

Efecto de la aplicación de levasa (mosto de caña de azúcar) en la producción y calidad de *Agave Tequilana Weber*

Jesús Manuel Arreola Tostado¹
Víctor Manuel Montoya Jasso²
Jesús Manuel Arreola Nava¹
Ximena Castillo Valdez²
Edgar Adrián Olivares Arreola³
Aurelio Báez Pérez^{4§}

¹Consultor agrícola privado. Apaseo el grande núm. 114, colonia Guanajuato, Celaya, Guanajuato. CP. 38010. ²Campus Montecillo-Colegio de Postgrados. Carretera México-Texcoco km 36.5, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. CP. 56230. ³Estudiante de maestría del Instituto Tecnológico Nacional de México. ⁴Campo Experimental Bajío-INIFAP. Carretera Celaya-San Miguel de Allende km 6.5, Celaya, Guanajuato. CP. 38110.

§Autor para correspondencia: baez.aurelio@inifap.gob.mx.

Resumen

El uso de abonos orgánicos en la producción agrícola cobra importancia en la actualidad, ante la necesidad de mejorar la fertilidad de suelos y hacer un uso racional de los fertilizantes químicos. El mosto de caña de azúcar es un subproducto generado de la fermentación industrial de las melazas obtenidas a partir de la caña de azúcar (Levasa), para la obtención y producción de levaduras para panificación. Se estableció un experimento para evaluar el efecto de la aplicación de Levasa en el crecimiento, producción y calidad de *Agave tequilana* Weber. Mayor cantidad de Levaza mejora el desarrollo y aumenta la producción y calidad de agave. Se evaluaron tres dosis crecientes: 5, 10 y 15 m³ ha⁻¹ y dos testigos: uno sin aplicación de fertilizantes y otro como lo hace el agricultor. El ensayo se evaluó mediante un diseño experimental en bloques al azar con cuatro repeticiones. Se hizo un análisis de los componentes principales. El experimento se estableció en abril de 2018, en una plantación de agave de 6 años, un año previo a la cosecha. Se evaluó el rendimiento, contenido de N, P, K y grados Brix. La aplicación de Levasa promovió el desarrollo y nutrición del cultivo de *A. tequilana* Weber. Los mejores resultados se obtuvieron con aplicación de 10 y 15 m³ ha⁻¹, lo cual se reflejó en mayor longitud de hoja (129 cm), ancho (11.8 cm) y espesor (1.7 cm) de misma, diámetro de piña (49 cm), altura de planta (191 cm), longitud de piña (53 cm) y por lo tanto mayor rendimiento de jima (253 t ha⁻¹) y porcentaje de grados Brix (30), que implicó mayor cantidad de tequila con mejor calidad. A nivel de componentes principales las variables fueron: rendimiento de jima, peso seco aéreo, espesor de hoja, diámetro de piña, altura de planta y longitud de piña.

Palabras clave: *Agave tequilana* Weber., biofertilizante, producción agrícola orgánica.

Recibido: junio de 2020

Aceptado: agosto de 2020

Introducción

La producción de tequila en México ha adquirido gran importancia en las últimas décadas. De 104 millones de litros que se producían en 1994 (Villa-Flores, 2009), en la actualidad se producen más de 270 millones de litros anualmente (Comité Nacional del Sistema Producto Agave Tequilana, 2018). El consumo ha aumentado significativamente, tanto en México como en el extranjero, lo que ha resultado en una gran demanda de la materia prima para su producción, que es el *Agave tequilana* Weber Var. Azul.

Actualmente, en la Zona de Denominación de Origen del Tequila, en municipios de los estados de Jalisco, Guanajuato, Michoacán, Nayarit y Tamaulipas, hay una superficie cultivada de más 60 000 ha, con más de 120 millones de plantas de agave y se busca nuevas áreas para su cultivo, que deben reunir características favorables para el desarrollo de la planta para la producción de tequila de buena calidad para la industria (Consejo Regulador del Tequila, 2019).

De acuerdo con cifras estimadas por el Comité Nacional del Sistema Producto Agave Tequilana, AC (2018), se producen en México anualmente 271 millones de litros de tequila, por lo que se requieren de 80 millones de piñas, de las cuales, se distribuyen 50 millones para la producción del tequila, 12 millones para inulina y jarabe de agave y se estima que 12 millones se pierden por siniestros (incendios, plagas, inundaciones y enfermedades).

El agave se adapta a regiones semiáridas y subhúmedas, con la mayor parte del año con días soleados, y presenta poca tolerancia a las bajas temperaturas, especialmente durante la noche (Ruiz-Corral, 2007). Se maneja preferente en suelos de textura franco-arcillosos o franco-arenosos en terrenos aún con un alto grado de pendiente. Para la selección de áreas para producir agave, se examinan las siguientes variables principales: temperatura nocturna, probabilidad de heladas, altitud, pendiente del suelo y precipitación anual.

Para la producción adecuada del *Agave tequilana* Weber Var. Azul, es necesario una apropiada nutrición del cultivo, por cual la fertilización juega un papel muy importante. Si bien, esta especie se adapta a crecer en suelos delgados, no muy fértiles, su producción se potencia cuando se proporcionan condiciones óptimas de nutrición. El empleo de fertilizantes orgánicos, además de contener nutrientes esenciales para el crecimiento del cultivo, proporciona elementos para mejorar la fertilidad de los suelos y aumentar las reservas orgánicas del mismo.

Entre gran variedad de fertilizantes orgánicos que se encuentran disponibles en el mercado, el mosto de caña de azúcar, que se obtiene como un subproducto del proceso industrial en la producción de levaduras para la panificación, ha mostrado buenos resultados en la producción de diversos cultivos; sin embargo, no se encuentran reportados; sólo hay información a nivel de residuos de caña azúcar (Chandra *et al.*, 2008). El objetivo del presente estudio fue evaluar el efecto de dosis crecientes de mosto de caña de azúcar en el desarrollo, rendimiento y calidad de *Agave tequilana* Weber Var. Azul.

Materiales y métodos

El estudio se efectuó en el municipio de Ciudad Manuel Doblado, Guanajuato, en el rancho 'El Guayabo', en la comunidad de Santa Rita (Figura 1). Se ubica en las coordenadas 20° 43' 49" de latitud norte y a la 101° 57' 12" longitud oeste, a una altitud de 1 725 m. La temperatura media anual es 20.5 °C, con temperatura máxima de 38.5 y mínima de 2.6 °C. La precipitación pluvial promedio es de 787 mm (Figura 3). El tipo de clima es semicalido (A) C (wo) (w) a (e) g con temperatura anual entre 18 y 22 °C con verano cálido, el más cálido de los subhúmedos con régimen de lluvias en verano, con mínima precipitación invernal (< 5%); extremoso, es decir, la diferencia entre el mes más frío y el más caliente esta entre 7 y 14 °C y la marcha de la misma es tipo Ganges (García, 1987).



Figura 1. Localización geográfica del municipio de Ciudad Manuel Doblado, Guanajuato, México.

Descripción del mosto de caña de azúcar

El mosto de caña de azúcar deslevadurizado (Levasa) (Jaramillo, 2019), es un fertilizante de origen orgánico, que se obtiene como un subproducto de la fermentación industrial de las melazas, obtenidas a partir de la caña de azúcar, durante el proceso de elaboración de levaduras para producción de alcohol y la panificación. El proceso de obtención de este subproducto, a partir de caña de azúcar, es parecido al de las vinazas (Lorenzo-Acosta *et al.*, 2014). La caña de azúcar es una especie comúnmente utilizada para la producción de levadura (*Saccharomyces cerevisiae*) (Suárez-Machín, 2016).

Después del proceso fermentativo se obtiene, por un lado, la levadura que es un organismo vivo y por el otro un material orgánico residual o mosto deslevadurado, el cual, es la materia prima para la fabricación de este fertilizante orgánico. Debido a que se utiliza mucha agua durante el proceso productivo, el subproducto es líquido y podría ser desechado como agua residual, por lo cual también podría considerarse como un biosólido. La producción de levadura incluye varios procesos, como la preparación de la melaza, la fermentación, la separación de la levadura y el secado. En varias etapas del proceso y también para efectos de limpieza, se utilizan productos químicos como ácido sulfúrico, ácido fosfórico, mono fosfato de amonio, hidróxido de amonio, soda caustica, hipoclorito de sodio y sales.

Los residuos líquidos con alta concentración de carga contaminante son generados en el proceso de separación de la levadura y en el filtro rotatorio al vacío. Las aguas residuales son tratadas y se eliminan los ácidos por métodos bioquímicos y procesos aerobios y anaerobios (Jaramillo, 2019). Al final se obtienen residuos líquidos con baja o nula carga de contaminantes. El líquido también puede someterse a un proceso de deshidratación y obtener una presentación sólida. La composición básica del mosto de caña de azúcar está constituida principalmente por materia orgánica, nitrógeno, fósforo, potasio, calcio y magnesio (Cuadro 1.).

Cuadro 1. Composición de mosto de caña de azúcar con base en su peso seco.

Elemento	valor	Unidades
pH (25 °C)	6.66	
Densidad	1.22	g ml ⁻¹
Humedad	40	%
Materia seca	60	%
Nitrógeno total (N)	1.03	%
Potasio (K ₂ O)	6.92	%
Fósforo (P ₂ O ₅)	0.65	%
Calcio (Ca)	1.02	%
Magnesio (Mg)	0.784	%
Materia orgánica	34.05	%
Materia seca	48.1	%
Cenizas	19.5	%

Características edáficas del suelo

Las características físicas y químicas del suelo donde fue establecido el ensayo se presentan respectivamente en el Cuadro 2. La textura, con base en el porcentaje de arena, limo y arcilla, fue franco-arcillosa. La densidad aparente varió entre 1.07 y 1.1, lo cual indicó que no hay problemas de compactación. La humedad aprovechable, con base a la capacidad de campo (55 y 57%) y el punto de marchitez permanente (29%), fue de 27%. El punto de saturación es elevado, 75% en promedio. Ello indica que el suelo tiene alta capacidad de retención de humedad, lo que es favorable para los cultivos.

A nivel de características químicas el suelo es moderadamente alcalino y el contenido de materia orgánica fue bajo; sin embargo, el contenido de N inorgánico (N-NO₃ + N-H₄) y P extractable Olsen son elevados, debido a que el cultivo habría sido fertilizado en los seis años precedentes o por contenido residual de estas fertilizaciones anteriores al muestreo de suelos. El contenido de K también es elevado; sin embargo, este elemento es abundante en muchos suelos de México.

Los contenidos de Ca y Mg son extremadamente altos; sin embargo, estos elementos no son dañinos para el cultivo de agave, aunque se encuentren en exceso. Debido a las adaptaciones fisiológicas y anatómicas de esta especie, las plantas pueden proliferar en zonas con escasa precipitación y suelos de baja fertilidad o problemas de salinidad, además de ser altamente tolerable

a otros elementos considerados como metales divalentes (Cen *et al.*, 2015). El contenido de Na fue bajo, lo cual es una condición deseable para los cultivos, porque el exceso de este elemento es dañino para los cultivos. A nivel de micronutrientes el Fe y Mn se encontraron en concentración elevada, no así el Zn, que su contenido es deficiente. Finalmente, el Cu se encontró en una concentración mediana.

Cuadro 2. Características fisicoquímicas del suelo.

Características físicas											
Arena	Limo (%)	Arcilla	DA (g cm ⁻³)	CC	PMP	HA (%)	Saturación				
24.5	41	34.5	1.09	56	29	27	75				
Características químicas											
pH	MO (%)	NI	PE	Acetato de amonio 1 N pH 7				DTPA 0.005 M pH 7.3			
				K	Ca	Mg	Na	Fe	Zn	Mg	Cu
7.64	1.46	66.6	41.3	3.4	4299	944.5	26	23.4	0.66	23.4	1.05

CC= capacidad de campo; DA= densidad aparente; HA= humedad aprovechable; MO= materia orgánica; NI= nitrógeno inorgánico (N-NO₃+N-NH₄); PE= fósforo extractable Olsen; PMP= punto de marchitez permanente.

Descripción del experimento

Se evaluaron cinco tratamientos: (1) testigo sin aplicación de fertilizantes, (2) testigo con aplicación de 300-160-700 kg ha⁻¹ de N-P₂O₅-K₂O, (3) aplicación de 5 m³ ha⁻¹ de Levasa, (4) aplicación de 10 m³ ha⁻¹ de Levasa y (5) aplicación de 15 m³ ha⁻¹ de Levasa. Los tratamientos se establecieron en camas de tres hileras de plantas (9 m de ancho) por 72 m de longitud; es decir, cerca de 648 m² de superficie por repetición o bloque. La distancia entre plantas fue de 1 m. La unidad experimental básica comprendió tres surcos o hileras de plantas y 12 m de longitud (36 m²), hubo 36 plantas por unidad experimental. Se consideró como parcela útil a las cuatro plantas centrales de la hilera central (12 m²), la cual correspondió a la unidad de muestreo. La superficie experimental total fue de 2 592 m².

Análisis estadístico

El diseño experimental fue en bloques completos al azar con cuatro repeticiones, cada bloque correspondió una repetición. También se efectuó un análisis de componentes principales. Los datos fueron analizados mediante el programa Statistical Analysis Software (SAS). Las posibles diferencias estadísticas significativas, entre tratamientos, se detectaron mediante un análisis de varianza. A las variables con significancia estadística se les hizo una prueba de comparación de medias de Tukey ($p < 0.05$), mediante el paquete estadístico SAS 9.0 (SAS, 2002), al igual que el análisis de componentes principales.

Aplicación de Levasa

El ensayo se llevó a cabo en condiciones de temporal. La aplicación de Levaza en el campo en tres fracciones, con intervalos de un mes: (1) durante la época de lluvias, el 30 de julio de 2018, se suministró 25% del total; (2) el 30 de agosto, el 50% del total; y (3) primero de octubre, el restante. La aplicación de las dosis correspondientes de Levasa se efectuaron de manera manual en cada planta de agave. Se efectuó una cavidad de 30 cm de profundidad, tratando de cubrir 40 cm de longitud en la periferia cada planta de agave, a una distancia de 40 cm de las mismas. Posteriormente se depositó con una jarra la cantidad correspondiente del producto en cada tratamiento y se cubrió la cavidad con tierra. La aplicación del fertilizante químico en el tratamiento testigo se hizo de la misma manera

Evaluación de parámetros

El periodo de evaluación comprendió entre el 21 de julio de 2018 al 5 de abril de 2019. Se evaluaron los siguientes parámetros.

Climáticos. Se consideraron registros de datos de temperaturas máximas, mínimas y precipitación de la estación automatizada el Vallado, ubicada en Ciudad Manuel Doblado, cercana al área de estudio. Esta estación es parte de la red de estaciones climáticas de Guanajuato (FGP, 2020).

Agronómicos. Se evaluó la población de plantas, altura, longitud de hojas, diámetro máximo de hojas extendidas, grosor de hojas, biomasa aérea, biomasa radical, diámetro y longitud de piña y rendimiento de jima.

Nutrición. En muestras recolectadas durante este último parámetro también se evaluó el contenido de N total mediante el método de Kjeldahl, descrito por Jakson (1976), el contenido de P total, con molibdato de amonio y titulación y K total mediante absorción atómica, previa digestión húmeda (Jakson, 1976). Finalmente se evaluó el contenido de grados Brix, de acuerdo con el método de Miller (1956).

Resultados y discusión

Temperaturas y precipitación pluvial

Las temperaturas máximas y mínimas y la precipitación, que imperaron en el sitio de estudio a lo largo de la evaluación, de abril de 2018 a abril de 2019 se presentan en la Figura 2. Las temperaturas mínimas extremas ocurrieron a mitad de diciembre de 2018, alcanzado cerca de $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$. Por otra parte, las temperaturas máximas extremas se presentaron entre finales de mayo y principios de junio de 2018, alcanzando hasta $36.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ a la sombra. El volumen de lluvia total, durante el periodo de estudio, fue de 586.6 mm. Éstas se concentraron mayormente en primavera-verano 2018, mientras que hasta abril de 2019 apenas sumaron 4 mm.

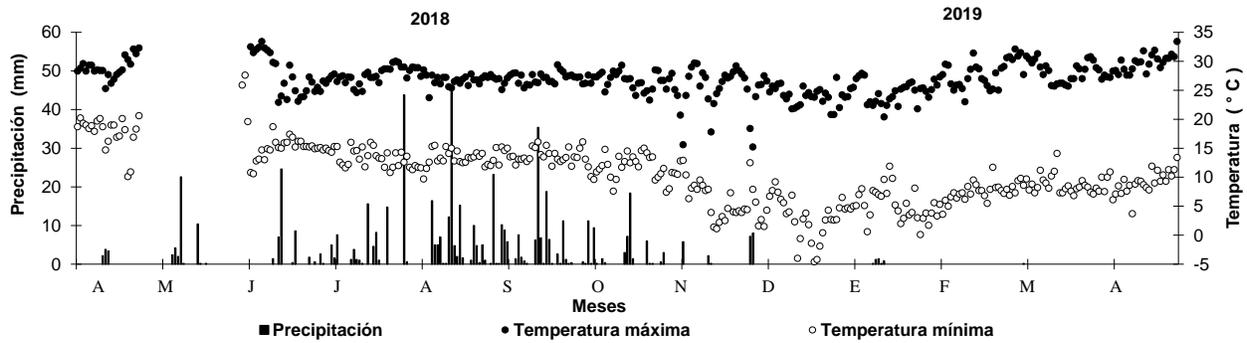


Figura 2. Temperaturas máximas y mínimas y precipitación diaria de abril de 2018 a abril de 2019. Ciudad Manuel Doblado, Guanajuato.

A nivel de temperaturas promedio y precipitación mensuales se observó que mayo de 2018 fue el mes más caluroso, durante el período que duró el presente estudio, con una temperatura media mensual de 31.4 °C (Figura 3). En contraste, el mes más frío correspondió a diciembre de 2018, con 13.6 °C. Por otra parte, el mes más lluvioso correspondió a agosto de 2018, donde cayeron 170.4 mm de precipitación; es decir, 29% del total.

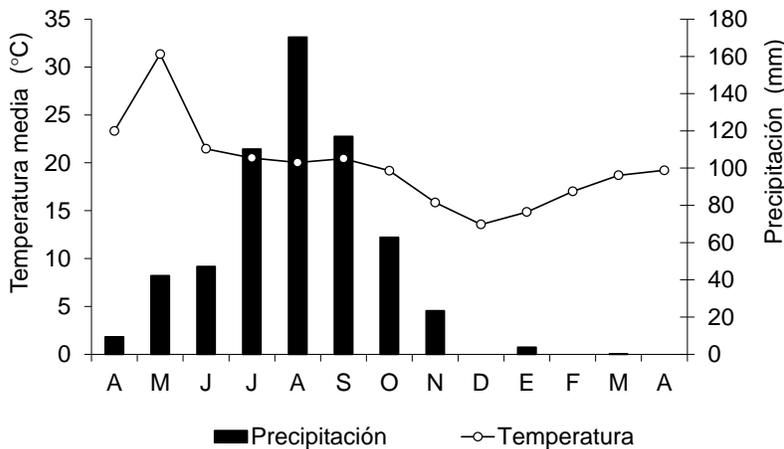


Figura 3. Diagrama ómbrotermico de abril de 2018 a abril de 2019. Cd. Manuel Doblado, Guanajuato.

Las condiciones extremas de temperaturas y la distribución de las lluvias, que imperaron durante el período de estudio, son clásicas del Bajío. Las mejores condiciones de temperatura para el desarrollo de la planta son de 15 a 25 °C durante el día y de 10 a 15 °C durante la noche. Temperaturas extremas de -3 °C y mayores de 35 °C afectan negativamente al desarrollo de la planta. Temperaturas de -6 °C pueden ser muy perjudiciales para el desarrollo de las plantas jóvenes, incluso pueden llegar a sucumbir plantas adultas de entre 5 y 6 años. De acuerdo con Ruiz-Corral *et al.* (2002) las condiciones térmicas óptimas y marginales para la fotosíntesis en el cultivo de *Agave tequilana* Weber en el estado de Jalisco, ésta se incrementa con temperaturas promedio diurnas frescas (22-25 °C) y nocturnas (14-16 °C), pero disminuyen con temperaturas promedio cálidas durante el día (>28 °C) y la noche (>20 °C). De acuerdo con esta información las condiciones térmicas a nivel de temperatura promedio mensual del mes más cálido (agosto) estuvo por encima del nivel óptimo.

Parámetros agronómicos

La población de plantas fluctuó entre 3 220 y 3 333 plantas ha⁻¹ (Cuadro 3). En la etapa fenológica reproductiva del cultivo, las plantas tuvieron una altura promedio que varió entre 125.6 y 141.6 cm. El promedio más bajo se obtuvo en el tratamiento testigo sin aplicación de fertilizantes (1), donde se registró, en la primera evaluación, 117.6 cm y en la última 125.6 cm; es decir, una tasa de crecimiento de 0.8 cm por mes (Figura 4). Con la aplicación de 10 y 15 m³ ha⁻¹ de mosto de levadura de caña de azúcar en los tratamientos 4 y 5 fue donde se obtuvo la mayor altura de planta y una tasa de crecimiento de 2.8 y 3.2 cm mes⁻¹, respectivamente.

Cuadro 3. Resultados de parámetros de evaluación de *Agave tequilana* Weber, variedad azul.

Trat	No. plantas	Altura planta	Long. hoja	Ancho hoja	Espesor hoja	No. hojas	Long. piña	Diámetro piña	Peso seco		
									Aéreo	Radical	Peso jima
									(t ha ⁻¹)		
1	3320 a*	125.6 b	102.2 b	10.7 a	1.3 b	36.3 a	29.1 b	26.9 b	184.1 a	24.4 a	123.8 c
2	3320 a	133.2ba	110.9 ba	10.8 a	1.6a	48.5 a	47.4 a	44.4 a	323.9 a	29.6 a	217.8 ab
3	3320 a	136.8 ba	110.6 ba	11.3 a	1.6 a	48.3 a	48.8 a	44.1 a	346.6 a	31.4 a	214.6 b
4	3333 a	141.6 a	127 a	11.7 a	1.7 a	51.5 a	52.4 a	48.7 a	436.9 a	31.3 a	234.4 ab
5	3333 a	141.6 a	129.2 a	11.8 a	1.7a	48.5 a	52.8 a	49.2 a	443.7 a	35.3 a	252.8 a
DMS	32.09	13.45	20.55	1.31	0.22	22.86	8.61	9.43	269.35	23.66	37.6
VE (%)	0.43	4.39	7.86	5.17	6.26	21.76	8.29	9.81	34.44	34.52	7.99

DMS= diferencia mínima significativa; VE= variación experimental; *= letras iguales son estadísticamente semejantes ($p < 0.05$).

La altura de planta del *Agave tequilana* Weber variedad azul, con denominación de origen, de acuerdo con resultados reportados Zuñiga-Estrada *et al.* (2018), puede variar entre 130 y 160 cm de altura, quienes obtuvieron plantas más grandes con sistemas de producción de fertirriego. Este comportamiento, en los tratamientos evaluados, se observó en todos parámetros agronómicos. Los promedios de longitud de hoja más bajos se obtuvieron en el tratamiento testigo sin aplicación de fertilizante (1), donde se registró al inicio del estudio 92.1 cm y en la última etapa 102.2 cm; es decir, una tasa de crecimiento de 1.18 cm por mes. Los tratamientos correspondientes al testigo con fertilizante químico (2) y las dosis crecientes del mosto de levadura de caña de azúcar (tratamientos 3 al 5) fueron semejantes entre sí ($p < 0.05$). Sin embargo, con la aplicación de 10 y 15 m³ ha⁻¹ de este producto, en los tratamientos 4 y 5, fue donde se obtuvo la mayor longitud de hoja, con 127 y 129.2 cm, respectivamente, y una tasa de crecimiento de 4.3 y 4.62 cm por mes.

De acuerdo con Saldaña-Robles *et al.* (2012) la longitud de hoja del *Agave tequilana*, en etapa reproductiva (7 a 8 años) puede alcanzar más de 1.1 m. A nivel de grosor de hoja, los tratamientos correspondientes al testigo, con fertilizante químico (2) y las dosis crecientes del mosto de caña de azúcar (tratamientos 3 al 5) fueron semejantes entre sí ($p < 0.05$). Sin embargo, con la aplicación de 10 y 15 m³ ha⁻¹ de este producto, en los tratamientos 4 y 5, fue donde se obtuvo el mayor espesor de hoja, con 1.7 cm y una tasa de crecimiento de 0.06 y 0.07 cm por mes. Se observó que a medida que aumentó la dosis de mosto de caña de azúcar aumentó la tasa de crecimiento en el espesor de las hojas de los agaves evaluados, ($R^2 = 0.97$). De acuerdo con Saldaña-Robles *et al.* (2012) el espesor de hoja del *Agave tequilana*, en etapa reproductiva puede variar entre 2 y 4 cm.

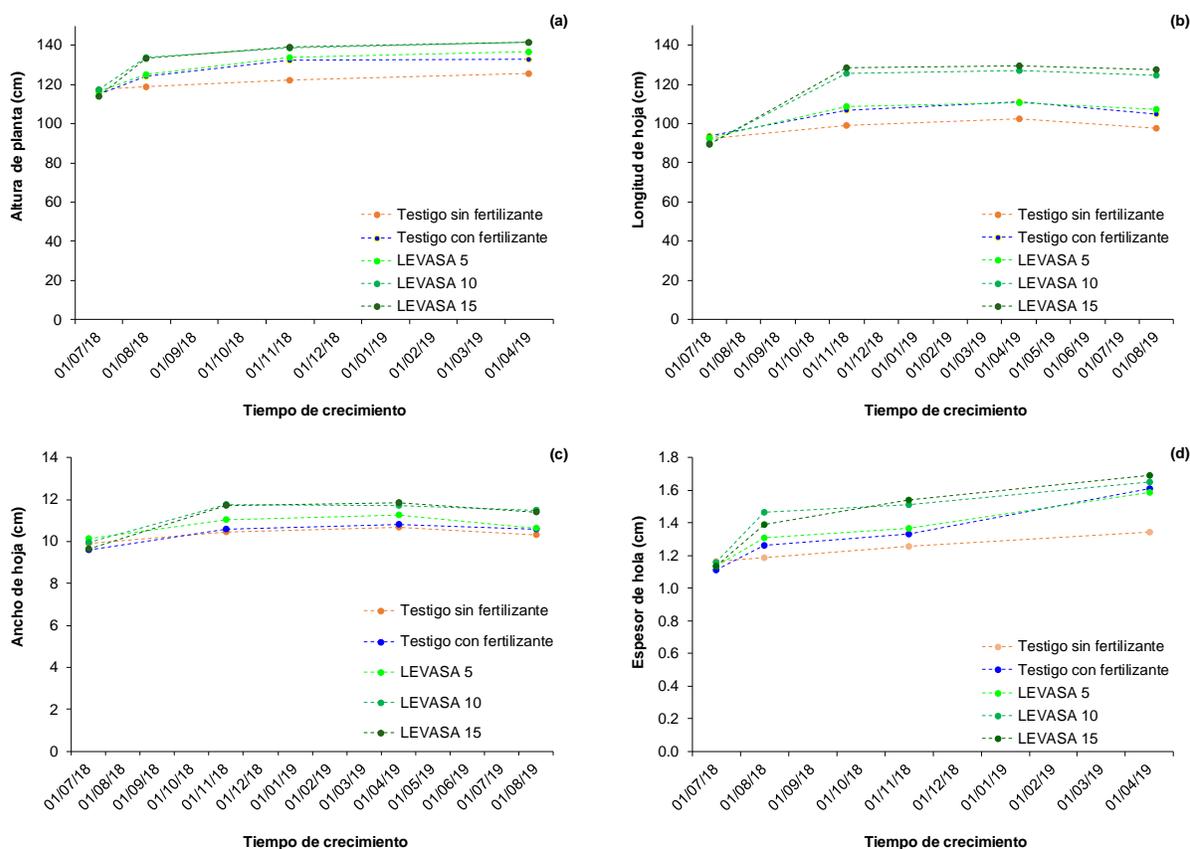


Figura 4. Desarrollo del cultivo en periodo de evaluación; a) altura de planta; b) longitud de hoja; c) ancho de hoja; y d) grosor de hoja.

Los valores agronómicos que se obtuvieron en los diferentes parámetros que se evaluaron en el presente estudio, de acuerdo con Saldaña-Robles (2012), son adecuados para implementar la cosecha mecanizada. Las dimensiones y pesos determinados en las plantas de agave, así como de cada uno de sus elementos presentan una cierta variabilidad que se debe a los factores de desarrollo propio de cada planta y su interacción con las condiciones edáficas y climáticas; sin embargo, característicos para una plantación de agave de 7 a 8 años.

La producción de jima, el parámetro más relevante, mostró diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) por efecto de los tratamientos. El tratamiento correspondiente al testigo químico y los tratamientos con dosis crecientes del mosto de levadura de caña de azúcar fueron estadísticamente semejantes ($p < 0.05$). Sin embargo, con aplicación de $15 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de mosto de caña de azúcar, se alcanzó un rendimiento de 192.3 t ha^{-1} , el cual fue 20% más con respecto al rendimiento que se obtuvo el testigo químico (1) (154.4 t ha^{-1}) y 59% superior al testigo sin aplicación de fertilizante (79.3 t ha^{-1}).

De acuerdo con Zúñiga-Estrada *et al.* (2018) para el periodo 2006-2015, en el estado de Jalisco, la producción media de agave fue de 100.1 t ha^{-1} , los resultados obtenidos muestran que el aporte nutrimental y el fraccionamiento de las aplicaciones hechas con el mosto de levadura de caña de azúcar superan, en casi 100%, los rendimientos medios con la aplicación de Levasa en dosis de $15 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$.

Contenido de N, P y K

El contenido de nitrógeno N, P y K foliar, mostró diferencias significativas ($p < 0.05$) por efecto de los tratamientos (Cuadro 4). El valor más bajo de N se obtuvo en el tratamiento donde no hubo aplicación de fertilizante (1). En este tratamiento se estimó, al inicio del estudio, un contenido de 60.6 ppm de este elemento y 100 ppm a la finalización de este, con una tasa de acumulación de 4.56 ppm por mes, en el periodo de evaluación del estudio.

Cuadro 4. Contenido de N, P, K y °Brix en estudio de *Agave tequilana* Weber, variedad azul.

Tratamiento	N	P	K	°Brix
	(%)			
1	99.9 b*	0.14 b	0.65 c	27.3 b
2	212.3 a	0.25 a	1.59 ba	28.2 a
3	201.5 a	0.23 a	1.27 ba	27.4 a
4	222.4 a	0.25 a	1.51 b	29.2 a
5	209.5 a	0.27 a	1.89 a	30.2 a
DMS	56.63	0.75	0.57	2.81
VE (%)	13.12	14.61	17.95	4.39

DMS= diferencia mínima significativa; VE= variación experimental; * = letras iguales son estadísticamente semejantes ($p < 0.05$).

Los tratamientos correspondientes al testigo con fertilizante químico (2) y las dosis crecientes de mosto de caña de azúcar (tratamientos 3, 4 y 5) fueron estadísticamente semejantes entre sí ($p < 0.05$). Sin embargo, con la aplicación de 10 y 15 m³ ha⁻¹ de este producto (4 y 5) fue donde se observó el mayor valor numérico en el contenido de N en hojas, con 170.3 y 157.6 ppm, respectivamente y una tasa de acumulación de 19.8 y 18.32 ppm de N por mes. De acuerdo con los rangos de suficiencia nutrimental establecidos por Uvalle-Bueno y Vélez-Gutiérrez (1987), el contenido de N en hojas en *Agave tequilana* Weber Var. Azul puede variar en un rango de 62.5 ppm, que es un nivel deficiente, a 500 ppm, que es un nivel excesivo.

Por último, se observó que a medida que aumentó la dosis de mosto de caña de azúcar, aumentó también el contenido de N en hoja, ($R^2 = 0.38$). Este valor implica una $r = 0.62$; es decir, el grado de asociación de ambas variables fue de 62%, con un ajuste a un modelo logarítmico. Las variaciones tan bruscas que se observan en las diferentes evaluaciones se deben, por una parte, a las aplicaciones de nitrógeno que se efectuaron, mediante los fertilizantes evaluados y por otra parte a la disponibilidad que hubo en la solución del suelo después del inicio de la temporada de lluvias. Cuando hay humedad en el suelo hay más actividad metabólica en la planta, que cuando es época de seca (Nobel y Valenzuela, 1987; Nobel *et al.*, 1988). El comportamiento en el contenido de P foliar fue semejante a lo explicado en el contenido de N.

De acuerdo con Uvalle-Bueno y Vélez-Gutiérrez (1987) el contenido de P en hojas en *Agave tequilana* A. Weber Var. Azul fluctúa en un rango de 0.08 ppm, que es un nivel deficiente, a 0.6 ppm, que es un nivel excesivo. Con base a este rango, se observó que durante la primera evaluación (21-07-2018), el contenido de este elemento en las hojas tuvo una variación de entre 0.12 y 0.14

ppm; es decir, deficiente para la segunda evaluación (22-08-2018) y al finalizar el estudio los rangos se ubicaron entre 0.14 y 0.27 ppm; es decir, desde bajo a suficiente. El contenido de potasio (K) foliar, mostró también diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) por efecto de los tratamientos.

De acuerdo con Uvalle-Bueno y Vélez-Gutiérrez (1987), el contenido de K en foliar en *Agave tequilana* va de un rango de 0.75 ppm, que es un nivel deficiente, a 6 ppm, que es un nivel excesivo. Con base en lo anterior, durante la primera evaluación el contenido de este elemento en fluctuó entre 0.65 y 0.73 ppm, es deficiente; sin embargo, al finalizar el estudio los valores fluctuaron entre 0.65 y 1.87 ppm, es decir, desde deficiente a medianamente bajo.

De acuerdo con Zuñiga-Estrada (2013) la acumulación de N, P y K absorbido por la planta se acumula mayormente en las hojas. Él estimó que al final del ciclo de cultivo, la materia seca correspondiente a éstas acopia 65.9, 82.4 y 71.9%, respectivamente.

°Brix

Este parámetro mostró diferencias estadísticas significativas ($p < 0.05$) por efecto de los tratamientos. Los promedios más bajo se obtuvieron en el testigo sin aplicación de fertilizante (T1) y en el tratamiento con aplicación de $5 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ de mosto de caña de azúcar, con 27.3 y 27.4% de azúcares totales reducidos, respectivamente (Figura 27). Los valores que hubo en los tratamientos con 10 y $15 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1}$ del producto (T4 y T5) fueron ligeramente mayores con respecto a los demás tratamientos.

De acuerdo con Latsague *et al.*, (2014), el contenido de azúcares incrementa cuando la fertilización es mayor, principalmente por efecto de la disposición de potasio. Con base a lo anterior y considerando que el contenido de este elemento en mosto de caña de azúcar es de 6.92%, la mayor producción de azúcares estuvo estrechamente relacionada con las dosis crecientes en la aplicación de este producto ($R^2 = 0.815$).

De igual manera, la longitud de las hojas fue favorable ($R^2 = 0.942$) para el incremento de los azúcares debido a la edad de la planta y el manejo de poda, lo cual causó el movimiento de agua, nutrientes, azúcares y carbohidratos hacia la piña, provocando incrementos en su contenido. Lo anterior concuerda con resultados reportados por Escamilla-Treviño (2012); Zuñiga-Estrada *et al.* (2018).

Análisis de componentes principales

El análisis de rendimiento de jima, de los cinco tratamientos, a nivel de componentes principales, se presenta en el Cuadro 5. Se observó que el componente principal uno explicó 86.66% de toda la varianza del experimento, mientras que el componente principal dos explica 8.9% de la varianza restante, es decir, que este análisis explica 95.56% de la variación total del experimento, debida a todas las variables evaluadas. En el primer componente principal las variables originales de mayor importancia fueron: rendimiento de jima, peso seco aéreo, espesor de hoja, diámetro de piña, altura de planta y longitud de piña. En el segundo componente principal las variables más importantes fueron población, azúcares totales reducidos, nitrógeno foliar y número de hojas. La importancia de cada componente principal se ve reflejada en el valor característico de cada uno de ellos.

Cuadro 5. Vectores característicos y varianza explicada por los primeros dos componentes principales en el estudio de *Agave tequilana*.

Variables	Vectores característicos	
	CP1	CP2
Sanidad	0.211545	0.536823
Altura de planta	0.270935	0.070858
Longitud de hoja	0.256032	0.32402
Ancho de hoja	0.24143	0.331228
Espesor de hoja	0.272087	-0.154829
Número de hojas	0.254053	-0.300625
Nitrógeno foliar	0.251372	-0.298774
Fósforo foliar	0.26526	-0.210221
Potasio foliar	0.25892	-0.104421
Longitud de piña	0.270005	-0.18945
Diámetro de piña	0.271788	-0.171011
Peso seco aéreo	0.273871	0.010465
Peso seco radical	0.262288	0.005944
Rendimiento	0.275654	-0.067312
Grados Brix	0.228652	0.404447
Valores característicos	12.9995	11.6647
Varianza (%)	86.66	8.9

En la Figura 5 se presenta la dispersión de los tratamientos con base en las variables de mayor importancia. Se observó que los tratamientos con mayor dosis de aplicación de mosto de caña de azúcar (10 y 15 m³ ha⁻¹) fueron los que tuvieron mayor rendimiento de jima, peso seco aéreo, espesor de hoja, diámetro de piña, altura de planta y longitud de piña. El testigo absoluto, sin aplicación de fertilizante siempre fue el que presentó los valores más bajos en todos los parámetros evaluados. El tratamiento testigo, con aplicación de fertilizante químico, y el tratado con aplicación de 5 m³ ha⁻¹ de mosto de caña de azúcar, representan un grupo que, si bien presentan una producción media de jima, tienen menor contenido de °Brix con respecto a los tratamientos 5 y 6.

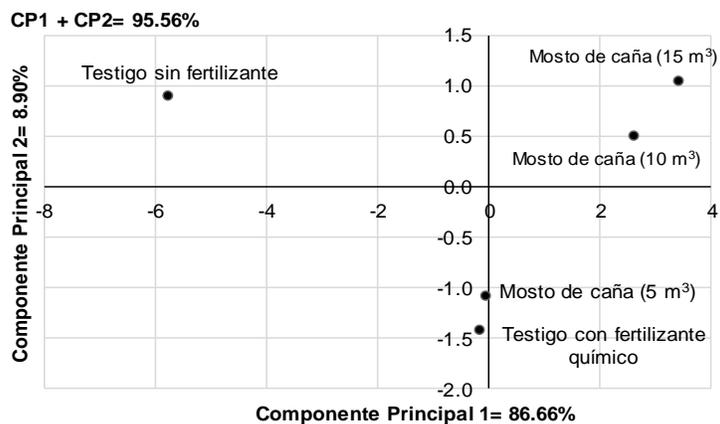


Figura 5. Análisis de componentes principales, dispersión de los tratamientos.

En el eje de las abscisas (CP1) se observó que el tratamiento que dio lugar al mayor rendimiento fue la aplicación de la mayor dosis de mosto de caña de azúcar, el cual presentó los mayores valores en todos los parámetros evaluados. En cuanto al eje de las ordenadas se observó que los menores parámetros se obtuvieron en el testigo absoluto, sin aplicación de fertilizantes.

Conclusiones

La aplicación de mosto de caña de azúcar promovió el desarrollo, producción y nutrición orgánica del cultivo de *Agave tequilana* A. Weber Var. Azul. Los mejores resultados se obtuvieron con aplicación de 10 y 15 m³ ha⁻¹, lo cual se reflejó a nivel de desarrollo del cultivo en altura de la planta, longitud, ancho y espesor de hojas, a nivel de rendimiento en una mayor longitud y diámetro de piña y producción de jima y mayor contenido de azúcares. Asimismo, la nutrición orgánica en las plantas de *Agave tequilana* A. Weber Var. Azul, con la aplicación de 15 m³ ha⁻¹ de Levasa permitió tener una asimilación de fósforo y potasio, 10 y 5% mayor que los testigos de fertilización química y absoluto, respectivamente.

Agradecimientos

A las empresas SAF MEX, SA de CV del Grupo Lesaffre y CERRO, Fresh SPR de CV por su soporte financiero. Al Lic. Luis Ernesto Reynoso, productor de *Agave tequilana* Var. Azul de Ciudad Manuel Doblado, Guanajuato. México, zona de denominación de origen del tequila, por el préstamo del predio para llevar a cabo el ensayo en campo, así como la infraestructura material y humana para culminar con éxito este experimento. Al Ing. Ramón Castellanos Valdivia y al Lic. Guillermo Rendón Santana por su apoyo parcial en los trabajos de campo, aplicación de Levasa, fertilización química y toma de datos.

Literatura citada

- Cen-Cen, E. R.; Gómez-Merino, F. y Martínez-Hernández, A. 2015. Tolerancia de *agave tequilana* a altas concentraciones de cationes metálicos divalentes. *Polibotánica*. 40:163-182.
- Chandra, R.; Ranab, N.S.; Kumarc, S. and Panward, G. S. 2008. Effects of sugarcane residue and green manure practices in sugarcane-ratoon-wheat sequence on productivity, soil fertility and soil biological properties. *Archiv. Agron. Soil Sci.* 54(6):1476-3567. Doi: 10.1080/03650340802279957.
- Comité Nacional del Sistema Producto Agave Tequilana A. C. 2018. <http://www.agavetequila.org/public/noticia/inventario-nacional-de-agave>.
- Consejo regulador del tequila. 2019. www.crt.org.mx. Fecha de consulta: 20/07/2019.
- Escamilla-Treviño, L. L. 2012. Potential of plants from the genus *Agave* as bioenergy crops. *Bioenerg. Res.* 5(1):1-9.
- FGP. 2020. <http://www.estaciones.fundacionguanajuato.mx/estaciones/station.php?id=36>
- García, E. 1987. Modificaciones al sistema de clasificación climática de Köppen. Cuarta edición. Serie de libros no. 6. Instituto de Geografía-Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM). CdMx. 22-29 pp.
- Jackson, M. L. 1976. Análisis químico de suelos. 3^{ra}. (Ed.). Traducción al español por Martínez, J. B. Omega. Barcelona, España. 282-283 pp.

- Jaramillo, C. X. 2019. Valorización agrícola de la levasa (subproducto de la producción de levadura para panadería). *Suelos Ecuatoriales*. 49(1 y 2):53-58.
- Latsague M.; Sáez, P. y Mora, M. 2014. Efecto de la fertilización con nitrógeno, fósforo y potasio, sobre el contenido foliar de carbohidratos, proteínas y pigmentos fotosintéticos en plantas de *Berberidopsis corallina* Hook. f. *Gayana Bot.* 71(1):37-42.
- Lorenzo-Acosta, Y.; Doménech-López, F.; Eng-Sánchez, F.; Almazán-del Olmo, O. y Chanfón-Curbelo, J. M. 2014. Tratamiento industrial de vinazas de destilerías en reactores UASB. *Tecnología Química*. 35(1):108-123.
- Miller, G. 1959. Use of dinitrosalicylic acid reagent for determination of reducing sugar. *Analytical Chemistry*. 31(3):420-428.
- Nobel, P. S. y Valenzuela, A. G. 1987. Environmental responses and productivity of the CAM plant, *Agave tequilana*. *Agric. Forest Meteorol.* 39(4):319-334.
- Nobel, P. S.; Quero, E. and Linares, H. 1988. Differential growth responses of agaves to nitrogen, phosphorus, potassium, and boron application. *J. Plant Nutr.* 11(12):1683-1700.
- Ruiz-Corral, J. A. 2007. Requerimientos agroecológicos y potencial productivo del agave *Agave tequilana* weber en México. *In: conocimiento y prácticas agronómicas para la producción de Agave tequilana weber en la zona de denominación de origen del tequila*. Pérez-Domínguez, J. F. y Del Real-Laborde, J. I. (Eds.). INIFAP)-Campo Experimental Centro-Altos de Jalisco. Tepatitlán de Morelos, Jalisco. Libro técnico núm. 4. 13-36 pp.
- Ruiz-Corral, J. A.; Pimienta-Barrios, E. y Zañudo-Hernández, J. 2002. Regiones térmicas óptimas y marginales para el cultivo de *Agave tequilana* en el estado de Jalisco. *Agrociencia*. 36(1):41-53.
- Saldaña-Robles, A.; Serwatowski-Hlawinska, R. J.; Saldaña, R. N.; Gutiérrez-Vaca, C.; Cabrera-Sixto, J. M. y García, B. S. 2012. Determinación de algunas propiedades físicas de *Agave tequilana* Weber para mecanizar la cosecha. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 3(3):451-465.
- SAS. 2002. Statistical Analysis System. SAS. Version 9.0. SAS Institute Inc. Cary, NC USA. n/p.
- Suárez-Machín, C.; Garrido-Carralero, N. A. y Guevara-Rodríguez, C. A. 2016. Levadura *Saccharomyces cerevisiae* y la producción de alcohol. Revisión bibliográfica. *ICIDCA sobre los derivados de la caña de azúcar*. 50(1):20-28.
- Uvalle-Bueno, J. X y Vélez-Gutiérrez, C. 1987. Nutrición del agave tequilero (*Agave tequilana* Weber, var. azul). En *Conocimiento y prácticas agronómicas para la producción Agave tequilana Weber*. Pérez-Domínguez, J. F. y del Real Laborde, J. I. (Eds.). INIFAP)-Centro de Investigación Regional del Pacífico Centro, Campo Experimental Centro-Altos de Jalisco. Tepatitlán, Jalisco. Libro técnico núm. 4. 68-88 pp.
- Villa-Flores, A. 2009. El tequila en el norte: características de la exportación de tequila a Estados Unidos y Canadá. *Revi. Mex. Estudios Canadienses*. 18:79-99.
- Zuñiga-Estrada, L. 2013. Nutrición de *Agave tequilana* y manejo de los fertilizantes en un sistema de producción intensiva (riego por goteo). MX-0-310391-33-03-14-09-32. SAGARPA. INIFAP-Campo Experimental Las Huastecas. Villa Cuauhtémoc, Tamaulipas. Folleto técnico. 20 p.
- Zuñiga-Estrada, L.; Rosales Robles, E.; Yáñez-Morales, M. de J. y Jacques-Hernández, C. 2018. Características y productividad de una planta MAC, *Agave tequilana* desarrollada con fertigación en Tamaulipas, México. *Rev. Mex. Cienc. Agríc.* 9(3):553-564.