

CRECIMIENTO Y SÓLIDOS SOLUBLES DE *Agave potatorum* Zucc. INDUCIDOS POR RIEGO Y FERTILIZACIÓN

GROWTH AND SOLUBLE SOLIDS OF *Agave potatorum* Zucc. INDUCED BY IRRIGATION AND FERTILIZATION

Saúl Martínez Ramírez^{1,2*}, Antonio Trinidad Santos¹, Celerino Robles³, Arturo Galvis Spinola¹, Teresa M. Hernández Mendoza³, José A. Santizo Rincón^{1†}, Gilberto Bautista Sánchez² y Eucebio C. Pedro Santos²

¹Colegio de Postgraduados, Campus Montecillo. Km 36.5 carretera México-Texcoco. 56230, Montecillo, Texcoco, Edo. de México. ²Domicilio actual: Universidad Tecnológica de la Mixteca. Km 2.5 carretera Huajuapán-Acatlita. 69000, Huajuapán de León, Oaxaca, México. Tel. 01(953) 53 22933, Ext. 550 y Fax 01(953) 53 20214. ³Centro Interdisciplinario de Investigación para el Desarrollo Integral Regional-Unidad Oaxaca, Instituto Politécnico Nacional. Hornos 1003. 71230, Xoxocotlán, Oaxaca, México. [†]Universidad Autónoma Chapingo. Km 38.5 carretera México-Texcoco. 56230, Chapingo, Edo. de México.

*Autor para correspondencia (saulmr@mixteco.utm.mx, ramar-gable@hotmail.com).

RESUMEN

El cultivo de *Agave potatorum* Zucc. es estratégico en la Mixteca oaxaqueña ya que está adaptado al ambiente árido y sirve para producir mezcal de alta demanda. Se hizo un experimento para estudiar el efecto de dos regímenes de humedad del suelo (sin riego y con riego) y cuatro dosis de nitrógeno (0, 50, 100 y 150 kg de N ha⁻¹) en plantas de 2, 3, 4 y 5 años, en un Regosol calcáreo de San Pedro Yodoyuxi, Huajuapán de León, Oaxaca, México. Se evaluaron 32 tratamientos en un diseño experimental de bloques completos con tratamientos aleatorizados, con cuatro repeticiones. Mensualmente durante un año se midieron las variables: concentración de sólidos solubles totales en hoja, incrementos en altura, diámetro, área foliar y número de hojas desplegadas. Los datos se sometieron a análisis de varianza y pruebas de Tukey ($\alpha = 0.05$). Se encontró que con la edad las plantas de *A. potatorum* aumentaron su contenido foliar de sólidos solubles y su crecimiento. La fertilización con 50 kg de N ha⁻¹ elevó el contenido de sólidos solubles en plantas de 5 años, pero no en las plantas de 2 años ni con dosis mayores de N. La condición sin riego elevó el contenido de sólidos solubles en hoja y el crecimiento en altura en plantas de 5 años, mientras que el riego mejoró el crecimiento foliar y el contenido de sólidos solubles en plantas jóvenes de 2 y 3 años.

Palabras clave: *Agave potatorum*, maguey mezcalero, fertilización, sólidos solubles, crecimiento.

SUMMARY

Because *Agave potatorum* Zucc. is adapted to the arid environment of the Mixteca oaxaqueña and it is used to produce a mezcal of high demand, its culture is strategic. An experimental trial to study two levels of irrigation (with and without) and four levels of nitrogen (0, 50, 100 and 150 kg of N ha⁻¹) was carried out on plants of 2, 3, 4 and 5 years old in a calcareous Regosol of San Pedro Yodoyuxi, Huajuapán de León, Oaxaca, México. The 32 treatments were evaluated under an experimental design of randomized complete blocks with four replications. Every month the following variables were recorded: content of total soluble solids in leaf (SSL), and increases in plant height (PH), plant diameter (PD), leaf area (LA) and number of unfolded leaves (NUL). Collected data were submitted to analysis of variance and mean comparisons by Tukey test with $\alpha = 0.05$. It was

found that *A. potatorum* plants increased all their response variables as they grew older. Fertilization with 50 kg of N ha⁻¹ induced an increase in leaf soluble solutes (SSL) in plants 5 years old, but not with higher N rates and neither in plants 2 years old. Under non irrigated conditions both LSS and plant height increased in 5 years old plants, whereas the irrigated conditions improved leaf growth and LSS in 2-3 years old plants.

Index words: *Agave potatorum*, maguey mezcalero, fertilization, soluble solids, growth.

INTRODUCCIÓN

Cuando las plantas se desarrollan en suelos deficientes en humedad y nutrientes es común que muestren un pobre crecimiento y bajos rendimientos. *Agave potatorum*, una de las especies de maguey que se emplea en el Estado de Oaxaca para la producción de mezcal (Sánchez, 2005), no es ajeno a este hecho. Ante la creciente demanda de mezcal (Sandoval y Rubio, 1997), en 2001 se inició en la Mixteca oaxaqueña un programa de plantaciones escalonadas de *A. potatorum*. Martínez *et al.* (2001), basados en varias fuentes de información (Gentry, 1982; Sánchez, 1997; Granados, 1999; Blanco *et al.*, 2001), consideran que el cultivo de esta especie es una alternativa de producción apropiada al entorno regional, que se caracteriza por su relativa aridez y suelos de escasa productividad agrícola, forestal y ganadera; además, debido a sus compuestos aromáticos volátiles, esta especie produce un mezcal que tiene alta demanda (Vera *et al.*, 2009).

Para alentar el cultivo de esta especie, se necesita generar tecnología que permita obtener no sólo mayores rendimientos de materia prima para la elaboración de mezcal sino también otros bienes y servicios, tales como medicina, combustible, cobijo, ornato, abono, materiales

para la construcción de viviendas y elaboración de implementos agrícolas, como lo obtenían los pueblos indígenas y mestizos de varias especies de maguey desde hace siete mil años (García-Mendoza, 2007; Sánchez, 1997). Recientemente, se ha determinado que los magueyes también tienen un alto potencial para la producción de combustible y fijación de carbono (Colunga-García *et al.*, 2007; Rendón-Salcido *et al.*, 2009; Borland *et al.*, 2009; Chambers y Holtum, 2010; García-Moya *et al.*, 2010; Núñez *et al.*, 2010).

Se ha comprobado que los magueyes se ven favorecidos en su crecimiento cuando se riegan durante el periodo de sequía. En campo, Nobel *et al.* (1989) probaron en *A. lechuguilla* la aplicación de dos frecuencias de riego: riego semanal y riego mensual, más un testigo sin riego. Las plantas con riego semanal produjeron 1561 g de biomasa seca total en la parte aérea de la planta, mientras que las plantas con riego mensual produjeron 1267 g y las plantas sin riego sólo produjeron 1114 g. La biomasa seca de la raíz completa tuvo un comportamiento similar; las plantas con riego semanal produjeron en promedio 75.4 g de raíz, las que se les proporcionó un riego mensual produjeron 53.6 g y las plantas sin riego produjeron sólo 43.2 g.

En cuanto a la fertilización, Nobel *et al.* (1988) encontraron que la aplicación de nitrógeno y fósforo, por separado, en *A. lechuguilla* cultivada en campo, aumentó la cantidad de hojas desplegadas y la tasa neta de intercambio de CO_2 ; la fertilización con potasio y con boro no generó diferencias en hojas desplegadas, pero sí en asimilación nocturna de CO_2 . Las mejores dosis de N, P, K y B fueron 100, 500, 100 y 100 kg ha^{-1} , respectivamente. Valenzuela y González (1995) determinaron en *A. tequilana* que el rendimiento estimado de la piña (tallo sin hojas) se duplicó con respecto al testigo cuando las plantas se fertilizaron con 120N-80P-60K, pero la aplicación de 120N-120P-60K generó rendimientos menores.

Con respecto a la edad en que los magueyes maduran, Aguirre *et al.* (2001) determinaron que *A. salmiana* lo hace 18 a 24 meses después de haber sido “deshuevado” (eliminado su yema floral para favorecer una mayor concentración de azúcares en la piña). En *A. tequilana*, el contenido de azúcares reductores (fructosa) en la piña, es un indicador de calidad (Granados, 1999). Al momento en que las piñas de *A. tequilana* ingresan a la fábrica de tequila, se muestrean algunas para determinación de azúcares; las piñas deben tener al menos 24 % de azúcares totales para que su precio no sea castigado (Bautista-Justo *et al.*, 2001). Debido a que los suelos de la Mixteca oaxaqueña generalmente son deficientes en humedad durante el periodo de estiaje (octubre a mayo), reconocidamente pobres en fertilidad (Blanco *et al.*, 2001) y con serias limitaciones

para la producción agrícola debido a la erosión y al clima (Alfaro, 2004), se planteó estudiar el efecto de la humedad del suelo y la fertilización nitrogenada en la concentración de sólidos solubles totales en hoja, incremento en diámetro, incremento en altura, incremento en área foliar y en hojas desplegadas en *A. potatorum* de diferentes edades. Los resultados ayudarán a determinar la demanda de nitrógeno y agua en el maguey cultivado en la Mixteca oaxaqueña, con el fin de aumentar el rendimiento y calidad de materia prima para la elaboración de mezcal.

MATERIALES Y MÉTODOS

La parcela experimental se estableció en San Pedro Yodoyuxi, Huajuapán de León, Oaxaca, en un sitio con coordenadas 17°45'01" LN y 97°45'54" LO, a una altitud de 1680 m (Figura 1). El suelo es un Regosol calcárico (Alfaro, 2004; Blanco *et al.*, 2001). Sus características, determinadas con base en la Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 (DOF, 2001), fueron: pH 8.3; contenido de materia orgánica 1.9 %; nitrógeno total 0.09 %; fósforo 3 mg kg^{-1} ; cationes intercambiables: K^+ 0.4 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$, Mg^{2+} 1.4 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$ y Na^+ 1.3 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$; Ca^{2+} extraíble 47.3 $\text{cmol}_c \text{kg}^{-1}$. Su clase textural es franco arcillo-arenoso, con 57 % de arena, 12 % de limo y 31 % de arcilla; capacidad de campo de 33 % y punto de marchitamiento permanente de 17.4 %.

El clima del sitio corresponde al semiárido cálido $\text{BS}_1(\text{h}')$ w (Trejo, 2004), con lluvias de junio a septiembre. La precipitación promedio anual es de 637 mm, con dos picos, uno en junio y otro en septiembre; la temperatura media mensual del sitio varía de 10.7 a 18.9 °C, con enero como el mes más frío y junio el más caluroso (Blanco *et al.*, 2001). En este estudio se evaluaron dos regímenes de humedad del suelo (sin riego y con riego), cuatro dosis de nitrógeno (0, 50, 100 y 150 kg ha^{-1}) en cuatro edades de planta (2, 3, 4 y 5 años) de *A. potatorum*. La combinación de estos factores generó 32 tratamientos (del factorial completo 2 x 4 x 4), mismos que en campo se distribuyeron en bloques completos con tratamientos aleatorizados. Por tratarse de una especie perenne se utilizó una planta como unidad experimental. Los bloques se establecieron en dirección perpendicular a la pendiente, cada uno con 32 unidades experimentales; cada tratamiento se repitió cuatro veces (Martínez, 2005; Castillo, 2000; Reyes, 1981).

Las plantas de 2 años se obtuvieron del vivero forestal-experimental de la Universidad Tecnológica de la Mixteca y las de otras edades se extrajeron, a finales de agosto de 2007, de plantaciones establecidas en campo. Su preparación para la plantación consistió en podarles las raíces y deshidratarlas durante 2 semanas. El 13 de septiembre de 2007, al momento de efectuar la plantación, se aplicaron 100 kg ha^{-1} de P_2O_5 (superfosfato triple) y 60 kg ha^{-1} de K_2O



Figura 1. Plantación experimental de *Agave potatorum* Zucc. en San Pedro Yodoyuxi, Huajuapán de León, Oaxaca.

(sulfato de potasio). La distancia entre plantas fue de 2.5 m y de 3 m entre hileras, densidad equivalente a 1320 plantas ha^{-1} . Para cada planta se construyó una terraza individual de 1 m^2 , de sección circular, con un bordo de tierra de 15 cm de altura. La fertilización nitrogenada se hizo el 30 de junio de 2008, una vez que se estableció el periodo de lluvias; se empleó sulfato de amonio que se distribuyó al voleo en la terraza individual, alrededor de la planta, y se incorporó manualmente en los primeros 5 cm de la capa de suelo. El tratamiento de riego se inició el 15 de octubre de 2008, una semana después de haber concluido el periodo de lluvias. Con un recipiente debidamente aforado se aplicaron 10 L de agua por planta.

Se midieron, mensualmente de agosto de 2008 a julio de 2009, como variables de respuesta las siguientes: concentración de sólidos solubles totales en hoja, incremento en diámetro, incremento en altura, incremento en área foliar y hojas desplegadas. La concentración de sólidos solubles totales en hoja se midió con un refractómetro digital portátil marca Mettler Toledo, modelo Quick-Brix 60. Para su determinación se tomó 1 cm^3 de tejido del envés de la tercera hoja basal activa, cuya distancia al punto de inserción de la hoja en la piña varió de 2 cm en plantas de 2 años hasta 10 cm en plantas de 5 años. La muestra se obtuvo con una gubia de 19 mm y el jugo se extrajo con un exprimidor metálico de uso casero. El diámetro de roseta se midió con cinta métrica, en orientación este-oeste. Los extremos de medición fueron las hojas funcionales más

extendidas, sin considerar espinas terminales. La altura de la planta hasta el ápice se midió con cinta métrica, cuyo extremo inferior se apoyó sobre un punto fijo en el suelo, sin considerar la espina terminal.

Para estimar el área foliar se midió largo y ancho máximos de cada hoja desplegada, sin considerar las espinas; el producto de largo por ancho se multiplicó por un factor de forma, el cual fue 0.787, 0.779, 0.792 y 0.777 para plantas de 2, 3, 4 y 5 años respectivamente. Este factor fue el resultado que se obtuvo de dividir el área de la hoja de la planta entre el área generada por su largo y ancho máximos. Para determinar el área de la hoja, se calcó en papel el contorno de las hojas de la parte media de las plantas y se aplicó el principio de proporcionalidad que hay entre el peso y área del papel.

Para el análisis estadístico se sumaron los datos mensuales de incremento de las variables de respuesta, con excepción de la concentración de sólidos solubles totales en hoja, y se obtuvo una cantidad global para un año. Se hizo el análisis de varianza y prueba de Tukey con $\alpha=0.05$, mediante el programa SAS versión 9.1 (SAS Institute, 2004). Las gráficas y ecuaciones de regresión se obtuvieron con el programa Excel de Microsoft®.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de los datos registrados se presentan en

los Cuadros 1 y 2; el análisis de varianza respectivo en el Cuadro 3.

La concentración de sólidos solubles totales en hoja varió ($P \leq 0.05$) entre edades, dosis de nitrógeno y por las interacciones riego x edad, edad x fertilización y riego x edad x fertilización. El incremento en área foliar y hojas desplegadas variaron ($P \leq 0.05$) entre edades y en las interacciones riego x edad, edad x fertilización y riego x edad x fertilización. El incremento en altura fue diferente ($P \leq 0.05$) entre edades y en la interacción edad x fertilización (Cuadro 3).

Efecto del riego

El régimen de humedad no generó diferencias significativas en las variables de respuesta de *A. potatorum* (Cuadros 1 y 3). Estos resultados indican que el crecimiento de este maguey no fue alterado por los niveles de humedad edáfica aplicados, y coinciden con lo encontrado por Sánchez *et al.* (2004) para *A. salmiana*, que creció en condiciones de sequía edáfica como resultado del control de sus propios procesos fisiológicos y bioquímicos. Esta misma especie duplicó su biomasa de raíz e incrementó en 17 % la longitud de sus hojas, a pesar del déficit hídrico inducido por un periodo de 30 d sin riego (Ruiz *et al.*, 2007). En el caso de *A. tequilana*, Pimienta-Barrios *et al.* (2001, 2005) reportaron que esta especie tuvo altas tasas de asimilación de CO₂ aún cuando la humedad en el suelo fue baja durante el invierno y la primavera; los autores atribuyeron este comportamiento a la succulencia de sus hojas, característica propia de las plantas con metabolismo ácido de las crasuláceas (Osmond *et al.*, 2008).

El comportamiento de *A. potatorum* ante el riego fue diferente al de *A. lechuguilla*, especie que se distribuye en la parte norte de México y en la que el incremento de materia

seca fue mayor en plantas con riego semanal que con riego mensual o sin riego (Nobel *et al.*, 1989); según estos autores, este comportamiento obedece a que con mayor humedad en la rizosfera hay mayor absorción de nutrimentos y CO₂, y por tanto una tasa más alta de crecimiento, como ocurre en las plantas CAM facultativas (Andrade *et al.*, 2007). Las diferentes respuestas al riego en estas dos especies puede atribuirse a que *A. potatorum* creció con una precipitación de 637 mm (Trejo, 2004) y en un suelo franco arcillo arenoso, mientras que *A. lechuguilla* lo hizo con una precipitación de 400 mm y en suelo franco arenoso (Nobel *et al.*, 1989), que por su menor contenido de arcilla posee menor capacidad de retención de humedad (Brady y Weil, 2008).

Efecto de la edad

La edad de la planta generó diferencias ($P \leq 0.01$) en las variables: concentración de sólidos solubles totales en hoja, incremento en altura, incremento en área foliar y hojas desplegadas (Cuadros 1 y 3). Las tres primeras presentaron una función lineal con respecto a la edad (Figuras 2 y 3), mientras que la cantidad de hojas desplegadas se ajustó mejor a una función cuadrática (Figura 3B). La relación lineal indica que entre los 2 y 5 años de edad *A. potatorum* se encuentra en la fase lineal del crecimiento, mientras que la cantidad de hojas desplegadas está en la fase de desaceleración del crecimiento. Es de destacar que la acumulación de sólidos solubles totales en la hoja aumentó con la edad de la planta. Resultados similares obtuvieron Bautista-Justo *et al.* (2003) en piñas de *A. tequilana*, Pinos-Rodríguez *et al.* (2008) en piñas de *A. salmiana*, y Rendón-Salcido *et al.* (2009) en hojas de *A. fourcroydes*.

Efecto de la fertilización

La fertilización nitrogenada sólo generó diferencias ($P \leq 0.05$) en la concentración de sólidos solubles totales en hoja

Cuadro 1. Concentración de sólidos solubles totales en hoja, incremento en diámetro, incremento en altura, incremento en área foliar y hojas desplegadas, como respuesta de *A. potatorum* al riego (n = 64), a la edad de planta (n = 32) y a la fertilización nitrogenada (n = 32).

VR	Riego		Edad de planta (años)				Fertilización (kg de N ha ⁻¹)			
	Con	Sin	2	3	4	5	0	50	100	150
SSTH (°Brix)	6.4	6.1	5.2 b	5.9 b	6.3 ab	7.4 a	6.1 ab	6.9 a	5.4 b	6.5 ab
D (cm)	23.5	23.9	20.8	24.1	25.4	24.5	22.7	23.3	26.0	22.9
A (cm)	21.5	22.3	17.1 c	20.7 b	23.7 ab	26.0 a	21.7	21.1	23.7	20.9
AF (m ²)	1.1	1.1	0.4 d	0.9 c	1.3 b	1.9 a	1.2	1.1	1.2	1.1
HD	51	50	42 b	51 a	53 a	57 a	48.8	50.5	51.9	51.9

Medias sin letras o con letras iguales en la misma hilera dentro de riego, edad de plantas y dosis de fertilización nitrogenada, no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05); VR = variable de respuesta; SSTH = concentración de sólidos solubles totales en hoja; D = incremento en diámetro; A = incremento en altura; AF = incremento en área foliar; HD = hojas desplegadas.

Cuadro 2. Promedios (n = 4) de concentración de sólidos solubles totales en hoja, incremento en diámetro, incremento en altura, incremento en área foliar y hojas desplegadas, como respuesta de *A. potatorum* a la dosis de fertilización nitrogenada.

VR	Edad	Régimen de humedad									
		Con riego					Sin riego				
		Dosis de nitrógeno (kg ha ⁻¹)				DMSH	Dosis de nitrógeno (kg ha ⁻¹)				DMSH
		0	50	100	150		0	50	100	150	
SSTH (°Brix)	2	4.7 b	6.4 a	5.9 ab	4.8 ab	1.7	4.9 ab	5.7 a	5.6 ab	4.4 b	1.3
	3	5.3	8.7	5.2	6.4	6.7	5.6	5.9	5.3	4.9	1.8
	4	7.4	5.9	4.8	7.0	3.3	6.2	5.4	5.5	8.5	5.9
	5	7.4	8.4	6.3	7.6	7.4	7.4	8.8	5.2	8.5	4.0
D (cm)	2	17.3	24.3	25.3	20.8	12.8	23.8	18.8	18.3	17.8	8.7
	3	18.8	20.0	24.3	24.8	16.9	22.3	25.8	28.3	29.0	18.8
	4	23.0	27.3	25.3	21.5	20.8	30.3	25.3	31.3	19.3	21.7
	5	23.3	24.0	28.0	28.5	12.0	22.8	20.8	27.3	21.8	16.0
A (cm)	2	15.0	16.5	19.8	17.5	31.8	18.0	16.0	18.3	15.8	5.4
	3	13.8 b	17.0 b	21.8 ab	26.0 a	8.9	19.8	22.5	23.0	21.5	12.4
	4	28.3	21.8	21.3	21.5	12.3	24.3	28.3	25.8	18.3	10.3
	5	24.8	25.3	28.8	24.8	9.9	29.8	21.5	31.3	22.3	17.3
AF (m ²)	2	0.51	0.49	0.51	0.47	0.54	0.55a	0.44 ab	0.39b	0.33b	0.14
	3	0.56 b	0.61 b	0.86 ab	1.12 a	0.51	0.93	0.94	0.99	1.09	1.10
	4	1.37	1.50	1.27	1.18	0.86	1.37	1.48	1.32	0.84	0.93
	5	1.81	1.98	1.97	2.08	0.99	2.35 a	1.35 b	2.04 ab	1.47 ab	0.89
HD	2	43	51	36	49	29	42	38	35	41	7
	3	44	44	57	55	15	49	50	57	56	33
	4	48	51	55	55	22	54	61	57	47	16
	5	58	56	61	61	12	54	54	58	52	17

Medias sin letras o con letras iguales en la misma hilera y mismo régimen de humedad no son estadísticamente diferentes (Tukey, 0.05); VR = variable de respuesta; SSTH = concentración de sólidos solubles totales en hoja; D = incremento en diámetro; A = incremento en altura; AF = incremento en área foliar; HD = hojas desplegadas; DMSH = diferencia mínima significativa honesta ($\alpha = 0.05$).

(Cuadro 3), pero no en las variables de crecimiento. Debido a que los datos que generaron este resultado se obtuvieron de plantas sujetas a dos regímenes de humedad y a cuatro edades, el efecto de la fertilización no presentó una tendencia clara. Así, las plantas que se fertilizaron con 50 kg de N ha⁻¹ tuvieron 21.7 % más sólidos solubles totales en hoja que las plantas que se fertilizaron con 100 kg de N ha⁻¹ (6.9 vs. 5.4 °Brix), pero tuvieron igual contenido de sólidos solubles totales que las plantas testigo y que las plantas fertilizadas con 150 kg de N ha⁻¹ (Cuadro 1). La dosis de 50 kg de N ha⁻¹, que fue la mejor para aumentar la concentración de sólidos solubles totales en *A. potatorum*, es similar a la dosis de 40N-40P-30K que se emplea en el cultivo de *A.*

tequilana en la cuenca hidrográfica “El Jihuite” (Flores-López *et al.*, 2009), y coincide con la dosis recomendada para *A. salmiana* cultivada en temporal o secano (Medina *et al.*, 2003). En *A. angustifolia* se aplican 50 g de sulfato de amonio por planta (SAGARPA, 2004), cantidad menor que la dosis de 180 g de sulfato de amonio por planta que resultó mejor en este estudio. El nulo efecto que se obtuvo por la fertilización en las variables de crecimiento muestra que *A. potatorum* tiene menor avidez por nitrógeno que las especies de importancia agrícola, lo que sugiere que es más eficiente en el uso del nitrógeno que las plantas C3, aunque esto no está totalmente esclarecido (Lüttge, 2004).

Efecto de la interacción riego x edad de la planta

Esta interacción generó diferencias significativas ($P \leq 0.05$) en concentración de sólidos solubles totales en hoja (SSTH), incremento en altura, incremento en área foliar y en hojas desplegadas (Cuadro 3). El cultivo sin riego de plantas de 5 años de edad generó 45.3 % más SSTH que las plantas de 2 años. Aquí también se observó que en suelo con más humedad disminuyen los sólidos solubles en plantas de 5 años, como ocurrió con *A. tequilana* en el periodo de lluvias (Bautista-Justo *et al.*, 2001). No obstante, en edades tempranas el riego aumentó la SSTH, ya que las plantas de 2 y 3 años superaron en 5.6 y 17.9 %, respectivamente, a plantas de las mismas edades pero sin riego. Algo similar ocurrió con el incremento en altura pues cuando fueron crecidas sin riego las plantas de 5 años superaron en 54.1 % a las plantas de 2 años. El crecimiento en área foliar y en hojas desplegadas resultó mayor en plantas con riego de 5 años que en plantas sin riego de 2 años, con ganancias de

265.0 y 52.5 %, respectivamente. Los beneficios del riego en el crecimiento foliar coinciden con lo encontrado por Nobel *et al.* (1989), quienes señalaron que el riego aumentó la cantidad de hojas desplegadas en *A. lechuguilla*.

Efecto de la interacción edad x dosis de nitrógeno

En la concentración de sólidos solubles totales en hoja, el mayor valor ($P \leq 0.05$) se registró en plantas de 5 años fertilizadas con 50 kg de N ha⁻¹; y el menor en plantas de 2 años sin fertilización, con diferencia de 79.6 %. En incremento en altura el mejor resultado se obtuvo en plantas de 5 años fertilizadas con 100 kg de N ha⁻¹, en contraste con plantas de 2 años sin fertilizar, con diferencia de 84.6 % y 68.4 %, respectivamente. El mayor incremento en área foliar se obtuvo en plantas de 5 años sin fertilizar y el menor en plantas de 2 años fertilizadas con 150 kg de N ha⁻¹, donde se nota que el crecimiento en área foliar en plantas de 2 años disminuye ante dosis crecientes de nitrógeno.

Cuadro 3. Valores de F del ANOVA generados en el ensayo de la respuesta de *Agave potatorum* al riego y a la fertilización nitrogenada.

Tratamientos	gl	SSTH	D	A	AF	HD
Riego (R)	1	0.484ns	0.765ns	0.420ns	0.699ns	0.443ns
Edad (E)	3	<0.01**	0.069ns	<0.01**	<0.01**	<0.01**
Fertilización (F)	3	0.042*	0.251ns	0.159ns	0.587ns	0.506ns
R x E	3	0.010*	0.103ns	<0.01**	<0.01**	<0.01**
R x F	3	0.209ns	0.402ns	0.101ns	0.105ns	0.524ns
E x F	9	<0.01**	0.241ns	<0.01**	<0.01**	<0.01**
R x E x F	9	0.044*	0.438ns	<0.01**	<0.01**	<0.01**

* $P \leq 0.05$, ** $P \leq 0.01$; gl = grados de libertad; ns = diferencia no significativa; SSTH = concentración de sólidos solubles totales en hoja; D = incremento en diámetro; A = incremento en altura; AF = incremento en área foliar; HD = hojas desplegadas.

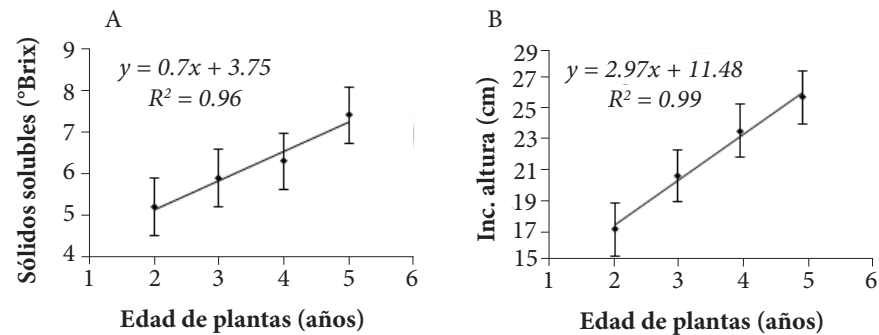


Figura 2. Promedios (n = 32) de concentración de sólidos solubles (A) e incremento en altura (B) en función de la edad de *A. potatorum*, con plantas crecidas bajo dos regímenes de humedad del suelo y cuatro dosis de fertilización nitrogenada.

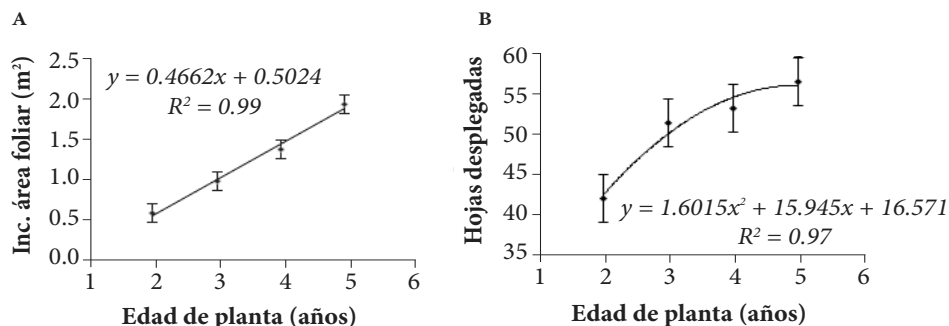


Figura 3. Promedios (n = 32) de incremento en área foliar (A) y hojas desplegadas (B) en función de la edad de *A. potatorum*, con plantas que crecieron bajo dos regímenes de humedad del suelo y cuatro dosis de fertilización nitrogenada.

Es decir, la fertilización favoreció el crecimiento y la concentración de sólidos solubles totales en hoja de *A. potatorum* de 5 años, como ocurrió con *A. tequilana* (Valenzuela y González, 1995) y *A. lechuguilla* (Nobel *et al.*, 1988), pero perjudicó a las plantas de 2 años en su crecimiento de área foliar, efecto semejante al que presentaron plántulas de *Agave cocui* Trelease que ante dosis crecientes de nitrógeno disminuyeron su cantidad y longitud máxima de raíces, debido al efecto tóxico del fertilizante (Díaz *et al.*, 2011).

Efecto de la interacción riego x edad de planta x dosis de nitrógeno

Entre tratamientos hubo diferencias significativas ($P \leq 0.05$) en crecimiento en altura, en área foliar y en hojas desplegadas. La mayor altura se obtuvo en plantas de 5 años, sin riego y fertilizadas con 100 kg de N ha⁻¹, en comparación con plantas de 3 años con riego y sin fertilización, con una diferencia de 127.3 %. En área foliar el mayor valor fue en plantas de 5 años sin riego y sin fertilización, y la menor área fue en plantas de 2 años sin riego y fertilizadas con 150 kg de N ha⁻¹, con diferencia de 602.9 %. La mayor cantidad de hojas desplegadas se obtuvo en plantas de 5 años, regadas y que se fertilizaron con 150 kg de N ha⁻¹, en comparación con las plantas de 2 años, sin riego y que se fertilizaron con 100 kg de N ha⁻¹, con una diferencia de 77.5 %. Es decir, los efectos de esta triple interacción confirman los resultados de las interacciones simples mencionada anteriormente.

CONCLUSIONES

La concentración de sólidos solubles totales en hoja y el crecimiento de *A. potatorum* en altura, en área foliar y en hojas desplegadas, aumentaron con la edad. La fertilización

con 50 kg de N ha⁻¹ favoreció mayor concentración de sólidos solubles totales en hoja, sobre todo en plantas de 5 años. En comparación con la condición de riego, la condición sin riego aumentó la concentración de sólidos solubles en hoja y el alargamiento en altura en plantas de 5 años, aunque el crecimiento foliar se vio reducido; lo contrario ocurrió en las plantas de 2 a 3 años. No obstante, sería recomendable evaluar otros regímenes de humedad del suelo y otras dosis y fuentes de nitrógeno.

AGRADECIMIENTOS

Al CONACYT, por la beca doctoral al primer autor. A la Universidad Tecnológica de la Mixteca y al Colegio de Postgraduados, por el financiamiento de la investigación. A la comunidad de San Pedro Yodoyuxi, especialmente al Sr. Eliseo Pérez Morales, por el préstamo gratuito del terreno donde se estableció la parcela experimental.

BIBLIOGRAFÍA

- Aguirre R J R, H Charcas S, J L Flores F (2001) El Maguey Mezcalero Potosino. Consejo Potosino de Ciencia y Tecnología, Gobierno del estado de San Luis Potosí. Instituto de Investigación de Zonas Desérticas. Universidad Autónoma de San Luis Potosí. San Luis Potosí, México. 87 p.
- Alfaro S G (2004) Suelos. In: Biodiversidad de Oaxaca. A J García-Mendoza, M J Ordóñez, M Briones-Salas (eds). Instituto de Biología, UNAM-Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza-World Wildlife Foundation. México. pp:55-65.
- Andrade J L, E de la B, C Reyes-García, M F Ricalde, G Vargas-Soto, J C Cervera (2007) El metabolismo ácido de las crasuláceas: diversidad, fisiología ambiental y productividad. Bol. Soc. Bot. Méx. 81:37-50.
- Bautista-Justo M, L García-Oropeza, R Salcedo-Hernández, L Parra-Negrete (2001) Azúcares en agaves (*Agave tequilana* Weber) cultivados en el estado de Guanajuato. Acta Univ. 11:33-38.
- Bautista-Justo M, L A Parra-Negrete, J E Barboza, Z Gamiño S (2003) Contenido de azúcares reductores en hojas de agave azul (*Agave tequilana* Weber) de distintos orígenes y edades. Rev. Salud Púb. Nutr. (UANL) ed. esp. No. 3.

- Blanco A A, S Martínez R, O Sánchez P, A Rubio S, C Cisneros C, E C Pedro S, R Morales L, F Sustaita R (2001) Aplicación de un Modelo de Balances Hídricos en la Cuenca Alta del Río Mixteco (Oaxaca). Determinación del Binomio Infiltración/Escorrimento con Vistas a la Reconstrucción de sus Ecosistemas Forestales. Universidad Tecnológica de la Mixteca, Huajuapán de León, Oaxaca. México. 251 p.
- Borland A M, H Griffiths, J Hartwell, J A C Smith (2009) Exploiting the potential of plants with crassulacean acid metabolism for bioenergy production on marginal lands. J. Exp. Bot. 60:2879-2896.
- Brady N C, R R Weil (2008) The Nature and Properties of Soils. 14th ed. Prentice Hall. New Jersey. USA. 975 p.
- Castillo M L E (2000) Introducción a la Estadística Experimental. Departamento de Parasitología Agrícola. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Texcoco, Estado de México. 263 p.
- Chambers D, J A M Holtum (2010) Feasibility of *Agave* as a Feedstock for Biofuel Production in Australia. Rural Industries Research and Development Corporation. Australian Government. Publication No 10/104. 74 p.
- Colunga-García M P, A Larqué S, L E Eguiarte, D Zizumbo-Villarreal (2007) El futuro de lo ancestral. In: En lo Ancestral hay Futuro: del Tequila, los Mezcales y Otros Agaves. M P Colunga-García, A Larqué S, L E Eguiarte, D Zizumbo-Villarreal (eds). Centro de Investigación Científica de Yucatán, A. C. Mérida, Yucatán. México. pp:395-402.
- Diario Oficial de la Federación (2001) Norma Oficial Mexicana NOM-021-RECNAT-2000 que establece las especificaciones de fertilidad, salinidad y clasificación de suelos. Estudios, muestreo y análisis. Diario Oficial de la Federación del 7 de diciembre de 2001.
- Díaz G J, G Rojas, Y Him de F, N Hernández de B, E Torrealba, Z Rodríguez (2011) Efecto de la fertilización nitrogenada sobre el crecimiento en vivero de cocuy (*Agave cocui* Trelease). Rev. Fac. Agron. (LUZ) 28 Supl. 1:264-472.
- Flores-López H E, R Carrillo-González, N Francisco-Nicolás, C Hidalgo-Moreno, J A Ruiz-Corral, A A Castañeda-Villanueva, R Velasco-Nuño (2009) Aportes de nitrógeno y fósforo de tres sistemas agrícolas de la cuenca hidrográfica "El Jihuete", en Jalisco, México. Agrociencia 23:659-669.
- García-Mendoza A J (2007) Los agaves de México. Ciencias 87:14-23.
- García-Moya E, A Romero-Manzanares, P S Nobel (2010) Highlights for *Agave* productivity. Global Change Biol. Bioen. 3:4-14.
- Gentry H S (1982) Agaves of Continental North America. The University of Arizona Press. Tucson, Arizona, USA. 670 p.
- Granados S D (1999) Los Agaves en México. 1a. reimp. Universidad Autónoma Chapingo. Texcoco, Estado de México. México. 252 p.
- Lüttge U (2004) Ecophysiology of crassulacean acid metabolism (CAM). Ann. Bot. 93:629-652.
- Martínez G A (2005) Experimentación Agrícola, Métodos Estadísticos. Universidad Autónoma Chapingo. Chapingo, Texcoco, Estado de México. México. 364 p.
- Martínez R S, E C Pedro S, F Sustaita R (2001) Recomendaciones técnicas para el manejo sustentable de los recursos florísticos, edáficos e hídricos en la cuenca alta del río Mixteco. T. Ciencia Tecnol. 4:3-19.
- Medina G, A Rumayor G, B Cabañas C, M Luna F, J A Ruiz C, C Gallegos V, J Madero T, R Gutiérrez S, S Rubio D, A G Bravo L (2003) Potencial productivo de especies agrícolas en el estado de Zacatecas. Instituto Nacional de Investigaciones Forestales, Agrícolas y Pecuarias. Libro Técnico No. 2. Centro de Investigación Regional Norte Centro. Campo Experimental Zacatecas. Calera, Zacatecas, México. 157 p.
- Nobel P S, E Quero, H Linares (1988) Differential growth responses of agaves to nitrogen, phosphorus, potassium, and boron applications. J. Plant Nutr. 11:1683-1700.
- Nobel P S, E Quero, H Linares (1989) Root versus shoot biomass: responses to water, nitrogen, and phosphorus applications for *Agave lechuguilla*. Bot. Gaz. 150:411-416.
- Núñez H M, L F Rodríguez, M Khanna (2010) *Agave* for tequila and biofuels: an economic assessment and potential opportunities. Global Change Biol. Bioen. 3:43-57.
- Osmond B, T Neales, G Stange (2008) Curiosity and context revisited: crassulacean acid metabolism in the Anthropocene. J. Exp. Bot. 59:1489-1502.
- Pimienta-Barrios E, J Zañudo-Hernández, P S Nobel, J García-Galindo (2005) Respuesta fisiológica a factores ambientales del agave azul (*Agave tequilana* Weber). Scientia-CUCBA 7:85-97.
- Pimienta-Barrios E, C Robles-Murguía, P S Nobel (2001) Net CO₂ uptake for *Agave tequilana* in a warm and a temperate environment. Biotrófica 33:312-318.
- Pinos-Rodríguez J M, M Zamudio, S S González (2008) The effect of plant age on the chemical composition of fresh and ensiled *Agave salmiana* leaves. S. African J. Animal Sci. 38:43-50.
- Rendón-Salcido L A, P Colunga-García M, L F Barahona-Pérez, E Pimienta-Barrios, A Magdub-Méndez, A Larqué-Saavedra (2009) Sugars and alcohol byproducts from henequén (*Agave fourcroydes*) as influenced by plant age and climate. Rev. Fitotec. Mex. 32:39-44.
- Reyes C P (1981) Diseño de Experimentos Aplicados. Ed. Trillas. México D. F. 344 p.
- Ruiz G, C Peña-Valdivia, L Trejo, A Sánchez (2007) Reacción fisiológica del maguey (*Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck) a la sequía intermitente. Rev. Fac. Agron. (LUZ) 24 Supl. 1:318-325.
- SAGARPA, Secretaría de Agricultura Ganadería Desarrollo Rural Pesca y Alimentación (2004) Diagnóstico de la Cadena Productiva del Sistema Producto Maguey-mezcal. SAGARPA-Delegación Oaxaca, Oaxaca, México. 213 p.
- Sánchez L A (1997) El mezcal en la historia de México: de Oaxaca, su mezcal. Bebidas Mex. 6:7-10.
- Sánchez L A (2005) Oaxaca, Tierra de Maguey y Mezcal. 2a ed. Instituto Tecnológico de Oaxaca. Oaxaca. México. 235 p.
- Sánchez U A B, C B Peña, J R Aguirre, C Trejo, E Cárdenas (2004) Efectos del potencial de agua en el crecimiento radical de plántulas de *Agave salmiana* Otto ex Salm-Dyck. Interiencia 29:626-631.
- Sandoval H E, M Rubio E (1997) La situación actual de la industria mezcalera del estado de Oaxaca. Bebidas Mex. 6:12-13.
- SAS Institute (2004) SAS® 9.1 SQL Procedure User's Guide. Cary, NC, USA.
- Trejo I (2004) Clima. In: Biodiversidad de Oaxaca. A J García-Mendoza, M J Ordóñez, M Briones-Salas (eds). Instituto de Biología, UNAM-Fondo Oaxaqueño para la Conservación de la Naturaleza-World Wildlife Fundation. México. pp:67-85.
- Valenzuela Z G, D R González E (1995) Fertilización del agave tequilero (*Agave tequilana* Weber) en la región de Tequila, Jalisco, México. Ensayo de una metodología para analizar crecimiento en cultivos multianuales mediante una técnica no destructiva. Terra 13:81-95.
- Vera G A M, P A Santiago G, M G López (2009) Compuestos volátiles aromáticos generados durante la elaboración de mezcal de *Agave angustifolia* y *Agave potatorum*. Rev. Fitotec. Mex. 32:273-279.