

Caracterización del maíz “Lluteño” (*Zea mays* L. tipo *amylacea*) proveniente del norte de Chile, tolerante a NaCl y exceso de boro, como una alternativa para la producción de bioenergía

*Characterization of maize “Lluteño” (*Zea mays* L. *amylacea* type)
from northern Chile, tolerant to NaCl and excess of boron, as an alternative
for bio-energy production*

Elizabeth Bastías M.^{1}, Mayerling Díaz M.¹, Patricia Pacheco C.¹,
Richard Bustos P., Elvis Hurtado C.¹*

RESUMEN

El objetivo del presente trabajo consistió en estudiar la composición química y bioquímica de los tejidos vegetales y evaluar los parámetros de crecimiento del maíz “Lluteño” (*Zea mays* L. tipo *amylacea*), para considerar otra alternativa productiva de este cultivo, la producción de bioetanol, a partir de la biomasa de desecho obtenido de la “chala” de maíz, después de la cosecha en el valle de Lluta (Arica-Chile). La totalidad de la producción de este maíz se orienta, principalmente, al consumo fresco; la biomasa aérea seca o “chala”, actualmente, no tiene un uso productivo, por el contrario, este material es quemado y muy pocas veces incorporado al suelo y pocos agricultores lo ocupan como forraje, desaprovechando, así, grandes volúmenes de biomasa. En el presente estudio se estimó el contenido de etanol a partir de esta biomasa y se caracterizó el comportamiento de las plantas en condiciones de campo, desde mayo a octubre del 2008. Los parámetros analizados durante la fenología del cultivo fueron el contenido de biomasa, el contenido relativo de agua (CRA), cuantificación del contenido de clorofilas y azúcares solubles totales. Los resultados sugieren que el maíz “Lluteño” tiene un crecimiento exponencial del contenido de biomasa y de la altura, a pesar de la alta salinidad y exceso de B, presente en el suelo y agua de riego; este incremento de la biomasa fue significativo en el mes de octubre, alrededor de un 94%. El contenido de clorofilas en las hojas se mantuvo, mostrando así no ser una limitante en la asimilación del CO₂. En este sentido, el contenido de azúcares solubles totales también se incrementó hasta un 86%, sugiriendo que el maíz “Lluteño” utilizaría el aumento significativo de este soluto orgánico para incrementar el contenido de bioetanol; además, este soluto también podría actuar de osmorregulador y/o osmoprotector para mantener el estado hídrico de las plantas, permitiendo, así, una alta producción de la biomasa. En cuanto a los niveles de etanol estimados después de cosecha se pueden considerar muy buenos destacando que la muestra analizada fue sólo a partir de biomasa seca y no se incluyó la mazorca, siendo una ventaja importante que no afecta el consumo humano de este maíz.

Palabras clave: *Zea mays* L. *amylacea*, salinidad, boro, germoplasma, bioenergía.

ABSTRACT

*The aim of this study was to examine the chemistry and biochemistry of plant tissues and evaluate the growth parameters of maize variety Lluteño (*Zea mays* L. *amylacea* type), to consider the alternative production of bioethanol from biomass waste obtained from the chaff of corn after harvest, in the valley of Lluta (Arica-Chile). The entire production of corn is geared mainly for fresh consumption, the dry biomass or chaff currently has no productive use. This material is burned and rarely incorporated into the soil and few farmers use it as fodder, wasting large volumes of biomass in the valley. This study estimated the content of ethanol from biomass and characterized the behavior of plants under field conditions from May to October 2008. The parameters examined during the crop phenology were biomass, relative water content (RWC), chlorophyll content and total soluble sugars. The results suggest that Lluteño corn has an exponential growth of biomass content and plant height, despite the high salinity and excess B in the soil and irrigation water; this increase in biomass was significant in the month of October, about 94%. The content of chlorophyll in the leaves was maintained, showing not be a limiting factor in the assimilation of CO₂. Total soluble sugars, also increased up to 86%, suggesting that Lluteño corn would use the significant increase of the organic solute to increase indirectly the potential bioethanol content; this solute may also act as an osmoregulator and/or osmoprotectant to maintain the water status of plants, thereby enabling a high production of biomass. The estimated levels of ethanol after harvest may be considered very good, noting that the sample was only from dry biomass and husks were not included; this being an important advantage that does not affect human consumption of this corn.*

Key words: *Zea mays*, *amylacea*, salinity, boron, germoplasm, bioenergy.

¹ Departamento de Producción Agrícola, Facultad de Ciencias Agronómicas, Universidad de Tarapacá, Casilla 6-D, Arica-Chile.

* Autor, e-mail: ebastias@uta.cl

Introducción

El uso continuo de combustibles fósiles para satisfacer la demanda energética del mundo está amenazado por el creciente aumento de la concentración de CO₂ en la atmósfera y su efecto en el calentamiento global. (Yu *et al.*, 2003; Demirbas *et al.*, 2004). Los biocombustibles han sido promovidos como una prometedora alternativa al petróleo (Finke *et al.*, 1999). La industria, los gobiernos y científicos impulsores del uso de los biocombustibles afirman que servirán como una alternativa para mitigar los efectos del cambio climático por la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero; podrían aumentar los ingresos de los pequeños y medianos agricultores, promoviendo el desarrollo rural (Demirbas *et al.*, 2004). Al ser Chile un país pequeño, lo hace muy dependiente energéticamente y en mayor o menor medida más vulnerable ante imprevistos internacionales. La búsqueda de fuentes energéticas renovables, considerando el desarrollo de la biomasa con fines energéticos, junto a la tecnología de transformación para producción masiva de etanol y biodiésel, como combustibles renovables, abre la posibilidad de transformar la agricultura en un productor de energía (Shapouri *et al.*, 2002).

El bioetanol representa en la actualidad más del 94% de la producción mundial de biocarburantes, con la mayoría procedente de la caña de azúcar (IRGC, 2007). Alrededor del 60% de la producción mundial de bioetanol proviene de la caña de azúcar y el 40% de otros cultivos (Dufey, 2006). La biomasa lignocelulósica, como los residuos agrícolas (maíz y paja de trigo), madera y cultivos energéticos, es un material atractivo para la producción de bioetanol combustible, porque es el recurso más abundante en la Tierra. La biomasa lignocelulósica podría producir hasta 442 mil millones l/año de bioetanol (Bohlmann, 2006). Cultivos tradicionales como el maíz, sorgo, papa, trigo, caña de azúcar e incluso biomasa de tallos de maíz y residuos vegetales son utilizados para producir bioetanol, aumentando con ello oportunidades de diversificación de productos e ingresos en otras actividades productivas (Kimm, 2004). Otra alternativa que se ha planteado recientemente es la producción de bioenergía a partir de la utilización de cultivos eficientes y tolerantes, cultivos que puedan ser producidos en suelos marginales, sin que esto disminuya la superficie

cultivable destinada para la alimentación humana (Worldwatch Institute, 2006).

El maíz es uno de los cereales más utilizados para producir bioenergía y desde épocas remotas ha sido una de las especies vegetales más productivas, considerando tanto su producción global cerca de 794,05 millones de toneladas en la campaña 2009/10 (USDA, 2010), siendo la productividad agrícola más de 5,04 t/ha⁻¹ (Wasde, USDA, 2010). Cabe destacar que no sólo el clima es fundamental para la producción de maíz, las condiciones de sequía y salinidad en el suelo también limitan la productividad (Lewitt, 1980; Rodríguez-Pérez, 2006). Dentro de la clasificación del maíz, según su tolerancia a la salinidad, éste es un cultivo sensible, siendo severamente afectado incluso a bajas concentraciones de sal (Mass *et al.*, 1983). El umbral para la reducción del crecimiento se estima en cerca de 1.7 mS cm⁻¹, con una pérdida de 10% del rendimiento (Cramer, 1994).

El valle de Lluta está localizado en el extremo norte de Chile, en la provincia de Arica. Pese a las buenas condiciones climáticas, abundante luz y temperatura, los altos niveles de salinidad y exceso de boro (B) que se encuentran, tanto en el suelo cultivable como en el agua de riego, son factores limitantes para la producción agrícola de esta zona y en cualquier zona en donde la agricultura sea la principal actividad económica (Bastías *et al.*, 2004). Los valores de Na⁺ y B encontrados son hasta seis veces mayores a los valores de referencia para los diferentes cultivos (Pizarro, 1987; Mamani *et al.*, 1998; Bañuelos *et al.*, 1999). El exceso de salinidad y B constituyen dos fuentes de estrés, frecuentemente asociados a ambientes áridos y semiáridos, condición que se presenta en esta región de Chile (Alpaslan y Gunes, 2001; Stenberg *et al.*, 2001; Läubli, 2002). Pese a estas condiciones, el maíz "Lluteño" ha expresado su potencial productivo utilizando suelos marginales y agua de riego de mala calidad (Bastías, 2005). Este maíz "Lluteño" es uno de los principales cultivos, ocupando más del 60% de la superficie de uso agrícola, y su producción se orienta, principalmente, a grano fresco o choclo. La altura que alcanza este cultivar de maíz es de aproximadamente 4 m, siendo la tasa de crecimiento muy alta a pesar de las condiciones de estrés presentes (Pacheco, 1970). Toda la biomasa generada no es utilizada por los agricultores, como por ejemplo, en la producción de materia orgánica o forraje, sino por el contrario es desaprovechada; los residuos sobrantes de la cosecha de maíz son

quemados en la mayoría de los casos, generando con ello la contaminación y la degradación de los suelos, agudizando la condición de estrés existente en el valle (Comunicación personal, 2008). El uso de la biomasa de maíz “Lluteño”, para producir bioetanol, podría ser una alternativa que investigar; además, la producción de bioenergía a partir de este maíz local, tolerante a estreses y productivo en suelos marginales, no compite por los suelos cultivables agrícolas existentes en la región, y podría ser una alternativa para suelos de mala calidad en otras zonas del mundo (Fritsche, 2006; Bastías *et al.*, 2008). La capacidad de producir etanol, desde una biomasa de bajo costo (desecho final de la cosecha), presenta una potencial apuesta que lo hace más competitivo frente a otros cultivos, por lo tanto se potenciaría como un cultivo de doble propósito: alimentación y bioenergía, atributos muy destacados. El objetivo del presente trabajo se orienta a estudiar la composición química, bioquímica y la estimación del contenido de etanol, a partir de la biomasa del maíz “Lluteño”, evaluando la fisiología del cultivo en condiciones de campo, para determinar una posible alternativa productiva en este maíz, como es la producción de bioenergía.

Materiales y Métodos

El estudio se realizó el año 2008, entre los meses de mayo-octubre. Durante estos meses se evaluó y seleccionó, por mes, una muestra al azar de cinco plantas de maíz “Lluteño” obtenidas en el km 10 ½ del valle de Lluta, provincia de Arica-Chile. Las plantas fueron etiquetadas para su posterior seguimiento y realizar diferentes mediciones (químicas, bioquímicas y la estimación del contenido de etanol) y cosecha del tejido foliar. Las plantas elegidas en la parcela fueron regadas con agua proveniente del río Lluta, la cual fue analizada, también en el suelo, para determinar las características del área de estudio. Se evaluaron el crecimiento de las plantas, los cambios en el contenido de azúcares solubles totales y clorofilas totales durante los diferentes periodos fenológicos del cultivo. Los niveles de azúcares obtenidos en los tejidos permitirán estimar la concentración de etanol. Por último, también se midió el contenido hídrico de las plantas. Es importante destacar que éstos son los primeros resultados obtenidos en condiciones de campo, durante la fenología del cultivo y su relación con las condiciones de estrés y por último su posible

utilización como bioenergía, a partir de la biomasa de la planta.

Contenido iónico del suelo y agua de riego

Se extrajeron muestras de suelo obtenidas a lo largo de los surcos de riego, en tres sitios del surco elegido (inicio, medio y final), a una profundidad de 10-30 cm desde la superficie. Complementariamente, se tomó la muestra del agua de riego proveniente del río Lluta. Las muestras de agua y suelo fueron analizadas en el laboratorio de Suelo y Aguas de la Facultad de Ciencias Agronómicas de la Universidad de Tarapacá-Arica, obteniendo valores de salinidad del suelo medida como conductividad eléctrica del extracto de saturación (CE), aniones y cationes de la solución del suelo y el agua de riego, según el protocolo establecido por Sadzanvka *et al.* (2004).

Parámetros de crecimiento

Durante el periodo fenológico del maíz Lluteño se determinó la altura de planta (A). Una vez finalizado el periodo de cosecha, se procedió a obtener la planta completa para las mediciones. Luego se obtuvo el peso fresco (PF) y peso seco (PS) de cada estructura de la planta (hojas, tallos y raíces). Una vez determinado el peso fresco, se procedió al secado en una estufa a 80 °C durante 72 horas, obteniendo el peso seco. El rendimiento de materia seca, por cosecha y por hectárea, se determinó a partir de la producción de biomasa fresca.

Contenido hídrico

Se determinó el contenido relativo del agua (CRA), donde se utilizaron las hojas totalmente desarrolladas de cada planta de maíz etiquetadas. Se registró el peso fresco (PF) de 10 círculos foliares tan luego fueron retirados de la planta, luego el peso turgente (PT), después de mantenerlas por 12 horas en agua destilada, seguido por el secado de cada una de ellas, con papel absorbente, y luego las muestras se secaron en una estufa por 72 horas para obtener el peso seco (PS). El CRA se determinó mediante la fórmula expresada por Jones y Turner (1978).

Cuantificación de pigmento fotosintético

Para extraer y cuantificar el contenido de clorofilas se utilizó la técnica de Hiscox e Israelstam

(1979), a partir de discos foliares y con el solvente orgánico dimetilulfóxido (DMSO). Cada disco foliar se colocó con 1 mL de DMSO en un tubo de ensayo, cubierto con papel de aluminio, durante 3 horas en estufa a 80 °C. Posteriormente, el sobrenadante se volcó en las celdas especiales para cuantificar en el espectrofotómetro (Spectronic Genesys 2) y se procedió a realizar las lecturas, usando las longitudes de onda de 480 nm, 649 nm, 665 nm y 750 nm. La concentración de clorofila se calculó mediante las siguientes fórmulas, según Barnes *et al.* (1992), teniendo en cuenta que el disolvente empleado es DMSO:

$$\begin{aligned} \text{Clorofila } a \text{ (Chl } a, \mu\text{g/mL)} &= 12.47 A_{665} - 3.62 A_{649} \\ \text{Clorofila } b \text{ (Chl } b, \mu\text{g/mL)} &= 25.06 A_{649} - 6.5 A_{665} \\ \text{Clorofila total (Chl } a + \text{Chl } b, \mu\text{g/mL)} &= 20.02 A_{665} \\ &+ 8.02 A_{649} - 1 \end{aligned}$$

Cuantificación de azúcares solubles

El contenido de azúcares solubles totales se determinó usando el método con Antrona (Irigoyen *et al.*, 1992), a partir del extracto de 10 discos foliares macerados con 2 mL de etanol al 80% a 30 °C; posteriormente fueron centrifugados a 5000 rpm durante 10 min. Los azúcares solubles totales fueron cuantificados en un espectrofotómetro (Spectronic Genesys 2) a 625 nm.

Contenido de etanol

El contenido de etanol se determinó de una muestra compuesta de “chala” seca de maíz, que fue molida y tamizada, utilizando Cromatografía Líquida de Alta Resolución (HPLC) con detector de índice de refracción en el Laboratorio Recursos Renovables Universidad de Concepción-Chile. Se estimó la concentración de etanol a partir del contenido de azúcares como: glucanos, arabinanos, xilanos y material insoluble en ácido (lignina y otros).

Resultados

Contenido iónico del suelo y del agua de riego

Según la norma americana de Riverside (1972) a través de Blasco, F. y Rubia, Y. de la (1973), considera la conductividad eléctrica (CE) del agua del valle de Lluta, clasificada como C4, un agua de salinidad muy alta, en muchos casos no es apta para

el riego, sólo debe usarse en suelos muy permeables y con buen drenaje, empleando volúmenes en exceso de agua para lavar las sales del suelo y también se podría utilizar en cultivos muy tolerantes a la salinidad. El contenido de Cl⁻ en el agua de riego excede a la Norma Chilena (Nch) 1333-1978, ya que tiene 593,8 ppm, la norma acepta como límite máximo 200 ppm. El contenido de B también se encuentra por sobre la norma, ya que el límite es 0,75 ppm de B. En relación al contenido de Na⁺ este no es muy alto, si se compara con el contenido de Cl⁻, por lo tanto, esta agua podría usarse para regadío en cultivos altamente tolerantes a la salinidad. Debido a los altos niveles de Ca²⁺ en el suelo del valle de Lluta, y también en el agua de riego, se agrava la situación de salinidad y exceso de B en este valle; es importante destacar que la medición de los iones y de conductividad eléctrica, en general, se duplico en el suelo con respecto a los niveles del agua de riego.

Tabla 1. Contenido iónico promedio del suelo y agua de riego del valle de Lluta, entre los meses de mayo a octubre del 2008.

Valle de Lluta	AGUA	SUELO
CE (Ms/cm)	2,7	5,5
Na ⁺ (ppm)	317,6	656,3
K ⁺ (ppm)	8,3	16,4
Ca ²⁺ (ppm)	221,2	417,7
Cl ⁻ (ppm)	593,8	1169,1
B (ppm)	10,8	16,8

Fuente: Laboratorio de Suelo y Aguas, Facultad de Ciencias Agronómicas. Universidad de Tarapacá (2008).

Parámetros de crecimiento

El rendimiento y la producción de biomasa es el resultado final de una serie de interacciones donde intervienen el genotipo, el clima, el suelo y el manejo del cultivo, entre otros. La producción de materia seca total es el producto de la tasa de crecimiento por la duración del período fenológico (Boote y Tollenaar, 1991). Los cambios en el contenido de biomasa, tanto en altura (A) como en peso seco (PS), son parámetros que han sido utilizados comúnmente para determinar el efecto del NaCl en las plantas. La altura en las plantas de maíz “Lluteño” (Figura 1) en condiciones de campo alcanzó una altura de promedio de 380 cm, lo que significó un aumento de un 93% con respecto a la

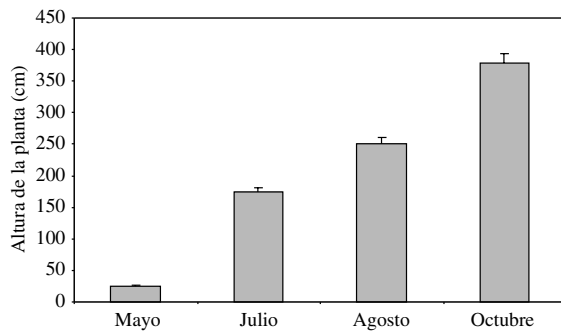


Figura 1. Altura de las plantas de maíz "Lluteño", entre los meses de mayo a octubre del 2008.

altura registrada en el primer muestreo, en el mes de mayo, donde las plantas de maíz tenían una altura inicial promedio de 25,6 cm. El aumento de la altura de las plantas fue continuo durante los estados fenológicos siguientes y fue un parámetro que no se vio afectado por la presencia excesiva de salinidad y de B, tanto en el suelo como en el agua de riego. Cuando se analizó la biomasa de las plantas, expresada en el contenido de materia seca en las plantas, por estructuras, raíz, tallo y hojas (Figura 2), se observó que las condiciones de alta salinidad y exceso de B no afectaron la producción de biomasa, observándose un notorio incremento en la materia seca. La hoja alcanzó el mayor PS en el mes de octubre (cosecha), con un promedio de 95 g planta⁻¹ de materia seca, el tallo registró un PS de 90 g planta⁻¹ y la raíz 30 g planta⁻¹. El promedio de PS total de las plantas de maíz fue de 215 g planta⁻¹. Estos datos nos permiten estimar una producción de materia seca proveniente de la biomasa del maíz "Lluteño" de 7,1 t/ha, cabe destacar que no se ha considerado la mazorca como parte de la biomasa. El aumento del contenido de la biomasa en las hojas fue muy significativo, desde el mes de

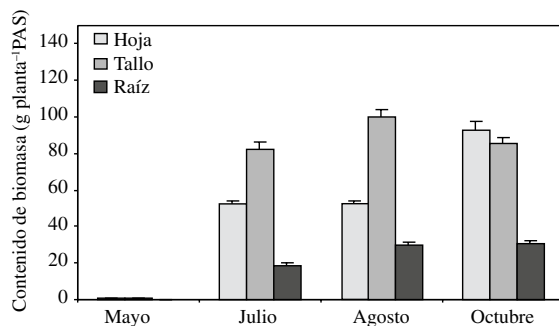


Figura 2. Contenido de biomasa, expresada en peso seco de raíz, tallo y hojas del maíz "Lluteño", entre los meses de mayo a octubre del 2008.

agosto a octubre (cosecha), siendo este comportamiento muy beneficioso, para obtener el máximo de biomasa en las plantas junto con el llenado del grano y así obtener una mazorca de alta calidad.

Evaluación del contenido hídrico

El estrés hídrico es uno de los efectos más drásticos en condiciones de salinidad, provocando una disminución del potencial hídrico del medio (suelo) debido a la presencia de iones y restringir, así, la absorción de agua por las raíces (efecto osmótico) (Hasegawa *et al.*, 2000). En las plantas de maíz "Lluteño" se observaron variaciones en el CRA, en las distintas etapas fenológicas del cultivo (Figura 3). El descenso del CRA ocurría en conjunto con el transcurso de la fenología. El efecto de las concentraciones de NaCl y exceso de boro existentes en el valle de Lluta podrían indicar un leve estrés hídrico en los tejidos de las plantas en el periodo de cosecha, pero este no afectó el crecimiento de la planta. Se observó que el mayor valor del CRA en el mes de mayo, inicio de la fenología del maíz, con un 95% y los valores promedio más bajo ocurrieron en el mes de octubre, con valores promedio de 65% (cosecha). El descenso fue del orden de un 28,6%

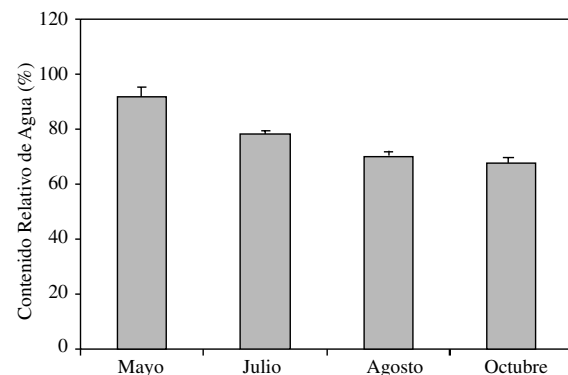


Figura 3. Contenido Relativo de Agua (CRA) foliar de las plantas, registrado de maíz "Lluteño", entre los meses de mayo a octubre del año 2008.

Contenido de clorofilas

El contenido de clorofilas está relacionado con la potencial capacidad fotosintética del maíz "Lluteño". El mayor contenido de clorofila (Figura 4) lo registra la clorofila *a*, en el mes de julio con valores de 12,6 Chl $\mu\text{g g}^{-1}$ PS. En los meses de agosto y octubre el contenido de clorofila *a* disminuye alrededor de un

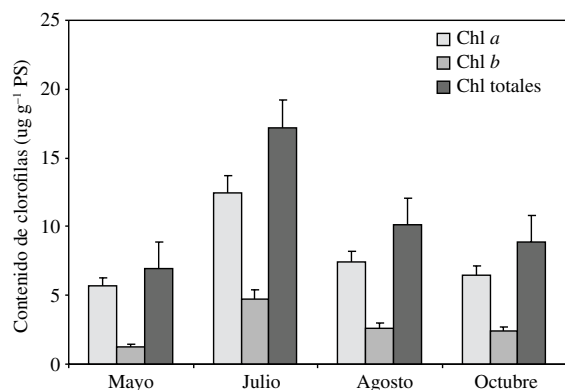


Figura 4. Contenido de clorofilas (*a*, *b* y *totales*) en hojas del maíz “Lluteño” en los diferentes estados fenológicos, entre los meses de mayo a octubre del 2008.

50%. Es de destacar que el aumento del contenido de clorofila *a* sólo ocurre en el mes de julio, luego vuelven los valores similares al observado al inicio del periodo fenológico. Respecto al contenido de clorofila *b*, se observaron en el mes de julio también los valores más altos, alcanzando 5,0 Chl $\mu\text{g g}^{-1}$ PS. En el mes de mayo se registraron los valores más bajos de 2,2 Chl $\mu\text{g g}^{-1}$ PS. Finalmente, el contenido de clorofilas totales (*a+b*) siguió la misma tendencia de las clorofilas *a* en el mes de julio, se alcanzaron los valores promedio de 17 Chl $\mu\text{g g}^{-1}$ PS, disminuyendo, aproximadamente, un 50% en los meses de agosto y octubre.

Contenido de azúcares solubles totales

La planta puede realizar ajuste osmótico (AO) a partir de la acumulación de solutos compatibles, como azúcares en la hoja, que permiten mantener un estado hídrico óptimo en las plantas para desarrollarse en condiciones de estrés salino (De Costa *et al.*, 2007). En este sentido, el contenido de azúcares solubles totales en la hoja (Figura 5), en condiciones de campo, mostró un aumento significativo solo durante el mes de octubre, hecho que coincide con la mayor acumulación de PS en la hoja, obteniendo valores promedio de 400 mg g^{-1} PS de azúcares solubles, aumentando, aproximadamente, un 90%. Con respecto a las plantas evaluadas en los meses anteriores (mayo, julio y agosto), no se observaron diferencias en el contenido de azúcares solubles totales en la hoja, siendo los valores muy bajos, con un promedio de 50 mg g^{-1} PS.

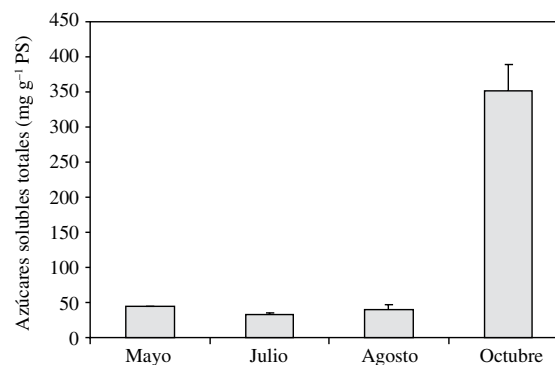


Figura 5. Contenido de azúcares solubles totales, en la hoja de maíz “Lluteño” en los diferentes estados fenológicos, entre los meses de mayo a octubre del año 2008.

Contenido de etanol

Para determinar la factibilidad de utilizar la biomasa o chala seca de maíz “Lluteño”, como una alternativa para obtener etanol, la estimación de la concentración de etanol fue a partir de los azúcares solubles totales presentes en la materia seca de las hojas; este cálculo, de una muestra compuesta, mostró un valor de 95,3 gal./t de materia seca de rastrojo. Cabe destacar que los galones de etanol, calculados a partir de la chala, no se consideraron en la materia seca, la mazorca o los granos.

Discusión

El maíz es un cultivo sensible a la salinidad (Rivetti, 2006). El efecto negativo de ella, en la producción de biomasa en el maíz “Lluteño” en condiciones de campo, no se observó, ni mucho menos se detuvo su crecimiento, mostrando una vez más la tolerancia a estas condiciones de estrés (Bastías, 2005). Por lo tanto, el maíz Lluteño puede mantener un crecimiento continuo y una óptima acumulación de biomasa, a pesar de crecer en suelos marginales regados con aguas de un alto contenido de sales y exceso de B (Tabla 1), respuesta contraria a la dada por Da Costa *et al.* (2007), quien señala que este parámetro es altamente sensible al estrés salino (Dale, 1998).

Andrade *et al.* (1996) consideran que la variación de peso y la partición de la materia seca, en las diferentes estructuras de la planta, durante el crecimiento de la planta, radican en que el primero describe el comportamiento del proceso productivo en su conjunto, y el segundo informa sobre la estrategia puesta en juego para determinar el número de

estructuras reproductivas y el llenado efectivo de los órganos de cosecha. Con respecto a la producción de biomasa o materia seca, incluyendo la mazorca en los híbridos de maíz comerciales, Harvest H9403®, Dekalb DK641® y Eagle 238W®, para forraje en la localidad de Bachiniva-México, alcanzan 9,4, 10 y 20,2 t/ha⁻¹, respectivamente (Ruiz *et al.*, 2006). En este sentido, los datos obtenidos en el presente estudio para el maíz “Lluteño” se estimó una producción de 7,1 t/ha⁻¹, pero sin considerar el peso de la mazorca. Además, la densidad de plantación utilizada en los híbridos forrajeros era de 80.000 plantas*ha⁻¹ (Núñez *et al.*, 2005), a diferencia de la densidad de plantas que se utiliza en el maíz “Lluteño” que es de tan sólo 40.000 plantas*ha⁻¹ (Fuentes y Subiabre, 2009). Para lograr una mayor producción de materia seca en el maíz “Lluteño” para ensilaje, se incrementó el número de plantas a 83.333 ha⁻¹, logrando rendimientos de materia seca del orden de 20 a 25 t/ha⁻¹ (Fuentes y Subiabre, 2009). Este aspecto es fundamental a la hora de proyectar la producción de biomasa de maíz “Lluteño” con fines bioenergéticos, ya que sólo aumentando la densidad de plantación se obtendrían mayores volúmenes de biomasa y con ello el aumento de la producción de bioetanol. La altura promedio de 380 cm/planta⁻¹ alcanzada por este maíz es notoriamente superior a los híbridos comerciales anteriormente descritos, estos híbridos de maíz alcanzan una altura promedio de 207, 226 y 251 cm*planta⁻¹, respectivamente (Ruiz *et al.*, 2006). En este sentido, podemos sugerir que el maíz “Lluteño”, a pesar de las condiciones edáficas donde se produce, puede alcanzar una producción de materia seca que va acorde con el llenado efectivo de los órganos de cosecha y superior al compararlos con híbridos comerciales de maíz forrajeros. El peso de la biomasa y la altura de las plantas se mantienen en forma ascendente y continua, esto se debe posiblemente a las estrategias de tolerancia a la salinidad y al exceso de B que posee este maíz para desarrollarse en estas condiciones (Figuras 1 y 2).

En cuanto al estrés hídrico, Pardossi *et al.* (1998) y De Costa *et al.* (2007) plantean que es uno de los primeros y más evidente efecto de la salinidad. Bajo esta condición, las plantas desarrollan respuestas fisiológicas para enfrentar los déficit hídricos, por evasión o tolerancia al estrés, que les permitan su supervivencia y lograr cierto desarrollo bajo estas condiciones desfavorables (Levitt, 1980). Dicho esto, se confirma la importancia de cuantificar el CRA

en los tejidos de las plantas, ya que éstos pueden disminuir con el incremento de la concentración de sal u otros iones en el medio de crecimiento, incidiendo en la disminución de la producción, Bethke y Drew (1992) y Kava *et al.* (2009). En este sentido, se observó una disminución del CRA en el maíz “Lluteño” (Figura 3), pero este descenso no significó en las plantas una detención de crecimiento ni una menor producción de biomasa; el estado hídrico fue el óptimo, a pesar del contenido salino y exceso de B del suelo y agua de riego. Es probable que la ligera variación del CRA en las plantas no fue suficiente para que los tejidos pierdan turgencia y el crecimiento se detenga. El descenso de los valores del CRA podría considerarse como uno de los mecanismos de respuesta de este maíz, para realizar el ajuste osmótico. Como el estado hídrico de la planta se ve afectado por la exposición a concentraciones elevadas de sales, deben ocurrir cambios en el flujo de agua de tal manera que las células y los tejidos se adapten a esta situación (Rojas, 2003), ya que normalmente la absorción de agua se lleva a cabo gracias al mayor potencial osmótico de la raíz con respecto al suelo y que ocurre en cuanto las células dejan de estar turgentes (Rojas, 2003). Este comportamiento podría ocurrir en el maíz Lluteño, por la capacidad que tiene de realizar ajuste osmótico, y para mantener un buen estado hídrico en las plantas se podría, en general, esperar un mayor descenso del contenido hídrico, en el mes de octubre, debido a una mayor acumulación de sales y B en el suelo, situación que no ocurre. Además, la acumulación de salinidad y exceso de boro podrían explicar el aumento de los niveles de azúcar solubles en la planta, y el posible rol de este soluto orgánico como osmorregulador y/o osmoprotector de las plantas (Figura 5).

Uno de los indicadores de la capacidad fotosintética de las plantas es la cantidad de clorofila por unidad de área de las hojas, ya que representa una medida de las dimensiones del sistema fotosintético y de su eficiencia, lo que determina, finalmente, la producción de biomasa en diferentes condiciones de cultivo (García *et al.*, 2005). La cuantificación de los pigmentos fotosintéticos y el estudio de su dinámica a través del tiempo pueden contribuir a conocer mejor el comportamiento de las plantas durante su ciclo de desarrollo y tiene una estrecha relación con la utilización de la energía lumínica, CO₂, agua y nutrientes, además, ayudaría a diseñar sistemas de manejo eficientes (Fortes *et al.*, 2009).

La clorofila *a* (Chl *a*) interviene activamente en la transformación de energía luminosa en energía química y ésta puede expresarse en cantidades de sustancias sintetizadas, como por ejemplo las proteínas y los carbohidratos solubles, por tanto, es de suponer que exista fundamentalmente alguna relación entre estas sustancias y la Chl *a* (Herrera, 2006; Fortes *et al.*, 2009). En este estudio, el contenido de pigmentos fotosintéticos en las hojas de maíz “Lluteño”, en condiciones de campo, fue óptimo. La suma de las clorofilas tuvo el mismo patrón de respuesta que los pigmentos individuales (Figura 4). Según Lauzán *et al.* (1991), cuando Chl *a* es superior a la Chl *b*, el funcionamiento de los pigmentos en el proceso de la fotosíntesis es el adecuado. Dicho esto, se podría sugerir que el maíz “Lluteño” tiene un proceso fotosintético adecuado durante el ciclo del cultivo en el valle de Lluta. Sin embargo, las investigaciones sobre el efecto que provoca la salinidad en la concentración de pigmentos fotosintéticos son abundantes y coincidentes, y tienden a mostrar un efecto negativo de la salinidad debido a la destrucción de los cloroplastos y a un aumento de la actividad de la enzima clorofilasa, afectando la síntesis de clorofilas y con ello disminuyendo la producción de biomasa (Flowers *et al.*, 1986; Appels *et al.*, 1990). Estudios realizados por Baco (2006) mencionan que los contenidos de clorofila disminuyen significativamente en maíz en el último periodo fenológico, lo que pudiera estar determinado por la menor demanda de energía y metabolitos que necesitaría la planta para mantener el crecimiento, similares resultados encontré en otras variedades de maíz, donde existiría una relación del comportamiento de las clorofilas con la edad de las plantas. También, Bokhari (1988), en *Eragrostis curvula* (Schradd), en la madurez de la planta, encontró reducciones significativas en los contenidos de clorofilas *a* y *b*. Zhang *et al.* (2007) y Wang *et al.* (2007) demostraron que ligado al envejecimiento de la planta ocurren reducciones en el contenido de clorofilas, en la eficiencia fotoquímica del fotosistema II, en la expresión de genes relacionados con la fotosíntesis y en la síntesis de proteína, lo que a su vez influye en la absorción de CO₂ y energía luminosa. Estas razones pueden ser contradictorias al compararlas con los contenidos de clorofila observados en el maíz “Lluteño”, ya que presenta estabilidad en el contenido de clorofilas, en especial en el mes de julio, donde aumenta su contenido, indicando así el grado de tolerancia a ambos estreses que presenta este maíz local.

Durante nuestro estudio se observó el mayor contenido de azúcares solubles en el último periodo de desarrollo del cultivo, coincidiendo con la etapa de cosecha de la mazorca; por lo tanto, el alto costo energético que significa para la planta la síntesis de azúcares solubles totales (Raven, 1985) sólo ocurre en este último periodo fenológico y no durante los otros periodos fenológicos. Para la producción de bioetanol, esta característica es muy importante, y la gran ventaja de estos niveles de azúcares solubles totales en el tejido foliar en la cosecha permite una mayor obtención de este bioetanol. Según datos proporcionados por NCGA (2004), la producción promedio obtenida a partir de una tonelada de molienda seca de maíz es de 407,37 lt. Si estimamos el cálculo de la concentración de etanol, a partir de los azúcares presentes en la materia seca, nos indicaría una producción de 107,5 gal/t, de materia seca, esta cifra considera la utilización de la mazorca en la producción de etanol. En este sentido, los contenidos de etanol obtenidos a partir de la biomasa seca del maíz “Lluteño” alcanzan a 95,3 gal/t, de materia seca, sin considerar la mazorca. Estos datos pueden ser muy prometedores a la hora de querer orientar la producción de este maíz hacia la obtención de bioenergía. La utilización de residuos vegetales para la obtención de bioetanol puede tener efectos económicos importantes. En primer lugar, porque se utilizaría eficientemente el cultivo de maíz, dando un valor agregado a los residuos lignocelulósicos que actualmente se desechan o se queman. Por otra parte, el bioetanol tiene ventajas adicionales evidentes, ya que su origen vegetal lo hace una fuente de energía inagotable, a diferencia de los combustibles fósiles, cuyas reservas están cada día más limitadas. La industria bioenergética podría con este tipo de maíz permitir habilitar grandes extensiones de terreno marginales que otros cultivos serían imposibles de producir, generando nuevos empleos en las zonas rurales y la revitalización de tierras marginales, como sería el caso del valle de Lluta u otras zonas del mundo afectadas por la salinización con niveles elevados de boro.

En conclusión, la utilización de biomasa residual obtenida de la cosecha del maíz “Lluteño” puede representar una actividad económica complementaria a la producción que hasta hoy se ha generado en el valle de Lluta, permitiendo con ello establecer otras cadenas productivas específicas en los agricultores de la Provincia de Arica, generando nuevos campos, sin que esto conlleve a ocupar suelos agrícolas con

orientación de alimentación, y utilizando suelos marginales y aguas de riego de mala calidad. También debemos considerar la poca superficie existente en la región para el desarrollo de esta actividad productiva, pero se debería enfocar en la comercialización de la semilla del maíz Lluteño.

Agradecimientos

Este estudio ha sido posible gracias al aporte del Convenio de Desempeño UTA-MECESUP 2 (Arica-Chile) y al Proyecto Mayor-UTA 9722-10.

Literatura Citada

- Andrade, F.; Cirilo, A.; Uhart, S.; Otegui M.
1996 Ecofisiología del cultivo de maíz. Ed. La Barrosa. Balcarce. Buenos Aires. 292 p.
- Alpaslan, M.; Gunes, A.
2001 Interactive effects of boron and salinity stress on the growth, membrane permeability and mineral composition of tomato and cucumber plants. *Plant and Soil* 236: 123-128.
- Appels, A. y Lagudah, H.
1990 Manipulation of chromosomal segments from wild wheat for the improvement of bread wheat. *Australian Journal. Plant Physiology*. 17: 253-266.
- Baco, S.
2006 Effects of Plant Age, Ascorbate and Kinetin Applications on Integrity of the Photosynthetic Pigment Complex in Maize (*Zea mays* L.) Plants Grown under Heat Stress. *Sci*. 5: 357.
- Bañuelos, G.; Ajwa, H.; Cáceres, L.; Dyer D.
1999 Germination responses and boron accumulation in germoplasm from Chile and United States grown with boron-enriched water. *Ecotoxicology Environmental Safety* 43: 62-67.
- Barnes, J.; Balaguer, L.; Manrique, E.; Elvira, S.; Davison, A.
1992 A reappraisal of the use DMSO for the extraction and determination of chlorophyll *a* and *b* lichens and the higher plants. *Environmental and Experimental Botany*. 32: 85-100.
- Bastías, E. González-Moro, B.; González-Murúa, C.
2004 *Zea mays* L. amylacea from the Lluta valley (Arica-Chile) tolerates salinity stress when high level of boron are available. *Plant and Soil* 256: 73-84.
- Bastías, E.
2005 Interacción del boro en la tolerancia a la salinidad de *Zea mays* L. amilácea originario del valle de Lluta (Arica-Chile). Tesis Doctoral. Universidad del País Vasco. España.
- Bethke, P.; Drew, M.
1992 Stomatal and Nonstomatal Components to Inhibition of Photosynthesis in Leaves of *Capsicum annuum* during Progressive Exposure to NaCl Salinity. *Plant Physiology* 99: 219-226.
- Blasco, F.; Rubia, Y. de la
1973 "Guía para clasificar las aguas en relación con su calidad para el riego". Instituto para la Reforma y Desarrollo Agrario (IRYDA). Madrid.
- Bokhari, U.
1988 Chlorophyll, dry matter, and photosynthetic conversion-efficiency relationships in warm-season grasses. *Journal. Range Management*. 36: 431.
- Bonhert, H.; Nelson, D.; Jensen, R.
1995 Adaptations to Environmental Stresses. *The Plant Cell* 7: 1099-1111.
- Boote, K.; Tollenaar, M.
1991 Modeling genetic yield potencial. pp. 533-565 En: K. Boote, J.M. Bennett, T.R. Sinclair and J.M Paulsen (eds.) *Physiology and determination of crop yield*. ASA, Madison, WI, USA.
- Cramer, G.
1994 Response of maize (*Zea mays* L.) to salinity. In: M. Passarakli (ed.). *Handbook of Plant and Crop Stress*. New York: Marcel Dekker. pp. 449-459.
- Demirbas, F.; Bozbas, K.; Balat, M.
2004 Carbon dioxide emission trends and environmental problems in Turkey. *Energy Explor Exploit* 22: 355-65.
- Finke, C.; Möller, K.; Schlink, S.; Gerowitt, B.; Isselstein, J.
1999 The environmental impact of maize cultivation in the European Union: practical options for the improvement of the environmental impact-Case study Germany, Research Centre for Agriculture and Environment in cooperation with the Department of Forage and Grass Research of the Institute for Agronomy and Plant Breeding, Georg. August, University of Göttingen, Göttingen, /http://ec.europa.eu/environment/agriculture/pdf/mais_allemange.pdf.
- Flowers, T.; Yeo, A.
1986 Ion relations of plants under drought and salinity. *Australian Journal of Scientific Research*. 75: 91 p.
- Fortes, D.; Herrera, R.; Sayonara, M.; Romero, A.; Cruz, A.
2009 Comportamiento de los pigmentos fotosintéticos, según la edad de rebrote después del pastoreo de *Pennisetum purpureum* vc. Cuba CT-115 en la estación poco lluviosa. *Revista Cubana de Ciencias Agrícolas*, 43: 183-186.
- Fuentes, F.; Subiabre, H.
2009 Recursos forrajeros para la alimentación del ganado en el Valle de Lluta). In: *Estudio básico: Investigación silvo-agropecuaria de innovación de la I Región*. Tapia F. (ed.). Santiago, Chile. Instituto de Investigaciones Agropecuarias (Ed). *Boletín INIA* N° 197: 125-129.
- Hasegawa, P.; Bressan, R.; Zhu, J.; Bohnert, H.
2000 Plant cellular an molecular responses to high salinity. *Annual Review of Plant Physiology and Plant Molecular Biology* 51: 463-499.
- Herrera, R.
2006 Fotosíntesis. En: *Pastos tropicales, contribución a la fisiología, establecimiento, rendimiento de biomasa, producción de biomasa, producción de semillas y reciclaje de nutrientes*. Ed. Instituto de Ciencia Animal, La Habana, Cuba. p. 37.
- Hiscox, J.; Israelstam, G.
1979 A method for the extraction of chlorophyll from leaf tissue without maceration. *Canadian Journal of Botany* 57: 1332-1334.

- Irigoyen, J.; Pérez de San Juan, J.; Sánchez-Díaz, M.
1996 Drought enhances chilling tolerance in a chilling sensitive maize (*Zea mays*) variety. *New Phytology* 134: 53-59.
- Jones, M.; Turner, T.
1978 Osmotic adjustment in leaves of sorghum in response to water deficit. *Plant Physiology* 61: 122-126.
- Lauzán, J.; Vento, H.; Herrera, R.; Martínez, R.; Cruz, R.
1991 Estudio de los pigmentos verdes y carotenoides en somaclones de King grass. III. Período lluvioso. *Revista Cubana de Ciencias Agrícolas* 25: 195.
- Läuchli, A.
2002 Functions of boron in higher plants: recent advances and open questions. *Plant Biology* 4: 190-192.
- Lewitt, J.
1980. Responses of Plants to Environmental Stresses, vol. 1. Academic Press, Nueva York. pp. 25-211.
- Mamani, R.; Doussoulin, E.; Serri, H.
1998 Respuesta del algodón (*Gossypium barbadense* L.) a los factores nitrógeno, densidad de plantación y carga de agua para lixiviación de sales en el valle de Lluta. *Revista Idesia*. V. 15: 49-58.
- NCGA
2004 Names Corn Yield Contest Winners; Top Yields Range from 339 to 248 Bushels Per Acre. PR Newswire. USDA. 37:19-28
- Núñez, G.; Hernández, R.; Contreras, F.; González, F.; Castañeda, A.; Peña, R.
2005 Madurez de híbridos de maíz a la cosecha para mejorar la producción y calidad del forraje. *Téc Pecu Méx* 43(1): 69-78.
- Pacheco, J.
1970 *Revista Idesia* Nº 1. Departamento de Agricultura, Universidad del Norte. Arica-Chile 1: 7-41.
- Paliwal, R.
2001 Introducción al maíz y su importancia. En: El maíz en los trópicos: mejoramiento y producción. Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación, FAO, Roma-Italia, 100 p.
- Pardossi, A.; Malorgio, F.; Oriolo, D.; Gucci, R.; Serra, G.; Tognoni, F.
1998 Water relations and osmotic adjustment in *Apium graveolens* during long-term NaCl stress and subsequent relief. *Physiol. Plant* 102: 369-376.
- Rivetti, A.
2006 Producción de maíz bajo diferentes regímenes de riego complementario en Río Cuarto, Córdoba, Argentina. I. Rendimiento en grano de maíz y sus componentes. *Revista de la Facultad de Ciencias Agrarias*. 38: 25-36.
- Rodríguez-Pérez, L.
2006 Physiological implications of osmoregulation in plants. *Agronomía Colombiana*. 24: 28-37.
- Rojas, M.
2003 La resistencia a la sequía. *Ciencia UANL* 3: 326-331.
- Ruiz, O.; Beltrán, R.; Salvador, F.; Rubio, H.; Grado, A.; Castillo, Y.
2006 Valor nutritivo y rendimiento forrajero de híbridos de maíz para ensilaje. *Revista Cubana de Ciencias Agrícolas*, 40: 91-96
- Shapouri, H.; Duffield, J.; Wang, M.
2002 The Energy Balance of Corn Ethanol: An Update Agricultural Economic Report no. 814. US Department of Agriculture, Office of the Chief Economist, Office of Energy Policy and New Uses.
- Stenberg, P.; Ulery, A.; Villa, C.
2001 Salinity and boron effects on growth and yield of tepary and kidney beans. *HortScience* 7: 1269-1272.
- USDA's monthly Crop Production and World Supply and Demand Estimates (WASDE) Reports, released Friday, estimated a yet smaller U.S. 2010 corn crop but slightly larger than expected soybean yields and crop size Vol. 8, No. 177, Sept. 13, 2010
Worldwatch Institute.
2006 Biofuels for transport: global potential and implications for sustainable agriculture and energy for the 21st century. Worldwatch Institute, Washington, D.C. Available from <http://www.worldwatch.org/system/files/EBF038.pdf>
- Wang, J.; Xing, J.; Zhang, L.; Jia, L.
2007 A new principle photosynthesis capacity biosensor based on quantitative measurement of delayed fluorescence *in vivo*. *Biosens. Bioelectron* 10: 1016.
- Yu, J.; Corripio, A.; Harrison, O.; Copeland, R.
2003 Analysis of the sorbent energy transfer system (SETS) for power generation and CO₂ capture. *Advanced Environmental*; 7:335-45.
- Zhang, L.; Xing, D.; Wang, J.; Li, L.
2007 Rapid and noninvasive detection of plants senescence using a delayed fluorescence technique. *Photochemical Photobiology Science*. 6: 635.