

ACUMULACIÓN DE IONES Y SOLUTOS ORGÁNICOS EN HOJAS DE PLANTAS DE CAÑA DE AZÚCAR CULTIVADAS EN DOS TABLONES COMERCIALES AFECTADOS POR SALES

Marina García¹, Ernesto Medina² y Roberto Villafañe³

RESUMEN

Se realizó un muestreo de campo con el objetivo de estudiar la relación de la salinidad del suelo con la acumulación de iones inorgánicos y solutos orgánicos en hojas del genotipo de caña de azúcar PR692176 cultivado en tabloncillos afectados por sales. Se seleccionaron dos tabloncillos comerciales, donde se tomaron muestras de suelo y de hojas con edad distinta. En los suelos se determinó la conductividad eléctrica del extracto (CEe) y la composición iónica, y en las hojas la concentración de Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Cl^- , SO_4^{-2} , azúcares solubles y prolina. Las sales predominantes en un tabloncillo fueron MgSO_4 y Na_2SO_4 , y en el otro, NaCl . La concentración salina en las hojas incrementó a medida que aumentó la CEe, resultando mayor en la vaina foliar y en la hoja más madura. En el tabloncillo con predominio de NaCl , la vaina foliar acumuló más Cl^- que la lámina y lo contrario ocurrió con el Na^+ , siendo la relación Na/Cl menor que uno en ambos tejidos; la concentración foliar de K^+ se redujo en ambas porciones de la hoja con el incremento en la CEe. En el suelo con alto contenido de MgSO_4 , la concentración de Ca^{+2} y la relación Ca/Mg en las hojas disminuyó considerablemente. La concentración de azúcares no reductores y de prolina aumentó a medida que se incrementó la CEe, lo que sugiere una vinculación entre la acumulación foliar de estos solutos y la tolerancia de este genotipo a condiciones salinas.

Palabras clave adicionales: *Saccharum* spp., suelos salinos, iones inorgánicos, azúcares solubles, prolina

ABSTRACT

Ions and organic solutes accumulation in leaves of sugar cane plants growing in two salt affected commercial fields

A field sampling was carried out to determine the relationship between the soil salinity and its ionic composition with the accumulation of ions and organic solutes in leaves of a sugarcane genotype PR692176 growing in salt-affected fields. Two commercial fields were chosen and samples of soil and leaves differing in age were sampled. In the soil samples the electrical conductivity of the saturation extract (ECe) and its saline composition were measured, and in the leaves the concentrations of Na^+ , K^+ , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Cl^- , SO_4^{-2} , soluble sugars and proline were determined. In one field MgSO_4 and Na_2SO_4 were the dominant salts, whereas NaCl was the dominant salt in the other. The concentration of salts in leaves increased with the ECe, with the highest values in the older leaves and the sheaths. In the field with NaCl as the dominant salt, the sheaths accumulated more Cl^- than the blades, and the contrary was observed in the case of Na^+ , being the Na/Cl ratio lower than one in both tissues. Leaf K^+ concentration decreased as ECe increased. In the soil with high content of MgSO_4 the concentration of Ca^{+2} and the Ca/Mg ratio was notably reduced. The concentration of non reducing sugars and proline increased with ECe, suggesting a relationship between the foliar accumulation of these solutes and the tolerance of this genotype to saline conditions.

Additional key words: *Saccharum* spp., saline soils, inorganic ions, soluble sugars, proline

INTRODUCCIÓN

El término salinidad describe la presencia de altas concentraciones de sales solubles en el suelo, o en la solución en la que las plantas crecen, lo cual afecta la productividad de la mayoría de las especies cultivadas (Maas, 1990). Un suelo se

considera salino si la conductividad eléctrica en su extracto saturado (CEe) excede los $4 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$; sin embargo, el valor por encima del cual ocurren efectos nocivos en los cultivos depende de factores genéticos, edáficos y climáticos (Maas, 1986). En la actualidad, se estima que el problema de salinización de los suelos de vocación agrícola

Recibido: Marzo 24, 2008

Aceptado: Febrero 2, 2009

¹ Instituto de Botánica Agrícola, Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. Maracay. Apdo. 4579.

² Instituto Venezolano de Investigaciones Científicas (IVIC), Centro de Ecología. Caracas.

³ Instituto de Ingeniería Agrícola, Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. Maracay. Venezuela.
e-mail: garciam@agr.ucv.ve

está presente en más de 100 países alrededor del mundo (Rengasamy, 2006). En el caso particular de Venezuela, se han reportado distintos grados y tipos de afectación de suelos por sales (Pla, 1985; Villafañe et al., 1999), lo que refleja la importancia del estudio de la respuesta fisiológica de los cultivos a este factor estresante.

La caña de azúcar se cultiva en regiones tropicales y subtropicales bajo condiciones edáficas y climáticas muy variadas. La estacionalidad de las lluvias y los altos requerimientos hídricos de este cultivo hacen que su manejo bajo irrigación sea frecuente, con el consecuente incremento en los problemas de salinización. Esta especie se considera moderadamente sensible a la salinidad (Maas, 1990), siendo mayor el grado de afectación cuando esta condición se presenta durante las primeras etapas del desarrollo (Wahid et al., 1997; Wahid, 2004). En Venezuela, gran parte de las áreas tradicionales y las nuevas dedicadas al cultivo de la caña de azúcar, especialmente en la zona Centro Occidental del país han sido señaladas como salinas o en proceso de salinización (Pla, 1985). La existencia de áreas desprovistas de plantas en tablones de caña de azúcar, comúnmente conocidas como 'peladeros', se ha atribuido en muchos casos a la presencia de un alto contenido de sales en los suelos y/o en las aguas de riego (Zérega et al., 1991).

A pesar de la importancia creciente del problema de salinización para la explotación comercial de la caña de azúcar, la información disponible en relación con los mecanismos fisiológicos involucrados en su respuesta a las sales es escasa, en relación a lo que se conoce para otros cultivos. Se ha indicado que la capacidad de exclusión de Na^+ y/o de Cl^- es importante en la tolerancia salina diferencial entre genotipos de este cultivo (Kumar, et al., 1994; Syed y El Swaify, 1973; Wahid, 2004). El gradiente de concentración de esos iones entre hojas expandidas y en expansión ha mostrado ser decreciente, mientras que con el K^+ ocurre lo contrario (Kumar, et al., 1994; Plaut et al., 2000; García, 2004). Dentro de hojas individuales, Bernstein et al. (1966) reportaron una acumulación preferencial de Cl^- en las vainas foliares, mientras que García (2004) encontró que tanto el Na^+ como el Cl^- son retenidos en ese compartimiento foliar. En cuanto a solutos

orgánicos en plantas estresadas, se ha reportado un incremento en los niveles de azúcares solubles (Kumar et al., 1994; Wahid, 2004) y de prolina (García y Medina, 2003; García, 2004; Wahid, 2004). Cabe indicar, que todos estos hallazgos provienen de estudios donde las condiciones de salinidad han sido manipuladas artificialmente en experimentos realizados bajo condiciones controladas; sin embargo, los resultados de este tipo de ensayo no siempre son extrapolables a condiciones de campo (Nelson y Ham, 2000).

Con base en los señalamientos anteriores, en este estudio se realizó un muestreo de campo, en el que se evaluó el patrón de acumulación de iones inorgánicos, azúcares solubles y prolina en hojas con distintos grados de madurez, en un genotipo de caña de azúcar creciendo en dos tablones comerciales con diferencias en la concentración y composición salina del suelo, con la finalidad de verificar si la acumulación de solutos en las hojas sigue el patrón descrito para plantas estresadas por sales en condiciones controladas, y además, estudiar el grado de correlación entre conductividad eléctrica del suelo y su composición salina con la acumulación de iones y solutos orgánicos en la hoja más recientemente expandida (hoja TVD).

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio se realizó en dos tablones comerciales con problemas de salinidad cultivados con el genotipo PR692176, en plantas de ciclo plantilla de cuatro meses de edad aproximadamente. Según reportes previos, este genotipo se comporta como tolerante a sales (Zérega et al., 1991; Villafañe, 1996; García y Medina, 2003). Los tablones seleccionados estuvieron ubicados en las fincas Maporal (municipio Peña, sector El Pozón, estado Yaracuy) y La Cristalina (municipio Palma Sola, estado Falcón, a 15 Km de Pueblo Nuevo). En cada tablón se ubicaron cinco puntos de muestreo, y en cada uno se tomaron muestras compuestas (3x) de suelo a una profundidad de 0-20 y 20-40 cm. Con estas muestras se prepararon pastas saturadas de suelo a las que se midió el pH, y en el extracto de la pasta se determinó la conductividad eléctrica (CEe), así como la concentración de CO_3^{2-} , HCO_3^- , Cl^- , SO_4^{2-} , Ca^{+2} , Mg^{+2} , Na^+ y K^+ , y se representó la composición

salina con la ayuda del programa 'Sales.bas' (Villafañe y Guarisma, 1998). Los resultados de las determinaciones químicas del suelo para las dos profundidades consideradas, fueron promediados y se reporta la media correspondiente a cada punto de muestreo.

En cada punto de muestreo de suelo se seleccionaron aleatoriamente tres plantas y en el tallo primario de éstas se tomaron muestras de la vaina foliar y de la porción media de la lámina de la hoja TVD y de la ubicada inmediatamente por encima de ésta (hoja aún en expansión) llamada en este estudio 'hoja TVD-1'. Estas muestras se lavaron y congelaron inmediatamente, se secaron en una estufa ventilada a 70 °C y luego se molieron; el material molido se usó para determinar en cada muestra la concentración de Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{+2} , Cl^- y SO_4^{-2} , azúcares reductores y no reductores y prolina. Para el caso de los iones se prepararon extractos acuosos; los cationes se midieron en un espectrofotómetro de absorción atómica, el Cl^- se determinó por titulación volumétrica con nitrato de plata, y el SO_4^{-2} por turbidimetría (Tabatabai y Bremmer, 1970). Para estimar el contenido de azúcares solubles, se prepararon extractos en etanol al 80 % y en éstos se determinó la concentración de azúcares solubles totales por el método de Dubois et al. (1956), azúcares reductores por el método de Robyt y Whelan (1968) y la concentración de azúcares no reductores se obtuvo por diferencia entre ambas. Para el caso de la

prolina se prepararon extractos en ácido sulfosalicílico al 3 % (p/v) y en el extracto se determinó la concentración de prolina siguiendo la metodología propuesta por Bates et al. (1973). La información obtenida se analizó en forma descriptiva y se calcularon los valores promedio y la desviación estándar para cada variable. Adicionalmente, se realizó un análisis de correlación simple entre la conductividad eléctrica y la concentración de los iones predominantes en el extracto de la pasta del suelo, y la concentración de solutos (inorgánicos y orgánicos) en la lámina de la hoja TVD de las plantas muestreadas en los diferentes puntos dentro de cada tablón.

RESULTADOS

Composición salina de los suelos y acumulación de solutos en las hojas

Los suelos de ambos tablones presentaron textura franco-arcillo-limosa y el pH resultó ligeramente alcalino y bastante similar dentro de cada tablón y entre ellos (Cuadro 1). En Maporal los valores de CEe oscilaron entre 5,5 y 11,5 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$ y los iones mayoritarios fueron los cationes Na^+ y Mg^{+2} y el anión, SO_4^{-2} seguido por Cl^- ; las sales dominantes fueron MgSO_4 y Na_2SO_4 . En La Cristalina, los valores de CEe entre los puntos de muestreo oscilaron en un rango más amplio, y los iones que hicieron el principal aporte al incremento en la CEe fueron Na^+ y Cl^- , siendo el NaCl la sal predominante.

Cuadro 1. Valores de pH y humedad de la pasta del suelo saturado, conductividad eléctrica (CEe) y concentración de cationes y aniones en el extracto de la pasta, en muestras tomadas en cinco puntos distintos de un tablón afectado por salinidad, en dos fincas dedicadas a la explotación comercial de caña de azúcar

Finca	Punto	pH	CEe ($\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$)	Concentración de iones ($\text{mmol}\cdot\text{L}^{-1}$)							
				Na^+	K^+	Ca^{+2}	Mg^{+2}	CO_3^{-2}	HCO_3^-	Cl^-	SO_4^{-2}
Maporal	1	8,6	11,5	72,6	1,5	9,8	29,0	0,1	2,2	14,8	65,6
	2	8,5	11,0	62,1	1,0	9,8	32,3	0,1	2,2	17,3	62,7
	3	8,7	9,3	48,2	2,1	9,5	20,8	0,1	1,4	9,5	50,9
	4	8,4	7,0	23,8	0,1	12,3	20,5	0,1	2,4	7,8	41,2
	5	8,3	5,5	12,1	0,2	12,5	14,0	0,1	1,8	6,5	29,3
La Cristalina	1	8,4	13,0	130,0	0,4	9,9	21,1	0,2	3,1	111,8	37,0
	2	8,1	11,0	110,0	0,3	11,9	13,4	0,0	3,3	91,8	31,8
	3	8,5	9,8	109,5	0,3	5,1	13,4	0,1	3,3	91,5	25,5
	4	8,2	7,3	74,5	0,2	9,9	17,3	0,0	3,6	71,7	25,3
	5	8,4	3,3	2,3	0,1	3,0	13,4	0,2	3,0	16,5	8,5

La concentración de Na^+ en las hojas de la planta, para puntos de CEE similar en los dos tablones, fue sustancialmente menor en Maporal (Figura 1); en esta finca, a 5,5 y 7,0 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$, la acumulación de Na^+ entre hojas y dentro de éstas fue casi la misma, pero a partir de 9,3 $\text{dS}\cdot\text{m}^{-1}$, se notó un gradiente ligeramente decreciente entre la hoja TVD y la TVD-1, mientras que en La Cristalina, el contenido de Na^+ fue siempre mayor en la hoja TVD que en la TVD-1, y en ambos tipos de hoja se notó un gradiente de concentración decreciente entre la lámina y la vaina foliar, el cual fue más acentuado en los puntos más salinos. En los dos tablones el

contenido de K^+ tendió a disminuir con el aumento en la CEE y su concentración foliar, en suelos con CEE similar en ambas fincas, fue menor en La Cristalina; el gradiente de concentración de este ión entre la hoja TVD y la TVD-1 fue creciente, y en ambas hojas su contenido fue sustancialmente mayor en la vaina foliar que en la lámina. La relación K/Na alcanzó los mayores valores en las plantas muestreadas en los puntos con menor CEE de cada tablón, y al comparar esta relación para puntos de similar CEE entre los dos tablones, se notó que su valor fue en general mayor en Maporal.

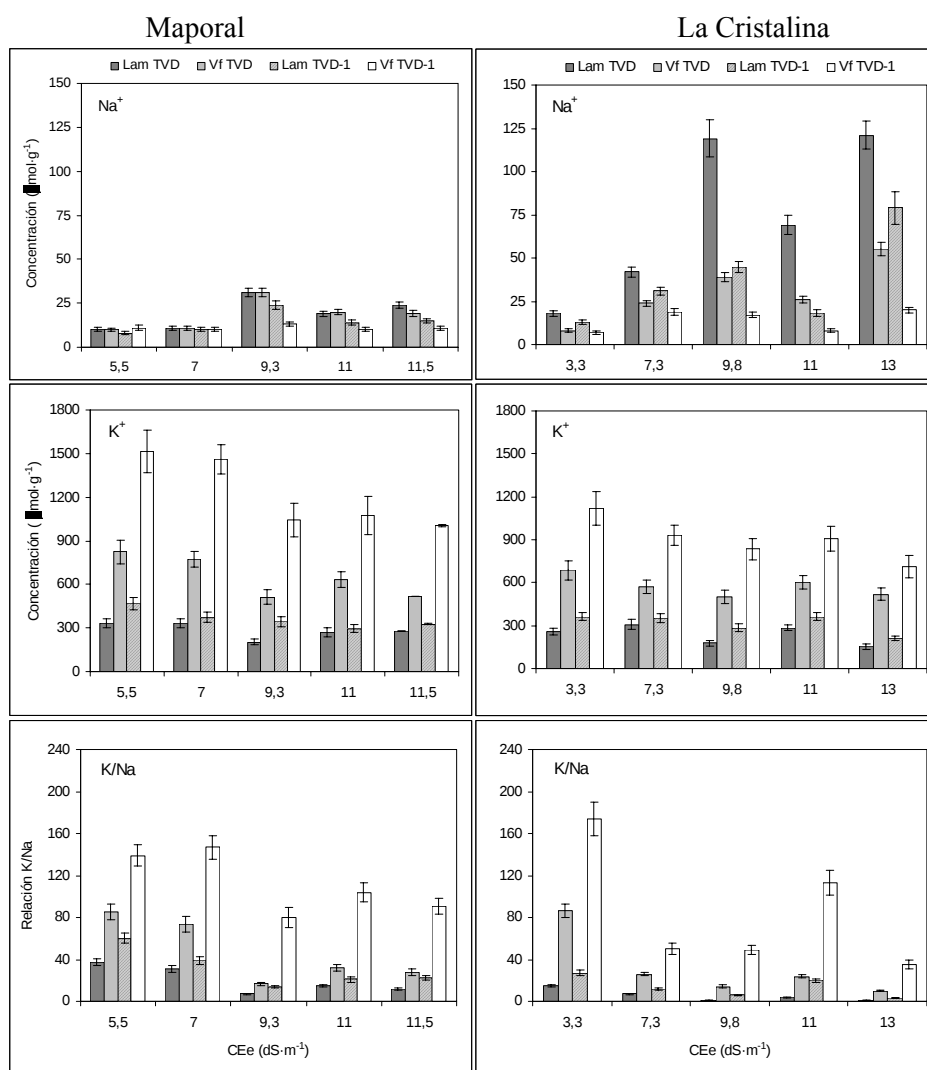


Figura 1. Concentración de sodio y potasio, y relación K/Na en la materia seca de la lámina (Lam) y de la vaina foliar (Vf) de hoja expandida (TVD) y en expansión (TVD-1), en plantas de PR692176 muestreadas en suelos con distinta CEE en dos fincas cañameleras

El contenido de Ca^{+2} soluble varió poco con respecto a la CEE, pero al comparar puntos de similar CEE en las dos fincas se evidenció que la concentración de este ión fue notablemente mayor en La Cristalina que en Maporal (Figura 2). La concentración de Ca^{+2} soluble mostró un patrón ligeramente decreciente entre la hoja TVD y la TVD-1 en el caso de la lámina, y lo contrario ocurrió en la vaina foliar. La concentración foliar de Mg^{+2} soluble fue mayor en los sitios más salinos de ambos tablones, y al comparar puntos con CEE similar en éstos, se nota que la

concentración de este ión fue mayor en Maporal, explicable por el predominio de MgSO_4 en el tablón de esta finca. En los dos tipos de hojas el contenido de Mg^{+2} soluble fue mayor en la vaina foliar que en la lámina, y en esta última la concentración de este ión aumentó con la edad foliar, mientras que en la vaina foliar ocurrió lo contrario. La relación Ca/Mg de las hojas distinguió claramente las plantas de los dos tablones, y para puntos de CEE similar en éstos, esta relación fue notablemente mayor en La Cristalina.

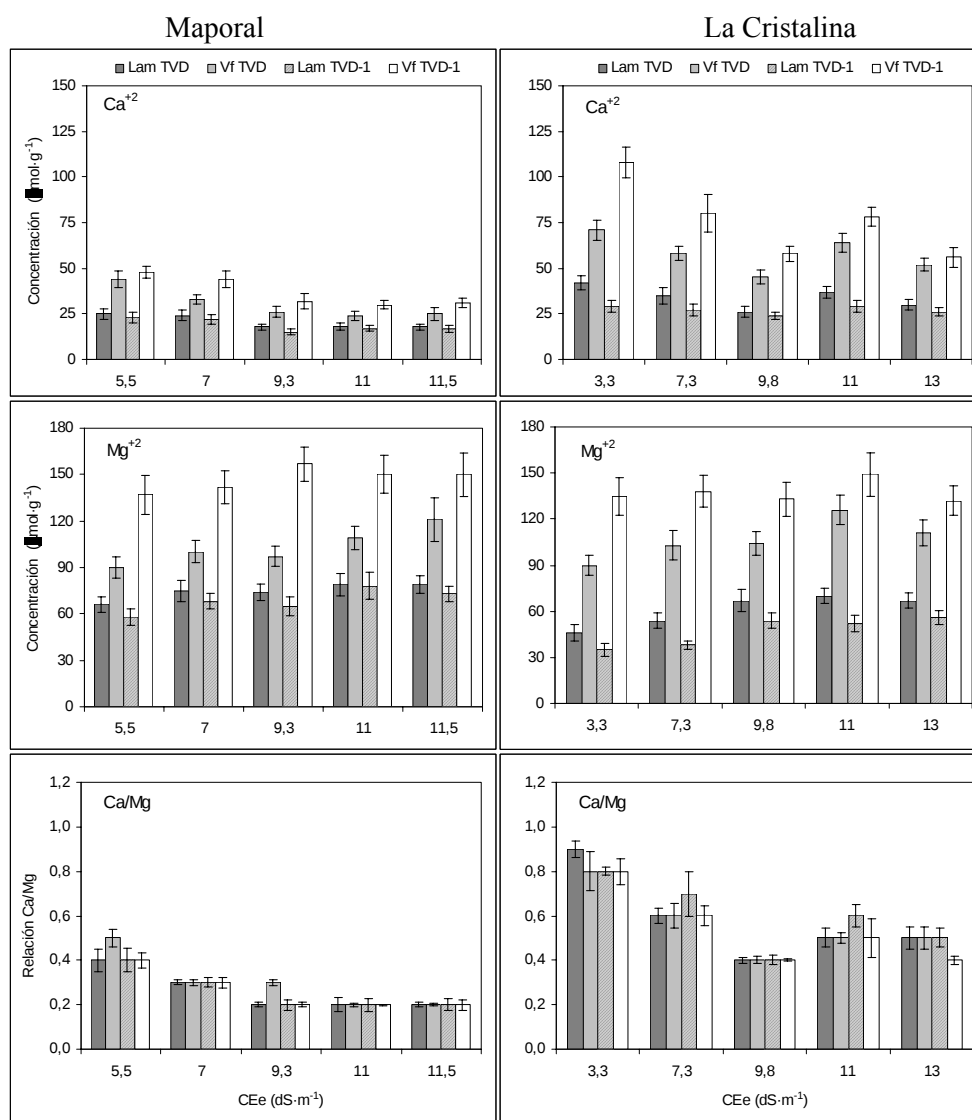


Figura 2. Concentración de calcio y magnesio soluble, y relación Ca/Mg en la materia seca de la lámina (Lam) y de la vaina foliar (Vf) de hoja expandida (TVD) y hoja en expansión (TVD-1), en plantas de PR692176 muestreadas en suelos con distinta CEE en dos fincas cañameleras

La concentración de Cl^- en los tejidos foliares tendió a ser más alto en los puntos con mayor CEE dentro de cada tablón (Figura 3), y al comparar puntos de salinidad similar en ambos tablones, se nota que la acumulación de Cl^- resultó mayor que La Cristalina que en Maporal reflejando la contribución dominante de este anión en el suelo de la primera finca (Cuadro 1). La concentración de Cl^- resultó sustancialmente mayor en las vainas foliares que en las láminas, manteniéndose en estas dos porciones un gradiente de concentración decreciente entre la hoja TVD y la TVD-1. En ambas fincas la concentración de Cl^- en los distintos tejidos foliares fue sustancialmente

mayor que la de Na^+ (relación $\text{Na}/\text{Cl} < 1$), lo que refleja una absorción y transporte de Cl^- hacia las hojas visiblemente mayor, respecto a la de Na^+ . El contenido foliar de SO_4^{2-} no mostró en Maporal una tendencia definida con respecto a la CEE del suelo, mientras que en La Cristalina su concentración fue similar para los distintos valores de CEE del suelo (Figura 3). La concentración de SO_4^{2-} disminuyó con la edad foliar, y fue siempre más elevada en la vaina foliar que en la lámina. La relación $\text{Cl}^-/\text{SO}_4^{2-}$ de las hojas en general tendió a ser más alta en los puntos con mayor CEE de los dos tablones, y su valor fue siempre mayor que uno.

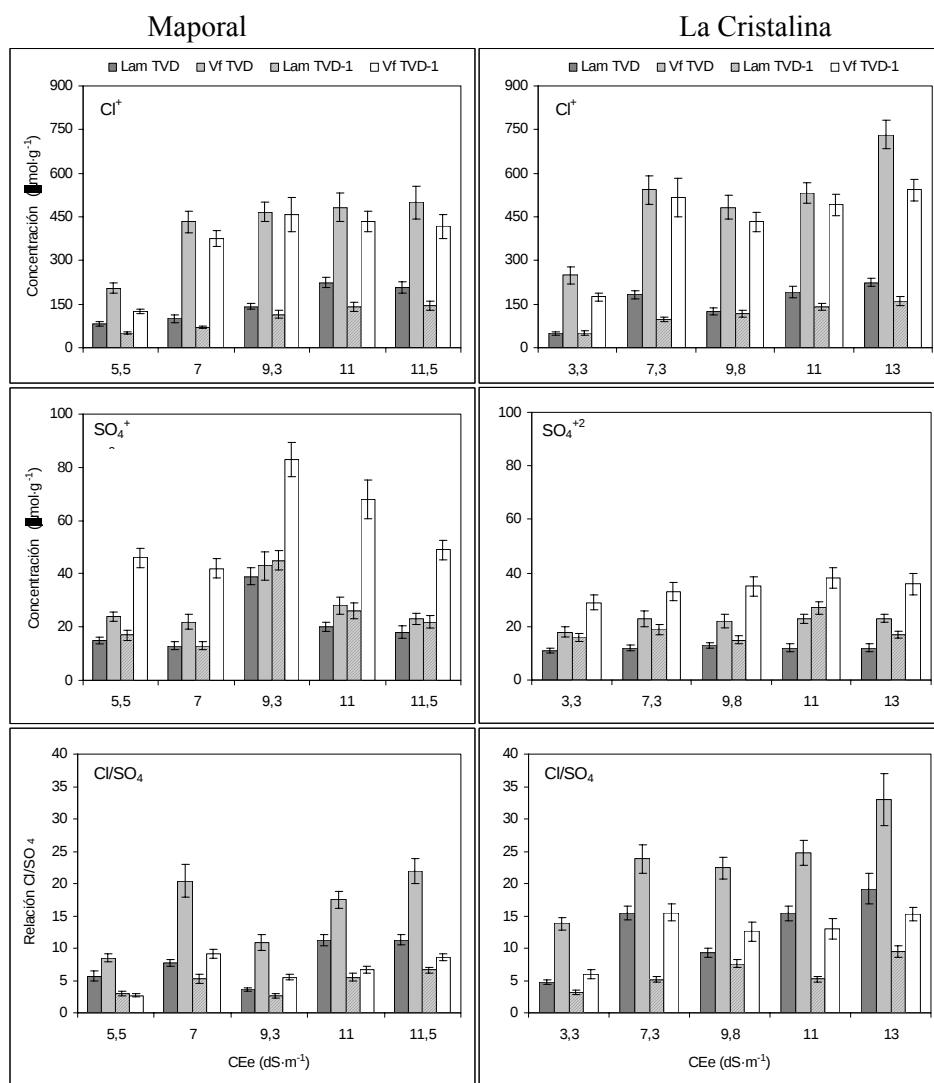


Figura 3. Concentración de cloruro y sulfato soluble, y relación Cl/SO_4 en la materia seca de la lámina (Lam) y de la vaina foliar (Vf) de hoja expandida (TVD) y hoja en expansión (TVD-1), en plantas de PR692176 muestreadas en suelos con distinta CEE en dos fincas cañameleras

En cuanto a la acumulación de solutos orgánicos, en Maporal el contenido de azúcares reductores en los tejidos foliares tendió a ser menor en los puntos de mayor CEe, mientras que en La Cristalina el comportamiento de esta variable fue más errático, sobre todo en las vainas foliares, mientras que la concentración de azúcares no reductores incrementó con el aumento en la CEe del suelo, en ambos tablones (Figura 4). En los dos tipos de hoja, la

acumulación de azúcares reductores y no reductores, fue mayor en las vainas foliares que en las láminas, y el contenido más alto de éstos se observó en la vaina foliar de la hoja TVD-1. La concentración de prolina aumentó en los dos tablones con el incremento en la CEe del suelo, especialmente en la vaina foliar de la hoja TVD-1, siendo ese efecto notablemente mayor en Maporal que en La Cristalina, para suelos de CEe similar.

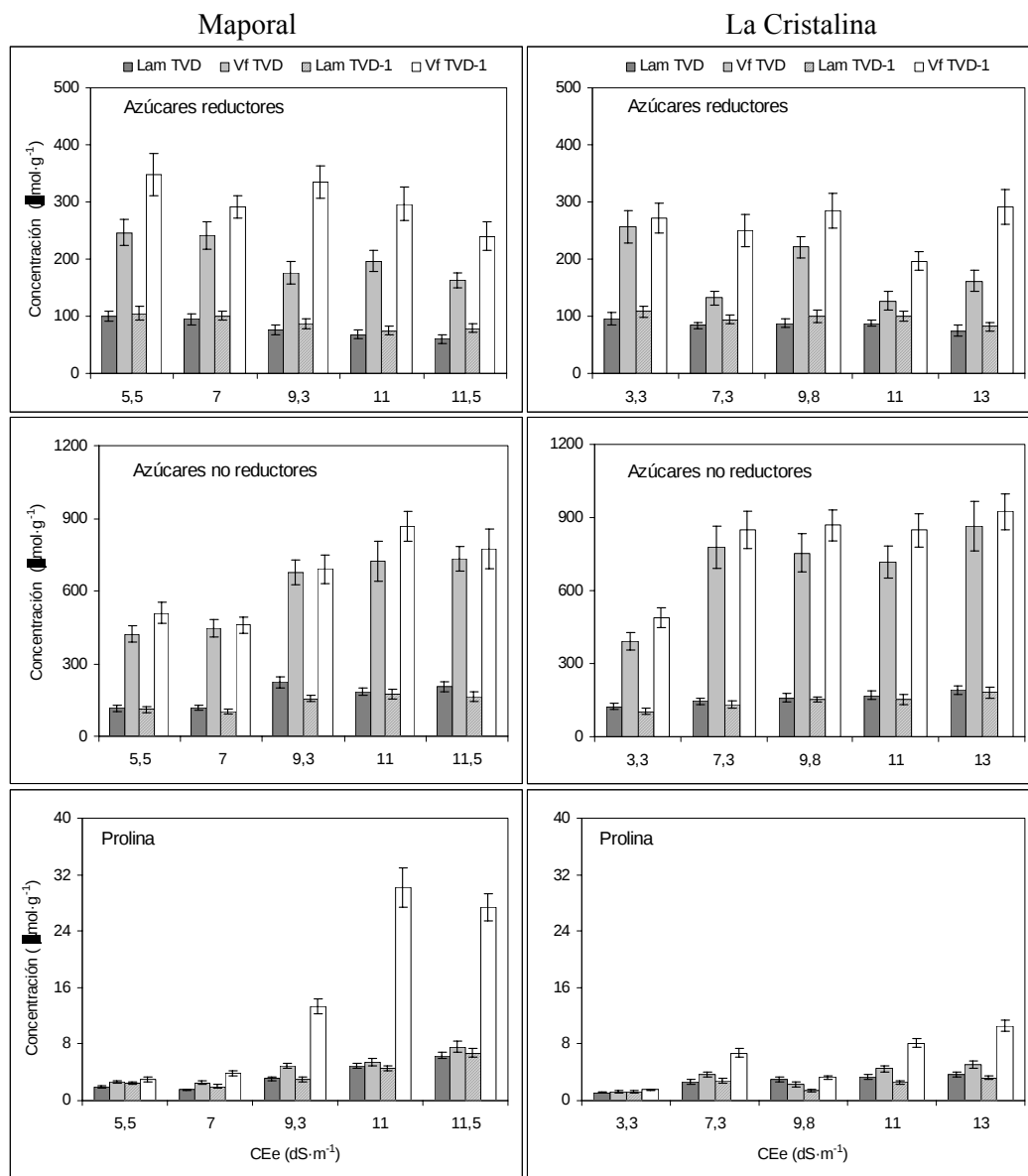


Figura 4. Concentración de azúcares reductores y no reductores, y prolina, en la materia seca de la lámina (Lam) y de la vaina foliar (Vf) de hoja expandida (TVD) y hoja en expansión (TVD-1), en plantas de PR692176 muestreadas en suelos con distinta CEe en dos fincas cañameleras

Relación entre salinidad del suelo y la concentración de solutos en la hoja TVD

El contenido foliar de Na^+ y Mg^{+2} se correlacionó positivamente con la CEE en ambos tablonos (Cuadro 2). El coeficiente de correlación fue más alto para el primer ión en La Cristalina, donde el Na^+ dominó ampliamente las sales del suelo (Cuadro 1). Por el contrario, el K^+ y el Ca^{+2} foliar se correlacionaron en forma negativa con la

CEE, lo que refleja un efecto adverso de la salinidad sobre la absorción y transporte de estos dos iones a las hojas. En cuanto a los aniones, el contenido de Cl^- en las hojas se correlacionó positivamente con la CEE en los dos tablonos, y entre todos los iones éste mostró el valor de correlación más alto. El SO_4^{-2} fue el único ión para el que no se detectó correlación con la CEE en ninguno de los dos tablonos.

Cuadro 2. Coeficientes de correlación entre la conductividad eléctrica del extracto (CEE) y los principales iones presentes en las sales del suelo, y la concentración de solutos en la lámina de la hoja TVD, en plantas de un genotipo de caña de azúcar creciendo en dos tablonos afectados por sales en dos fincas dedicadas a la explotación comercial de caña de azúcar

Sales en dos líneas dedicadas a la explotación comercial de cana de azúcar									
Hoja \ Suelo	Na ⁺	K ⁺	Ca ⁺²	Mg ⁺²	Cl ⁻	SO ₄ ⁻²	Azúcares		Prolina
							reductores	no reductores	
Maporal									
CEe	0,64**	-0,51*	-0,89**	0,65**	0,94**	0,28	-0,78**	0,74**	0,81**
Na ⁺	0,69**	-0,54*	-0,90**	0,53*	0,93**	0,31	-0,79**	0,90**	0,84**
Mg ⁺²	0,40	-0,31	-0,76**	0,57*	0,86**	0,04	-0,69**	0,53**	0,75**
Cl ⁻	0,40	-0,32	-0,76**	0,49	0,86**	0,06	-0,70**	0,55*	0,79**
SO ₄ ⁻²	0,63	-0,49	-0,88**	0,57*	0,93**	0,29	-0,77**	0,72**	0,81**
La Cristalina									
CEe	0,82**	-0,56*	-0,64**	0,60*	0,91**	0,33	-0,48	0,74**	0,84**
Na ⁺	0,83**	-0,65**	-0,72**	0,60*	0,88**	0,40	-0,47	0,74**	0,85**
Mg ⁺²	0,36	-0,37	-0,29	0,10	0,48	-0,14	-0,44	0,46	0,42
Cl ⁻	0,82**	-0,45	-0,72**	0,64**	0,88**	0,38	-0,49	0,71**	0,85**
SO ₄ ⁻²	0,71**	-0,34	-0,48	0,68**	0,90**	0,29	-0,47	0,72**	0,85**

** : significancia a $P \leq 0,01$; * : significancia a $P \leq 0,05$

En los dos tablonos la concentración de Na^+ del suelo, se correlacionó negativamente con el contenido de K^+ y de Ca^{+2} y positivamente con el de Na^+ , Mg^{+2} y Cl^- de la hoja. El Mg^{+2} del suelo se correlacionó positivamente con el Mg^{+2} y el Cl^- foliar y negativamente con el Ca^{+2} de la hoja, sólo en Maporal. En La Cristalina el Cl^- del suelo se correlacionó positivamente con Na^+ , Mg^{+2} y Cl^- foliar y negativamente con el Ca^{+2} de la hoja, mientras que en Maporal este anión sólo se correlacionó positivamente con el Cl^- y negativamente con el Ca^{+2} foliar. El SO_4^{-2} del suelo se correlacionó positivamente con Na^+ , Mg^{+2} y Cl^- foliar en los dos tablonos y adicionalmente en Maporal, este anión se correlacionó negativamente con el Ca^{+2} presente en la hoja.

En los dos tablonos se detectó una correlación positiva entre la CEE y la concentración de iones del suelo (excepto el Mg^{+2} en La Cristalina) con la concentración de azúcares no reductores y de

prolina en la hoja (Cuadro 2), mientras que en el caso de los azúcares reductores, sólo en Maporal se encontró una correlación negativa significativa, tanto con la CEE como con los iones dominantes del suelo.

DISCUSIÓN

Los resultados muestran que tanto la CEE como la composición salina del suelo, variaron entre y dentro de los dos tablonos estudiados, lo que refleja la complejidad en la dinámica de las sales a nivel del suelo en condiciones de campo (Rengasamy, 2006; Nelson y Ham, 2000). Ambos tablonos mostraron concentraciones salinas que superan el nivel umbral de $1,7 \text{ dS} \cdot \text{m}^{-1}$ sugerido por Maas (1990) para la caña de azúcar, sin embargo, hay que considerar que ese valor no contempla diferencias varietales, y además, ha sido determinado para suelos donde el Cl^- es el anión

predominante. Esto implica que en casos donde sea otro el anión dominante en las sales del suelo, ese nivel umbral puede variar; tal sería el caso del tablón en Maporal, donde el SO_4^{2-} fue el anión que predominó en el suelo. En consecuencia, el grado de afectación del crecimiento y la productividad del genotipo PR692176 por la salinidad, bajo condiciones de manejo agronómico similares en ambos tablonos, puede ser notablemente distinto, aspecto que sería interesante abordar en otros estudios a nivel de campo.

Los datos obtenidos en este estudio sugieren una acumulación preferencial de Na^+ y Cl^- en la hoja TVD, protegiendo así las hojas más jóvenes, aún en expansión, del efecto tóxico de esos dos iones, lo que coincide con lo reportado para este cultivo en ensayos en condiciones controladas (Kumar et al., 1994; Plaut et al., 2000; García, 2004). El Na^+ se acumuló preferentemente en la lámina, más que en la vaina foliar, contrariamente a lo observado por García (2004) en el mismo genotipo, cuando éste fue estresado con sales simples de sodio en una cámara de crecimiento. No obstante, la concentración de Na^+ en la lámina de la hoja TVD de PR692176 encontrada por García (2004) fue sustancialmente mayor que la observada en este estudio, por lo que suponemos que el Na^+ es compartimentado preferentemente en la vaina foliar sólo si su contenido en la lámina rebasa cierto nivel umbral; si ese no es el caso, este ión es acumulado—principalmente en la lámina foliar, donde posiblemente juega un papel importante en el ajuste osmótico, tal como ocurre en otras especies (Marschner, 1995).

En cuanto al Mg^{+2} , se evidenció su efecto negativo sobre la absorción de Ca^{+2} , provocando una reducción importante en la relación Ca/Mg de los tejidos foliares, situación que fue más notoria en el tablón de Maporal. Cabe indicar que en los dos tablonos la concentración más alta de Mg^{+2} se observó en la vaina foliar de la hoja en expansión, lo cual refleja la incapacidad de las plantas para restringir la excesiva acumulación de ese catión en tejidos foliares en crecimiento activo, donde éste se acumula en concentraciones que posiblemente ocasionan efectos tóxicos. Algunos autores sugieren que en suelos salinos, el Mg^{+2} puede resultar más tóxico que el Na^+ , debido a que su absorción excesiva usualmente está acompañada de una caída dramática en la absorción de Ca^{+2} y

de K^+ , provocando deficiencia de esos dos iones, lo que aunado al efecto tóxico del Mg^{+2} , desbalance catiónico y/o una combinación de esos efectos, puede inhibir sensiblemente el crecimiento (Marschner, 1995).

Contrariamente a lo observado en el caso del Na^+ , el Cl^- se acumuló preferentemente en la vaina foliar, en forma similar a lo observado en las plantas de caña de azúcar estresadas en condiciones controladas (Bernstein et al., 1966) y en particular en PR692176 (García, 2004), lo que demuestra la exclusión de este anión de la lámina, probablemente debido a su efecto altamente tóxico. Por otra parte, en los dos tipos de hoja y en las dos porciones de éstas, la relación Na/Cl fue menor que 1, lo que refleja un transporte preferencial de Cl^- , respecto al Na^+ , a las hojas en correspondencia con resultados de trabajos previos en otros genotipos de caña de azúcar sometidos a estrés salino en condiciones controladas (Syed y El-Swaify, 1973; Plaut et al., 2000; Wahid, 2004), incluyendo a PR692176 (García, 2004).

En los dos tablonos, el contenido de azúcares no reductores se incrementó con el aumento en la CEE, tanto en la lámina como en la vaina foliar, mientras que la concentración de azúcares reductores tendió a ser menor en los puntos de mayor CEE; este comportamiento coincide con evidencias obtenidas en plantas de caña de azúcar estresadas en condiciones controladas, (Kumar et al., 1994; Wahid, 2004; García, 2004). Los niveles de prolina también fueron más altos en las plantas muestreadas en los puntos más salinos, lo que confirma la función osmoprotectora de este aminoácido en plantas de caña de azúcar estresadas por sales (García y Medina, 2003; Wahid, 2004; García, 2004).

Las correlaciones descritas en este estudio reflejan en forma general la influencia de la CEE y el contenido iónico del suelo, en la acumulación foliar de solutos. En los dos tablonos, la CEE del suelo se correlacionó positivamente con el contenido de Na^+ , Mg^{+2} y Cl^- de la hoja, y negativamente con el de K^+ y Ca^{+2} de la misma. Esas correlaciones guardaron correspondencia con la contribución de los primeros tres iones al incremento en la CEE en el suelo de cada finca, y con el efecto desfavorable de éstos sobre la absorción y transporte de K^+ y Ca^{+2} a las hojas. La correlación entre el contenido de Cl^- en la hoja y

la CEe, resultó bastante alta detectándose además una correlación positiva altamente significativa entre el nivel de ese anión en el suelo y su concentración en la lámina, lo que indica que existe una vinculación estrecha entre el incremento en la salinidad y en la concentración de Cl^- en el suelo, y su absorción y transporte a las hojas.

Algunas interacciones iónicas, fueron notorias a través de las correlaciones analizadas. En las dos fincas, el Na^+ del suelo y el K^+ de la hoja se correlacionaron negativamente, reflejando la interacción antagonística que existe entre ambos iones (Cramer, 1997). También en ambos tablones, se detectó una correlación negativa entre el nivel de Na^+ en el suelo y la acumulación de Ca^{+2} en la hoja, lo cual evidencia el reconocido efecto antagonístico ejercido por el primer ión sobre la absorción del segundo (Rengel, 1992). En el tablón de La Cristalina, se evidenció una correlación positiva bastante elevada entre el nivel de Cl^- en el suelo y el contenido de Na^+ en la hoja, lo que supone un efecto sinérgico del primer ión sobre la absorción del segundo, tal como se ha observado en plantas de caña de azúcar estresadas por sales en condiciones controladas (Plaut et al., 2000; García, 2004). La concentración de SO_4^{-2} en el suelo también se correlacionó positivamente con el contenido de Na^+ en las dos porciones de la hoja y en ambas fincas; adicionalmente, en Maporal este anión mostró una correlación negativa con el nivel de Ca^{+2} foliar; estas últimas correlaciones suponen una interacción sinérgica entre SO_4^{-2} y Na^+ y antagonística entre SO_4^{-2} y Ca^{+2} , tal como se ha sugerido en reportes previos para caña de azúcar (Syed y El-Swaify, 1973).

En cuanto a los solutos orgánicos, los niveles de azúcares no reductores y de prolina mostraron una correlación positiva altamente significativa con la CEe y con la mayoría de los iones dominantes en las sales del suelo, lo que sugiere una estrecha vinculación entre el incremento en la salinidad del sustrato y la acumulación de estos dos solutos en la hoja. En Maporal, fue mayor la magnitud del incremento en el contenido de prolina a medida que aumentó la CEe del suelo, en especial en la vaina foliar de la hoja TVD-1, lo que pudiera estar relacionado con el predominio de SO_4^{-2} en el suelo, ión al que se le ha asignado un acentuado efecto deshidratante en los tejidos

(Degano, 1999), que podría acentuar el incremento en la producción de prolina para ajuste osmótico en las células foliares. En el caso de los azúcares no reductores, estudios previos en caña de azúcar han demostrado una correlación negativa entre la concentración de éstos en la caña y la CEe (Thomas et al., 1981; Lingle et al., 2000), debida en parte a una reducción en la tasa de transporte de sacarosa desde las hojas al tallo (Lingle et al., 2000); la correlación positiva entre el contenido de azúcares no reductores en la hoja y la CEe, sustenta este último señalamiento, ya que al aumentar los requerimientos de este soluto en las hojas, posiblemente por ajuste osmótico, se reduce la proporción de sacarosa disponible para ser transportada al tallo.

CONCLUSIONES

Las plantas de caña de azúcar estresadas por sales retienen iones tóxicos en hojas maduras, un proceso que protege los tejidos foliares en crecimiento activo. Dentro de hojas individuales los distintos iones, exceptuando el Na^+ , se acumulan preferentemente en la vaina foliar, siendo así excluidas de la lámina, donde están los tejidos responsables de la fotosíntesis. En los dos tablones, se observó una buena correspondencia entre la CEe y la composición salina del suelo con la acumulación de sales en las hojas. La acumulación de azúcares no reductores y de prolina en las hojas se incrementó con el aumento en la CEe y además, se detectó una correlación positiva bastante alta entre el contenido de esos dos solutos en hoja TVD con la CEe y la concentración de los iones predominantes en las sales del suelo, todo lo cual apoya la existencia de una vinculación estrecha entre la capacidad para acumular esos solutos y la tolerancia a condiciones de salinidad en caña de azúcar.

AGRADECIMIENTO

Al Consejo de Desarrollo Científico y Humanístico de la Universidad Central de Venezuela por el financiamiento otorgado a través del Proyecto No. 01.31.4692.2004. Al Ing. Luis Zérega, por sus valiosas orientaciones en cuanto a la ubicación de tablones afectados por salinidad. A Marta Francisco, por su cooperación en la determinación de iones inorgánicos en el

laboratorio de Ecofisiología Vegetal del Centro de Ecología (IVIC). Al Laboratorio de Metabolismo y Fisiología de Cultivos y Malezas (Facultad de Agronomía, UCV) por el apoyo brindado para la determinación de solutos orgánicos.

LITERATURA CITADA

1. Bates, L., R. Waldren y D. Teare. 1973. Rapid determination of free proline for water-stress studies. *Plant Soil* 39: 205-207.
2. Bernstein, L., E. Francois y R. Clark. 1966. Salt tolerance of N.Co. varieties of sugarcane. II. Effects of soil salinity and sprinkling on chemical composition. *Agron. J.* 58: 503-507.
3. Cramer, G. 1997. Uptake and role of ions in salt tolerance. In: Strategies for improving salt tolerance in higher plants. P. Jaiwal, R. Singh and A. Gulati (eds) Science Publishers Inc. New Hampshire, USA. p: 55-86.
4. Degano, C. 1999. Respuestas morfológicas y anatómicas de *Tessaria absinthioides* (Hook. et Arn.) DC a la salinidad. *Rev. Brasil. Bot. São Paulo* 22: 357-363.
5. Dubois, M., K. Gilles, J. Hamilton, P. Rebers y F. Smith. 1956. Colorimetric method for determination of sugars and related substances. *Ann. Chem.* 8: 350-356.
6. García, M. 2004. Crecimiento, morfoanatomía radical, acumulación de solutos orgánicos y relaciones iónicas en dos genotipos de caña de azúcar con tolerancia salina contrastante. Tesis Doctor en Ciencias Agrícolas. Facultad de Agronomía, Universidad Central de Venezuela. Maracay.
7. García, M. y E. Medina. 2003. Crecimiento y acumulación de prolina en dos genotipos de caña de azúcar sometidos a salinización con cloruro de sodio. *Rev. Fac. Agron. (LUZ)* 20: 168-179.
8. Kumar, S., K. Naidu y H. Sehtiya. 1994. Causes of growth reduction in elongating and expanding leaf tissue of sugarcane under saline conditions. *Aust. J. Plant Physiol.* 21: 71-83.
9. Lingle, S., R. Wiedenfeld y J. Irvine. 2000. Sugarcane response to saline irrigation water. *J. Plant Nut.* 23: 469-486.
10. Maas, E. 1986. Salt tolerance of Plants. *App. Agric. Res.* 1: 12-25.
11. Maas, E. 1990. Crop salt tolerance. In: Agricultural salinity assessment and management. K. Tanji (ed.) ASCE. NY., USA. p: 262-304.
12. Marschner, H. 1995. Mineral nutrition of higher plants. 2nd ed. Academic Press. London.
13. Nelson, P. y G. Ham. 2000. Exploring the response of sugar cane to sodic and saline conditions through natural variation in the field. *Field Crop Res.* 66: 245-255.
14. Pla, I. 1985. Origen, distribución y diagnóstico de suelos afectados por sales en condiciones tropicales. *Rev. Fac. Agron. (Maracay)* 14: 125-150.
15. Plaut, F., C. Meinzer y E. Federman. 2000. Leaf development, transpiration and ion uptake and distribution in sugarcane cultivars grown under salinity. *Plant Soil* 218: 59-69.
16. Rengasamy, P. 2006. World salinization with emphasis on Australia. *J. Exp. Bot.* 57: 1017-1023.
17. Rengel, Z. 1992. The role of calcium in salt toxicity. *Plant Cell Environ.* 15: 625-632.
18. Robyt, J. y W. Whelan. 1968. Starch and its derivatives. Chapman and Hall, London.
19. Syed, M. y S. El-Swaify. 1973. Effect of saline water irrigation on N.Co.310 and H50-7209 cultivars of sugarcane. I. Chemical composition of plants. *Trop. Agri. (Trinidad)* 50: 45-51.
20. Tabatai, L. y N. Bremmer. 1970. A simple turbidimetric method of determining sulfur in plant materials. *Agr. J.* 62: 805-807.

21. Thomas, J., F. Salinas y G. Oerther. 1981. Use of saline for supplemental irrigation of sugarcane. *Agron. J.* 73: 1011-1017
22. Villafañe, R. 1996. Tolerancia a la salinidad y al sodio de seis variedades de caña de azúcar en Venezuela. *Agron. Trop.* 46: 85-99.
23. Villafañe, R. 2000. Calificación de los suelos por sales y dispersión por sodio y su aplicación en la evaluación de tierras. *Agron. Trop.* 50: 645-658.
24. Villafañe, R. y R. Guarisma. 1998. Propuesta para calificar y manejar el agua de riego según su salinidad. *Agron. Trop.* 48: 251-273.
25. Villafañe, R., O. Abarca, M. Aspúrua, T. Ruíz y J. Ugarte. 1999. Distribución espacial de los suelos de Quíbor y su relación con las limitaciones del drenaje y la calidad de agua. *Bioagro* 11(2): 43-50.
26. 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: 133-141.
27. Wahid, A., A. Rao y E. Rasul. 1997. Identification of salt tolerance traits in sugarcane lines. *Field Crop Res.* 54: 9-17.
28. Zérega, L., T. Hernández y J. Valladares. 1991. Caracterización de suelos y aguas afectadas por sales en zonas cañameleras de Azucarera Río Turbio. *Caña de Azúcar* 9: 5-52.