Black), pH (potenciométrico, relación suelo:agua, 1:2), conductividad eléctrica (conductimetría), nitrógeno total (MicroKjeldahl), fósforo disponible (Olsen), potasio, calcio y magnesio intercambiables (extraídos con acetato de amonio 1N pH 7.0 y cuantificados en un ICP-AES (espectrómetro de emisión atómica de plasma inducido acoplado).

Cuadro 1. Características físicas y químicas del suelo donde se estableció el experimento.

Parámetro	Resultado	Clasificación con base en la NOM- 021
<b>Características físicas</b>		
Textura	92.04%	Arenosa
Arena	1.66%	
Limo	6.30%	
Arcilla		
Capacidad de retención de humedad	7.01%	
Densidad aparente	1.53 g cm <sup>-3</sup>	
<b>Características químicas</b>		
Materia orgánica	0.25%	Muy bajo
Nitrógeno total	0.07%	Bajo
Fósforo extraíble	8 mg kg <sup>-1</sup>	Medio
Potasio intercambiable	60.89 cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	
Calcio intercambiable	1207.01 cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	
Magnesio intercambiable	163.71 cmol <sub>c</sub> kg <sup>-1</sup>	
pH	8.03	Medianamente alcalino
Conductividad eléctrica	0.98 dS m <sup>-1</sup>	Efectos despreciables de salinidad

El trasplante se llevo a cabo el 28 de junio de 2008, la distancia entre plantas fue de 1.5 m y entre hileras de 3 m, esto con la finalidad de lograr un buen desarrollo radical. Tres FLL fueron seleccionados para este experimento 1) Turf Builder® (TB) (27-03-04 NPK), 2) Multigro (6)® (M6) (21-14-10 NPK + 2 MgO), 3) Multigro (3)® (M3) (24-05-13 NPK + 2 MgO) (Cuadro 2). Los fertilizantes se seleccionaron con base en el periodo de liberación de nutrimentos, a la casa comercial (Cuadro 2) y a su disponibilidad en el mercado.

Cuadro 2. Composición química de los fertilizantes de liberación controlada (FLC) utilizados en el experimento.

Nutrimento	*Turf Builder®	**Multigro (6)®	**Multigro(3)®
	(2 meses)***	(6 meses)***	(3 meses)***
Composición (%)			
N (NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> )	15	11	12
N (NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> )	12	10	12
P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> <sup>-</sup> )	03	14	05
K <sup>+</sup> (K <sub>2</sub> O)	04	10	13
Mg <sup>2+</sup>	0	02	02

Casa comercial: \*Haifa Chemicals; \*\*Scotts; \*\*\* Indica el periodo de liberación de nutrientes a una temperatura media de 21°C

Una semana después del trasplante se aplicaron de forma circular 100 g de fertilizante a cada planta (Arredondo *et al.*, 2001). Para la evaluación de las tensiones de humedad en el suelo, se aplicaron riegos directos a cada una de las plantas. Se establecieron tres diferentes niveles de humedad aprovechable del suelo (HA): 80%, 50% y 20%, además del testigo (sin riego). Al momento de establecer el experimento en campo, se formaron cuatro hileras con 40 plantas de maguey cada una, en cada una de las hileras se evaluó uno de los niveles de humedad y su interacción con cada uno de los fertilizantes, incluyendo los testigos. La aplicación de los riegos se inicio 6 meses después de haber establecido el experimento (28 de diciembre de 2008), con la finalidad de evitar la temporada de lluvias (mayo-septiembre) y alterar las tensiones de humedad evaluadas. Para mantener los diferentes niveles de humedad, se hicieron cajetes de 50 cm de diámetro alrededor de cada planta, para retener el agua en el suelo. Para medir los diferentes niveles de humedad se utilizaron tensiómetros, se colocó un tensiómetro dentro del cajete y a un costado de la planta a una distancia de aproximadamente 15 cm en la parte central de cada una de las hileras. Para la calibración de los tensiómetros, el suelo se llevó a saturación, a través del método gravimétrico se obtuvo el porcentaje de humedad diaria del suelo hasta que este porcentaje se mantuvo constante (15 días) (Fig. 2). Diariamente se tomaron muestras de suelo de aproximadamente 120 g, se secaron a 105°C por 24 hrs en una estufa (Termoline Over Series).

Simultáneamente se obtuvieron las lecturas diarias de tensión (kPa) a la que correspondía cada nivel de humedad (Fig. 1). Con los datos de HA y tensión de humedad, a través de una regresión lineal simple se determinaron las tensiones (kPa) a las que correspondían los tres niveles de HA evaluados en este experimento: HA (80%)=7 kPa, HA (50%)=10 kPa, HA (20%)=13 kPa.

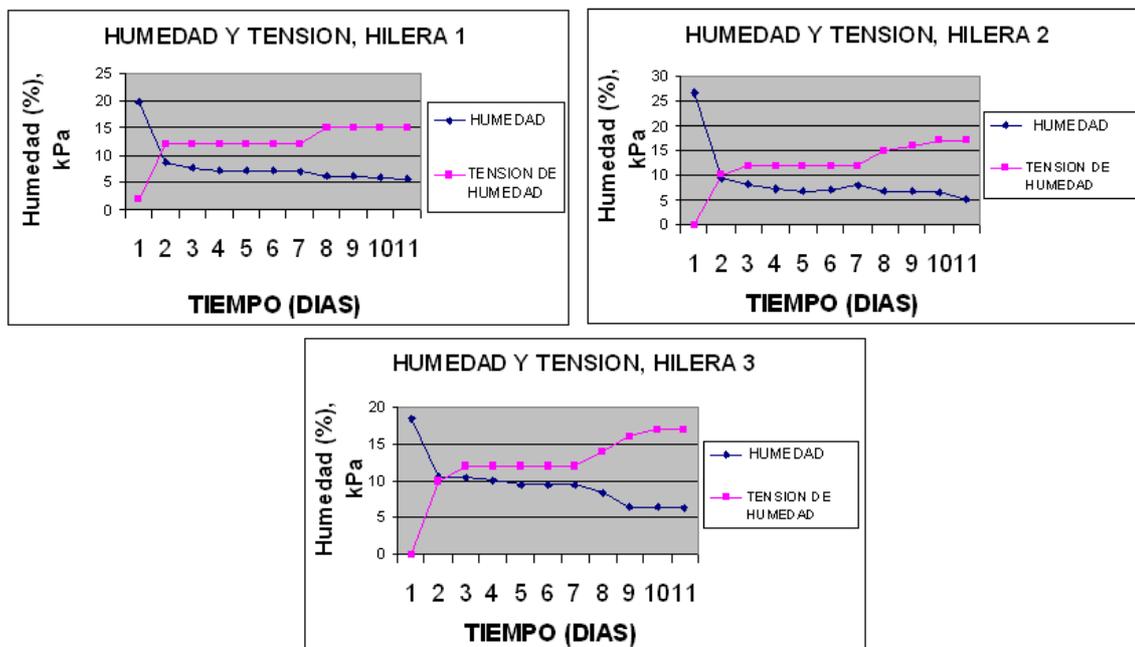


Figura 1. Niveles y tensiones de humedad del suelo donde se estableció el experimento (Hilera 1= 80% de humedad aprovechable; Hilera 2: 50% de humedad aprovechable; Hilera 3: 20% de humedad aprovechable).

Se realizó una curva de secado (Figura 2) para determinar la capacidad de campo (15%), el punto de marchitez permanente (7.5%) y el porcentaje de humedad aprovechable del suelo (7.5%), estos datos fueron necesarios para determinar la cantidad de agua que se aplicó para mantener las diferentes tensiones de humedad del suelo. La cantidad de agua aplicada al suelo para mantener los diferentes niveles de HA evaluados, se calculó a partir de un cilindro de 50 cm de diámetro (medida del cajete), 25 cm de altura (profundidad a la que se presenta el mayor porcentaje de raíces en maguey) y una densidad aparente del suelo de 1.53 g cm<sup>-3</sup> (Cuadro 1).

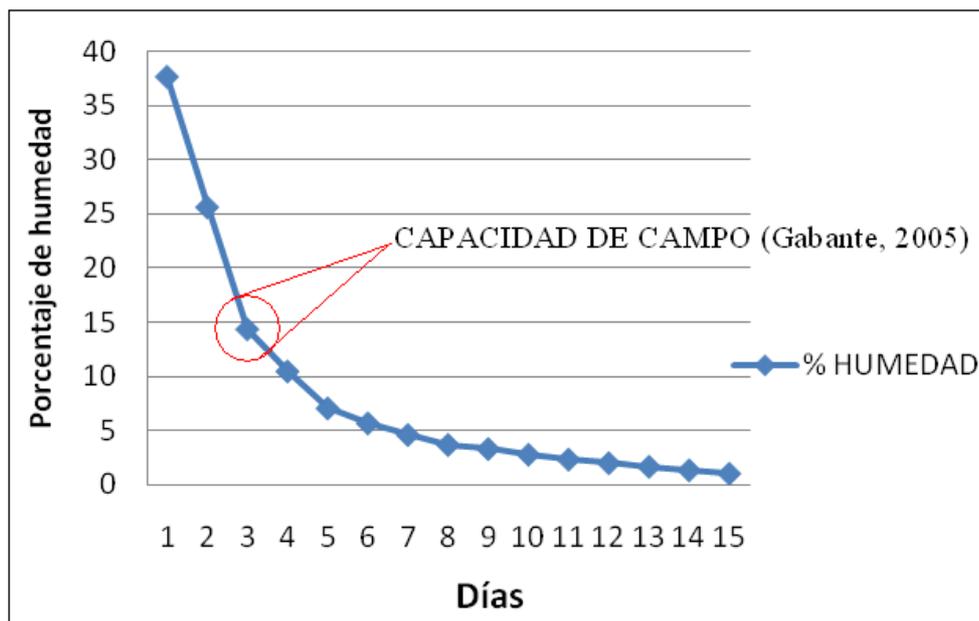


Figura 2. Curva de secado del suelo donde se estableció el experimento

El experimento se estableció bajo un diseño bifactorial (humedad y fertilizantes) con cuatro niveles cada factor, y con arreglo de bloques completamente al azar. En total se formaron 16 tratamientos con 10 repeticiones cada uno. Los tratamientos fueron T1: Sin riego y sin fertilizante, T2: Sin Riego + Turf Builder®, T3: Sin riego + Multigro (6)®, T4: Sin riego + Multigro (3)®, T5: 20%HA y sin fertilizante, T6: 80%HA + Multigro (3)®, T7: 20%HA + Multigro (6)®, T8: 20%HA + Multigro (3)®, T9:50%HA y sin fertilizante, T10: 50%HA + Turf Builder®, T11: 50%HA + Multigro (6)®, T12: 50%HA + Multigro(3)®, T13:80%HA y sin fertilizante, T14: 80%HA + Turf Builder®, T15: 80%HA + Multigro (6)®, T16: 20%HA + Turf Builder®.

#### 4.2.1 Variables de crecimiento y contenido nutrimental

El experimento duro 11 meses, se hicieron evaluaciones bimestrales para las variables altura de planta (AP) (flexómetro) y número de hojas desplegadas (NHD), al final del experimento se midió diámetro de tallo (DT) (vernier digital Mitutoyu modelo CD-12 CP CAP), longitud de raíces (LR) (flexómetro), volumen de raíces (VR) (a través del método volumetrico), grosor de raíces (GR) (vernier digital Mitutoyu modelo CD-12 CP CAP), densidad de raíces (DR), grados Brix (GB) Para medir el contenido de sólidos solubles totales se tomó una muestra de masa vegetal del centro del tallo, la cual se macero para la obtención de una gota de liquido de tallo y finalmente la cuantificación de °Brix se realizo con un refractómetro portátil marca Zeigen modelo ZRP-214), área foliar (AF), peso fresco de hoja (PFH), tallo (PFT) y raíz (PFR) y peso seco de hoja (PSH),

tallo (PST) y raíz (PSR), Para registrar los pesos frescos y secos se utilizó una balanza analítica Sartorius LP 620P, Antes de registrar el peso seco de tallo esto fueron secados en una estufa (Thermolyne Oven Series 9000) a 65 °C hasta peso constante.

El contenido nutrimental se determinó en tres plantas por tratamiento, para ello todas las hojas de cada planta se secaron a 70°C durante tres semanas aproximadamente, posteriormente se molieron en un molino eléctrico, finalmente se tamizaron (malla de 2 micras) y se homogeneizaron a través del método del cuarteo. Los nutrimentos que se determinaron fueron nitrógeno por el método de MicroKjeldahl , fósforo mediante el método de Vanamolibdato , potasio, calcio y magnesio, los cuales se obtuvieron mediante una digestión seca y se cuantificaron por ICP-AES (Alcantar y Sandoval, 1999).

#### **4.2.2 Análisis estadístico**

A los datos de crecimiento y contenido nutrimental se les realizó un análisis de varianza y cuando hubo diferencias significativas entre tratamientos ( $P \leq 0.05$ ) se aplicó la prueba de Tukey. Para el análisis estadístico se utilizó el programa SAS (Statistical Analysis System, Versión 9.0). Para las variables AP, NHD y DT se tomaron datos antes del transplante en campo, los datos obtenidos al final del experimento para estas variables se restaron a los datos obtenidos antes del transplante, de esta manera el análisis estadístico se realizó únicamente con las diferencias obtenidas antes del transplante y al final del experimento, con la finalidad de tener más exactitud en los resultados obtenidos.

### **4.3 RESULTADOS Y DISCUSION**

#### **4.3.1 Efecto de fertilizantes de liberación lenta sobre el crecimiento de maguey mezcalero**

##### **4.3.1.1 Altura de planta**

De los tratamientos que recibieron FLL ninguno presentó diferencias significativas respecto al testigo (sin fertilizante) para la variable altura de planta. Sin embargo, aunque no se presentaron diferencias significativas entre tratamientos, las plantas de maguey respondieron mejor con la aplicación de Multigro (3)<sup>®</sup> y la menor tasa de crecimiento se obtuvo en el testigo (Figura 3). Similarmente, Pacheco (2007) evaluó FLL en maguey mezcalero y no encontró diferencias estadísticas entre tratamientos, aunque reportó que la altura de las plantas fue mayor con respecto al testigo.

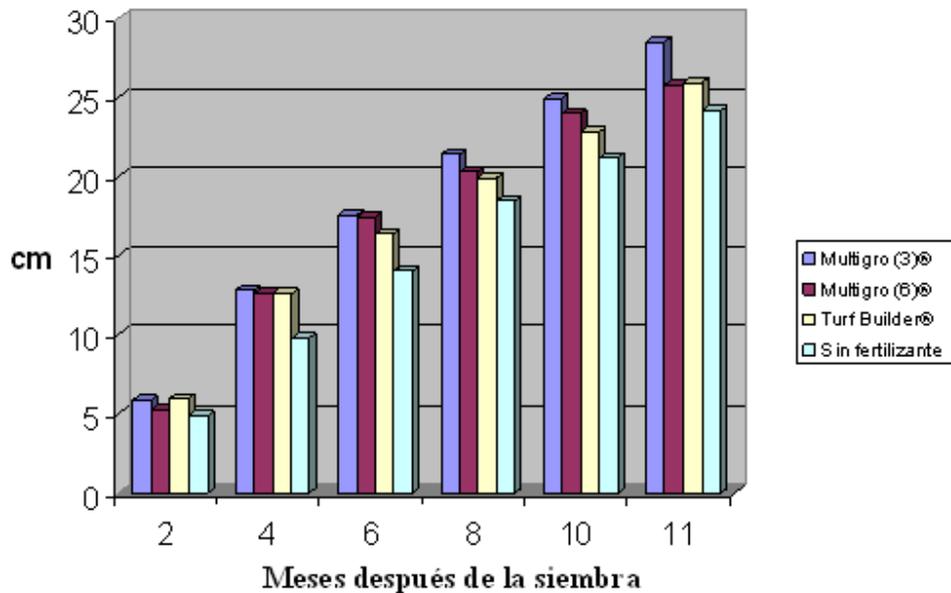


Figura 3. Efecto de fertilizantes de liberación lenta sobre la altura de planta en maguey mezcalero (*Agave angustifolia* Haw.).

#### 4.3.1.2 Número de hojas desplegadas

Para la variable NHD se obtuvieron diferencias significativas entre tratamientos. Al finalizar el experimento el mayor número de hojas desplegadas se obtuvo con el tratamiento donde se utilizó el fertilizante Multigro (3)® (Cuadro 3), el cual fue estadísticamente diferente del testigo y a Multigro (6)® ( $p= 0.0093$ ). El tratamiento con Turf Builder® no fue estadísticamente diferente con los demás tratamientos. Estos resultados difieren de los reportados por Pacheco (2007) quien no encontró diferencias significativas entre tratamientos con la aplicación de FLL para la variable NHD.

Cuadro 3. Número de hojas desplegadas en maguey mezcalero (*Agave angustifolia* Haw) con la aplicación de fertilizantes de liberación lenta.

Tratamiento	Número de hojas desplegadas					
	2 meses	4 meses	6 meses	8 meses	10 meses	11 meses
Multigro (3)®	2.97 a	5.80 a	6.92 a	8.40 a	9.22 a	12.22 a
Multigro (6)®	2.80 a	5.65 a	6.42 ab	7.65 a	8.70 a	10.57 b
Turf Builder®	2.97 a	5.45 a	6.50 ab	8.25 a	8.95 a	10.87 ab
Sin fertilizante	2.40 a	4.47 a	5.70 b	7.25 a	8.30 a	10.37 b

Valores medios seguidos por la misma letra en cada columna, no difieren significativamente (Tukey;  $P \leq 0.05$ ).

Bautista-Sánchez (2009) evaluó dos dosis de nitrógeno (0 y 20 kg ha<sup>-1</sup>) como urea y cuatro dosis de fósforo (0, 20, 40 y 60 kg ha<sup>-1</sup>) como superfosfato triple de calcio sobre el NHD y obtuvo respuestas positivas (18 a 23 hojas/planta con fósforo y nitrógeno respectivamente).

Barrios-Ayala *et al.* (2005) encontraron respuestas positivas en *A. angustifolia* para la variable NHD, 8% más con fertilización mineral a una dosis de: 60-60-60 de N-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>-K<sub>2</sub>O en comparación con el testigo (sin fertilizante). Sin embargo, esta dosis de fertilización no se puede considerar como definitiva debido a que las condiciones edáficas y ambientales son muy contrastantes para todas las zonas productoras de maguey mezcalero en el estado de Oaxaca, debido a que esta especie se localiza en 21 distritos, en un rango altitudinal que va de 50 a 2300 m y crece al menos en 4 tipos de vegetación (García-Mendoza *et al.*, 2004).

#### 4.3.1.3 Diámetro de tallo, área foliar, grados Brix y variables de las raíces (longitud, volumen, grosor y densidad).

Para las variables DT, LR y AF no hubo diferencias significativas entre tratamientos fertilizados pero si con respecto al testigo ( $P \leq 0.05$ ), para las dos primeras variables el mejor tratamiento fue donde se utilizó el fertilizante Multigro (6)® y Multigro (3)® para AF (Cuadro 4). Para la variable DT los resultados obtenidos en este experimento difieren de los encontrados por Pacheco (2007) quien no encontró diferencias estadísticas para la variable DT entre tratamientos donde se utilizaron FLL y el testigo.

Rojas (2006) evaluó fertilizantes nitrogenados y encontró las mayores longitudes radicales de *A. cocui* en sustratos sin fertilización. Estos resultados difieren de los reportados en este estudio, donde los valores más altos para la longitud de raíces se obtuvieron en los tratamientos fertilizados. El trabajo de Rojas (2006) se realizó en contenedores y en vivero, por lo que probablemente las raíces de las plantas de maguey fertilizadas no tuvieron la necesidad de explorar una gran área, ya que los nutrimentos estaban disponibles inmediatamente. En cambio, la presente investigación se llevo a cabo a campo abierto, lo que hace pensar que pudo haber factores externos (competencia con malezas, disponibilidad de humedad, temperatura del suelo) que interfirieran en su buen aprovechamiento. Por otra parte, los resultados obtenidos coinciden con otros estudios donde la utilización de sustratos con arena mas enmiendas orgánicas estimulo el incremento del número y longitud de las raíces de *A. cocui* (Casanova, 2004).

Las variables VR, GB, GR y DR no presentaron diferencias significativas entre tratamientos, sin embargo el tratamiento con el fertilizante Multigro (6)® presentó los valores más altos (Cuadro 4).

Cuadro 4. Respuesta de las variables de crecimiento de plantas de maguey mezcalero (*Agave angustifolia* Haw) a la aplicación de tres fertilizantes de liberación lenta.

Tratamiento	Longitud de raíces (cm)	Volumen de raíces (cm <sup>3</sup> )	Área foliar (cm <sup>2</sup> )	Grosor de raíces (mm)	Diámetro de tallo (mm)	Grados Brix (%)	Densidad de raíces
Multigro (3)®	23.62 ab	38.650 a	305.07 a	3.20 a	26.15 a	12.25 a	0.570 a
Multigro (6)®	24.92 a	41.150 a	304.67 a	3.29 a	27.28 a	12.35 a	0.557 a
Turf Builder®	23.41 ab	27.850 a	269.58 ab	2.92 a	22.91 ab	12.17 a	0.531 a
Sin fertilizante	22.03 b	27.100 a	215.93 b	3.05 a	3.05 a	11.60 a	0.543 a

Valores medios seguidos por la misma letra en cada columna, no difieren significativamente (Tukey;  $P \leq 0.05$ ).

Para la variable AF los tratamientos fertilizados fueron estadísticamente iguales entre si pero diferentes al testigo ( $P= 0.0029$ ) (Cuadro 4). Estos resultados coinciden con los obtenidos por Pacheco (2007), donde los mejores resultados para la variable AF en *A. angustifolia* se obtuvieron con la utilización de FLL.

Los valores obtenidos para la variable GB fueron bajos comparados con los reportados por Pacheco (2007), quizás esto se deba al contenido de humedad, el cual pudo afectar negativamente la

concentración de azúcares o simplemente se deba a la genética misma de las plantas y a las condiciones ambientales de donde se trajo el material vegetativo utilizado en el experimento.

Las variables medidas en las raíces (VR, GR y DR) no presentaron diferencias significativas entre los tratamientos fertilizados y el testigo, a excepción de LR la cual fue estadísticamente diferente en los tratamientos fertilizados con respecto al testigo ( $P= 0.045$ ). Para estas variables de manera general los valores mas altos se presentaron en los tratamientos que se utilizaron los fertilizantes Multigro (3)® y Multigro (6)® (Cuadro 4).

En cuanto a la acumulación de biomasa, para las variables PFH y PFT no hubo diferencias significativas entre los tratamientos fertilizados, sin embargo si hubo diferencias con respecto al testigo ( $P\leq 0.01$ ), los valores mas altos para estas dos variables los presento el tratamiento con Multigro (6)® (Cuadro 5). Para la variable PFR no hubo diferencias estadísticas entre tratamientos, el valor más alto también lo presentó el tratamiento con Multigro (6)® (Cuadro 5). En las variables PSH y PST el tratamiento Multigro (6)® fue estadísticamente diferente al testigo ( $p\leq 0.05$ ). No se encontraron diferencias estadísticas para la variable PSR.

Pacheco (2007) encontró los mejores resultados en el PSH y PST de *A. angustifolia* al combinar FLL con vermicomposta. Los resultados obtenidos en este experimento para la variable PFH, son comparables con los de Rojas (2006) quien determinó que el PFH de *A. cocui* incrementó al aumentar la dosis de fertilización en comparación con el testigo (plantas no fertilizadas). Para la misma variable, los resultados son diferentes a los obtenidos por Marval y Piñero (1979) quienes al evaluar diferentes dosis de fertilización en *A. sisalana* en vivero, no encontraron diferencias significativas.

Cuadro 5. Respuesta en la acumulación de biomasa de maguey mezcalero (*Agave angustifolia* Haw) a la aplicación de tres fertilizantes de liberación controlada.

Tratamiento	Peso fresco de hojas (g)	Peso fresco de tallo (g)	Peso fresco de raíces (g)	Peso seco de hojas (g)	Peso seco de tallo (g)	Peso seco de raíces (g)
Multigro (3)®	597.80 a	350.61 a	52.43 a	110.88 a	90.27 ab	20.01 a
Multigro (6)®	602.51 a	361.57 a	56.66 a	116.34 a	100.19 a	20.84 a
Turf Builder®	520.43 ab	311.75 ab	36.45 a	91.57 ab	85.29 ab	15.18 a
Sin fertilizante	415.25 b	267.36 b	37.72 a	71.49 b	67.73 b	14.91 a

Valores medios seguidos por la misma letra en cada columna, no difieren significativamente (Tukey;  $P \leq 0.05$ ).

Bencomo (2009) evaluó el efecto de diferentes dosis de fertilización en *A. cocui* con fertilizante orgánico Biomar-80 y un fertilizante químico con una concentración (14-14-14 NPK). Este autor encontró los valores más altos para las variables PFR Y PSR en el testigo, el cual fue estadísticamente diferente a los tratamientos donde se aplicó fertilizante. Los resultados encontrados en este trabajo para las variables LR, PFR y PSR difieren de los encontrados por Bencomo (2009) ya que los valores más altos se obtuvieron con los tratamientos donde se utilizaron fertilizantes (Cuadros 4 y 5). Por otra parte, estos resultados coinciden con los encontrados por Massiah (1998) quien al evaluar deficiencias nutrimentales en *Aloe barbadensis* (planta con metabolismo CAM), encontró que la aplicación de soluciones nitrogenadas incrementó el PSR.

Una posible explicación de la mejor respuesta del fertilizante Multigro (3)<sup>®</sup> respecto a los otros dos FLL utilizados, quizás sea debido a la naturaleza de los materiales utilizados para encapsular los nutrientes. De acuerdo con el fabricante el Multigro (3)<sup>®</sup> se libera más rápidamente a una temperatura media de 21°C (Cuadro 2) y está disponible para las plantas en un periodo máximo de tres meses, el cual se puede reducir al aumentar la temperatura del suelo. De esta manera, al liberarse el nutriente un poco más rápido que los otros fertilizantes, es posible que la planta los asimilara en mayor grado, y consecuentemente presentara un mayor crecimiento. El fertilizante Multigro (6)<sup>®</sup> fue el que presentó los mejores resultados para todas las variables que fueron evaluadas al final del experimento (DT, LR, VR, GB, PSH, PST y PSR), quizás al tener un periodo de liberación más prolongado que el Multigro (3)<sup>®</sup> promovió un mayor crecimiento a largo plazo; sin embargo si se hubieran evaluado estas variables al inicio del experimento quizás los mejores resultados se hubiesen tenido con Multigro (3)<sup>®</sup> y Turf Builder<sup>®</sup>, por el periodo de liberación de estos dos fertilizantes (2 y 3 meses respectivamente) (Cuadro 2), lo cual está determinado por el tipo y grosor de la cubierta de cada uno de los fertilizantes.

#### **4.3.2 Efecto de diferentes niveles de humedad aprovechable sobre el crecimiento de maguey mezcalero.**

##### **4.3.2.1 Altura de planta**

La disponibilidad continua de humedad en el suelo favoreció el incremento en AP de maguey mezcalero (Cuadro 6). Todos los tratamientos donde se aplicaron riegos, fueron estadísticamente diferentes al testigo ( $P = <0.0001$ ). La AP se duplicó con el tratamiento a 80% de HA en comparación con el testigo. Los resultados obtenidos en este experimento son similares a los reportados por Otero *et al.* (2000) quienes reportaron que el riego en *A. fourcroydes* en fase de vivero promovió diferencias significativas en la altura final de las plantas, en comparación con el

testigo que no recibió agua. Las plantas que recibieron riego alcanzaron una altura de 45-50 cm después de 12 meses de establecido el experimento, mientras que el testigo alcanzó una altura de 37.7 cm. En trabajos realizados en vivero con sisal (*A. sisalana*), planta similar al henequén, la AP se duplicó con irrigación, los efectos más pronunciados se obtuvieron a los 6 meses de edad (Otero *et al.*, 2000).

Cuadro 6. Respuesta del crecimiento de maguey mezcalero (*Agave angustifolia* Haw.) a la aplicación de tres niveles de humedad aprovechable en el suelo.

Humedad aprovechable (%)	Altura de planta (cm)			
	6 meses	8 meses	10 meses	11 meses
80	19.71 a	24.55 a	27.85 a	30.77 a
50	18.51 a	21.92 a	26.36 a	27.72 a
20	15.92 a	21.55 a	26.27 a	29.13 a
Sin riego	11.27 b	11.99 b	12.38 b	16.75 b

Valores medios seguidos por la misma letra en cada columna, no difieren significativamente (Tukey;  $P \leq 0.05$ ).

#### 4.3.2.2 Número de hojas desplegadas

La disponibilidad continua de humedad en el suelo tuvo un efecto significativo en la generación de hojas en maguey mezcalero, se obtuvieron diferencias estadísticas entre tratamientos con respecto al testigo ( $P = <0.0001$ ). Aunque no se presentaron diferencias significativas entre tratamientos donde se aplicaron riegos, el mejor resultado se obtuvo con el tratamiento de HA al 20% (Cuadro 7), caso contrario a la variable AP donde los valores más altos se presentaron con el 80% de humedad. Los resultados obtenidos coinciden con los reportados por José-Jacinto (1995), quien encontró que en *A. angustifolia* de cuatro y 8 años de edad, el desarrollo de hojas nuevas se relacionó con factores del medio como temperatura, irradiación y precipitación, ya que el desarrollo de un mayor número de hojas se obtuvo en los meses con mayor precipitación y por consecuencia mayor humedad en el suelo; mientras que la producción de hojas decreció en un 100% en los meses con escasa precipitación y bajas temperaturas.

Cuadro 7. Respuesta de la variable número de hojas desplegadas en maguey mezcalero (*Agave angustifolia* Haw.) a la aplicación de tres niveles de humedad aprovechable en el suelo.

Humedad aprovechable (%)	Número de hojas desplegadas			
	6 meses	8 meses	10 meses	11 meses
80	7.27 a	8.77 a	10.22 a	12.87 a
50	6.37 a	8.57 a	10.00 a	11.60 a
20	6.90 a	9.17 a	10.67 a	13.10 a
Sin riego	5.00 b	5.02 b	4.27 b	6.47 b

Valores medios seguidos por la misma letra en cada columna, no difieren significativamente (Tukey;  $P \leq 0.05$ ).

#### 4.3.2.3 Diámetro de tallo, área foliar, grados Brix y variables de las raíces (, volumen, grosor y densidad)

Para las variables DT, LR, AF y GB no se encontraron diferencias significativas entre los tratamientos que recibieron riegos, sin embargo, estos tratamientos fueron estadísticamente diferentes al testigo para las variables mencionadas ( $P < .0001$ ) (Cuadro 8). La variable VR tuvo el valor más alto en el tratamiento con 80% de HA y fue estadísticamente diferente al tratamiento con 20% de HA y al testigo ( $P = < .0001$ ) (Cuadro 8). La variable GR tuvo el valor más alto con 80% de HA y fue estadísticamente diferente al tratamiento con 50% de HA y al testigo ( $P = < 0.0001$ ). Para la variable DR el valor más alto lo presentó el testigo, siendo estadísticamente diferente al tratamiento con 50% de HA ( $P = < 0.0001$ ).

Los valores más altos para LR, VR, GR y DR encontraron con un 80% de HA; Sin embargo para la variable DR el mejor tratamiento fue el testigo, tal vez, porque al tener condiciones más limitantes de humedad en el suelo, las plantas tienen que generar raíces mucho más delgadas y cortas pero en mayor cantidad para poder extraer más eficientemente el agua retenida en el suelo. Las raíces reconocen cambios pequeños de humedad en el suelo, los que activan una serie de señales que son transportadas a través del sistema vascular y por algún mecanismo, aún desconocido, regulan el crecimiento e intercambio de gases del vástago mucho antes de que el contenido de agua de sus tejidos se vea afectado (Davies y Zhang, 1991). Sánchez-Urdaeta (2004) encontró que la raíz de plántulas de *A. salmiana* tolera el déficit de humedad drástico y que su crecimiento continúa como resultado del control de sus procesos fisiológicos y bioquímicos independientemente del estrés.

Cuadro 8. Respuesta de las variables de crecimiento de plantas de maguey mezcalero (*Agave angustifolia* Haw.) a la aplicación de tres niveles de humedad aprovechable en el suelo.

Humedad aprovechable (%)	Diámetro de tallo (mm)	Longitud de raíces (cm)	Volumen de raíces (cm <sup>3</sup> )	Grosor de raíces (mm)	Densidad de raíces	Área foliar (cm <sup>2</sup> )	Grados Brix (%)
80	31.32 a	25.10 a	48.62 a	3.57 a	0.537 ab	313.36 a	12.25 a
50	29.73 a	25.34 a	45.37ab	3.16 b	0.504 b	312.87 a	12.97 a
20	26.85 a	25.95 a	32.22 b	3.54 ab	0.551 ab	333.81 a	12.27 a
Sin riego	7.45 b	17.59 b	8.52 c	2.19 c	0.609 a	135.19 b	10.87 b

Valores medios seguidos por la misma letra en cada columna, no difieren significativamente (Tukey;  $P \leq 0.05$ ).

Para la variable AF, los tratamientos con riego fueron estadísticamente iguales entre si pero diferentes al testigo ( $P = <0.0001$ ) (Cuadro 8). En cuanto a la disponibilidad continua de humedad en el suelo, las variables PSH y PST presentaron diferencias significativas respecto al testigo ( $P = <0.0001$ ) (Cuadro 9). En el Cuadro 5, se observa que los tratamientos en los que se aplicaron FLL no fueron estadísticamente diferentes al testigo para la variable PSR, sin embargo, con los riegos si se obtuvieron diferencias significativas para esta variable ( $P = <0.0001$ ), el tratamiento con 80% de HA fue el que presento los mejores resultados y fue estadísticamente diferente al testigo y al tratamiento con 20% de HA. Para las variables PSH, PST Y PSR el mejor tratamiento también fue al 80% de HA, siendo este tratamiento estadísticamente diferente al testigo y al tratamiento con 20% de HA (Cuadro 9).

Cuadro 9. Respuesta en la acumulación de biomasa de maguey mezcalero (*Agave angustifolia* Haw.) a la aplicación de tres niveles de humedad aprovechable en el suelo.

Humedad aprovechable (%)	Peso fresco de hojas (g)	Peso fresco de tallo (g)	Peso fresco de raíces (g)	Peso seco de hojas (g)	Peso seco de tallo (g)	Peso seco de raíces (g)
80	639.66 a	415.02 a	74.63 a	138.54 a	128.24 a	25.45 a
50	591.83 a	351.85 a	58.57 ab	120.51 ab	95.71 b	22.62 ab
20	665.49 a	355.44 a	38.52 b	100.10 b	84.04 b	17.39 b
Sin riego	239.01 b	168.97 b	11.52 c	31.12 c	35.50 c	5.49 c

Valores medios seguidos por la misma letra en cada columna, no difieren significativamente (Tukey;  $P \leq 0.05$ ).

Para la variable PSH los resultados coinciden con los reportados por Nobel *et al.* (1989) quienes probaron en *A. lechuguilla* la aplicación de riego semanal, riego mensual y sin riego. Los resultados obtenidos para PSH fueron muy superiores al aplicar riegos semanales en comparación con la aplicación de riegos mensuales y sin riego.

Para las variables PFH y PFT los tratamientos con riego fueron estadísticamente diferentes al testigo ( $P = <0.0001$ ). En la variable PFR el mejor resultado se obtuvo con 80% de HA, este tratamiento fue estadísticamente diferente a los tratamientos con 20% de HA y al testigo ( $P = <0.0001$ )

#### **4.3.3 Interacción de fertilizantes de liberación controlada y niveles de humedad**

En el Cuadro 10 se muestran las variables donde la interacción FLL y tensión de humedad del suelo presentaron diferencias significativas entre tratamientos. Todas las variables analizadas donde no se aplicó riego presentaron los valores más bajos, independientemente de que se hayan o no fertilizado. Las variables que respondieron significativamente al efecto de la interacción FLL y niveles de humedad aprovechable en el suelo fueron NHD (a los 2 y 11 meses) ( $P \leq 0.05$ ), DT ( $P = 0.004$ ), GB ( $P = 0.003$ ) y PFH ( $P = 0.04$ ). Dos de las variables que representan mayor importancia en este cultivo son el tamaño de la piña (DT) y los GB los cuales se manifiestan en rendimiento y calidad del producto obtenido.

Para la variable NHD a los 2 y 11 meses los mejores tratamientos fueron las interacciones al 80% de HA con M3 y 80% de HA con M6. Para la variable GB, los mejores tratamientos fueron las interacciones al 50% de HA con TB y M3. Para las variables DT y PFH la interacción con mejores resultados fue al 80% de HA con M6 (Cuadro 10). Los resultados obtenidos en este experimento con *A. angustifolia* reafirman el alto potencial que puede tener la combinación de FLL y un buen contenido de humedad en el suelo sobre el crecimiento de los cultivos.

Cuadro 10. Respuesta de las variables de crecimiento a la interacción humedad y fertilizante en maguey mezcalero (*Agave angustifolia* Haw.).

Tratamiento	Número de hojas		Grados Brix (%)	Diámetro de tallo (mm)	Peso fresco de hojas (g)
	2 meses	11 meses			
SR y SF	<b>1.70 b</b>	<b>6.30 d</b>	11.40 ab	<b>8.26 de</b>	<b>221.4 e</b>
SR + TB	<b>2.00 b</b>	<b>6.20 d</b>	11.00 ab	<b>7.74 de</b>	<b>265.3 de</b>
SR + M6	<b>1.50 b</b>	<b>5.60 d</b>	<b>10.40 b</b>	<b>4.68 e</b>	<b>169.3 e</b>
SR + M3	2.40 ab	<b>7.80 cd</b>	10.70 ab	<b>9.11 de</b>	300.2 cde
20 y SF	3.30 ab	11.80 abc	12.80 ab	21.76 bcde	463.3 abcde
20 + TB	2.80 ab	<b>15.10 a</b>	<b>10.60 b</b>	25.61 abcd	687.2 abc
20 + M6	1.60 b	11.60 abc	13.50 ab	25.02 abcd	694.4 abc
20 + M3	2.60 ab	13.90 ab	12.20 ab	35.00 abc	817.1 a
50 y SF	<b>1.90 b</b>	11.20 abc	10.80 ab	17.00 cde	404.4 bcde
50 + TB	3.80 ab	11.60 abc	<b>14.00 a</b>	29.25 abc	491.5 abcde
50 + M6	3.50 ab	11.50 abc	13.10 ab	37.81 ab	725.2 ab
50 + M3	3.60 ab	12.10 ab	<b>14.00 a</b>	34.86 abc	746.4 ab
80 y SF	2.70 ab	12.20 ab	11.40 ab	28.98 abc	572.1 abcde
80 + TB	3.30 ab	10.60 bc	13.10 ab	29.04 abc	637.8 abcd
80 + M6	<b>4.60 a</b>	13.60 ab	12.40 ab	<b>41.63 a</b>	<b>821.2 a</b>
80 + M3	3.30 ab	<b>15.10 a</b>	12.10 ab	25.61 abcd	527.6 abcde

20= 20% HA; 50= 50% HA; 80= 80% HA; SR= sin riego; SF= sin fertilizante; TB= Turf Builder®; M6= Multigro (6)®; M3= Multigro (3) ®. Valores medios seguidos por la misma letra en cada columna, no difieren significativamente (Tukey;  $P \leq 0.05$ ).).

Enríquez del Valle *et al.* (2007) evaluaron la AP, NHD, VR y acumulación de materia seca en el tallo de plantas de *A. angustifolia* Haw. obtenidas a través de propagación *in Vitro*, plantadas en contenedores con composta bajo un sistema de fertiriego con agua sola y con una solución Stainer al 50 y 100% de concentración de nutrientes. Los autores encontraron los mejores resultados con composta, obtuvieron 9.5%, 8.8%, 32.1% y 20.4% mas para las variables NHD, DT, VR y materia seca en tallo respectivamente con respecto al testigo. Las plantas sembradas en composta y con

fertirriego tuvieron 37.8 g mas en cuanto a acumulación de biomasa, 40.4 cm en longitud del tallo y 4.7 cm en diámetro de tallo.

Los valores más altos de GB se obtuvieron con un 50% de HA combinado con M3 y TB, los cuales fueron superiores al testigo y a los tratamientos donde no hubo fertilización (Cuadro 10). Pacheco (2007) encontró que plantas de *A. angustifolia* responden positivamente a la aplicación de vermicomposta, los tratamientos que recibieron vermicomposta presentaron valores mas altos y fueron estadísticamente superiores a los tratamientos donde se aplicaron FLL. Al comparar los resultados obtenidos para la variable GB en este trabajo con los obtenidos por Pacheco (2007), encontramos que esta autora encontró valores mucho mayores para °Brix (26% y 24% con vermicomposta y FLL respectivamente) en el material vegetativo que ella evaluó, quizás esto podría ser debido al contenido nutrimental aportado por los FLL ya que Mussett y Díaz (2000) mencionan que cuando existe buena disponibilidad de N se favorece el incremento de la concentración de azúcares en las plantas de *A. angustifolia*.

En cuanto a la variable NHD para el tratamiento con 80% de HA y M3 se presentaron valores que duplicaron a todos los resultados obtenidos en los tratamientos sin riego independientemente de que se hayan o no fertilizado.

La buena respuesta que tiene esta especie a la aplicación simultanea de riego y fertilización es evidente, tal vez podría parecer poco factible utilizar algún sistema de riego debido a la escasez de agua en las zonas donde se cultiva maguey mezcalero, sin embargo, existen algunos métodos eficientes para ahorrar el gasto de agua como lo es el fertirriego, el cual puede ser una opción bastante factible para acelerar el crecimiento de esta especie, reducir el tiempo a la cosecha e incrementar rendimientos y calidad del producto. Actualmente, en algunas zonas de producción (Altos de Jalisco) y en el estado de Tamaulipas ya se está utilizando el fertirriego con el fin de hacer una producción más forzada y más rápida en el desarrollo de *A. tequilana* Weber (Gioanetto), por otra parte ya existen insumos comerciales orgánicos, certificados, para llevar a cabo un manejo de fertilización adecuado (Zuñiga, 2006). Algunos otros estados que están implementando el sistema de producción con fertirriego en *A. tequilana* son Zacatecas y San Luis Potosí.

El factor que más influyó en la mayoría de las variables evaluadas fue el contenido de humedad del suelo. La humedad interactúa con la temperatura del suelo (factor no medido en este experimento), al tener un buen contenido de humedad (50 a 100%) y una temperatura superior a 21°C se incrementa la temperatura del vapor de agua en el suelo, el cual es el principal agente destructor de las cubiertas envolventes de los FLL (Kotchba *et al.*, 1990). Con un porcentaje menor a 25% de

humedad aprovechable en el suelo, la disponibilidad de los nutrientes de los FLL disminuye considerablemente, incluso se puede llegar a inhibir en un suelo completamente seco (Kotchba *et al.*, 1990). En este estudio, el suelo donde se estableció el experimento tuvo una capacidad de retención de humedad de 7% (Cuadro 1), el cual es un valor relativamente bajo, principalmente debido a la textura del suelo, la cual es completamente arenosa (Cuadro 1). Con base en estas características del suelo evaluado y a los resultados encontrados por Kotchba *et al.* (1990) sobre el efecto de la humedad del suelo en la liberación de nutrientes de los FLL, podemos suponer que en los tratamientos con menor porcentaje de humedad aprovechable del suelo (testigo y 20% de HA) hubo menor liberación y absorción de nutrientes, de ahí que estos tratamientos presentaran los valores más bajos en el crecimiento, caso contrario en donde interaccionaron los riegos y los fertilizantes (Cuadro 10).

#### 4.3.4 Contenido nutrimental en hojas

La concentración de K y Ca en las hojas de *A. angustifolia* Haw. no fue estadísticamente diferente entre tratamientos, sin embargo la concentración de Mg fue mayor con el fertilizante Multigro (6)®, el cual fue estadísticamente diferente al Turf Builder® ( $P= 0.01$ ) (Cuadro 11).

Cuadro 11. Efecto de diferentes fertilizantes de liberación controlada en el contenido nutrimental en hojas de maguey mezcalero (*Agave angustifolia* Haw.).

Tratamiento	Concentración (mg kg <sup>-1</sup> )				
	N	P	K	Ca	Mg
Multigro (3)®	65311 b	1941.24 b	15983 a	35901 a	7126.5 ab
Multigro (6)®	88491 a	2079.98 a	16379 a	36297 a	7467.8 a
Turf Builder®	84141 ab	1884.73 b	18421 a	33405 a	6341.8 b
Sin fertilizante	79082 ab	1934.96 b	18967 a	35231 a	6978.9 ab

Valores medios seguidos por la misma letra en cada columna, no difieren significativamente (Tukey;  $P \leq 0.05$ ).

El Multigro (3)® presentó los valores más altos después de Multigro (6)® en cuanto al contenido de Mg, quizás esto influyó para que con este fertilizante se obtuvieran los valores más altos para la variable AP y NHD (Fig. 3, Cuadro 3).

Para el caso del N la mayor concentración se obtuvo en el tratamiento con Multigro (6)®, el cual fue estadísticamente diferente al tratamiento con Multigro (3)® ( $P= 0.02$ ). Al comparar los resultados obtenidos con los reportados por Nobel (1994) y José (1995) en cuanto al contenido de N en hojas de maguey, los resultados obtenidos en este experimento son mucho mayores en algunos casos 8 o 9 veces mas, probablemente debido a la elevada eficiencia en el aprovechamiento de los FLL por parte de las plantas.

Los valores encontrados para N son superiores a los reportados por Hernández (2003), este autor encontró que cuando las plantas de *A. angustifolia* fueron fertilizadas con composta la concentración de N fue de 1.78% en promedio.

Nobel (1988) reportó que cuando se aplica N a *A. deserti*, el número de hojas desarrolladas es el doble en comparación con las plantas a las que no se les había aplicado dicho nutrimento para un año de estudio; también mencionó que en plantas de *A. fourcroydes*, *A. lechugilla* y *A. sisalana* se obtienen resultados similares. Valenzuela (1992) en un trabajo de fertilización con N, P y K; así como la relación en la forma de aplicación (a través del suelo o encima de la planta), encontró diferencias en cuanto al número de hojas producidas para *A. tequilana* de 28 hojas en promedio para la fertilización en suelo y 24 hojas para la fertilización directa a la planta. Es un hecho que se debe seguir insistiendo en este tipo de investigaciones en plantas del género *Agave* de manera particular en aquellas de importancia económica, para llegar a un conocimiento concreto de los factores que están influyendo en su fisiología y por ende en su productividad.

En estudios de fertilidad y nutrición de agaves se ha dado mayor énfasis al N, debido a que este es el elemento que absorben en mayor cantidad, y además es el que tiene mayor influencia en el crecimiento de estas plantas (Nobel, 1988).

Para el caso del fósforo el mejor tratamiento también fue donde se aplicó el fertilizante Multigro (6)®, el cual fue estadísticamente diferente con el resto de los tratamientos ( $P= 0.0002$ ).

La aplicación de diferentes niveles de humedad en el suelo no tuvo efectos significativos en cuanto a la concentración de K, sin embargo el tratamiento al 50% de HA presentó el valor más alto y el testigo fue el que presentó el valor más bajo.

El testigo presentó la concentración más alta de Ca y Mg, el tratamiento con 50% de HA también tuvo una concentración alta de Ca. En cambio, el tratamiento con 80% de HA mostró la concentración más baja de Ca y Mg, este tratamiento fue estadísticamente diferente del resto de los tratamientos ( $P \leq 0.0001$ ) (cuadro 12).

Cuadro 12. Efecto de diferentes niveles de humedad aprovechable del suelo en el contenido nutrimental en hojas de maguey mezcalero (*Agave angustifolia* Haw).

Humedad aprovechable (%)	Concentración (mg kg <sup>-1</sup> )				
	N	P	K	Ca	Mg
80	87265 a	2165.16 a	16863 a	28678 b	5174.8 b
50	82518 ab	1807.72 c	19350 a	37515 a	7745.4 a
20	84766 a	1895.20 bc	17500 a	35483 a	7342.6 a
Sin riego	62475 b	1972.84 b	16038 a	39157 a	7652.3 a

Valores medios seguidos por la misma letra en cada columna, no difieren significativamente (Tukey;  $P \leq 0.05$ ).

El efecto de la interacción humedad y fertilizante fue estadísticamente significativo para la concentración de N ( $P= 0.0038$ ), P ( $P= <0.0001$ ), Ca ( $P= 0.0409$ ) y Mg ( $P= 0.0053$ ). Los tratamientos fertilizados con un 80% de HA fueron los que presentaron los contenidos más altos de Mg y Ca, la concentración de este último se duplicó en comparación con el testigo (Cuadro 13). Probablemente un buen contenido de humedad en el suelo favoreció una mayor absorción de nutrientes, en este caso tanto de Mg como de Ca (Righetti *et al.*, 1990)..

El tratamiento con 80% de HA presentó la concentración más alta de P y N. Este tratamiento fue estadísticamente diferente al testigo ( $P=\leq 0.0001$ ).

Los resultados en cuanto a la concentración de P coinciden con los reportados por Nobel (1994) (2100 ppm), en los tratamientos donde no se aplicó riego, contrariamente en tratamientos donde se aplicaron riegos (80 y 50% de HA) se obtuvieron valores para la concentración de P muy por debajo del promedio reportado por Nobel (1994).

Cuadro 13. Respuesta de la concentración nutrimental a la interacción humedad y fertilizante en hojas de maguey mezcalero (*Agave angustifolia* Haw).

Tratamiento	Concentración (mg kg <sup>-1</sup> )			
	N	P	Ca	Mg
SR y SF	85751 a ± 5607.7	<b>2399.13 a</b> ± 11.8	<b>30435 bcd</b> ± 5744.4	<b>5287.3 cd</b> ± 1331.5
SR + TB	<b>101949 a ± 13549</b>	2126.23 abc ± 57.0	<b>30907 bcd</b> ± 3279.3	<b>5427.0 bcd</b> ± 303.0
SR + M6	98248 a ± 18047.6	2067.64 bcd ± 92.6	<b>28886 cd</b> ± 10081.1	<b>5529.2 bcd</b> ± 2236.7
SR + M3	63112 ab ± 4557.4	2067.64 bcd ± 43.0	<b>24486 d</b> ± 2946.8	<b>4455.8 d ± 533.4</b>
20 y SF	75032 a ± 2254.01	1687.59 e ± 52.2	37423 abc ± 3129.7	<b>8124.0 a</b> ± 46.9
20 + TB	79695 a ± 4882.2	<b>1888.50 cde</b> ± 145.7	35128 abcd ± 2502.8	7534.1 abc ± 987.1
20 + M6	81858 a ± 5291.0	1822.37 de ± 90.6	40317 abc ± 4089.7	7819.5 ab ± 396.5
20 + M3	93490 a ± 2706.7	1832.41 cde ± 29.9	37192 abc ± 917.2	7504.1 abc ± 7.0
50 y SF	90846 a ± 8569.8	<b>1670.02 e</b> ± 6.6	34065 abcd ± 1177.1	6583.4 abcd ± 396.2
50 + TB	86184 a ± 8462.8	<b>2067.64 bcd</b> ± 90.6	36337 abcd ± 3158.2	<b>8106.0 a</b> ± 487.2
50 + M6	75561 a ± 4385.6	1911.10 cde ± 89.2	33969 abcd ± 1631.2	7064.5 abc ± 896.9
50 + M3	86472 a ± 4752.7	1932.03 cde ± 83.3	37563 abc ± 3493.6	7616.7 abc ± 442.6
80 y SF	84934 a ± 5809.3	1782.19 de ± 183.4	<b>31696 abcd</b> ± 2244.0	5372.7 bcd ± 274.2
80 + TB	86135 a ± 8669.2	<b>2237.57 ab</b> ± 76.2	<b>42814 a</b> ± 3480.1	<b>8804.2 a</b> ± 688.2
80 + M6	<b>14966 b</b> ± 709.3	1963.84 bcde ± 189.4	<b>40432 abc</b> ± 3975.0	<b>8092.9 a</b> ± 709.3
80 + M3	73254 a ± 8855.9	1907.75 cde ± 88.2	<b>41685 ab</b> ± 311.1	<b>8339.1 a</b> ± 256.4

20= 20% HA; 50= 50% HA; 80= 80% HA; SR= sin riego; SF= sin fertilizante;TB= Turf Builder®; M6= Multigro (6)®; M3= Multigro (3) ®.Valores medios seguidos por la misma letra en cada columna, no difieren significativamente (Tukey;  $P \leq 0.05$ ). ). Los datos se presentan como promedio ± desviación estándar (n=3).

El N es un nutrimento esencial para las plantas CAM, dado que aumenta la síntesis de ácidos orgánicos (Nobel, 1983). Los trabajos de Nobel (1988) y Valenzuela (1992) mostraron que los niveles de N, P y K tienen influencia en el desarrollo de las plantas de agave. Nobel (1994) refirió que las cantidades óptimas de nutrimentos para el mejor desarrollo y crecimiento de los magueyes en suelos arenosos es de 3 g de N, 0.06 de P y 0.25 de K por kg suelo seco y que el promedio de

nutrimentos en hojas de agave es de 1.2% para N, 2100 ppm para P, 1.8% para K y 43 ppm para Na. Los aspectos de tipo nutricional en plantas CAM aun no se encuentran bien esclarecidos.

La concentración más baja de N se obtuvo en el tratamiento con 80% de HA Y Multigro (6)®, Este Tratamiento fue estadísticamente diferente de los demás ( $P=0.0038$ ). Los testigos sin riego tuvieron los contenidos mas altos de N (Cuadro 13), el resto de los tratamientos no presentaron diferencias significativas entre si.

No se obtuvo un efecto significativo de la interacción HA y FLL sobre el contenido de K. Sin embargo los valores encontrados concuerdan con los reportados por Nobel (1994) (1.8%). El contenido mas alto de K se obtuvo con el tratamiento al 50% de HA.

#### **4.4 CONCLUSIONES**

Las plantas de maguey mezcalero (*Agave angustifolia* Haw.) tuvieron una respuesta positiva a la aplicación de fertilizantes de liberación controlada.

De los tres fertilizantes de liberación controlada evaluados, el Multigro (3)® y el Multigro (6)® fueron los que mejor promovieron el crecimiento de las plantas de maguey mezcalero.

Las plantas de maguey mezcalero tuvieron una respuesta positiva a la aplicación de diferentes niveles de humedad en el suelo. Los tratamientos con 80 % de humedad aprovechable fueron los que de manera general presentaron los mejores resultados para la mayoría de las variables evaluadas (altura de planta, diámetro de tallo, volumen de raíces, grosor de raíces, peso fresco de tallo, peso fresco de raíces, peso seco de hojas, peso seco de tallo, peso seco de raíces).

Con el tratamiento al 20% de humedad aprovechable se obtuvieron los valores mas altos para las variables número de hojas desplegadas, área foliar, peso fresco de hojas y longitud de raíces.

La interacción del contenido de humedad en el suelo y la aplicación de fertilizantes de liberación lenta tuvo un efecto positivo en el crecimiento de maguey. El tratamiento al 80% de humedad aprovechable combinado con Multigro (6)® y Multigro (3)® fueron los que mostraron los mejores resultados para las variables evaluadas. Los tratamientos con 80% de HA y fertilizados presentaron las concentraciones mas altas de Ca y Mg en hojas de maguey.

Los tratamientos sin riego y fertilizados presentaron las concentraciones mas altas de N y P en hojas de maguey. El K no presento significancia a la interacción humedad y FL

#### 4.6 LITERATURA CITADA

Alcantar, G. G. y Sandoval, V. M. 1999. Manual de análisis químico de tejido vegetal, guía de muestreo, preparación, análisis e interpretación. Instituto de recursos naturales. Colegio de Postgraduados, Montecillo, Estado de México.

Arceta, E. G. I. 1997. Caracterización fisiológica de una población silvestre de pitayo (*Stenocereus queretaroensis* (Weber) Buxbaum) asociada con micorrizas vesículo arbuscular. Bachelor's Thesis. Universidad de Guadalajara, México.

Arredondo, V.C., Contrera, I.R., Canseco, L.A. 2001. Evaluación de la respuesta del maguey mezcalero (*Agave angustifolia* Haw) a la fertilización en plantaciones comerciales. VI Foro estatal de Investigación Científica y Tecnológica. pp.105-107.

Arredondo, V. C. y Espinoza, H. 2005. Manual del magueyero. Consejo Oaxaqueño del maguey y mezcal, A.C. p.142.

Barrios-Ayala A., R., Ariza-Flores, J. M., Molina-Muñoz y R. Cruzaley-Sarabia. 2005. Efecto de diversos ambientes de fertilización en maguey mezcalero, sobre su crecimiento y síntesis de azúcares reductores. Memorias del V Congreso del Noroeste, I Nacional en ciencias alimentarias y biotecnología. Centro de las Artes de la Universidad de Sonora. Hermosillo, Sonora. México.

Bautista-Cruz, A., Carrillo-González, R., Arnaud-Viñas, M.R., Robles, C., De León-González, F. 2007. Soil fertility properties on *Agave angustifolia* Haw. plantations. Soil and Tillage Research 96, 342-349.

Bautista-Sánchez, G. 2009. Fertilización fosfatada y nitrogenada de *Agave potatorum* Zucc. UTM. Boletín técnico. Instituto de hidrología.

Bencomo-Fernández, W.C. 2009. Evaluación de la propagación sexual y asexual de cocui (*Agave cocui* Trelease) y su manejo en fase de vivero. Tesis para obtener el título de Ingeniero Agrónomo. Universidad Centroccidental Lisandro Alvarado. Decanato de agronomía, Cabudare. Venezuela.

Bett –Garber, K.L.; Lamikanra, O.; Lester, G.O.; Ingram, D. And Watson, M. 2005. Influence of soil type and storage conditions on sensory qualities of fresh-cut cantaloupe (*Cucumis melo* L.). Journal of the Science of Food and Agriculture. 85: 825-830.

Bustos, F., González, M., Donoso, P., Gerding, V., Donoso, C., Escobar, B. 2008. Efectos de distintas dosis de fertilizante de liberación controlada (Osmocote®) en el desarrollo de plantas de coigüe, raulí y ulmo. *Bosque* 29 (2), 155-161.

Casanova, R. 2004. Efecto del peso de los hijos apomícticos y el sustrato bajo dos ambientes de la luminosidad en la propagación asexual de *Agave cocui* Trelease. Trabajo de grado para obtener el título de Ingeniero Agrónomo. UCLA. Barquisimeto. Venezuela.

Castro B., C. 2007. Manual para la producción y paquete tecnológico para agave. Secretaria de Desarrollo Rural del estado de Puebla. Puebla, México.

Chagoya, M. V. 2004. Diagnostico de la cadena productiva del sistema producto maguey-mezcal. SAGARPA. SEDAF. COMMAC. 206 p.

Chalmers, D.J., P.D. Mitchel y P.H. Jerie. 1985. The relation between irrigation, growth and productivity of peach. *Acta Horticulturae* 173: 283-288.

CONAFOR. 2003. *Agave angustifolia* Haw. Paquetes tecnológicos.

Davies WJ, Zhang J. (1991). Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soil. *Ann. Rev. Plant Physiol. Mol. Biol.* 42: 55-76.

Engels, C. y H. Marschner, 1995. Plant uptake and utilization of nitrogen. In: P.E. Bacon (ed.). Nitrogen fertilization in the environment. Marcel Dekker, New York. P. 41-82.

Enríquez-del Valle, J.R., Velasco, V.A., Campos A., G.V., Hernández-Gallardo, E. y Rodríguez-Mendoza, M.N. 2006. *Agave angustifolia* plants grown with different fertigation doses and organic substrates. *Acta Hort.* 843:49-56.

Espinoza P. H., Arredondo M. A., Canon, A. M., Canseco y F. Vásquez. 2002. La materia prima para producir el mezcal oaxaqueño. Catálogo de diversidad de agaves. INIFAP, folleto técnico 2. 68 p.

Fernández-Escobar, R., Benlloch, M., Herrera, E., García-Novelo, J.M. 2004. Effect of traditional and slow-release N fertilizers on growth of olive nursery plants and N losses by leaching. *Scientia Horticulturae* 101, 39–49.

Granados, S. D. 1993. Los Agaves en México. UACH. México D.F. 251 p.

Garate, A. y I. Bonilla 2001. Nutrición mineral y producción vegetal. pp. 113-130 In: Azcón-Bieto, J. y M. Talón. (eds.). *Fundamentos de fisiología vegetal*. McGraw-Hill Interamericana. Madrid, España.

García-Mendoza, A. J., Ordóñez, M. J., Briones, S. M. 2004. Biodiversidad de Oaxaca. REDACTA, S.A. de C. V. México. D. F. p. 154.

García-Mendoza, A. J. 2007. Los agaves de México. *Ciencias*, julio-septiembre, número 087. Universidad Nacional Autónoma de México. Distrito federal, México. Pp. 14-23.

Geraldson, C.M. and Tyler, K.B.1990. Plant analysis as an aid in fertilizing vegetable crops. *Soil testing and plant analysis* 3<sup>TH</sup> ed. SSSA. Book series, No. 3. Madison, WI. P. 549-562.

Hernández G. E. 2003. Crecimiento en vivero de vitroplantas de *Agave angustifolia* Haw bajo efectos de sustratos orgánicos y fertirriego. Tesis de maestría. ITVO. 129 p.

IFA (International Fertilizer Industry Association). 2002. Los fertilizantes y su uso, una guía de bolsillo para los oficiales de extensión. 4a ed. Paris, France.

INEGI. 1998. Anuario estadístico del Estado de Oaxaca. Catalogo No. 15218.

Jacobs, D., Rose, D., Haase, D., Alzugaray, P. 2004. Fertilization at planting impairs root system development and drought avoidance of Douglas-fir (*Pseudotsuga menziesii*) seedlings. *Ann. For. Sci.* 61, 643–651

José-Jacinto, R. 1995. Estimación de la productividad en *Agave angustifolia* Haw. Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, México.

José-Jacinto, R. 1993. El crecimiento y las prácticas culturales de los agaves pulqueros del Valle de México. Tesis Profesional. Universidad Nacional Autónoma de México. Los reyes Iztacala, México. 82 p.

Kochba, M., Gambash, S., Avnimelech, Y. 1990. Studies on slow release fertilizers. 1. Effects of temperature, moisture, and water vapour pressure, *Soil Sci.* 149, 339–343.

Latchet, W. 1995. *Physiological plant ecology*, 3rd ed. Springer-Verlag, Berlin.

Marschner, H. 1995. *Mineral nutrition of higher plants*. 2<sup>nd</sup> ed. Academic Press. London, England.

Marval, P. Y G. Piñero. 1979. Efecto de la fertilización sobre el desarrollo de bulbillos en vivero de sisal (*Agave sisalana*). *Ciarco* 2 (1): 11-20. Yaritagua. Venezuela.

Massiah, D. 1997. Estudio de las deficiencias de N, P, K Ca y Mg y su efecto sobre el desarrollo y la composición química de plantas de Sábila (*Aloe barbadensis* M.). Trabajo de grado para obtener el Título de Ingeniero Agrónomo. UCLA. Barquisimeto. Venezuela.

Mussett y Díaz M. 2000. Establecimiento de *agave cocui* Trelease en zonas semiáridas de falcón: efecto de la densidad de siembra y asociación con *Eerythrina velutina* willd. *Cieza*. 28p.

Nobel, P. S. (1988). *Environmental biology of agaves and cacti*. Cambridge University Press, Cambridge. New York, N.Y. 270 p.

Nobel, P. S., E. Quero y H. Linares. 1989. Root versus shoot biomass: responses to water, nitrogen, and phosphorus applications for *Agave lechuguilla*. *Botanical Gazette* 150(4):411-416.

Nobel, P.S., Muiyi, C. 1992. Shrinkage of Attached Roots of *Opuntia ficus-indica* in Response to Lowered Water Potentials—Predicted Consequences for Water Uptake or Loss to Soil. *Ann Bot* 1992 70: 485-491.

Nobel P. S. (1994). *Remarkable agaves and cacti*. Oxford Univerity Press. New York, N.Y. 166 p.

Nobel, P.S. 1998. *Los incomparables agaves y cactus*. Traducción al español de E. García M. ed. Trillas. México.

- Orozco-Romero, J., Pérez, Z. O. 2006. Tensión de humedad del suelo y fertilización nitrogenada en plátano (*Musa AAA simmonds*) cv. Gran Enano. *Revista Agrociencia*. 40, 149:162.
- Otero B. R., Valdés T. C., Igarza S. A. y Rodríguez M. N. 2000. Efecto de la norma e intervalo de riego en el crecimiento y desarrollo del henequén (*Agave fourcroydes*, Lem.) en fase de vivero. *Temas*. Pp. 45-47.
- Pacheco, R. A. J. 2007. Efecto de fertilizantes de liberación lenta en maguey mezcalero (*Agave angustifolia* Haw.). Tesis de Maestría en Ciencias. CIIDIR-IPN, Oaxaca. 125 p.
- Palma, C. F. 1998. Las especies útiles de género *Agave* en Oaxaca. *Huaxyácan* 16:12-16.
- Peña, T. E., Ramírez. C. M., Martínez. F., Rodríguez. N. A., Companioni, C. N., 2002. Manual para la producción de abonos orgánicos en la agricultura urbana. La Habana Cuba.
- Pérez Z., O., M. Cigales R y K. Pérez C. 2003. Tecnología de bajo impacto ambiental para la producción intensiva de melón cantaloupe en Colima. Folleto de Investigación 1. Campo Experimental Tecomán. Centro de Investigación del Pacífico Centro. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias (INIFAP). Colima, Col., México.
- Pimienta-Barríos y Park S. Nobel. 1998. Vegetative, reproductive, and physiological adaptations to aridity of pitayo (*Stenocereus queretaroensis*, cactaceae). *Economic Botany* 52(4) pp. 401--411.
- Righetti, T. L., K. L. Wilder, and G. A. Cummings. 1990. Plant analysis as an aid in fertilizing orchards. pp. 563-601. In: R. E. Westerman (ed.). *Soil testing and plant analysis*. 3rd ed. Book Series 3. Soil Science Society of America. Madison, WI, USA
- Ruiz G., Peña-Valdivia C, Trejo L. 2, Sánchez A. 2007. Reacción fisiológica del maguey (*Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck) a la sequía intermitente. *Rev. Fav. Agron. (LUZ)*. 2007, 24 Supl. 1: 318-325.
- Rojas, G. 2006. Efecto del almacenamiento y fertilización sobre el crecimiento en fase de vivero de hijos apomícticos de cocuy (*Agave cocuy* Trelease). Trabajo de grado para obtener el Título de Ingeniero Agrónomo. UCLA. Barquisimeto. Venezuela.

Ruiz G., Peña-Valdivia C, Trejo L. 2, Sánchez A. 2007. Reacción fisiológica del maguey (*Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck) a la sequía intermitente. Rev. Fav. Agron. (LUZ). 2007, 24 Supl. 1: 318-325.

Sánchez-Urdaneta A.B., Peña-Valdivia C.B, Rogelio Aguirre J., Trejo C. y Cárdenas E. 2004. Efectos del potencial de agua en el crecimiento radical de plántulas de *Agave salmiana* otto ex salm-dyck. Interciencia VOL. 29 N° 11.

Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales. 2002. Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000. Diario Oficial.

Shock, C.C., E.B.G. Feibert y L.D. Saunders. 1998. Onion yield and quality affected by soil water potential as irrigation threshold. HortScience 33: 1188-1191

Šrámek, F., Dubský, M. 2007. Effect of slow release fertilizers on container-grown woody plants. Hort. Sci. (Prague) 34 (1), 35–41.

Statistical analysis system. 1999. V.8.0

Valenzuela Z., A. G. (1992). Fertilización en plantaciones jóvenes de agave tequilero (*Agave tequilaza* weber, variedad azul). Tesis de Maestría. Universidad Autónoma de Guadalajara, Guadalajara Jalisco, México.

Wang, F.L., A.K. Alva. 1996. Leaching of nitrogen from slow-release urea sources in sandy soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 60:1454-1458.

Zuñiga, E.L., Rosales, R. E., Yañez, M. M. de J., Jaques, H. C., y Teran, V. A.P. 2007. Desarrollo del cultivo del agave azul en un sistema de producción intensivo en Tamaulipas. Trabajo experimental. INIFAP campus “Las Huastecas”, Tamaulipas, México.

## V. CAPITULO 3

### **RESPUESTA FISIOLÓGICA DE MAGUEY MEZCALERO (*Agave angustifolia* Haw.) A DIFERENTES NIVELES DE HUMEDAD APROVECHABLE DEL SUELO Y FERTILIZANTES DE LIBERACIÓN LENTA**

#### **5.1 INTRODUCCION**

Los magueyes son plantas xerófitas adaptadas a vivir en condiciones climáticas desfavorables, con largos periodos de sequía y altas temperaturas. El maguey mezcalero (*Agave angustifolia* Haw.) es un cultivo de gran importancia económica para el estado de Oaxaca, ya que es la materia prima para la producción del mezcal (Palma, 1998), es una planta perenne y suculenta del género de las agaváceas, la adaptación más importante de esta planta a la sequía se basa en el metabolismo ácido de las crasuláceas (CAM) caracterizado por las fluctuaciones ácidas de sus tejidos durante el día y apertura estomática en la noche (Nobel, 1991). Actualmente se estima que alrededor de 6% de las especies de plantas superiores presentan el metabolismo CAM (Dodd (2001)). El CAM se ha encontrado en cientos de especies, en 26 familias de angiospermas, en algunas pteridofitas y quizás en la gimnosperma *Welwischia mirabilis* (Salisbury y Ross, 1993), el rasgo más notable de las plantas CAM, es la formación de ácido málico en la noche y su desaparición con la luz del día. Luttge y Nobel (1984) en *Cereus válidus* y *A. deserti* estudiaron la influencia de las variaciones diarias en la concentración de malato, en la presión osmótica y la presión hidrostática, y concluyeron que además del ritmo estomatal invertido, la oscilación de malato tiene un efecto marcado sobre la presión osmótica y en consecuencia en las relaciones hídricas de la planta. La apertura estomática en la noche en las plantas CAM favorece el ahorro de agua, debido a que las temperaturas del aire y de las hojas en la noche son inferiores que las diurnas y por consecuencia los gradientes de concentración de vapor de agua entre la hoja y el aire son menores que en el día, minimizando la pérdida de agua, normalmente este tipo de plantas se encuentran en regiones desérticas (Szarek y Ting, 1975), donde las temperaturas frescas en la noche favorecen la apertura estomatal. En *A. deserti*, Nobel (1976) encontró que cuando la temperatura de la hoja en la noche se incrementaba de 5 a 20°C la resistencia de los estomas aumentaba cinco veces. Las plantas CAM generalmente almacenan grandes cantidades de agua en el mesófilo, en el periodo que existe disponibilidad de agua en el suelo y minimizan la pérdida por el mecanismo de abrir los estomas en la noche entre otros, de esta forma mantienen agua en los tejidos por largos periodos. Otro mecanismo para evitar la pérdida de agua en las plantas CAM ha sido descubierto por Nobel y Cui (1992), las raíces de las plantas de *Opuntia ficus indica*, cuando están bajo fuerte sequía en el suelo

se encogen y provocan cámaras de aire entre la raíz y el suelo que evitan la pérdida de agua desde la planta hasta el suelo. La relación entre variables fisiológicas como eficiencia fotosintética, conductancia estomática, resistencia estomática, concentración interna de CO<sub>2</sub>, temperatura de la hoja y los diferentes niveles de humedad en el suelo sobre el crecimiento de plantas de maguey mezcalero han sido poco estudiados. Con base en lo anterior, el objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto de la interacción de diferentes fertilizantes de liberación lenta (FLL) y diferentes niveles de humedad aprovechable del suelo (HA) sobre algunas variables fisiológicas como eficiencia fotosintética, conductancia estomática, resistencia estomática, concentración interna de CO<sub>2</sub> y temperatura de la hoja en plantas de *A. angustifolia* Haw.

## **5.2 MATERIALES Y METODOS**

La metodología y los materiales utilizados en el establecimiento del experimento fueron los mismos que se mencionaron en el capítulo 2.

### **5.2.1 Evaluación de variables fisiológicas**

En este capítulo de la investigación se evaluaron 5 parámetros fisiológicos: tasa de asimilación de CO<sub>2</sub> (FS NETA), conductancia estomática (CS), temperatura de la hoja (TH), concentración intracelular de CO<sub>2</sub> (CINT) y resistencia estomática (RS). Además de los parámetros fisiológicos antes mencionados, con el mismo equipo se obtuvieron lecturas de radiación fotosintéticamente activa (RFA), temperatura ambiental y humedad relativa para cada uno de los intervalos de las dos mediciones que se realizaron. Las evaluaciones fisiológicas se realizaron durante los últimos 6 meses del experimento (el experimento duro 11 meses en total), porque en este periodo se aplicaron los riegos y se controló la humedad del suelo. La metodología utilizada para la evaluación de las variables fisiológicas fue la de (Nobel, 1988).

Se hicieron dos mediciones de las variables fisiológicas, la primera medición se realizó dos meses después de aplicar los riegos (28 de abril de 2009), en intervalos aproximados de 5 horas: 14:00 p.m., 19:00 p.m., 01:00 a.m. y 06:00 a.m. La segunda medición se hizo tres meses después de la primera (28 de julio de 2009), de igual forma, en intervalos aproximados de 5 horas: 08:00 a.m., 14:00 p.m., 19:00 p.m. y 01:00 a.m. Estas mediciones se realizaron con un aparato portátil para medir fotosíntesis IRGA (Analizador de gases por infrarrojo) modelo Li-Cor LI-6100 con el que fueron registradas las tasas instantáneas de asimilación de CO<sub>2</sub> (El equipo utilizado pertenece al departamento de Fitotecnia de la Universidad Autónoma Chapingo, Texcoco, Estado de México).

Las variables fisiológicas se determinaron en tres plantas por tratamiento, las plantas seleccionadas fueron las que representaron los valores promedio (de un total de diez repeticiones por tratamiento) para la variable altura de planta. En ambas mediciones se evaluó la misma hoja, la cual fue una hoja completamente desarrollada (totalmente desplegada y con una longitud aproximada de 25 cm), sana y con orientación norte-sur, con la finalidad de que la lamina de la hoja recibiera directamente la luz, evitando sombreo de otras hojas. Se tomo el primer tercio de la hoja de la espina terminal hacia abajo para tomar la lectura, por ser la parte más iluminada y la zona que más se adaptó a la cámara del equipo para poder hacer las mediciones. Además de las variables fisiológicas, con el mismo equipo se registró la temperatura ambiental, la humedad relativa y la radiación fotosintéticamente activa. Al realizar las mediciones de CO<sub>2</sub>, el equipo registra la lectura del área de la hoja muestreada, el procedimiento que se siguió en este experimento para determinar la FS NETA, fue obtener el área foliar (AF) total por tratamiento (Cuadro 2) para extrapolar la tasa de asimilación real de CO<sub>2</sub> por tratamiento.

Los datos obtenidos se sometieron a un análisis de varianza y cuando hubo diferencias significativas entre tratamientos ( $P \leq 0.05$ ), se aplicó la prueba de Tukey. Para el análisis estadístico se utilizó el programa SAS (Statistical Analysis System, Versión 9.0).

## **5.3 RESULTADOS Y DISCUSION**

### **5.3.1 Tasa de asimilación de CO<sub>2</sub>**

Al analizar las características ambientales obtuvimos que el valor de la RFA para la segunda medición ( $1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) (Figura 1b) fue mayor en comparación con la primera medición ( $1000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ ) (Figura 1a) para el intervalo de las 14:00 P.M. Las lecturas efectuadas en la noche no presentaron valores para RFA.

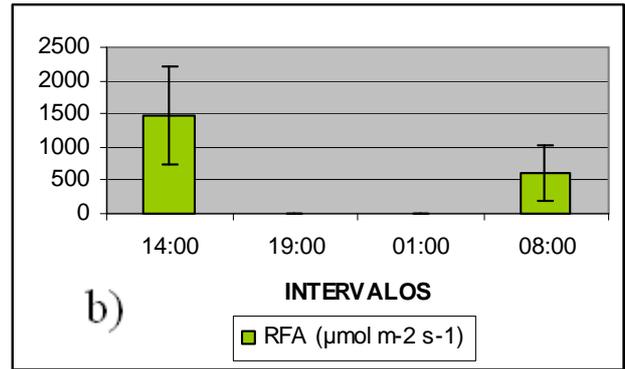
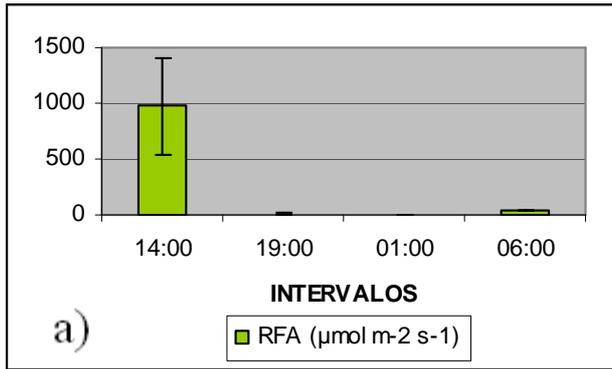


Figura 1. Radiación fotosintéticamente activa para cada una de las mediciones e intervalos estudiados, primera medición (a), segunda medición (b). Los datos se presentan como promedio  $\pm$  desviación estandar (n= 48).

Al aumentar la temperatura disminuyó la humedad relativa. En la primera medición la temperatura mas alta (39 °C) se presentó en el intervalo de las 14:00 p.m y la temperatura mas baja (15°C). se presentó en los intervalos de la 01:00 a.m.y las 06:00 a.m. (Fig. 2a). En la segunda medición, la temperatura mas alta (39°C) se presentó en el intervalo de las 14:00 p.m. y la temperatura mas baja a la 01:00 a.m. (18°C) (Fig. 2b).

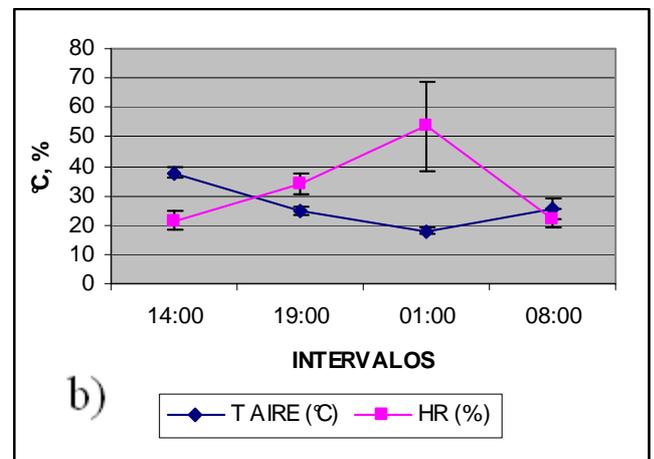
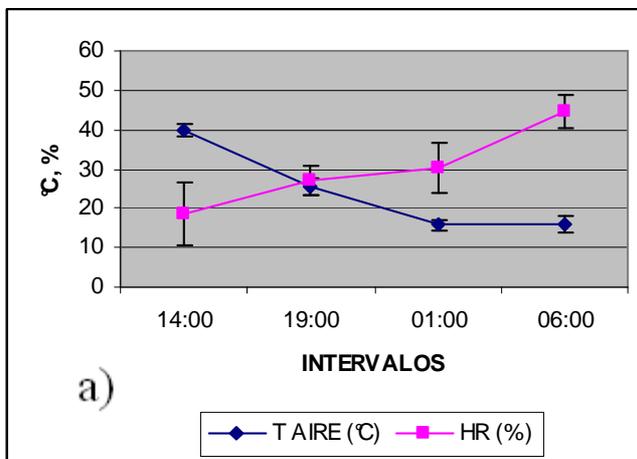


Figura 2. Temperatura ambiental y Humedad relativa para cada una de las mediciones e intervalos estudiados, primera medición (a), segunda medición (b). Los datos se presentan como promedio  $\pm$  desviación estandar (n= 48).

Se obtuvieron diferencias significativas entre tratamientos para la variable FS NETA en los tratamientos donde se evaluó el factor humedad aprovechable del suelo (Cuadro 1), caso contrario

para el factor fertilizante donde ninguno de los FLL evaluados mostró diferencias significativas entre tratamientos para esta variable.

Al comparar las tasas de asimilación de CO<sub>2</sub> entre la primera y segunda medición, se observó un incremento notorio en la asimilación de CO<sub>2</sub> para la segunda medición en los intervalos de las 19:00 P.M. y 01:00 a.m (Cuadro 1), probablemente debido al periodo que estuvieron expuestas las plantas al riego, ya que la primera medición se tomo dos meses después de iniciar con los riegos y la segunda medición se realizo cinco meses después. Posiblemente después de estar cinco meses expuestas al riego, las plantas tuvieron una mayor respuesta en las tasas de asimilación de CO<sub>2</sub>, y por lo tanto en el crecimiento. Para la primera medición, en todos los intervalos, los tratamientos con riego presentaron las tasas más altas de asimilación de CO<sub>2</sub> las cuales fueron estadísticamente iguales entre ellas y diferentes respecto al testigo (Cuadro 1). Similarmente, en la primera medición la tasa de asimilación total fue más alta en el intervalo de las 06:00 a.m., siendo los tratamientos al 50 y al 20% de HA los que presentaron las tasas más altas de asimilación de CO<sub>2</sub>, también para esta medición el testigo presento el valor más bajo comparado con los tratamientos con riego (Cuadro 2). En los testigos (sin riego) en cada uno de los intervalos de la primera medición, la tasa más alta de asimilación se obtuvo en el intervalo de la 01:00 a.m. posiblemente esto se deba a que las condiciones ambientales fueron más favorables para la apertura estomática, ya que en este intervalo se obtuvieron las temperaturas más bajas (15°C) (Fig. 2). Paralelo a esto, en la primera medición se realizo una repetición a las 14:00 hrs. solamente en los tratamientos con riego (Fig. 3), sin embargo todos los valores mostrados por el equipo fueron negativos, es decir que no hubo apertura estomática y por lo tanto no hubo asimilación de CO<sub>2</sub> debido a las altas temperaturas y a la baja humedad relativa (Figura 3), estos resultados refirman lo investigado en plantas con metabolismo tipo CAM, donde se ha encontrado que en condiciones desfavorables de humedad y temperatura, solamente abren sus estomas en la noche. García-Mendoza (2007) mencionó que el metabolismo CAM, típico de algunos géneros y familias de plantas que crecen en zonas con altas temperaturas, constituye una especialización fisiológica en los agaves, a la cual se combina una alta radiación y baja humedad. Las plantas con metabolismo CAM tienen transpiración nocturna, abren sus estomas en la noche, fijan el carbono en ácidos orgánicos, principalmente ácido málico, que se acumulan en las vacuolas; durante el día, el ácido málico es descarboxilado y se obtiene carbono, el cual es utilizado por la planta para producir carbohidratos. Por otra parte, en diversos estudios se ha encontrado que las temperaturas frescas nocturnas desempeñan una función más importante en la asimilación de CO<sub>2</sub> que las diurnas en plantas CAM (Hascom y Ting; Pimienta-Barrios et al., 2000; Nobel *et al.*, (2002)); debido a que las temperaturas frescas moderadas en la noche favorecen la actividad de la enzima fosfoenol piruvato carboxilasa (PEPása) y la asimilación de CO<sub>2</sub> en plantas

CAM en condiciones controladas (Israel y Nobel 1995). En este experimento para la primera medición las tasas más altas de asimilación se obtuvieron a la 01:00 y 06:00 a.m., Fue en estos intervalos donde se presentaron las temperaturas más frescas y la humedad relativa más alta (Fig. 2a).

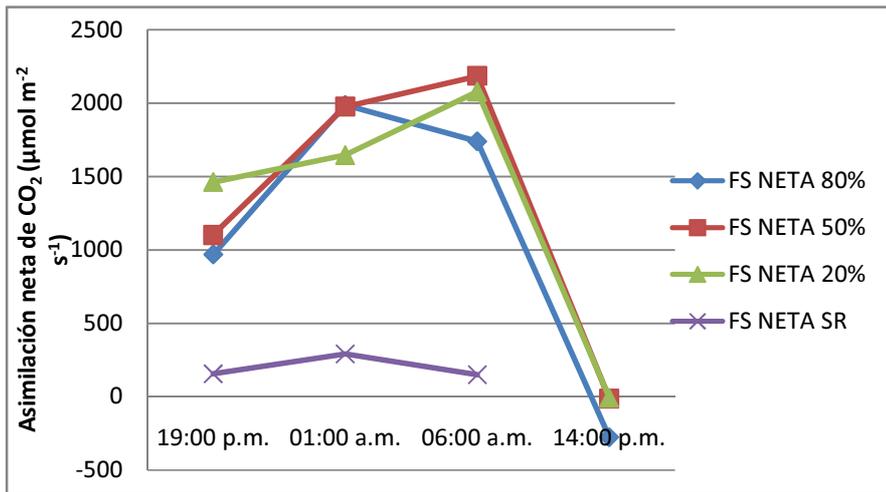


Figura 3. Tasa de asimilación neta de CO<sub>2</sub> en plantas de maguey mezcalero (*Agave angustifolia* Haw.). Primera medición (28/04/09).

En la primera medición no se tuvieron valores positivos para las tasas de asimilación de CO<sub>2</sub> en el intervalo de las 14:00 p.m. (Fig. 3), sin embargo en la segunda medición se tuvieron valores positivos para este mismo intervalo, tal vez debido a un efecto positivo del riego el cual pudo incrementar las tasas de asimilación, por otra parte quizás al haber un mayor crecimiento y desarrollo de la hoja se pudieron haber elevado las tasas de asimilación de CO<sub>2</sub> (Cuadro 1).

En la segunda medición la mayor tasa de fotosíntesis se obtuvo en los tratamientos con 50% y 80% de HA y el valor más bajo se presentó con el testigo (Cuadro 1). La fotosíntesis en plantas C4 es altamente sensible al estrés por bajos contenidos de humedad, a bajos contenidos de agua en las hojas, las tasas de asimilación de CO<sub>2</sub> y la conductancia estomatal disminuyen rápidamente en plantas C4 (Ghannoum, 2008). Los valores más altos de asimilación de CO<sub>2</sub> se presentaron en los intervalos de las 19:00 p.m. y la 01:00 a.m. y el valor más bajo se obtuvo a las 14 p.m.. (Cuadro 1), Lo cual puso de manifiesto el típico metabolismo CAM, donde debido a las condiciones poco favorables (altas temperaturas y poca humedad en el suelo) se redujo la actividad fotosintética e incrementó la respiración (Pimienta-Barrios et al., 2000). Para la segunda medición de asimilación

de CO<sub>2</sub>, en los intervalos de las 19:00 p.m. y LA 01:00 a.m. se obtuvieron las temperaturas más frescas y la humedad relativa más alta (Fig. 2b).

Cuadro 1. Tasa de asimilación de CO<sub>2</sub> en plantas de maguey mezcalero (*Agave angustifolia* Haw) en función de la humedad aprovechable.

Humedad aprovechable (%)	Tasa de asimilación de CO <sub>2</sub> (μmol m <sup>-2</sup> s <sup>-1</sup> )				FS TOTAL
	19:00 hrs.	01:00 a.m.	06:00 a.m.	FS TOTAL	
<b>Primera medición (28/04/2009)</b>					
80	969.4 ab	1987.2 a	1739.2 a	<b>4695.9</b>	
50	1100.9 a	1975.2 a	2184.3 a	<b>5260.5</b>	
20	1461.8 a	1645.8 a	2077.6 a	<b>5185.3</b>	
Sin riego	154.7 b	290.5 b	149.4 b	<b>594.7</b>	
<b>FS TOTAL</b>	<b>3687.0</b>	<b>5898.9</b>	<b>6150.6</b>		
<b>Segunda medición (28/07/2009)</b>					
	<b>19:00 hrs.</b>	<b>01:00 a.m.</b>	<b>14:00 hrs.</b>	<b>08:00 a.m.</b>	
80	1546.8 a	2011.5 a	124.8 ab	2761.2 a	<b>6444.3</b>
50	2364.9 a	2677.5 a	55.1 b	2152.7 a	<b>7250.4</b>
20	2398.7 a	1803.0 b	283.9 ab	507.3 b	<b>4993.1</b>
Sin riego	1249.7 a	847.0 b	337.0 a	58.2 b	<b>2492.1</b>
<b>FS TOTAL</b>	<b>7560.2</b>	<b>7339.2</b>	<b>800.9</b>	<b>5479.5</b>	

FS TOTAL, fotosíntesis total. Valores medios seguidos por la misma letra en cada columna, no difieren significativamente (Tukey;  $P \leq 0.05$ ).

El testigo (sin riego) tuvo la menor tasa de asimilación de CO<sub>2</sub> en la mayoría de los intervalos, excepto en el que se llevo a cabo a las 14:00 P.M. (Cuadro 1). Las plantas con mayor estrés hídrico deberían cerrar sus estomas a esta hora, debido a las características poco favorables del ambiente, sin embargo, bajos potenciales de agua en el suelo no afectan la resistencia estomática, ni la

transpiración en las primeras etapas de crecimiento, ya que el alto contenido de agua en el parénquima mantiene abiertos los estomas aun cuando las condiciones de humedad en el suelo son limitantes (Rodríguez-García, 2007).

José (1995) evaluó tasas de asimilación de CO<sub>2</sub> en maguey mezcalero a campo abierto y bajo condiciones de temporal en plantas de cuatro y 8 años de edad, para ambas edades y bajo esas circunstancias la mayoría de las plantas presentaron sus máximas tasas de asimilación de CO<sub>2</sub> entre las 19:00 p.m. y las 02:00 a.m. Después de las 08:00 a.m. la tasa de asimilación de CO<sub>2</sub> descendió prácticamente a cero. Estos resultados coinciden parcialmente con los reportados en este experimento, donde las mayores tasas de asimilación de CO<sub>2</sub> se observaron en la mayoría de los casos a las 19:00 p.m y a la 01:00 a.m. Sin embargo, y posiblemente por las buenas condiciones de humedad aprovechable del suelo, después de las 08:00 a.m. aun se tuvo asimilación de CO<sub>2</sub>, a pesar de que estas tasas fueron pequeñas para el testigo y el tratamiento con 20% de HA. En este trabajo las plantas evaluadas fueron de aproximadamente un año de edad lo que tal vez pudo variar la cantidad de CO<sub>2</sub> en comparación con plantas de cuatro y 8 años.

En la mayoría de los estudios realizados en plantas CAM (Nobel, 1989; Pimienta-Barrios, 2006) sobre fijación de CO<sub>2</sub>, la mayoría de los resultados obtenidos concuerdan con los de este experimento. De manera general, un buen contenido de HA promueve una mayor tasa de asimilación de CO<sub>2</sub>. Nobel y Pimienta-Barrios (1995) encontraron que en pitayo (*S.queretaroensis*) un periodo de sequía relativamente corto (menos de 20 días) no afectó significativamente la tasa de asimilación de CO<sub>2</sub>, sin embargo después de 27 días de sequía la tasa se redujo en un 33%, a los 41 días se tuvo una reducción de 69% y a los 56 días, 89% menos fijación de CO<sub>2</sub>.

La temperatura puede influir en los procesos fisiológicos básicos, como fotosíntesis y respiración, que determinan en gran parte la cantidad de los azúcares que se forman en las hojas y posteriormente se transportan y almacenan en la piña. Trabajos previos en especies que presentan el metabolismo CAM, como *A.tequilana*, *Opuntia ficus-indica* y *Stenocereus queretaronesis*, han revelado que temperaturas cálidas reducen la fotosíntesis e incrementan la respiración (Nobel et al., 1998; Pimienta-Barrios et al., 2000). También se ha encontrado que *A. tequilana* es una planta sensible al daño por temperaturas bajas (-7 °C) (Nobel et al., 1998).

En plantas CAM, las temperaturas cálidas reducen la actividad fotosintética e incrementan la respiración (Pimienta-Barrios et al., 2000). Las temperaturas frescas en la noche favorecen la actividad de la enzima PEPása y la asimilación nocturna de CO<sub>2</sub> en condiciones controladas (Israel y Nobel, 1995; Nobel, 1988; Nobel et al., 1998), y en campo (Hascom y Ting, 1978; Pimienta-

Barrios *et al.*, 2000). Las temperaturas nocturnas son más importantes que las diurnas para la asimilación de CO<sub>2</sub> en *A. tequilana*. Las tasas instantáneas más altas de asimilación neta de CO<sub>2</sub> se registraron entre 10 y 18°C, y las tasas disminuyeron conforme las temperaturas fueron inferiores a 5°C o superiores a 23°C. Estos resultados concuerdan con los encontrados en este experimento en *A. angustifolia*, donde las tasas más altas de asimilación de CO<sub>2</sub>, se obtuvieron en un intervalo de temperatura de 10 a 20°C (Fig. 2a y 2b).

La luz (Flujo Fotosintético de Fotones, FFF) es otro factor ambiental limitante para la fotosíntesis en plantas CAM (Gibson y Nobel, 1986). En *O. ficus-indica* y *S. queretaroensis* la actividad fotosintética presenta una estrecha dependencia con la disponibilidad de luz (Nobel y Hartsock, 1984; Nobel y Pimienta-Barrios, 1995; Pimienta-Barrios y Nobel, 1998). Ruiz-Corral *et al.* (2002) hicieron una evaluación estacional de la actividad fotosintética de *A. tequilana* y encontraron que el valor más alto de fotosíntesis se obtuvo en septiembre de 1998, el mes con el promedio diario más bajo de FFF y con temperaturas promedio día/noche frescas (22/16 °C). En este experimento solo se pudo comparar la influencia de la RFA en el intervalo de las 14:00 P.M., en la segunda medición se obtuvo una RFA de 1500 FFF (500 FFF más que en la primera medición) (Fig. 1), quizás este factor aunado a la buena disponibilidad de HA pudo influir para que en la segunda medición y para este intervalo se hayan obtenido lecturas positivas en la asimilación de CO<sub>2</sub>.

### 5.3.2 Temperatura de la hoja

Al disminuir la TH, se incrementó la FS NETA. En la primera medición se presentaron las tasas más altas de asimilación de CO<sub>2</sub> a las 01:00 a.m. y a las 06:00 a.m. (Cuadro 1), probablemente debido a una temperatura más baja en el ambiente (Fig. 2a). En la segunda medición, las tasas de asimilación más altas de CO<sub>2</sub> se observaron a las 19:00 p.m. y a la 01:00 a.m. (Cuadro 1) que son los intervalos donde se tienen las temperaturas más bajas (Fig. 5). En la mayoría de los casos la TH fue 0.8°C superior a la temperatura ambiental registrada al momento de tomar los datos.

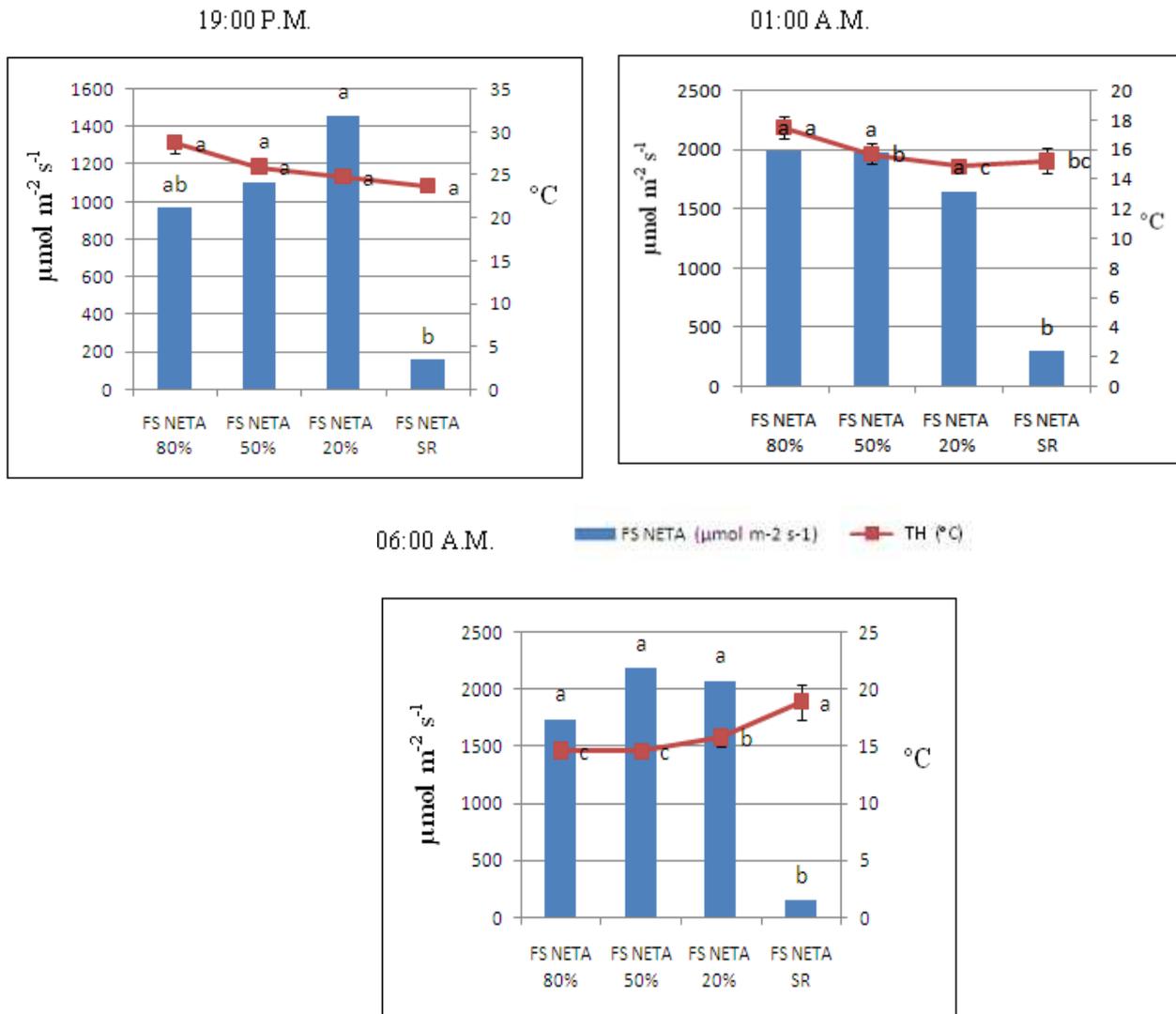


Figura 4. Tasa de asimilación de CO<sub>2</sub> en plantas de maguey mezcalero (*Agave angustifolia* Haw) en función de la temperatura de la hoja. Primera medición (28/04/09). Los datos se presentan como promedio  $\pm$  desviación estandar (n=12)

Al incrementar el porcentaje de HA del suelo se incrementó la TH (Fig. 4 y 5). Las tasas de asimilación de CO<sub>2</sub> más altas se obtuvieron al 50 y 20% de HA en la primera medición y al 50% de HA para la segunda (Cuadro 1). Los intervalos de las 06:00 a.m. y las 08:00 a.m de la primera y segunda medición respectivamente, presentaron una tendencia opuesta a la mayoría de los intervalos de ambas mediciones, ya que en estos casos la TH disminuyó al aumentar el contenido de HA del suelo (Fig. 4 y 5) probablemente debido a que es en estas horas donde se tienen las temperaturas más bajas es decir justo antes de que salga el sol. Existen muy pocos estudios donde se

compare el contenido de humedad en el suelo con la TH en agaves, sin embargo, Rodríguez-García *et al.* (2007) encontraron resultados muy parecidos a los de este experimento, ellos obtuvieron en *Aloe vera* (planta con metabolismo CAM), que la TH fue superior en los tratamientos con mayor humedad, pero en algunas ocasiones se presentaron fluctuaciones donde la TH fue mayor donde se tuvo menor contenido de humedad en el suelo. En este estudio, para la primera lectura, el intervalo de las 19:00 P.M., no presento diferencias estadísticas entre tratamientos para la variable TH, las repeticiones a las 01:00 a.m. y 06:00 a.m. presentaron diferencias significativas entre tratamientos (Fig. 4). Para la segunda lectura, todos los intervalos de medición presentaron diferencias significativas entre tratamientos (Fig. 5).

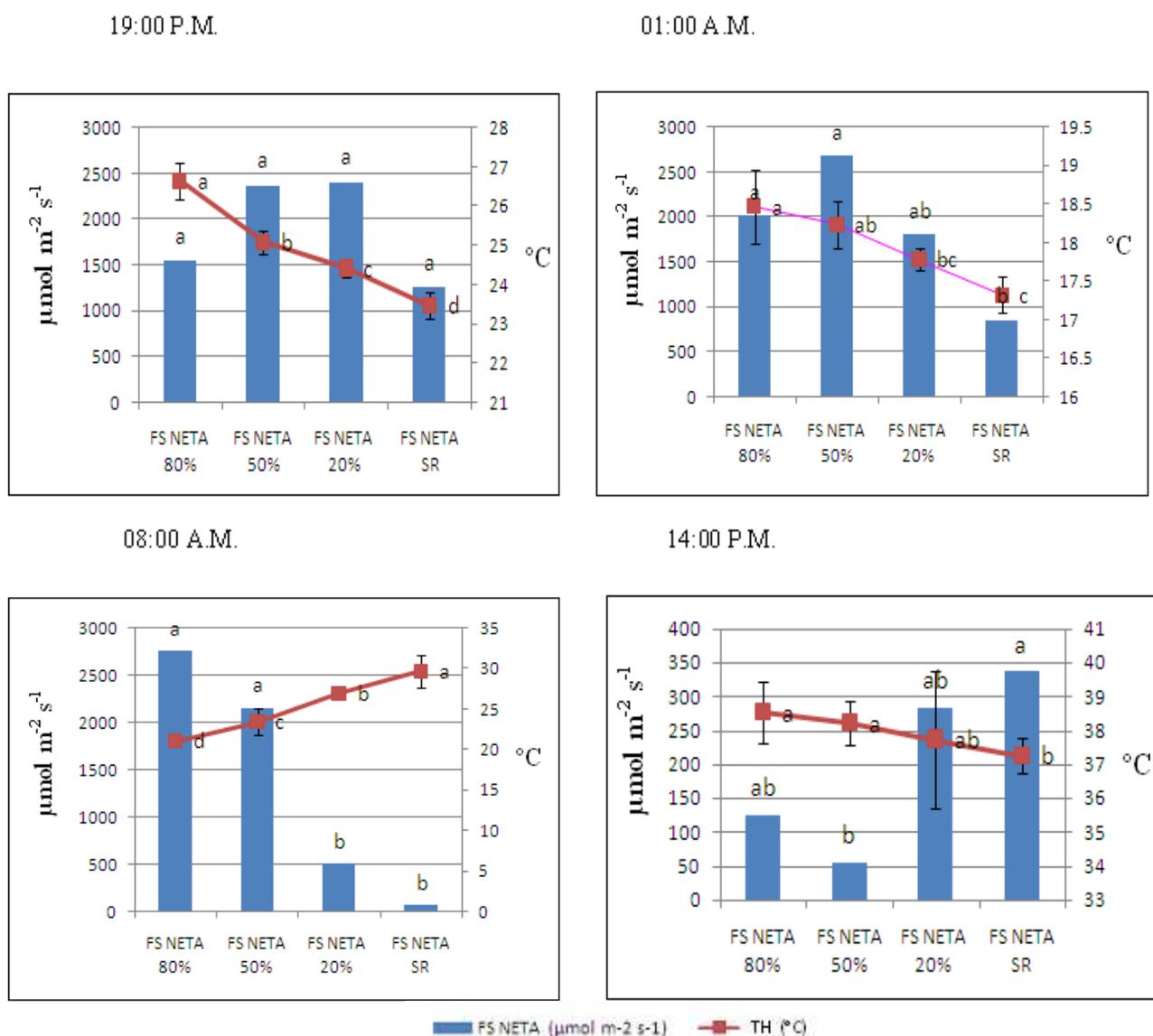


Figura 5 Tasa de asimilación de CO<sub>2</sub> en plantas de maguey mezcalero (*Agave angustifolia* Haw) en función de la temperatura de la hoja. Segunda lectura (28/07/09). Los datos se presentan como promedio ± desviación estándar (n=12)

### 5.3.3 Resistencia estomática

En ambas lecturas se pudo observar que al disminuir la RS se incrementó la tasa de asimilación de CO<sub>2</sub> (Fig. 6 y 7). Para la primera medición en todos los intervalos se presentaron diferencias significativas entre tratamientos (Fig. 6), por otra parte los valores más altos de RS se presentaron a las 19:00 P.M. (Fig. 6), y fue en este intervalo donde se obtuvo la menor tasa de asimilación (Cuadro 2), los valores más bajos de RS se presentaron a las 06:00 a.m. (Fig. 6) y fue en este tratamiento donde se tuvo la tasa más alta de asimilación de CO<sub>2</sub> (Cuadro 1).

A mayor contenido de humedad en el suelo se incrementó la RS, los resultados encontrados en este experimento difieren de los obtenidos por Rodríguez-García (2007) en *Aloe vera* quien obtuvo mayor RS en tratamientos con mayor estrés hídrico. Para la segunda medición, el intervalo de las 08:00 a.m. no presentó diferencias significativas entre tratamientos para la variable RS, los demás intervalos de esta medición, presentaron diferencias significativas entre tratamientos (Fig. 7). Por otra parte, los valores más bajos de RS se presentaron a las 01:00 a.m. y a las 19:00 p.m. (Fig. 7), y fue en estos intervalos donde se obtuvieron las tasas más altas de asimilación de CO<sub>2</sub> (Cuadro 1). El valor más bajo de RS se presentó a las 14:00 p.m., fue este intervalo el que presentó los valores más bajos de asimilación de CO<sub>2</sub> (Figura 7). En la mayoría de los casos el testigo presentó los valores más bajos de RS.

Estos resultados pudieran parecer contradictorios pues se esperaba que los valores más altos de RS se presentaran en los tratamientos con menor cantidad de humedad debido a que la literatura indica que el órgano que recibe el estímulo del déficit hídrico en el suelo es la raíz, la cual sintetiza ácido abscísico (ABA) (Olien y Lakso, 1986; Davies y Zhang, 1991), lo transporta vía xilema hacia la hoja y ahí induce cambios en la permeabilidad de la membrana de las células guarda, las cuales liberan solutos (K<sup>+</sup> y Ca<sup>2+</sup>) (Roberts, 1998) hacia el citoplasma de las células acompañantes, y con ello el agua disminuye el potencial de turgencia, que hace que los estomas se cierren (Maathuis *et al.*, 1997; Ruíz *et al.*, 1993; Salisbury y Ross, 1993). También se ha encontrado que la hoja mantiene ABA en el apoplasto de las células del mesófilo, el cual es transportado hacia las células guarda por el flujo transpiratorio cuando se recibe una señal de déficit hídrico en el suelo (Davies y Zhang, 1991). En esta variable tal vez podemos darnos cuenta de las características típicas de las plantas CAM debido a que aunque no hubo diferencias significativas entre tratamientos, los mejores

resultados para las variables de crecimiento (altura de planta, número de hojas desplegadas y área foliar) y la tasa de asimilación de CO<sub>2</sub> se presentó con los tratamientos al 80 y 50% de HA (Cuadro 1).

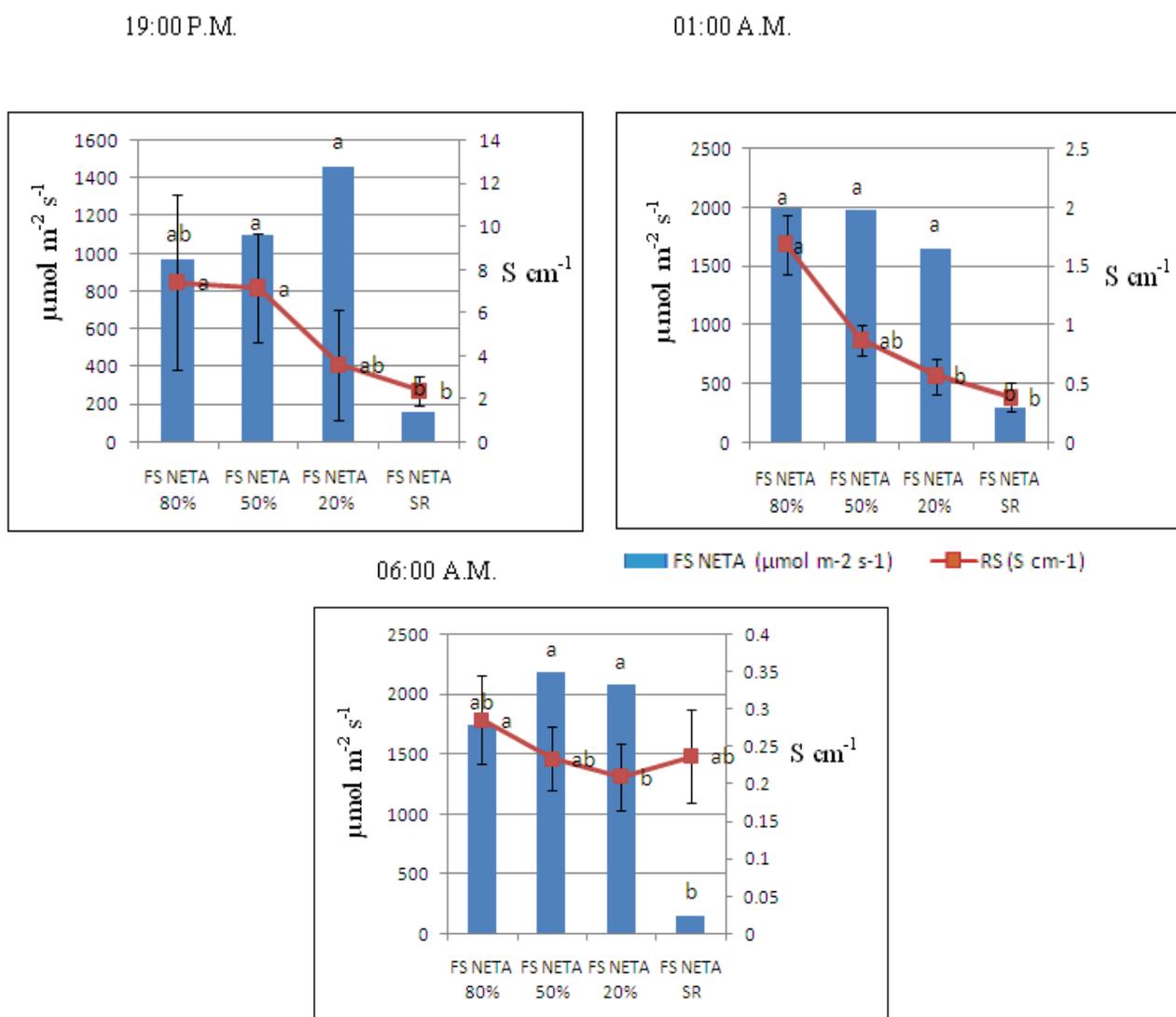


Figura 6. Influencia de la resistencia estomática sobre la tasa de asimilación neta de CO<sub>2</sub> en plantas de maguey mezcalero (*Agave angustifolia* Haw.). Primera lectura (28/04/09). Los datos se presentan como promedio ± desviación estandar (n=12)

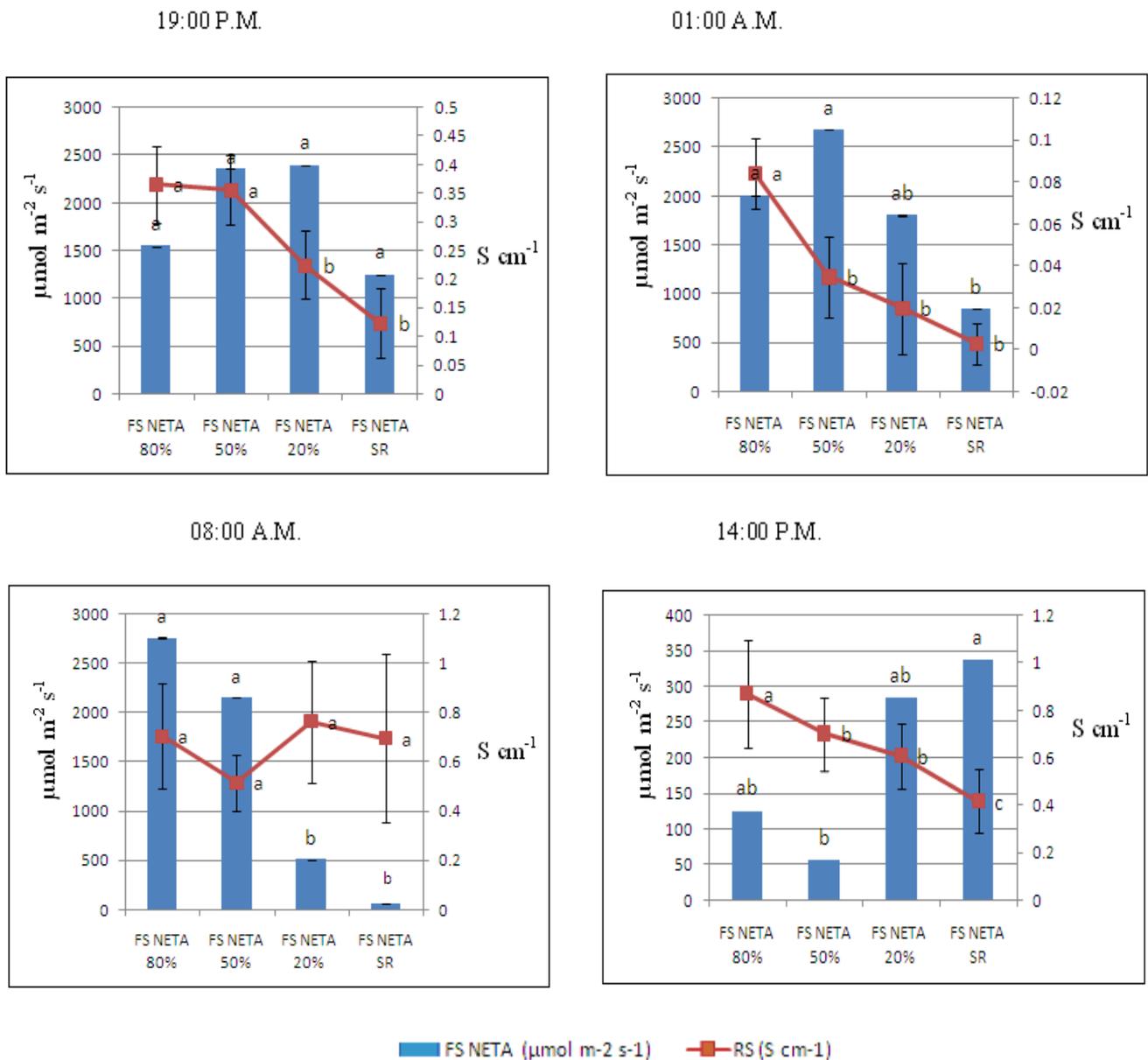


Figura 7. Tasa de asimilación de CO<sub>2</sub> en plantas de maguey mezcalero (*Agave angustifolia* Haw) en función de la resistencia estomática. Segunda lectura (28/07/09). Los datos se presentan como promedio  $\pm$  desviación estandar (n=12)

### 5.3.4 Conductancia estomática

Al aumentar la RS disminuyó la CS y viceversa. Al aumentar la CS, se incrementó la tasa de asimilación de CO<sub>2</sub> (Figuras 8 y 9). En la primera medición para la variable CS, en todos los

intervalos se presentaron diferencias significativas entre tratamientos (Figura 8). Los valores más altos de CS se presentaron a las 06:00 a.m. (Figura 8), y fue en este intervalo donde se obtuvo la mayor tasa de asimilación de CO<sub>2</sub> (Cuadro 1), los valores más bajos de CS se presentaron a las 19:00 P.M. (Figura 8) y fue en este intervalo donde se tuvo la tasa más baja de asimilación de CO<sub>2</sub> (Cuadro 1).

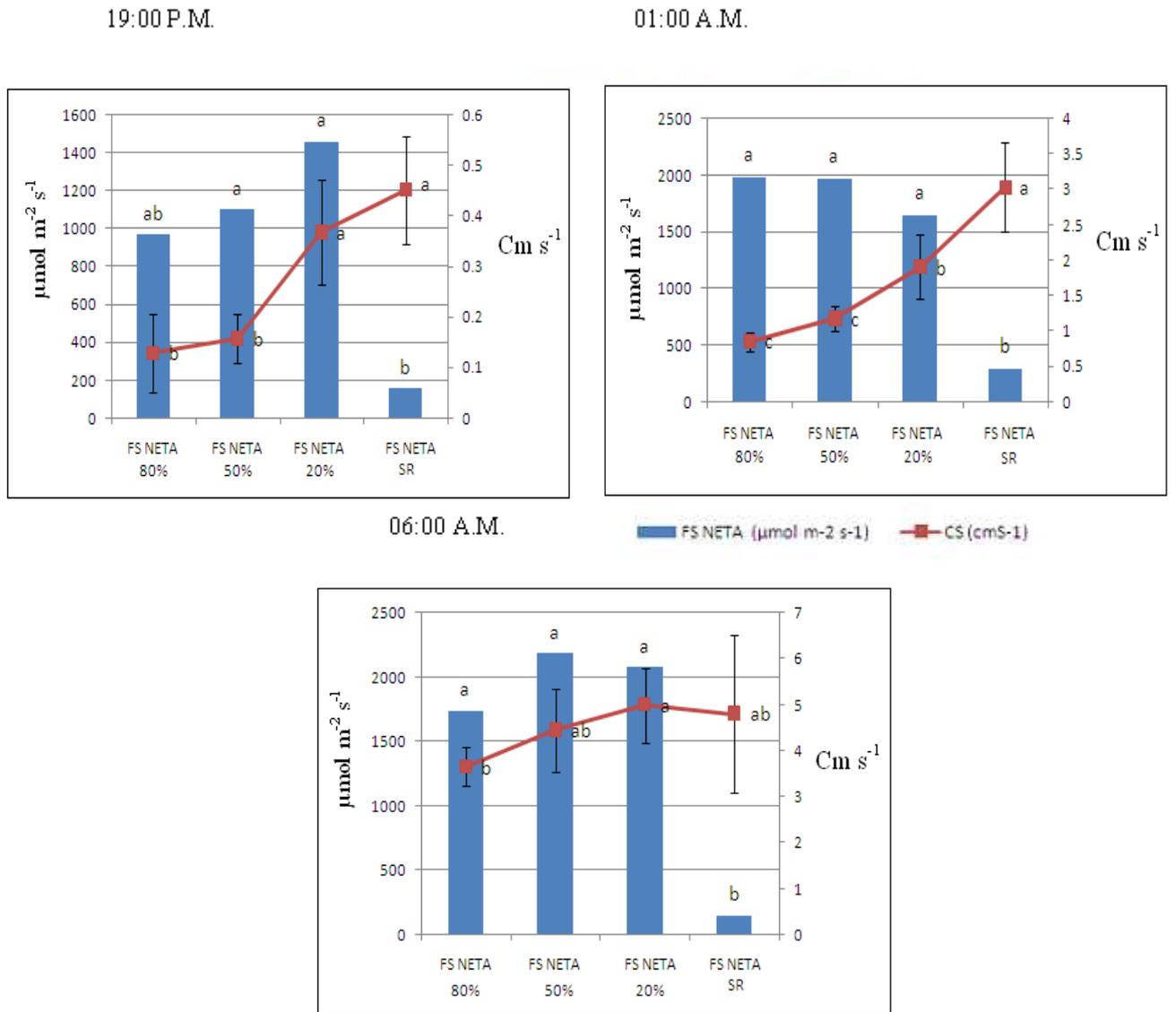


Figura 8. Tasa de asimilación de CO<sub>2</sub> en plantas de maguey mezcalero (*Agave angustifolia* Haw) en función de la conductancia estomática. Primera lectura (28/04/09). Los datos se presentan como promedio ± desviación estándar (n=12)

En la segunda medición, el intervalo de las 08:00 a.m. no presento diferencias significativas entre tratamientos para la variable CS, sin embargo, el resto de los intervalos de esta medición presentaron diferencias significativas entre tratamientos (Figura 9). Los valores más altos de CS se presentaron a la 01:00 a.m. y a las 19:00 p.m. (Figura 9), y es en estas repeticiones donde se obtuvieron las tasas más altas de asimilación de CO<sub>2</sub>. En la mayoría de los casos al disminuir el contenido de HA del suelo se incrementó la CS (Figuras 8 y 9). José (1995) encontró que la apertura estomatal en plantas de *A. angustifolia* de cuatro y 8 años de edad está directamente relacionada con cambios en el contenido de agua y temperatura celular, y no con la cantidad o capacidad de fijación de CO<sub>2</sub>.

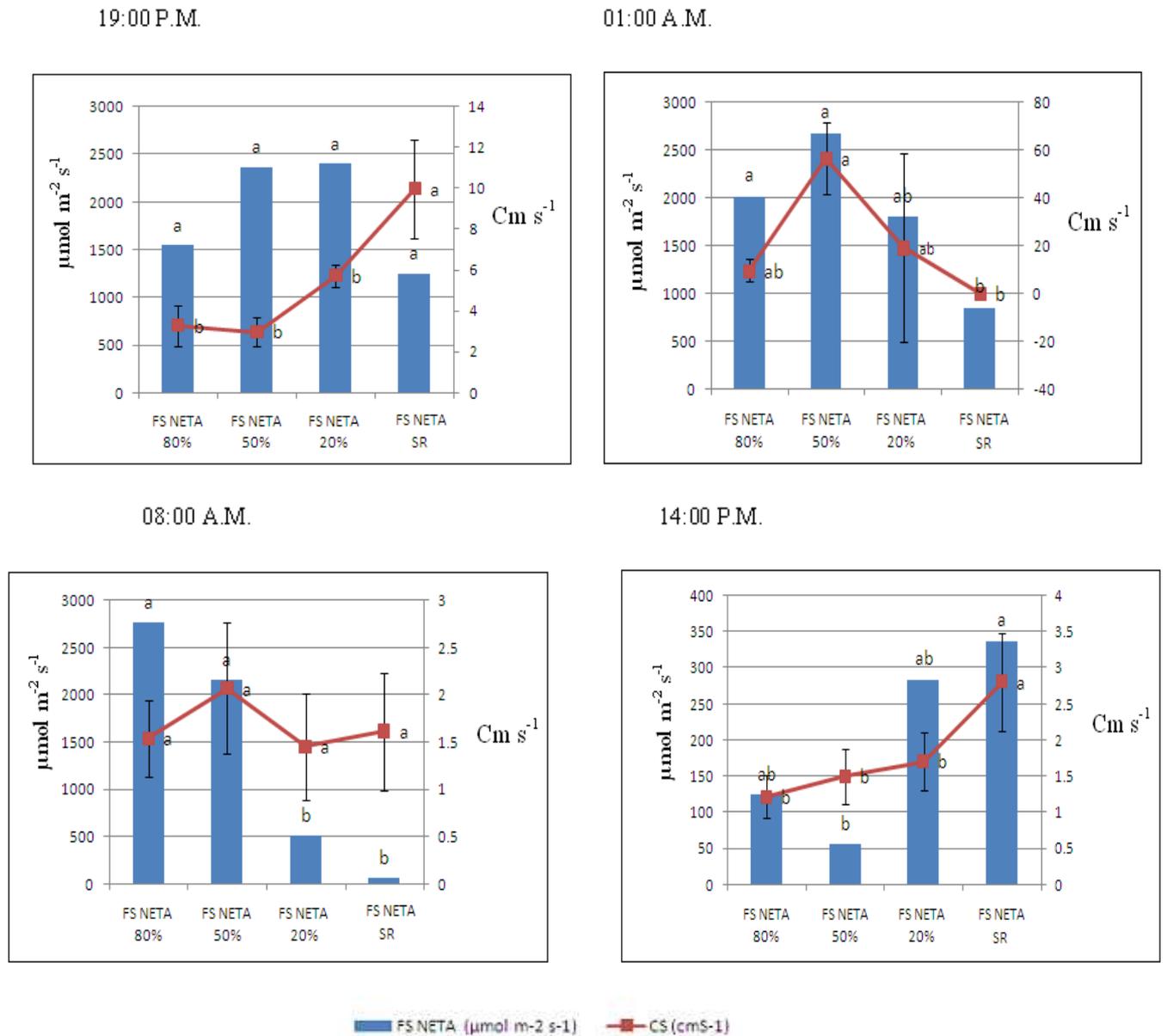


Figura 9. Tasa de asimilación de CO<sub>2</sub> en plantas de maguey mezcalero (*Agave angustifolia* Haw) en función de la conductancia estomática. Segunda lectura (28/07/09). Los datos se presentan como promedio ± desviación estandar (n=12)

### 5.3.5 Concentración intracelular de CO<sub>2</sub>

De manera general, para la primera medición no se tuvo una tendencia muy clara sobre el comportamiento de la CINT (Figura 10). En cambio, en la segunda medición al aumentar la tasa de asimilación de CO<sub>2</sub> disminuyó la CINT (Figura 11). Este resultado probablemente se deba a que al asimilar una mayor cantidad de CO<sub>2</sub> la planta tiene una tasa de crecimiento mucho mas acelerada, lo que implica una mayor acumulación de biomasa y por lo tanto un mayor consumo de CO<sub>2</sub> (Manjarrez-Martinez *et al.*1999). El valor mas bajo de CINT se presento en la segunda medición a las 14:00 p.m (Figura 11).

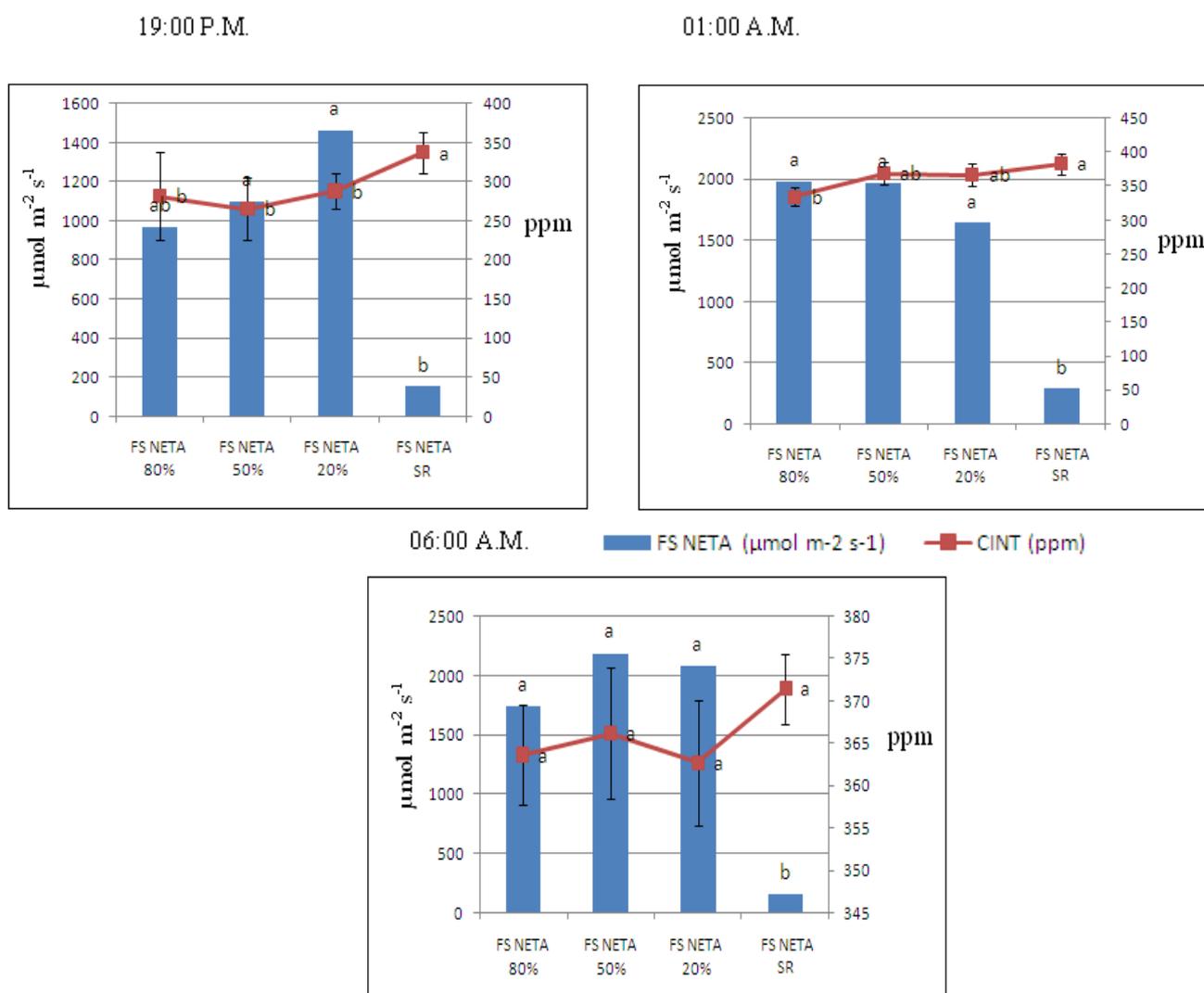


Figura 10. Tasa de asimilación de CO<sub>2</sub> en plantas de maguey mezcalero (*Agave angustifolia* Haw) en función de la concentración intracelular de CO<sub>2</sub>. Primera lectura (28/04/09). Los datos se presentan como promedio ± desviación estandar (n=12).

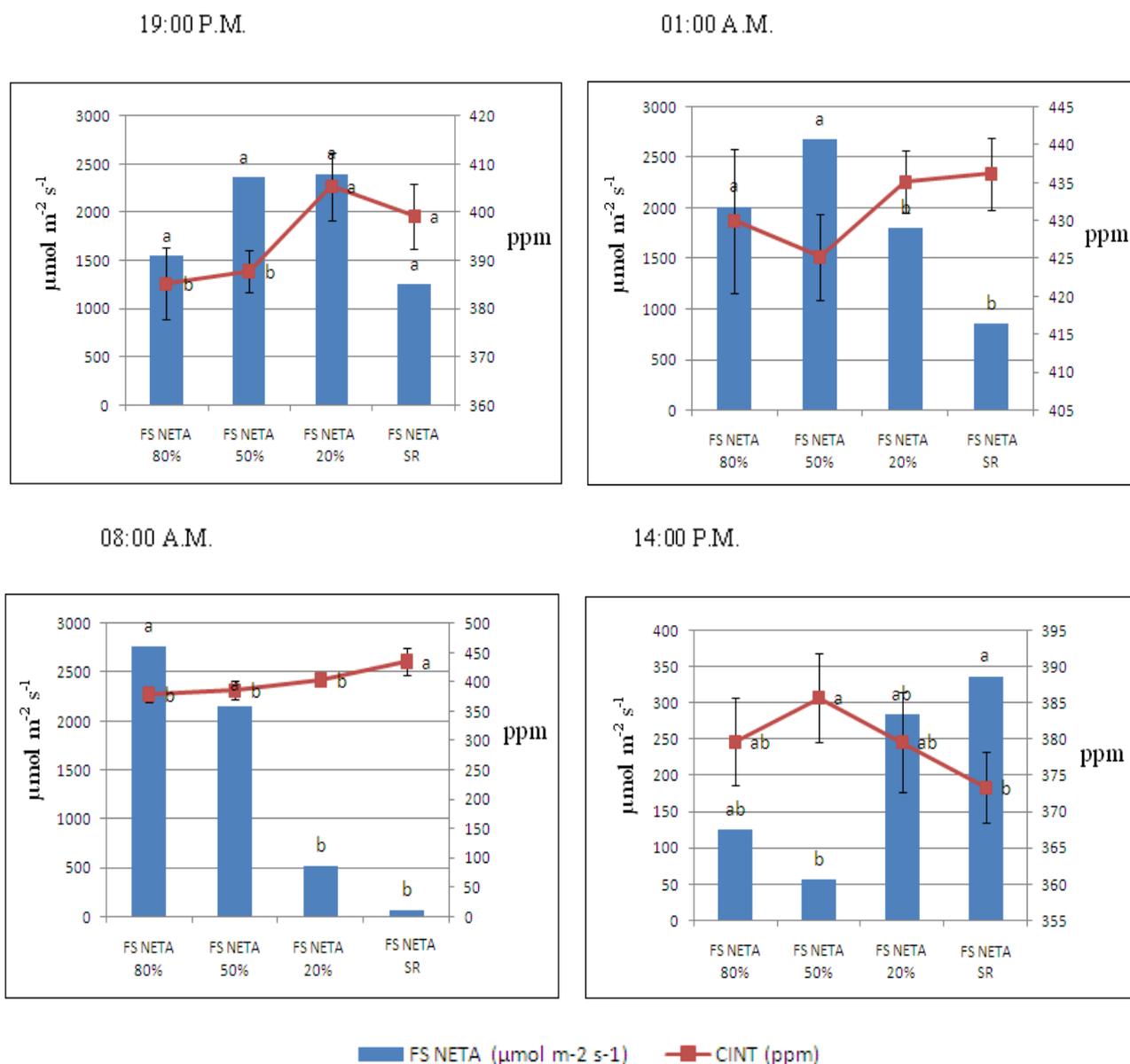


Figura 11. Tasa de asimilación de CO<sub>2</sub> en plantas de maguey mezcalero (*Agave angustifolia* Haw) en función de la concentración intracelular de CO<sub>2</sub>. Segunda lectura (28/07/09). Los datos se presentan como promedio ± desviación estandar (n=12).

### 5.3.6 Tasa fotosintética y crecimiento de maguey mezcalero

La aplicación continua de humedad en el suelo influyó de manera positiva sobre el incremento en AP, DT y NH. Los tratamientos donde se aplicaron riegos fueron estadísticamente diferentes al testigo para todas estas variables, los mejores resultados se obtuvieron con el tratamiento con 80% de HA.

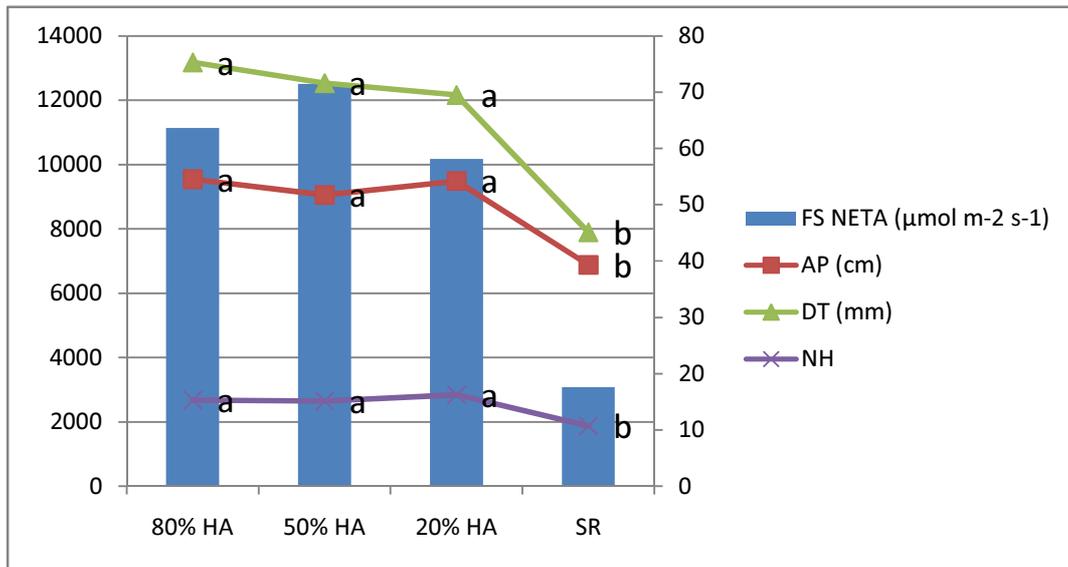


Figura 12. Influencia de la tasa de asimilación neta de  $\text{CO}_2$  sobre el crecimiento de plantas de maguey mezcalero (*Agave angustifolia* Haw.). Valores medios seguidos por la misma letra en cada punto, no difieren significativamente (Tukey;  $P \leq 0.05$ ).

Una de las variables más importantes a considerar para la evaluación de la eficiencia fotosintética es la acumulación de materia seca, ya que la cantidad final de  $\text{CO}_2$  fijado por la planta se reflejara en la acumulación de materia seca, de tal manera que a mayor asimilación de  $\text{CO}_2$ , mayor acumulación de materia seca José (1995). En este experimento se obtuvieron diferencias significativas en cuanto a la acumulación de materia seca en hojas, tallos y raíces. Para estas tres variables la mayor acumulación de materia seca se obtuvo en los tratamientos con 50% y 80% de HA, los cuales fueron diferentes al testigo (Figura 13). Aunque al nivel de 80% de HA se presentaron los niveles más altos DE acumulación de materia seca, este nivel presento una tasa fotosintética menor que a un nivel de 50% de HA. Sin embargo, se presentaron diferencias estadísticas significativas entre estos dos niveles de HA solo para la variable PST. El nivel de HA al 80% fue estadísticamente diferente a los valores obtenidos con un 20% de HA y al testigo para las variables PSH, PST Y

PSR, por otra parte el nivel de humedad al 50% solo fue estadísticamente diferente a los valores obtenidos con el testigo (SR) para estas mismas variables.

José (1995) mencionó que en *A. angustifolia* Haw. el número de hojas nuevas desarrolladas se relacionó con factores ambientales tales como temperatura, irradiación y precipitación. En este estudio *A. angustifolia* presentó en los meses con mayor precipitación y, en consecuencia, con mayor humedad EN EL suelo Y temperaturas ambientales promedio de 18°C; una mayor producción de hojas y, en general de crecimiento vegetativo.

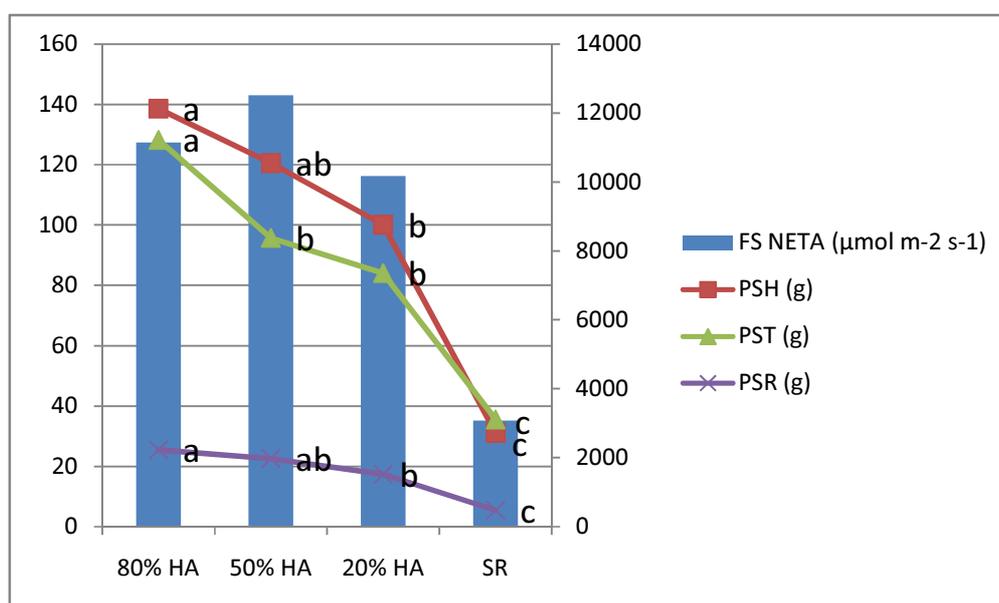


Figura 13. Influencia de la tasa de asimilación neta de  $\text{CO}_2$  sobre la producción de materia seca de plantas de maguey mezcalero (*Agave angustifolia* Haw.). Valores medios seguidos por la misma letra en cada punto, no difieren significativamente (Tukey;  $P \leq 0.05$ ).

### 5.3.7 Interacción de niveles de humedad aprovechable y fertilizantes de liberación controlada sobre la fisiología de maguey mezcalero.

Al evaluar el factor FLC de forma individual no se encontraron diferencias significativas entre tratamientos donde se aplicaron FLC. La interacción FLC\*HA fue significativa en las variables fisiológicas TH, CS, RS y CINT (Cuadros 2, 3 y 4).

Cuadro 2. Respuesta de variables fisiológicas a la interacción humedad y fertilizantes de liberación controlada en maguey mezcalero *Agave angustifolia* Haw. Primera medición.

Tratamiento	Intervalo 19:00 p.m.			Intervalo 01:00 a.m.	Intervalo 06:00 a.m.
	CINT	RS	CS	T° hoja	T° hoja
1 SR y SF	<b>350.84 a</b>	<b>2.08 b</b>	<b>0.54 a</b>	<b>14.60 f</b>	<b>17.63 c</b>
2 SR + TB	<b>337.89 abc</b>	<b>2.61 b</b>	<b>0.41 abc</b>	<b>15.40 def</b>	<b>21.15 a</b>
3 SR + M6	<b>311.35 abcd</b>	<b>2.82 b</b>	<b>0.31 abcde</b>	<b>15.82 cdef</b>	<b>17.58 c</b>
4 SR + M3	<b>347.60 ab</b>	<b>2.00 b</b>	0.53 a	<b>15.29 ef</b>	<b>19.21 b</b>
5 20 y SF	301.02 abcd	6.53 ab	0.19 bcde	<b>15.07 ef</b>	14.88 fg
16 20 + TB	281.32 abcd	2.78 b	0.38 abcd	<b>15.41 def</b>	16.66 d
7 20 + M6	300.53 abcd	2.93 b	0.34 abcd	<b>14.48 f</b>	15.51 ef
8 20 + M3	268.54 abcd	2.12 b	0.48 ab	<b>14.75 f</b>	16.05 de
9 50 y SF	258.74 abcd	8.35 ab	0.12 cde	16.61 bcde	14.77 fg
10 50 + TB	301.34 abcd	9.26 ab	<b>0.12 de</b>	15.15 ef	14.16 g
11 50 + M6	<b>240.61 cd</b>	5.28 ab	0.19 bcde	15.95 cdef	14.85 fg
12 50 + M3	260.82 abcd	5.72 ab	0.18 cde	15.20 ef	<b>14.52 g</b>
13 80 y SF	<b>235.56 d</b>	3.86 b	0.27 abcde	16.96 abcd	<b>14.76 fg</b>
14 80 + TB	342.90 ab	4.09 b	<b>0.04 e</b>	<b>18.48 a</b>	<b>14.31 g</b>
15 80 + M6	<b>250.59 bcd</b>	<b>6.13 ab</b>	<b>0.17 cde</b>	<b>17.04 abc</b>	<b>14.69 g</b>
6 80 + M3	297.52 abcd	<b>15.56 a</b>	<b>0.09 de</b>	<b>17.57 ab</b>	<b>14.67 g</b>

20= 20% HA; 50= 50% HA; 80= 80% HA; SR= sin riego; SF= sin fertilizante; TB= Turf Builder®; M6= Multigro (6)®; M3= Multigro (3) ®. Valores medios seguidos por la misma letra en cada columna, no difieren significativamente (Tukey;  $P \leq 0.05$ ). ).

Para la primera medición las tendencias fueron similares a las encontradas al evaluar de manera individual los diferentes niveles de HA. La TH se incrementó al disminuir los niveles de HA en el suelo. La RS solamente presentó diferencias estadísticas en el intervalo de las 19:00 P.M., se observó una tendencia clara, los tratamientos sin riego presentaron una menor RS. Los tratamientos con 80% y 50% de HA presentaron los valores más altos de RS, el tratamiento con 80% de HA y

M3 presento el valor más alto que todos los tratamientos (15.56), 7 veces mayor que el tratamiento que presento la RS mas baja, el cual fue el testigo sin riego mas M3(2.0) (Cuadro 2). Para las variables CS y CINT los valores mas altos lo presentaron los testigos sin riego y sin fertilizante, se observó que a mayor humedad, menor CS y CINT (Cuadro 3).

Cuadro 3. Respuesta de variables fisiológicas a la interacción humedad y fertilizante en maguey mezcalero (*Agave angustifolia* Haw.) Segunda medición

Tratamiento	Intervalo 8:00 a.m.	Intervalo 14:00 a.m.			Intervalo 19:00 a.m	
	T° hoja	T° hoja	CINT	RS	T° Hoja	CS
SR y SF	<b>29.28 b</b>	37.44 bcde	372.74 b	<b>0.40 c</b>	<b>23.26 g</b>	<b>15.56 a</b>
SR + TB	<b>31.44 a</b>	35.51 ef	376.42 b	<b>0.37 c</b>	<b>23.52 fg</b>	<b>9.26 ab</b>
SR + M6	<b>26.87 cd</b>	<b>38.88 abc</b>	376.26 b	<b>0.47 c</b>	<b>23.83 fg</b>	<b>8.28 ab</b>
SR + M3	<b>31.12 a</b>	37.17 bcdef	368.11 b	<b>0.40 c</b>	<b>23.25 g</b>	6.74 b
20 y SF	26.62 cd	<b>40.38 a</b>	372.75 b	0.57 bc	25.03 de	3.89 b
20 + TB	27.25 c	36.40 def	<b>383.57 ab</b>	0.62 bc	23.89 f	9.87 ab
20 + M6	26.75 cd	39.03 abc	<b>379.54 b</b>	0.60 bc	24.72 e	4.33 b
20 + M3	27.08 c	<b>35.08 f</b>	<b>382.59 ab</b>	0.62 bc	24.03 f	4.82 b
50 y SF	21.06 g	37.16 cdef	<b>405.58 a</b>	0.79 abc	25.51 d	2.85 b
50 + TB	25.27 de	39.14 abc	377.04 b	0.62 bc	24.84 e	3.64 b
50 + M6	23.37 f	38.47 abcd	377.04 b	0.63 bc	25.11 de	<b>2.58 b</b>
50 + M3	24.12 ef	38.09 abcd	383.32 ab	<b>0.75 abc</b>	24.89 de	<b>2.85 b</b>
80 y SF	<b>21.26 g</b>	38.60 abcd	379.93 b	<b>0.94 ab</b>	26.16 c	<b>2.21 b</b>
80 + TB	<b>20.68 g</b>	<b>39.48 ab</b>	377.99 b	<b>1.14 a</b>	<b>27.26 a</b>	<b>2.98 b</b>
80 + M6	<b>21.12 g</b>	37.25 bcdef	381.55 b	<b>0.72 abc</b>	<b>26.30 abc</b>	<b>2.42 b</b>
80 + M3	<b>21.20 g</b>	38.76 abc	379.32 b	0.65 bc	<b>26.86 ab</b>	5.48 b

20= 20% HA; 50= 50% HA; 80= 80% HA; SR= sin riego; SF= sin fertilizante;TB= Turf Builder®; M6= Multigro (6)®; M3= Multigro (3) ®.Valores medios seguidos por la misma letra en cada columna, no difieren significativamente (Tukey;  $P \leq 0.05$ ). ).

Al analizar los resultados de la interacción humedad\*FLC para los intervalos de la segunda medición que presentaron diferencias estadísticas, se observó que se presentaron las mismas tendencias que en la primera medición. Sin embargo, la RS aunque presentó la misma tendencia que en la primera medición en la segunda se presentaron valores mucho más bajos para esta variable. La CS presentó valores mucho mayores que en la primera medición, los resultados obtenidos para estas dos variables (RS y CS) en la segunda medición pueden explicar el haber obtenido tasas mucho mayores de asimilación de CO<sub>2</sub> (Cuadro 3). La CINT también podría explicar las mayores tasas de asimilación de CO<sub>2</sub> en la segunda medición ya que se obtuvieron valores mas altos que en la primera medición (Cuadros 3 y 4).

Cuadro 4. Continuación

Tratamiento	Intervalo 01:00 a.m.		
	T° hoja	CINT	RS
SR y SF	<b>17.49 b</b>	441.46 a	<b>0.00 b</b>
SR + TB	<b>17.11 b</b>	430.73 abc	<b>0.01 ab</b>
SR + M6	<b>17.62 b</b>	436.18 ab	<b>0.00 b</b>
SR + M3	<b>17.04 b</b>	436.43 ab	<b>0.00 b</b>
20 y SF	18.01 b	434.19 abc	<b>0.00 b</b>
20 + TB	17.59 b	435.79 ab	<b>0.00 b</b>
20 + M6	17.87 b	437.57 a	0.01 ab
20 + M3	17.63 b	432.93 abc	0.06 ab
50 y SF	18.09 b	430.49 abc	0.02 ab
50 + TB	18.24 b	430.13 abc	0.01 ab
50 + M6	18.28 b	419.54 c	0.07 ab
50 + M3	18.30 b	420.74 bc	0.02 ab
80 y SF	17.80 b	428.50 abc	0.09 ab
80 + TB	<b>20.99 a</b>	418.95 c	<b>0.11 a</b>
80 + M6	17.62 b	432.97 abc	<b>0.03 ab</b>
80 + M3	17.44 b	439.44 a	<b>0.09 ab</b>

20= 20% HA; 50= 50% HA; 80= 80% HA; SR= sin riego; SF= sin fertilizante;TB= Turf Builder®; M6= Multigro (6)®; M3= Multigro (3) ®.Valores medios seguidos por la misma letra en cada columna, no difieren significativamente (Tukey;  $P \leq 0.05$ ). ). Los datos se presentan como promedio  $\pm$  desviación estandar (n=3).

#### 5.4 CONCLUSIONES

El contenido de humedad aprovechable en el suelo influyó de manera positiva en la asimilación neta de CO<sub>2</sub> en maguey mezcalero. Los tratamientos con 50 y 20% de humedad aprovechable fueron los que presentaron las tasas mas altas de asimilación de CO<sub>2</sub>.

El contenido de humedad aprovechable en el suelo influyó de manera directa en la temperatura de la hoja (a mayor nivel de humedad mayor temperatura de la hoja y a menor temperatura de la hoja mayor asimilación de CO<sub>2</sub>), resistencia estomática (A mayor contenido de humedad en el suelo mayor resistencia estomática y a menor resistencia estomática mayor tasa de asimilación de CO<sub>2</sub>), conductancia estomática (a mayor nivel de humedad aprovechable en el suelo menor conductancia estomática y a mayor conductancia estomática mayor asimilación de CO<sub>2</sub>), contenido intracelular de CO<sub>2</sub> (a mayor humedad aprovechable en el suelo menor concentración intracelular de CO<sub>2</sub> y a mayor asimilación de CO<sub>2</sub> menor concentración intracelular de CO<sub>2</sub>).

El contenido de humedad aprovechable en el suelo influye de manera positiva sobre la acumulación de materia seca y diámetro de tallo en maguey mezcalero siendo los tratamientos con 80% de humedad aprovechable el que presento los mejores resultados y el testigo (SR) los valores mas bajos.

Los niveles de humedad aprovechable al 50 y al 20% presentaron los mejores resultados para las variables altura de planta, área foliar y número de hojas desplegadas.

La aplicación de fertilizantes de liberación controlada no tuvo efecto significativo sobre la respuesta de las variables fisiológicas medidas en maguey mezcalero.

En cuanto a la interacción humedad aprovechable y fertilizantes de liberación controlada, en la primera medición y para la variable temperatura de la hoja los valores mas altos se obtuvieron en los tratamientos sin riego y fertilizados en el intervalo de las 06:00 a.m. y viceversa para el intervalo de la 01:00 a.m. En la segunda medición en los intervalos de las 14:00, 19:00 y 01:00 a.m. la temperatura mas alta se obtuvo con los tratamientos con riego y fertilizados, caso contrario para el intervalo de las 08:00 a.m.

La concentración intracelular de CO<sub>2</sub> y conductancia estomática en el intervalo de las 19:00 para la primera medición, se obtuvieron en los tratamientos sin riego y fertilizados, la RS para este mismo intervalo presento los valores mas altos en los tratamientos con 80% de humedad aprovechable y fertilizados. La misma tendencia para estas variables se observo en la segunda medición.

## 5.5 LITERATURA CITADA

Davies, J.W. y J. Zhang. 1991. Root signals and the regulation of growth and development of plants in drying soils. *Ann. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* 42: 55-76.

Dodd A. N. 2001. The role and regulation of starch degradation during acclimation to salinity and CAM induction in *Mesembryanthemum crystallinum*. PhD Thesis, University of Newcastle upon Tyne.

Ghannoum O. 2008. C<sub>4</sub> photosynthesis and water stress. Published by Oxford University Press on behalf of the Annals of Botany Company.

Gibson, A.C. y Nobel, P.S. (1986). *The cactus primer*. Cambridge, MA: Harvard University Press. 286 pp.

Hanscom, Z. y Ting, I.P. (1978). Irrigation magnifies CAM-photosynthesis in *Opuntia basilaris* (Cactaceae). *Oecologia*, 33: 1–15.

Israel, A.A. y P.S. Nobel. 1995. Growth temperature versus CO<sub>2</sub> uptake, Rubisco and PEP Case activities, and enzyme high temperature sensitivities for a CAM plant. *Plant Physiol. Biochem.* 33: 345-351.

José-Jacinto, R. 1995. Estimación de la productividad en *Agave angustifolia* Haw. Tesis de Maestría, Colegio de Postgraduados, México.

Luttge, U. y P.S. Nobel. 1984. Day-Night variations in malate concentration, osmotic pressure and hydrostatic pressure in *cereus validus* *Plant Physiol.* 75: 804-807.

Maathuis, F.J.M., A.M. Ichida, D. Sanders y J.I. Schroeder. 1997. Roles of higher plant K channels. *Plant Physiol.* 114; 1141-1149.

- Manjarrez-Martínez, M.J., R. Ferrera-Cerrato, y M.C. González-Chávez. 1999. Efecto de la vermicomposta y la micorriza arbuscular en el desarrollo y tasa fotosintética de chile serrano. *Terra*. 17:9-15.
- Nobel, P.S. 1991. Tansley review no. 32. Achievable productivities of certain CAM plants: basis for high values compared with C3 and C4 plants. *New Phytol.* 119: 183–206.
- Nobel P.S.1976. Water relations and Photosynthesis of a desert CAM Plant, *Agave deserti*. *Plant Physiol.* 58: 576-582.
- Nobel P.S. y M. Cui.1992. Hydraulic conductances of the soil, the root-soil air gap, and the root: changes for desert succulents in drying soil. *J. Exp. Bot.* 43: 317-326.
- Nobel, P.S y Hartsock, T.L. (1984). Physiological responses of *Opuntia ficus-indica* to growth temperature. *Physiologia Plantarum*, 60: 98–105.
- Nobel, P.S. 1988. *Environmental Biology of Agave and Cacti*. Cambridge University Press, New York, 270 pp.
- Nobel, P. S. 1991. Environmental influences on CO<sub>2</sub> uptake by Agaves, CAM plants with high productivities. *Econ. Bot.* 44(4): 488–502.
- Nobel, P. S. 1994. *Remarkable Agaves and Cacti*. Cambridge University Press. New York, USA. 166 p.
- Nobel, P. S. 1995. Environmental Biology. In: Barbera, G., Inglese, P., Pimienta-Barrios, E (Eds). *Agroecology, Cultivation, and Uses of Cactus Pear*. FAO. Plant Production and Protection Paper, Roma, Italia. 216p
- Nobel, P. S. , García-Moya y E. Quero.1992.High annual productivity of certain agaves and cacti under cultivation. *Plant Cell Env.*15: 329–335.
- Nobel, P. S., M. Castañeda, G. North, E.Pimienta-Barrios y J. A. Ruiz-Corral.1998. Temperature influences on leaf CO<sub>2</sub> exchange, cell viability and cultivation range for *Agave tequilana*. *J. Arid Env.* 39:1–9.
- Nobel, P. S., E. Pimienta-Barrios, J. Zañudo-Hernández, y B. C. Ramírez-Hernández. 2002. Historical aspects and net CO<sub>2</sub> uptake for cultivated crassulacean acid metabolism plants in Mexico. *Ann. Appl. Biol.* 140: 133–142.

Nobel, P.S. & Pimienta-Barrios, E. (1995). Monthly stem elongation for *Stenocereus queretaroensis*: Relationships to environmental conditions, net CO<sub>2</sub> uptake, and seasonal variations in sugar content. *Environmental and Experimental Botany*, 35: 17–42.

Olien, W.C. & A.N. Lakso. 1986. Effect of rootstocks on apple (*Malus domestica*) tree water relations. *Physiol. Plantarum*. 67:421-430.

Palma, C. F. 1998. Las especies útiles de género *Agave* en Oaxaca. *Huaxyácan* 16:12-16.

Pimienta-Barrios, E., J. Zañudo, E. Yopez, E. Pimienta-Barrios y P. S. Nobel. 2000. Seasonal variation of net CO<sub>2</sub> uptake for cactus pear (*Opuntia ficus-indica*) and pitayo (*Stenocereus queretaroensis*) in a semiarid environment. *J. Arid Env.* 43: 73–83.

Pimienta-Barrios, E. y Nobel, P.S. (1998). Vegetative, reproductive, and physiological adaptations to aridity of pitayo [*Stenocereus queretaroensis* (Weber) Buxbaum]. *Economic Botany*, 52: 391–401.

Roberts, S.K. 1998. Regulation of K in maize roots by water stress and abscisic acid. *Plant Physiol.* 116: 145-153.

Rodriguez, G. R., Jasso de Rodriguez, D., Gil-Marin, J.A., Angulo S.J.L., Lira-Saldivar, R.H. 2007. Growth, stomatal resistance and transpiration of *Aloe vera* under different soil water potentials. *Industrial Crops and products* : 25 (2007) 123-128.

Ruiz-Corral, J.A., Pimienta-Barrios, E., Zañudo, H.J. 2002. Regiones termicas optimas y marginales para el cultivo del agave tequilaza en el estado de Jalisco. *Agrociencia* 36: 41-53.

Ruiz, L.P., C.J. Atkinson y T.A. Mansfiel. 1993. Calcium in xilem and its influence on the behaviour of stomata. *Phil. Trans. R. Soc. London*.

Salisbury, F.B. y C.W. Ross. 1993. *Fisiología Vegetal*. Trad. al español por V. González-Velasquez. Grupo Editorial Iberoamericana. México, D.F.

Szarek, S.R. y I.P. Ting, 1975. Photosynthetic efficiency of plants CAM in relation to C<sub>3</sub> y C<sub>4</sub> plants. Pp. 289-297. *In*: R. Marcelle (ed.). *Environmental and biological control of Photosynthesis*. W. Junk. The Hague, The Netherlands.

## RECOMENDACIONES Y PERSPECTIVAS

Sabiendo que existe poca información acerca de esta especie, a continuación se enuncian algunas recomendaciones que podrían ayudar a entender de mejor manera la respuesta de plantas de maguey mezcalero a los factores que se evaluaron en este trabajo (Humedad y fertilizantes de liberación controlada):

Realizar investigaciones evaluando diferentes dosis de fertilizantes de liberación controlada, en maguey mezcalero.

Evaluar el efecto de la interacción humedad aprovechable del suelo y fertilizantes de liberación controlada en plantas de maguey mezcalero de diferentes edades.

Evaluar la interacción de diferentes niveles de humedad y fertilizantes de liberación controlada en campo, directamente en las zonas productoras de este cultivo.

Evaluar el efecto de los FLC, por un periodo de tiempo mas prolongado, con la finalidad de conocer el verdadero potencial que tienen estos materiales en base al periodo de liberación que maneje el fabricante.

En cuanto a la evaluación de parámetros fisiológicos, seria recomendable hacer más mediciones en intervalos de tiempo mas cortos (2 horas), tanto en el día como en la noche.

Sería importante también realizar este mismo experimento, en condiciones controladas (invernadero), para realizar una comparación de los resultados obtenidos en este experimento a campo abierto.

Una recomendación importante es utilizar algunos otros equipos para llevar acabo las mediciones fisiológicas, seri conveniente utilizar un porómetro para determinar temperatura de la hoja y respiración.

Las perspectivas en cuanto al cultivo de maguey mezcalero son bastante buenas ya que aunque esta especie es únicamente reconocida internacionalmente por la producción de mezcal, actualmente se han estado realizando investigaciones acerca de otros usos que se pueden obtener de (medicina, construcción, alimentación, industria textil, etc) lo que hace vislumbrar un futuro alentador para los productores de este cultivo (que en la mayoría son productores de zonas rurales y de escasos recursos), ya que pueden hacer un uso mas eficiente de toda la planta y no solamente depender de la producción de mezcal, es por eso que es urgente la necesidad de investigación en esta especie en todos los campos explorados y no explorados.