

Afectaciones fisiológicas y bioquímicas en vitroplantas de caña de azúcar en respuesta al estrés hídrico y salino

Miriam Cristina Pastelín-Solano
Odón Castañeda-Castro[§]

Universidad Veracruzana-Facultad de Ciencias Químicas. Prolongación de Oriente 6 núm. 1009, Orizaba, Veracruz, México. CP. 94340. Tel. 01(272) 7241779. (mpastelin@uv.mx).

[§]Autor para correspondencia: odcastaneda@uv.mx.

Resumen

La producción agrícola es afectada negativamente por estrés biótico y abiótico, siendo responsables de grandes pérdidas económicas en el mundo. La caña de azúcar es la materia prima para obtener jugo de caña que se transforma en sacarosa y en la producción de etanol de segunda generación. En el presente estudio se evaluó el número de brotes y hojas, la concentración de prolina, clorofila a, b y total y la concentración de azúcares como respuesta al estrés hídrico y salino en dos variedades de caña de azúcar *in vitro*. Brotes individualizados de 5 cm de longitud de las variedades MotzMex 91-207 y SP 71-6180 de caña de azúcar se cultivaron *in vitro* bajo estrés hídrico (PEG 6000) y salino (NaCl). Las dos variedades de caña de azúcar analizadas *in vitro* presentaron respuestas diferentes al estrés osmótico. La variedad MotzMex 91-207 fue mejor que la variedad SP 71-6180 para responder al estrés hídrico con una mayor acumulación de prolina (82.34 mg g⁻¹ PS), no presentó disminución en el contenido de clorofilas a, b y total y generó 20.8 brotes por explante aun en condiciones de estrés. Por otro lado, la respuesta al estrés salino con 50 mM NaCl *in vitro* la presentó la variedad SP 71-6180 al generar una mayor acumulación de carbohidratos como galactosa, glucosa y manosa.

Palabras clave: *Saccharum*, cromatografía líquida de alta resolución, estrés abiótico.

Recibido: agosto de 2018

Aceptado: octubre de 2018

El calentamiento global aumenta la frecuencia de fenómenos meteorológicos extremos tales como inundaciones y sequías afectando negativamente la productividad agraria. México es el segundo país del mundo más vulnerable a los efectos del cambio climático, lo que traería como consecuencia una posible disminución en la producción agrícola de 30% si no se toman las debidas medidas para enfrentarlo (Moyer, 2010).

La supervivencia de las plantas bajo condiciones ambientales adversas está basada en los cambios metabólicos y estructurales para adaptarse al estrés (Golldack *et al.*, 2014). La sequía y la salinidad son factores abióticos estresantes que impactan el desarrollo de la planta y la productividad; por lo tanto, causan grandes pérdidas en el rendimiento agrícola (OIA, 2009; Agarwal *et al.*, 2013).

Las respuestas al estrés abiótico en la fisiología de la planta se expresan de forma negativa en la fotosíntesis, a través de la reducción del área foliar, contenido de clorofila, conductancia estomática y síntesis de carbohidratos que puede provocar la muerte de la planta (Chávez-Suárez *et al.*, 2015). La presión de la turgencia depende del potencial osmótico de la vacuola; por lo tanto, la osmorregulación o ajuste osmótico ocurre cuando las células acumulan solutos, como la prolina, en respuesta a algún estímulo ambiental, como la sequía o la salinidad. Esto permite que la presión de la turgencia permanezca alta para permitir diversos procesos como la disminución en la fotosíntesis, reducción de transpiración, cierre estomático y reducción del área foliar causado por estrés hídrico (Inman-Bamber y Smith, 2005).

El estrés salino tiene diferentes efectos adversos en las plantas que van desde la disminución rápida de la tasa de crecimiento y la reducción en el flujo de agua en las raíces lo que causa estrés hídrico, hasta la acumulación de iones como Na^+ y Cl^- en la célula vegetal que causan efectos tóxicos (Munns *et al.*, 2006).

El polietilenglicol (PEG) es un alcohol polimérico con alta solubilidad en agua y baja toxicidad, actúa como agente osmótico no penetrante al disminuir el potencial hídrico del medio de cultivo, produce una deficiencia hídrica en las células vegetales y un desbalance del metabolismo en general, utilizado ampliamente en la realización de estudios experimentales de simulación de efectos de sequía en laboratorio (Fontana *et al.*, 2001; Almansouri *et al.*, 2001; Burnett *et al.*, 2005).

La caña de azúcar es un cultivo industrial importante, México ocupa el sexto lugar con una producción de 6.18 millones de toneladas de azúcar (CONADESUCA, 2016). El déficit hídrico es el principal factor que influye en la productividad de la caña de azúcar. Afecta directamente el amacollamiento y la altura del tallo, lo que resulta en una producción de sacarosa incierta (Reddy *et al.*, 2004; Sugiharto 2004).

El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar características morfológicas, fisiológicas y bioquímicas en dos variedades de caña de azúcar *in vitro* (MotzMex 91-207 y SP 71-6180) en respuesta al estrés hídrico (PEG 6000) y estrés salino (NaCl).

Material vegetal y medio de cultivo

La presente investigación se llevó a cabo en el laboratorio de Biotecnología y Criobiología Vegetal, Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana, ubicado en prolongación de Oriente 6 No. 1009 Orizaba, Veracruz México.

El material biológico utilizado fueron vitroplantas de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) de las variedades MotzMex 91-207 (actualmente liberada para el campo comercial) y SP 71-6180 (utilizada como progenitor femenino en los cruzamientos para obtener semilla genética vía sexual).

El medio de cultivo fue un MS (Murashige y Skoog, 1962) al 100%, complementado con 2% sacarosa (p/v), 100 mg L⁻¹ mio-inositol, 50 mg L⁻¹ tiamina, 100 mg L⁻¹ piridoxina, 50 mg L⁻¹ ácido nicotínico, 300 mg L⁻¹ glicina, 100 mg L⁻¹ biotina, 50 mg L⁻¹ arginina y 50 mg L⁻¹ ácido ascórbico. El pH del medio se ajustó a 5.7 ±0.1 y permaneció en estado líquido durante el desarrollo del experimento. 20 mL de medio de cultivo líquido fue depositado en frascos con capacidad para 150 mL y fue esterilizado en una autoclave vertical (Lab-Tech modelo LAC5060s; Namyangju, Corea del Sur) a 120 °C por 20 min.

Efecto del polietilenglicol (PEG 6000) y cloruro de sodio (NaCl) en diferentes respuestas fisiológicas

Brotos individualizados de 5 cm de longitud se depositaron en frascos de vidrio con capacidad de 150 mL a los cuales se adicionó 20 mL de medio de cultivo líquido. El estrés hídrico fue inducido por la adición de polietilenglicol 6000 (PEG) al medio de cultivo en concentraciones de 0, 5, 10 y 15 % (para generar potenciales osmóticos de -0.18, -0.45, -0.65 y -0.8 MPa, respectivamente). El estrés salino se indujo con NaCl en 0, 50, 75 y 100 mM.

Los tratamientos establecidos en el medio de cultivo *in vitro* se mantuvieron en un cuarto de incubación de ambiente controlado, con luz blanca fluorescente, cuya radiación fotosintética activa fue de 50 μmol m⁻² s⁻¹, fotoperiodo de 16 h luz y 8 h oscuridad, se empleó luz blanca fluorescente con flujo de fotones entre 40 y 50 μmol m⁻² s⁻¹ a 25 ±2 °C por un periodo de 30 días.

Cada tratamiento tuvo cinco repeticiones y cada una de éstas consistió de un frasco con tres explantes. Los datos obtenidos se analizaron a través de un Anova utilizando el paquete estadístico SAS (SAS, 2011).

Análisis del contenido de prolina

La concentración de prolina se realizó de acuerdo a la metodología descrita por Bates *et al.* (1973). Para ello se utilizó tejido foliar fresco y se analizó en un espectrofotómetro Hewlett Packard® 8452, a 520 nm, usando L-prolina marca Merck® para la curva de calibración.

Determinación de clorofilas

Los contenidos de clorofila a, b y total se realizaron por el método descrito por Harborne (1973) en el que se tomó la muestra fresca y se cuantificó en espectrofotómetro (ThermoFisher®, Genesys 10S UV-VIS; China) con absorbancia de 663 y 645 nm.

Variables del crecimiento

Después de 30 días del establecimiento, en el medio de cultivo líquido y con cuatro niveles de PEG y NaCl, las plantas fueron extraídas para analizar el número de hojas, brotes, concentración de prolina, contenido de clorofilas y contenido de azúcares.

Se determinó el incremento porcentual en el número vástago, considerando como referencia la altura inicial del vástago. Las alturas se midieron con un flexómetro considerando como altura inicial 5 cm en todos los casos.

Análisis de carbohidratos por cromatografía líquida de alta resolución (HPLC)

Los carbohidratos fueron determinados por cromatografía líquida de alta resolución (HPLC). El equipo utilizado fue un HPLC marca Dionex® modelo ICS-3000 equipado con un detector electroquímico, columna CarboPac PA1 2×250 mm, de la marca ThermoFisher® utilizando agua grado HPLC como fase móvil con un flujo isocrático de 0.5 mL min⁻¹ y NaOH 300 mM para la reacción electroquímica. La temperatura de análisis fue de 30 °C, con un tiempo de corrida de 80 minutos. Los estándares utilizados fueron arabinosa, galactosa, glucosa, xilosa y fructuosa ≥95%, marca Sigma-Aldrich® con nueve diferentes concentraciones (0.1, 0.2, 0.5, 0.8, 1, 2, 3, 4 y 5%), la extracción se realizó con 30 mg de material vegetal, el volumen de inyección fue de 25 µL y la cuantificación se realizó por medio de una curva de calibración y estándar externo.

Efecto del PEG y NaCl

Las vitroplantas de caña de azúcar incrementaron la acumulación de prolina (138.78 mg g⁻¹ PMF) cuando se sometieron al agente estresante PEG al 5%, aumentando el número de brotes (15). A pesar del incremento en la concentración del PEG los niveles de clorofila fueron mayores (Cuadro 1).

Cuadro 1. Efecto del agente estresante (PEG y NaCl) en las concentraciones de prolina, clorofilas, número de brotes y hojas de vitroplantas de caña de azúcar.

Agente estresante	Prolina	Clorofila a	Clorofila b	Clorofila total	Brotes	Hojas
	(mg g ⁻¹ PMF)		(mg g ⁻¹ PMF)		(número)	
PEG (%)						
0	30.56 ±0.01 c	0.3 ±0.02 c	0.25 ±0.02 cd	0.55 ±0.03 c	9.9 ±0.55 c	23.3 ±0.77 ab
5	138.78 ±90.83 a	0.4 ±0.03 b	0.35 ±0.02 b	0.75 ±0.05 b	15 ±6.35 abc	32.4 ±14.24 ab
10	35.22 ±5.84 bc	0.5 ±0.02 a	0.4 ±0.02 a	0.9 ±0.03 a	11.7 ±2.74 bc	27.7 ±6.9 ab
15	59.53 ±28.08 bc	0.54 ±0.08 a	0.4 ±0.04 a	0.95 ±0.04 a	9.8 ±1.75 c	21.6 ±3.94 b
NaCl (mM)						
0	30.56 ±0.01 c	0.3 ±0.02 c	0.25 ±0.02 cd	0.55 ±0.03 c	9.9 ±0.55 c	23.3 ±0.77 ab
50	53.2 ±1.46 bc	0.3 ±0.03 c	0.26 ±0.02 c	0.56 ±0.04 c	17.9 ±0.99 a	34.7 ±7.12 a
75	68.52 ±18.24 bc	0.22 ±0.02 d	0.21 ±0.01 d	0.44 ±0.03 d	16.1 ±2.3 ab	31.8 ±3.29 ab
100	97.82 ±16.78 ab	0.22 ±0.01 d	0.22 ±0.03 cd	0.44 ±0.04 d	13 ±3.51 abc	29.8 ±5.48 ab

Medias ± DE con letras distintas en cada columna indican que no existen diferencias estadísticas significativas entre tratamientos ($p \leq 0.05$).

La respuesta al estrés salino se presentó en los niveles más altos de NaCl (100 mM) alcanzando la mayor acumulación de prolina (97.82 mg g⁻¹ PMF) (Cuadro 1). Los niveles de clorofilas disminuyeron como respuesta al estrés salino. De la misma manera García *et al.* (2010), al evaluar

dos cultivares de *Phaseolus* en sombreadero, encontraron una disminución del contenido relativo de clorofila y atribuyeron esta reducción a la inhibición en la síntesis de precursores de esta molécula lo que, por lo común, se acentúa a medida que se prolonga el período de estrés.

De acuerdo a los resultados obtenidos en este estudio, las vitroplantas de caña de azúcar presentaron una mayor susceptibilidad al estrés salino que al estrés hídrico. El contenido de clorofila desempeña un papel importante en el crecimiento y desarrollo de las plantas (Jahan *et al.*, 2014) y la disminución en su contenido es la principal causa de alteraciones en el proceso de fotosíntesis (Khairi *et al.*, 2015).

En el cultivo de la caña de azúcar, la degradación de clorofila, cuando es expuesta a estrés osmótico provoca daños en la capacidad fotosintética, ya que los niveles tienden a decrecer en función del tiempo de exposición, lo que lleva suponer un daño categórico al complejo proteico de los fotosistemas (Cha-Um y Kirdmanee, 2008).

En relación a los cambios presentados en arabinosa, galactosa, xilosa y manosa no existieron diferencias significativas en función al agente estresante al cual fueron expuestas las vitroplantas de caña de azúcar.

Efecto del factor variedad

Al inducir el estrés osmótico *in vitro* de la caña de azúcar por efecto de los factores PEG y NaCl hubo comportamientos distintos entre las variedades.

La mayor acumulación de prolina ($82.34 \text{ mg g}^{-1} \text{ PS}$) se presentó en la variedad MotzMex 91-207 en comparación con la variedad SP 71-6180 ($46.21 \text{ mg g}^{-1} \text{ PS}$) (Cuadro 2). Los contenidos de clorofila presentaron similitud en las dos variedades de caña de azúcar sometidas a estrés hídrico, no existió diferencia estadística significativa.

Cuadro 2. Efecto del factor variedad en las concentraciones de prolina, clorofilas, número de brotes y hojas de vitroplantas de caña de azúcar bajo estrés osmótico durante 30 días.

Variedad	Prolina	Cl a	Cl b	Cl total	Brotes	Hojas
	($\text{mg g}^{-1} \text{ PS}$)	(mg g^{-1} PF)			(número)	
MotzMex 91-207	$82.34 \pm 30.44a$	$0.36 \pm 0.06a$	$0.3 \pm 0.03a$	$0.67 \pm 0.09a$	$15.05 \pm 1.94a$	$32.93 \pm 3.93a$
SP 71-6180	$46.21 \pm 8.88b$	$0.33 \pm 0.14a$	$0.28 \pm 0.1a$	$0.62 \pm 0.1a$	$10.78 \pm 1.46b$	$23.23 \pm 2.02b$

Medias \pm DE con letras distintas en cada columna indican diferencias estadísticas significativas entre variedades evaluadas ($p \leq 0.05$).

La acumulación de azúcares en las dos variedades en estudio presentó diferentes comportamientos. Las concentraciones más altas de arabinosa, glucosa, xilosa, manosa y fructuosa, se encontraron en la variedad de caña de azúcar SP 71-6180, mientras que la variedad MotzMex solo presentó las concentraciones más altas en galactosa (Figura 1).

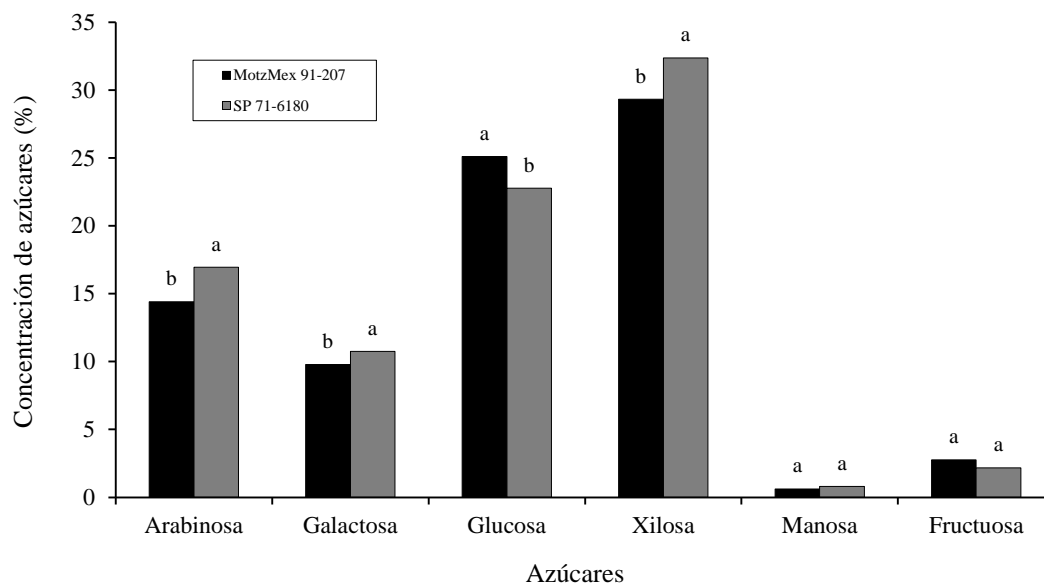


Figura 1. Efecto del factor variedad (MotzMex 91-207 y SP 71-6180) en la acumulación de carbohidratos en vitroplantas de caña de azúcar bajo estrés osmótico durante 30 días. Letras distintas sobre las columnas de cada figura indican diferencias significativas entre tratamientos ($p \leq 0.05$).

La acumulación de prolina frecuentemente se ha vinculado con una mayor tolerancia al estrés por sales y por sequía. Aunque su papel en la osmotolerancia de la planta sigue siendo controvertido, se cree que la prolina contribuye al ajuste osmótico, a la desintoxicación de las especies reactivas del oxígeno y a la protección de la integridad de la membrana (Kuznetsov y Schevyakova, 1999; Molinari *et al.*, 2007). En tabaco se han producido plantas transgénicas que sobreproducen prolina, mejorando así su tolerancia a las sales (Kishor *et al.*, 1995). Se ha demostrado que los niveles de prolina en las raíces, aunque un poco menores, son proporcionales a las concentraciones foliares (García y Medina, 2009).

Los azúcares tienen funciones en las plantas como la transducción de señales de los limitantes abióticos que han sido aprovechadas para inducir cambios relacionados con la tolerancia de las plantas mediante la transformación con genes foráneos y expresión alterada de la ruta de la sacarosa, debido principalmente a modificaciones en el balance de la partición del carbono y la fotosíntesis (Chinnusamy *et al.*, 2005).

Efecto de la interacción PEG y NaCl

La variedad de caña de azúcar MotzMex 91-207 en concentraciones 5% de PEG al medio de cultivo mostró un incremento en prolina ($221.7 \text{ mg g}^{-1} \text{ PS}$), siendo capaz de regenerar brotes aun en condiciones estresantes (20.8 brotes) y número de hojas (45.4) (Cuadro 3).

Cuadro 3. Valores promedio para las variables medidas en dos variedades de caña de azúcar *in vitro* (*Saccharum spp.*) sometidos a estrés hídrico y salino durante 30 días.

Variedad	Agente estresante	Prolina	Cl a	Cl b	Cl total	Brotos	Hojas
		(mg g ⁻¹ PS)	(mg g ⁻¹ PF)			(número)	
PEG (%)							
MotzMex 91-207	0	30.56 ±0.1j	0.31 ±0.1fg	0.26 ±0.1ef	0.58 ±0.1f	10.4 ±0.1i	24 ±0.1defg
	5	221.7 ±0.1a	0.37 ±0.1e	0.33 ±0.1d	0.71 ±0.1e	20.8 ±0.1a	45.4 ±0.1a
	10	40.55 ±0.1h	0.51 ±0.1b	0.41 ±0.1ab	0.93 ±0.1b	14.2 ±0.1f	34 ±0.1bc
	15	85.17 ±0.1c	0.61 ±0.1a	0.37 ±0.1c	0.99 ±0.1a	11.4 ±0.1h	25.2 ±0.1def
SP 71-6180	0	30.56 ±0.1j	0.29 ±0.1gh	0.23 ±0.1ghi	0.52 ±0.1g	9.4 ±0.1k	22.6 ±0.1efg
	5	55.86 ±0.1e	0.42 ±0.1d	0.36 ±0.1c	0.79 ±0.1d	9.2 ±0.1l	19.4 ±0.1fg
	10	29.89 ±0.1k	0.49 ±0.1bc	0.39 ±0.1c	0.88 ±0.1c	9.2 ±0.1l	21.4 ±0.1fg
	15	33.89 ±0.1i	0.47 ±0.1c	0.44 ±0.1ab	0.92 ±0.1b	8.2 ±0.1m	18 ±0.1g
NaCl (mM)							
MotzMex 91-207	0	30.56 ±0.1j	0.31 ±0.1fg	0.26 ±0.1ef	0.58 ±0.1f	10.4 ±0.1i	24 ±0.1defg
	50	51.8 ±0.1g	0.32 ±0.1f	0.27 ±0.1ef	0.6 ±0.1f	18.8 ±0.1b	41.2 ±0.1a
	75	85.17±0.1c	0.24 ±0.1i	0.22 ±0.1hij	0.46 ±0.1h	18.2 ±0.1c	34.8 ±0.1b
	100	113.14 ±0.1b	0.23 ±0.1ij	0.25 ±0.1efg	0.48±0.1h	16.2 ±0.1e	34.8 ±0.1b
SP 71-6180	0	30.56 ±0.1j	0.29 ±0.1gh	0.23±0.1gh	0.52 ±0.1g	9.4 ±0.1k	22.6 ±0.1efg
	50	54.53 ±0.1f	0.28 ±0.1h	0.24 ±0.1fgh	0.52 ±0.1g	17 ±0.1d	28.2 ±0.1cde
	75	51.87 ±0.1g	0.2 ±0.1j	0.21 ±0.1ij	0.41 ±0.1i	14 ±0.1g	28.8 ±0.1bcd
	100	82.5 ±0.1d	0.22 ±0.1ij	0.19 ±0.1j	0.41 ±0.1i	9.8 ±0.1j	24.8 ±0.1def

Medias ± DE con letras distintas en cada columna indican que no existen diferencias estadísticas significativas entre tratamientos ($p \leq 0.05$).

La variedad MotzMex además presentó el contenido más alto de clorofila a y total (0.61 y 0.99 mg g⁻¹ PF) cuando se adicionó 15% de PEG al medio de cultivo.

La mayor acumulación de xilosa (30.53%) se obtuvo con la variedad SP 71-6180 en concentraciones de 15% de PEG en el medio de cultivo.

Las vitroplantas de caña de azúcar de la variedad SP 71-6180 acumularon la mayor cantidad de carbohidratos galactosa, glucosa y manosa bajo 50 mM NaCl para inducir el estrés salino. La adición de 100 mM de NaCl al medio de cultivo presentó la concentración más alta de manosa (39.2%) en la variedad SP 71-61-80 (Cuadro 4).

Cuadro 4. Efecto de la interacción de variedad y agente estresante en las concentraciones de carbohidratos de vitroplantas de caña de azúcar.

Variedad	Agente estresante	Galactosa	Glucosa	Xilosa	Manosa	Fructuosa
		(%)				
PEG (%)						
MotMex 91-207	0	15.44 ±0.1g	10.67 ±0.1g	24.48 ±0.1h	34.55 ±0.1c	0.84 ±0.1b
	5	14.4 ±0.1j	10.43 ±0.1h	30.15 ±0.1b	28.88 ±0.1j	0.71 ±0.1d
	10	13.65 ±0.1i	9.31 ±0.1i	25.17 ±0.1f	29.36 ±0.1h	0.52 ±0.1f
	15	9.77 ±0.1n	6.54 ±0.1n	26.64 ±0.1d	20.49 ±0.1n	0.42 ±0.1h
SP 71-6180	0	15.74 ±0.1f	10.86 ±0.1f	24.65 ±0.1g	34.33 ±0.1d	0.75 ±0.1c
	5	13.35 ±0.1m	8.59 ±0.1m	17.1 ±0.1m	24.46 ±0.1m	0.31 ±0.1i
	10	16.12 ±0.1e	11.21 ±0.1c	19.15 ±0.1j	29.87 ±0.1g	0.52 ±0.1f
	15	14.08 ±0.1k	9.61 ±0.1j	30.53 ±0.1a	25.24 ±0.1l	0.43 ±0.1h
NaCl (mM)						
MotMex 91-207	0	15.44 ±0.1g	10.67 ±0.1g	24.48 ±0.1h	34.55 ±0.1c	0.84 ±0.1b
	50	16.67 ±0.1d	11.16 ±0.1d	25.2 ±0.1f	30.65 ±0.1f	0.51 ±0.1fg
	75	14.88 ±0.1i	9.52 ±0.1k	18.85 ±0.1k	27.01 ±0.1k	0.48 ±0.1g
	100	15.1 ±0.1h	9.97 ±0.1i	25.9 ±0.1e	29.04 ±0.1l	0.57 ±0.1e
SP 71-6180	0	15.74 ±0.1f	10.86 ±0.1f	24.65 ±0.1g	34.33 ±0.1d	0.75 ±0.1c
	50	20.61 ±0.1a	12.12 ±0.1a	17.79 ±0.1l	38.25 ±0.1b	0.41 ±0.1h
	75	19.74 ±0.1c	11.83 ±0.1b	27.09 ±0.1c	33.27 ±0.1e	3 ±0.1a
	100	20.29 ±0.1b	10.92 ±0.1e	21.24 ±0.1i	39.29 ±0.1a	0.3 ±0.1i

Medias ± DE con letras iguales en cada columna indican que en cada evaluación no existen diferencias Estadísticas significativas ($p \leq 0.05$).

La caña de azúcar es un cultivo considerado moderadamente sensible al estrés osmótico y lo que afecta su crecimiento y morfología radical, el crecimiento del sistema aéreo y los procesos fotosintéticos (García y Medina, 2009).

La salinidad genera senescencia foliar que va acompañada de una removilización de nutrientes, y una consecuente disminución del contenido de clorofila antes de la abscisión de la hoja (Keller, 2005; Quesada y Valpuesta, 2008).

La importancia de los solutos orgánicos, como los azúcares destaca en que están asociados con la tolerancia a la salinidad (Abdel, 2007). De acuerdo con Kumar *et al.* (1994) la alta demanda de fotoasimilados que involucra los procesos de crecimiento de los tejidos en expansión está determinado por la capacidad de la planta para sintetizar y acumular azúcares (Pérez-Alfocea *et al.*, 1996). También Wahid (2004) encontró en plantas de caña de azúcar salinizadas, un mayor incremento en el contenido de azúcares solubles en una variedad tolerante, con respecto a una sensible, lo que sugiere que estos solutos juegan un papel importante en el ajuste osmótico y en la tolerancia a sales en este cultivo.

La homeostasis iónica a nivel de planta requiere una coordinación precisa entre los mecanismos celulares y los que operan a nivel intercelular, en tejidos y órganos. A nivel celular, los mecanismos de tolerancia a la salinidad descansan sobre varios aspectos interrelacionados, como son: el mantenimiento del equilibrio osmótico en relación con el tonoplasto y con el medio externo requiere la síntesis en el citoplasma de los solutos orgánicos compatibles como los azúcares (Munns *et al.*, 2006). Las raíces pueden realizar ajuste osmótico mediante la acumulación de azúcares (Willadino y Camara, 2004; Romero *et al.*, 2004), lo cual disminuye el potencial osmótico de la raíz y de esta manera favorece la absorción del agua que es limitada por la salinidad. Gupta y Sharma (1990) encontraron que las plantas de tomate tratadas con niveles de 50 mM de NaCl, presentaron un crecimiento de biomasa similar o superior al control, en correspondencia con un incremento en el contenido de azúcares reductores totales en el tallo y raíz, además se ha encontrado que la salinidad afecta la biomasa seca de las plántulas, pero su reducción es menor comparado con la biomasa fresca (Torres y Echevarría, 1994).

Conclusiones

La variedad MotzMex 91-207 fue mejor que la variedad SP 71-6180 bajo condiciones de estrés hídrico con la adición de PEG al presentar una mayor acumulación de prolina, clorofila *a*, *b* y total y al mismo tiempo continuar con su capacidad de regeneración de brotes y hojas a nivel *in vitro*. La variedad SP 71-6180 fue superior en respuesta al estrés salino que la MotzMex 91-207 al generar una mayor acumulación de carbohidratos como galactosa, glucosa y manosa.

Literatura citada

- Abdel, M. 2007. Physiological aspects of mungbean plant (*Vigna radiata* L. Wilezek) in response to salt stress and gibberellic acid treatment. *Res. J. Agric. Biol. Sci.* 3(4):200-213.
- Agarwal, P. K.; Shukla, P. S.; Gupta, K. and Jha, B. 2013. Bioengineering for salinity tolerance in plants: state of the art. *Mol. Biotechnol.* 54(1):102-123.
- Almansouri, M. J.; Kinet, M. and Lutts, S. 2001. Effect of salt and osmotic stresses on germination in durum wheat (*Triticum durum* Desf.). *Plant and Soil.* 231(2):243-254.
- Bates, L. S.; Waldren, R. P. and Teare, I. D. 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant Soil.* 39(1):205-207.
- Burnett, S. E.; Pennisi, S. V.; Thomas, P. A. and van Iersel, M. W. 2005. Controlled drought affects morphology and anatomy of *Salvia splendens*. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 130(4):775-781.
- Cha, U. S. and Kirdmanee, C. 2008. Effect of osmotic stress on proline accumulation, photosynthetic abilities and growth of sugarcane plantlets (*Saccharum officinarum* L.). *Pakistan J. Bot.* 40(6):254-2552.
- Chávez, S. L.; Álvarez, F. A.; Ramírez, F. R.; Infante, F. S.; Licea, C. L.; García, R. B.; García, A. A. y Fonseca, A. M. 2015. Efecto de la salinidad sobre el contenido relativo de agua y la concentración de pigmentos en tres genotipos de frijol. (*Phaseolus vulgaris* L.) *Centro Agrícola.* 42(3):19-24.
- Chinnusamy, V.; Liming, X. and Jian, K. C. 2005. Chapter two: use of genetic engineering and molecular biology approaches for crop improvement for stress environments. *In: Ashraf, M. y Harris, P. (Eds.). Abiotic stresses plant resistance through breeding and molecular approaches.* Food Products Press, Binghamton. 47-95 pp.

- CONADESUCA. 2016. Diversificación de la caña de azúcar para otros fines. Nota técnica informativa del sector de la caña de azúcar. <http://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/114368/CAMBIOSNotaABRIL2016.pdf>.
- Fontana, G.; Licciardi, M.; Mansueto, S.; Schillaci, D. and Giammona, G. 2001. *Amoxicillin-loaded polyethylcyanoacrylate nanoparticles*: Influence of PEG coating on the particle size, drug release rate and phagocytic uptake. *Biomaterial*. 22(21):2857-2865.
- García, M. y Medina, E. 2009. Acumulación de iones y solutos orgánicos en dos genotipos de caña de azúcar, estresados con sales simples o suplementadas con calcio. *Bioagro*. 21(1):3-14.
- García, M.; García, G. y Sanabria, M. 2010. Efecto de la salinidad sobre el crecimiento, daño oxidativo y concentración foliar de metabolitos secundarios en dos variedades de caraota (*Phaseolus vulgaris* L.). *Interciencia* 35(11):840-846.
- Gollmack, D.; Li, C.; Mohan, H. and Probst, N. 2014. Tolerance to drought and salt stress in plants: Unraveling the signaling networks. *Front. Plant Sci*. 5(10):151.
- Gupta, S. K. and Sharma, S. K. 1990. Response of crops to high exchangeable sodium percentage. *Irrigation Sci*. 11(3):173-179.
- Harborne, J. B. 1973. *Phytochemical methods: a guide to modern techniques of plant analysis*. Chapman and Hall Ltd, London. 205-207 pp.
- Inman, B. N. G. and Smith, D. M. 2005. Water relations in sugarcane and response to water deficits. *Field Crops Res*. 92(2-3):185-202.
- Jahan, M. S.; Nozulaidi, M.; Moneruzzaman, M.; Ainun, A. and Husna N. 2014. Control of plant growth and water loss by a lack of light-harvesting complexes in photosystem-II in *Arabidopsis thaliana* chl-1 mutant. *Acta Physiol. Plantarum* 36(7):1627-1635.
- Keller, M. 2005. Deficit irrigation and vine mineral nutrition. *Amer. J. Enol. Vitic*. 56(3):267-283.
- Khairi, M.; Nozulaidi, M. and Sarwar, M. 2015. Effects of different water levels on physiology and yield of salinity rice variety. *Australian J. Basic Appl. Sci*. 9(2):339-345.
- Kishor, K.; Hong, Z.; Miao, G.; Hu, C. and Verma, D. 1995. Overexpression of Pyrroline 5-Carboxylate Synthetase increases proline production and confer osmotolerance in transgenic plants. *Plant Physiol*. 108(4):1387-1394.
- Kumar, S.; Naidu, K. and Sehtiya, H. 1994. Causes of growth reduction in elongating and expanding leaf tissue of sugarcane under saline conditions. *Aust. J. Plant Physiol*. 21(1):71-83.
- Kuznetsov, V. and Schevyakova, N. 1999. Proline under stress: biological role, metabolism and regulation. *Russian J. Plant Physiol*. 46(2):274-287.
- Molinari, H. B. C.; Marur, C. J.; Daros, E.; de Campos, M. K. F.; de Carvalho, J. F. R. P.; Filho, J. C. B.; Pereira, L. F. P.; Vieira, L. G. E. 2007. Evaluation of the stress-inducible production of proline in transgenic sugarcane (*Saccharum* spp.): osmotic adjustment, chlorophyll fluorescence and oxidative stress. *Physiologia Plantarum*. 130(2):218-229.
- Moyer, M. 2010. How much is left? A graphical accounting of the limits to what one planet can provide. *Scientific American - Environment*. 74-81 pp.
- Munns, R.; James, R. A. and Lauchli, A. 2006. Approaches to increasing the salt tolerance of wheat and other cereals. *J. Bot*. 57(5):1025-1043.
- Murashige, T. and Skoog, F. 1962. A revised medium for rapid growth and bio assays with tobacco tissue cultures. *Physiol. Plantarum*. 15(3):473-497.
- OIA. 2009. Conferencia Internacional. OIA/Egipto 'World perspectives for sugar crops as food and energy. 23 p.

- Pérez, A. F.; Balibrea M.; Santa, C. A. and Estaño, M. 1996. Agronomical and physiological characterization of salinity tolerance in a commercial tomato hybrid. *Plant Soil*. 180(2):251-257.
- Quesada, M. A. y Valpuesta, V. 2008. Senescencia y abscisión. *In: fundamentos de fisiología vegetal*. Azcón-Bieto, J. y Talón, M. (Eds.). McGraw-Hill Interamericana. Madrid. 559-576 pp.
- Reddy, A. R.; Chaitanya, K. V. and Vivekanandan, M. 2004. Drought-induced responses of photosynthesis and antioxidant metabolism in higher plants. *J. Plant Physiol*. 161(11):1189-1202.
- Romero, C. A.; Espinosa, R. M. C.; Cutanda, C.; Cortina, P.; Hernández, F. A. y Culiáñez, M. 2004. La osmoregulación: mecanismos y significado. *In: la ecofisiología vegetal, una ciencia de síntesis*. Thomson Editores. España. Madrid. 603-620 pp.
- SAS, 2011. SAS/STAT® 9.3 User's Guide. SAS Institute Inc. Cary, NC, USA. 178 p.
- Sugiharto, B. 2004. Biochemical and molecular studies on sucrose-phosphate synthase and drought inducible-protein in sugarcane (*Saccharum officinarum*). *J. Ilmu. Dasar*. 5(1):62-67.
- Torres, W. and Echevarría I. 1994. Germination and seedling growth of rice (*Oryza sativa* L.) at different NaCl concentration. *Cultivos tropicales*. 15(2):44-47.
- Wahid, A. 2004. Analysis of toxic and osmotic effects of sodium chloride on leaf growth and economic yield of sugarcane. *Bot Bull Acad Sin*. 45(1):133-141.
- Willadino, L. T. y Camara. 2004. Origen y naturaleza de los ambientes salinos. *In: la ecofisiología vegetal, una ciencia de síntesis*. Reigosa, M.; Pedrol, N. y Sánchez, A. (Eds). Thomson Editores Spain. Madrid. 300-303 pp.