



Revista Industrial
y Agrícola de
Tucumán

ISSN 0370-5404

En línea
1851-3018

Tomo 103 (1):
6-13; 2026



ESTACION EXPERIMENTAL
AGROINDUSTRIAL
OBISPO COLOMBRES
Tucumán | Argentina

Av. William Cross 3150
T4101XAC - Las Talitas.
Tucumán, Argentina.

Trabajo ya publicado

**Trabajo
presentado en
el XXXII ISSCT
Centennial
Congress, 24 al 28
de agosto de 2025,
Cali, Colombia,
traducido al
castellano.**

Fecha de
recepción:
30/09/2025

Fecha de
aceptación:
02/10/2025

Evaluación de indicadores de daño por heladas en variedades TUC de caña de azúcar en Tucumán, Argentina

Diego D. Henríquez*, M. Fernanda Figueroa*, L. Pablo Medina*, Diego D. Costilla*, Jorge V. Díaz*, A. Cecilia Ghio*, A. Carolina Díaz Romero*, Natalia R. Sorol** y Santiago Ostengo*

* Programa de Mejoramiento Genético de Caña de Azúcar, Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC), Las Talitas, Tucumán, R. Argentina, T4101XAC; **Sección Química, EEAOC. Email: dhenriquez@eeaoc.org.ar

RESUMEN

En Tucumán, la principal provincia productora de caña de azúcar de Argentina, las heladas afectan frecuentemente el desarrollo óptimo del cultivo y la recuperación de azúcar durante el procesamiento industrial. Caracterizar las variedades TUC desarrolladas por el Programa de Mejoramiento Genético de Caña de Azúcar de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (PMGCA-EEAOC) en relación con el deterioro inducido por las heladas es crucial para optimizar las estrategias de manejo de los cultivares. Este estudio tuvo como objetivo evaluar la respuesta al deterioro posterior a una helada de cinco variedades TUC: TUC 95-10, TUC 03-12, TUC 06-7, TUC 02-22 y TUC 00-65. Durante 2024, se realizaron muestreos quincenales en dos sitios experimentales para cuantificar los cambios en el contenido de sacarosa antes y después de un evento de helada severa. Los cultivares comerciales LCP 85-384 y TUCCP 77-42 se incluyeron como controles de alta y baja tolerancia al deterioro del jugo post helada, respectivamente. La concentración de sacarosa (g de sacarosa/100 g de jugo) se cuantificó utilizando cromatografía líquida de alta resolución (HPLC). La primera helada significativa ocurrió el 11 de julio, con una intensidad moderada, en Los Quemados, Leales ($-3,5^{\circ}\text{C}$ durante 8 h), y severa en Santa Ana, Río Chico ($-4,2^{\circ}\text{C}$ durante 10 h). TUC 06-7 y TUC 03-12 mostraron una baja tasa inicial de disminución de sacarosa en ambos sitios, lo que indica una notable estabilidad en las primeras etapas después de la helada. TUC 95-10 mostró una tasa inicial intermedia de disminución de sacarosa. Por el contrario, TUC 02-22 y TUC 00-65 experimentaron una tasa inicial más alta de pérdida de sacarosa, aunque con un comportamiento aun superior al de TUCCP 77-42. Estos resultados preliminares ofrecen una caracterización inicial del comportamiento de las variedades TUC de caña de azúcar frente a las heladas. Es crucial continuar con ensayos adicionales bajo condiciones de heladas severas para validar estas conclusiones.

Palabras clave: contenido de sacarosa, estrés por frío, calidad industrial.

ABSTRACT

Evaluation of freeze-damage indicators in TUC sugarcane varieties in Tucumán, Argentina

In Tucumán, Argentina's primary sugarcane-producing province, frost events frequently affect optimal crop development and sugar recovery during industrial processing. Characterizing TUC varieties, developed by the Sugarcane Breeding Program of Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (SCBP-EEAOC), in relation to frost-induced deterioration is crucial for optimizing cultivar management strategies. This study aimed to assess the post-frost deterioration response of the main five TUC varieties: TUC 95-10, TUC 03-12, TUC 06-7, TUC 02-22, and TUC 00-65. During 2024, sampling was conducted

biweekly (from May 15 to October 17) at two experimental sites, in order to quantify changes in sucrose content prior and after a severe frost event. The commercial cultivars LCP 85-384 and TUCCP 77-42 were included as reference controls of high and low tolerance to juice deterioration post-frost, respectively. Sucrose concentration (g of sucrose per 100 g of juice) was quantified using high-performance liquid chromatography (HPLC). The first significant frost occurred on July 11, with moderate intensity in Los Quemados, Leales (-3.5°C for 8 h) and severe intensity in Santa Ana, Río Chico (-4.2°C for 10 h). TUC 06-7 and TUC 03-12 exhibited a low initial rate of sucrose decrease at both sites, indicating notable stability in the early stages following the frost. TUC 95-10 showed an intermediate initial rate of sucrose decrease. In contrast, TUC 02-22 and TUC 00-65 experienced a higher initial rate of sucrose loss, although with performance still superior to that of TUCCP 77-42. These preliminary results represent the first characterization on the behavior of TUC sugarcane varieties in response to frost, making it essential to continue with additional trials under severe frost conditions to validate these results.

Key words: sugar content, cold stress, industrial quality.

■ INTRODUCCIÓN

Debido a su sensibilidad a las bajas temperaturas, la caña de azúcar necesita ciclos de crecimiento más cortos en regiones propensas a las heladas para mitigar los efectos adversos de este tipo de eventos climáticos. Entre los diversos tipos de daño por heladas, las temperaturas entre 0 y -2°C causan amarillamiento del follaje y quemaduras localizadas, sin afectar el tallo principal. Cuando las temperaturas oscilan entre -2 y $-3,5^{\circ}\text{C}$, el follaje se daña por completo, provocando lesiones en el tallo principal y ennegrecimiento del tejido (Romero *et al.*, 2009). Entre $-3,5$ y -6°C , se produce la destrucción total del follaje, así como daño severo del tallo principal y los brotes, y necrosis en las regiones apicales del tallo. Por debajo de -6°C , la destrucción es completa, afectando el follaje, el tallo principal y más de seis brotes y entrenudos (Romero *et al.*, 2009). Además, el estrés por frío reduce el contenido de clorofila, lo que conduce a una menor eficiencia fotosintética, con efectos más severos observados en genotipos sensibles (Härter *et al.*, 2023).

En Tucumán, la principal región productora de caña de azúcar en Argentina, las heladas son un factor importante que afecta la recuperación de azúcar durante el procesamiento industrial. La gravedad del daño inducido por las heladas en la caña de azúcar está determinada tanto por la temperatura como por la duración de la exposición, con un mayor deterioro cuando los eventos de heladas son seguidos por condiciones cálidas y húmedas que promueven el crecimiento microbiano. En general, la caña de azúcar afectada por heladas severas produce jugo con menor pureza, mayor acidez y concentraciones anormales de polisacáridos (Eggleston *et al.*, 2004).

Diversas estrategias de manejo pueden mitigar las pérdidas de sacarosa causadas por este evento climático, entre ellas el uso de cultivares de maduración temprana y/o con mayor tolerancia al deterioro post-helada, la aplicación de maduradores químicos para acelerar la acumulación de sacarosa y la coordinación eficiente de las operaciones de cosecha y molienda, priorizando las áreas más afectadas. En este contexto, un objetivo clave del Programa de Mejoramiento Genético de la Caña de Azúcar en la Estación Experimental Agroindustrial Obispo

Colombres (PMGCA-EEOC) es el desarrollo de nuevas variedades "TUC" de maduración temprana, cruciales en las regiones más propensas a heladas. Estos cultivares permiten la acumulación de sacarosa antes del inicio del período de bajas temperaturas, a diferencia de los cultivares de maduración intermedia o tardía que aún estarían en fases de crecimiento activo y serían más vulnerables a las pérdidas de rendimiento y calidad. Dado este escenario, el PMGCA-EEOC tiene un gran interés en caracterizar el comportamiento de las principales variedades TUC, que actualmente ocupan el 30,3% del área cultivada con caña de azúcar (Henriquez *et al.*, 2023), a fin de generar información valiosa para optimizar las estrategias de manejo y cosecha. Por ello, el objetivo de este estudio fue evaluar la respuesta al deterioro posterior a una helada de las cinco variedades de caña de azúcar TUC más cultivadas.

■ MATERIALES Y MÉTODOS

Variedades evaluadas

El estudio incluyó cinco variedades de maduración temprana: TUC 95-10, TUC 03-12, TUC 06-7, TUC 02-22 y TUC 00-65. Se usaron como controles LCP 85-384, una variedad de maduración temprana con buen comportamiento frente a las heladas, y TUCCP 77-42, de maduración intermedia y con pobre desempeño frente a las heladas.

Implementación del ensayo de campo

Se evaluaron dos ensayos experimentales, en su segunda soca, establecidos en áreas propensas a heladas de Tucumán, Argentina: Los Quemados (departamento Leales) y Santa Ana (departamento Río Chico). Ambos fueron implantados bajo un diseño en bloques completos al azar (DBCA), con tres repeticiones. Cada parcela estuvo conformada por tres surcos de 10 m de longitud, con un espaciamiento de 1,60 m entre sí. Para garantizar la ausencia de enfermedades sistémicas, se empleó caña semilla obtenida a partir de vitroplantas.

Muestreo y evaluación de parámetros relacionados con las heladas

Entre el 15 de mayo y el 17 de octubre de 2024 se realizaron muestreos quincenales en ambos sitios experimentales. Cada muestra estuvo compuesta por 10 tallos limpios, pelados y despuntados en su punto natural de quiebre. El material se procesó inmediatamente, sin almacenamiento previo, a fin de evitar que factores externos afectaran la calidad de la materia prima. Las determinaciones se llevaron a cabo en el Laboratorio de Química de la EEAOC, donde se cuantificó el contenido de sacarosa en el jugo (g de sacarosa en 100 g de jugo) mediante cromatografía líquida de alta resolución (HPLC).

Datos meteorológicos

Los datos meteorológicos utilizados para el balance hídrico secuencial y el análisis de la duración e intensidad de las heladas se obtuvieron de las estaciones meteorológicas automáticas ubicadas en Santa Ana y Los Quemados (Tucumán, Argentina). Estas estaciones proporcionan registros cada 15 minutos. Para este estudio se utilizaron las series de datos correspondientes al período de febrero a octubre de 2024.

Análisis de datos

A partir del primer evento de helada registrado, se modeló el contenido de sacarosa de siete variedades de caña de azúcar a lo largo de ocho fechas de muestreo comprendidas entre julio y octubre de 2024. Este enfoque permitió identificar diferencias varietales en la reducción de sacarosa durante el período de evaluación, así como estimar las fechas críticas en las que se produjeron cambios significativos en las tasas de disminución. El análisis de datos se efectuó utilizando el software Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2020). Se ajustó un modelo de regresión no lineal de dos tramos (Ostengo, 2020). En este modelo, la relación entre el contenido de sacarosa (y = sacarosa g/100g) y el tiempo (x = fecha de muestreo) cambia de una fase de declive lineal inicial a una fase subsiguiente con una tasa de declive diferente, representado por:

$$Sacarosa (g/100g) = \alpha + (\beta_1 * x) * (x < \gamma) + [\beta_1 * \gamma + \beta_2 * (x - \gamma)] * (x \geq \gamma) + \varepsilon$$

Donde:

α representa la intersección del primer segmento, un parámetro relacionado con el valor inicial de sacarosa de cada variedad a partir de la primera fecha de helada (segunda quincena de julio).

β_1 corresponde a la pendiente del primer segmento y describe la tasa inicial de pérdida de sacarosa en función del tiempo x (código de la fecha de muestreo).

β_2 es la pendiente del segundo segmento y representa la tasa final de pérdida de sacarosa a lo largo del tiempo.

γ indica el punto de inflexión a partir del cual cambia la tasa de disminución.

ε es el término de error aleatorio, con media cero y varianza σ^2 .

RESULTADOS

La primera helada significativa ocurrió el 11 de julio de 2024, con una intensidad moderada en Los Quemados

(-3,5 °C durante 8 h) y una intensidad severa en Santa Ana (-4,2 °C durante 10 h). Este evento marcó el comienzo de una serie de heladas consecutivas, con temperaturas mínimas que oscilaron entre -2 °C y -4 °C y duraciones prolongadas, que se extendieron hasta mediados de julio. Posteriormente, los eventos de heladas continuaron con menor intensidad hasta el 10 de agosto, con temperaturas mínimas alrededor de -2 °C y duraciones más cortas (Figura 1).

Entre febrero y octubre, se observaron diferencias en la disponibilidad hídrica entre los sitios evaluados. Por ello, para obtener el balance hídrico secuencial, se partió de los siguientes supuestos: un contenido de agua disponible uniforme de 300 mm en ambos sitios y una profundidad efectiva del suelo de 1 m. La evapotranspiración de referencia (ET_0) se estimó con base en la radiación solar, la temperatura del aire, la humedad relativa y la velocidad del viento, aplicando correcciones del coeficiente de cultivo (K_c). Los valores de precipitación no se ajustaron mediante un factor de eficiencia. Como resultado, Santa Ana presentó un mayor almacenamiento promedio de agua en el suelo (152,3 mm) y un déficit de humedad del suelo menos pronunciado (-125 mm) en comparación con Los Quemados (137,1 mm y -180 mm, respectivamente).

Basado en la fecha de la primera helada registrada, se realizó un análisis de regresión no lineal para modelar el comportamiento de siete variedades de caña de azúcar en base al porcentaje de sacarosa, en ambas localidades evaluadas. Utilizando los parámetros determinados, se trazó la curva de regresión no lineal para cada variedad en cada ensayo.

En Los Quemados, LCP 85-384 exhibió 17,42% de sacarosa el día 0 después de la helada, con la tasa inicial de disminución más baja ($\beta_1 = -0,03$) que no fue estadísticamente significativa ($p = 0,880$), lo que refleja su notable estabilidad durante las primeras etapas del ciclo posterior a la helada (Tabla 1). Por el contrario, TUCCP 77-42 mostró el valor de sacarosa más bajo el día 0 después de la helada (16,64%), con la tasa inicial de disminución

Tabla 1. Parámetros estimados mediante análisis de regresión no lineal para modelar el comportamiento de siete variedades de caña de azúcar según el porcentaje de sacarosa en ocho fechas de muestreo, de julio a octubre de 2024, durante las cuales se registraron heladas. Ubicación: Los Quemados, departamento Leales, Tucumán, Argentina.

Variedad	α^1	β_1^2 (P-valor)	γ^3	β_2^4 (P-valor)
LCP 85-384	17,42	-0,03 (0,880)	4,25	-1,53 (0,019)
TUCCP 77-42	16,64	-0,85 (0,004)	5,76	-2,77 (0,027)
TUC 95-10	17,19	-0,34 (0,041)	4,62	-1,52 (0,004)
TUC 03-12	17,33	-0,12 (0,728)	3,82	-2,10 (0,003)
TUC 06-7	17,18	-0,22 (0,186)	5,65	-3,18 (0,018)
TUC 02-22	19,18	-0,53 (0,056)	4,00	-1,81 (0,009)
TUC 00-65	17,38	-0,64 (0,043)	3,93	-1,46 (0,003)

¹: contenido de sacarosa (%) a inicio de cosecha, ²: tasa de acumulación de sacarosa durante la etapa inicial post helada, ³: momento del tiempo en el ocurre un cambio significativo en la tasa de acumulación de sacarosa, ⁴: tasa de acumulación de sacarosa al final de cosecha. El parámetro γ es expresado como días transcurridos después de la primera helada registrada (donde 0 = día de la primera helada registrada y 7 = 96 días después de la primera helada).

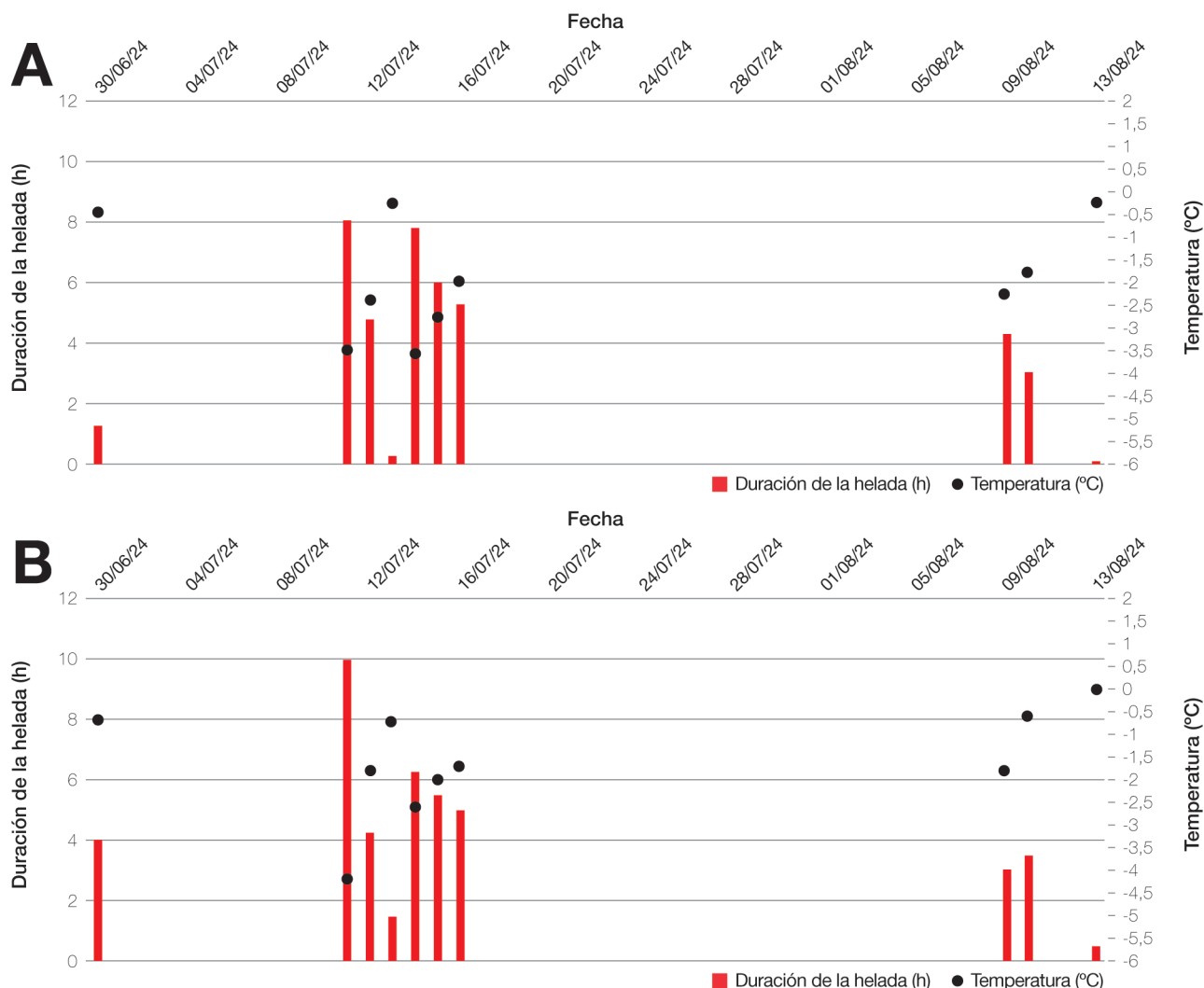


Figura 1. Temperaturas mínimas y su duración en (A) Los Quemados, Leales, y (B) Santa Ana, Río Chico (Tucumán, Argentina), durante la temporada 2024.

más alta ($\beta_1 = -0,85$; $p = 0,004$), lo que indica una pérdida abrupta de sacarosa desde el principio.

Las variedades TUC mostraron valores de sacarosa similares a LCP 85-384 el día 0 después de la helada (Tabla 1), con excepción de TUC 02-22, que alcanzó valores más altos (19,18%). Con respecto a la tasa inicial de disminución, TUC 03-12 y TUC 06-7 exhibieron los valores más bajos, y estas disminuciones no fueron estadísticamente significativas (Tabla 1), lo que demuestra una notable estabilidad al comienzo del ciclo. TUC 95-10 mostró una tasa inicial de disminución intermedia y significativa. TUC 02-22 y TUC 00-65 exhibieron las tasas iniciales más altas de disminución de sacarosa, ambas estadísticamente significativas, aunque aún más bajas que TUCCP 77-42.

LCP 85-384 mostró un punto de inflexión moderado ($y = 4,25$), manteniendo una baja pérdida de sacarosa hasta 57 días después de la helada (Figura 2B); su tasa de disminución final fue significativa ($\beta_2 = -1,53$; $p = 0,019$), lo que indica una marcada reducción después del punto de inflexión. Con respecto a TUCCP 77-42, aunque su punto de inflexión fue posterior ($y = 5,76$; 78 días después de la helada) (Figura 2C), la pérdida de sacarosa se intensifica aún más después de este punto debido a su alta y sig-

nificativa tasa de disminución final ($\beta_2 = -2,77$; $p = 0,027$). Estas características la posicionan como la variedad más susceptible a las heladas.

Entre las variedades TUC evaluadas, TUC 03-12, TUC 00-65 y TUC 02-22 exhibieron puntos de inflexión tempranos, hasta 54 días después de la helada (Figuras 2E, 2H y 2G); mientras que TUC 95-10 mostró un punto de inflexión intermedio (Figura 2D), lo que refleja una pérdida de sacarosa controlada en las primeras etapas, y TUC 06-7 tuvo un punto de inflexión tardío, lo que indica una notable estabilidad (Figura 2F).

Con respecto a la tasa final de disminución de sacarosa (β_2), TUC 06-7 mostró una caída brusca y significativa en el contenido de sacarosa después del punto de inflexión (Tabla 1, Figura 2F), seguida por TUC 03-12 (Tabla 1, Figura 2E) y TUC 02-22 (Tabla 1, Figura 2G), mientras que TUC 95-10 (Tabla 1, Figura 2D) y TUC 00-65 (Tabla 1, Figura 2H) exhibieron valores de β_2 significativos similares a LCP 85-384.

En el ensayo de Santa Ana, LCP 85-384 exhibió un contenido de sacarosa de 18,50% el día 0 después de la helada, mostrando un comportamiento similar al observado en Los Quemados, con una baja tasa de disminución inicial ($\beta_1 = -0,17$), que no fue estadísticamente

significativa, lo que indica estabilidad durante las primeras etapas (Tabla 2). TUCCP 77-42 comenzó con el contenido de sacarosa más bajo (16,95%); sin embargo, a diferencia de Los Quemados, exhibió una tasa de disminución inicial moderada pero estadísticamente significativa, lo que resultó en una menor pérdida de sacarosa en comparación con esa localidad (Tabla 2). Las variedades TUC 95-10 y TUC 03-12 mostraron valores de sacarosa similares a LCP 85-384 el día 0 después de la helada (Tabla 2), excepto TUC 02-22, que alcanzó valores más altos (19,53%), y TUC 06-7, que tuvo valores más bajos (17,94%) (Tabla 2). Con respecto a la tasa de disminución inicial de sacarosa, las variedades TUC 95-10, TUC 06-7 y TUC 03-12 exhibieron valores bajos y no significativos (Tabla 2), lo que demuestra una notable estabilidad al comienzo del ciclo.

LCP 85-384 presentó un punto de inflexión temprano ($y=4,00$; 54 días después de la helada), después del cual la pérdida de sacarosa se aceleró ligeramente ($\beta_2=-0,89$; $p=0,039$), lo que señala un comportamiento relativamente estable bajo condiciones de heladas (Figura 3B). En el caso de TUCCP 77-42, se observó un punto de inflexión intermedio ($y=4,68$; 63 días después de la helada), con una tasa de disminución final moderadamente alta que fue significativa, lo que sugiere una respuesta menos favorable (Tabla 2) (Figura 3C). De las variedades TUC evaluadas, TUC 06-7, TUC 95-10, TUC 03-12 y TUC 02-22 mostraron puntos de inflexión que ocurrieron entre 63 y 81 días después de la helada (Figuras 3F, D, E y G).

En cuanto a la tasa de disminución final de sacarosa (β_2), TUC 02-22 exhibió el valor más alto y significativo (Tabla 2; Figura 3G), lo que refleja una pérdida acelerada de sacarosa después de su punto de inflexión, seguida por TUC 03-12 (Figura 3E), TUC 95-10 (Figura 3D) y TUC 06-7 (Figura 3F), todas las cuales fueron significativas (Tabla 2). La variedad TUC 02-22 estaba caída al momento del muestreo, lo que probablemente afectó su resistencia al daño por heladas. La caña caída es más susceptible al daño por heladas, ya que las temperaturas cerca del suelo son más bajas (Romero *et al.*, 2009).

Tabla 2. Parámetros estimados mediante análisis de regresión no lineal para modelar el comportamiento de siete variedades de caña de azúcar en función del porcentaje de sacarosa en ocho fechas de muestreo, de julio a octubre de 2024, durante las cuales se registraron heladas. Ubicación: Santa Ana, departamento Río Chico, Tucumán, Argentina.

Variedad	α^1	β_1^2 (P-valor)	γ^3	β_1^4 (P-valor)
LCP 85-384	18,50	-0,17 (0,599)	4,00	-0,89 (0,039)
TUCCP 77-42	16,95	-0,27 (0,050)	4,68	-1,05 (0,012)
TUC 95-10	18,18	-0,11 (0,618)	4,63	-1,38 (0,035)
TUC 03-12	18,49	-0,07 (0,653)	4,82	-1,40 (0,015)
TUC 06-7	17,94	-0,02 (0,981)	5,29	-0,76 (0,014)
TUC 02-22	19,53	-0,68 (0,004)	5,96	-3,69 (0,006)

¹: contenido de sacarosa (%) a inicio de cosecha, ²: tasa de acumulación de sacarosa durante la etapa inicial post helada, ³: momento del tiempo en el ocurre un cambio significativo en la tasa de acumulación de sacarosa, ⁴: tasa de acumulación de sacarosa al final de cosecha. El parámetro γ es expresado como días transcurridos después de la primera helada registrada (donde 0 = día de la primera helada registrada y 7 = 96 días después de la primera helada).

En el presente estudio, tanto el control LCP 85-384 como las variedades TUC de maduración temprana mostraron generalmente una menor disminución inicial de sacarosa (valores de β_1), en comparación con el control TUCCP 77-42, particularmente en la localidad de Los Quemados, donde el daño por heladas fue más severo. Esta observación apoya la hipótesis de que la maduración temprana puede ayudar a mitigar el impacto inmediato de las heladas. Sin embargo, es importante señalar que, a pesar de su clasificación como de maduración temprana, todas las variedades TUC exhibieron una disminución final significativa en el contenido de sacarosa (valores de β_2). Esto sugiere que, una vez que el tejido de la caña de azúcar sufre estrés por heladas, se inicia un proceso de deterioro irreversible que causa la pérdida progresiva de sacarosa.

La variedad TUCCP 77-42 mostró una mayor susceptibilidad al estrés, especialmente en Los Quemados, donde la disminución inicial de sacarosa fue abrupta, lo que concuerda con lo esperado para una variedad de maduración intermedia. Sin embargo, su comportamiento en Santa Ana fue diferente: exhibió una pérdida inicial de sacarosa moderada, lo que sugiere que factores ambientales, como la mayor disponibilidad de agua, pueden mitigar el impacto de su grupo de madurez.

Las condiciones ambientales, particularmente la disponibilidad de agua, parecieron influir en el rendimiento varietal entre las localidades. Si bien la intensidad de la helada se clasificó como moderada en Los Quemados y severa en Santa Ana, la pérdida de sacarosa posterior a la helada fue más pronunciada en Los Quemados para la mayoría de las variedades (tanto en las etapas iniciales como finales, con pendientes de β_2 más pronunciadas). Esta aparente contradicción puede explicarse por el estado hídrico contrastante observado en ambos sitios. De febrero a octubre de 2024, Los Quemados experimentó balances hídricos negativos recurrentes y un menor almacenamiento de agua en el suelo, particularmente durante el período crítico posterior a la helada (julio a septiembre), lo que sugiere la presencia de estrés hídrico. Con respecto a Santa Ana, mantuvo un mayor almacenamiento de agua en el suelo y menos déficits hídricos durante el mismo período.

La combinación de una intensidad de helada moderada y un déficit de agua sostenido en Los Quemados puede haber exacerbado el daño, lo que llevó a una degradación acelerada de la sacarosa. Por el contrario, las condiciones más húmedas en Santa Ana podrían haber amortiguado el impacto fisiológico de la helada, lo que resultó en menores pérdidas de sacarosa, incluso bajo condiciones de heladas severas. El control susceptible TUC-CP 77-42 ofrece un claro ejemplo de esta interacción entre la disponibilidad de agua y la respuesta a las heladas. En Los Quemados, TUCCP 77-42 mostró una marcada disminución inicial de sacarosa ($\beta_1=-0,85$) y una alta tasa final de pérdida de sacarosa ($\beta_2=-2,77$) (Tabla 1), lo que refleja su vulnerabilidad en condiciones combinadas de heladas y estrés hídrico. Sin embargo, en Santa Ana, a pesar de la mayor intensidad de la helada, la misma variedad presentó una disminución inicial de sacarosa considerablemente menor ($\beta_1=-0,27$) y una menor tasa de pérdida de sacarosa final ($\beta_2=-1,05$) (Tabla 2).

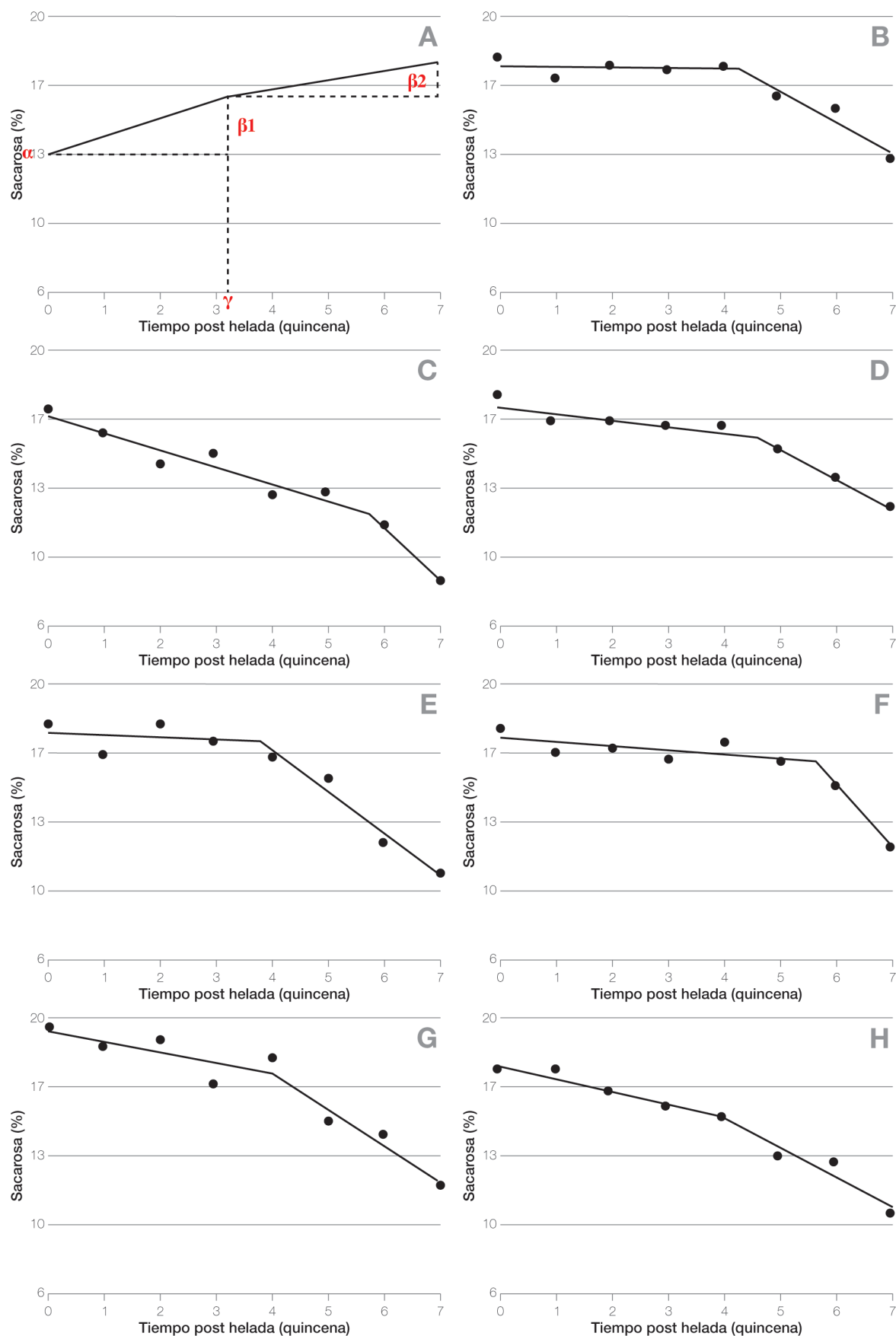


Figura 2. Cambios en el contenido de sacarosa (%) en variedades de caña de azúcar en edad soca 2 durante la temporada 2024, analizados a partir de la primera helada registrada. Los Quemados, Departamento de Leales, Tucumán, Argentina. (A) Modelo gráfico, (B) LCP 85-384, (C) TUCCP 77-42, (D) TUC 95-10, (E) TUC 03-12, (F) TUC 06-7, (G) TUC 02-22 y (H) TUC 00-65.

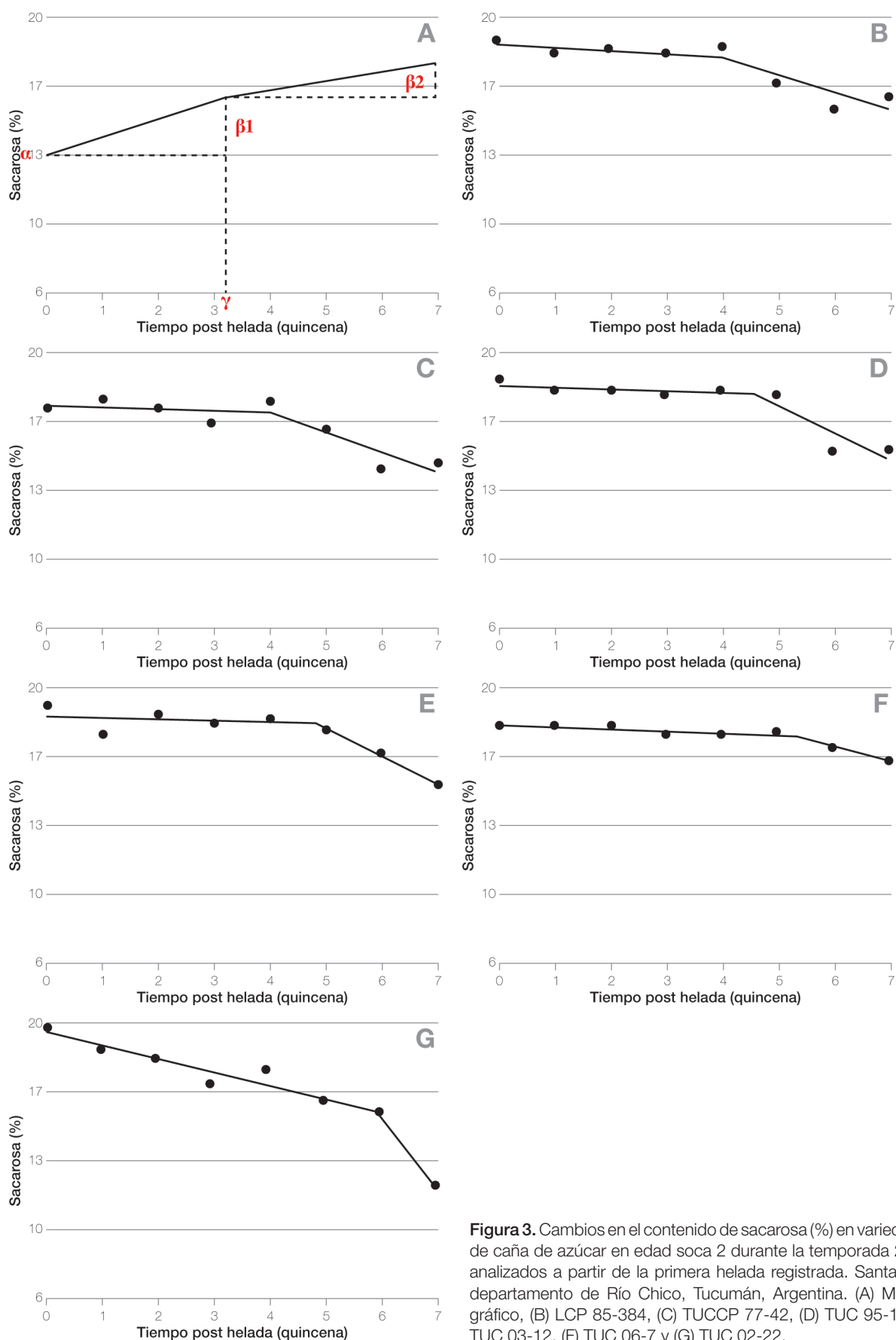


Figura 3. Cambios en el contenido de sacarosa (%) en variedades de caña de azúcar en edad soca 2 durante la temporada 2024, analizados a partir de la primera helada registrada. Santa Ana, departamento de Río Chico, Tucumán, Argentina. (A) Modelo gráfico, (B) LCP 85-384, (C) TUCCP 77-42, (D) TUC 95-10, (E) TUC 03-12, (F) TUC 06-7 y (G) TUC 02-22.

CONCLUSIONES

El comportamiento diferencial de las variedades frente a las heladas evidenció que la madurez temprana y la estabilidad inicial dada por la tasa inicial de disminución son factores clave para mitigar la pérdida de sacarosa. Las respuestas observadas sugieren que la selección varietal y el momento de cosecha deben adaptarse al contexto ambiental de cada zona productora.

LCP 85-384, confirmó su valor como referencia de estabilidad bajo frío, manteniendo niveles de sacarosa consistentes incluso en condiciones contrastantes. TUC 06-7 se destacó por su estabilidad y punto de inflexión tardío, lo cual sugiere una ventana de cosecha más extensa. TUC 95-10 mostró un comportamiento equilibrado, adecuado para cosechas intermedias. TUC 03-12 demostró una excelente estabilidad inicial. Sin embargo, su punto de inflexión temprano, observado particularmente en Los Quemados, resalta la necesidad de un momento óptimo de cosecha para maximizar la recuperación de sacarosa después de la helada. TUC 02-22 se caracterizó por su elevado contenido inicial de sacarosa, que actuó como un amortiguador parcial frente al impacto de las heladas, permitiéndole conservar niveles aceptables en las etapas tempranas del ciclo. No obstante, esta ventaja inicial se diluyó rápidamente debido a su alta tasa de pérdida posterior, lo que redujo su estabilidad bajo frío. Este desempeño fue notablemente inferior en Santa Ana, probablemente debido al vuelco observado. Por lo tanto, es crucial reevaluar su performance en condiciones de cultivo normales, aunque su comportamiento sugiere que una cosecha temprana es altamente recomendable para capitalizar su buen contenido inicial de sacarosa. TUC 00-65 en Los Quemados mostró una rápida pérdida inicial de sacarosa bajo condiciones de heladas, pero aún con mejor desempeño que TUCCP 77-42. No pudo evaluarse en Santa Ana, por lo que se necesitan más ensayos para una caracterización más precisa. Sin embargo, su comportamiento sugiere considerar una cosecha temprana en condiciones de heladas. TUCCP 77-42, el control susceptible, ratificó su alta sensibilidad al frío, reafirmando su carácter inadecuado para zonas con heladas recurrentes.

En conclusión, estos resultados preliminares proporcionan información importante sobre la respuesta de las variedades de caña de azúcar al estrés por heladas; no obstante, se requiere continuar con ensayos adicionales bajo estas condiciones para una caracterización precisa. Este análisis, además, destaca la importancia de adaptar las estrategias de manejo y cosecha de acuerdo con las condiciones locales, para optimizar el rendimiento y la calidad de la materia prima para la industria.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Di Rienzo, J. A.; F. Casanoves; M. G. Balzarini; L. Gonzalez; M. Tablada y C. W. Robledo. 2020. InfoStat versión 2020.** Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. <http://www.infostat.com.ar>.
- Eggleston, G.; B. L. Legendre and T. R. C. Tew. 2004.** Indicators of freeze-damaged sugarcane varieties which can predict processing problems. *Food Chemistry* 87: 119-133.
- Härter, A.; W. Rodrigues Antunes; A. A. Campos de Azeredo; S. D. dos A. e Silva and R. A. de Oliveira. 2023.** Early screening for cold tolerance in sugarcane breeding. *Pesquisa Agropecuária Brasileira* 58, e02711.
- Henriquez, D. D.; P. Medina; M. Aybar Guchea et al. 2023.** Relevamiento de la distribución varietal y del uso de otras tecnologías en el cultivo de caña de azúcar en la provincia de Tucumán: campaña 2022/2023. Reporte Agroindustrial EEAOC 314.
- Ostengo, S. 2020.** Aproximaciones metodológicas para la caracterización de la calidad industrial de genotipos de caña de azúcar. Tesis Doctoral inédita. Universidad Nacional de Tucumán, Tucumán, Argentina.
- Romero, E. R.; P. A. Digonzelli; M. J. Tonatto et al. 2009.** Heladas. Efecto sobre los cañaverales y alternativas de manejo. En: Romero, E. R.; P. A. Digonzelli y J. Scandaliaris (eds.), *Manual del Cañero*, EEAOC, Argentina, pp. 197-206.