

Características y productividad de una planta MAC, *Agave tequilana* desarrollada con fertigación en Tamaulipas, México

Lamberto Zúñiga-Estrada^{1§}
Enrique Rosales Robles¹
María de Jesús Yáñez-Morales²
Cuauhtémoc Jacques-Hernández³

¹Instituto Nacional de Investigación Forestales, Agrícolas y Pecuarias. (enrique_77840@yahoo.com).

²Colegio de Postgraduados. (yanezmj@colos.mx). ³Instituto Politécnico Nacional-Centro de Biotecnología Genómica-Reynosa. (aguilaquecae@yahoo.com).

§Autor para correspondencia: zuniga.lamberto@inifap.gob.mx.

Resumen

En el cultivo de *Agave tequilana*, los estudios se han restringido a una parte de su largo ciclo y a periodos cortos de tiempo, por tal razón, con el objetivo de evaluar las características agronómicas en planta y piña en un ciclo completo de la planta, se establecieron hijuelos provenientes de Jalisco en el sur de Tamaulipas en tres condiciones: a) en temporal y sin fertilizante (TA); b) fertigación, además de la precipitación, recibieron agua y nutrientes (N, P, K, Ca, Mg, y micronutrientes) mediante un sistema de riego por goteo; y c) FB+fertigación, adicional a lo anterior, éstas plantas recibieron fertilización de base (FB), con N, P, K y micronutrientes, cada tratamiento tuvo tres repeticiones. Se realizaron ocho evaluaciones destructivas utilizando una planta por unidad experimental, septiembre 2004, febrero del 2005, octubre de 2005, 2006, 2007, 2008, 2009 y 2010. Las plantas desarrolladas con fertigación y fb+fertigación, en promedio superaron en 26% y 57% la altura y número de hojas de plantas del TA, respectivamente; la mayor producción de Materia Seca (MS) anual fue 51.8 t ha⁻¹, estimándose un total de biomasa por planta de 491.4 y 456.1 t ha⁻¹ y 218.1 y 252.4 t ha⁻¹ en la piña, respectivamente. En plantas del TA la biomasa total fue 97 t ha⁻¹ y un rendimiento de piña de 46.5 t ha⁻¹. En piña los azúcares evaluados en °Brix y azúcares reductores totales (ART) no fueron afectados por los tratamientos. La concentración de ART en la piña fluctuó entre 26.8 y 29%. La concentración de glucosa y fructosa fue similar en etapas iniciales de desarrollo de la piña; Sin embargo, al final del ciclo durante la etapa de máximo crecimiento el valor medio en la concentración de fructosa fue de 246.8 g por kg MS de piña y representó 88% de los dos monosacáridos solubles evaluados, la glucosa presentó un comportamiento inverso y representó el restante 12%.

Palabras clave: azúcares reductores, MAC, producción de biomasa, riego por goteo.

Recibido: marzo de 2018

Aceptado: mayo de 2018

Introducción

Mejorar los rendimientos actuales en los sistemas de producción agrícola, aún con los aumentos de temperatura y CO₂ que se registran como efecto del cambio climático, es un reto; una de las alternativas para afrontarlo, precisa dilucidar la evolución, características genómicas y mecanismos de regulación de las plantas con metabolismo ácido de las crasuláceas (MAC); transfiriéndose la ingeniería MAC a cultivos con fotosíntesis C₃ y C₄, con el objetivo de incrementar el uso eficiente del agua, reducir las pérdidas de los cultivos por efecto de sequías y contribuir a la expansión de la producción agrícola en tierras abandonadas o semiáridas (Owen y Griffiths, 2014; Heikkinen, 2015; Wullschleger *et al.*, 2015). El metabolismo MAC es propio de la familia Agavácea de la cual 151 especies son endémicas de México. A estas plantas se les conoce como magueyes, agaves o mezcales (Gentry, 1982).

En México, las especies de importancia económica son *A. tequilana* cultivado para la producción de tequila; *A. angustifolia*, *A. salmiana* y *A. americana* entre otras, usadas en la elaboración del mezcal; *A. fourcroydes* y *A. lechuguilla* en la obtención de fibra (Escamilla-Treviño, 2012). En los últimos años estas plantas han recibido atención, debido a que en la MS de las hojas presentan paredes celulares que contienen entre 3 y 15% de lignina y 68% de celulosa; esta baja concentración de lignina consume menos energía cuando es utilizada para producir biocombustibles, (Iñiguez-Covarrubias *et al.*, 2001; Borland *et al.*, 2009; Nobel, 2010; Somerville *et al.*, 2010; Li *et al.*, 2014).

Estudios realizados en especies de agave, han asociado la fijación de CO₂ con la humedad de suelo (HS), temperatura (T), radiación fotosintéticamente activa (RFA), salinidad (S) y deficiencias nutrimentales (DN), entre otros factores. Con respecto a la T, en plantas de *A. tequilana* que recibieron 15 °C/5 °C de temperatura durante día/noche, se registró una fijación de 298 mmol m⁻² de CO₂ en 24 h; valor de fijación que disminuyó 10 y 72% al incrementarse la temperatura de 25 °C/15 °C y 35 °C/25 °C, respectivamente (Pimienta *et al.*, 2001). Por otra parte, cuando HS no fue un factor limitante en *A. deserti* que recibió riego, la apertura nocturna de estomas, característica en estas plantas MAC, fue modificada, registrándose durante el día la apertura de estomas, fijándose en el periodo de luz 97% del CO₂ requerido por la planta (Hartsock y Nobel, 1976).

Los estudios en agave, se han realizado en periodos de tiempo entre 24 horas y dos años, en diferentes etapas del ciclo de la planta; sin considerar, la compleja interacción entre etapas de desarrollo de la planta, condiciones climatológicas y fertilidad del suelo, etc. Desestimándose el potencial de estas plantas MAC, cuando son desarrolladas sin limitaciones de humedad. Por tal razón, el objetivo del presente estudio fue estudiar un ciclo completo de la planta de *A. tequilana*, documentar el comportamiento de sus características agronómicas, rendimiento y calidad, cuando se desarrolla en una región cálida del sur de Tamaulipas, bajo dos sistemas de producción a) tradicional de temporal y sin fertilizante; y b) un sistema de producción intensiva, recibiendo todo el ciclo agua y nutrimentos mediante un sistema de riego por goteo.

Materiales y métodos

En mayo de 2004 se estableció el cultivo de agave en terrenos del Campo Experimental “Las Huastecas” del Instituto Nacional de Investigaciones Forestales Agrícolas y Pecuarias (INIFAP), localizado en el municipio de Altamira, Tamaulipas, México, a 22° 33’ 59” latitud norte, 98° 09’

49" longitud oeste y 15 msnm. Las plantas se desarrollaron en un Vértisol éutrico (INEGI, 2016), caracterizado a partir de una muestra compuesta, tomada a 0.3 m de profundidad, en 24 puntos del terreno. En la muestra de suelo, se determinó: textura, retención de humedad, materia orgánica, capacidad de intercambio catiónico, cationes intercambiables y pH, de acuerdo con la Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAP-2000 (Cuadro 1).

Cuadro 1. Propiedades físicas y químicas del suelo arcilloso donde se desarrolló el cultivo de agave.

Análisis mecánico			Humedad del suelo		pH (1:2)	MO (%)	CIC	Cationes intercambiables			
Arena	Limo	Arcilla	CC	PMP				K	Ca	Mg	Na
	(%)		(%)					cmol ₍₊₎ kg ⁻¹			
26.9	23	50.1	42.6	20.6	8.7	1.1	52.5	0.37	43.2	4.4	1.35

CC= capacidad de campo; PMP= punto de marchitez permanente; MO= materia orgánica; CIC= capacidad de intercambio catiónico.

Hijuelos de agave provenientes del estado de Jalisco, se establecieron en tres condiciones de manejo del fertilizante: a) testigo absoluto (TA), en condiciones de temporal y sin fertilizante; b) fertigración, además de la lluvia, cada planta recibió durante su desarrollo a través de un sistema de riego por goteo y en 348 eventos de riego, 3 960.8 L de agua, 315.3 g de N; 179.9 g de P₂O₅; 353.4 g de K₂O; 111 g de CaO y 89.1 g de MgO; y c) FB+fertigración, previo al trasplante, estas plantas recibieron 162-150-250 kg ha⁻¹ de N, P y K, respectivamente como fertilización de base (FB), además del agua y fertilizantes que recibieron las plantas en el tratamiento anterior. La fuente de fertilizantes para aportar P fue el monofosfato de amonio (11-52-00), mientras que para el K se utilizó el nitrato de potasio (13-00-44). La FB se complementó con una tonelada por hectárea de Econutriente[®] como fertilizante orgánico, enriquecido con 5 kg ha⁻¹ de sulfato de magnesio, fierro y zinc. Cada tratamiento se estableció en tres repeticiones.

El terreno donde se estableció el estudio fue preparado y bordeado a un metro de distancia entre surcos. Sólo en el caso del tratamiento FB+fertigración, cada tercer surco se aplicó en el fondo el fertilizante en banda; posteriormente se rajó el bordo, cubriéndose con suelo el fertilizante, el cual quedó a una profundidad aproximada de 30 cm por debajo de donde se plantaron hijuelos de tamaño toronja y piña (Rendón *et al.*, 2011). La unidad experimental consistió en seis hileras de plantas de agave a 3 m de separación y 1.5 m entre plantas, estableciéndose 16 plantas por hilera y 96 por unidad experimental de 405 m².

Durante el desarrollo del cultivo se realizaron ocho evaluaciones, septiembre 2004, febrero de 2005, octubre del 2005, 2006, 2007, 2008, 2009 y 2010, en cada muestreo, al azar se extrajo una planta por unidad experimental evaluándose, altura de la planta a la espina más alta de las hojas del cogollo, número total de hojas completamente desplegadas, peso húmedo (PH) y materia seca (MS) de planta y piña. En éste último órgano con un refractómetro portátil refracto 30PX, Mettler Toledo se determinó °Brix, los azúcares reductores totales (ART) por el método Ting (1956) y fructosa y glucosa, por Cromatografía líquida de alta eficiencia (HPLC por sus siglas en Inglés) con un equipo Hewlett-Packard/Agilent Technologies modelo 1100 equipado con un detector diferencial de índice de refracción empleando un columna Aminex HPX-87H (Bio-Rad) de 300 x 7.8 mm, a una temperatura de 40 °C, empleando una solución de H₂SO₄ 0.005 N como efluente a un flujo de 0.4 mL min⁻¹.

En cada evaluación, los datos obtenidos en las variables fueron analizados como un diseño completamente al azar y los valores medios se compararon mediante la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$), los valores de las características agronómicas que mostraron significancia se ajustaron a modelos de regresión en función del periodo de crecimiento.

Resultados y discusión

Desde el trasplante hasta la cosecha, se emplearon 77 meses en el estudio, en este periodo el valor medio de temperatura mínima y máxima fue 19.8 y 29.9 °C, respectivamente; registrándose 5 952.2 mm como precipitación total (PPTOT), en 479 eventos. Sin embargo, esta PPTOT representó sólo 59% de la evaporación total registrada (EV). El déficit de precipitación con respecto a la evaporación fue variable durante el ciclo de desarrollo del cultivo, acentuándose entre 54 y 65 MDP; en esta etapa, la precipitación representó sólo el 35 de la EV. Situación que originó menor almacenamiento de agua para riego y disminuyó hasta de 50% el volumen de riego y nutrimentos aportados en los dos últimos años de desarrollo del cultivo, en aquellas plantas desarrolladas con fertigación y FB+fertigación. La disminución del volumen del agua de riego al final del ciclo, originó mayor estrés en las plantas de mayor desarrollo, que fueron las que recibieron fertigación y FB+fertigación, en éstas plantas, 65% de la población estudiada presentaron madurez fisiológica a los 71 MDP (emisión del escape floral), mientras que las plantas desarrolladas en el TA a los 77 MDP, no emitieron escape floral.

Las plantas de agave desarrolladas con Fertigación y FB+Fertigación presentaron también valores superiores ($p \leq 0.05$) de altura de planta, número de hojas, PH y MS de la planta, °Brix y ART a los valores que presentaron en las mismas características las plantas del TA, mientras que la concentración de azúcares evaluados como °Brix y azúcares reductores (AR) no fueron afectados por el manejo (Cuadro 2).

Cuadro 2. Características agronómicas y de calidad de la piña, registradas en la planta de agave desarrollada en 77 meses bajo diferentes condiciones de fertilización.

Descripción de tratamientos	Altura de planta (cm)	Numero de hojas	Planta		Azúcares en piña		
			Peso húmedo (kg)	Materia seca (kg)	°Brix (%)	AR [‡] (g L ⁻¹)	AR Total (kg piña ⁻¹)
Testigo absoluto (TA)	129 b [†]	42.7 b	29.4 b	7.4 b	29.4 a	267.6 a	2.8 b
Fertigación	156 a	131.3 a	138.2 a	38.5 a	31.8 a	289.1 a	13.8 a
FB + fertigación	153.3 a	128.7 a	148.9 a	42.3 a	32 a	290.3 a	15.6 a

[†]= Valores con diferente letra en la misma columna son diferentes (Tukey $p \leq 0.05$); [‡]=azúcares reductores.

Altura y número de hojas por planta

La altura y el número de hojas producidas en las plantas del TA se incrementaron durante todo el ciclo de desarrollo, sus valores fueron significativamente inferiores ($p \leq 0.05$) a los registrados en las plantas desarrolladas con fertigación y FB+fertigación, sin existir diferencias en los valores de

altura de estas últimas plantas. Los valores de ambas características generados en las evaluaciones se ajustaron significativamente a modelos cuadráticos (Cuadro 3), con los que se estimó la tasa anual de acumulación de altura y hojas, durante el desarrollo de la planta, (Cuadro 4).

Cuadro 3. Modelos de regresión, cuadrado medio del error de la regresión (CMER) y coeficientes de determinación generados para la altura y número de hojas registradas en la planta de agave.

Característica estimada	Modelo de regresión	CMER	R ²
Altura (cm)			
Fertigación	Y= -0.042+4.72+39.22	108.61	0.95 [†]
FB+fertigación	Y= -0.052+5.57+30.22	73.35	0.97
Testigo absoluto	Y= 0.006+0.42+58.09	70.61	0.89
Número de hojas			
Fertigación	Y= -0.012+2.16+35.14	190.15	0.84
FB+Fertigación	Y= -0.021+2.80+30.29	243.21	0.81
Testigo absoluto	Y= -0.019+1.73+18.529	34.99	0.81

†= significativo ($p \leq 0.05$).

En las plantas del TA, durante el primer año de establecidas se estimó un incremento de 7 cm en la altura, tasa de crecimiento que aumentó año con año, registrándose durante el sexto año 13 cm como la mayor tasa de crecimiento anual, (Cuadro 4). La altura en las plantas del TA al final del ciclo (77 MDP) fue 129.0 cm, altura que en las plantas que recibieron agua y nutrientes en el sistema de riego se registró en el primer tercio de su ciclo (22 MDP). De igual forma, la tendencia que presentó la planta del TA de incrementar la altura al avanzar la edad, fue invertida en las plantas con Fertigación y FB+fertigación, durante el primer año (12 MDP) éstas plantas presentaron la mayor tasa de crecimiento incrementando su altura 46 y 54 cm, respectivamente; al avanzar el ciclo de desarrollo su tasa de crecimiento disminuyó, a los 48 MDP la altura de la planta sólo se incrementó 14 cm.

Cuadro 4. Tasa anual de crecimiento (cm planta⁻¹) y de producción de hojas (hojas planta⁻¹), estimadas mediante los modelos generados con la información original.

Meses después de plantadas (MDP)	Tasa de crecimiento de altura			Tasa de producción de hojas		
	Fertigación	FB+fertigación	Testigo absoluto	Fertigación	FB+fertigación	Testigo absoluto
	(cm planta ⁻¹ año ⁻¹)			(Hojas planta ⁻¹ año ⁻¹)		
12	46	54	7	37	31	3
24	39	44	9	32	27	3
36	27	29	10	23	20	4
48	15	14	11	13	14	4
60	2	-1	12	4	7	4
72	-10	-15	13	-5	0	4

El número de hojas producidas en la planta de agave presentó un comportamiento similar a la altura previamente descrito. Las plantas del TA a los 41 MDP presentaron 57 hojas y fue la mayor cantidad de hojas; cantidad que representó sólo 43% del número de hojas que en promedio se registraron en las plantas desarrolladas con fertigación y fb+fertigación, las diferencias entre plantas que recibieron fertilizante en el sistema de riego y las que se desarrollaron sin riego fueron significativas ($p \leq 0.05$).

La tasa anual de producción de hojas estimada, permite inferir que la planta del TA en los dos primeros años produjo tres hojas cada año, posteriormente la planta incrementó su producción a cuatro hojas por año; esta tendencia en la tasa anual de producción de hojas, fue invertida en las plantas de agave desarrolladas con fertigación y FB+fertigación (Cuadro 4). En estas últimas plantas durante los dos primeros años se estimó una producción anual de hojas 10 veces superior con respecto a la producción estimada en plantas del TA; al avanzar el ciclo de la planta, la cantidad de hojas producidas por año disminuyó (Cuadro 4), situación que podría asociarse a una disminución de 48% en el volumen de agua de riego y aporte de nutrimentos que recibieron estas plantas en el sexto año de su desarrollo.

La mayor producción de hojas en los primeros años de desarrollo de la planta y su disminución al avanzar el ciclo de la planta, etapa en la que la piña se desarrolla, pueden indicar menor competencia interna de la planta entre ambas estructuras. Estos resultados, difieren a los registrados por Nobel y Valenzuela (1987), en siembras comerciales establecidas en Tequila, Jalisco, quienes consignaron una producción de hojas anual de 34 y 46 en plantas de *A. tequilana*, de tres y seis años, respectivamente.

Biomasa en planta y piña

La biomasa en la planta de agave se incrementó al avanzar su ciclo de desarrollo, tendencia que a los 41 y 77 MDP se modificó negativamente en plantas del TA, mientras que en las desarrolladas con fertigación y FB+fertigación la biomasa decreció sólo al final del ciclo (77 MDP) (Cuadro 5). En la planta del TA dicha disminución de la biomasa puede asociarse directamente a una falta de humedad en el suelo originada por la escasa precipitación registrada entre los 54 y 77 MDP, sin considerar la distribución de la lluvia durante este periodo la precipitación total representó sólo 44% de la evaporación registrada.

En la piña, la biomasa se incrementó durante todo el ciclo, independientemente a las condiciones en las que se desarrolló la planta de agave, indicando esto que, ante un estrés por falta de humedad, la planta sacrifica la acumulación de biomasa en el follaje, en beneficio del desarrollo de la piña, (Cuadro 6). Y este último órgano, hasta los dos años de establecida la planta acumuló 23% de la biomasa total de la planta y al final del ciclo este porcentaje aumentó hasta 49%, valor ligeramente inferior a los 54% de la biomasa reportada en piña de plantas entre 6 y 7 años por Nobel (1990).

Las plantas de agave que recibieron agua y fertilizante en los tratamientos con fertigación y FB+fertigación, presentaron valores de peso fresco (PF) de la planta y piña iguales entre ellas ($p \leq 0.05$), pero muy superiores a los registrados en ambas características de las plantas desarrolladas en el TA; la mayor diferencia en la producción de biomasa acumulada entre estas plantas y las desarrolladas en el TA se observó a los 63 MDP, a esta etapa superaron en promedio 5.5 y 5.7 veces la biomasa total registrada en la planta y piña del TA, respectivamente.

Cuadro 5. Peso fresco (PF) y seco (PS) acumulado en planta y piña (kg) en las etapas de evaluación durante el desarrollo de la planta de agave.

Tratamiento	Meses de desarrollo del agave							
	4	9	17	29	41	53	65	77
Planta								
Peso fresco (kg planta ⁻¹)								
Testigo absoluto	2.4 b [†]	6.2 a	15.2 b	20.4 b	13.8 b	19.5 b	30.4 b	29.4 b
Fertigación	5.2 a	8.9 a	34.1 a	60.9 a	86 a	97.1 a	159.2 a	138.2 a
FB + fertigación	5.4 a	9.1 a	31.1 a	76.2 a	89.5 a	135.6 a	176.1 a	148.9 a
Piña								
Testigo absoluto	0.8 b	1.3 a	2.9 b	5.3 b	6.2 b	8.1 b	11.7 b	14.1 b
Fertigación	1.5 a	2.2 a	8.1 a	15.3 a	23.5 a	33.1 a	63.9 a	66.1 a
FB + fertigación	1.6 a	2.2 a	7.3 a	18.3 a	24 a	46.7 a	69.3 a	76.4 a
Planta								
Peso seco (kg planta ⁻¹)								
Testigo absoluto	0.4 b	0.9 b	2.2 b	3.5 b	3.3 b	5.8 b	7.7 b	6.9 b
Fertigación	0.7 a	1.1 ab	4.7 a	10.7 a	13.4 ab	25 a	41.4 a	36.5 a
FB + fertigación	0.7 a	1.4 a	4.5 a	11.9 a	16.7 a	31.6 a	43.7 a	39.8 a
Piña								
Testigo absoluto	0.1 b	0.2 a	0.7 b	1.2 b	1.4 b	3.7 b	4.1 b	4.5 b
Fertigación	0.2 a	0.4 a	1.3 ab	3.5 a	4.7 ab	12.9 a	21.2 a	23.6 a
FB + fertigación	0.2 a	0.4 a	1.3 a	3.5 a	6.4 a	16.8 a	21.6 a	24.6 a

[†]Valores con diferente letra en la misma columna son diferentes (Tukey $p \leq 0.05$).

La alta producción de MS registrada en plantas de agave desarrolladas con fertigación y FB+fertigación demuestra que los efectos negativos de una temperatura alta sobre la planta de agave mencionados por Nobel *et al.* (1998) y Pimienta-Barrios (2001), fueron minimizados cuando la planta de agave se desarrolló sin limitaciones de humedad durante todo el ciclo, mediante fertigación (Cuadro 5).

Con los valores de biomasa registrados a 77 MDP, en plantas desarrolladas con la técnica de fertigación y FB+fertigación y considerando una densidad de siembra comercial de 3 300 plantas ha⁻¹, se estimó una producción de 491.4 y 456.1 t ha⁻¹ de biomasa total en la planta y en piña de 218.1 y 252.4 t ha⁻¹, respectivamente; mientras que en las plantas del TA la biomasa total estimada en la planta fue 97 t ha⁻¹, y en piña, un rendimiento de 46.5 t ha⁻¹. Lo anterior pone en evidencia que el agua y nutrimentos aportados al cultivo del agave en un sistema de producción intensiva (fertigación) permite obtener rendimientos de piña superiores a las 100.1 t ha⁻¹ que se han registrado como valor medio de producción en el periodo 2006 al 2015 en el estado de Jalisco (SAGARPA, 2016).

De la biomasa total registrada en la planta de agave a los 4 MDP, la MS representó 14% y el restante 86% fue humedad, al avanzar la edad de la planta la MS se incrementó a 27% en detrimento de la humedad. A los cinco años y cinco meses de establecida la planta (65 MDP) se registró la mayor cantidad de MS en la planta, estimándose 140.4 t de MS ha⁻¹ como un valor promedio de producción en plantas desarrolladas con fertigación y FB+fertigación, cantidad significativamente superior a las 25.5 t ha⁻¹ estimadas en la planta del TA (Cuadro 5).

El agua y nutrimentos que recibieron mediante el sistema de riego las plantas desarrolladas con fertigación y FB+ fertigación originó hasta los 65 MDP, incrementos variables en la tasa de producción anual de MS, (Cuadro 7), la mayor tasa de producción anual de MS estimada fue de 54.4 y 49.2 t ha⁻¹, respectivamente, valores que en promedio superaron 6.2 veces la máxima acumulación anual de MS que se presentó en la planta del TA y también superó la producción de 21.1 t ha⁻¹ año⁻¹ reportado por Nobel y Valenzuela (1987) en plantas de *A. tequilana* de seis años, establecidas en el estado de Jalisco.

En las plantas del TA entre los 30 y 41 MDP y durante la última evaluación entre 66 y 77 MDP la tasa anual de producción de MS en la planta completa presentó valores negativos; mientras que, en la piña, la tasa de acumulación de MS estimada se incrementó durante todo el ciclo de desarrollo de la planta (Cuadro 6).

Cuadro 6. Tasa anual de producción de biomasa seca en la piña y la planta de agave desarrollada en tres condiciones de manejo de la fertilización.

Tratamiento	Producción de MS entre etapas de evaluación					
	4 - 17	18-29	30-41	42-53	54-65	66-77
Planta	Entre etapas (kg de MS planta ⁻¹)					
Testigo absoluto	1.8 ±0.15 [†]	1.3 ±0.09	-0.2 ±0.32	2.5 ±3.01	1.9 ±4.04	-0.7 ±0.54
Fertigación	4 ±0.75	6 ±1.93	2.6 ±2.15	11.6 ±7.9	16.5 ±10.15	-4.9 ±2.86
FB + Fertigación	3.8 ±0.41	11.1 ±1.26	4.9 ±3.22	14.9 ±9.57	12 ±10.3	-3.8 ±2.16
Piña						
Testigo absoluto	0.6 ±0.05	0.5 ±0.05	0.2 ±0.06	2.2 ±1.25	0.4 ±1.61	0.5 ±0.3
Fertigación	1 ±0.32	2.3 ±0.24	1.2 ±0.82	8.2 ±3.35	8.3 ±5.57	2.4 ±0.16
FB + Fertigación	1.1 ±0.18	3.3 ±0.39	2.9 ±1.6	10.4 ±1.89	4.8 ±2.56	3 ±1.1

[†]Valores son medias ± error estándar; N= 3 plantas.

Los valores negativos en la tasa anual de producción de MS, indican que en dos evaluaciones continuas realizadas en plantas seleccionadas al azar, el mayor valor de MS se registró en plantas del primer muestreo. Por otra parte, en etapas tempranas de desarrollo de la planta la tasa anual de producción de MS registró valores negativos menores con respecto a los registrados en plantas adultas; situación que puede asociarse entre otras cosas, a una menor demanda de humedad en las plantas pequeñas y también a que en dicho periodo coincidió con el registro de las temperaturas bajas del ciclo que de acuerdo a los estudios de Novel *et al.* (1998) y Pimienta-Barrios *et al.* (2001), pudieron ser más favorables para el desarrollo de la planta. La disminución en la tasa de acumulación de MS en la planta de agave observado al final del ciclo (77 MDP), como se mencionó anteriormente fue asociada también a la reducción en el volumen de agua y fertilizante que recibieron entre los 54 y 77 MDP.

Azúcares en la piña

La concentración de °Brix y ART en la piña a los 6 años y 7 meses de desarrollo de la planta de agave (77 MDP), no fue modificada por el fertilizante y agua que recibió ($p \leq 0.05$), Cuadro 2; en ésta etapa, la concentración de ART fluctuó entre 26.8 y 29%, valores de ART ligeramente inferiores a 30.8 y 32.7%, reportados por Mellado-Mojica y López (2012), en piñas cosechadas en el estado de Jalisco en la época húmeda y seca, respectivamente. De acuerdo a Mancilla-Margalli

y López (2006), las condiciones ambientales originaron que en piñas de *A. tequilana* de 6 años de edad cosechadas en Jalisco se registraran 900 mg g^{-1} de MS de carbohidratos totales solubles (sucrosa, fructosa y glucosa). Mientras que en Guanajuato en piñas de la misma edad sólo fueron 550 mg g^{-1} de MS.

Variaciones en la concentración de ART en la MS de la piña en el presente estudio se registraron por efecto de las condiciones de manejo en el que se desarrollaron las plantas y también por efecto del desarrollo de la planta (Figura 1); es decir, a los 29 MDP el valor medio de ART en la piñas de las tres plantas fue de 246.3 g kg MS , inferior 2.6 y 3.4 veces al valor medio de concentración de ART registrada a 65 y 77 MDP, respectivamente; en éstas dos últimas etapas del cultivo en la piña de la planta desarrollada en el TA se registró la mayor concentración de ART, situación que puede ser asociada a la flexibilidad metabólica de los agaves que les permite adaptarse a diferentes condiciones ambientales donde la disponibilidad de agua en éstas plantas es el factor limitante.

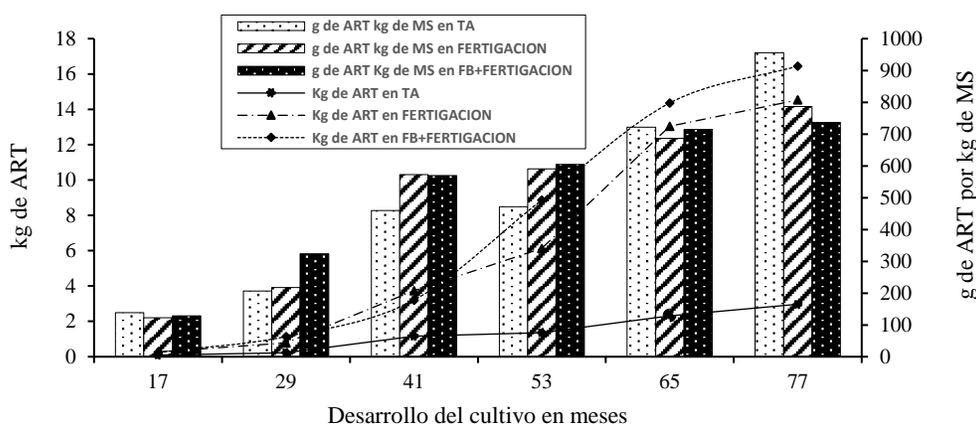


Figura 1. Acumulación de azúcares reductores totales (ART, kg piña^{-1}) y concentración de ART (g kg de MS) en la piña de plantas de agave desarrolladas en tres condiciones de manejo de fertilizantes.

De acuerdo con lo anterior, el agua y fertilizantes aplicados mediante la técnica de fertigación a la planta de agave en la región cálida del sur de Tamaulipas, permitió producir mayores volúmenes de piña, con una concentración de azúcares similar a la determinada en plantas desarrolladas en el TA. Sin embargo, al favorecerse el crecimiento de la piña en plantas que recibieron fertigación y FB+fertigación, se incrementó 5.3 veces la cantidad de ART con respecto a la piña de plantas desarrolladas en el TA ($p \leq 0.05$) (Cuadro 4).

Estas diferencias en los valores de ART en la piña de las plantas del TA y las piñas de plantas desarrolladas con fertigación se observaron desde etapas iniciales de desarrollo de la planta de agave, (Figura 3). Sin embargo, independientemente del manejo nutricional que recibió la planta de agave, a los 41 MDP (3 años y 5 meses) las plantas acumularon en la piña 22% de los ART, con respecto al valor de ART determinados en la piña de agave al final del ciclo (77 MDP), el restante 78% se acumuló en etapas posteriores.

Los monosacáridos que formaron parte de los ART de la piña de agave (fructosa y glucosa) tampoco fueron afectados por el manejo nutricional que recibió la planta. En la etapa inicial a los 17 MDP, la concentración de fructosa y glucosa en los ART presentó un valor medio de 28.25 g

kg⁻¹ de MS de piña (Cuadro 7); es decir, en la primera evaluación, ambos monosacáridos estaban a la misma concentración en la piña. Posteriormente la fructosa y glucosa mostraron una tendencia a incrementar diferencialmente su concentración: con respecto a la glucosa a los 53 MDP se estimó 269.7 g kg⁻¹ de MS de la piña, dicho valor representó 87% de la concentración total de ambos monosacáridos presentes en los ART y el cual disminuyó hasta 12% durante las dos últimas evaluaciones (65 y 77 MDP).

Cuadro 7. Concentración de monosacáridos en la materia seca de la planta de *Agave tequilana* en diferentes etapas de su desarrollo.

Tratamiento	Monosacárido	Meses de desarrollo de la planta (g kg ⁻¹ de MS)					
		17	29	41	53	65	77
Testigo absoluto	Fructosa	11.4 ±0.8 [†]	43.9 ±3	63.3 ±5.7	41.9 ±3.6	219 ±21.4	233.5 ±15.2
	Glucosa	22.4 ±6.4	14.8 ±4.3	224.7 ±20.4	260.7 ±24.9	30.1 ±2.8	34.1 ±0.7
Fertigación	Fructosa	12.6 ±0.6	48.8 ±12	54.7 ±4.1	37.3 ±2	244.4 ±7.8	252.6 ±5.1
	Glucosa	31.2 ±1.6	20.7 ±3.5	194.2 ±14.7	271.5 ±7.4	33.6 ±1.5	36.5 ±1.5
FB+Fertigación	Fructosa	60 ±9.4	60 ±9.4	50.1 ±11	39.2 ±10.7	244.4 ±24.2	254.2 ±24.2
	Glucosa	32.4 ±1.9	32.4 ±1.9	177.7 ±38.9	277 ±43.8	33.3 ±3.2	36 ±3.8

[†]Valores son medias ± error estándar; N= 3 plantas.

La disminución de la glucosa durante la etapa de mayor crecimiento de la piña (dos últimas evaluaciones), originó incrementos en la concentración de fructuosa en los ART cuyo valor medio fue de 246.8 g kg⁻¹ de MS de piña y representó 88% del total de los monosacáridos evaluados. El comportamiento de estos monosacáridos en las piñas de plantas de *A. tequilana* fue diferente al previamente consignado por Mellado-Mojica y López (2012), quienes, en piñas de diferente edad colectadas en Amatitlán, Jalisco, México, reportaron concentraciones de fructosa mayores a la concentración de glucosa independientemente de la etapa de desarrollo de la piña.

Conclusiones

El desarrollo de la planta de *Agave tequilana* mediante la técnica de fertigación, recibiendo agua y nutrimentos en todo el ciclo de su desarrollo, permitió demostrar:

Plantas desarrolladas con fertigación presentan un mayor crecimiento desde etapas iniciales del ciclo, registrando en promedio 180 cm de altura y 148 hojas, superaron en 26 y 57%, respectivamente, los valores registrados en estas características en plantas desarrolladas sin riego y sin fertilizante.

Con una densidad de siembra comercial de 3 300 plantas ha⁻¹, en plantas desarrolladas con fertigación se estimó una producción de biomasa total en la planta entre 456.1 y 491.4 t ha⁻¹ y en la piña entre 218.1 y 252.4 t ha⁻¹; valores superiores a las 97 t ha⁻¹ y 46.5 ha⁻¹ de biomasa total de la planta y piña, respectivamente, estimadas en plantas del TA.

La concentración de azúcares en la piña evaluados como °Brix y AR no fueron afectados por el manejo del agua y fertilizante.

Agradecimientos

A la Fundación Produce Tamaulipas, AC, por el financiamiento del proyecto de investigación durante 2004-2012.

Literatura citada

- Borland, A. M.; Griffiths, H.; Hartwell, J. and Smith, J. A. C. 2009. Exploiting the potential of plants with crassulacean acid metabolism for bioenergy production on marginal lands. *J. Exp. Bot.* 60(10):2879-2896.
- Escamilla-Treviño, L. L. 2012. Potential of plants from the genus *Agave* as bioenergy crops. *Bioenerg. Res.* 5(1):1-9.
- Gentry, H. S. 1982. *Agaves of Continental North America*. The University of Arizona Press, Tucson, Arizona, USA. 670 p.
- Hartsock, L. T. and Nobel, S. P. 1976. Watering converts a CAM plant to daytime CO₂ uptake. *Nature.* 262(8):574-576.
- Heikkinen N. 2015. Does agave hold the secret to drought-resistant farming?. *Scientific American*. <http://www.scientificamerican.com/article/does-agave-hold-the-secret-to-drought-resistant-farming/>.
- INEGI. 2016. (Instituto Nacional de Estadística, Geografía e Informática). 2016. <http://gaia.inegi.org.mx/mdm6/?v=bGF0OjlyLjc5MTQyLGxvbjotOTguODQ0MjYsejo1LGw6YzQxNg>.
- Iñiguez-Covarrubias, G.; Díaz-Teres, R.; Sanjuan-Dueñas, R.; Anzaldo-Hernández, J. and Rowell, R. M. 2001. Utilization of by-products from the tequila industry. Part 2: potential value of *Agave tequilana* Weber azul leaves. *Bio. Technol.* 77(2):101-108.
- Li, H.; Pattathil, S.; Foston, B. M.; Ding, S-Y.; Kumar, R.; Gao, X.; Mittal, A.; Yarbrough, M. J.; Himmel, E. M.; Ragauskas, J. A.; Hahn, G. M. and Wyman E. C. 2014. Agave proves to be a low recalcitrant lignocellulosic feedstock for biofuels production on semi-arid lands. *Biotechnol. Biofuels.* 1-11.
- Mancilla-Margalli, N. A. and López, M. G. 2006. Water-soluble carbohydrates and fructan structure patterns from *Agave* and *Dasyliirion* species. *J. Agric. Food Chem.* 54(20):7832-7839.
- Mellado-Mojica, E. and López, M. G. 2012. Fructan metabolism in *A. tequilana* Weber Blue variety along its developmental cycle in the field. *J. Agric. Food Chem.* 60(47):11704-11713.
- Nobel, S. P. 1990. Environmental influences on CO₂ uptake by agaves, cam plants with high productivities. *Econ. Bot.* 44(4):488-502.
- Park, S. N. *Desert wisdom/agaves and cacti: CO₂, water, climate change*. 2010. iUniverse, Inc. New York, NY and Bloomington, IN. 182 pp.
- Nobel, S. P. and Valenzuela, G. A. 1987. Environmental responses and productivity of the CAM plant, *Agave tequilana*. *Agricultural and Forest Meteorology.* 39(4):319-334.
- Nobel, S. P.; Castañeda, M.; North, G.; Pimienta-Barrios, E. and Ruiz, A. 1998. Temperature influences on leaf CO₂ exchange, cell viability and cultivation range for *Agave tequilana*. *J. Arid Environ.* 39(1):1-9.

- Norma Oficial Mexicana NOM-021-SEMARNAT-2000. Que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. en línea <http://biblioteca.semarnat.gob.mx/janium/Documentos/Ciga/libros2009/DO2280n.pdf>.
- Owen, A. N. and Griffiths, H. 2014. Marginal land bioethanol yield potential of four crassulacean acid metabolism candidates (*Agave fourcroydes*, *Agave salmiana*, *Agave tequilana* and *Opuntia ficus-indica*) in Australia. *Global Change Biology. Bioenergy*. 6(6):687-703.
- Pimienta-Barrios, E.; Robles-Murguía, C. and Nobel, P. S. 2001. Net CO₂ Uptake for *Agave tequilana* in a warm and a temperate environment. *Biotropica*. 33(2):312-318.
- Rendón, S. L. A.; Ávila M. M. E.; Rodríguez, G. B. y Del Real, L. J. I. 2011. (Eds): manual técnico para el establecimiento de huertas madre de agave azul. Consejo regulador del Tequila (C.R.T.). Libro técnico núm. 1. 127 p.
- SAGARPA. 2016. (Secretaría de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentación). Anuario estadístico. Oiedrus Jalisco. <http://www.oeidrus-jalisco.gob.mx/agricultura/anuarios/>.
- Somerville, C.; Youngs, H.; Taylor, C.; Davis, C. S. and Long, S. P. 2010. Feedstocks for lignocellulosic biofuels. *Science*. 329(1):790-792.
- Wullschleger, D. S.; Hao-Bo, G.; Reyes, C. and Aguilar, N. C. 2015. A roadmap for research on crassulacean acid metabolism (CAM) to enhance sustainable food and bioenergy production in a hotter, drier world. *New Phytologist*. 207(3):491-504.