

Caracterización de las relaciones hídricas en cuatro variedades de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) sometidas a estrés hídrico en condiciones de invernadero en Costa Rica.¹

Eduardo J. Cadet Piedra

Ingeniero Agrónomo. Liga Agrícola Industrial de la Caña de Azúcar. ecadet@laica.co.cr

Resumen

La caña de azúcar ha presentado tolerancia media al déficit hídrico debido a sus características morfológicas y fisiológicas, se ha observado que no es igual para el componente varietal existente y que durante periodos de sequía se pueden alcanzar pérdidas agroindustriales desde 15% hasta 40% en tonelaje por hectárea. Una de las alternativas es buscar variedades que utilicen el agua de manera más eficiente y con tolerancia a déficit hídrico. El objetivo de este trabajo fue caracterizar los parámetros de las relaciones hídricas y aspectos morfológicos de las plantas de caña de azúcar asociados a su tolerancia al estrés hídrico por medio de la implementación de las curvas presión/volumen, las mediciones de potencial hídrico (Ψ_w) y crecimiento. Para ello, cuatro variedades de caña de azúcar, NA 56-42, RB 86-7515, CP 72-2086 y LAICA 12-331 fueron evaluadas en invernadero en macetas bajo déficit y a capacidad de campo a lo largo de 22 semanas, antes, durante y después del déficit hídrico. Los resultados indican que la variedad NA 56-42 es la más susceptible a periodos cortos de déficit hídrico por obtener el potencial hídrico en el punto de pérdida de turgencia mayor (-1,08 MPa) y el mayor marchitamiento durante el estrés hídrico. La variedad CP 72-2086 se adaptó a periodos más prolongados de déficit hídrico manteniendo el mayor contenido relativo de agua durante el estrés, la LAICA 12-331 presentó un buen ajuste osmótico, pero con reducido crecimiento y la RB 86-7515 mostró las mejores características de tolerancia al déficit hídrico por los resultados que presentó en el crecimiento y los datos de los parámetros hídricos evaluados. Se clasificó según la tolerancia al déficit hídrico de mayor a menor en el siguiente orden: RB 86-7515, LAICA 12-331, CP 72-2086 y NA 56-42. El Ψ_w de -1,40 MPa es el valor máximo que la caña de azúcar puede alcanzar antes de mostrar efectos por la sequía el cual varía entre variedades donde la variedad RB 86-7515 alcanzó -1,51 MPa.

Palabras claves: Déficit hídrico, potencial hídrico, potencial osmótico, simplasto, contenido hídrico relativo, curva presión/volumen.

Abstract

Sugarcane has presented medium tolerance to water deficit due to its morphological and physiological characteristics, and it has been observed that it is not the same for the existing varietal component and that during drought periods agroindustrial losses can be reached from 15% to 40% in tonnage per ha. One of the alternatives is to look for varieties that use water more efficiently and with tolerance to water deficit. The objective of this work was to characterize the parameters of water relationships and morphological aspects of sugar cane plants associated with their tolerance to water stress through the implementation of pressure/volume curves, potential water measurements (Ψ_w) and growth. For this, four varieties of sugarcane NA 56-42, RB 86-7515, CP 72-2086 and LAICA 12-331 were evaluated in a greenhouse in deep deficit pots and field capacity for 22 weeks, before, during and after the water deficit. The results indicate that the variety NA 56-42 is the most susceptible to short periods of water deficit by obtaining the water potential at the point of higher turgor loss (-1.08 MPa) and the more significant wilting during water stress. The variety CP 72-2086 was adapted to longer periods of water deficit maintaining the highest relative water content during stress, the LAICA 12-331 presented a good osmotic adjustment, but with reduced growth and the RB 86-7515 showed the best characteristics of tolerance to water deficit due to the results presented in the growth and the data of the water

¹ Documento presentado en el XI Congreso ATALAC - TECNICAÑA efectuado en Cali, Colombia, del 24 al 28 de setiembre del 2018.

parameters evaluated. It was classified according to tolerance to water deficit from highest to lowest in the following order: RB 86-7515, LAICA 12-331, CP 72-2086 and NA 56-42. The Ψ_w of -1.44 MPa is the maximum value that sugarcane can reach before showing effects due to drought which varies between varieties where the variety RB 86-7515 reached -1.51 MPa.

INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar es un cultivo de rápido crecimiento, con gran capacidad de adaptación y elevado potencial de producción debido a sus determinantes atributos anatómicos, estructurales, genéticos y fisiológicos (Chaves, 2015). El abastecimiento y disponibilidad de agua afecta directamente el crecimiento de la planta por ende, su concentración de azúcar.

La caña de azúcar a pesar de ser una planta C4 es demandante en el uso de agua para producir altos tonelajes, pero también se ha destacado como un cultivo tolerante a la sequía debido a su amplia capacidad de exploración radicular, a las diferencias en el comportamiento de la actividad estomática y el arrollamiento pasivo de las hojas. Es capaz de soportar intervalos de corto plazo sin riego sin afectar notablemente sus rendimientos (Basnayake et al., 2012).

Un factor ambiental, como la falta de agua, puede generar pérdidas de un 15 % hasta un 40% de la caña cosechada (Inman-Bamber et al., 2012). Todos los procesos de la planta de caña de azúcar como crecimiento, transporte y almacenaje de sacarosa, entre otros, son afectados directa o indirectamente por el suministro de agua (Johnsen y Major, 2004). En el caso de la caña de azúcar el rendimiento está determinado por el crecimiento vegetativo dado por la altura de los tallos, el número de tallos por área y el alargamiento de los entrenudos en los cuales se acumula la sacarosa. Por ende el déficit hídrico es extremadamente perjudicial en vista de que el proceso fisiológico más sensible al estrés hídrico es el crecimiento (Eksteen et al., 2015).

El estado de energía del agua en la planta se expresa como potencial hídrico (Ψ_w), y hace referencia al trabajo necesario para transportar el agua dentro de la planta de un lugar a otro. La transpiración, provoca gradientes de potencial hídrico en las plantas de caña de azúcar, necesarios para que el agua fluya desde las raíces hasta las hojas a través del xilema conductor. El agua dentro del xilema está bajo tensión durante la transpiración y debido a ello los valores que determinan el potencial se expresa en términos negativos (Lenz et al., 2006).

El crecimiento celular es uno de los procesos fisiológicos más sensibles al déficit hídrico, ya que una sequía severa reduce el área foliar, acelera la senectud de las hojas maduras, altera la fotosíntesis y la transpiración debido a la reducción de la turgencia, estimula el cierre estomático y el bloqueo a la difusión del CO₂ hacia el mesófilo, por lo tanto, provoca el colapso de los tallos de caña de azúcar (Graca et al., 2010).

Se ha encontrado variabilidad genética en la arquitectura hidráulica y la susceptibilidad a la cavitación entre diversos cultivares de caña de azúcar bajo déficit hídrico. El valor del potencial hídrico (Ψ_w) en la caña de azúcar al cual ocurre la pérdida del 50% de la capacidad de transportar agua (PLC 50) oscila entre -0,8 y -1,2 MPa. Por medio de la experimentación, mejoramiento y observación se ha dilucidado una marcada diversidad genética en la susceptibilidad a la cavitación y en la capacidad de respuesta al estrés hídrico de diversas variedades de caña de azúcar, diferencias que pueden deberse a la dimensión, abundancia y diámetro de los vasos conductores y la eficiencia en el transporte de savia (Gutiérrez, 2014). Además del gradiente necesario para ascender y mantener la savia en la parte alta de la caña de azúcar en contra de la fuerza de gravedad, los cultivares deben superar fricciones y resistencias

encontradas en los tejidos y en el suelo. La mayor resistencia en la caña se encuentra en la lámina foliar y llega a alcanzar hasta -1,4 MPa, valores de -2 MPa se consideran perjudiciales para el crecimiento y productividad de la misma (Gutiérrez, 2014).

Los estudios con indicadores fisiológicos en las plantas de cultivos comerciales constituyen una herramienta importante para entender los mecanismos de adaptación a las condiciones de estrés hídrico, entre los cuales podemos mencionar el potencial osmótico en el punto de pérdida de turgencia o momento de marchitamiento (Ψ_w PPT) y al potencial osmótico a plena turgencia o capacidad de realizar ajuste osmótico (Ψ_{π} PT) como los parámetros fisiológicos que se utilizan como indicadores de tolerancia a la sequía, no obstante el módulo de elasticidad o elasticidad de las paredes celulares (ϵ) y el contenido relativo de agua o contenido hídrico que alcanzaría a plena turgencia (CRA) han demostrado ser indicadores de la capacidad de retención de agua en momentos de estrés hídrico en diferente magnitud entre especies y ambientes (Bartlett et al., 2012). Por lo tanto, es conveniente caracterizar las variedades de caña de azúcar en cuanto al grado de respuesta y adaptación a la sequía, conocer los límites de plasticidad, tolerancia y evaluar el comportamiento fisiológico determinado por la pérdida de turgencia, la capacidad de ajuste osmótico, el mantenimiento del volumen celular y la elasticidad de la pared celular (Parra, et al., 2002). Los parámetros hídricos se obtienen de las curvas presión/volumen y se complementan con estudios de morfología, anatomía y fisiología, lo que permite caracterizar las variedades de caña de azúcar por su grado de tolerancia para hacer frente al estrés hídrico.

OBJETIVOS

Objetivo general.

Caracterizar los parámetros fundamentales de las relaciones hídricas y aspectos morfológicos de las plantas de caña de azúcar sometidas a estrés hídrico en condiciones de invernadero.

Objetivos específicos.

- Definir el umbral de potencial hídrico a partir del cual ocurre estrés hídrico en las variedades estudiadas de caña de azúcar
- Comparar cuatro variedades de caña de azúcar en su grado de respuesta al estrés hídrico utilizando parámetros derivados del análisis de las curvas presión volumen.

MATERIALES Y MÉTODOS

Sitio de estudio

El experimento se realizó en la Estación Experimental del Departamento de investigación y Extensión de la Caña de Azúcar (DIECA), en un ambiente de invernadero en condiciones homogéneas y controladas, localizado en Santa Gertrudis Sur, distrito San José, cantón de Grecia, provincia de Alajuela, Costa Rica, a una altitud de 1.005 msnm. La zona presenta una temperatura entre 16 °C – 27 °C, una precipitación anual total de 2500 a 3000 mm distribuida entre los meses de abril - noviembre con una humedad relativa promedio de 89%.

Material vegetal.

Se seleccionaron cuatro variedades de caña de azúcar, tres comerciales y una promisoría, las cuales fueron: CP 72-2086, RB 86-7515, LAICA 12- 331 (promisoría) y NA 56-42.

Siembra del material varietal.

El material vegetal se sembró en maceteros de 40 cm de profundidad por 60 cm de diámetro equivalente a 0,11 m³. Se utilizó un sustrato que contenía 30% de abono orgánico, 60% de suelo Andisol y un 10% turba (peat moss), los recipientes se llenaron hasta el tope, se colocaron tres esquejes de caña con tres yemas en cada una de las macetas. Las plantas se fertilizaron según lo detalla el Cuadro 1.

Cuadro 1. Cantidades en gramos de nutrimentos individuales aplicados por maceta.

Época	Fórmula de fertilizante	Cantidad de fertilizante aplicado (g)	Cantidad por nutrimento (g)		
			N	P ₂ O ₅	K ₂ O
Siembra	10-30-10	75	7,5	22,5	7,5
2ª Fertilización	NH ₄ NO ₃	30	10,05	0	0
3ª Fertilización	20-3-20	35	7	1,05	7
Total (g)		140	24,55	23,55	14,5

Las 24 macetas se colocaron en el invernadero, el riego fue por aspersión, a las 6:00am y a las 3:00 pm por diez minutos cada uno, hasta el primer mes de ciclo vegetativo.

A partir del segundo mes se efectuó un cambio en la forma de riego. Se suministró ocho litros de agua a cada maceta, los riegos se efectuaron cada dos días hasta los seis meses de desarrollo vegetativo.

El diseño experimental fue un modelo irrestricto al azar con arreglo factorial, donde se evaluaron cuatro variedades de caña de azúcar y dos regímenes hídricos, capacidad de campo y de déficit hídrico aplicado a partir de cuándo las plantas cumplieron seis meses de edad. Se instalaron seis repeticiones de cada una de las variedades, para un total de veinticuatro unidades experimentales, siendo cada maceta la unidad experimental. Los datos de crecimiento y morfología se procesaron por medio de un análisis de MANOVA con 5 grados de libertad a un nivel de confianza del 95%, los resultados de las curvas y de potencial hídrico se analizaron por medio de la prueba de Tukey con un 95% de confianza.

Exposición de los tratamientos de régimen hídrico

Se sometió a dos regímenes hídricos: capacidad de campo y estrés hídrico. Todas las plantas se mantuvieron a capacidad de campo durante seis meses para permitir su crecimiento y desarrollo normal, de manera que en cada maceta se disponía de aproximadamente de 10 tallos. Luego de este periodo se procedió a suspender el suministro de agua a una hilera completa del ensayo, donde se obtuvo 3 macetas bajo déficit hídrico y 3 macetas bajo capacidad de campo de cada variedad.

El periodo de déficit hídrico fue de treinta y cinco días, posteriormente se continuó el riego a las seis macetas por igual alcanzando el régimen de capacidad de campo en cada una de ellas, el período de tiempo estipulados para la recuperación de la turgencia y la reiniciación del crecimiento consistió de veinte días.

Variabes evaluadas

De cada maceta se escogió un tallo que se mantuvo intacto para realizar las mediciones consecutivas de crecimiento hasta finalizar el ensayo. Para el potencial hídrico se muestreó un tallo diferente cada semana, por ser las mediciones destructivas. Para la construcción de las curvas presión/volumen se tomaron hojas de diferentes tallos, utilizando la hoja+3 considerada como hoja la indicadora en el cultivo de la caña de azúcar (Clements y Ghotb, 1969).

Las mediciones de crecimiento se realizaron cada ocho días hasta el final del ensayo donde se midió longitud de la hoja, expansión de las hojas, el ancho de la hoja +3 (enrollamiento). El índice de verdor se calculó cada semana haciendo un promedio de 5 puntos por hoja con el medidor CCM-200 El Ψ_w se midió cada ocho días y durante los treinta y cinco días de estrés hídrico se aumentó a dos lecturas por semana, las curvas presión/volumen se construyeron en tres momentos: antes, durante y después de estrés hídrico.

Relaciones hídricas.

Determinación del potencial hídrico (Ψ_w).

El Ψ_w se midió con la cámara de presión de Scholander (modelo PMS-100, PMS, Logan, UT, USA) a partir del tercer mes de edad de las plantas. La lectura de Ψ_w se ejecutó por medio de la adaptación del método descrito por Saliendra et al., (1990) el cual consistió en realizar las mediciones en segmentos terminales de las hojas, las cuales se enrollan y se embolsan, y no en hojas completas como se ilustra en la (Figura 2 B y C).

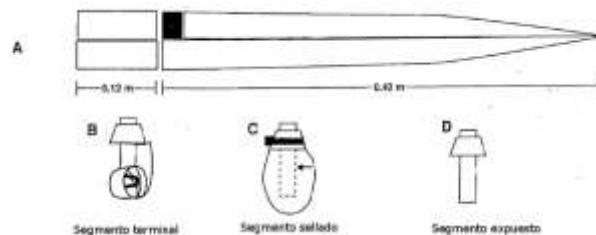


Figura 2. Obtención de un segmento de la hoja de caña de azúcar utilizada para medir potenciales hídricos en la cámara de Scholander. Grecia, Alajuela. Marzo-noviembre 2017 adaptado de (Saliendra et al., 1990).

Cada día de medición se seleccionó un tallo al azar de cada maceta, a los cuales se les removió la hoja +3 (Kuijper, 1915); a las hojas seleccionadas, y debido a que la cámara fue diseñada para hacer mediciones en hojas de plantas pecioladas de dicotiledóneas se debió ajustar para hojas de monocotiledóneas y por lo tanto se realizó un corte a los 0,52 m de longitud desde la parte distal hacia el centro de esta, los primeros 0,4 m de hoja se doblaron con el cuidado de no quebrarla y se sostuvo con un clip. Para evitar la deshidratación se cubrió la hoja con una bolsa plástica transparente de 25 cm por 8 cm y se selló con cinta adhesiva justo antes de removerla de la planta donante. Una vez removida se “fabricó un pecíolo” de 0,12 m de longitud con la nervadura central, la cual quedó por fuera de la cámara.

Curvas presión volumen

El procedimiento consistió en tomar la hoja +3 de cada maceta de la variedad correspondiente y se construyó una curva con cada hoja extraída con el método adaptado para medir Ψ_w descrito anteriormente (Saliendra et al., 1990). Por lo tanto, se elaboraron un total de 18 curvas por variedad. A diferencia del método de Ψ_w , la muestra de hoja debidamente embolsada se colocó en una hielera con agua destilada para su rehidratación total por 24 horas, con el debido cuidado de que solo el pecíolo fabricado tuviera contacto con el agua. Previo a la colocación en la cámara de presión se pesó la muestra en una balanza analítica para anotar su peso fresco al inicio; la bolsa plástica transparente se debió pesar con anterioridad para restarla al final de la curva y obtener el peso fresco real de la hoja. El clip y la cinta que se usaron para enrollar la hoja se pesaron al finalizar la curva presión/volumen para obtener el peso de la hoja por diferencia.

La muestra fresca se introdujo en la cámara de presión. El pecíolo se ajustó al tapón de la cámara y para evitar fugas de gas y savia se selló con plastilina alrededor de la sección que queda dentro de la cámara. El extremo del pecíolo afuera de la cámara se le colocó un tubo Eppendorf®. Inmediatamente se selló el tubo Eppendorf® contra el pecíolo utilizando Parafilm® sin dañar la vena central. Se colocó un rollo de papel toalla dentro del tubo Eppendorf® que se pesó previamente en balanza analítica para obtener la cantidad de savia extraída por diferencia de peso, se verificó que el papel toalla quedará en contacto con la vena central "pecíolo".

La presión se aplicó a intervalos de 10 minutos, la primera lectura a los 2,5 bares, aumentando la presión de la siguiente forma 4,5; 6,5; 8,5; 10,5; 12,5; 14,5; 18,5; 22,0 y hasta 24,0 bares, dado a que la caña de azúcar alcanza su punto de marchitez permanente a los 20 bares, el cual es la humedad mínima en la que no puede seguir extrayendo agua del suelo y no logra recuperarse de la pérdida hídrica, aunque la humedad ambiental sea saturada. Por lo tanto el procedimiento de colocar pedazo de papel toalla se realizó diez veces, con un papel de 0,1109 g que recolectó la savia en cada punto de presión y por diferencia de peso se anotaba la savia recolectada. Entre cada cambio de presión se pesó el papel toalla y se calculó el peso de la savia extraída por diferencia.

Concluido el procedimiento anterior y luego de alcanzar las ultimas lecturas de potencial hídrico, las muestras se colocaron en estufa a 80°C durante 48 horas para determinar el peso seco. La construcción de la curva presión/volumen tuvo una duración de dos horas para cada hoja.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Potencial osmótico a plena turgencia.

La variedad NA 56-42 al obtener el mayor valor de $\Psi_{\pi PT}$, se caracterizó por ser la de menor capacidad para contrarrestar el efecto del déficit hídrico, debido a que la capacidad de realizar ajuste osmótico se vio más limitada que en las otras tres variedades (Fig. 3 y 4) (Bartlett et al., 2012).

Según Inman-Bamber et al. (2005) Explica que los ajustes osmóticos ocurren por la acumulación de solutos dentro de las células y su respuesta a ciertos estímulos ambientales, concuerda con los valores del $\Psi_{\pi PT}$ en las variedades RB 86-7515 y CP 72-2086 siendo menor que en la NA 56-42, que se catalogó como la más susceptible al déficit hídrico, por lo tanto, fue la variedad con la mayor reducción en el crecimiento y el menor Ψ_w durante estrés (Fig. 3 y 4).

Estudios explican que entre menor sea el $\Psi_{\pi PT}$ permite a la planta reducir la transpiración sin perder turgencia (agua) por lo que retrasa el síntoma de marchitez de las hojas (Meinzer et al., 1990) lo que claramente se observó en la variedad NA 56-42 que experimentó la mayor caída en el índice de verdor, presentando síntomas de marchitamiento severos desde el inicio y enrollamiento de hojas mayor, a diferencia de las otras variedades (Fig. 3 y 4).

Potencial hídrico en el punto de pérdida de turgencia.

Se observó que la variedad NA 56-42 fue la de menor tolerancia a situaciones de sequía. En cuanto al parámetro del $\Psi_w PPT$, esta fue la que presentó el mayor valor en los tres regímenes hídricos, pero con significancia estadística antes del estrés (Fig. 3 y 4). Resultados que concuerdan con lo reportado por Wolpert (2012) que explica que las especies con los $\Psi_w PPT$ menores tienden a presentar rasgos de tolerancia a la sequía, debido a que logran mantener el crecimiento, la conductancia estomática e hidráulica en condiciones de limitantes de agua en el suelo como lo mostro la variedad RB 86-7515.

De este modo, aunque no existan diferencias significativas ($p > 0,05$) entre las otras tres variedades en el Ψ_w PPT, la variedad LAICA 12-331 presentó el menor Ψ_w PPT y por ende es el cultivar con la mayor capacidad de tolerar el déficit hídrico en términos fisiológicos enfatizando en la capacidad de ajuste osmótico (Fig. 3 y 4).

Las variedades RB 86-7515 y CP 72-2086 presentaron valores de Ψ_w PPT muy similares entre ellas al igual que un crecimiento mayor que en las otras variedades. Valores que aciertan con lo encontrado por Bartlett et al. (2012) que explican que a un menor Ψ_w PPT se extienden el tiempo al cual las plantas comienzan a experimentar efectos negativos en el crecimiento por la sequía. Las variedades RB 86-7515 y CP 72-2086, superaron en aspectos de crecimiento a la LAICA 12-331 que presentó características favorables de ajuste osmótico. Se explica por qué a un menor Ψ_w PPT las plantas logran retrasar el marchitamiento de los tejidos Wolpert (2012) e (Inman-Bamber et al., (2005).

Módulo volumétrico de elasticidad.

La variedad RB 86-7515 al obtener el menor valor de ϵ , contribuyó a obtener el menor Ψ_w PPT, esto le permitió evitar la pérdida de volumen de agua celular, retrasar la marchitez y presentar niveles de CRA altos durante el estrés por déficit hídrico. Estas características concuerdan con Barker et al. (1993) que explican que a menores módulos de elasticidad permite el mantenimiento del volumen celular y de la turgencia (Fig. 3 y 4).

Los valores obtenidos sugieren que la variedad RB 86-7515 presenta paredes celulares más elásticas lo que le permitió un mejor ajuste osmótico y mantener una presión constante la cual fue fundamental para sobrellevar diversos procesos fisiológicos (Welbaum y Meinzer, 1990). Por lo tanto, la variedad NA 56-42 presentó paredes celulares más rígidas al obtener el mayor valor de ϵ , por lo cual no logró sobrellevar un adecuado ajuste osmótico y por ende no fue capaz de mantener una presión y turgencia constante, que perjudicó la tasa de división celular y múltiples procesos de funcionamiento en mayor grado que las otras tres variedades (Fig. 3 y 4).

Contenido hídrico relativo.

Existe una relación fuerte entre la tolerancia al estrés hídrico y el mantenimiento del CRA a nivel celular (Miyashita et al., 2005). En este estudio, en la evaluación del CRA demuestra como la variedad NA 56-42 es la de menor capacidad de retener agua en sus células ya que es la de menor CRA al compararla con las otras variedades (Fig. 3 y 4).

La variedad RB 86-7515 presentó la mejor capacidad de retener agua durante el estrés hídrico., pero Gutiérrez (2014) le atribuye estas características a la capacidad de la caña de lograr cambios fisiológicos y anatómicos a diferentes respuestas ambientales, por lo tanto, en la fase de recuperación la variedad NA 56-42 se ubicó como la segunda de mayor CRA y resalta el fenómeno de adaptación al poseer la capacidad de recuperarse (Fig. 3 y 4).

Volumen del simplasto

El alto volumen simplástico se asocia con alta conductancia estomática y altas tasas fotosintéticas, que son rasgos indirectamente relacionados con el rendimiento del cultivo (Moore y Botha, 2014). Esto sucede debido a que el agua del simplasto está en continuo intercambio y movimiento en el citoplasma que conecta con células adyacentes por medio de los plasmodesmos (Azcón-Bieto et al., 2000). Debido a estas características las cuatro variedades durante el estrés hídrico mantuvieron el volumen del simplasto, debido a que las plantas incrementan su actividad de transpiración para poder tomar agua del suelo la cual es limitante, debido a esto las cuatro variedades presentaron un menor potencial hídrico durante este período (Fig. 3 y 4).

Potencial hídrico y su relación en el crecimiento vegetativo.

Los resultados de este ensayo concuerdan con lo reportado por Amaya et al. (1995), quienes observaron en plantaciones de caña de azúcar de Colombia una disminución de la altura de los tallos en los periodos de déficit hídrico. Por ende, las variedades que mostraron el menor Ψ_w en condiciones de estrés, presentaron el menor crecimiento, por lo tanto, fueron las más susceptibles al estrés. Los resultados concuerdan con lo reportado por Silva et al. (2008) que en condiciones de estrés hídrico las variedades tolerantes presentaron las mejores características en altura, largo de hoja y un índice de verdor mayor que las variedades susceptibles (Fig. 3 y 4).

La elongación celular y el crecimiento disminuye a valores que van de -0,5 a -1,4 MPa (Moore y Botha, 2014) y por consiguiente en la situación de estrés hídrico todas las variedades, pero en especial la NA 56-42 se vio perjudicada en su crecimiento por alcanzar los menores Ψ_w durante el estrés (Fig. 3 y 4).

El marchitamiento de las hojas de caña de azúcar ocurre entre -1 a -2,2 MPa (Inman Bamber et al., 1986); la variedad NA 56-42 experimentó el menor índice de verdor durante estrés hídrico y la RB 86-7515 el mayor, datos que concuerdan con la relación al potencial hídrico en momentos de estrés y con los valores de Ψ_w PPT que al ser el mayor en la NA 56-42 los síntomas de marchitamiento aparecieron de primero que en variedades con Ψ_w PPT menores como la RB 86-7515 (Fig. 3 y 4).

La inhibición de la fotosíntesis y por ende los procesos fisiológicos más importantes de la caña de azúcar empiezan a sufrir reducciones a partir de -1,2 MPa (Du et al., 1998). Así, de este modo, se comprueba que la variedad NA 56-42 presentó la menor tolerancia ya que alcanzó el valor de -1,2 MPa más rápido que las otras variedades (Fig. 3 y 4).

En conjunto las variables de crecimiento y relaciones hídricas examinadas en este estudio permite concluir que las reducciones en el potencial osmótico, en el módulo de elasticidad, en valor del potencial hídrico al cual ocurre el marchitamiento y el mantenimiento del volumen del simplasto, son determinantes en el mantenimiento de la turgencia y el crecimiento a menor contenido de agua y potencial hídrico en las hojas, lo que permite clasificar las 4 variedades evaluadas, según la tolerancia al déficit hídrico, de mayor a menor en el siguiente orden: RB 86-7515, LAICA 12-331, CP 72-2086 y NA 56-42.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

La planta de caña de azúcar presenta diferentes grados de adaptación entre variedades para enfrentar niveles distintos de déficit hídrico, Con lo cual se concluye que:

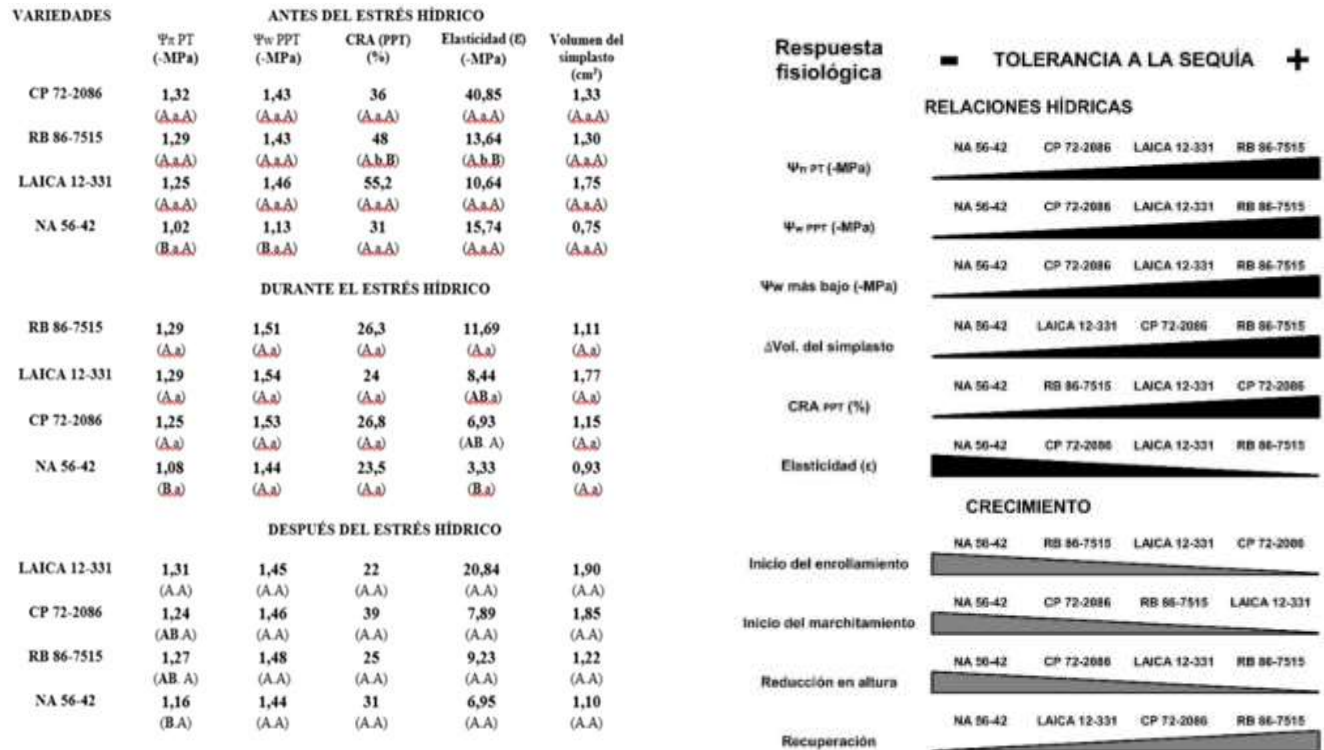
- La planta de caña de azúcar toleró niveles de déficit hídrico hasta -1,399 MPa. Valores menores de potencial hídrico indujeron en la caña cambios significativos en el metabolismo y diferenciación de los tejidos y órganos.
- Los resultados de este estudio mostraron que la variedad NA 56-42 fue la más susceptible al déficit hídrico en condiciones de invernadero, debido a que presentó los mayores valores en los parámetros inherentes a las relaciones hídricas como: Ψ_w PPT, Ψ_{π} PT, CRAPPT, Ψ_w y el volumen simplástico. Fue la variedad en presentar un marchitamiento más rápido y severo, mostrando un mayor y más rápido enrollamiento de la hoja y un cese de crecimiento mayor que en las otras variedades evaluadas (Fig. 3 y 4).
- El Ψ_w PPT es un parámetro importante para discernir tolerancia al estrés hídrico, entre menor sea el valor, mayor tolerancia al estrés hídrico demuestra; en caña de azúcar se estipula un valor de -1,50 MPa como el máximo nivel que puede alcanzar antes de presentar un grado de marchitez irreversible en variedades tolerantes. En este estudio los valores de menor magnitud los presentaron las variedades RB 86-7515 y LAICA 12-331 (Fig. 3).

- Es posible establecer el potencial hídrico, por variedad de caña de azúcar, donde la planta está a punto de sufrir efectos irreversibles en su crecimiento, valores que en promedio rondan los -1,40 MPa como inicio de síntomas de marchitamiento, siendo este diferente entre variedades. De este modo se puede incluir al Ψ_w como una medición temprana e in situ para reducir las bajas en rendimiento agrícola por efecto del déficit hídrico.
- La técnica de curvas presión/volumen resultó ser una herramienta en la detección de variedades tolerantes a la sequía, y es recomendable incorporarlo en los procesos de mejoramiento genético y en la identificación de materiales con rasgos de tolerancia a estrés por déficit hídrico para las regiones con períodos de sequía prolongados.

Referencias

1. Amaya, A; Cock, J., Hernández, A. y J. Irvine. 1995. El cultivo de la caña en la zona azucarera de Colombia. Cenicaña. Cali: Cenicaña.
2. Azcón, J. y Talón, M. 2000. Fundamentos de Fisiología Vegetal. Barcelona España: Ed McGraw-Hill. 1-51 pp.
3. Barker, D; Sullivan, C. y Moser, L. 1993. Water deficit effects on osmotic potential, cell wall elasticity, and proline in five forage grasses. *Agronomy Journal* 85: 270-275.
4. Bartlett, M; Scoffoni, C. y Sack, L. 2012. The determinants of leaf turgor loss point and prediction of drought tolerance of species and biomes: A global meta-analysis. *Ecology Letters* 15(5): 393-405.
5. Basnayake, J; Jackson, P; Inman-Bamber, N. y Lakshmanan. P. 2012. Sugarcane for water-limited environments. Genetic variation in cane yield and sugar content in response to water stress. *Journal of Experimental Botany* 63(16): 6023–6033.
6. Chaves, M. 2015. Principales variedades de caña cultivadas comercialmente en algunos países de tradición azucarera del Continente Americano. San Jose. CR. Disponible en: <https://www.laica.co.cr/biblioteca/servlet/DownloadServlet?c=443>
7. Eksteen, A; Singels, A. y S. Ngxaliwe. 2015. Water relations of two contrasting sugarcane genotypes. *Field Crops Research* 168: 86-100.
8. Graca, J; Rodrigues, F; Farias, F; Oliveira, C; Hoffmann, C. y S. Zingaretti. 2010. Physiological parameters in sugarcane cultivars submitted to water deficit. *Brazilian Society of Plant Physiology*.
9. Gutiérrez, M. 2014. Las relaciones hídricas y la tolerancia a la sequía en la caña de azúcar. IX Congreso de ATALAC. San José, Costa Rica.
10. Inman-Bamber, N. y de Jager, J. 1986. The reaction of two varieties of sugarcane to water stress. *Field Crops Research* 15:15-28.
11. Inman-Bamber, N. y D. Smith. 2005. Water relations in sugarcane and response to water deficits. *Field Crops Research* 92(2–3): 185–202.
12. Inman-Bamber, N; Lakshmanan, P. y S. Park. 2012. Sugarcane for water-limited environments: theoretical assessment of suitable traits. *Field Crops Research* 15:15-28
13. Johnsen, K. y J. Major. 2004. Técnicas ecofisiológicas en la evaluación de germoplasma. Manejo de Recursos genéticos forestales. Documentos presentados en el segundo Seminario Taller sobre Manejo de Recursos Genéticos Forestales realizado los días 11 y 12 de abril de 1995 en la Universidad Autónoma de Chapingo. Segunda Edición. Comisión Nacional Forestal. 159 p.
14. Lenz, T; Wright, I. y M. Westdy. 2006. Interrelations among pressure–volume curve traits across species and water availability gradients. *Physiologia Plantarum*. 127(3): 423– 433.
15. Meinzer, F. 2002. Co-ordination of vapour and liquid phase water transport properties in plants. *Plant Cell and Environment* 25(2), 265-274.
16. Meinzer, F; Station, D. y H. Association. 1990. Stomatal and hydraulic conductance in growing sugarcane: stomatal adjustment to water transport capacity. *Plant Cell and Environment* 13(4), 383-388.

17. Miyashita, K; Tanakamaru. S; Maitani, T. y K. Kimura. 2005. Recovery responses of photosynthesis, transpiration, and stomatal conductance in kidney bean following drought stress. *Environ. Exp. Bot.* 53(2): 205-215.
18. Moore, P. y F. Botha. 2014. Sugarcane Physiology, Biochemistry & Functional Biology. New York: Ed John Wiley & Sons, Inc. Iowa USA.
19. Polanía, J; Tafur, M. y L. Rodríguez. 2003. Curva Presión/Volumen de la caña de azúcar variedad CC 8592 en condiciones del Valle del Cauca. *Acta Agronómica* 52(1): 71-76.
20. Saliendra, N; Meinzer, C. y D. Grantz. 1990. Water potential in sugarcane measured from leaf segments in a pressure chamber. *Agronomy journal* 82(2), 358-361.
21. Welbaum, G; y F. Meinzer. 1990. Compartimentation of solutes and water in developing sugarcane stalk tissue. *Plant Physiology* 93(3): 1157-1153.
22. Wolpert, S. (2012). Which plants will survive droughts, climate change. Disponible en: <http://newsroom.ucla.edu/releases/which-plants-will-survive-droughts-231567>



Figuras 3 y 4. Caracterización numérica de los parámetros hídricos encontrados en las cuatro variedades de caña de azúcar, así como su comportamiento en el crecimiento ante situaciones de estrés por falta de agua.