



Revista Industrial
y Agrícola de
Tucumán

ISSN 0370-5404

Tomo 102 (2) | 2025



ESTACION EXPERIMENTAL
AGROINDUSTRIAL
OBISPO COLOMBRES
Tucumán | Argentina



Autoridades EEAOC

Presidente

Ing. Agr. Roberto Sánchez Loria

Vicepresidente

Lic. Sebastián Budeguer

Vocales

Ing. Agr. José Ignacio Lobo Viaña

Ing. Agr. Francisco J. Estrada

Dn. Luis Fernando Umana

Dn. Pablo José Padilla

Dn. Juan Carlos Crovella

Dn. José Antonio Linares

Mg. Lic. Catalina Rocchia Ferro

Ing. Bernabé Oscar Alzabé

Director Técnico

Dr. Hernán Salas López

Directores Asistentes:

Tecnología Agropecuaria

Dr. Santiago Ostengo

Tecnología Industrial

Ing. Qco. Roberto Marcelo Ruiz

Administración y Servicios

C.P.N. Mariana Barraquero

Recursos Humanos

Lic. José D. Rodríguez Domato

Editor Responsable

Dr. Hernán Salas López

Editora de contenidos

Dra. M. Francisca Perera

Comisión asesora

Dra. Andrea N. Peña Malavera

Mg. Ing. Federico Franck Colombres

Responsable Técnico OJS

Ing. Jorge Poch

Ing. César Filippone

Arte, diseño y diagramación

Diego Lobo

Corrección

Prof. en Letras Ernesto Klass

Difusión

D.G. Silvio César Salmoiraghi

Coordinadora de Publicaciones

Ing. Agr. Victoria González



Tomo 102 (2):
2025

ISSN
0370-5404

En línea
1851-3018

Revista Industrial y Agrícola de Tucumán

EEAOC

	Pag
Validación de una metodología para el análisis de residuos de atrazina y clorpirifos en suelo	3
Ajustes de la tasa de aplicación fitosanitaria en limón (<i>Citrus limon</i>) a partir de la información generada por drones	13
Aplicación de giberelina con adición de urea para retrasar el color de los frutos de limón (<i>Citrus limon</i>)	22
Gasificación de residuos de cosecha como alternativa energética sostenible en la industria sucroalcoholera de Tucumán, Argentina	28
Precisión de la selección genómica en poblaciones del programa de mejoramiento de caña de azúcar de la EEAOC	34
Índice de selección basado en compuestos no-azúcares del jugo de caña de azúcar	41
El rol crucial del Programa de Mejoramiento Genético de la EEAOC: diversificación varietal en el área cañera de Tucumán, Argentina en los últimos 10 años	47
Mapeo asociativo y localización de marcadores moleculares ligados a la resistencia a roya marrón de caña de azúcar	51
Huella hídrica del cultivo de caña de azúcar en la provincia de Tucumán, Argentina*	56



ESTACION EXPERIMENTAL
AGROINDUSTRIAL
OBISPO COLOMBRES
Tucumán | Argentina

Av. William Cross 3150
T4101XAC | Las Talitas
Tucumán | Argentina
Tel: (54 381) 452 1000
Fax: (54 381) 452 1008
direcc@eeaoc.org.ar
www.eeaoc.org.ar



Agradecimiento a los árbitros

RIAT 102 (2) - 2025

El Editor Responsable de la Revista Industrial y Agrícola de Tucumán agradece especialmente a los siguientes especialistas, consultados en la evaluación de los trabajos publicados en el presente tomo.

Dra. Ing. Virginia Aparicio

Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). [CCT MAR DEL PLATA] Centro Científico Tecnológico - Mar del Plata, Buenos Aires. R. Argentina.

Dra. Ing. Agr. Lorena Sendín

Instituto de Tecnología Agroindustrial del Noroeste Argentino (ITANOA). Tucumán, R. Argentina.

Dr. Cs. Biol. O. Roque Interdonato

Universidad Nacional de Tucumán. Facultad de Agronomía, Zootecnia y Veterinaria (FAZ y V). Tucumán, R. Argentina.



Revista Industrial
y Agrícola de
Tucumán



ESTACION EXPERIMENTAL
AGROINDUSTRIAL
OBISPO COLOMBRES
Tucumán | Argentina

Periodicidad

La Revista Industrial y Agrícola de Tucumán edita un volumen por año, en dos fascículos semestrales ocasionalmente incluidos en un solo número.

Se distribuye en su sitio web: <https://publicaciones.eeaoc.gob.ar/index.php/riat/index>

E-mail: publicaciones-ojs@eeaoc.org.ar

Tel.: +54 381 452 1000 (Int.) 256 – CP 4101

Las Talitas – Tucumán, Argentina – CC N° 9

<https://www.eeaoc.gob.ar>



Revista Industrial
y Agrícola de
Tucumán

ISSN 0370-5404

En línea
1851-3018

Tomo 102 (2):
3-12; 2025



ESTACION EXPERIMENTAL
AGROINDUSTRIAL
OBISPO COLOMBARES
Tucumán | Argentina

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

Validación de una metodología para el análisis de residuos de atrazina y clorpirifos en suelo

Marina Lacina *, Norma Kamiya *, Walter D. Machado ** y Álvaro Bravo***

*Sección Química, EEAOC; **Sección Ingeniería y Proyectos Industriales, EEAOC; ***Facultad de Ciencias Exactas e Ingeniería, UNT. Email: mlacina@eeaoc.org.ar

RESUMEN

El uso de agroquímicos para el control de plagas en los cultivos puede conducir a la contaminación de los suelos con sus residuos. En la provincia de Tucumán, el principal cultivo es la caña de azúcar, en el cual se utiliza atrazina como herbicida pre y post emergente para el control de gramíneas y hojas anchas. Clorpirifos, por su parte, es un insecticida cuyo uso no está permitido en Argentina desde el año 2023. Sin embargo, dadas sus características fisicoquímicas, es persistente en el ambiente y por lo tanto, es posible que aún se encuentren residuos a niveles traza en suelos agrícolas con historial de uso de este insecticida. El objetivo de este trabajo fue el desarrollo y validación de un método para la determinación simultánea de atrazina, sus metabolitos desetil atrazina (DEA) y desisopropil atrazina (DIA), y de clorpirifos en muestras de suelo de uso agrícola, con el fin de contar con un método validado para evaluar posteriormente la degradación de estos compuestos en suelo y en lechos biológicos. La detección y cuantificación se llevó a cabo por cromatografía gaseosa (GC) con detector de masas simple cuadrupolo (CG-MSD). La extracción de los plaguicidas se basó en el método de QuEChERS original, empleando acetato de etilo como solvente de extracción. Se evaluaron límites de detección y de cuantificación, linealidad, reproducibilidad e incertidumbre. El método validado resultó adecuado para la determinación de residuos de los plaguicidas seleccionados, obteniéndose valores aceptables de los parámetros evaluados, en el rango de concentraciones de $0,020 \text{ mg kg}^{-1}$ a 20 mg kg^{-1} (atrazina, desetil atrazina y clorpirifos) y de $0,050 \text{ mg kg}^{-1}$ a 20 mg kg^{-1} (desisopropil atrazina). Estos valores son adecuados para los fines de esta validación y comparables con los de otros autores. Se comprobó que el método es también adecuado para otras matrices como compost de citrus.

Palabras clave: agroquímicos, desetil atrazina, desisopropil atrazina, plaguicidas, CG-MSD.

ABSTRACT

Validation of a methodology for the analysis of atrazine and chlorpyrifos residues in soil

The use of agrochemicals for pest control on crops can lead to soil contamination with residues. In the province of Tucumán, the main crop is sugarcane, where atrazine is used as a pre- and post-emergence herbicide to control grasses and broadleaf weeds. Chlorpyrifos is an insecticide whose use has been prohibited in Argentina since 2023. However, given its physicochemical characteristics, it is persistent in the environment; therefore, trace levels of residues may still be found in agricultural soils with a history of use of this insecticide. The objective of this study was to develop and validate a method for the simultaneous determination of atrazine, its metabolites desethyl atrazine (DEA) and desisopropyl atrazine (DIA), and chlorpyrifos in agricultural soil samples. This method was used to subsequently evaluate the degradation of these compounds in soil and biobeds. Detection and quantification were carried out by gas chromatography (GC) with a single quadrupole mass detector (GC-MSD). Pesticide extraction was based on the original QuEChERS method, using ethyl acetate as the extraction solvent. Limits of detection and quantification, linearity, reproducibility, and uncertainty were evaluated. The validated method was suitable for determining residues of the selected pesticides, yielding acceptable values for the parameters evaluated, in the concentration range of 0.020 mg kg^{-1} (atrazine, desethyl atrazine and chlorpyrifos) and 0.050 mg kg^{-1} to 20 mg kg^{-1} (desisopropyl atrazine). These values are adequate for the purposes of this validation and comparable with those of

Fecha de
recepción:
20/05/2025

Fecha de
aceptación:
04/09/2025

other authors. The method was also found to be suitable for other matrices such as citrus compost.

Key words: agrochemicals, desethyl atrazine, deisopropyl atrazine, pesticides, GC-MSD.

INTRODUCCIÓN

La atrazina (6-cloro-N-etil-N'-(1-metiletil)-triazina-2,4-diamina) es uno de los herbicidas clorados más ampliamente utilizados en la agricultura (Hayes *et al.*, 2002; Lassere *et al.*, 2008). En los últimos años, varios estudios han demostrado un peligro potencial de su uso tanto para la salud ambiental como la humana. Es un herbicida sistémico selectivo autorizado en Argentina para el control de malezas en cultivos de maíz, sorgo granífero, caña de azúcar y té, entre otros. Se lo considera un potencial contaminante debido a sus características físicoquímicas, con una vida media de varios días a meses, dependiendo de las características del suelo y las prácticas agrícolas utilizadas. El compuesto original y sus metabolitos se han detectado en suelos y aguas superficiales y subterráneas, siendo prohibido su uso en algunos países de Europa, y restringido en otros, considerándolo altamente contaminante del agua potable (Candela, 2016).

En la provincia de Tucumán, la atrazina (ATZ) es empleada comúnmente en el control de malezas durante la brotación y el macollaje de la caña de azúcar. Estas fases se extienden desde octubre hasta mediados de enero, con variaciones de acuerdo a las condiciones ambientales y de manejo. Además del cultivo de caña de azúcar, en el centro-oeste de la provincia también se cultiva maíz y soja con sucesión de trigo.

La azucarera fue la primera industria pesada de toda la Argentina y es la actividad agroindustrial más importante de la provincia, responsable del 65% del azúcar

producido en el país. En el cultivo de la caña de azúcar se emplea ATZ como herbicida pre y post emergente para el control de gramíneas y hojas anchas. Su uso está registrado en Argentina y autorizado por el SENASA, con un Límite Máximo de Residuo (LMR) de 0,25 mg kg⁻¹.

En esta provincia se estudió el impacto de veintinueve plaguicidas sobre la calidad del agua superficial de la sub cuenca del arroyo Mista. La atrazina fue el plaguicida más detectado, con una frecuencia de detección del 40% y un registro máximo de 0,324 µg L⁻¹ (De Gerónimo *et al.*, 2014). Portocarrero *et al.* (2018), investigadora del INTA, relevó en su tesis doctoral las concentraciones de ATZ en el agua superficial de los arroyos Mista y Saladillo, pertenecientes a la cuenca del río Salí, al este del sector cañero de la provincia (departamentos Cruz Alta y Leales). Se detectó este herbicida en el 100% de las muestras, con concentraciones mínimas y máximas de 0,0004 µg L⁻¹ y 0,4 µg L⁻¹, respectivamente.

Considerando su toxicidad, el uso generalizado y la estabilidad relativamente alta en el agua y el suelo (Chowdhury *et al.*, 2021; Reinhardt *et al.*, 1990; Rostami *et al.*, 2021; Schwab *et al.*, 2006), resulta indispensable contar con un método de análisis de atrazina y sus metabolitos principales de degradación biológica (desetil atrazina y desisopropil atrazina) (Figura 1) que sea confiable, rápido y sencillo de implementar, a fin de poder monitorear la presencia de este herbicida en suelos. Por otro lado, clorpirifos es un insecticida y acaricida organofosforado (Figura 1) de amplio espectro. Tras una revisión integral de antecedentes científicos sobre los riesgos para la

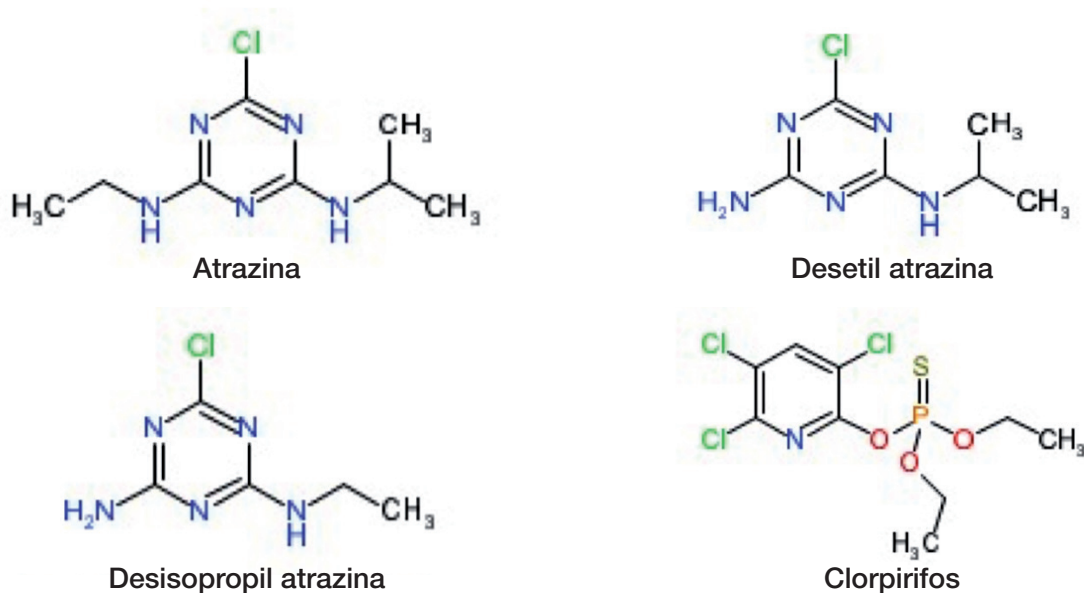


Figura 1. Estructura química de atrazina, sus metabolitos (DEA y DIA) y clorpirifos.

salud, el Servicio Nacional de Sanidad y Calidad Agroalimentaria (SENASA) de Argentina eliminó de sus registros los principios activos y los productos fitosanitarios que lo contengan, a partir de junio de 2023. Antes de esta medida, era ampliamente usado en diversos cultivos, como granos (garbanzo, maíz), papa, frutas cítricas, tabaco y distintas hortalizas. Este compuesto presenta baja solubilidad en agua y alto coeficiente de adsorción en suelos (Narváez Valderrama *et al.*, 2012). Dadas sus características fisicoquímicas, es persistente en el ambiente; por lo tanto, es posible que aún se encuentren residuos a niveles traza en suelos agrícolas con historial de uso de este insecticida.

Actualmente, existen numerosos trabajos publicados sobre metodologías de análisis de residuos de atrazina y clorpirifos en suelo (Fenoll *et al.*, 2006; Mojica and Guerrero, 2010; Pszczolińska and Michel, 2016; Maciá *et al.*, 2015). Los métodos de extracción empleados habitualmente incluyen la extracción Soxhlet (método de la Agencia de Protección Ambiental -EPA- 3540), extracción Soxhlet automatizada (método EPA 3541), extracción líquida presurizada (PLE) (método EPA 3545), extracción asistida por microondas (MAE) (método EPA 3546), extracción ultrasónica con solventes (USE) (método EPA 3550) y extracción con fluidos supercríticos (SFE) (método EPA 3562), así como extracción en fase sólida (SPE), microextracción en fase sólida (SPME), dispersión de matriz en fase sólida (MSPD) y extracción acelerada con solvente (ASE). Alternativamente, algunos autores proponen el uso de un método rápido, fácil, económico, efectivo, robusto y seguro, QuEChERS (por sus siglas en inglés de Quick, Easy, Cheap, Effective, Rugged and Safe) para reemplazar los métodos de extracción tradicionales para la determinación de plaguicidas en suelo (García Pinto *et al.*, 2010; Paramasivam and Chandrasekaran, 2013; Acosta-Dacal *et al.*, 2021; González Curbelo *et al.*, 2022).

En el laboratorio de Residuos de Plaguicidas de la Sección Química de la EEAOC se analizan principalmente residuos de agroquímicos en frutas y hortalizas, en especial frutas cítricas y sus derivados industriales, y en alimentos en general. En muestras ambientales, sólo se analizan aguas. Debido a los requerimientos crecientes de análisis de contaminantes en suelos, se inició la puesta a punto de esta metodología. Se comenzó por atrazina y clorpirifos, por ser los plaguicidas que abarcan el trabajo de tesis de la autora principal, un estudio de degradación de estos plaguicidas en suelo y en lechos biológicos, en el marco de su trabajo de tesis de la Maestría en Gestión Ambiental. Para hacer el estudio de degradación, fueron necesarias la puesta a punto y la validación del método de análisis de estos analitos en suelo y en los componentes de las biomezclas a ensayar.

El objetivo de este trabajo fue validar la metodología para la determinación de residuos de atrazina y dos de sus metabolitos (DEA y DIA) con importancia toxicológica, y el insecticida clorpirifos, basada en el método de extracción QuEChERS original (Anastassiades *et al.*, 2003), empleando acetato de etilo en lugar de acetoni-trilo (Perihan *et al.*, 2007) y GC-MSD para su detección y cuantificación. La verificación del método se realizó en compost de citrus, por ser uno de los componentes de las biomezclas que se emplearán posteriormente para el estudio de degradación de estos plaguicidas.

MATERIALES Y MÉTODOS

En la Tabla 1 se indican las propiedades fisicoquímicas de los compuestos estudiados. Dada la gran variabilidad en la solubilidad en agua de los analitos, se decidió emplear un solvente de extracción de polaridad media, como el acetato de etilo, que tiene afinidad por sustancias tanto de baja polaridad como intermedia, para asegurar una buena recuperación de los cuatro analitos.

Tabla 1. Propiedades fisicoquímicas de los analitos evaluados.

Parámetro	Atrazina	DEA	DIA	Clorpirifos
Masa molar (g mol ⁻¹)	215,68	187,68	173,68	350,6
Solubilidad en agua (mg L ⁻¹)	33	3200	670	1,4
pKa	1,68-1,71	1,30-1,65	1,30-1,58	-----

Todos los reactivos empleados fueron de grado analítico. El acetato de etilo grado plaguicida (GP) fue provisto por Sintorgan. El sulfato de magnesio anhidro (pureza 97%) y el cloruro de sodio fueron suministrados por Cicarelli, mientras que el PSA y C18 fueron adquiridos a Agilent Technologies. El carbón grafitizado (Supelclean ENVI-Carb 120/400) fue provisto por Supelco. Los estándares individuales de atrazina, DEA, DIA y clorpirifos, todos con una pureza mayor al 98,0%, fueron adquiridos a Dr. Ehrenstorfer.

Se prepararon soluciones madres individuales a una concentración de 1000 mg L⁻¹ en acetato de etilo que se almacenaron a -20°C en freezer. Se realizaron diluciones de 100 mg L⁻¹ y a partir de éstas se prepararon mezclas de los cuatro analitos de 10 mg L⁻¹ y de 1 mg L⁻¹, que se utilizaron tanto para la fortificación como para las curvas de calibración.

Muestreo y preparación del suelo

Se empleó como matriz representativa suelo proveniente de una parcela agrícola libre de los plaguicidas en estudio. El muestreo se realizó en un lote de cultivo de granos de la localidad de Gobernador Piedrabuena, provincia de Tucumán, República Argentina, a una profundidad de 0 a 30 cm. El acondicionamiento de la muestra consistió en eliminar la brosa (pequeñas ramas y hojas), secar a temperatura ambiente y tamizar por malla de 2 mm (Sistema Norteamericano).

El suelo fue caracterizado como un suelo franco con un contenido de materia orgánica de 1,9%, una salinidad de 0,8 dS m⁻¹ y un pH de 7,5. Para la verificación de la aplicabilidad del método a otras matrices, se empleó compost de citrus libre de los plaguicidas que abarca esta validación, provisto por una empresa citrícola de Tucumán. El compost fue analizado para su caracterización, con un contenido de MO de 9,1%, un pH de 9,0 y una salinidad de 3,6%.

Tanto el suelo como el compost fueron analizados previamente para verificar que no se detectaran los plaguicidas y/o metabolitos que abarca esta validación.

• **Acondicionamiento de la muestra:** la muestra de suelo se acondicionó eliminando la brosa (pequeñas ramas y hojas) y secándola a temperatura ambiente; posteriormente, fue colocada en horno a 40°C durante 48 h y se tamizó con una malla de 2 mm (Sistema Norteamericano).

• **Muestras fortificadas:** se realizaron fortificaciones de las muestras de suelo blanco con las mezclas de los analitos en estudio, a tres concentraciones: 0,020; 0,050 y 0,10 mg kg⁻¹. Para ello, se pesaron 5 g de suelo y 5 g de agua destilada, dejando que se hidratara por cinco minutos. Luego se realizaron las fortificaciones según el siguiente esquema (Tabla 2).

Luego de fortificar, los tubos de los testigos y de las muestras fortificadas se colocaron en heladera durante siete días, para permitir que los plaguicidas se adsorban a las partículas del suelo, antes de proceder a su extracción.

• **Método de extracción y limpieza del extracto:** la extracción de los plaguicidas se basó en el método QuEChERS (Anastassiades *et al.*, 2003). Los plaguicidas adicionados a las muestras se extrajeron con acetato de etilo, seguido de una limpieza por extracción en fase dispersiva con PSA y C18. La detección, cuantificación y confirmación de los plaguicidas se realizó por cromatografía gaseosa con detector de masas simple cuadrupolo (CG-MSD).

• **Extracción de los plaguicidas de las muestras fortificadas:** se retiraron los tubos con las muestras guardadas por siete días en la heladera y se las dejó a temperatura ambiente por 20 minutos, hasta atemperarse. Luego se adicionaron 10 ml de acetato de etilo GP, se agitó por 1 minuto y a continuación se agregaron 2 g de sulfato de magnesio anhidro, pureza mayor a 98% (previamente acondicionado en mufla al menos 2 h a 500°C para remover agua y ftalatos residuales) y 0,5 g de cloruro de sodio anhidro p.a. Se agitó vigorosamente durante 1 min para permitir la interacción total de los reactivos y la muestra. Se centrifugaron los tubos durante 5 min a 4500 rpm en una centrífuga refrigerada a 10°C.

• **Limpieza de los extractos:** Se tomaron con pipeta automática entre 6 y 7 ml del extracto (fase orgánica superior correspondiente al acetato de etilo) y se procedió a la limpieza en el tubo de 15 ml, conteniendo 300 mg de MgSO₄ anhidro y 50 mg PSA. Se agitó 1 minuto cada tubo y luego se centrifugó a 3000 rpm por 5 minutos. Luego de centrifugar, se tomaron 5 ml del extracto limpio, se colocaron en tubos de hemólisis de vidrio y se concentraron a 1 ml en evaporador con corriente de nitrógeno a temperatura inferior a 40°C. Se transfirió el extracto a un vial de 1,5

ml para su análisis por CG-MSD.

• **Preparación de un blanco de muestra:** la muestra sin fortificar se utilizó como matriz para realizar las curvas de calibración. Se siguió el procedimiento indicado en la preparación de las muestras fortificadas, pero en lugar de 5 g, se pesaron 10 g de suelo y se adicionó el doble de los reactivos (20 ml de solvente, 4 g de MgSO₄ anhidro y 1 g NaCl). Por cada tanda de muestras se requirió preparar dos tubos de blanco.

• **Limpieza del extracto blanco:** se realizó la limpieza del extracto con tubos que contenían el doble de MgSO₄ anhidro y PSA, con el mayor volumen posible que se recuperó del sobrenadante del tubo de extracción de 50 ml. En el caso de compost, se realizó la limpieza con C18 y carbono grafitizado, por el alto contenido de lípidos y clorofila. Luego de centrifugar, se dividió cada extracto en dos o tres tubos de hemólisis, colocando 5 ml en cada uno, a fin de obtener volumen suficiente para realizar varios puntos de la curva de calibración. Se concentró y se llevó cada tubo a un volumen final de 1 ml (el factor de concentración, por lo tanto, fue de 5).

Instrumentación

Condiciones cromatográficas

Los análisis cromatográficos se realizaron en un Cromatógrafo Gaseoso Agilent Technologies 6850, provisto con una columna para cromatografía gaseosa Phenomenex ZB-5MS Guardian 5% Polysilarylene-95% Polydimethylsiloxane, de 30 m de largo, 0,25 mm de diámetro y 0,25 mm de espesor de film, con un guarda-columna de 5 m; el gas transportador utilizado fue helio, con una velocidad de flujo de 1 ml min⁻¹ y una presión de 60,6 KPa, en modo flujo constante; el inyector automático split/splitless se utilizó en modo splitless, a una temperatura de 280°C, con un volumen de inyección de 1 µl. El programa de temperatura del horno fue el siguiente: temperatura inicial de 70°C, una rampa inicial de 70 a 200°C, a una velocidad de 25°C min⁻¹. Luego, una segunda rampa de 200 a 230°C, a una velocidad de 5°C min⁻¹, se mantuvo a 230°C durante 5 min; finalmente, una rampa de 230 a 280°C, a una velocidad de 50°C min⁻¹, manteniendo esta temperatura por 2 min. El tiempo de corrida fue de 19,2 min.

Condiciones del espectrómetro de masas

La detección, identificación y cuantificación de los compuestos analizados se realizó empleando un espectrómetro de masas Agilent Technologies simple cuadrupolo, acoplado al cromatógrafo gaseoso, modelo 5973N, operado en modo ionización por impacto electrónico (EI), con una energía de ionización de 70 eV. La

Tabla 2. Esquema de fortificación.

Nivel de fortificación	Volumen de fortificación	Volumen de solvente adicionado
Testigo o Blanco (tres repeticiones)		1000 µl de Acetato de Etilo
Fortificado a 20 ppb (seis repeticiones)	100 µl de mezcla de 1 mg L ⁻¹	900 µl de Acetato de Etilo
Fortificado a 50 ppb (seis repeticiones)	250 µl de mezcla de 1 mg L ⁻¹	750 µl de Acetato de Etilo
Fortificado a 100 ppb (seis repeticiones)	50 µl de mezcla de 10 mg L ⁻¹	950 µl de Acetato de Etilo

temperatura de la fuente de iones fue de 230°C; y la del cuadrupolo, de 150°C. Para la identificación y selección inicial de los iones para cada analito se trabajó en modo full SCAN, en un rango de 50 a 500 m/z; el análisis y cuantificación de la curva de calibración, blancos y muestras fortificadas se realizó en modo SIM (Single Ion Monitoring). El método se armó en tres ventanas de tiempo según grupos de compuestos: en el primero se monitorearon los iones correspondientes a DEA y DIA; en el segundo, los de atrazina; y en el tercero, los de clorpirifos, seleccionando los iones indicados en la Tabla 2.

Validación del método

Para llevar a cabo la validación de la metodología, se determinaron los siguientes parámetros, siguiendo lo sugerido en el Documento SANTE 11312/2021 de la Comunidad Europea: Límite de Detección (LD), Límite de Cuantificación (LQ) o Límite de Reporte, Precisión en condiciones de Repetibilidad y Precisión Intermedia, Veracidad, Especificidad, Linealidad, Efecto Matriz, Intervalo de Trabajo y Robustez.

• Límite de Detección (LD)

Para establecer el Límite de Detección se realizaron diluciones sucesivas de las soluciones madre y se analizaron las de concentración menor a 1 mg L⁻¹ (0,01, 0,05, 0,1 mg L⁻¹), para establecer la mínima concentración en la que se cumplen las condiciones de detección de los iones de cuantificación y cualificación, y en la que los picos cromatográficos presenten una relación señal/ruido mayor o igual a 3. Luego se verificó que esa concentración se detecte en matriz.

• Límite de Cuantificación (LQ) (Nivel de Reporte)

El establecimiento del Límite de Cuantificación se realizó a partir de los ensayos de veracidad y precisión intermedia, y se determinó el menor nivel de fortificación que cumplió con las condiciones de un valor de coeficiente de variación porcentual (CV%) ≤ 20% y una recuperación entre 70 y 110%.

• Precisión en condiciones de Repetibilidad y Precisión Intermedia

Todos los ensayos se realizaron en condiciones de Precisión Intermedia; el mismo analista en diferentes días realizó las repeticiones a dos niveles de fortificación: al LQ y a 0,10 mg kg⁻¹. Se calcularon el porcentaje de recuperación promedio y el CV%, considerándose aceptables valores de recuperación promedio entre 70 y 110% y CV ≤ 20%.

• Veracidad

Se calcularon las recuperaciones porcentuales promedio de las muestras fortificadas a 0,020 mg kg⁻¹, 0,050 mg kg⁻¹ (DIA) y 0,10 mg kg⁻¹ en suelo, y a 0,20 mg kg⁻¹ en compost de citrus.

• Especificidad

Las detecciones positivas se confirmaron cuando se cumplieron los siguientes requisitos establecidos en la Guía Sante N° 11312/2021:

- El tiempo de retención del pico en la muestra coincidió con el del analito en cuestión en la muestra fortificada.

- La relación señal/ruido de cada uno de los iones característicos de los analitos a determinar fue igual o superior a 3.

- Las intensidades relativas de los iones detectados, expresados como un porcentaje de la intensidad del ión más intenso, se correspondieron con la de la muestra fortificada o un punto de la curva de concentración comparable, con una diferencia máxima tolerable del 30%.

- Los picos de los analitos en los cromatogramas de iones extraídos se superpusieron totalmente.

• Linealidad

Se evaluó la Linealidad con soluciones estándares a concentraciones comprendidas entre 0,02 y 20 mg kg⁻¹ con estándares en matriz (extractos de muestras blanco-).

Los valores de aceptación de los coeficientes de correlación (R²) para las curvas de calibración son R² iguales o mayores a 0,99.

• Efecto Matriz

Se evaluó el Efecto Matriz, realizando las curvas de calibración en solvente y en extracto de suelo libre de plaguicidas. Se consideró que no existía Efecto Matriz si la relación entre las pendientes de la curva en matriz y en solvente era igual a 1; que existía un efecto de disminución de la señal si era menor a 1 y que existía efecto de incremento de la señal si era mayor a 1.

El porcentaje de Efecto Matriz se calculó como:

$$EM\% = \left(\frac{\text{Pendiente en matriz}}{\text{pendiente en solución}} - 1 \right) * 100$$

Se consideró: 0 – 20%: Efecto Matriz suave; 21 – 50%: Efecto Matriz moderado; >50%: Efecto Matriz fuerte.

• Robustez

Para comprobar la aplicabilidad del método a otras matrices además del suelo, se hizo una verificación del método en muestras de compost de citrus, a un nivel de fortificación de 0,2 mg kg⁻¹, por triplicado.

• Intervalo de Trabajo

Se estableció el rango de trabajo entre el LQ y el mayor nivel analizado en la curva de calibración en matriz, siempre y cuando el R² diera un valor igual o mayor a 0,99.

• Incertidumbre de las mediciones

La estimación de la incertidumbre se realizó en base a lo indicado en el apéndice C de la Guía Sante 11312/2021/v2 (pág. 31 a 33), enfoque 1: Estimación de la incertidumbre de medición (MU) basada en datos de control de calidad/validación intralaboratorio.

Se identificaron las siguientes fuentes de incertidumbre: muestreo; preparación de la muestra (efectos atribuibles al analista); efectos atribuibles a los materiales de referencia; efectos atribuibles a los instrumentos de medición; efectos de la muestra (matriz); cálculo de resultados (número de cifras significativas, redondeo); errores aleatorios.

Para el cálculo de la incertidumbre se tomaron los

datos de recuperación para el nivel de fortificación de 20 $\mu\text{g kg}^{-1}$ para atrazina, DEA y clorpirifos, y 50 $\mu\text{g kg}^{-1}$ para DIA. Se calcularon las incertidumbres para cada plaguicida analizado, y la incertidumbre combinada y expandida para todos los plaguicidas en la matriz suelo.

• Incertidumbre del Sesgo (μ_{sesgo})

Para estimar la incertidumbre del sesgo de cada plaguicida se tuvieron en cuenta dos componentes: a) El sesgo (como diferencia porcentual con el valor nominal o valor certificado); b) La incertidumbre del valor nominal/certificado, (μ_{Cref}) de acuerdo con la siguiente ecuación:

$$\mu_{\text{sesgo}} = \sqrt{\text{sesgo}^2 + \left(\frac{S_{\text{sesgo}}}{\sqrt{n}}\right)^2 + \mu_{\text{Cref}}^2}$$

Donde:

sesgo es el promedio de las diferencias porcentuales entre el valor experimental y el valor nominal.

S_{sesgo} es el desvío estándar de las n mediciones que se realizaron para determinar el sesgo.

μ_{Cref} es la incertidumbre del material de referencia que se obtuvo dividiendo en 2 el valor indicado en el certificado analítico enviado por el proveedor (expresado en %).

• Incertidumbre del plaguicida ($\mu_{\text{plaguicida}}$)

Para el cálculo se combinaron las incertidumbres aportadas por el sesgo y la precisión intermedia para cada plaguicida aplicando la siguiente fórmula:

$$\mu_{\text{plaguicida}} = \sqrt{\mu_{\text{sesgo}}^2 + \mu_{\text{prec int}}^2}$$

Donde:

$\mu_{\text{prec int}} = \text{CV de las recuperaciones de las } n \text{ repeticiones realizadas.}$

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Figura 2 se muestra el cromatograma iónico total de los compuestos analizados.

Límite de Detección (LD)

Para atrazina, DEA y clorpirifos se estableció como Límite de Detección 0,010 mg kg^{-1} (que corresponde a un valor de 0,050 mg L^{-1} de concentración de lectura), dado que a este nivel se cumplieron las condiciones de detección de los iones de cuantificación y cualificación y que los picos cromatográficos presenten una relación señal/ruido ≥ 3 . Para DIA, estas condiciones se cumplieron para una concentración igual o mayor a 0,1 mg L^{-1} de lectura, por lo que el límite de detección se estableció en 0,020 mg kg^{-1} para este analito. Estos límites de detección son similares a los obtenidos por otros investigadores (Mojica, 2010; Rezende, 2022) y resultaron adecuados para los fines de esta validación.

Límite de Cuantificación (LQ) (Nivel de Reporte)

Para atrazina, DEA y clorpirifos, el Límite de Cuantificación se estableció en 0,020 mg kg^{-1} (20 $\mu\text{g kg}^{-1}$), determinando la concentración de residuos de plaguicidas de muestras fortificadas a este nivel que cumplan con las condiciones de $\text{CV} \leq 20\%$ y Recuperación entre 70 y 110%. Para DIA estas condiciones se cumplieron en la concentración de 0,050 mg kg^{-1} (50 $\mu\text{g kg}^{-1}$), por lo que se estableció este valor como su límite de cuantificación. Los valores obtenidos son similares a los hallados por otros autores (Mojica, 2010; Rezende, 2022) y son adecuados para los fines de esta validación.

Precisión en condiciones de Repetibilidad y Precisión Intermedia

Para la determinación de estos parámetros se calculó la recuperación promedio y el Coeficiente de Variación porcentual (CV%). Los resultados obtenidos se

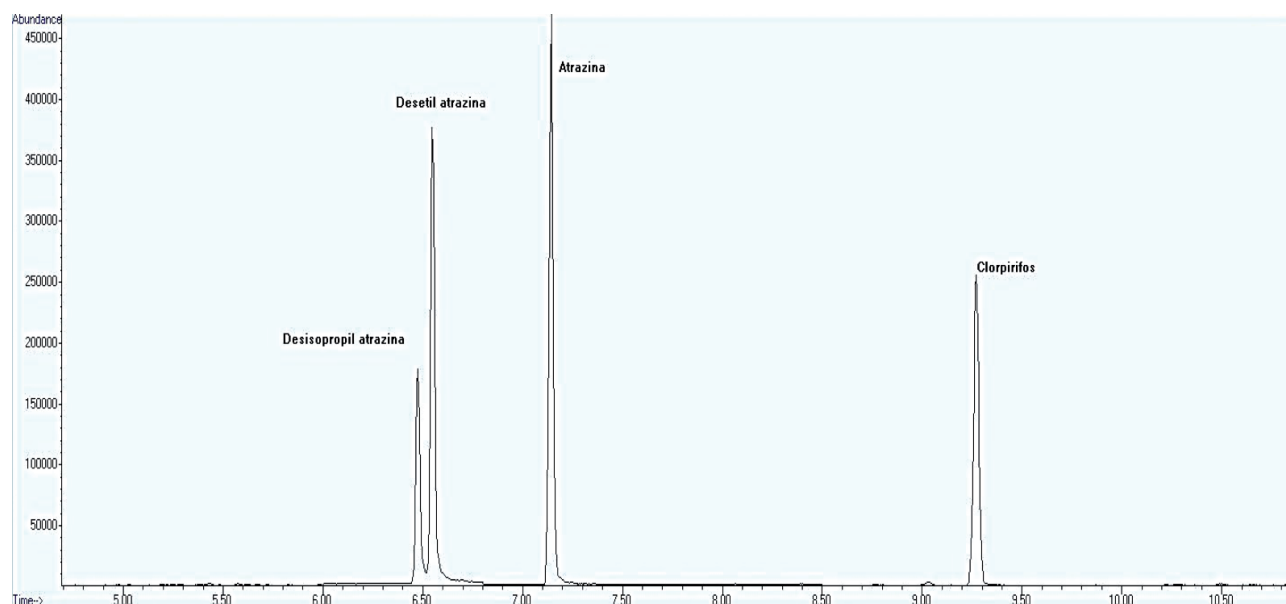


Figura 2. Cromatograma iónico total (TIC) de una muestra de suelo fortificada a 10 mg kg^{-1} con DIA, DEA, atrazina y clorpirifos.

muestran en la Tabla 3. Los valores obtenidos se encuentran entre 76 y 87%, lo que demuestra una buena eficiencia del método para extraer los analitos estudiados; los valores de CV% muestran que el método tiene una precisión aceptable. Tanto la recuperación como la precisión son comparables a las informadas por otros investigadores (Mojica, 2010; Rezende, 2022)

Veracidad

Las recuperaciones porcentuales promedio de las muestras fortificadas a 0,020 mg kg⁻¹, 0,050 mg kg⁻¹ (DIA) y 0,10 mg kg⁻¹ en suelo se muestran en la Tabla 3.

Especificidad

Se verificó que en cada nivel de fortificación se cumplieran los criterios establecidos en el Documento SANTE 11312/2021 de la Comisión Europea: el tiempo de retención del pico en la muestra coincidió con el del analito en cuestión en la muestra fortificada; la relación señal/ruido de cada uno de los iones característicos de los analitos a determinar fue igual o superior a 3; las intensidades relativas de los iones detectados, expresados como un porcentaje de la intensidad del ión más intenso, se correspondieron con la de un punto de la curva de concentración comparable, con una diferencia máxima tolerable del 30 %; los picos de los analitos en los cromatogramas de iones extraídos se superpusieron totalmente. Esto demuestra que la Cromatografía Gaseosa simple cuadrupolo resulta una herramienta eficaz para la detección y confirmación de los analitos estudiados, siendo más simple y económica que metodologías más costosas como la cromatografía líquida acoplada a un espectrómetro de masas triple cuadrupolo.

Linealidad

Los valores de R² para las curvas en matriz dieron valores iguales o mayores a 0,99 (Tabla 4). El método mostró una linealidad en un rango amplio de trabajo, pudiendo emplearse tanto para valores del orden de las ppb a ppm, siendo adecuado tanto para detectar trazas como para cuantificar concentraciones elevadas, por ejemplo, a causa de un derrame accidental, o para monitoreo de la degradación de estos plaguicidas en sistemas de biorremediación.

Efecto Matriz

Los valores obtenidos para los plaguicidas evaluados en esta validación se muestran en la Tabla 4.

En los cuatro analitos estudiados se observó un efecto matriz positivo; es decir, un aumento de la señal en la curva en matriz con respecto a la curva en solvente, lo cual es típico de la Cromatografía Gaseosa acoplada a Masas.

En todos los casos, el Efecto Matriz fue menor al 20%, lo que se considera un efecto matriz suave, pudiendo hacerse la cuantificación con curva en solvente. No obstante, debido a la gran variabilidad en la composición de las posibles muestras de suelo a analizar, es recomendable realizar las curvas de calibración en matriz, para evitar errores de sub o sobre cuantificación.

En las Figuras 3, 4, 5 y 6 se muestran los gráficos de linealidad en solvente y en extracto de suelo de cada uno de los compuestos analizados.

Robustez

Se verificó la aplicabilidad del método en otras matrices, empleando como matriz representativa compost de citrus. Se eligió esta matriz por ser uno de los componentes elegidos para la preparación de biomezclas que serán utilizadas para un estudio posterior de degradación de estos plaguicidas en lechos biológicos. Los valores obtenidos de recuperación para un nivel de fortificación de 0,2 mg L⁻¹ fueron aceptables, en el rango de 70 a 110%. Los resultados se muestran en la Tabla 5.

Intervalo de Trabajo

Se estableció el rango de trabajo entre 0,02 a 20 mg kg⁻¹ para atrazina, DEA y clorpirifos; y 0,05 a 20 mg kg⁻¹ para DIA. Este rango es adecuado para la detección a niveles de contaminación ambiental y de derrames puntuales. El método permite ampliar el rango de trabajo para concentraciones más elevadas, agregando a la curva de calibración puntos de mayor concentración, siempre y cuando se verifique que la respuesta es lineal.

Incertidumbre de las mediciones

Los valores de incertidumbre de cada plaguicida se muestran en la Tabla 3.

Se obtuvo como incertidumbre expandida del

Tabla 3. Parámetros de validación para el método en suelo.

Analito	Recuperación promedio % (CV%)		LD (mg kg ⁻¹)	LQ (mg kg ⁻¹)	Incertidumbre de medida (calculada al LQ)
	LQ (0,02-0,05 mg kg ⁻¹)	0,100 (mg kg ⁻¹)			
Atrazina	76 (4,3)	80 (4,1)	0,01	0,02	17
DEA	87 (5,5)	82 (5,9)	0,01	0,02	10
DIA	81 (8,0)	77 (3,2)	0,02	0,05	14
Clorpirifos	80 (6,5)	83 (5,5)	0,01	0,02	14

Tabla 4. Efecto matriz y linealidad.

Analito	Pendiente curva en matriz (suelo)	Pendiente curva en solvente	R ² curva en matriz	R ² curva en solución	Relación de pendientes matriz/solución	Efecto matriz (EM) %
Atrazina	791942	80 (4,1)	0,9956	0,9969	1,09	9
DEA	955499	82 (5,9)	0,9974	0,9979	1,15	15
DIA	460029	77 (3,2)	0,9915	0,9986	1,17	17
Clorpirifos	450668	83 (5,5)	0,9966	0,9987	1,12	12

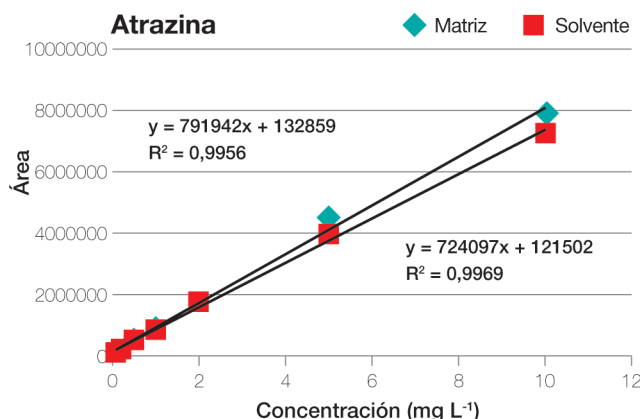


Figura 3. Curvas de calibración de atrazina en solvente y en extracto de suelo.

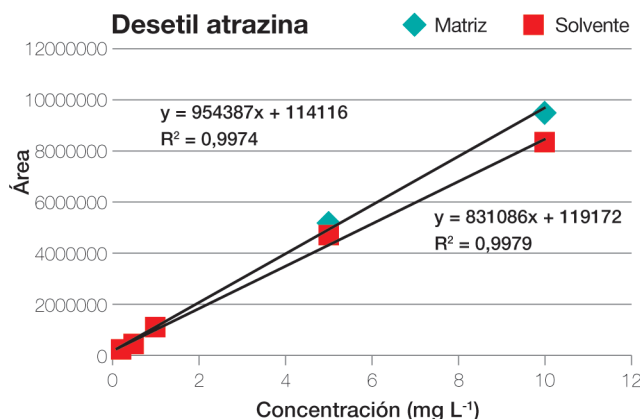


Figura 4. Curvas de calibración de desetil atrazina en solvente y en extracto de suelo.

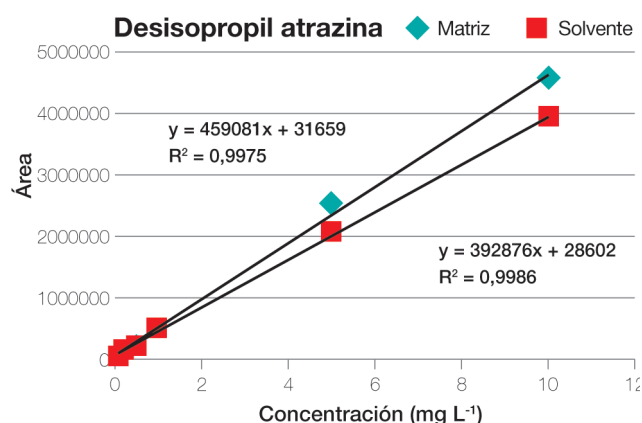


Figura 5. Curvas de calibración de desisopropil atrazina en solvente y en extracto de suelo.

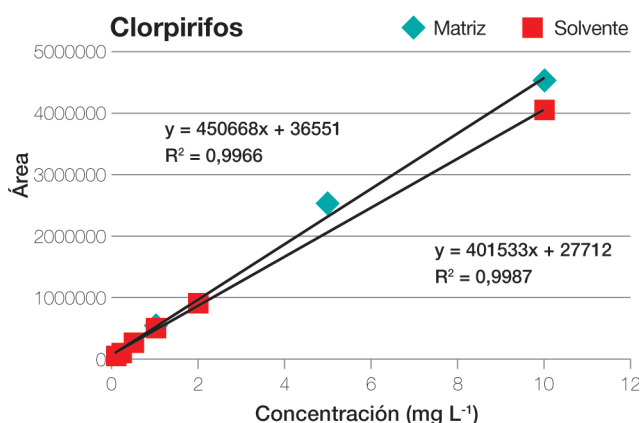


Figura 6. Curvas de calibración de clorpirifos en solvente y en extracto de suelo.

Tabla 5. Parámetros de verificación del método en compost de citrus para un nivel de fortificación de 0,2 mg kg⁻¹.

Analito	Recuperación promedio -(CV%)	LD (mg kg ⁻¹)	LQ (mg kg ⁻¹)	Incertidumbre de medida (%)
Atrazina	83 -(2,1)	0,01	0,02	12
DEA	81 -(2,3)	0,01	0,02	14
DIA	104 -(3,0)	0,02	0,05	4
Clorpirifos	79 -(6,1)	0,01	0,02	15

método un valor de 27%. Este valor de incertidumbre es aceptable para los análisis de residuos de plaguicidas en matrices complejas, como alimentos o muestras ambientales.

CONCLUSIONES

El resultado de este estudio muestra que el método validado, basado en el método QuECHERS, es aplicable a la determinación de los cuatro analitos presentados en esta validación en el rango de 0,020 a 20 mg kg⁻¹ para atrazina, DEA y clorpirifos; y de 0,050 - 20 mg kg⁻¹ para DIA. Es más rápido, sencillo y amigable con el ambiente,

en comparación con otros métodos como el de extracción sólido-líquido, el de ultrasonido o el de extracción por Soxhlet, que utilizan mayores volúmenes de solvente y tiempos prolongados de extracción; o técnicas de mayor complejidad tecnológica, como la PLE, la ASE o la SFE, que requieren la adquisición de equipamiento costoso y no disponible en la mayoría de los laboratorios de nuestro país. Los valores obtenidos de límite de detección y de cuantificación (0,01-0,02 mg kg⁻¹ para atrazina, DEA y clorpirifos; 0,02-0,05 mg kg⁻¹ para DIA, respectivamente) muestran que el método es lo suficientemente sensible para los fines de esta validación, y que puede ser empleado tanto en estudios de contaminación de suelos con trazas de estos plaguicidas como en la evaluación de la

degradación en lechos biológicos, o derrames accidentales de agroquímicos.

Se concluye que el método es adecuado para la determinación simultánea de los plaguicidas analizados por CG-MSD en muestras de suelo con una precisión, recuperación y sensibilidad aceptables. Puede ser de utilidad para los laboratorios que no cuentan con equipos de cromatografía líquida acoplada a triple cuadrupolo, que es la metodología mayormente empleada en la actualidad por los laboratorios de análisis de contaminantes en muestras ambientales. Se demostró, también, su versatilidad y aplicabilidad a otras matrices, como compost de citrus, lo cual permite, por ejemplo, su uso en estudios de degradación de estos plaguicidas en lechos biológicos. Se obtuvo un valor de incertidumbre expandida para los plaguicidas analizados de 27%.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Acosta-Dacal, A.; C. Rial-Berriel; R. Díaz-Díaz; M. Bernal- Suárez and O. Luzardo. 2021.** Optimization and validation of a QuEChERS-based method for the simultaneous environmental monitoring of 218 pesticide residues in clay loam soil. *Science of the Total Environment* 753 (142015): 1-17. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.142015>
- Anastassiades, M.; S. Lehotay; D. Štajnbaher and F. Schenck. 2003.** Fast and Easy Multiresidue Method Employing Acetonitrile Extraction/Partitioning and Dispersive Solid-Phase Extraction for the Determination of Pesticide Residues in Produce. *J. of AOAC International* 86 (2): 412-341. <https://doi.org/10.1093/jaoac/86.2.412>
- Candela R. E. 2016.** Comportamiento de atrazina y su relación con la práctica de fertilización nitrogenada en un suelo de la pedanía Cañas, departamento Colón, provincia de Córdoba. Tesis de maestría en ciencias de la ingeniería mención ambiente. <https://rdu.unc.edu.ar/bitstream/handle/11086/4180/tesis%20raul%20candela.pdf?sequence=1&isallowed=y>
- Chowdhury, I. F.; M. Rohan; B. J. Stodart; C. Chen; H. Wu and G. S. Doran. 2021.** Persistence of atrazine and trifluralin in a clay loam soil undergoing different temperature and moisture conditions. *Environ. Pollut.* 276(116687): 1-9. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.116687>
- De Gerónimo, E., V. Aparicio, S. Bárbaro, R. Portocarrero, S. Jaime, J. L. Costa. 2014.** Presence of pesticides in surface water from four sub-basins in Argentina. *Chemosphere* 107:423-431. <http://dx.doi.org/10.1016/j.chemosphere.2014.01.039>
- Environmental Protection Agency (USA). 2024.** Hazardous Waste Test Methods. 3500 series: Organic Sample Extraction. EPA's SW-846 Compendium (Last updated on June 14, 2024).
- European Commission. 2021.** EU Reference Laboratory for Residues of Pesticides (EURL). Documento N° SANTE 11312/2021. Analytical Quality Control and Method Validation Procedures for Pesticide Residues Analysis in Food and Feed.
- Fenoll, J.; P. Hellín; C. Marín; C. M. Martínez and P. Flores. 2006.** Multiresidue Analysis of Pesticides in Soil by Gas Chromatography with Electron-Capture Detection and Gas Chromatography Mass Spectrometry Detection. *Bull. Environ. Contam. Toxicol* 76: 361-372
- García Pinto, Carmelo; M. Fernández Laespada; S. Herrero Martín; A. Casas Ferreira; J. Pérez Pavón and B. Moreno Cordero. 2010.** Simplified QuEChERS approach for the extraction of chlorinated compounds from soil samples. *Talanta*. 81 (1-2): 385-391. <https://doi.org/10.1016/j.talanta.2009.12.013>
- González-Curbelo, M.; D. Varela-Martínez and D. Riaño-Herrera. 2022.** Pesticide-Residue Analysis in Soils by the QuEChERS Method: A Review. *Molecules* 27(13): 4323. <https://doi.org/10.3390/molecules27134323>
- Hayes, T.; K. Haston; M. Tsui; A. Hoang; C. Haeffele and A. Vonk. 2002.** Feminization of male frogs in the wild. *Nature*. 419: 895-896. <https://doi.org/10.1038/419895a>
- Lassere, J. P.; F. Fack; D. Revets; J. Renaut; T. Bohn; A. C. Gutleb and L. Hoffmann. 2008.** Effects of the endocrine disrupting compounds atrazine and PCB 153 on the protein expression of MCF-7 human breast cancer cells. *J. Tox. Let.* 180 (S122). <https://doi.org/10.1016/j.toxlet.2008.06.379>
- Maciá, A.; K. Vazquez J. Campo and Y. Picó. 2015.** Assessment of two extraction methods to determine pesticides in soils, sediments and sludges. Application to the Túrria River Basin. *Journal of Chromatography A* 1378: 19-31 <http://dx.doi.org/10.1016/j.chroma.2014.11.079>
- Mojica A. and J. Guerrero. 2010.** Extracción de residuos de plaguicidas en suelos asistida por ultrasonido. *Rev. Colomb. Quím.* 39 (3):371-387
- Narváez Valderrama, J. F.; J. A. Palacio Baena y F. J. Molina Pérez. 2012.** Persistencia de plaguicidas en el ambiente y su ecotoxicidad: Una revisión de los procesos de degradación natural. *Gestión y Ambiente*. 15 (3): 27-37 [En línea] Consultado: 31 de Marzo de 2025. ISSN: 0124-177X. Disponible en: <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169424893002>
- Paramasivam, M. and S. Chandrasekaran. 2013.** Determination of fipronil and its major metabolites in vegetables, fruit and soil using QuEChERS and gas chromatography-mass spectrometry. *Intern. J. Environ. Anal. Chem.* 93 (11): 1203-1211. <http://dx.doi.org/10.1080/03067319.2012.708747>
- Perihan, A.; A. Ambrus; S. J. Lehotay and A. Cannavan. 2007.** Validation of an efficient method for the determination of pesticide residues in fruits and vegetables using ethyl acetate for extraction. *Journal of Environmental Science and Health Part B*. 42: 481-490. <https://doi.org/10.1080/19312450701392490>
- Portocarrero, R.; V. Aparicio; E. De Gerónimo; C. Morales and J. L. Costa. 2018.** Pesticide presence in a hydrologic system of Tucumán province, Argentina. *Geophysical Research Abstracts* 20, EGU2018-2349 EGU General Assembly 2018.
- Portocarrero, Rocío. 2020.** Destino ambiental de los herbicidas atrazina y ametrina utilizados en el cultivo de caña de azúcar. Tesis para optar al grado de Doctor en Ciencias Agrarias. Facultad de Ciencias

- Agrarias. Universidad Nacional de Mar del Plata.
- Pszczolińska, K. and M. Michel. 2016.** The QuEChERS Approach for the Determination of Pesticide Residues in Soil Samples: An Overview. : Journal of AOAC International Vol. 99, No. 6:1403-1414 DOI: 10.7540/jaoacint.16-0274 Downloaded from <https://academic.oup.com/jaoac/article/99/6/1403/5658396> by guest on 30 March 2022
- Rezende, S.; N. Besil; L. Archondo; H. Heinzen and M. V. Cesio. 2022.** Multiresidue analysis of basic, neutral, and acidic pesticides in biobeds' biomixture. MethodsX 9, 101697. <https://doi.org/10.1016/j.mex.2022.101697>
- Reinhardt, C. F.; J. G. Ehlers and P. C. Nel. 1990.** Persistence of atrazine as affected by selected soil properties. S. Afr. J. plant soil 7 (3): 182-187. <https://doi.org/10.1080/02571862.1990.10634564>
- Rostami, S.; S. Jafari; Z. Moeini; M. Jaskulak; L. Keshtgar; A. Badeenezhad; A. Azhdarpoor; M. Rostami; K. Zorena and M. Dehghani. 2021.** Current methods and technologies for degradation of atrazine in contaminated soil and water: A review. Environ. Tech. & Innov. 24. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2021.102019>
- Schwab, A. P.; P. A. Splichal and M. K. Banks. 2006.** Persistence of atrazine and alachlor in ground water aquifers and soil. Water, Air & Soil Pollution 171: 203-235. <https://doi.org/10.1007/s11270-005-9037-2>.



Revista Industrial
y Agrícola de
Tucumán

ISSN 0370-5404

En línea
1851-3018

Tomo 102 (2):
13-21; 2025



ESTACION EXPERIMENTAL
AGROINDUSTRIAL
OBISPO COLOMBRES
Tucumán | Argentina

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

Ajustes de la tasa de aplicación fitosanitaria en limón (*Citrus limon*) a partir de la información generada por drones

Nelson D. Aranda*, Carlos Moyano**, Nicolás Mitrovich*, M. Inés Valdez*, José L. Taddei*** y Dardo H. Figueroa*

*Sección Fruticultura, Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC) AV. William Cross 3150, Las Talitas (4101) Tucumán, Argentina. Tel.: +54 381 452100. Int. 135; **Empresa Agroindex; ***Empresa Citrusvil S.A. Ruta 302 km 7, Banda del Río Salí (4109). Email: ndaranda@eeaoc.org.ar

RESUMEN

Una correcta pulverización en limoneros es aquella que permite un control eficiente sobre las plagas y enfermedades. Para determinar el volumen de aplicación se deben tener en cuenta las características de las plantas. El uso de drones permite obtener el volumen de estas utilizando técnicas de fotogrametría. En el presente trabajo se evaluó la tasa de aplicación ajustada a partir de la información generada por dron, en comparación a la obtenida por métodos convencionales. El ensayo se realizó en la localidad de El Rodeo, provincia de Tucumán, en plantas de limonero Lisboa/Agrio de 19 años de edad. Se aplicaron tres tratamientos fitosanitarios: T1, con la tasa de aplicación preestablecida por la empresa propietaria de la finca; T2, con la tasa de aplicación preestablecida por la empresa y dosis de cobre del T3; y T3, con la tasa de aplicación ajustada a partir de información generada por dron. El diseño experimental fue de bloques al azar con cuatro repeticiones. Se compararon los volúmenes de copa obtenidos a partir de dron con los obtenidos por el método clásico. Se evaluaron las tasas de aplicación, la dosis de cobre y la calidad de fruta. Los resultados indicaron una correlación directa entre el volumen de copa obtenido a partir del dron y el obtenido por el método clásico ($R^2 = 0,8676$). Se observaron, asimismo, diferencias significativas en las tasas de aplicación, con valores de 6982 l/ha para T1 y T2; y de 4703,6 l/ha para T3, con una reducción del 33%. Las dosis de cobre se diferenciaron significativamente entre tratamientos: 10,44 kg/ha para T1 y 7,05 kg/ha para T2 y T3. No hubo diferencias significativas en la calidad de la fruta entre tratamientos. El ajuste de las tasas de aplicación no afectó dicha calidad, y se concluyó que el uso del dron permite aumentar la eficiencia de aplicaciones.

Palabras clave: VANTs (Vehículos Aéreos No Tripulados), sensores remotos, cítricos.

ABSTRACT

Adjustments to the phytosanitary application rate in lemon (*Citrus limon*) based on information generated by drones

Proper spraying of lemon trees allows for efficient pest and disease control. Plant characteristics must be taken into account when determining the application rate. The use of drones allows for obtaining plant volumes using photogrammetry techniques. In this study, the adjusted application rate was evaluated based on information generated by drones, compared to that obtained using conventional methods. The trial was conducted in the town of El Rodeo, Tucumán province, on 19-year-old Lisboa/Agrio lemon trees. Three phytosanitary treatments were applied: T1, with the application rate preset by the company that owns the farm; T2, with the application rate preset by the company and the copper dose of T3; and T3, with the application rate adjusted based on information generated by the drone. The experimental design was a randomized block with four replications. The canopy volumes obtained from the drone were compared with those obtained using the conventional method. Application rates, copper dosage, and fruit quality were evaluated. The results indicated a direct correlation between canopy volume obtained using the drone and that obtained using the conventional method ($R^2 = 0.8676$). Significant differences were also observed in application rates, with values of 6982 l/ha for T1 and T2; and 4703.6 l/ha for T3, a 33% reduction. Copper dosages differed significantly between treatments: 10.44

Fecha de
recepción:
07/08/2025

Fecha de
aceptación:
08/09/2025

kg/ha for T1 and 7.05 kg/ha for T2 and T3. There were no significant differences in fruit quality between treatments. Adjusting application rates did not affect quality, and it was concluded that using the drone increases application efficiency.

Key words: UAVs (Unmanned Aerial Vehicles), remote sensors, citrus.

■ INTRODUCCIÓN

En la provincia de Tucumán, la superficie neta total ocupada con cítricos es de 41.700 ha, discriminadas en 1600 ha de dulces (naranjas y mandarinas) y 40.100 ha de limón (Carreras Baldrés *et al.*, 2024).

Una de las principales preocupaciones de los productores de cítricos, principalmente de quienes exportan limón fresco, es la protección sanitaria de sus plantaciones. El nivel de cobertura de las aplicaciones juega un rol importante al momento de analizar los problemas sanitarios que normalmente se presentan en las fincas comerciales de cítricos (Furness y Thompson, 2008; citado por Salas *et al.*, 2012).

Una correcta pulverización es aquella que permite una cobertura completa y adecuada de los árboles, sin desperdicio de plaguicidas y manteniendo un control eficiente sobre las plagas y las enfermedades. Para ello, es necesario desalojar el aire de la planta y reemplazarlo con la mezcla química, cubriendo cada hoja y cada rama con el producto (Manual de operaciones de la empresa John Bean Sprayers, 1997).

Para determinar el volumen de aplicación, además de los factores que interfieren en la pulverización, deben tenerse en cuenta también las características de la copa de las plantas. Por lo tanto, el volumen de aplicación nunca debe ser un factor predefinido. Un adecuado ajuste al volumen de copa de las plantas (volumen de pulverización/m³ de dosel) es una herramienta que contribuye al uso racional del agua y del producto en aplicaciones para el control de plagas y enfermedades (Da Silva y Ramos, 2017).

Las pulverizaciones en plantaciones de cítricos son muy variables (Palacios, 2005), utilizándose de 2000 l a 10.000 l de agua, de 3 kg a 15 kg de fungicidas cúpricos y de 20 l a 100 l de aceite mineral por ha (Salas *et al.*, 2012). Estos mismos autores concluyeron que es posible reducir a 5000 l/ha la cantidad de líquido utilizado en las aplicaciones convencionales, sin que ello represente una disminución significativa en la proporción de fruta embalable. Asimismo, afirmaron que la reducción de la cantidad de líquido también puede ir acompañada de una disminución sustancial de plaguicidas. Fogliata (2023) expuso que para el manejo de enfermedades en limón se aplica un volumen de caldo de 3500 - 5000 l/ha (200 ml/ m³ de copa) y fungicidas cúpricos en dosis de 2,6 - 3,8 kg /ha de Cu metálico. En este sentido, la calibración del volumen de aplicación de los tratamientos fitosanitarios es muy importante. Generalmente se realiza mediante técnicas empíricas y, en algunos casos, mediante el método de Tratamiento por Volumen Vegetativo (TRV, por sus siglas del inglés Tree Row Volume), desarrollado por Byers *et al.*, 1971, citado por Galeano Roa *et al.* (2025). Dicha técnica permite ajustar el caldo erogado según la plaga y el cultivo

concretos, considerando el volumen foliar, de modo que el arbolado sea tratado con la máxima eficacia y el mínimo impacto ambiental. Se mide en litros de caldo fitosanitario por metro cúbico de volumen (Larios Adorno, 2008).

Con el avance de la tecnología surgen nuevas herramientas que pueden mejorar estas calibraciones, entre las cuales se puede destacar el uso de vehículos aéreos no tripulados (VANTS), comúnmente conocidos como drones. El empleo de estos y la agricultura de precisión en labores agrícolas son cada vez más implementados por los agricultores. Esto se debe a su gran capacidad para captar información de los cultivos de manera precisa, facilitando la toma de decisiones. Las imágenes capturadas permiten realizar modelos tridimensionales del terreno; planificar el establecimiento, la producción y el monitoreo de cultivos; y detectar plagas, enfermedades y deficiencias nutricionales, así como realizar estimaciones de volumen de copa (Guevara-Bonilla, 2020).

En ensayos realizados sobre limonero, Aranda *et al.* (2023) demostraron que existe una correlación directa entre el método clásico de determinación de volumen de copa y el método con fotogrametría utilizando drones, y concluyeron que los drones son una efectiva alternativa a los métodos tradicionales de medición de volumen de copa.

Considerando que la incorporación de los vuelos con dron para medir el volumen de copa del monte frutal es muy importante desde el punto de vista operativo y logístico para obtener aplicaciones fitosanitarias más precisas y eficientes para el rendimiento y la calidad de la fruta, se propuso como objetivo de este trabajo ajustar la tasa de aplicación (l/ha) a partir de información generada por dron (volumen de copa) en el cultivo de limonero.

■ MATERIALES Y MÉTODOS

Descripción del lugar de estudio

El ensayo se realizó en la localidad de El Rodeo, departamento Burruyacú (LS: 26° 40' 38,2" y LO: 64° 56' 38,8") de la provincia de Tucumán (Figura 1). El lugar se encuentra dentro de la región del Pedemonte Subhúmedo - Seco, donde la temperatura media anual es de 19°C. La temperatura media del mes más caliente (enero) es de 25°C, y la del mes más frío (julio) es de 12°C. Es una región considerada libre de heladas, aunque éstas pueden producirse en algunos años de manera excepcional. La precipitación anual fluctúa entre 700 y 900 mm y la evapotranspiración potencial es de 900 mm. Las lluvias son estivales, con un acentuado período de sequía invernal-primaveral. Los suelos dominantes en esta subregión son los Haplustoles fluvénticos y cumúlicos, originados en los sedimentos aluviales y coluviales provenientes de la serraña (Zuccardi y Fadda, 1985).

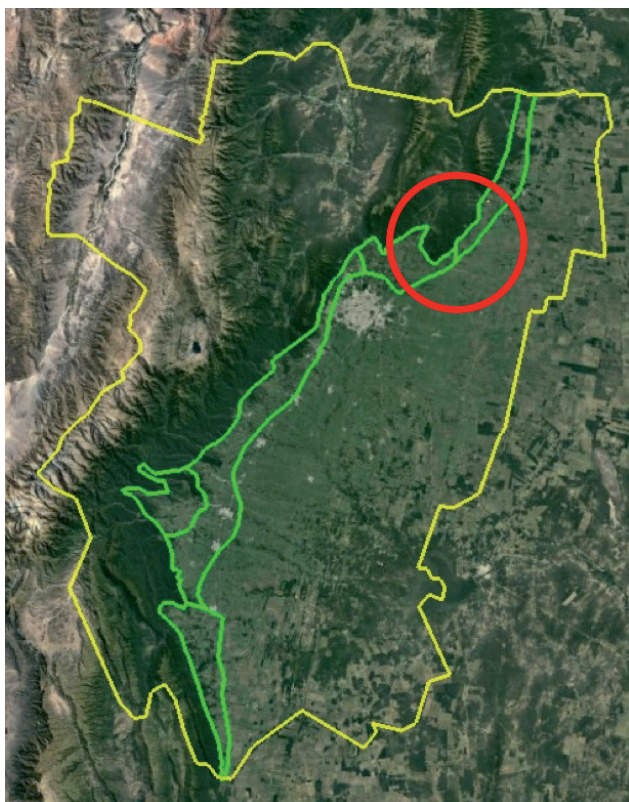


Figura 1. En amarillo se traza el contorno del mapa de la provincia de Tucumán, Argentina; en verde, la región del Pedemonte y el círculo rojo indica la ubicación del lugar del ensayo.

Características del ensayo

El ensayo se efectuó durante tres campañas, iniciando en septiembre de 2018 y concluyendo en febrero de 2021. Consistió en la aplicación de tres tratamientos (Tabla 1), sobre plantas de 19 años de edad, correspondientes a la combinación de limonero (*Citrus limon*) Lisboa Frost nuc / Naranja agrio (*Citrus aurantium*), con un marco de plantación de 7 m entre filas y 4 m entre plantas. Se utilizó una turbo pulverizadora Hidroneumática FMC de 2000 l de capacidad. El diseño experimental fue en bloques al azar, con cuatro repeticiones, y cada parcela

estaba constituida de una fila con 21 plantas y sus respectivas borduras.

Vuelos con dron y estimación del volumen de copa

Se utilizó un dron Matrice 100 de la marca DJI, equipado con un sensor remoto (cámara multispectral R-G-NIR). La altura de vuelo fue de 100 m, con un solape entre fotos de un 65% de lado y un 75% de frente (sidelap y frontlap, respectivamente). La velocidad fue de 11 m/s. A partir de los vuelos se generaron modelos digitales de superficie (DSM) y del terreno (DTM), lo que permitió estimar el volumen de copa de la superficie analizada a partir de las diferencias entre el DTM y el DSM (Figuras 2 y 3).

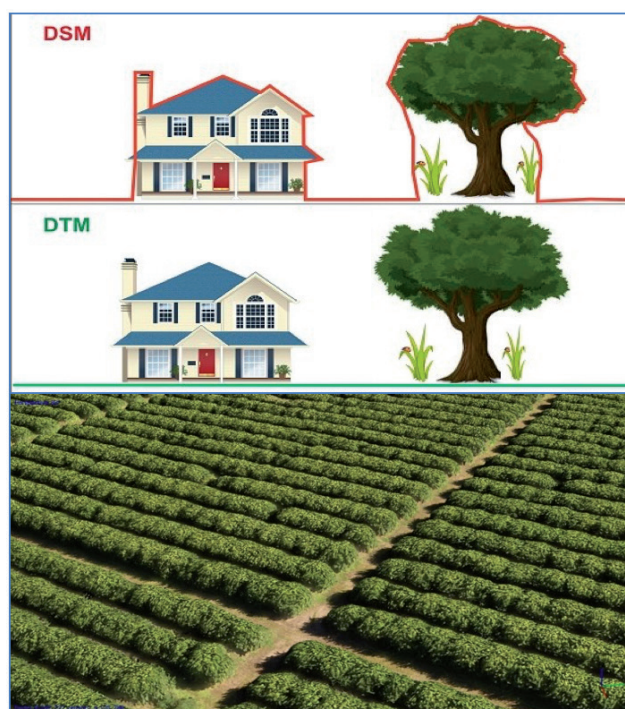


Figura 2. Esquema de Modelos Digitales. Arriba: DSM (línea roja trazada sobre la casa y el árbol) y DTM (línea verde trazada a nivel del terreno); Abajo: ejemplo de modelo realizado en cítricos (diferencia entre DSM y DTM).

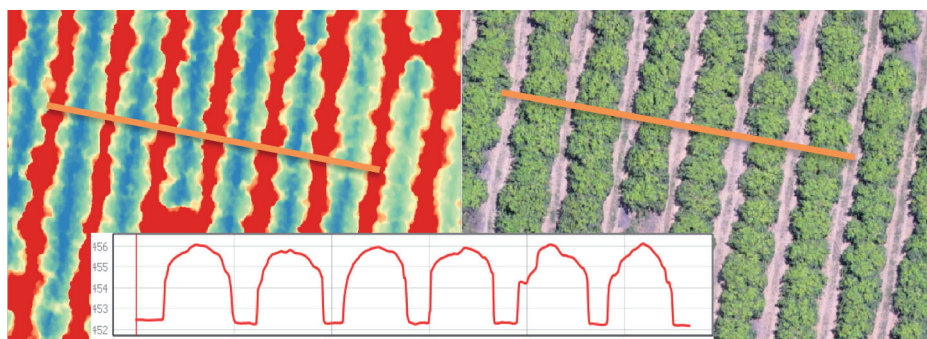


Figura 3. Modelos digitales aplicados en el ensayo para determinar el volumen de copa. Izquierda: imagen de ortomosaico RGB (siglas en inglés Red, Green and Blue) del cultivo de limonero; derecha: imagen común. La imagen solapada en el centro, en blanco y con un trazo de línea roja, es un DSM (Modelo Digital de Superficie) realizado sobre la línea de referencia (color naranja).

Tabla 1. Descripción de tratamientos realizados.

Tratamiento	Especificaciones	Superficie
T1	Tratamiento fitosanitario con tasa de aplicación (l/ha) preestablecida por la empresa propietaria de la finca	0,47 ha
T2*	Tratamiento fitosanitario con tasa de aplicación (l/ha) preestablecida por la empresa y dosis de cobre (kg/ha) del T3	0,47 ha
T3	Tratamiento fitosanitario con tasa de aplicación ajustada a partir de información generada por dron	0,47 ha

* Tratamiento realizado a partir de la segunda campaña para comparar la calidad de fruta con la dosis de cobre (T1 vs T2) y la tasa de aplicación (T2 vs T3).

Los vuelos se realizaron una semana antes de cada aplicación (sujeto a condiciones meteorológicas óptimas). De esta manera, se utilizó el dato de volumen de copas previo a la aplicación para ajustar la tasa de aplicación del tratamiento T3. Con la información disponible al final de cada campaña se realizó un análisis de la evolución del volumen de copa en el tiempo.

Estimación del volumen de copa con el método clásico

Con el fin de validar los datos de volumen de copa obtenidos a partir de información generada por dron, se estimó el volumen de copa por el método clásico. Para ello, se midió con regla de agrimensor, graduada en centímetros, la altura tomada desde el suelo hasta la parte superior de la planta; y se determinó el diámetro de la copa medido en la dirección perpendicular a la línea de plantación (Figura 4). Luego se aplicó la fórmula propuesta por Mendel en 1956, citada por Colauto Stenzel *et al.* (2005): $V = (2/3 \pi R^2 H)$, donde V = Volumen de la copa (m^3), R = radio de las plantas (m) y H = altura de las plantas (m).

Con los datos de volumen de copa obtenidos, se realizó una comparación entre los métodos (clásico vs. dron), mediante regresión lineal simple con el programa Microsoft Excel.

Aplicaciones fitosanitarias

Las aplicaciones se iniciaron desde el mes de septiembre y concluyeron en febrero (Figura 5). Los tratamientos T1 y T2 se aplicaron con un volumen de caldo preestablecido, conforme a las calibraciones realizadas normalmente para el manejo de la finca. El volumen de caldo del tratamiento T3 se ajustó utilizando tarjetas hidrosensibles abrochadas al follaje, en diferentes partes del árbol (en la parte baja de la copa, en el centro del árbol, arriba dentro de la copa). Una vez verificado el correcto mojado de la planta, se relacionaron los litros erogados (l/planta) con el



Figura 4. Medición de plantas en el ensayo con regla de agrimensor. Altura (arriba) y diámetro (abajo) para determinar el volumen de copa.

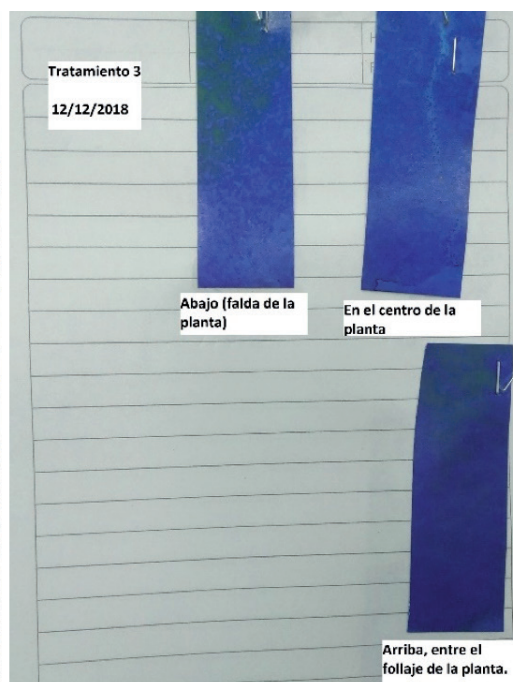


Figura 5. Izquierda.: aplicación de septiembre; derecha: mojado de tarjetas, para ajustar el volumen de aplicación del T3, en diciembre.

volumen de copa promedio de las plantas (m^3), obteniendo así un volumen de aplicación (VA) de 0.25 l/m^3 de copa. Para estimar la tasa de aplicación en l/ha , se relacionó el volumen de aplicación ajustado con el volumen de copa (m^3/ha) calculado por el dron:

$$TA = VA * VD$$

Donde:

TA: Tasa de aplicación (l/ha), (empleada a lo largo de la campaña)

VA: Volumen ajustado (l/m^3)

VD: Volumen de copa de los árboles determinado con dron (m^3/ha)

En todos los tratamientos se utilizaron los mismos productos químicos de control de plagas y enfermedades.

Se determinó la tasa de aplicación (l/ha) del tratamiento T1 a partir del volumen de caldo aplicado por planta y el número de plantas por ha. También se registró la dosis de óxido cuproso (50 %) teniendo en cuenta la concentración del mismo 1,5%.

Evaluación de la fruta

Para evaluar calidad, se cosechó la totalidad de la fruta de cuatro plantas por tratamiento. Luego, de acuerdo al método empleado por Salas *et al.* (2012), se determinó, para cada tratamiento, la cantidad de fruta cuya calidad permitía su comercialización en el mercado de fruta fresca para exportación (fruta embalable) y la fruta restante (destinada a la industria y comúnmente definida como “descarte”). Se clasificó según la causa más evidente por la que fuera descartada: ramaleo (cicatrices producidas por el roce del fruto con otros órganos de la planta o por acción del viento), presencia de plagas (cochinillas, ácaros y trips) y enfermedades (sarna, botrytis y melanos) (Figura 6).

Análisis estadísticos

Se compararon las medias de las variables de interés entre tratamientos mediante análisis ANOVA y com-

paraciones múltiples con prueba de Fisher, utilizando el programa Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2020).

Para gráficos de barra y líneas se utilizó el programa Microsoft Excel 2016 (Microsoft, 2016).

Se consideraron como variables dependientes las tasas de aplicación para cada mes, las tasas de aplicación para cada año, la dosis de óxido cuproso y la fruta embalable. Las variables de clasificación fueron los tratamientos.

RESULTADOS

Volumen de copa

En la Figura 7 se presenta el comportamiento del volumen de copa en las tres campañas. Las curvas en la gráfica muestran una misma tendencia: un crecimiento inicial pronunciado entre septiembre y octubre, luego un amesetamiento desde octubre a diciembre, para después volver a crecer desde diciembre a marzo. Algunas diferencias entre las diferentes campañas podrían deberse a las condiciones climáticas inherentes de cada año. En la campaña 2019/2020, se practicó una poda del monte frutal más severa de lo habitual, lo que pudo haber afectado los primeros meses del crecimiento del cultivo y los valores normales del volumen de copa. A partir de noviembre, se mantuvo un comportamiento similar al de las otras curvas.

Relacionando la densidad de plantas (aproximadamente 357 plantas/ha) con la información generada por el dron, el volumen promedio de copa fue de $47,6 \text{ m}^3$ al comienzo de las campañas y para febrero alcanzó un valor de $62,4 \text{ m}^3$. En la Figura 8 se puede observar un ejemplo del volumen de copa en m^3/ha determinado mediante un vuelo con dron en octubre de 2018.

Comparación de métodos para determinar el volumen de copa

En la Figura 9 se observa el resultado de la regresión lineal simple realizada para el volumen de copa por planta. La orientación de dispersión de puntos, la línea de tendencia y el valor del coeficiente de correlación,



Figura 6. Izquierda.: Evaluación de fruta en el ensayo; derecha: fruta embalable y fruta de descarte.

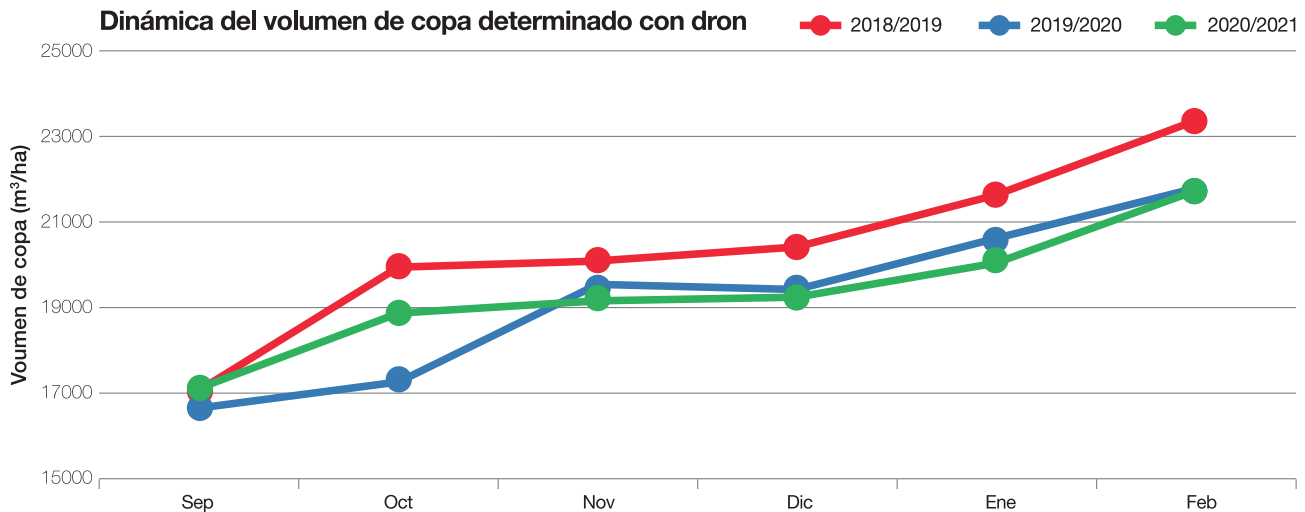


Figura 7. Dinámica del volumen de copa de limonero para tres campañas.

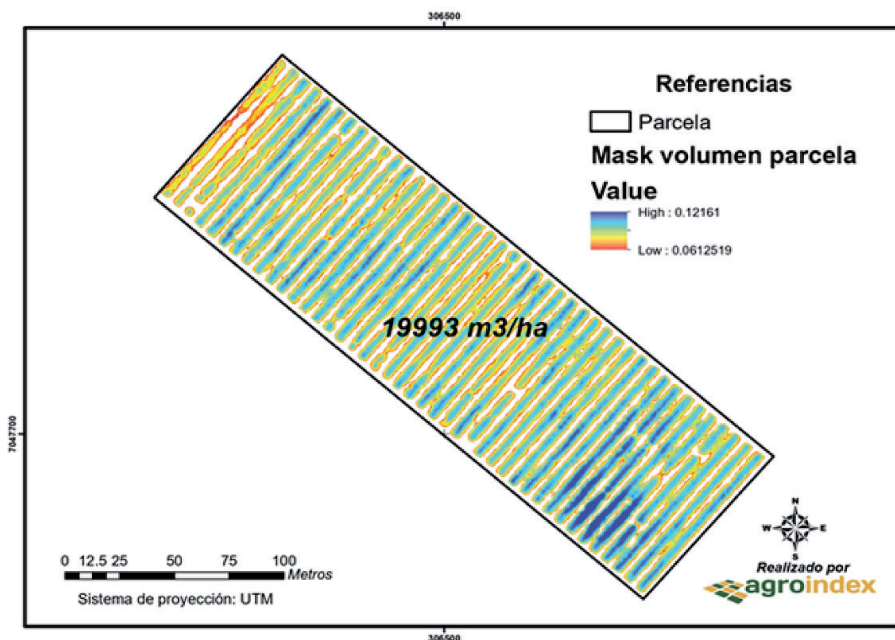


Figura 8. Imagen de Ortomosaico para determinar volumen de copa de limonero en octubre 2018. Volumen de copa: Azul indica valores altos, Verde los medios y amarillo los valores bajos. El número del centro es el valor del volumen de copa referido a hectárea.

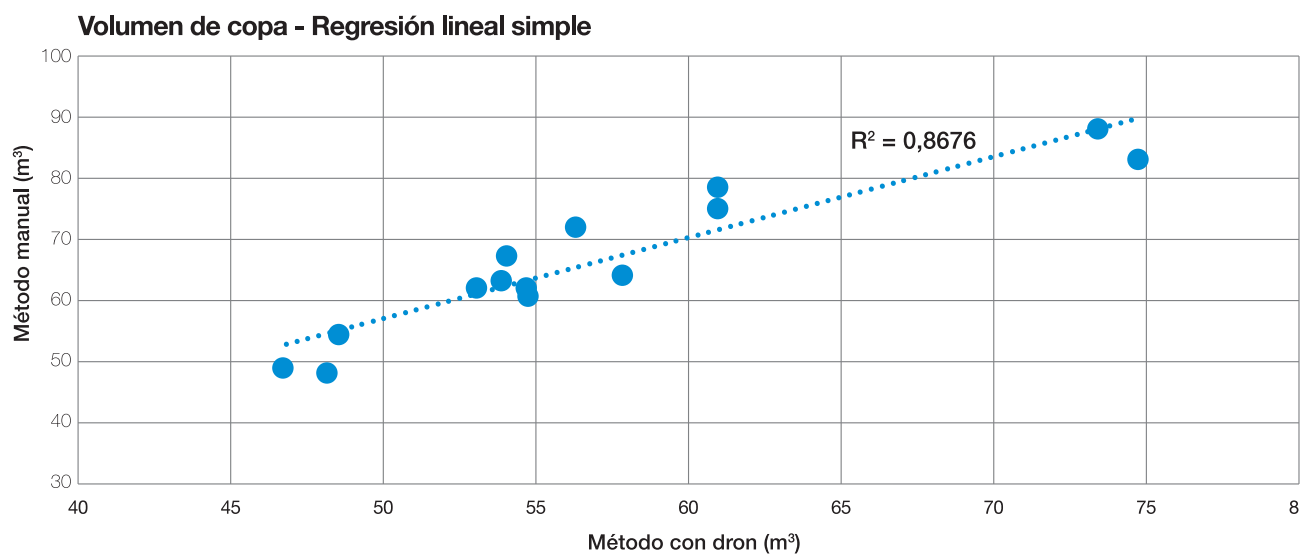


Figura 9. Correlación entre el volumen de copa de los árboles de limonero realizados por el método clásico o manual y el método a partir de información generada por dron.

$R^2 = 0,8676$, indican que existe correlación directa entre el método manual y el método con dron. Estos resultados son coincidentes con los obtenidos por Aranda *et al.* (2023) en ensayos sobre limonero.

Tasas de aplicación

En la Tabla 2 se exponen las tasas de aplicación y las diferencias expresadas en porcentaje entre el tratamiento T3 (ajustado a partir de información generada por dron) y los tratamientos T1 y T2 (tasa de aplicación preestablecida por la empresa). Los datos están detallados por fecha de aplicación y por campaña.

Los menores valores fueron de 5891 l/ha para el T1-T2, mientras que para el T3 fue de 3759 l/ha. El máximo valor registrado fue de 8033 l/ha para los tratamientos T1-T2, y de 5.439 l/ha para el tratamiento T3. Las diferen-

cias entre las tasas de aplicación varían entre el 23,0% y el 38,9%. Teniendo en cuenta todas las aplicaciones realizadas durante las tres campañas, el promedio de las tasas de aplicación arrojó un valor de 6.982 l/ha para los tratamientos T1-T2, y de 4.703 l/ha para el T3, lo que representa una diferencia promedio del 33%.

Los resultados del análisis estadístico para las tasas de aplicación se pueden observar en las Tablas 3 y 4, comparación mensual y anual, respectivamente. Se puede advertir que en todos los casos existen diferencias significativas entre los tratamientos. El promedio de las tasas de aplicación por campaña fue de 6982.2 l/ha para el T1 y T2, y de 4703,6 para el T3. Los valores de tasa de aplicación del T3 son similares a los obtenidos en los ajustes de calibraciones de Salas *et al.* (2012) y en manejo de enfermedades por Fogliata (2023).

Dosis de cobre

Las dosis de óxido cuproso registradas para cada tratamiento y aplicación se muestran en la Figura 10. Este producto se aplicó teniendo en cuenta una concentración (1,5 ‰), razón por la cual las dosis difieren de manera similar a las tasas de aplicación entre tratamien-

Tabla 2. Tasas de aplicación fitosanitaria por tratamiento y fecha en cada una de las campañas del ensayo.

	Fecha	T1=T2 (l/ha)	T3 (l/ha)	Diferencia entre tratamientos (%)
1ª campaña	26 Sep 2018	6.176	3.759	38,9
	30 Oct 2018	6.426	4.199	34,4
	12 Dic 2018	7.374	4.711	36,1
	16 Ene 2019	7.497	4.773	35,3
	15 Feb 2019	7.497	5.148	35,3
2ª campaña	18 Sep 2019	6.426	4.167	35,2
	16 Oct 2019	6.783	4.327	36,2
	11 Nov 2019	7.140	4.881	31,6
	10 Dic 2019	7.319	4.891	33,2
	13 Feb 2020	8.033	5.439	32,3
3ª campaña	23 Sep 2020	5.891	4.296	27,1
	27 Oct 2020	6.783	4.729	30,3
	24 Nov 2020	6.783	4.803	29,2
	23 Dic 2020	7.140	4.822	32,5
	18 Ene 2021	7.145	5.023	29,6
	18 Feb 2021	7.150	5.317	25,7
	Promedio	6.982	4.703	33,0

Tabla 3. Comparación mensual de medias de tasa de aplicación (l/ha) por tratamiento.

	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb
T1 y T2	6.164,2 a	6.664,0 a	6.961,5 a	7.277,4 a	7.318,5 a	7.556,5 a
T3	4.074,2 b	4.418,2 b	4.842,2 b	4.808,0 b	4.898,2 b	5.341,4 b

Test: LSD Fisher Alfa=0,05. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Tabla 4. Comparación por campaña de medias de la tasa de aplicación (l/ha) por tratamiento.

	2018-2019	2019-2020	2020-2021	Promedio
T1 y T2	6.993,9 a	7.140,0 a	6.812,7 a	6.982,2
T3	4.518,0 b	4.740,9 b	4.851,9 b	4.703,6

Test: LSD Fisher Alfa=0,05. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

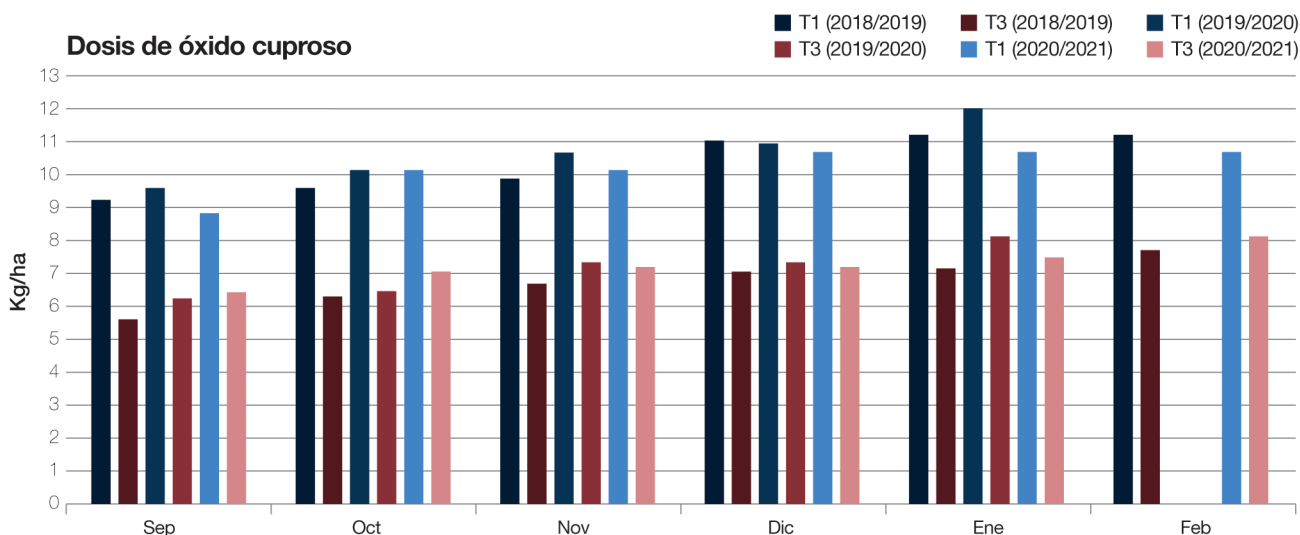


Figura 10. Dosis mensual de óxido cuproso en cada campaña.

tos. Para el T1 los valores de óxido cuproso varían entre 8,8 kg/ha a 12 kg/ha, mientras que para el T3 están en un rango de 5,6 kg/ha a 8,2 kg/ha.

Los resultados del análisis estadístico para la dosis de cobre se pueden observar en las Tablas 5 y 6, comparación mensual y anual, respectivamente. En todos los casos existen diferencias significativas entre los tratamientos.

Tabla 5. Comparación mensual de dosis de óxido cuproso (kg/ha) por tratamientos.

	Sep	Oct	Nov	Dic	Ene	Feb
T1	9,25 a	10,00 a	10,26 a	10,92 a	11,33 a	10,98 a
T2 y T3	6,11 b	6,63 b	7,07 b	7,21 b	7,62 b	7,94 b

Test: LSD Fisher Alfa=0,05. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Tabla 6. Comparación por campaña de dosis de óxido (kg/ha) cuproso por tratamientos.

	2018-2019	2019-2020	2020-2021	Promedio
T1	10,39 a	10,71 a	10,22 a	10,44
T2 y T3	6,76 b	7,11 b	7,28 b	7,05

Test: LSD Fisher Alfa=0,05. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

Las dosis más bajas se registraron en septiembre, con 9,25 kg/ha para el T1 y de 6,11 kg/ha para los T2 y T3. Los valores más altos correspondieron a enero en el T1, con 11,33 kg/ha; y a febrero en los T2 y T3, con 7,94 kg/ha. El promedio de dosis por campaña fue de 10,44 kg/ha en el T1, mientras que para el T2 y T3 fue de 7,05 kg/ha. Esto último concuerda con lo expuesto por Fogliata (2023) para el manejo de enfermedades en limón.

Evaluación de fruta

Los resultados de la evaluación de la calidad de fruta se pueden observar en la Tabla 7. Ni la fruta “embalable”, ni la de “descarte” ni la media productiva por planta arrojaron diferencias significativas entre los tratamientos. De manera general, se puede apreciar que en la campaña 2018-2019 los valores de fruta embalable fueron menores que los de descarte; en 2019-2020 se observó una paridad entre estos valores, y en 2020-2021 el rendimiento de fruta embalable fue superior al de descarte en todos los tratamientos.

Tabla 7. Medias de rendimiento de fruta en kg/planta, evaluadas en cada campaña.

	Campaña 2018-2019			Campaña 2019-2020			Campaña 2020-2021		
	Embalable	Descarte	Total	Embalable	Descarte	Total	Embalable	Descarte	Total
T1	63,0 a	104,8	167,8	65,0 a	66,3 a	131,3 a	136,2 a	73,7 a	210,0 a
T2				62,5 a	64,0 a	126,5 a	143,7 a	60,0 a	203,7 a
T3	55,8 a	104,1	160,0	67,5 a	55,3 a	128,1 a	146,2 a	55,0 a	201,2 a

Test LSD Fisher Alfa=0,05. Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

CONCLUSIONES

Desde el punto de vista operativo y logístico, el uso del dron resultó ser una herramienta eficiente para determinar el volumen de copa en el cultivo de limonero a lo largo de la campaña de aplicaciones fitosanitarias.

La tasa de aplicación promedio, calculada a partir de información generada por el dron, fue significativamente menor a la convencional en un 33%. Esta reducción en la cantidad de líquido aplicado también implicó una disminución sustancial en el uso de fungicida cúprico. Todo esto puede generar un significativo ahorro en los costos de producción, además de reducir el impacto negativo de esta práctica en el medio ambiente.

El ajuste de las tasas de aplicación a partir de información generada por dron no disminuyó los rendimientos de la calidad de fruta embalable, por lo cual se puede concluir que el uso de dron es una herramienta que permite aumentar la eficiencia de estas operaciones.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Aranda, N. D.; C. Moyano; D. Figueroa; N. Mitrovich; M. I. Valdez; H. Salas; L. Saravia; M. Avellaneda y S. Palacio. 2023. Estimación de la altura y el volumen de copa de limonero (*Citrus limon*) mediante el uso de dron y un método manual. EEAOC – Revista Industrial Agrícola de Tucumán 100 (2).
- Carreras Baldrés, J. I.; C. Fandos; J. F. Soria; P. Scandaliaris; D. Figueroa y H. Salas. 2024. Diferenciación de edades de plantaciones en el monte cítrico tucumano al año 2024. EEAOC, Reporte Agroindustrial 329.
- Colauto Stenzel, N. M.; C. S. Viera Janeiro Neves; M. B. Dos Santos Scholz e J. C. Gomes. 2005. Comportamento da laranjeira ‘Folha Murcha’ em sete porta-enxertos no Noroeste do Paraná. Rev. Bras. Frutic. 27 (3): 408–411. Disponible en: <https://www.scielo.br/j/rbfa/a/sD6wR4PDYjN9Jvc8Ygdtm9c/?format=pdf&lang=pt>.
- Da Silva M. y H. H. Ramos. 2017. Manual de Tecnología de Aplicación en Citrus. (J. Ribas Ed.) Fundecitrus. Vila Melhado, Araraquara, S.P., Brasil.
- Di Rienzo J. A.; M. Balzarini; F. Casanaves; L. Gonzáles; M. Tablada y C. W. Robledo. 2020. Infostat Profesional. Versión 2020. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>
- Fogliata, M. G. 2023. Situación actual de las enfermedades cuarentenarias de los cítricos en el noroeste Argentino (NOA) y avances en investigación. En X

congreso Argentino de Citricultura (pp. 88). Concordia, Entre Ríos, Argentina. Ed. J. P. Bouvet (EEA Concordia – INTA).

Galeano Roa; B. A.; J. Sánchez - Hermosilla López; F. Aguera Vega y P. Martínez Carricondo. 2025. Prototipo de bajo coste para pulverización adaptada en cultivos en invernadero: resultados preliminares. Simposio CEA de Robótica, Bioingeniería, Visión Artificial y Automática Marina 2025. Almería, España. En: <https://doi.org/10.64117/simposioscea.v1i1.20> . Consultado: en julio 2025

Guevara-Bonilla, M. 2020. Uso de vehículos aéreos no tripulados (VANT's) para el monitoreo y manejo de los recursos naturales: una síntesis. Revista Tecnología en Marcha 33 (4), octubre-diciembre 2020.

Larios Adorno, J. D. 2008. Técnica de Atomización según Volumen Vegetativo (T.R.V.). En <https://es.scribd.com/document/317365805/1195-Tecnicas-de-atomizacion-segun-volumen-vegetativo-T-R-V-1-pdf>. Consultado en Julio 2025.

Manual de operaciones de la empresa John Bean

Sprayers. 1997. Operator's Manual. Model 993 y 1093 Speedprayer. Manual N° 5281690. John Bean Sprayer, 395 Industrial Drive, Hogansville, GA 30230.

Microsoft Corporation. 2016. Microsoft Excel 2016. URL <https://support.microsoft.com/es-es/office/descargar-e-instalar-o-reinstalar-office-2021-office-2019-u-office-2016-7c695b06-6d1a-4917-809c-98ce43f86479>.

Palacios, J. 2005. Citricultura. Editorial Alfa Beta, Argentina.

Salas, H.; H. Vinciguerra; C. Mansilla; D. Figueroa; L. Goane; A. Rojas; B. Carrizo y A. Campos. 2012. Manejo de plagas y enfermedades en limonero utilizando diferentes volúmenes de aplicación y dosis de activos. EEAOC - Revista Avance Agroindustrial, 33 (3).

Zuccardi, R. B. y G. S. Fadda. 1985. Bosquejo Agrológico de la Provincia de Tucumán. [En Línea] Disponible en: <https://www.edafologia.org/descargas/>. Consultado: julio 2025.



Revista Industrial
y Agrícola de
Tucumán

ISSN 0370-5404

En línea
1851-3018

Tomo 102 (2):
22-27; 2025



ESTACION EXPERIMENTAL
AGROINDUSTRIAL
OBISPO COLOMBRES
Tucumán | Argentina

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

Aplicación de giberelina con adición de urea para retrasar el color de los frutos de limón (*Citrus limon*)

Nelson D. Aranda*, Franco A. García*, Diego Reinoso**, M. Inés Valdez* y Dardo Figueroa*

* Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC) AV. William Cross 3150, Las Talitas (4101) Tucumán, Argentina. Tel.: +54 381 452100. Int. 135. ** Empresa Agroalianza S.A. Ruta 315 esquina Roca, Tafí Viejo (4103) Tucumán, Argentina. Email: ndaranda@eeaoc.org.ar .

RESUMEN

El cambio de color de la fruta de limón es clave en su comercialización como fruta fresca. El objetivo del presente estudio fue evaluar la eficacia del ácido giberélico (GA_3), en combinación con urea foliar, para retrasar la coloración de frutos de limón (*Citrus limon*). El ensayo se realizó en una finca de variedad Lisboa Frost injertada sobre Citrumelo 4475, bajo un diseño de bloques al azar con cinco tratamientos: i) testigo, ii) GA_3 15 ppm, iii) GA_3 15 ppm + urea 1%, iv) urea 1% y v) GA_3 30 ppm. Se determinó el Índice de Color en Citrus (ICC) y la distribución de categorías de color en distintas etapas. Los tratamientos con GA_3 , especialmente GA_3 30 ppm y GA_3 15 ppm + urea 1%, retrasaron significativamente el avance de la coloración respecto al testigo hasta 42 días después de la aplicación (DDA), mientras que GA_3 15 ppm lo hizo hasta los 33 DDA. La urea sola no mostró efecto. Al momento de la cosecha (61 DDA), los frutos tratados con GA_3 conservaron una tonalidad verdosa frente al amarillo del testigo. La adición de urea permitió reducir la dosis de GA_3 , representando una alternativa eficiente y económicamente ventajosa.

Palabras clave: ácido giberélico, urea foliar, índice de color.

ABSTRACT

Application of gibberellin with added urea to delay the coloring of lemon fruit (*Citrus limon*)

The color change of lemon fruit is key to its commercialization as fresh fruit. The objective of this study was to evaluate the effectiveness of gibberellic acid (GA_3) in combination with foliar urea in delaying the coloration of lemon fruit (*Citrus limon*). The trial was conducted on a farm growing the Lisboa Frost variety grafted onto Citrumelo 4475, using a randomized block design with five treatments: i) control, ii) GA_3 15 ppm, iii) GA_3 15 ppm + urea 1%, iv) urea 1%, and v) GA_3 30 ppm. The Citrus Color Index (CCI) and the distribution of color categories at different stages were determined. The GA_3 treatments, especially GA_3 30 ppm and GA_3 15 ppm + urea 1%, significantly delayed the progress of coloration compared to the control until 42 days after application (DDA), while GA_3 15 ppm did so until 33 DDA. Urea alone had no effect. At harvest (61 DPA), the fruits treated with GA_3 retained a greenish hue compared to the yellow of the control. The addition of urea allowed the GA_3 dose to be reduced, representing an efficient and economically advantageous alternative.

Key words: gibberellic acid, foliar urea, color index.

Fecha de
recepción:
20/08/2025

Fecha de
aceptación:
03/10/2025

INTRODUCCIÓN

A medida que avanza la maduración de los frutos de limón, los tejidos de la cáscara comienzan a pigmentarse debido a la pérdida progresiva de clorofilas y al incremento de carotenoides. En consecuencia, el color de la cáscara cambia de verde a amarillo (Agustí *et al.*, 2020).

En la cosecha de invierno, si esta no se completa hasta principios de la primavera, gran parte de los frutos caerá del árbol al madurar. Los limones que quedan en el árbol para la cosecha tardía desarrollan un color amarillo oscuro. Aunque no existen regulaciones en lo que respecta al color, se reconoce que se pagan precios superiores por frutos de color amarillo claro. Para extender la cosecha de limón, cuando la demanda es alta, se debe regular el color de la fruta para satisfacer la demanda del mercado (El-Zeftawi, 1980).

Una práctica muy usada para retrasar el cambio del color de los cítricos es la aplicación de ácido giberélico (GA_3). Este tratamiento, cuando el fruto comienza a cambiar de color, retarda la degradación de la clorofila y la síntesis de carotenoides (Sánchez, 2000).

En la provincia de Tucumán, Aranda y Valdez (2019) demostraron la eficacia del uso de giberelina foliar para retrasar el color de los frutos de limón. Además, según Agustí *et al.* (2020), la adición de compuestos nitrogenados -como urea- al caldo de aplicación estimula la acción de la giberelina, permitiendo disminuir las dosis de aplicación.

En Argentina, no existen antecedentes publicados sobre la aplicación de giberelina combinada con ferti-

lizantes nitrogenados. Por este motivo, se propuso realizar un ensayo para evaluar el impacto de la aplicación de giberelina (GA_3) con la adición de urea foliar sobre el retraso de la coloración del limón.

MATERIALES Y MÉTODOS

Ensayo:

El ensayo se realizó en la finca Nogal 2 de la empresa Agroalianza, ubicada en la localidad de La Calera, departamento Alberdi, provincia de Tucumán, Argentina (coordenadas geográficas: 27° 34' 57" latitud sur y 65° 43' 56" longitud oeste; Figura 1). El lote fue plantado en 2018 con limonero (*Citrus limon*), variedad Lisboa Frost nucelar injertado sobre Citrumelo 4475, en un marco de 7,5 m x 4 m.

Tratamientos:

La aplicación se realizó el 7 de mayo de 2025, con una turbo pulverizadora Hidroneumática FMC de 2000 l de capacidad, con un volumen de 15 l por planta, dirigido con un solo lateral de empicado (media ala, Figura 2). Los tratamientos realizados se especifican en la Tabla 1. Para aumentar la eficiencia de penetración del producto, se ajustó el pH del caldo a 4,5 con la adición de 500 cc de ácido fosfórico cada 1000 l de agua.

El diseño fue en bloques al azar con cuatro repeticiones por tratamiento. Cada parcela estaba constituida por ½ fila de aproximadamente 12 plantas, con sus respectivas borduras.

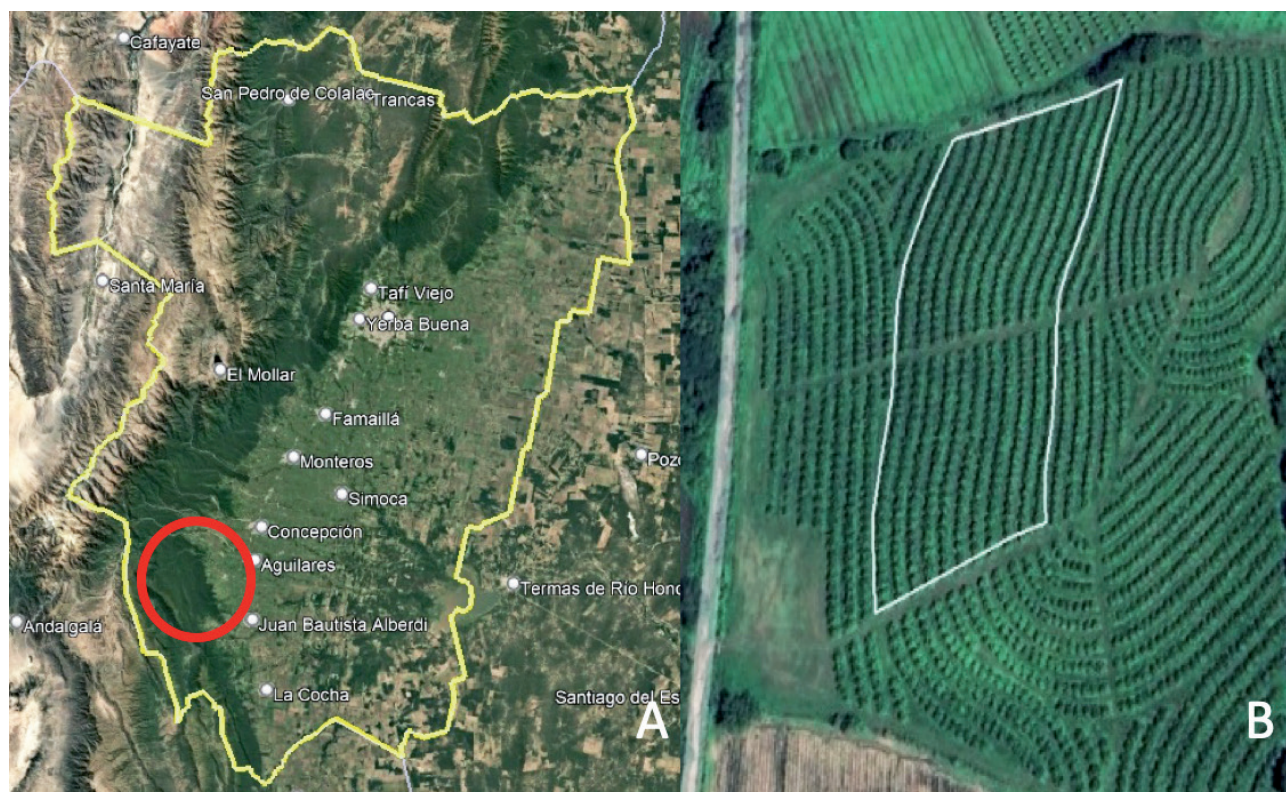


Figura 1. A. Ubicación del ensayo en la finca El Nogal 2 (círculo rojo) en la provincia de Tucumán, Argentina. B. El polígono blanco indica el sector de la finca donde se evaluaron los tratamientos.



Figura 2. A: Aplicación de ensayo utilizando media a la de la turbo pulverizadora. B: Color y mojado de fruta en el momento de la pulverización.

Tabla 1. Especificaciones de los tratamientos.

Tratamiento	Especificaciones
T1	Testigo sin aplicar
T2	GA ₃ (15 ppm)*
T3	GA ₃ (15 ppm)* + Urea (1%)
T4	Urea (1%)
T5	GA ₃ (30 ppm)*

* Producto Comercial (P.C.) usado: ácido giberélico al 10 %.

Evolución del ICC a campo:

Se evaluó el Índice de Color en Citrus (ICC) realizando lecturas con colorímetro Konica Minolta CR 400, en pre aplicación y pos aplicación, mediante la relación propuesta por Jiménez-Cuesta *et al.* (1981): $IC = 1000 \times a / (L \times b)$ donde L: Luminosidad del negro al blanco; a: de rojo a verde; y b: del amarillo al azul. Se siguió la evolución del mismo durante la campaña.

Para las mediciones a campo, se marcaron 20 frutas por repetición, 10 de cada lado de la fila, con un total de 80 frutas por tratamiento, y se realizaron periódicamente lecturas a campo, desde la pre aplicación hasta la cosecha (Figura 3).

Para comparar los tratamientos, se evaluaron las medias del ICC a lo largo del tiempo con modelos generales y mixtos mediante el soporte Infostat (Di Rienzo *et al.*, 2020), se determinó la interacción entre el ICC y los días después de la aplicación (DDA).

Con los resultados de cada medición, se elaboraron gráficos de barras en Microsoft Excel para clasificar la distribución del color en cada tratamiento. La clasificación



Figura 3. A: Frutas marcadas para mediciones a campo. B: Detalle de fruta marcada.

se basó en el ICC, siguiendo las categorías propuestas por Aranda y Valdez (2019). La denominación de los colores, según la apreciación visual a campo, fue la siguiente: Verde oscuro: valores de ICC < -13, Verdes: ICC entre -13 y -10, pinto oscuro: ICC entre -10 a -6, pinto: entre -6 a -2, pinto claro: entre -2 a 0, amarillo: entre 0 a 2 y bronceado: ICC > 2 (Figura 4).

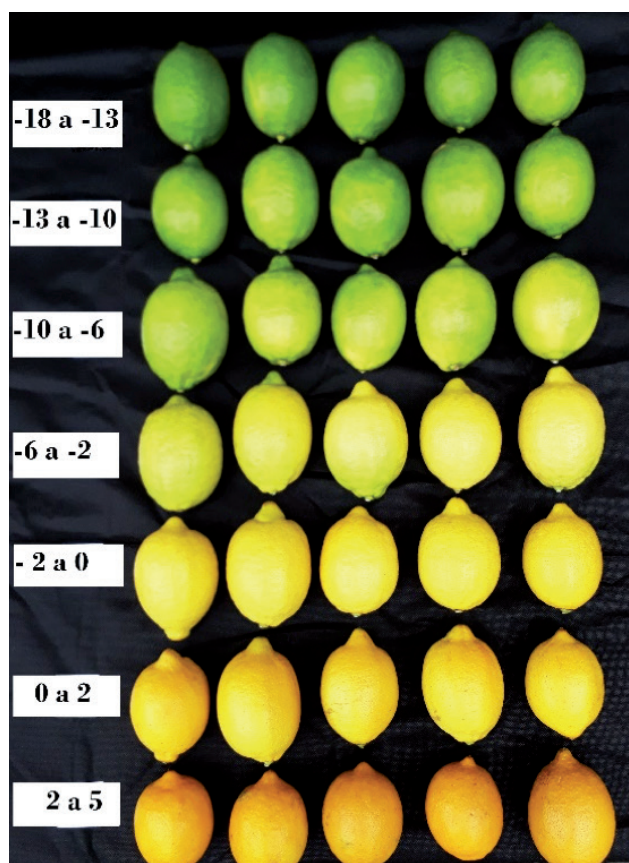


Figura 4. Rangos de valores de ICC en limón, según Aranda y Valdez (2019). Valores más bajos corresponden a frutos verdes y valores más altos, con mayor coloración amarilla.

RESULTADOS

Evolución temporal del ICC

El resultado del análisis estadístico de las medias de ICC se presenta en la Tabla 2. En pre aplicación y el día 0 (momentos antes de la aplicación), se observa un aumento en los valores, lo que indica el progresivo cambio de color de la cáscara (de pinto oscuro a pinto). Para estos momentos, como se preveía, no se detectaron diferencias estadísticas entre tratamientos, lo que confirma la uniformidad inicial del ICC.

Desde la pre aplicación hasta los 61 DDA se incrementaron los valores de ICC (evidenciando la pérdida de color verde). Sin embargo, los tratamientos con GA₃, 15

ppm (T2), 30 ppm (T5) y la combinación de 15 ppm + urea 1% (T3) retrasaron significativamente el avance de la coloración de la fruta respecto al testigo (T1) y la aplicación de urea 1% (T4). Estas diferencias se mantuvieron hasta los 33 DDA para el tratamiento T2 y hasta los 42 DDA para T3 y T5. Esto queda evidenciado en los valores de ICC a los 42 DDA, donde T3 y T5 mantienen ICC significativamente inferiores al resto (-2,8 y -3,2 respectivamente), mientras que T2 pierde significancia frente al testigo. Esto sugiere que el efecto de GA₃ 15 ppm sin urea es más corto que la de GA₃ 30 ppm o GA₃ 15 ppm + urea. A los 61 DDA (momento de la cosecha), las diferencias entre los tratamientos desaparecen, lo que indica similitud de los valores de ICC. Esto confirma que el retraso en la coloración es temporal. Sin embargo, los tratamientos con GA₃ (T2, T3, T5) poseen una coloración pinto claro, mientras que en el testigo (T1) y el tratamiento con urea 1% (T4) es amarillo. Esto implica que los tratamientos con GA₃ causaron una menor degradación de clorofila y una menor síntesis de carotenoides. Este comportamiento es consistente con lo observado en otros cítricos (El-Zeftawi, 1980; Sánchez, 2000) y en estudios previos en limón en Tucumán (Aranda y Valdez, 2019).

La Figura 5 muestra la evolución temporal del ICC, donde T1 y T4 presentan las pendientes más pronunciadas entre 0 y 30 DDA, mientras que T2, T3 y T5 muestran incrementos más graduales. El tratamiento T5 se mantiene siempre por debajo de los demás, con la pendiente más suave. Desde los 30 a 60 DDA, las pendientes se suavizan hasta aplanarse, indicando poca variación del ICC hasta el final.

La diferencia más notable entre tratamientos se observa entre 20 y 40 DDA, donde T1 y T4 tienen los valores más altos de ICC, y T5 los menores valores. Se observa también cómo, a los 40 DDA, T2 se aproxima a los tratamientos T1 y T4, lo que reduce la diferencia estadística en los valores de ICC.

Distribución de colores en los frutos

La distribución de colores en pre aplicación (23 de abril) es similar entre los tratamientos, predominando los colores “pinto oscuro” con valores aproximados al 40%, seguido por el “pinto” entre 26% y 40%, y “verde” entre el 13% y 26%. El 16 de junio (22 DDA), se observa claramente que T1 y T4 tienen una gran porción de amarillos y bronceados (~70 %), mientras que T2, T3 y T5 conservan mucho más verde y pinto oscuro (~70 %). Si bien esto tiene relación con la comparación de valores promedio de ICC, la distribución de color muestra aún más contraste entre tratamientos. A los 42 DDA, la tendencia

Tabla 2. Evolución del Índice de Color de Citrus (ICC) y apreciación visual del color de la fruta de limón a lo largo del tiempo.

Tratamiento	Pre aplicación (23/04)		Aplicación (07/05)		9 DDA (16/05)		22 DDA (29/05)		33 DDA (09/06)		42 DDA (18/06)		61 DDA Cosecha (03/07)	
	ICC	Color	ICC	Color	ICC	Color	ICC	Color	ICC	Color	ICC	Color	ICC	Color
T1	-10,9 e	P. O.	-8,5 d	P.	-6,0 c	P.	-3,5 b	P. C.	-1,5 a	A.	-1,1 a	A.	-1,0 a	A.
T2	-10,6 e	P. O.	-8,7 d	P.	-7,2 d	P.	-5,8 c	P. C.	-3,6 b	P. C.	-2,4 a	P. C.	-2,0 a	P. C.
T3	-11,1 e	P. O.	-8,6 d	P.	-7,4 d	P.	-5,8 c	P. C.	-3,8 b	P. C.	-2,8 b	P. C.	-2,0 a	P. C.
T4	-10,3 e	P. O.	-8,5 d	P.	-6,3 c	P.	-3,6 b	P. C.	-1,3 a	A.	-1,2 a	A.	-1,1 a	A.
T5	-11,2 e	P. O.	-8,8 d	P.	-7,9 d	P.	-6,2 c	P.	-3,9 b	P. C.	-3,2 b	P. C.	-2,1 a	P. C.

Color: P.O.: Pinto Oscuro; P.: Pinto; P.C.: Pinto Claro; A.: Amarillo. **Días:** DDA: Días Después de Aplicación.

Test: DGC Alfa = 0,05 Medias con una letra común no son significativamente diferentes ($p > 0,05$).

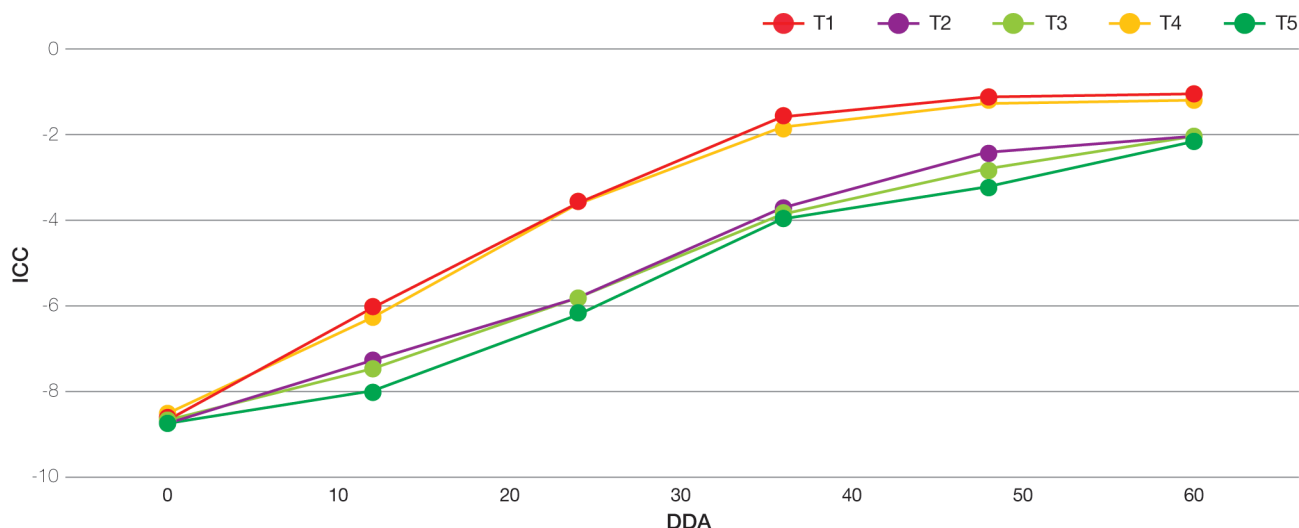


Figura 5. Evolución del índice de color de Citrus (ICC) durante 60 días después de la aplicación (DDA) de cinco tratamientos (T1-T5). Los valores de ICC negativos indican predominio de color verde, mientras que los cercanos a cero representan colores amarillos.

se mantiene, con predominio de los colores amarillos y bronceados en los tratamientos T1 (86%) y T4 (76%). En contraste, estos mismos colores en los demás tratamientos tienen valores de 41% (T3), 57% (T2) y 37% para el T5. A los 61 DDA, si bien el análisis estadístico no arroja diferencias significativas en el momento de la cosecha, en la distribución de colores existe mayor porcentaje de fruta “pinto claro” en los tratamientos con giberelina T2, T3 y

T4, y menos color amarillo que en T1 y T4 (Figura 6).

En la Figura 10 se exhiben las muestras extraídas de cada tratamiento al momento de cosecha. En los tratamientos que contenían GA_3 (T2, T3 y T5), se observa una leve tonalidad verdosa, sobre todo en los extremos de la fruta, coincidente con la denominación de color pinto claro, mientras que los T1 y T4 arrojaron valores del ICC correspondientes al color amarillo.

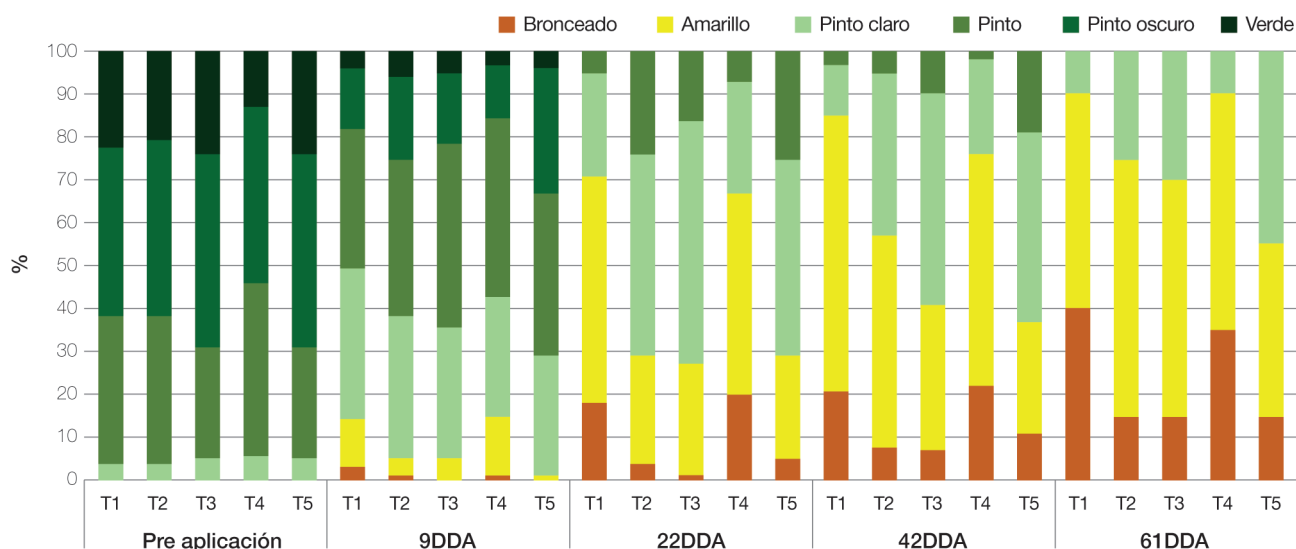


Figura 6. Distribución porcentual de categorías de color de cáscara en frutos de limón de los diferentes tratamientos (T1-T5), evaluada desde preaplicación hasta 61 días después de la aplicación (DDA).

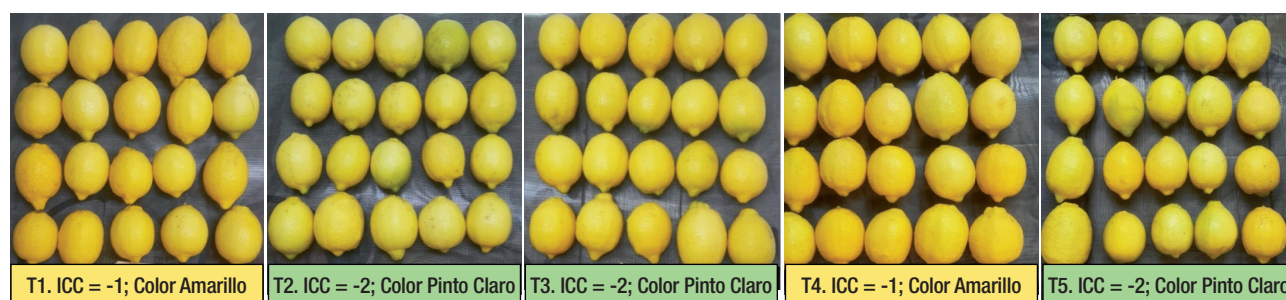


Figura 7. Apreciación visual de los colores de la fruta al momento de cosecha.

■ CONCLUSIONES

El uso de 15 ppm de GA3 en combinación con 1% de urea representa una alternativa eficiente y económicamente ventajosa frente a la aplicación de 30 ppm de GA₃. Ambos tratamientos logran un efecto similar en el retraso de la coloración de los frutos de limón.

La aplicación debe realizarse en el momento en que los frutos comienzan a cambiar de color.

La integración de esta práctica dentro de un plan de manejo de cosecha escalonada puede favorecer la disponibilidad de fruta con color comercial óptimo en períodos de mayor demanda y mejor precio.

■ BIBLIOGRAFÍA CITADA

Agustí, M.; C. Mesejo y C. Reig. 2020. Citricultura 3a Edición. Editorial Mundiprensa, España.

Aranda, N. e I. Valdez. 2019. El color del limón, ¿Hormonas al servicio de exigencias de mercado? Avance Agroindustrial 40 (1): 10-13.

Di Rienzo, J. A.M M. Balzarini; F. Casanaves; L. González; M. Tablada y C. W. Robledo. 2020. Infostat Profesional. Versión 2020. Facultad de Ciencias Agropecuarias. Universidad Nacional de Córdoba. Argentina. URL <http://www.infostat.com.ar>

El-Zeftawi. 1980. Effects of Gibberellic Acid and Cycocel on Colouring and sizing of lemon. Scientia Horticulturae 12: 177-181.

Jiménez-Cuesta, M.; J. Cuquerella and J. M. Martínez-Jávega. 1981. Determination of a color index for citrus fruit degreening. Proceeding International Society Citriculture 2: 750-753.

Sanches, F. R. 2000. Aplicação de biorreguladores vegetais. Aspectos fisiológicos e aplicações práticas na citricultura mundial. Editorial AEDOS, Brasil.



Revista Industrial
y Agrícola de
Tucumán

ISSN 0370-5404

En línea
1851-3018

Tomo 102 (2):
28-33; 2025



ESTACION EXPERIMENTAL
AGROINDUSTRIAL
OBISPO COLOMBRES
Tucumán | Argentina

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

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

Fecha de
recepción:
26/09/2025

Fecha de
aceptación:
29/09/2025

Gasificación de residuos de cosecha como alternativa energética sostenible en la industria sucroalcoholera de Tucumán, Argentina

Federico J. Franck Colombres*, **, Enrique A. Feijoó*, L. Patricia Garolera de Nucci*,
Gisela F. Díaz* y Marta C. Cruz*

* Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales – Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres, Tucumán, Argentina; **Departamento de Mecánica – Universidad Nacional de Tucumán, Av. Independencia 1800, S. M. de Tucumán, Tucumán, Argentina. Email: federicofranck@gmail.com

RESUMEN

En Tucumán, el bioetanol se produce principalmente en destilerías anexas a centrales azucareras que consumen energía térmica y eléctrica, proveniente en gran medida del bagazo generado, lo que contribuye a la sostenibilidad de su proceso. Sin embargo, también se utilizan combustibles fósiles para cubrir sus necesidades energéticas. El objetivo de este trabajo fue estudiar el uso de residuos agrícolas de la cosecha de la caña de azúcar mediante el proceso de gasificación con aire, para reducir el consumo de combustibles fósiles. Se propuso un esquema de utilización y una tecnología de gasificación adecuada; se determinaron los flujos para el balance de materia y energía; y se propuso un modelo matemático. Se estimó el desempeño del gas de gasificación en una caldera de gas natural mediante un análisis comparativo basado en un ensayo con gas natural. Se determinó la eficiencia de la caldera utilizando gas de gasificación, su consumo para sustituir el gas natural y la cantidad de residuos de cosecha necesarios para alimentar el gasificador. Dada la naturaleza biogénica del carbono de los residuos de cosecha, se estimaron las emisiones evitadas de gases de efecto invernadero como la diferencia entre las emisiones de la combustión del gas natural y las de la combustión del diésel consumido en la logística de los residuos de cosecha. Los resultados muestran que para eliminar el gas natural se necesitarían 14 kg de gas de gasificación por kg de gas natural y se obtendrían 2,763 kg de gas de gasificación por kg de residuo de cosecha, es decir, 5,07 kg de residuo de cosecha por kg de gas natural. Mediante la tecnología de gasificación, parte de los residuos de cosecha podrían utilizarse para sustituir completamente el gas natural y reducir las emisiones de CO₂ en un 94%.

Palabras clave: bioenergía, biocombustible, energía limpia, residuos agrícolas, proceso termoquímico.

ABSTRACT

Gasification of harvest residues as a sustainable energy alternative in the sugarcane agroindustry of Tucumán, Argentina

In Tucumán, bioethanol is produced mainly from distilleries annexed to sugarcane plants that consume thermal and electrical energy supplied largely from the bagasse generated, which contributes to the sustainability of their process. However, additional fossil fuels are also used in the process to supply their energy requirements. The objective of this work was to study the use of agricultural residues from sugarcane harvests, using gasification process with air, to reduce fossil-fuel consumption. A utilization scheme and an appropriate gasification technology were proposed, the flows were determined for the material and energy balance, and a mathematical model proposed. The performance that the gasification gas shows in a natural gas boiler was estimated through a comparative

analysis based on a test with natural gas. The efficiency of the boiler using gasification gas, its consumption to replace natural gas and the amount of harvest residues necessary to feed the gasifier were determined. Given the biogenic carbon of the harvest residues, avoided greenhouse gas emissions were estimated as the difference of the emissions from natural gas combustion with those from the combustion of diesel consumed in the logistics of the harvest residues. The result shows that to eliminate natural gas 14 kg of gasification gas/kg of natural gas would be needed and 2.763 kg of gasification gas/kg of harvest residue would be obtained, that is, 5.07 kg of harvest residue/kg of natural gas. Through gasification technology, part of the harvest residues could be used to replace natural gas entirely and reduce CO₂ emissions by 94%.

Key words: bioenergy, biofuel, clean energy, agricultural residue, thermochemical process.

INTRODUCCIÓN

El sector azucarero es la principal actividad agro-industrial de Tucumán, con 294.470 ha dedicadas al cultivo, 14 ingenios azucareros y 10 destilerías anexas. Estas plantas industriales requieren energía térmica y eléctrica, que se obtiene principalmente del bagazo, pero también de combustibles fósiles, gas natural (GN) o fueloil. El residuo agrícola de la cosecha de la caña (RAC) se emplea como cobertura del suelo, pero quedan aún remanentes sin aprovechar. Mediante una tecnología adecuada, estos podrían emplearse para abastecimiento de energía de la industria sucroalcoholera. Los sistemas más difundidos para aprovechamiento energético de biomásas similares al RAC emplean tecnologías de combustión; sin embargo, el RAC tiene características particulares, principalmente en cuanto a la baja temperatura de fusión de cenizas, que complican dicho proceso. La gasificación se presenta como una alternativa, ya que se realiza a temperaturas más bajas que la combustión. Además, mediante gasificación se pueden lograr eficiencias mayores, y podría em-

plearse también con bagazo. El objetivo de este trabajo es evaluar el aprovechamiento del RAC para abastecimiento energético de una planta sucroalcoholera tipo de Tucumán mediante gasificación.

MATERIALES Y MÉTODOS

Quantificación, valoración y logística de la biomasa

En Tucumán se estima una generación de RAC de 150 kg base seca por TC (tonelada de caña) y se recomienda extraer entre el 30% y 70% en función de las condiciones agroecológicas, con una media del 50% (Casen *et al.*, 2019). La humedad del RAC al momento de la cosecha (40-50%) es alta para gasificación, pero con secado natural a campo, de entre 10 y 15 días, puede llegar a valores del 15% (Aso *et al.*, 2008), humedad con la cual la biomasa es apta para ser gasificada. En base a Feijóo (2018), se propone el esquema de logística del RAC de la Figura 1, con un consumo de gasoil de 11,24 l/t RAC y

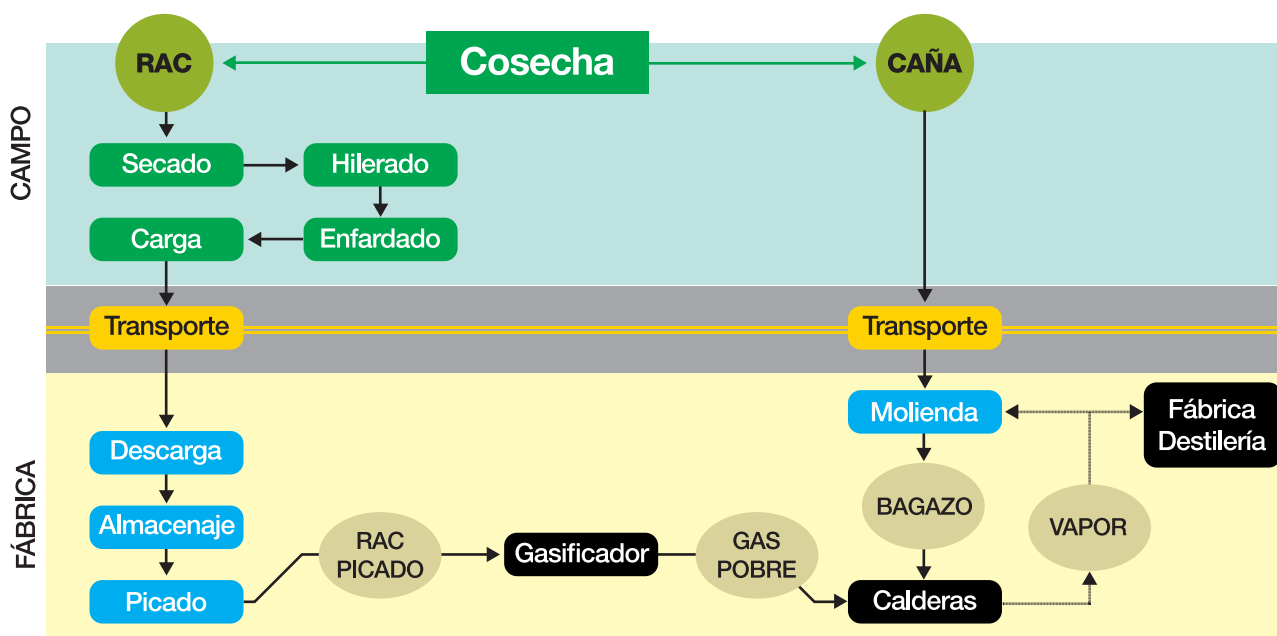


Figura 1. Logística del RAC para su aprovechamiento energético.

2,65 kg CO₂/l de gasoil.

Caso base

Tucumán cuenta con 10 destilerías anexas a ingenios azucareros, con diferentes capacidades y esquemas productivos, que emplean como materia prima para la producción de etanol fluidos azucarados de distintas procedencias y proporciones, con lo cual varían las cantidades relativas de azúcar y alcohol producidas, así como el consumo energético del proceso. Un proceso que maximice la cantidad de azúcar a obtener consume relativamente menos vapor (Diez *et al.*, 2019); por ello, se asumió una planta hipotética que emplee todo el jugo de la caña para producir azúcar blanco directo, produzca alcohol con la miel final y concentre la vinaza (Tabla 1).

Tabla 1. Datos de entrada para la resolución de los balances.

zafra (producción de azúcar y alcohol)	150	días
interzafra (producción sólo de alcohol)	180	días
molienda	10.000	t/día
humedad bagazo	51,4	%caña
jugo	100	%caña
azúcar	10,79	%caña
melaza	4,58	%caña
vapor escape	55	%caña
alcohol total producido	12,3	l/TC
consumo de vapor en destilería	4,5	kg vapor/l de alcohol
consumo de vapor en deshidratadora	2,5	kg vapor/l de alcohol
vinaza cruda	11	l vinaza/l alcohol
concentración vinaza cruda	10	Bx
concentración vinaza concentrada	35	Bx
vapor en concentración de vinaza	0,35	kg vapor/l vinaza
temperatura (t) del vapor	320	°C
presión (p) del vapor	21	bar
temperatura del agua alimentación	95	°C
rendimiento calderas a bagazo (η_B)	62	%
rendimiento calderas a GN (η_{GN})	76,3	%

Balances de materia y energía del caso base

A partir de los datos de Tabla 1, se determinó la molienda anual, la producción de azúcar y melaza, así como la capacidad de almacenamiento de melaza requerida y la capacidad de producción de etanol necesarias para la destilería, considerando que opera a plena carga, en forma constante, tanto en zafra como en interzafra.

Se determinó la cantidad de bagazo (B) generado con la molienda, y con ella, teniendo en cuenta el rendimiento de calderas (η_B), el poder calorífico inferior (PCI) y entalpías (h) del vapor (h_v) y del agua (h_a), se determinó la cantidad de vapor (V) generada a partir del mismo (V_B) mediante Ec. 1.

Se determinó el vapor en zafra y, a continuación, se calculó la cantidad de vapor generado con GN durante zafra (V_Z) como la diferencia entre el vapor total en zafra y el V_B . Con la Ec. 2 se determinó la cantidad de GN consumida en zafra (GN_Z).

Ecuación 1

$$V_B = \frac{\eta_B \cdot B \cdot PCI_B}{(h_v - h_a)}$$

Ecuación 2

$$GN_Z = \frac{V_Z \cdot (h_v - h_a)}{\eta_{GN} \cdot PCI_{GN}}$$

De igual manera se determinaron los consumos de vapor y GN en interzafra (V_I , GN_I).

Los caudales máxicos se expresaron en kg/h y las entalpías y poderes caloríficos en kJ/kg.

Aprovechamiento del gas de gasificación

Se propone la combustión del gas de gasificación, en primera instancia para la generación de energía térmica únicamente, y se adopta un gasificador con aire. Así, el gas generado resulta un gas pobre (GP), de relativamente bajo poder calorífico, que podría aprovecharse de distintas maneras: caliente, como sale del gasificador, o limpio y frío; en calderas existentes o en instalaciones nuevas diseñadas para tal fin; como único combustible, o en combinación con bagazo u otros combustibles. Podrían también considerarse combinaciones de estas alternativas. En este caso, se analizó a modo de ejemplo la alternativa de usar GP caliente en una caldera existente de GN.

La selección del tipo específico de gasificador dependerá de múltiples factores (Franck Colombres, 2017). En este caso, aunque los requerimientos del gas no serían muy exigentes debido al uso propuesto del GP mediante combustión, se seleccionó un gasificador de lecho fluidizado, ya que se trata de un proceso continuo y permitiría, a futuro, realizar mejoras para la generación de energía adicional en un sistema integrado con turbina de gas.

Gasificación de la biomasa residual

El desempeño de los gasificadores se evaluó en este caso mediante la eficiencia de gas caliente (η_c), relación entre la energía del GP (E_{GP}), obtenida con el PCI del GP (PCI_{GP}) más su entalpía (h_{GP}), y la energía entregada con el PCI del combustible (PCI_{RAC}), despreciando la energía de equipos auxiliares, según Ec. 3 y 4 (donde cp: calor específico, r: referencia).

Ecuación 3

$$\eta_c = \frac{GP \cdot (PCI_{GP} + h_{GP})}{RAC \cdot PCI_{RAC}}$$

Ecuación 4

$$h_{GP} = cp_{GP} \cdot (t_{GP} - t_r)$$

Para estimar la eficiencia de gasificación, primero se obtuvo la composición de los gases que abandonan el reactor a partir del planteo y la resolución de un modelo de equilibrio termodinámico. Se asumió una base de 1 kg/h de RAC y se plantearon los balances de materia, asumiendo una conversión del carbono del 85%, temperatura de reacción de 850°C y sistema adiabático. Suponiendo que los gases resultantes están conformados únicamente por

CO₂, CO, CH₄, H₂, N₂ y H₂O, se determinó la composición resultante considerando las constantes de equilibrio K₁ y K₂, las cuales fueron obtenidas de Rodríguez *et al.* (2010). Se conformó así un sistema de nueve ecuaciones con nueve incógnitas (factor de aire y caudal, PCI y contenido de CO₂, CO, CH₄, H₂, N₂ y H₂O del GP), que se resolvió empleando el método de optimización lineal sujeto a múltiples restricciones.

Combustión del gas pobre en una caldera de gas natural

Para evaluar la posibilidad y eficiencia de combustión del GP en una caldera, se realizó un análisis comparativo a partir del ensayo de una caldera de GN, manteniendo el volumen de gases reales en la cámara de combustión. Para ello se determinaron, en primer lugar, las pérdidas porcentuales por radiación, convección e indeterminadas de la caldera con GN a partir del método indirecto y, manteniendo dichas pérdidas, se estimó luego el rendimiento con el GP. Se asumió para la combustión del GP un factor de dilución de 1,10. Empleando el método de Broido (Wohlenberg and Mullikin, 1935), se obtuvo la eficiencia de la radiación en cada caso; con ello se determinó el calor transferido por radiación en la cámara de combustión, así como la entalpía y la temperatura de los gases remanentes en la combustión de GP. Manteniendo los coeficientes de transferencia de calor en el sobrecalentador y el haz convectivo, se calculó la temperatura final de los gases y nuevamente, por el método indirecto, se calculó el rendimiento de la caldera.

La mencionada caldera es de tipo acuotubular compacta a GN de 450 m² de superficie, con una producción nominal de 48 t/h a 1765 kPa(a) y 320°C. Durante los ensayos, la caldera produjo 22,2 t/h de vapor de 1716 kPa(a) y 316,9°C. Se registró 1,8% de O₂ en los gases en base seca. La temperatura del agua de alimentación fue de 106,8°C; la del aire, de 35,9°C; y la temperatura final de los gases, de 316,9°C.

Balance global

Con el rendimiento de la caldera con GP (η_{GP}) y la E_{GP} se calculó el equivalente GP-GN (E_{GP-GN}) según Ec. 5. Con la relación GP/RAC, se determinó el requerimiento de RAC.

Emisiones de dióxido de carbono

Ecuación 5

$$Eq_{GP-GN} = \frac{PCI_{GN} \cdot \eta_{GN}}{E_{GN} \cdot \eta_{GPC}}$$

Para estimar la reducción potencial de gases de efecto invernadero (GEI) se calculó el CO₂ liberado en la logística del RAC y se lo comparó con el producido por la combustión del GN.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Balances del caso base

Las Figuras 2 y 3 representan los resultados de los balances para el caso base, en los períodos de zafra e interzafra, respectivamente. El ingenio tipo por día muele

10.000 TC, produce 1079 t de azúcar y 458 t de melaza, de las cuales 250 almacena para interzafra y 208 emplea para la producción de 56 m³/día de etanol, que se deshidratan para obtener 53 m³/día de bioetanol. Por año muele 1.500.000 TC, produce 161.850 t de azúcar, 17,6 millones de litros de bioetanol, consume 19,2 millones de Nm³ de GN, y se dejan en el campo 264.706 t de RAC (considerado al 15% de humedad).

Gasificación del RAC con el modelo propuesto

En la Figura 4 se presentan los resultados para la gasificación. Se requieren 1,912 kg de aire por kg de RAC, con el cual se obtienen 2,763 kg de GP por kg de RAC con un PCI de 2057 kJ/kg.

Combustión de gas pobre en la caldera de gas natural

Con GN, se obtuvo 76,28% de eficiencia, con pérdidas del 13,18% por calor sensible, de 0,05% por combustión incompleta (CO), y de 10,49% por radiación, convección e indeterminadas. La eficiencia de la radiación fue 51,69%. El coeficiente de transferencia del haz convectivo fue de 250 kJ/m² °C; la temperatura de gases a la salida del hogar, de 973°C; y la temperatura media del hogar, de 1341°C. Para GP la pérdida por calor sensible fue de 14,85%; la eficiencia de radiación, de 51,26%; y la eficiencia de la caldera, de 74,67%. La temperatura a la salida del hogar fue de 939°C; y la temperatura media del hogar, de 1286°C. En comparación con la operación con GN, la capacidad de producción de vapor aumentaría un 3% con GP. La temperatura del vapor sobrecalentado sería 2% menor, por lo que podría llegar a ser necesario modificar los sobrecalentadores y revisar la operación de los atemperadores. El caudal de aire de combustión disminuiría 44%, y el de gases efluentes aumentaría 7%, con lo cual los ventiladores de tiro forzado e inducido deberían ser regulados o modificados para las nuevas condiciones. Los quemadores de GP deberían operar con caudales volumétricos de mezcla (gas-aire) a condiciones reales, alrededor de 150% mayores que para GN, por lo que deberían ser más grandes que los de GN o emplearse más quemadores.

Requerimientos de RAC

Se requiere recolectar durante zafra 520 t/día de RAC, 234 t/día necesarias para reemplazar 46 t/día (57.727 Nm³/día) de GN consumido en zafra, y 286 t/día a almacenar para interzafra, las que se usarían a razón de 238 t/día para reemplazar las 47 t/día (58.690 Nm³/día) de GN consumido en interzafra.

El RAC recolectado en zafra (520 t/día) representa un 29% del correspondiente a la caña molida (1765 t/día), es decir que, aun habiendo asumido valores conservadores, habría suficiente RAC para la propuesta en cualquier región de la provincia; y quedarían aun excedentes para otros usos, considerando los porcentajes de recolección recomendados.

Equivalente GP-GN

Para eliminar el GN, se necesitan 14 kg de GP/kg de GN. Con una producción de 2,763 kg de GP/kg de RAC, se requerirían 5,07 kg de RAC/kg de GN.

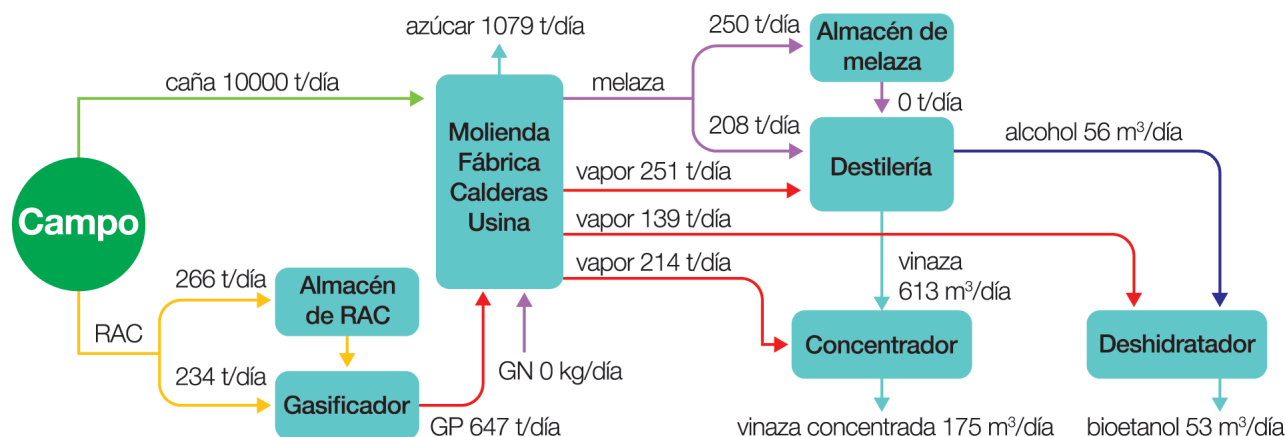


Figura 2. Balances para el caso base durante el período de zafra.

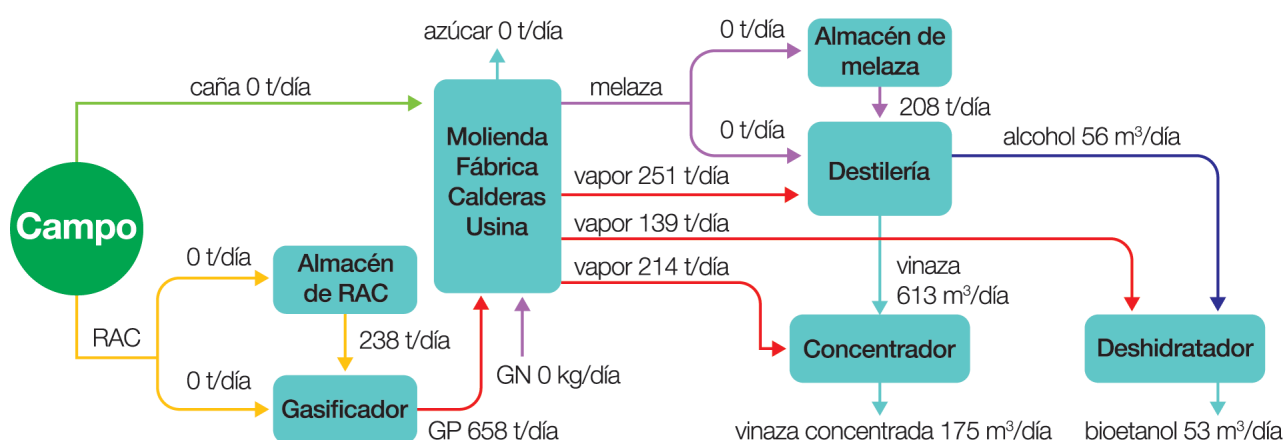
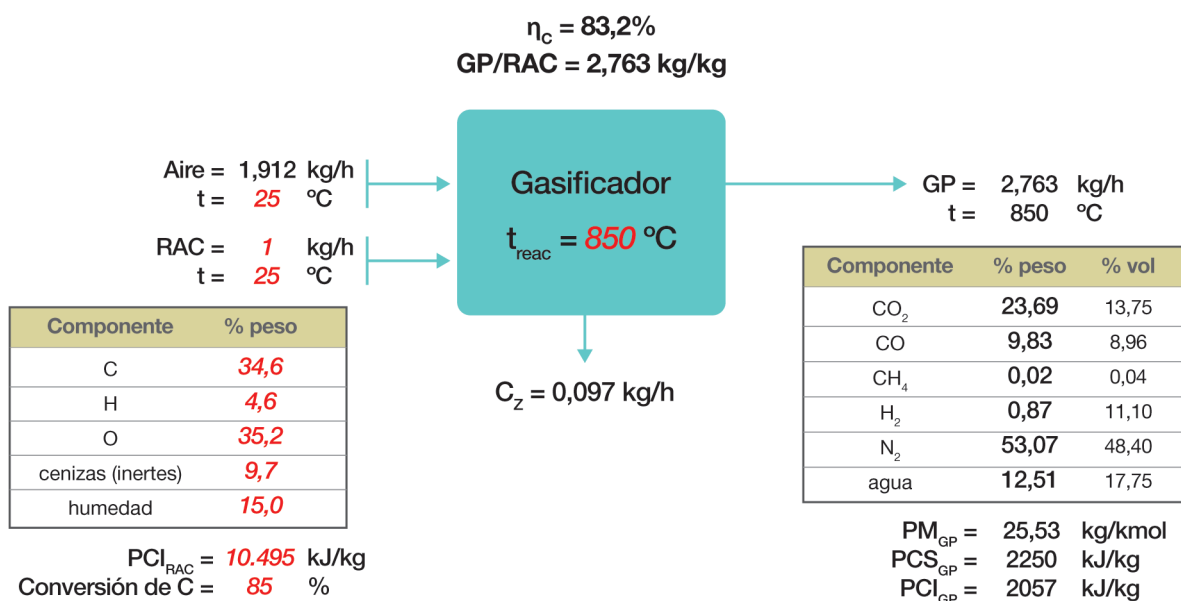


Figura 3. Balances para el caso base durante interzafra.

Balances de masa y energía en el gasificador con RAC



Nota: los valores en *cursiva* corresponden a datos de entrada.

Figura 4. Resultados de balances para la gasificación de RAC.

Reducción de gases de efecto invernadero

La combustión de cada kg de GN produce 2,65 kg CO₂, lo que equivale a 40.782 kg de CO₂ emitidos al año. El CO₂ producido por la combustión del gasoil en la logística del RAC es de 29,79 kg CO₂/t RAC, con lo cual la logística del RAC representaría anualmente 2322 kg CO₂. Esto significa que se podría lograr una reducción de 38.460 kg de CO₂ por año, que representa una reducción del 94,3% respecto a la combustión de GN.

CONCLUSIONES

Una planta sucroalcoholera tipo de Tucumán, de 10.000 TC/día de capacidad, anualmente muele 1.500.000 TC; produce 161.850 t de azúcar y 17,6 millones de litros de bioetanol; consume 19,2 millones de Nm³ de GN y deja 264.706 t de RAC en el campo, del cual podría extraerse entre un 30% y 70%, según la región agroecológica. La gasificación podría emplearse para reemplazar el consumo de GN. Empleando en calderas GP caliente generado en gasificadores de lecho fluidizado con aire, se requerirían 77.935 t de RAC al año, que representan un 29% del RAC correspondiente a la respectiva caña molida, por lo que aún quedaría una fracción de RAC disponible para otros usos. La cantidad de CO₂ producido por la combustión del gasoil en la logística del RAC es de 2,3 t de CO₂/año, mientras que la emitida con gas natural en calderas es de 41 t de CO₂/año, es decir, una reducción de GEI del 94,3%.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Aso, G.; E. A. Feijóo; S. M. Sosa y Dora Paz. 2008.** Residuos agrícolas de la cosecha en verde de la caña de azúcar. Experiencias de secado natural en el campo. *Avance Agroind.* 29 (1): 19-22.
- Casen, S. D.; E. A. Feijóo; C. A. Gómez et al. 2019.** Sugarcane trash bale pallets in two locations in the province of Tucumán: energetic and structural characterization. *Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists* 30: 1625-1636.
- Diez, O. A.; M. N. Russo; R. A. Salazar y R. M. Ruiz. 2019.** Producción simultánea de azúcar y alcohol: optimización energética incluyendo concentración de vinaza. *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán* 96 (1): 35-41.
- Feijóo, E. A. 2018.** Análisis de diferentes opciones logísticas para el uso de residuos agrícolas de la caña de azúcar con fines energéticos en Tucumán. Tesis Especialización en Ingeniería Bioenergética. Universidad Tecnológica Nacional.
- Franck Colombres, F. J. 2017.** La gasificación como alternativa para generación distribuida de energía eléctrica a partir de biomasa residual de Tucumán. Tesis Especialización en Ingeniería Bioenergética. Universidad Tecnológica Nacional.
- Rodríguez, A. D.; A. Zaleta Aguilar; A. Olivares Arriaga y F. F. Torres Chimal. 2010.** Análisis y diseño de un sistema de gasificación de biomasa. Memorias del XVI congreso internacional anual de la SOMIM, México.
- Wohlenberg, W. J. and H. F. Mullikin. 1935.** Review of methods of computing heat absorption in boiler furnaces. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers* 57: 531-540.



Revista Industrial
y Agrícola de
Tucumán

ISSN 0370-5404

En línea
1851-3018

Tomo 102 (2):
34-40; 2025



ESTACION EXPERIMENTAL
AGROINDUSTRIAL
OBISPO COLOMBRES
Tucumán | Argentina

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

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

Fecha de
recepción:
05/09/2025

Fecha de
aceptación:
08/09/2025

Precisión de la selección genómica en poblaciones del programa de mejoramiento de caña de azúcar de la EEAOC

Josefina Racedo*, Ezequiel Rossi**, Andrea N. Peña*, Ana C. Ghio***, Diego D. Henríquez***, Jorge V. Díaz***, Aldo S. Noguera*, María F. Perera* y Santiago Ostengo*

* Instituto de Tecnología Agroindustrial del Noroeste Argentino (ITANO), Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC) - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). CCT CONICET NOA Sur. Las Talitas, Tucumán, T4101XAC, República Argentina. ** Instituto de Investigaciones Agrobiotecnológicas (INIAB, CONICET-UNRC). Río Cuarto, Córdoba, Argentina. *** Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC). Las Talitas, Tucumán, T4101XAC, República Argentina. Email: joracedo@gmail.com

RESUMEN

La selección genómica (SG) es una herramienta prometedora para incrementar la eficiencia en el mejoramiento de caracteres complejos. Se evaluó la precisión de predicción de los valores de mejora estimados a partir de datos genómicos (GEBV, por sus siglas en inglés de *Genomic-estimated breeding value*) en distintas poblaciones de diferentes etapas del Programa de Mejoramiento Genético de la Caña de Azúcar de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (PMGCA-EEAOC). Los modelos de SG fueron entrenados en tres poblaciones de mejoramiento fenotipadas para caracteres de maduración temprana y genotipadas con marcadores SNP obtenidos por DArTseq. Las poblaciones de mejoramiento consistieron en: i) 264 accesiones del banco de germoplasma (BG); ii) 160 individuos en la segunda etapa clonal (2C); y iii) 47 individuos de la etapa de Ensayos Internos de variedades en campo (I). Para todas las predicciones genómicas se utilizó el modelo de predicción lineal insesgada mejorado por genómica (G-BLUP por sus siglas en inglés de *Genomic best linear unbiased prediction*). La eficiencia de la SG fue evaluada mediante validación interna y cruzada, dependiendo de la población. Para BG, la población de entrenamiento (PE) consistió en 264 accesiones, y las precisiones se obtuvieron mediante correlaciones dentro de la población usando una partición 80:20. Para 2C, la eficiencia se evaluó dentro de la población utilizando una partición 80:20, y el modelo estimado se aplicó para estimar los GEBVs en la población I (validación cruzada). Además, se analizó una PE conformada por la combinación de las poblaciones 2C e I, con precisión obtenida a través de correlaciones dentro de la población (80:20). Las mayores eficiencias de SG para BG se observaron en los caracteres pol y azúcar recuperado ($r = 0,43$ y $0,40$, respectivamente). Para 2C e I, las mayores eficiencias de SG se observaron en el contenido de azúcar, tanto al considerar ambas poblaciones conjuntamente ($r = 0,41$), como cuando la PE consistió solo en 2C ($r = 0,43$). Dado que la efectividad de la SG en programas de mejoramiento depende de los datos fenotípicos y moleculares, el modelo de predicción, y el tamaño y composición de la PE, estos resultados son alentadores para continuar desarrollando estrategias que optimicen la PE con el fin de alcanzar mayores precisiones.

Palabras clave: GEBV, marcadores moleculares, DArT-seq, mejoramiento molecular.

ABSTRACT

Accuracy of genomic selection in populations of the EEAOC sugarcane breeding program

Genomic selection (GS) is a promising breeding tool for improving the efficiency of complex trait breeding. The prediction accuracy of genomic breeding values was assessed across populations at different stages of the Sugarcane Breeding Program at the Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (SCBP-EEAOC). GS models were tested in three breeding populations phenotyped for early maturation traits and genotyped using DArTseq SNP markers. The breeding populations consisted of: i) 264 accessions from germplasm bank (GB); ii) 160 individuals in the second clonal stage (2CS); and iii) 47 individuals from infield variety trials stage (IVT). The genomic best linear unbiased prediction

(G-BLUP) model was used for all genomic predictions. The efficiency of GS was evaluated through intra- and cross-validation, depending on the population. For GB, the training population (TR) consisted of 264 accessions, and accuracies were obtained by correlations within population using an 80:20 split. For 2CS, efficiency was evaluated within the population using an 80:20 split, and the estimated model was applied to estimate genomic estimated breeding values (GEBVs) for population IVT (cross-validation). Additionally, a TR consisting of combined 2CS and IVT populations was analyzed, with accuracy obtained through correlations within the population (80:20). The highest GS efficiencies for GB were observed for pol and sugar-recovered traits ($r = 0.43$ and 0.40 , respectively). For 2CS and IVT, the highest GS efficiencies were observed for sugar content when considering both populations jointly ($r = 0.41$), and when the TR consisted only of 2CS ($r = 0.43$). Since the effectiveness of GS in breeding programs depends on the phenotypic and molecular data, the prediction model, and the size and composition of the TR, these results are encouraging for the continued development of strategies to optimize the TR to achieve better accuracies.

Key words: GEBV, molecular markers, DArT-seq, molecular breeding.

■ INTRODUCCIÓN

La selección genómica (SG) es una estrategia cada vez más importante que complementa el mejoramiento convencional. A diferencia de la selección asistida por marcadores (SAM), que utiliza un número reducido de marcadores previamente asociados a genes o QTLs (por sus siglas en inglés de *quantitative trait loci*) de interés, la SG utiliza simultáneamente todos los marcadores distribuidos en el genoma para predecir el valor genético o el desempeño fenotípico de los individuos en una población, incluyendo aquellos QTLs con efectos menores (Meuwissen *et al.*, 2001).

Este valor genético, denominado Valor de Mejora Estimado a partir de datos Genómicos (GEBV, por sus siglas en inglés de *Genomic-estimated breeding value*), resulta de aplicar un modelo estadístico predictivo que integra la información de los marcadores moleculares obtenidos mediante genotipado de alta densidad con los datos fenotípicos de los caracteres de interés. Una vez entrenado el modelo, la implementación exitosa de SG en un programa de mejoramiento requiere validación cruzada, tanto dentro de la población como entre poblaciones. Durante la validación, se evalúa la capacidad predictiva del modelo calibrado comparando los valores predichos con los observados en una nueva población. Una buena calibración asegura que los GEBVs se correlacionen suficientemente con los valores de mejora derivados de los datos fenotípicos.

Dada la importancia de incrementar la eficiencia del Programa de Mejoramiento Genético de la Caña de Azúcar de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (PMGCA-EEAOC), se implementó un proyecto de SG. Inicialmente, se entrenaron distintos modelos de SG con una población de 80 genotipos avanzados del esquema de mejoramiento para caracteres de maduración temprana. Aunque los modelos explicaron una porción significativa de la variabilidad del mérito genético, la eficiencia de SG fue baja debido a la limitada variabilidad genética y al reducido tamaño de la población de entrenamiento (Ostengo, 2020).

En 2016, se amplió la población de entrenamiento a 188 accesiones del banco de germoplasma (BG), incrementando tanto el número de individuos evaluados como la variabilidad genética. Esta población fue fenotipada entre 2016 y 2021 para el número y peso de tallos, la resistencia a enfermedades y la calidad industrial, y además fue genotipada mediante GBS (por sus siglas en inglés de *Genotyping by sequencing*). Los modelos de SG fueron ajustados para estimar los GEBVs individuales, útiles para diseñar futuros cruzamientos (Racedo *et al.*, 2023).

El objetivo del presente estudio fue implementar SG, incluyendo poblaciones de clones en diferentes etapas del esquema de mejora, rutinariamente fenotipadas por el PMGCA-EEAOC, y realizar validaciones intra e interpopulacionales para evaluar la precisión de las estimaciones. Los resultados permitirán comparar distintas estrategias de implementación de SG dentro del programa y determinar cuál es la más precisa, eficiente y factible para acortar el ciclo de mejoramiento y acelerar la tasa de ganancia genética.

■ MATERIALES Y MÉTODOS

Material vegetal, genotipado y fenotipado

• Población del Banco de Germoplasma (BG)

Se seleccionaron 303 genotipos de caña de azúcar de un total de 789 accesiones del banco de germoplasma del PMGCA-EEAOC (Ostengo *et al.*, 2021). La selección priorizó incluir los individuos más utilizados como progenitores en cruzamientos, añadiendo otros genotipos para capturar la diversidad alélica. Se recolectaron muestras de hojas en campo para realizar extracciones de ADN siguiendo las recomendaciones del servicio de genotipado de alta densidad DArTseq.

Los ensayos fenotípicos se llevaron a cabo en el campo experimental de la EEAOC (Las Talitas, departamento Tafí Viejo, Tucumán, Argentina), donde cada genotipo estuvo representado por parcelas de 2 surcos \times 3 metros. Se evaluaron los componentes de calidad industrial

azúcar recuperada (AR %) y Pol % caña, según Diez *et al.* (2000). Para ello, se recolectaron 10 tallos por parcela en la edad de planta, que fueron limpiados, cortados y procesados en laboratorio con trituradora de martillos (95% de celdas abiertas), extrayéndose el jugo mediante prensa hidráulica a $240 \text{ kg cm}^{-2} \text{ min}^{-1}$. La biomasa se estimó mediante el peso de 10 tallos tomados al azar de cada parcela.

• Población de la segunda etapa clonal (2C)

Se realizó el genotipado de alta densidad en 200 individuos de la segunda etapa clonal (2C) del esquema de mejora del PMGCA-EEAOC mediante DArTseq. Los datos fenotípicos se recolectaron en ensayos con diseño de bloques completos al azar (DBCA) de 3 surcos \times 3 metros, con dos repeticiones y dos cortes sucesivos en un sitio. Se midieron contenido de sacarosa (CS%), número de tallos por metro y peso de tallo, procesando 10 tallos por parcela central en un molino experimental de laboratorio. El contenido de azúcar se calculó a partir de Brix y Pol % jugo según Fogliata (1995):

$$CS\% = 0,98 \times \text{Pol\%jugo} - 0,28 \times \text{Brix}$$

Los datos fenotípicos se analizaron mediante modelos lineales mixtos para obtener los BLUPs por carácter.

• Población de Ensayos Internos de variedades en campo (I)

Se genotiparon 50 clones correspondientes a la etapa de Ensayos Internos de variedades (I), siguiendo el procedimiento de DArTseq. Los ensayos fenotípicos se organizaron en parcelas de 3 surcos \times 8 metros, con DBCA y tres repeticiones, evaluándose durante dos cortes consecutivos en dos localidades (El Colmenar y Santa Ana, provincia de Tucumán). Se determinaron contenido de azúcar y componentes de rendimiento (número de tallos por metro y peso de tallo) en caña planta y primera soca. Los datos se analizaron mediante modelos lineales mixtos apropiados para evaluación multiam biental, obteniéndose los predictores genéticos (BLUPs).

• Caracterización de poblaciones mediante análisis conjunto de datos fenotípicos y genotípicos (Procrustes) y ACoP

Los caracteres fenotípicos se analizaron mediante análisis de componentes principales (ACP), utilizando distancia euclidiana como medida de disimilitud (Infostat, Di Rienzo *et al.*, 2020). Para la caracterización molecular, se calculó la distancia genética de Nei (1972) a partir de todos los marcadores polimórficos, y se construyeron matrices de distancia para el ordenamiento. La ordenación se realizó mediante análisis de coordenadas principales (ACoP) y escalamiento multidimensional (MDS por sus siglas en inglés de *Multidimensional Scaling*).

El grado de concordancia entre ordenamientos fenotípicos y genotípicos se evaluó mediante análisis de Procrustes generalizado (Gower, 1975), considerando las dos primeras coordenadas principales de cada conjunto de datos.

Además, se visualizaron las relaciones genéticas entre las tres poblaciones mediante ACoP (Infostat, 2020).

• Datos genotípicos para selección genómica

Se analizaron las frecuencias alélicas en cada población para excluir marcadores con frecuencia menor a 0,1 (MAF de las siglas en inglés de *minor allele frequency* < 0,1). Se incluyeron marcadores con tasa de llamado superior a 0,8 en los modelos de SG.

• Modelos de selección genómica y validación cruzada

Para todas las predicciones genómicas se utilizó el modelo G-BLUP. Los ajustes se realizaron mediante cadenas de Markov Monte Carlo (MCMC), usando Gibbs sampler con 50.000 iteraciones y un burn-in de 5000, implementados con el paquete BGLR en R (de los Campos y Pérez-Rodríguez, 2014; R Core Team, 2024).

La eficiencia de la SG se evaluó mediante validación intra e interpoblacional, según corresponda. Para BG, se utilizó partición 80:20 para obtener las precisiones mediante correlaciones dentro de la población, replicando 100 veces con asignaciones aleatorias independientes para entrenamiento y prueba. Para 2C, se evaluó intrapoblacional con 80:20, y el modelo estimado se aplicó para predecir GEBVs en la población I (validación cruzada). Además, se analizó una PE combinando 2C e I, con precisión obtenida mediante correlaciones dentro de la población (80:20).

■ RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El desbalance entre el gran número de marcadores y el menor número de observaciones fenotípicas puede influir en la precisión del modelo G-BLUP. Aunque G-BLUP incorpora de manera inherente regularización mediante la matriz de relaciones genómicas (G), un exceso de marcadores puede introducir ruido y reducir la precisión predictiva, particularmente si muchos de ellos no están relacionados con el carácter de interés (VanRaden, 2008; Hayes *et al.*, 2009). Estrategias como filtrar marcadores de baja calidad (Wray *et al.*, 2013) o aumentar el número de observaciones fenotípicas pueden ayudar a mitigar este efecto.

En este estudio se obtuvieron 74.969 SNPs (por sus siglas en inglés de *single nucleotide polymorphism*) de todas las poblaciones mediante DArTseq. Tras filtrar los SNPs con MAF < 0,1, se incluyeron 35.869 SNPs para los procedimientos de SG. Algunos genotipos se excluyeron debido a la baja calidad de secuenciación, probablemente por degradación de ADN durante el envío al servicio de genotipado. Como resultado, los modelos de SG se entrenaron en tres poblaciones de mejoramiento fenotipadas para caracteres de maduración temprana: i) 264 accesiones del Banco de Germoplasma (BG); ii) 160 individuos de la Segunda Etapa Clonal (2C); y iii) 47 individuos de la etapa de Ensayos Internos de Variedades (I).

■ Caracterización de poblaciones mediante análisis conjunto de datos genotípicos y fenotípicos (Procrustes) y ACoP

Para visualizar las relaciones entre los individuos,

las poblaciones fueron caracterizadas mediante un análisis conjunto de datos fenotípicos y genotípicos usando análisis de Procrustes. Este enfoque redujo la dimensionalidad de las matrices de datos de los caracteres fenotípicos y genotípicos a dos ejes. Para la población BG, el ACoP explicó el 7% de la variabilidad total observada con 14.725 SNPs polimórficos en los ejes 1 y 2, mientras que el ACP de los datos fenotípicos explicó el 100% de la variabilidad en los dos primeros ejes (Figura 1). Para la

población 2C, el análisis ACoP explicó el 11% de la variabilidad total observada con 15.600 SNPs polimórficos en los ejes 1 y 2, mientras que el ACP de los datos fenotípicos representó el 75% de la variabilidad en los dos primeros ejes (Figura 2). Para la población I, el ACoP explicó el 13% de la variabilidad total observada con 17.039 SNPs polimórficos en los ejes 1 y 2, mientras que el ACP de los datos fenotípicos explicó el 89% de la variabilidad en los dos primeros ejes (Figura 3).

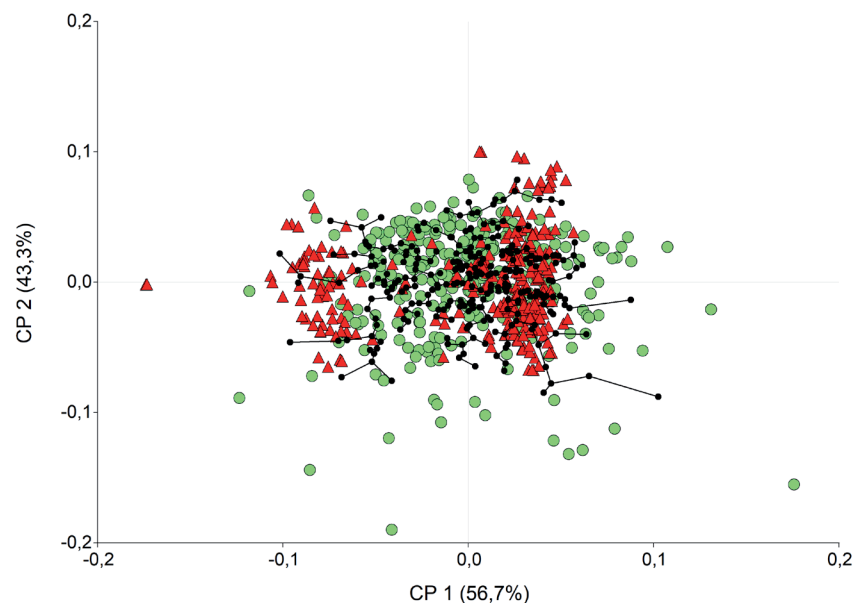


Figura 1. Proyección de las coordenadas CP1 y CP2 con el Árbol de Expansión Mínima para la configuración de consenso (línea negra), configuración fenotípica (círculos verdes) y configuración molecular (triángulos rojos), derivada del Análisis Generalizado de Procrustes de la población del Banco de Germoplasma (BG).

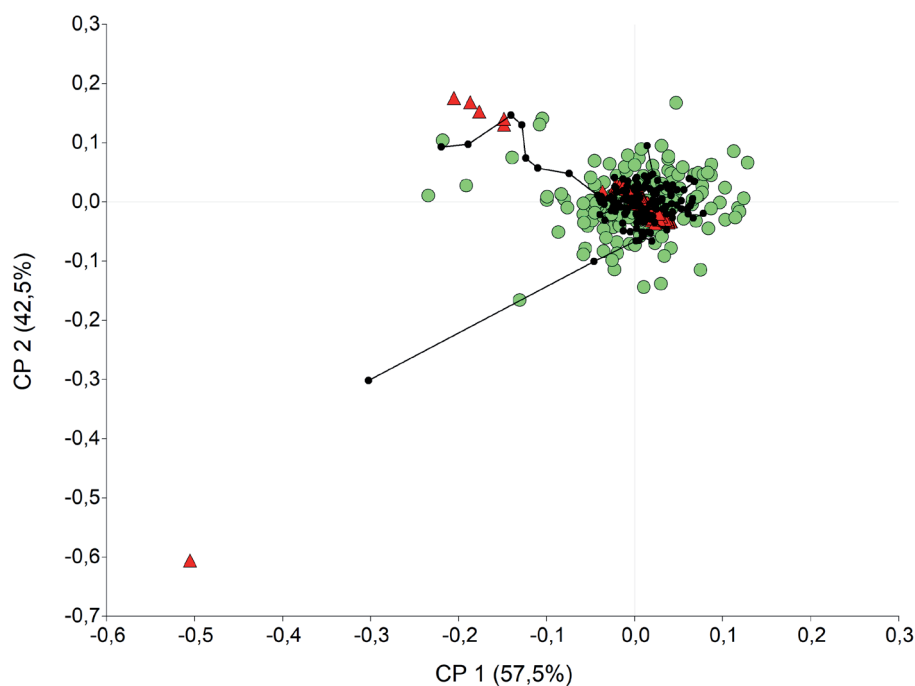


Figura 2. Proyección de las coordenadas CP1 y CP2 con el Árbol de Expansión Mínima para la configuración de consenso (línea negra), configuración fenotípica (círculos verdes) y configuración molecular (triángulos rojos), derivada del Análisis Generalizado de Procrustes de la población de la Segunda Etapa Clonal (2C).

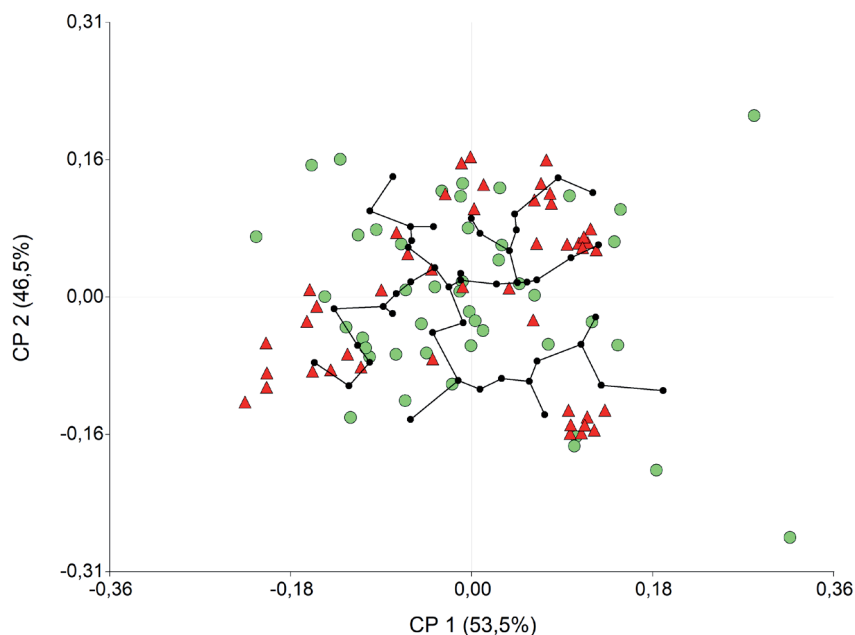


Figura 3. Proyección de las coordenadas CP1 y CP2 con el Árbol de Expansión Mínima para la configuración de consenso (línea negra), configuración fenotípica (círculos verdes) y configuración molecular (triángulos rojos), derivada del Análisis Generalizado de Procrustes de la población de Ensayos Internos de Variedades (I).

El análisis de Procrustes reveló correlaciones moderadas entre los datos moleculares y fenotípicos en las tres poblaciones analizadas, con la correlación más alta en la población 2C (0,631), seguida de la población BG (0,595) y la población I (0,547). Estos resultados indican una congruencia razonable entre los marcadores moleculares y los caracteres fenotípicos, con solo diferencias menores observadas entre poblaciones. Esta congruencia moderada sugiere que las relaciones entre los individuos se reflejan de manera similar tanto en los datos fenotípicos como genotípicos, indicando que ambos tipos de datos capturan patrones de variabilidad comparables (Bramardi *et al.*, 2005). En consecuencia, esta alineación implica que las mediciones fenotípicas podrían reflejar efectivamente

información subyacente similar a la de los datos moleculares, a pesar de las diferencias en la precisión de la medición fenotípica entre poblaciones. La consistencia general sugiere que los datos moleculares podrían predecir razonablemente la variación fenotípica en estas poblaciones.

La precisión de las predicciones de selección genómica depende no solo del tamaño de la población de entrenamiento, sino también de su diversidad, de su estructura genética y de las relaciones entre los individuos de las poblaciones de entrenamiento y de prueba (Berro *et al.*, 2019). Para visualizar las relaciones genéticas entre las tres poblaciones estudiadas, se realizó un ACoP (Figura 4). Nuestros resultados sugieren que la población BG podría entrenar de manera efectiva modelos para

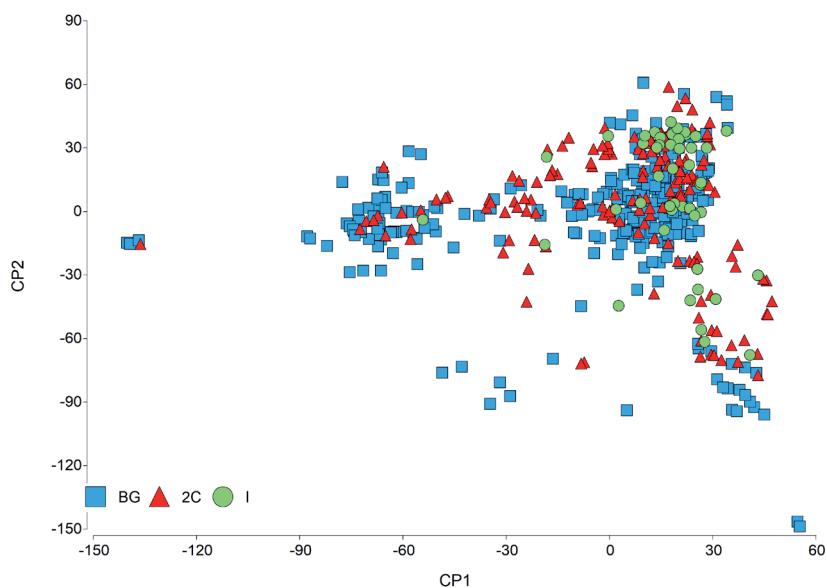


Figura 4. Análisis de Coordenadas Principales (APoC). Se utilizaron 35.869 SNPs derivados de DArT-seq para visualizar las relaciones genéticas entre las poblaciones de caña de azúcar BG, 2CS e I estudiadas.

predecir GEBVs en las poblaciones 2C e I, dado que su amplia diversidad alélica abarca ambas poblaciones objetivo. Sin embargo, aunque BG presenta una diversidad genética extensa, las subestructuras subyacentes deberían considerarse en análisis futuros. Por el contrario, predecir GEBVs de I usando como entrenamiento a la 2C probablemente produciría resultados más débiles, porque pocos individuos de 2CS estaban relacionados con los de I, reduciendo el poder predictivo del modelo (Habier *et al.*, 2007). Estos hallazgos resaltan la importancia de seleccionar una PE que equilibre de manera óptima diversidad, estructura genética y parentesco para mejorar la precisión de la predicción genómica.

Selección genómica

Para BG, la PE consistió en 264 accesiones, y las precisiones se obtuvieron usando una partición 80:20 (Tabla 1).

Para 2C, la eficiencia se evaluó dentro de la población usando una partición 80:20 (Tabla 2), y el modelo estimado se aplicó para estimar los GEBVs de la población I (validación cruzada) (Tabla 3). Además, se analizó una PE conformada por la combinación de las poblaciones 2C e I, obteniéndose la precisión mediante correlaciones dentro de la población (partición 80:20) (Tabla 4).

Las mayores eficiencias de SG para BG se observaron en los caracteres Pol % y azúcar recuperada ($r = 0,43$ y $0,40$, respectivamente; Tabla 1). Para 2C e I, las mayores eficiencias de SG se observaron en el carácter Contenido de azúcar cuando ambas poblaciones se analizaron conjuntamente ($r = 0,41$; Tabla 4) y cuando la PE consistió únicamente en 2C ($r = 0,43$; Tabla 2).

Estas precisiones son consistentes con las reportadas en estudios previos de SG en caña de azúcar (Gouy *et al.*, 2013; Deomano *et al.*, 2020; Hayes *et al.*, 2022; Shahi *et al.*, 2025). Este enfoque es particularmente relevante para caracteres como contenido de azúcar y Pol %, donde los efectos genéticos aditivos controlan una proporción significativa de la variabilidad genética.

Las precisiones para caracteres relacionados con el rendimiento de biomasa (tallos por metro y peso de tallo) fueron menores en todos los casos. En estos caracteres, la varianza genética no aditiva contribuye significativamente a la varianza genética total y está fuertemente influenciada por factores ambientales.

El éxito de la SG en programas de mejoramiento depende de múltiples factores, entre ellos la calidad y exhaustividad de los datos fenotípicos, el modelo de predicción empleado y el número y tipo de marcadores moleculares, así como el tamaño y la composición de la PE. Además, la relación genética entre la PE y la población de prueba es uno de los determinantes más importantes para maximizar la capacidad predictiva. En el caso de BG, en comparación con nuestro estudio previo (Racedo *et al.*, 2023), aunque el tamaño de la población es mayor, las precisiones de predicción no mostraron mejoras. Esto subraya que un requisito clave para alcanzar predicciones confiables es la calidad de los datos fenotípicos. No obstante, ampliar el tamaño de las parcelas y las repeticiones para la totalidad de la colección de germoplasma (789 genotipos) resultaría poco práctico. A partir de estos resultados, se definirá una subpoblación de genotipos del banco de germoplasma que será evaluada en campo me-

Tabla 1. Valores medios de los coeficientes de correlación ($N=100$) y desviación estándar para el modelo de SG G-BLUP aplicado a la población del Banco de Germoplasma (BG) de caña de azúcar para contenido temprano de sacarosa y peso de tallo. La precisión se evaluó dentro de la población (80:20).

Variable	Media	Desvío estándar
Pol%	0,43	0,13
Azúcar recuperable	0,40	0,13
Peso del tallo	0,38	0,11

Tabla 2. Valores medios de los coeficientes de correlación ($N=100$) y desviación estándar para validación intra-poblacional con partición 80:20 usando el modelo G-BLUP de SG aplicado a la población de la Segunda Etapa Clonal (2CS) (160 genotipos) de caña de azúcar para caracteres de rendimiento.

Variable	Media	Desvío estándar
Contenido de azúcar	0,43	0,14
Tallos por metro	0,26	0,21
Peso del tallo	0,01	0,11

Tabla 3. Valores medios de los coeficientes de correlación ($N=100$) y desviación estándar para validación cruzada inter-poblacional considerando la población de la Segunda Etapa Clonal (2CS) como conjunto de entrenamiento (160 genotipos) y la población de Ensayos Internos de Variedades (I) como conjunto de prueba (47 genotipos). Los GEBVs estimados para I se correlacionaron con sus valores fenotípicos. El modelo G-BLUP de selección genómica se implementó para caracteres de rendimiento.

Variable	Media	Desvío estándar
Contenido de azúcar	0,04	0,04
Tallos por metro	0,06	0,06
Peso del tallo	0,05	0,06

Tabla 4. Valores medios de los coeficientes de correlación ($N=100$) y desviación estándar para validación intra-poblacional con partición 80:20 usando el modelo G-BLUP de selección genómica aplicado a las poblaciones combinadas Segunda Etapa Clonal (2C) e Interna (I) (total de 207 genotipos) de caña de azúcar para caracteres de rendimiento.

Variable	Media	Desvío estándar
Contenido de azúcar	0,41	0,12
Tallos por metro	0,09	0,14
Peso del tallo	0,03	0,12

dante un diseño experimental adecuado, con el objetivo de optimizar la población de entrenamiento para futuras predicciones.

La precisión obtenida en la 2C para el rendimiento de azúcar es prometedora; sin embargo, cuando los GEBVs de I se estimaron usando el modelo entrenado en la 2C, las precisiones fueron bajas, indicando que no es posible predecir el desempeño de clones avanzados basado en el modelo entrenado en la etapa anterior del esquema de mejoramiento.

CONCLUSIONES

Basado en estudios previamente reportados, los valores de precisión que obtuvimos son alentadores para la implementación de SG en el PMGCA de la EEAOC. Los resultados son prometedores para el desarrollo continuo de estrategias que optimicen la metodología y logren mayores precisiones.

Usando el modelo G-BLUP implementado, se obtuvieron GEBVs para un total de 510 individuos, proporcionando información valiosa para el PMGCA de la EEAOC. Estos GEBVs pueden asistir en la caracterización de líneas parentales, facilitando el diseño de cruzamientos más efectivos y contribuyendo al desarrollo de poblaciones mejoradas.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Berro, I.; B. Lado; R. S. Nalin; M. Quincke and L. Gutiérrez. 2019.** Training population optimization for genomic selection. *Plant Genome* 12: 190028.
- Bramardi, S. J.; G. P. Bernet; M. J. Asíns and E. A. Carbonell. 2005.** Simultaneous agronomic and molecular characterization of genotypes via the generalised procrustes analysis: an application to cucumber. *Crop Science* 45: 1603–1609.
- de los Campos, G. and P. Pérez-Rodríguez. 2014.** Bayesian generalized linear regression. *R package version 1(4)*.
- Deomano, E.; P. Jackson; X. Wei; K. Aitken; R. Kota and P. Pérez-Rodríguez. 2020.** Genomic prediction of sugar content and cane yield in sugar cane clones in different stages of selection in a breeding program, with and without pedigree information. *Molecular Breeding* 40: 38.
- Diez, O.; S. Zossi; E. R. Chavanne y G. Cárdenas. 2000.** Calidad industrial de las cañas de azúcar de maduración temprana LCP85-384 y LCP85-376 en Tucumán. Análisis de sus principales constituyentes físico-químicos. *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán* 77 (2): 39–48.
- Fogliata, F. A. 1995.** Composición química y vegetativa. In: Felipe, L. E. (ed.), *Agronomía de la caña de azúcar*. Argentina: El Graduado, pp. 163–209.
- Gower, J. C. 1975.** Generalized Procrustes analysis. *Psychometrika* 40: 33–51.
- Gouy, M.; Y. Rousselle; D. Bastianelli et al. 2013.** Experimental assessment of the accuracy of genomic selection in sugarcane. *Theoretical and Applied Genetics* 126: 2575–2586.
- Habier, D.; R. L. Fernando and J. C. M. Dekkers. 2007.** The impact of genetic relationship information on genome-assisted breeding values. *Genetics* 177: 2389–2397.
- Hayes, B. J.; P. J. Bowman; A. J. Chamberlain and M. E. Goddard. 2009.** Genomic selection in dairy cattle: Progress and challenges. *Journal of Dairy Science* 92: 433–444.
- Hayes, B. J.; X. Wei; P. Joyce et al. 2022.** Accuracy of genomic prediction of complex traits in sugarcane. *Theoretical and Applied Genetics* 134: 1455–1462.
- Infostat. Di Rienzo, J. A.; F. Casanoves; M. G. Balzarini; L. Gonzalez; M. Tablada y C. W. Robledo. 2020.** Infostat versión 2020. Grupo Infostat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.
- Meuwissen, T. H.; B. J. Hayes and M. E. Goddard. 2001.** Prediction of total genetic value using genome-wide dense marker maps. *Genetics* 157: 1819–1829.
- Nei, M. 1972.** Genetic distance between populations. *American Naturalist* 106: 283–292.
- Ostengo, S. 2020.** Aproximaciones metodológicas para la caracterización de la calidad industrial de genotipos de caña de azúcar. PhD thesis. National University of Tucumán, Argentina.
- Ostengo, S.; G. Serino; M. F. Perera et al. 2021.** Sugarcane breeding, germplasm development and supporting genetics research in Argentina. *Sugar Tech* 24: 166–180.
- R Core Team. 2024.** R: a language and environment for statistical computing. R package version 4.0.3. Accessed 10 Jun 2024. <http://www.r-project.org>
- Racedo, J.; E. A. Rossi; M. Aybar Guchea et al. 2023.** Genomic selection for traits of interest in the EEAOC sugarcane breeding program. *Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists* 31: 775–781.
- Shahi, D.; J. Todd; K. Gravois et al. 2025.** Exploiting historical agronomic data to develop genomic prediction strategies for early clonal selection in the Louisiana sugarcane variety development program. *The Plant Genome* 18: e20545.
- VanRaden, P. M. 2008.** Efficient methods to compute genomic predictions. *Journal of Dairy Science* 91: 4414–4423.
- Wray, N. R.; J. Yang; B. J. Hayes; A. L. Price; M. E. Goddard and P. M. Visscher. 2013.** Pitfalls in predicting complex traits from SNPs. *Nature Reviews Genetics* 14: 507–515.



Revista Industrial
y Agrícola de
Tucumán

ISSN 0370-5404

En línea
1851-3018

Tomo 102 (2):
41-46; 2025



ESTACION EXPERIMENTAL
AGROINDUSTRIAL
OBISPO COLOMBRES
Tucumán | Argentina

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

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

Fecha de
recepción:
17/09/2025

Fecha de
aceptación:
19/09/2025

Índice de selección basado en compuestos no-azúcares del jugo de caña de azúcar

Santiago Ostengo*, Natalia Sorol* y Mónica Balzarini**

* Programa de Mejoramiento Genético de Caña de Azúcar, Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres, Las Talitas, Tucumán, Argentina; ** Facultad de Ciencias Agropecuarias-Universidad Nacional de Córdoba and Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología de Argentina (CONICET), Córdoba, Argentina. Email: santiagoostengo@eeaac.org.ar

RESUMEN

El jugo de caña de azúcar está compuesto por azúcares, agua y diferentes sustancias solubles e insolubles conocidas como compuestos no-azúcares. Tanto los compuestos azúcares como los no-azúcares son cruciales en la fábrica, debido a que son responsables de efectos adversos en la calidad y recuperación de sacarosa. Los modelos mixtos multicarácter permiten la estimación de Predictores lineales insesgados o BLUPs (por sus siglas en inglés: *Best Linear Unbiased Predictors*), que pueden considerarse índices que resumen el mérito genético en función de varios caracteres. Este trabajo tiene como objetivo generar un índice que caracterice las variedades según su desempeño industrial relacionado con los compuestos no-azúcares. Se realizaron análisis de compuestos no-azúcares en 10 genotipos evaluados en seis localidades de Tucumán, Argentina. Se midieron almidón, cenizas, fosfatos, fenoles y color del jugo de caña durante el inicio de la zafra, a lo largo de tres años consecutivos. Se ajustaron modelos mixtos multicarácter y multiambiente (MTME, por sus siglas en inglés: *Multi-Trait Multi-Environment*) para obtener los BLUPs del efecto genético, considerados como un índice de calidad industrial (Ic). Valores negativos de Ic, más alejados de cero, indican genotipos con buen desempeño industrial en relación con los compuestos no-azúcares. El efecto aleatorio de la muestra se incluyó en el modelo para contemplar las correlaciones entre variables (V). El componente de varianza del efecto de genotipo (G) resultó estadísticamente significativo, lo que indica variabilidad entre variedades al considerar en conjunto los cinco compuestos no-azúcares. La variedad LCP 85-384 presentó el valor de Ic más bajo (-0,322), lo que sugiere una destacada aptitud industrial en función de los compuestos no-azúcares. En contraste, TUC 95-10 y TUCCP 77-42 mostraron los valores de Ic más altos. Los predictores de la interacción G×V revelaron que la baja calidad industrial de TUC 95-10 y TUCCP 77-42 se debe principalmente al alto contenido de almidón y cenizas en su jugo, respectivamente. El estudio logró desarrollar con éxito un índice (Ic) para evaluar el desempeño industrial de variedades de caña de azúcar en función de los compuestos no-azúcares, proporcionando una herramienta valiosa para la caracterización y selección de genotipos de acuerdo con un conjunto de caracteres de interés.

Palabras clave: caña de azúcar, compuestos no-azúcares, Índice de selección, BLUPs, modelos mixtos.

ABSTRACT

Selection index based on non-sugar compounds of sugarcane juice

The juice of the sugar cane is composed of sugars, water, and different soluble and insoluble substances known as non-sugar compounds. Both sugar and non-sugar compounds are crucial in the factory because they are responsible for adverse effects on the quality and recovery of sucrose. Multi-trait mixed models enable the estimation of BLUPs (Best Linear Unbiased Predictors), which can be considered indices summarizing genetic merit based on several traits. This work aims to generate an index that characterizes varieties according to their industrial performance related to non-sugar compounds. Analyses of non-sugar compounds were conducted on 10 genotypes evaluated across six sites of Tucumán, Argentina. Starch, ash, phosphates, phenols, and color of sugarcane juice were measured during the beginning of harvest season for three consecutive years.

Multi-trait and Multi-environmental Mixed models were adjusted to obtain BLUPs of the genetic effect, considered as an index of industrial quality (I_c). Negative I_c values, further from zero, indicate genotypes with good industrial performance according to non-sugar components. The random effect of the sample was included in the model to account for the correlations between traits (T). The variance component of the genotype effect (G) was statistically significant, indicating variability among varieties when considering the five non-sugar components together. The LCP85-384 variety exhibited the lowest I_c value (-0.322), suggesting outstanding industrial suitability based on the non-sugar components. In contrast, TUC 95-10 and TUCCP 77-42 showed the highest I_c values. The predictors of the G×T interaction revealed that the poor industrial quality of TUC 95-10 and TUCCP 77-42 is mainly due to the high starch and ash content in their juice, respectively. The study successfully developed an index (I_c) to evaluate the industrial performance of sugarcane varieties based on non-sugar components, providing a valuable tool for the characterization and selection of genotypes according to a set of traits of interest.

Key words: sugarcane, non-sugar compounds, Selection index, BLUPs, mixed models.

INTRODUCCIÓN

El rendimiento de azúcar por unidad de área es el carácter más importante que se tiene en cuenta en un programa de mejoramiento genético de caña de azúcar. Este atributo depende del rendimiento de caña por hectárea y el rendimiento de sacarosa del jugo. Sin embargo, el jugo de caña de azúcar está compuesto por azúcares (sacarosa, glucosa y fructosa), agua y una amplia variedad de compuestos conocidos como “no-azúcares”, que pueden ser solubles (sales minerales, ácidos, fenoles, pigmentos, etc.) e insolubles/coloides (almidón, fibras, ceras, sílice, entre otros). Estos últimos compuestos son relevantes en la industria ya que son responsables de efectos adversos en la calidad y recuperación de azúcar (Eggleston *et al.*, 2006). Por ejemplo, incrementos en el contenido de cenizas y almidón pueden afectar la recuperación de sacarosa y el proceso de cristalización, respectivamente (Rein, 2007), mientras que concentraciones bajas de fosfatos (<300 mg/kg) pueden causar defectos en la clarificación (Pérez Capote *et al.*, 2000). Se ha documentado también que los compuestos antocianicos y fenólicos afectan el color del jugo y la calidad del azúcar (Godshall and Legendre, 1988; Legendre *et al.*, 1999). En particular, los fenoles impactan además en la velocidad de sedimentación.

El contenido de azúcar y de componentes no-azúcares en el jugo de la caña de azúcar depende de varios factores, incluyendo el efecto genotipo. Diversos estudios mostraron diferencias varietales en el contenido de compuestos no-azúcares (Hogarth and Kingstog, 1984; Mariotti *et al.*, 2001; Zhou *et al.*, 2007; Jackson *et al.*, 2008; Rupa and Asoka, 2008; Zossi *et al.*, 2010; Duarte-Almeida *et al.*, 2011).

El Programa de Mejoramiento Genético de Caña de azúcar (PMGCA) de la EEAOC ha llevado a cabo evaluaciones especiales, asociadas a compuestos no-azúcares, sobre clones avanzados y variedades comerciales, con el propósito de ampliar su caracterización en relación a la calidad industrial (Ostengo *et al.*, 2019).

En un contexto de evaluaciones de variedades a

través de múltiples caracteres, es habitual la implementación de índices de selección para la caracterización y selección simultánea de estos caracteres (Falconer and Mackay, 1996). Los índices de selección derivan de modelos estadísticos que permiten usar la información de los distintos caracteres conjuntamente. Por ejemplo, a partir de un único valor índice, es posible caracterizar un genotipo por múltiples caracteres. Los modelos mixtos brindan también el marco adecuado para ajustar un modelo que integre información de diferentes caracteres, ya que permite considerar la correlación existente entre ellos (Malosetti *et al.*, 2008). El ajuste de modelos mixtos Multicarácter, que consideran el efecto genotipo como aleatorio, permite la estimación de los Blups (Best Linear Unbiased Predictors), los cuales pueden ser considerados como índices que resumen el mérito genético según el conjunto de caracteres evaluados (Piepho *et al.*, 2008; Covarrubias-Pazaran *et al.*, 2018).

El presente trabajo tiene como objetivo generar un índice que permita caracterizar las variedades según su aptitud industrial relacionada a los compuestos no-azúcares.

MATERIALES Y MÉTODOS

Datos

Se realizaron determinaciones asociadas a compuestos no-azúcares sobre un conjunto de 10 genotipos de caña de azúcar, de los cuales seis corresponden a clones avanzados del PMGCA-EEAOC, y cuatro a variedades comerciales cultivadas en Tucumán (Tabla 1). Los genotipos fueron evaluados en un ensayo multiambiente conducido en seis sitios del área cañera de Tucumán. Los genotipos seleccionados en este estudio representan una muestra aleatoria de posibles clones evaluados en una etapa avanzada del PMGCA-EEAOC. De manera similar, los sitios elegidos representan entornos ambientales de producción de caña de azúcar que difieren en las características edafoclimáticas.

Los ensayos fueron plantados en 2011 según un diseño en bloques completamente aleatorizados, donde la unidad experimental estuvo conformada por tres surcos de 10 metros de largo. Una muestra de 10 tallos fue tomada al azar de cada parcela en el inicio del periodo de cosecha (mayo) durante tres años consecutivos de cultivo (ciclo del cultivo/años): soca 1/2013, soca 2/2014 y soca 3/2015.

Tabla 1. Genotipos de caña de azúcar evaluados según diferentes compuestos no-azúcares.

Genotipos			
1	TUC 02-19	6	TUC 03-22
2	TUC 02-45	7	LCP 85-384
3	TUC 02-60	8	TUCCP 77-42
4	TUC 02-71	9	RA 87-3
5	TUC 03-1	10	TUC 95-10

Las muestras de tallos limpios y correctamente despuntados fueron procesados en laboratorio con un desfibrador y el jugo fue extraído con una prensa hidráulica. En el jugo se hicieron las siguientes determinaciones analíticas: 1) contenido de almidón (mg/kg°Bx) de acuerdo al método propuesto por Godshall (2004) y Zossi *et al.* (2008); 2) contenido de fenoles (mg/kg°Bx) según Clarke *et al.* (1985); 3) color del jugo (U.I. – unidades ICUMSA); 4) contenido de cenizas conductimétricas (g/100 g) y 5) contenido de fosfatos (mg/l). Las tres últimas determinaciones fueron realizadas de acuerdo a lo propuesto por la Comisión Internacional para Métodos Uniformes de Análisis de Azúcar (ICUMSA, del inglés *International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis*) (ICUMSA, 2005).

Procedimiento de Análisis

Con el propósito de obtener predictores genéticos del tipo BLUP para cada variedad, que permitan la caracterización de la aptitud genética en función del conjunto de caracteres no-azúcares (almidón, cenizas, color, fenoles y fosfatos), se ajustó el siguiente modelo mixto:

$$y = X\beta + Zu + e$$

donde **y** es el vector respuesta que contiene los valores de los componentes no azúcares para cada observación. El vector de efectos fijos **β** contiene la media general y un indicador de la variable (V) medida en cada elemento del vector respuesta. El vector **β** se asocia a las observaciones a través de la matriz de diseño X. El modelo también incluye un vector de efectos aleatorios (**u**) que contiene los efectos de genotipo (G), ambiente (E), muestra (M) y las interacciones G×V, G×E, E×V y G×E×V. Los efectos aleatorios se asocian al vector de observaciones a través de la matriz de incidencia Z. El vector **e** contiene términos de error asociados a cada dato del vector **y**. Todos los efectos aleatorios se asumen independientes, con distribución normal con media 0 y varianzas iguales a: σ^2_G , σ^2_A , σ^2_M ,

$\sigma^2_{G \times V}$, $\sigma^2_{G \times E}$, $\sigma^2_{E \times V}$ y $\sigma^2_{G \times E \times V}$. La prueba de significancia de los componentes de varianza se realizó mediante el estadístico Likelihood Ratio Test (LRT). A partir de los componentes de varianza σ^2_G y $\sigma^2_{G \times V}$ se calcularon los predictores genéticos (BLUPs) de interés. El efecto aleatorio dado por la muestra (M) -tomada de cada genotipo en cada parcela, y ambiente-, sobre la cual se realizaron las determinaciones de los cinco componentes, fue incluido en el modelo con el objeto de contemplar las correlaciones existentes entre las variables (Schabenberger and Pierce, 2002; Littell *et al.*, 2000). Para este análisis se consideró al ambiente como una combinación de la localidad y el año de cultivo. La variable contenido de fosfato fue transformada previamente a valores iguales a 1000 - x, ya que valores bajos de fosfatos están asociados a una mala calidad industrial: según la literatura (Chen y Chou, 1993; Doherty y Rackermann, 2008, 2009; Rein, 2007), la concentración mínima de fosfatos solubles en el jugo de caña debe ser de 250 mg/l para que la clarificación sea satisfactoria. De esta forma, valores negativos de BLUPs y más alejados de 0 implican genotipos con buena aptitud industrial según los componentes no-azúcares. Las variables analizadas fueron estandarizadas previo ajuste del modelo. El ajuste del modelo se realizó con PROC MIXED, SAS (SAS Institute, 2016).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los valores mínimos, máximos y de desvío estándar observados en genotipos de caña de azúcar con respecto a determinaciones asociadas a compuestos no azúcares dan cuenta de la variabilidad del contenido de este tipo de componentes en el jugo de la caña de azúcar (Tabla 2).

Tabla 2. Valores medios, mínimos, máximos y coeficiente de variación (CV%) de diferentes compuestos no-azúcares de genotipos de caña de azúcar (n=10) evaluados en un ensayo multiambiente.

Compuestos no azúcares	Media	Mín.	Máx.	CV%.
Almidón (mg/kg°Bx)	2864,4	1138,0	5090,0	27,8
Cenizas (g/100 g)	0,718	0,313	1,456	23,9
Color (U.I.)	10595,2	4281,0	20824,0	27,1
Fenoles (mg/kg°Bx)	1998,1	1134,0	3583,0	22,4
Fosfatos (mg/l)	352,1	138,0	836,0	39,2

Los componentes de varianzas de los efectos aleatorios e interacciones contempladas en el modelo mixto multivariado se observan en la Tabla 3. El efecto genotipo fue significativo según LRT, implicando que existe variabilidad entre variedades cuando se consideran los cinco componentes no azúcares conjuntamente. Las diferencias entre variedades dependen del compuesto no azúcar y del ambiente donde fueron evaluadas (G×E×V significativa). Se destaca, además, que el efecto aleatorio asociado a la muestra fue significativo, lo que sugiere correlaciones entre los componentes no azúcares de una misma muestra.

Tabla 3. Componentes de varianzas estimados (σ^2) a partir de un modelo mixto ajustado en genotipos de caña de azúcar evaluados en múltiples ambientes y para múltiples componentes no azúcares relacionados con la calidad del jugo.

Fuentes de variación	σ^2	p
Genotipo (G)	0,0646	0,048
Ambiente (E)	0,0000	
Muestra (M)	0,0171	<0,001
Genotipo x Variable (GxV)	0,2159	<0,001
Genotipo x Ambiente (GxE)	0,0000	
Ambiente x Variable (E x V)	0,4228	<0,001
Genotipo x Ambiente x Variable (GxE x V)	0,1598	<0,001
Residual	0,1661	

p= valor de probabilidad de la Prueba de Cociente de Verosimilitud (LRT)

Los predictores genéticos BLUPs fueron considerados como un índice (Ic) que define el desempeño de la variedad según el conjunto de componentes no-azúcares. La Tabla 4 presenta los BLUPs del efecto genético (Ic) y los de cada variedad según cada variable (predictores de la interacción GxV). Genotipos con valores de Ic negativos son considerados materiales con buena calidad industrial según los cinco componentes no azúcares, ya que implica contenidos bajos de almidón, cenizas y fenoles, un jugo poco coloreado (valores bajos de U.I.) y un contenido alto de fosfatos. En esta última Tabla se observa que la variedad LCP 85-384 presenta el valor más bajo de Ic (-0,322), lo que sugiere una destacada aptitud industrial según componentes no azúcares en su jugo, en relación al resto de los genotipos. Los BLUPs derivados de la interacción GxV ponen de manifiesto que el comportamiento destacado se da para todos los componentes no-azúcares. La variedad TUC 95-10 evidenció el valor más alto de Ic (0,305), seguida por TUCCP 77-42, variedad que mostró también valores elevados de Ic (0,262). Si se analizan los predictores de la interacción GxV, se puede observar la diferencia de estos dos genotipos en cuanto a cómo fue su comportamiento para cada componente de manera separada, y cómo contribuyeron cada uno de

éstos a una menor aptitud industrial. En el caso de TUC 95-10, si bien presenta un bajo contenido de cenizas, su índice de calidad (Ic) se ve afectado principalmente por el elevado contenido de almidón y el color de su jugo. Por el contrario, en TUCCP 77-42, la reducción en la aptitud industrial está determinada fundamentalmente por su alto nivel de cenizas.

El comportamiento opuesto observado entre los dos testigos comerciales (LCP 85-384 y TUCCP 77-42) en cuanto a calidad industrial coincide con estudios previos en los que se analizaron los compuestos no-azúcares de manera independiente (Diez *et al.*, 2000; Zossi *et al.*, 2010, 2011). Por el contrario, la aproximación implementada en este estudio contempla la correlación entre los caracteres. Los BLUPs del efecto genotipo derivan de un modelo donde el vector de variable respuesta considera el conjunto de variables analizadas y donde las correlaciones entre ellas son modeladas en la matriz de varianza y covarianza asociada a un efecto aleatorio de muestra. Según Piepho *et al.* (2008), la metodología *Multivariate* o *Multi-trait BLUP* resulta más ventajosa cuanto más correlacionados están los caracteres.

Malosetti *et al.* (2008) propusieron un modelo mixto *multi-trait* multiambiente, donde considera el efecto de la variable (carácter) dentro del modelo. El objeto de esta aproximación consistió en identificar un eficiente modelo de correlaciones genéticas mediante la imposición de algunas estructuras en la matriz de (co)varianza, para luego incluir información de marcadores moleculares en un modelo más completo. En la aproximación abordada en este trabajo, el objetivo principal es considerar los BLUPs del efecto genotipo como un índice para caracterizar o seleccionar genotipos según los compuestos no-azúcares del jugo. Este índice resulta adecuado para tal fin, ya que contempla las varianzas genéticas y las correlaciones existentes entre las variables en su determinación.

CONCLUSIONES

El ajuste de un modelo mixto multicarácter y multiambiente permitió generar un índice basado en compuestos no-azúcares, que puede utilizarse como una he-

Tabla 4. Predictores lineales insesgados (BLUPs) del efecto genotipo (Ic) y de la interacción genotipo por variable obtenidos a partir de un modelo mixto ajustado en variedades de caña de azúcar evaluadas en múltiples ambientes y para diferentes componentes no azúcares relacionados con la calidad del jugo.

Variedad	Ic	Almidón	Cenizas	Color	Fenoles	Fosfatos
LCP 85-384	-0,322	-0,252	-0,711	-0,567	-0,012	0,466
RA 87-3	0,123	-0,078	0,139	0,523	-0,066	-0,108
TUC 02-19	-0,111	-0,430	-0,224	-0,152	0,223	0,213
TUC 02-45	-0,008	-0,782	0,309	0,241	0,019	0,188
TUC 02-60	-0,008	-0,398	0,134	0,142	-0,061	0,156
TUC 02-71	-0,208	-0,419	-0,671	0,202	0,085	0,110
TUC 03-1	-0,050	0,576	0,094	-0,447	-0,012	-0,379
TUC 03-22	0,017	0,394	-0,114	-0,025	-0,141	-0,058
TUCCP 77-42	0,262	0,549	1,297	-0,571	-0,084	-0,316
TUC 95-10	0,305	0,840	-0,253	0,655	0,049	-0,273

herramienta para la selección de genotipos con fines de calidad industrial. Este enfoque integró de manera eficiente la información de varios caracteres correlacionados, considerando simultáneamente la variabilidad genética y los efectos del ambiente, lo que posibilita una evaluación más completa de la aptitud industrial de las variedades. Los resultados evidencian diferencias claras entre genotipos; en este sentido, el índice propuesto facilita la identificación de materiales con mejor perfil industrial en etapas tempranas del programa de mejoramiento, optimizando la toma de decisiones y contribuyendo al desarrollo de variedades de caña de azúcar con jugos de mayor pureza y mejor comportamiento en los procesos de clarificación y cristalización.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Clarke, M. A.; R. S. Blanco; M. A. Godshall and B. T. To. 1985. Colour components in sugar refinery processes. In: *Proceedings of the Sugar Industry Technologists* 44: 53-88.
- Chen, J. C. P. and C. C. Chou. 1993. *Cane Sugar Handbook*, 12 ed., Wiley & Sons, pp. 121.
- Covarrubias-Pazarán, G.; B. Schlautman; L. Díaz-García; E. Grygleski; J. Polashock; J. Johnson-Cicales; N. Vorsa; M. Lorzio and J. Zalapa. 2018. Multivariate GBLUP improves accuracy of genomic selection for yield and fruit weight in biparental populations of *Vaccinium macrocarpon* Ait. *Frontiers in Plant Science* 9: 1310.
- Diez, O.; S. Zossi; E. R. Chavanne y G. Cárdenas. 2000. Calidad industrial de las cañas de azúcar de maduración temprana LCP85-384 y LCP85-376 en Tucumán. Análisis de sus principales constituyentes físico-químicos. *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán* 77 (2): 39-48.
- Doherty, W. O. S. and D. W. Rackemann. 2008. Stability of sugarcane juice – a preliminary assessment of the colorimetric method used for phosphate analysis. *Sugar Industry / Zuckerindustrie* 133 (1): 24-30.
- Doherty, W. O. S. and D. W. Rackemann. 2009. Some aspects of calcium phosphate chemistry in sugarcane clarification. *The International Sugar Journal*, 111 (1327): 448-455.
- Duarte-Almeida, J. M.; A. Salatino; M. I. Genovese and F. M. Lajolo. 2011. Phenolic composition and antioxidant activity of culms and sugarcane (*Saccharum officinarum* L.) products. *Food Chemistry* 125 (2): 660-664.
- Eggleson, G.; B. Montes; A. Monge and D. Guidry. 2006. Optimisation of D-amylase application in raw sugar manufacture. In: *Proceedings of the Sugar Processing Research Conference*, pp. 319-340.
- Falconer, D. S. and T. F. C. Mackay. 1996. *Introduction to quantitative genetics*. Longman Group, Essex, UK.
- Godshall, M. A. 2004. Report on collaborative study of SPRI rapid starch test for raw sugar. In: *Proceedings of ICUMSA Interim Meeting*, Atlanta, pp. 37-41.
- Godshall, M. A. and B. Legendre. 1988. Phenolic content of maturing sugarcane. *International Sugar Journal* 90: 16-19.
- Hogarth, D. and D. Kingston. 1984. The inheritance of ash in juice from sugarcane. *Sugar Cane* 1: 5-9.
- International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis (ICUMSA). 2005. *Method book*. Bartens, Berlin, Germany.
- Jackson, P. A.; B. L. Schroeder; A. R. Rattey; A. Wood and M. O'Shea. 2008. Management of ash/impurity ratio in sugarcane: relative effects of genotypes, and N and K fertilizer rates. *Australian Journal of Agricultural Research* 59: 795-801.
- Legendre, B. L.; M. A. Clarke; M. A. Godshall and M. P. Grisham. 1999. Developments in sugarcane agriculture that affect processing. *Zuckerindustrie* 124 (2): 120-125.
- Malosetti, M.; J. M. Ribaut; M. Vargas; J. Crossa and F. A. Van Eeuwijk. 2008. A multi-trait multi-environment QTL mixed model with an application to drought and nitrogen stress trials in maize (*Zea mays* L.). *Euphytica* 161(1-2): 241-257.
- Mariotti, J. A.; M. I. Cuenya and M. B. Garcia de Salas. 2001. The performance of families in breeding for quality traits in sugarcane. In: *Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists* 24: 495-499.
- Ostengo, S.; M. I. Cuenya; S. Zossi and M. Balzarini. 2019. Relative contribution of genetic and environmental effects on nonsugar compounds of cane juice. In: *Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists* 30: 464-469.
- Pérez Capote, J. L.; C. Reyes Esquirol; H. J. Suárez y F. R. Díaz Mujica. 2000. Evaluación de calidades de caña de azúcar atendiendo a la calidad de los jugos. *Centro Azúcar* 3: 21-25.
- Piepho, H. P.; J. Möhring; A. E. Melchinger and A. Büchse. 2008. BLUP for phenotypic selection in plant breeding and variety testing. *Euphytica* 161 (1-2): 209-228.
- Rein, P. 2007. *Cane sugar engineering*. Bartens, Berlin, Germany.
- Rupa, T. R. and S. Asoka. 2008. Effect of rind pigments and juice colorants on juice clarity, settling time, and mud volume of sugarcane. *Sugar Tech* 10: 109-113.
- Schabenberger, O. and F. Pierce. 2002. *Contemporary statistical models for the plant and soil sciences*. CRC Press. Boca Raton, Florida, EEUU.
- SAS Institute Inc. 2016. *SAS University Edition*. Cary, NC, USA.
- Zhou, M.; C. A. Kimbeng; G. Eggleston; J. C. Veremis and K. Gravois. 2007. Prospects of breeding for low starch content in sugarcane. In: *Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists* 26: 724-729.
- Zossi, B. S.; M. E. Navarro; N. Sorol; M. Sastre y R. M. Ruiz. 2008. Validación de una metodología para determinar el contenido de almidón en azúcar. *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán* 85 (2): 1-7.
- Zossi, B. S.; G. J. Cárdenas; N. Sorol y M. Sastre. 2010. Influencia de compuestos azúcares y no azúcares en la calidad industrial de caña de azúcar en Tucumán (R. Argentina): Parte 1: caña limpia y despuntada. *Revista Industrial y Agrícola de Tucumán* 87: 15-27.
- Zossi, B. S.; G. J. Cárdenas; N. R. Sorol y M. Sastre.

2011. Influencia de compuestos azúcares y no azúcares en la calidad industrial de caña de azúcar en Tucumán (R. Argentina): caña verde y quemada (Parte 2). Revista Industrial y Agrícola de Tucumán 88(1): 13-21.





Revista Industrial
y Agrícola de
Tucumán

ISSN 0370-5404

En línea
1851-3018

Tomo 102 (2):
47-50; 2025



ESTACION EXPERIMENTAL
AGROINDUSTRIAL
OBISPO COLOMBRES
Tucumán | Argentina

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

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

Fecha de
recepción:
16/09/2025

Fecha de
aceptación:
17/09/2025

El rol crucial del Programa de Mejoramiento Genético de la EEAOC: diversificación varietal en el área cañera de Tucumán, Argentina en los últimos 10 años

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

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

RESUMEN

Desde la década de 1970, el Programa de Mejoramiento Genético de Caña de Azúcar de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (PMGCA-EEAOC) analiza la distribución de variedades de caña de azúcar en el área de cultivo de la provincia de Tucumán, principal región productora de Argentina. La variedad LCP 85-384, liberada en el país en 1999, fue registrada por primera vez en el relevamiento varietal de 2001/2002, con una cobertura del 13,5% del área cañera en la provincia. Esta variedad incrementó rápidamente su superficie cultivada hasta ocupar el 83,1% del área cañera en la campaña 2013/2014. La homogeneidad genética del cultivo plantea un serio riesgo fitosanitario y compromete la sostenibilidad a largo plazo del sistema productivo. Para abordar este problema, el PMGCA-EEAOC ha liberado ocho variedades TUC entre 2009 y 2019, brindando a los productores de caña de azúcar opciones para diversificar sus explotaciones y reducir la superficie cultivada de LCP 85-384. El objetivo de este trabajo fue evaluar el impacto de la liberación de estas variedades TUC en la diversificación del área cañera en Tucumán durante la última década. Los datos fueron tomados de relevamientos varietales realizados entre 2014 y 2023. LCP 85-384 mostró una disminución persistente después de su pico en 2013/2014, llegando al 62,5% del área cultivada en 2022/2023. Esta disminución se correlaciona directamente con la creciente adopción de las variedades TUC, que ocuparon el 12,5%, 22,1% y 30,4% del área cañera en 2016/2017, 2019/2020 y 2022/2023, respectivamente. TUC 95-10 fue la segunda variedad más cultivada, alcanzando el 10,3%, 18,0% y 17,1% del área cultivada, respectivamente, desplazando a TUCCP 77-42 del segundo lugar. TUC 03-12 ha mostrado una difusión acelerada, ocupando el 7,3% del área cañera en 2022/2023 y convirtiéndose en la tercera variedad más cultivada en Tucumán. El PMGCA-EEAOC ha jugado un papel fundamental al ofrecer alternativas que permitieron reducir la dependencia de LCP 85-384. Este progreso hacia un sistema de producción más equilibrado y menos vulnerable a riesgos fitosanitarios es un avance significativo para el futuro de la caña de azúcar en Tucumán.

Palabras clave: caña de azúcar, dinámica de cultivo, variedad, cultivar, evolución varietal.

ABSTRACT

The crucial role of the EEAOC breeding program: varietal diversification in the sugarcane area of Tucumán, Argentina in the last 10 years

Since the 1970s, the Sugarcane Breeding Program of the Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (SCBP-EEAOC) has surveyed the distribution of sugarcane varieties in the cultivation area of Tucumán, the main sugar-producing region in Argentina. The variety LCP 85-384, released in the country in 1999, was first recorded in the varietal survey of 2001/2002 covering 13.5% of the sugarcane area in the province; this area rapidly grew to 83.1% in 2013/2014. Genetic homogeneity in a crop poses a serious

risk from a phytosanitary perspective, compromising the sustainability of the production system. To address this issue, the SCBP-EEAOC released eight new TUC varieties between 2009 and 2019, providing sugarcane growers with options to diversify their farms and reduce the cultivated area of LCP 85-384. This work aimed to evaluate how the release of new varieties by SCBP-EEAOC impacted on the sugarcane area diversification in Tucumán over the past decade. Data was obtained from varietal surveys conducted from 2014 to 2023. LCP 85-384 showed a persistent decline after its peak in 2013/2014 to 62.5% of the cultivated area in 2022/2023. This reduction correlates to an increase in the adoption of TUC varieties, which occupied 12.5%, 22.1%, and 30.4% of the sugarcane area in 2016/2017, 2019/2020, and 2022/2023, respectively. TUC 95-10 was the second-most cultivated variety, reaching 10.3%, 18.0%, and 17.1% of the cultivated area, respectively, displacing TUCCP 77-42 from second place. TUC 03-12 achieved 7.3% of the growing area in 2022/2023, becoming the third-most cultivated variety in Tucumán. The SCBP-EEAOC has played a crucial role in providing alternatives that have allowed reducing dependence on LCP 85-384. This progress toward a more balanced production system, which is less vulnerable to phytosanitary risks, represents a significant advance for the future of sugarcane in Tucumán.

Key words: genetic hegemony, crop dynamics, variety, cultivar, varietal evolution.

INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar representa un cultivo clave para la economía regional de Tucumán, Argentina, con 294.470 hectáreas cultivadas (Fandos *et al.*, 2024), el área cañera más grande del país. Sin embargo, la sostenibilidad de esta producción enfrenta numerosos desafíos, entre ellos la dependencia de un único cultivar dominante: LCP 85-384. Desde su introducción en 1999, esta variedad llegó a ocupar el 83,1% del área cultivada en la campaña 2013/2014 (Ostengo *et al.*, 2015), convirtiéndose en el pilar de la producción azucarera de la región. La extensa área ocupada por LCP 85-384 ha incrementado la vulnerabilidad del sistema frente a riesgos fitosanitarios. Por ejemplo, en 2005 rompió su resistencia a la roya marrón (Ramallo *et al.*, 2005), y en 2020 ocurrió lo mismo con el carbón de la caña de azúcar, con una prevalencia mayor al 85% (Bertani *et al.*, 2023). Como resultado, las nuevas variedades liberadas por el Programa de Mejoramiento Genético de Caña de Azúcar de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (PMGCA-EEAOC) enfrentan un entorno fitosanitario desfavorable, lo que complica su desempeño y amenaza su sostenibilidad a largo plazo.

Durante décadas, el PMGCA-EEAOC ha trabajado en el desarrollo de variedades TUC, enfocándose en lograr madurez temprana, destacado desempeño agrónomo e industrial y buen comportamiento fitosanitario. Este esfuerzo ha culminado en la liberación de ocho nuevas variedades entre 2009 y 2019: TUC 95-37, TUC 97-8, TUC 95-10, TUC 00-19, TUC 03-12, TUC 02-22, TUC 06-7 y TUC 00-65, proporcionando a los productores cañeros opciones para diversificar el cultivo y reducir el área plantada con LCP 85-384. La diversificación varietal no es solo una estrategia para mitigar los riesgos asociados con la homogeneidad genética, sino también una herramienta esencial para asegurar la estabilidad productiva del sistema agroindustrial. Con el objetivo de comprender en profundidad este cambio, se analizó el impacto de la libe-

ración de las variedades TUC en la diversificación del área cañera de Tucumán, Argentina, durante la última década.

MATERIALES Y MÉTODOS

Este estudio se basó en datos recopilados por el PMGCA-EEAOC a través de relevamientos sistemáticos realizados en el área cañera de Tucumán entre 2014 y 2023. Se tomó como referencia la campaña 2013/2014, punto en el que la variedad LCP 85-384 alcanzó su máxima expansión de área cultivada. A partir de este pico, se evaluó la evolución de la composición varietal en las campañas subsiguientes, con un enfoque particular en 2016/2017, 2019/2020 y 2022/2023, para cuantificar el impacto de las nuevas variedades TUC liberadas. Se implementó un sistema de relevamiento estratificado por regiones productivas, cubriendo tanto a pequeños como a grandes productores. La información recopilada incluyó el número de surcos o hectáreas cultivadas con cada variedad en los campos comerciales de cada productor encuestado, considerando todas las edades de cultivo. Se estableció un umbral mínimo del 40% del área cañera relevada, considerado necesario para una estimación fiable de la composición varietal del área cultivada con caña de azúcar. Cada relevamiento realizado durante las diferentes campañas cubrió, aproximadamente, 1000 productores. Se calculó la contribución relativa de cada variedad en el área cultivada total para cada zafra evaluada, utilizando el área cañera relevada por la sección Sensores Remotos de la EEAOC como referencia. La dinámica de la distribución varietal en la región cañera de Tucumán durante la última década se analizó utilizando un enfoque descriptivo basado en gráficos evolutivos y cálculos porcentuales. Este análisis permitió la identificación de las tendencias de adopción de nuevas variedades después de su liberación y la potencial reducción del área ocupada por LCP 85-384. Específicamente para la campaña 2022/2023 se recopiló información del área plantada con caña planta

discriminada por variedad, con el propósito de proyectar la futura diversificación del área cañera de Tucumán.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Durante la campaña 2016/2017, el 76,8% de la superficie cultivada estaba plantada con LCP 85-384 (Figura 1A), lo que muestra una reducción desde el 83,1% registrado en el relevamiento del 2013/2014 (Ostengo *et al.*, 2015). Mientras tanto, TUC 95-10 continuó expandiendo su adopción, alcanzando el 10,3% de la superficie en producción, reemplazando así a TUCCP 77-42 como la segunda variedad más cultivada (Ostengo *et al.*, 2015). TUC 97-8 y TUC 95-37 se mantuvieron en porcentajes bajos, mientras que TUC 00-19, liberada en 2013, comenzó a aparecer en el espectro varietal pero aún con una participación limitada (Figura 1A).

Durante la campaña 2019/2020, LCP 85-384 continuó con un marcado descenso en el área cañera de Tucumán, ocupando el 67,7% (Figura 1B). TUC 95-10 consolidó su posición como la segunda variedad más cultivada en la provincia, representando el 18,0% del área. TUC 97-8 y TUC 00-19 se mantuvieron en niveles bajos, mientras que TUC 03-12, liberada en 2015, apareció por primera vez en la encuesta, ocupando el 1,0% de la superficie cultivada (Figura 1B).

En la campaña 2022/2023, LCP 85-384 mantuvo su tendencia decreciente, ocupando el 62,5% de la superficie cultivada (Figura 1C), lo que representa una reducción significativa en comparación con campañas anteriores. TUC 95-10 y TUC 03-12 se consolidaron como las principales alternativas al cultivar predominante, alcanzando el 17,1% y 7,3% del área, respectivamente. Dos variedades liberadas recientemente (2019), TUC 02-22 y TUC 06-7, comenzaron a mostrar participación en la composición varietal, marcando el inicio de una transición sustancial.

La Figura 2 muestra un cambio estructural en la composición varietal a lo largo del tiempo. LCP 85-384 sigue siendo una variedad predominante, ocupando un área

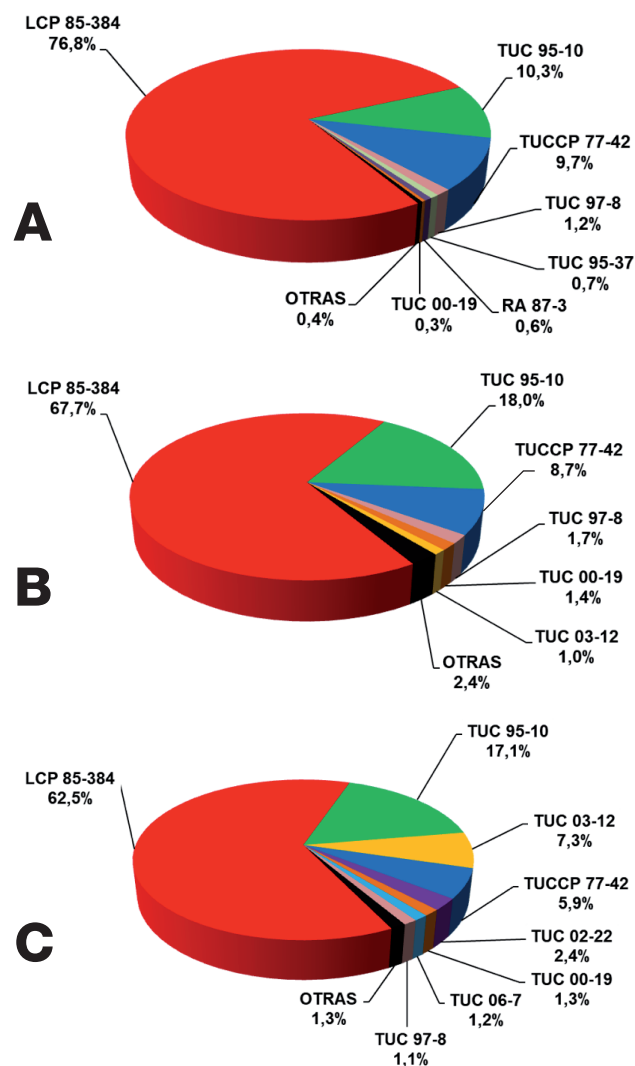


Figura 1. Distribución porcentual de las principales variedades cultivadas en el área cañera de Tucumán, Argentina, durante las campañas (A) 2016/2017, (B) 2019/2020 y (C) 2022/2023.

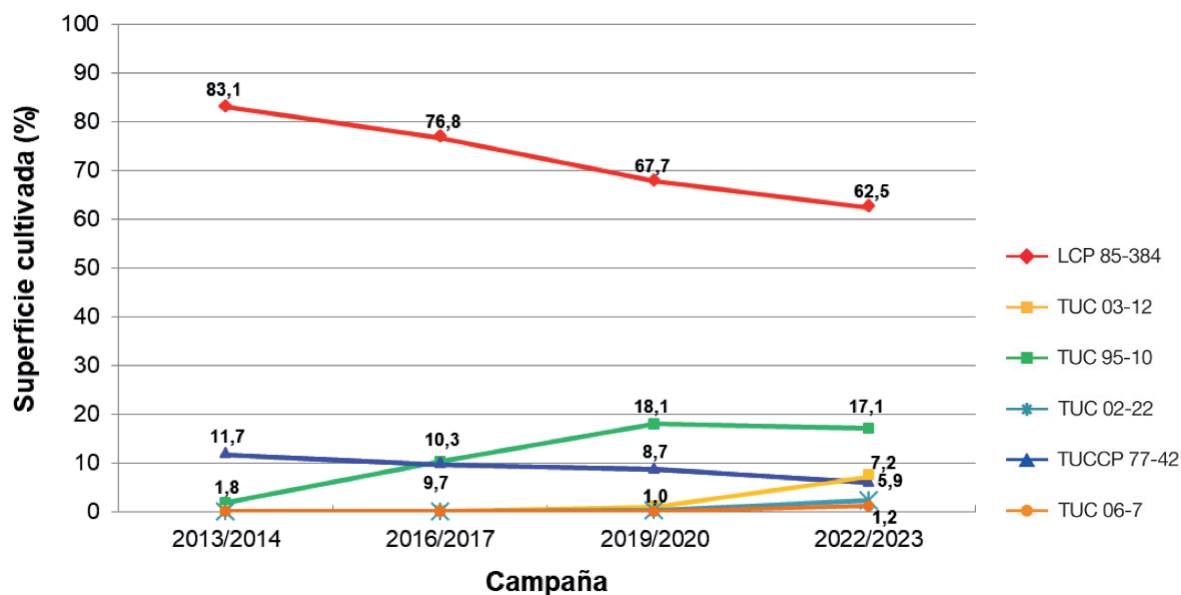


Figura 2. Dinámica de la composición de las variedades más relevantes en el área cultivada con caña de azúcar de Tucumán, Argentina, entre las campañas 2013/2014, 2016/2017, 2019/2020 y 2022/2023.

que excede el 25%, la proporción máxima recomendada en otros países (Cursi *et al.*, 2022). Sin embargo, ha perdido más de 20 puntos porcentuales desde 2013/2014, cuando alcanzó su valor máximo (Ostengo *et al.*, 2015). Las nuevas variedades liberadas por el PMGCA-EEAOC están siendo adoptadas progresivamente, lo que refleja su aceptación por parte del sector productivo. Desde la campaña 2016/2017, TUC 95-10 se estableció como la segunda variedad más cultivada en Tucumán. Además, desde la campaña 2019/2020, TUC 03-12 evidenció una difusión acelerada, con un aumento de 6,2 puntos porcentuales.

TUC 02-22 y TUC 06-7 comenzaron a ser consideradas por los productores cañeros de Tucumán en sus plantaciones de caña planta durante la campaña 2022/2023 (Figura 3). Un dato particularmente revelador es que, durante dicha campaña, un total del 44,1% de las plantaciones establecidas incluyeron cinco variedades TUC liberadas en los últimos 12 años (Figura 3), lo que demuestra su aceptación por parte del sector productivo.

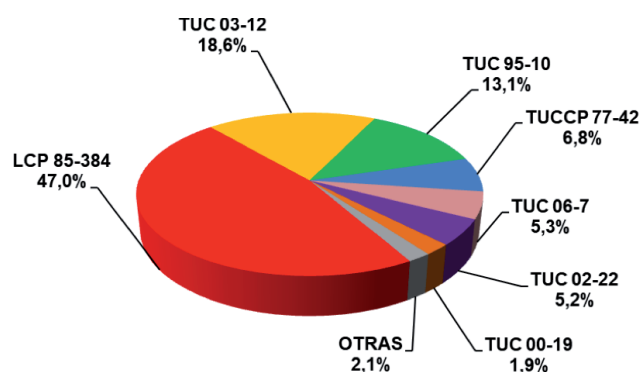


Figura 3. Distribución porcentual de variedades para la edad de caña planta en el área plantada con caña de azúcar de Tucumán, Argentina, durante la campaña 2022/2023.

CONCLUSIONES

El PMGCA-EEAOC ha desempeñado un papel crucial en la diversificación varietal del área cañera de Tucumán a través de la liberación de variedades TUC, contribuyendo a una mayor sostenibilidad en el sistema agroindustrial. La reducción en el área ocupada por LCP 85-384 y el aumento en la adopción de variedades TUC demuestran un progreso significativo hacia un sistema de producción más equilibrado y menos vulnerable en términos de riesgos fitosanitarios. El futuro de la caña de azúcar en Tucumán dependerá de la capacidad de integrar nuevas tecnologías de mejoramiento, estrategias de transferencia de conocimientos y prácticas de manejo sostenible para establecer la diversificación varietal como piedra angular de la productividad y la sostenibilidad del sector.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Bertani, R. P.; C. Funes; J. A. Lobo and S. Chaves. 2023. Reaction of commercial sugarcane varieties against smut disease in Tucumán, Argentina during the 2020/2021 and 2021/2022 seasons. *Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists* 31:379-384.
- Cursi, D. E.; H. P. Hoffmann; G. V. S. Barbosa *et al.* 2022. History and current status of sugarcane breeding, germplasm development and molecular genetics in Brazil. *Sugar Tech* 24:112-133.
- Fandos, C.; J. Scandaliaris; P. Scandaliaris; J. I. Carreras Baldrés y F. J. Soria. 2024. Estimación del área cosechable y de la producción de caña de azúcar para la zafra 2024 en Tucumán. *Reporte Agroindustrial EEAOC* 306.
- Ostengo, S.; J. V. Díaz; M. A. Espinosa; E. R. Chavanne; D. D. Costilla y M. I. Cuenya. 2015. Relevamiento de la distribución de variedades y de otras tecnologías aplicadas en el cultivo de caña de azúcar en la provincia de Tucumán: campaña 2013/2014. *Gacetilla Agroindustrial EEAOC* 78.
- Ramallo, J.; L. D. Ploper; E. Brito y J. Giardina. 2005. Distribución y severidad de la roya marrón de la caña de azúcar en la variedad LCP 85-384 en Tucumán. *Avance Agroindustrial* 26(1):9-11.



Revista Industrial
y Agrícola de
Tucumán

ISSN 0370-5404

En línea
1851-3018

Tomo 102 (2):
51-55; 2025



ESTACION EXPERIMENTAL
AGROINDUSTRIAL
OBISPO COLOMBRES
Tucumán | Argentina

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

Mapeo asociativo y localización de marcadores moleculares ligados a la resistencia a roya marrón de caña de azúcar

Andrea N. Peña Malavera*, Diego Costilla*, Aldo S. Noguera*, Atilio P. Castagnaro*, Santiago Ostengo* y Josefina Racedo*

* Instituto de Tecnología Agroindustrial del Noroeste Argentino (ITANOA), Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC) - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), CCT NOA Sur. Av. William Cross 3150. Las Talitas, Tucumán, R. Argentina, T4101XAC. Email: andreapema@eeaoc.org.ar

RESUMEN

La roya marrón de la caña de azúcar (*Puccinia melanocephala*) es una enfermedad de gran importancia en muchas regiones productoras de azúcar del mundo, que causa importantes pérdidas de rendimiento, con repercusiones económicas. El método más eficaz para controlar esta enfermedad es el uso de variedades comerciales resistentes. La disponibilidad de marcadores de diagnóstico para detectar la presencia del gen mayor *Bru1* ha permitido estudiar su eficacia y frecuencia en el germoplasma de la caña de azúcar, revelando que en algunos casos la resistencia a la roya marrón en las variedades modernas recae esencialmente en el gen *Bru1*. Para identificar fuentes genéticas alternativas de resistencia, se realizó previamente un estudio de genotipado selectivo en una población biparental, identificando SNPs asociados nuevas fuentes. El presente estudio tuvo como objetivo realizar un mapeo de asociación en una población compuesta por 305 accesiones del banco de germoplasma de la EEAOC, genotipadas con 9K SNPs derivados de DArT seq y fenotipadas para roya marrón en el campo bajo alta presión de inóculo natural. Se encontró que un total de 10 SNPs estaban asociados con la resistencia. La localización de estos marcadores en el mapa genético de la caña de azúcar permitirá identificar las regiones que controlan este rasgo de interés, poniéndolas a disposición de la comunidad científica y de los mejoradores.

Palabras clave: marcadores DArT-seq, genotipos, fenotipos, estructura poblacional, parentesco.

ABSTRACT

Association mapping and localization of molecular markers linked to sugarcane brown rust resistance

Sugarcane brown rust (*Puccinia melanocephala*) is a disease of major importance in many sugar producing regions of the world, causing significant yield losses and economic impacts. The most effective method for controlling this disease is the use of resistant commercial varieties. The availability of diagnostic markers to detect the presence of the major gene *Bru1* has allowed the study of its efficacy and frequency in sugarcane germplasm, revealing that in some cases resistance to brown rust in modern varieties is essentially due to the *Bru1* gene. To identify alternative genetic sources of resistance, a selective genotyping study was previously conducted in a biparental population, identifying SNPs associated with brown rust resistance. The present study aimed to perform association mapping in a population composed of 305 accessions from the EEAOC germplasm bank, genotyped with 9K SNPs derived from DArT seq and phenotyped for brown rust in the field under high natural inoculum pressure. A total of 10 SNPs were found to be associated with resistance. The localization of these markers on the sugarcane genetic map will allow for the identification of the regions that control this trait of interest, making them available to the scientific community and breeders.

Key words: DArT-seq markers, genotypes, phenotypes, population structure, kinship.

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

Fecha de
recepción:
18/09/2025

Fecha de
aceptación:
19/09/2025

INTRODUCCIÓN

El hongo *Puccinia melanocephala* H. & P. Sydow es el agente causal de la roya marrón de la caña de azúcar, una enfermedad foliar presente en muchas regiones productoras de este cultivo a nivel mundial. La presencia de un gen mayor de resistencia a roya marrón (*Bru1*) ha sido identificada en el cultivar R570 (Daugrois *et al.*, 1996) y los marcadores diagnósticos han permitido determinar que la resistencia, en la mayoría de las variedades comerciales a nivel global, está asociada con este gen. Esta amplia prevalencia amenaza la durabilidad de la resistencia conferida por *Bru1*, al incrementar el riesgo de brotes de la enfermedad (Racedo *et al.*, 2013). Como resultado, varios cultivares comerciales altamente productivos que se volvieron susceptibles a la roya marrón han sido discontinuados (Comstock *et al.*, 1992; Barrera *et al.*, 2013). Es importante asegurar una diversidad genética suficiente de resistencia entre las variedades comerciales cultivadas para prolongar la vida útil de los genes de resistencia.

Hasta la fecha, se han identificado otras fuentes de resistencia a la roya marrón. *Bru2* (Daugrois *et al.*, 1996; Raboin *et al.*, 2006) ofrece una fuente alternativa de resistencia y muestra potencial para diversificar las estrategias de resistencia; sin embargo, aún no se han reportado marcadores diagnóstico para su implementación efectiva. En un estudio previo (Chaves *et al.*, 2022), se localizaron fuentes alternativas de resistencia a *Bru1* y se identificaron SNPs asociados.

El presente estudio tiene como objetivo desarrollar una estrategia de GWAS (Genome-Wide Association Study, estudio de asociación de genoma completo) utilizando un panel de caña de azúcar compuesto por los genotipos más frecuentemente empleados en el programa de mejoramiento local. Mediante el análisis de datos de infecciones naturales y de marcadores moleculares obtenidos mediante GBS (Genotyping by Sequencing, genotipificación por secuenciación), la meta es identificar regiones asociadas con la resistencia a la roya marrón.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material vegetal

La población estuvo compuesta por 305 genotipos de caña de azúcar de los 789 que constituyen la colección de germoplasma del programa de mejoramiento de la EEAOC (Ostengo *et al.*, 2021). Mientras que la mayoría de ellos se utilizan con mayor frecuencia como progenitores para cruzamientos, otros se incluyeron con el fin de capturar diversidad alélica.

Extracción de ADN

El ADN se extrajo a partir de tejido foliar congelado siguiendo el protocolo de Diversity Arrays Technology (DART) Pty Ltd (www.diversityarrays.com/orderinstructions/plant-dna-extraction-protocol-for-dart/). La calidad y cantidad del ADN se evaluaron mediante geles de agarosa al 0,8% teñidos con GelRed, de acuerdo con los procedimientos recomendados por el proveedor de genotipificación por secuenciación (GBS).

Genotipado

La población de caña de azúcar fue genotipada utilizando la plataforma DArT-seq (Yarralumla, Australia), una tecnología de alto rendimiento basada en un método de reducción de complejidad del genoma, mediante una selección inteligente de fracciones genómicas que corresponden predominantemente a genes activos. Estas fracciones genómicas se secuencian posteriormente utilizando plataformas de NGS (Next-Generation Sequencing, secuenciación de nueva generación). Las secuencias generadas se procesaron mediante las canalizaciones analíticas propietarias de DArT-seq.

En resumen, para la identificación de polimorfismos de nucleótido único (SNPs), todas las etiquetas de todas las bibliotecas incluidas en el análisis con DArTsoft14 se agrupan mediante el algoritmo en C++ de DArT PL, seguido del análisis de los grupos para obtener loci SNP separados utilizando una serie de parámetros técnicos. Los datos se codificaron de la siguiente manera: 0 para el homocigoto de referencia, 1 para el homocigoto del SNP, 2 para el heterocigoto y “-” para el alelo nulo. Los SNPs obtenidos fueron filtrados para loci monomórficos y se aplicó un umbral de frecuencia mínima de alelo (MAF, *Minor Allele Frequency*) del 20%.

Fenotipado

La población de caña de azúcar fue evaluada mediante infecciones naturales de roya marrón en un diseño sin replicaciones en el campo experimental de la EEAOC (Las Talitas, departamento Tafí Viejo, provincia de Tucumán, Argentina). Cada genotipo estuvo representado por una fila de cuatro metros y se evaluó el desarrollo de la roya marrón bajo alta presión de inóculo durante el período más favorable para el desarrollo de la enfermedad. La variedad LCP 85-384 (altamente susceptible) se plantó en los bordes que rodeaban el ensayo para favorecer la infección natural.

Las reacciones a la roya marrón se puntuaron en cada parcela utilizando una escala de 1 (sin enfermedad) a 9 (más del 50% del tejido de la lámina foliar dañado), según lo descrito por Amorin *et al.* (1987), por dos observadores independientes. Los análisis de datos se realizaron con Navure 2.7.3 (Navure, 2023).

Análisis de mapeo asociativo

Se aplicó un modelo lineal mixto que incorpora una matriz de parentesco (K) para tener en cuenta la relación entre los genotipos. Los datos procesados se utilizaron para generar una matriz de relaciones genéticas K mediante la función A.mat de la librería rrBLUP, la cual calcula coeficientes de parentesco basados en la similitud aditiva de los genotipos.

El análisis de asociación genómica se realizó utilizando el modelo K, que incorpora la matriz de parentesco K como estructura de covarianza en el modelo (Peña Malavera *et al.*, 2018). Se utilizó el siguiente modelo lineal generalizado para evaluar la asociación entre cada SNP y el rasgo fenotípico:

$$y = \mu + x\beta + Zg + \epsilon$$

donde y es el fenotipo, μ es la media general, $x\beta$ representa el efecto del marcador (SNP), Zg es el efecto genético aleatorio modelado mediante la matriz de parentesco K , y ϵ es el error residual. Los valores de p para cada SNP se calcularon utilizando una estadística t . El umbral de significancia estadística se definió como 5×10^{-6} , lo cual corresponde a $-\log_{10}(5 \times 10^{-6}) \geq 5,30103$ (Chen *et al.*, 2021). Los SNPs con valores de p ajustados que cumplieran este criterio se consideraron significativos.

■ Análisis de las secuencias de SNP asociadas con la resistencia a la roya marrón en el genoma de caña de azúcar

Se analizaron las secuencias de los marcadores DArT-seq de caña de azúcar significativamente asociados con la resistencia a la roya marrón para estudiar su similitud y posición en el genoma de caña de azúcar. Este análisis se realizó utilizando las bases de datos del cultivar híbrido de *Saccharum* R570, mediante la herramienta BLAST y el Gene Browser en el Sugarcane Genome Hub (<https://sugarcane-genome.cirad.fr/>) (Gruber *et al.*, 2017).

■ RESULTADOS

En el mapeo asociativo, es importante conocer la estructura poblacional y el rasgo de interés. La Figura 1 ilustra la distribución de frecuencias de la severidad a roya marrón en la población bajo estudio. Los puntajes representan una medida de la severidad de la roya marrón o de la resistencia. El puntaje más frecuente es 1, con aproximadamente 180 observaciones, lo que indica que la mayoría de los individuos son resistentes. Los puntajes 2 y 3 tienen un número moderado de observaciones, alrededor de 50 cada uno. Los puntajes del 4 al 8 muestran un fuerte descenso en la frecuencia, con mínima representación en el conjunto de datos, lo que sugiere que los puntajes ele-

vados de roya (mayor severidad) son raros. En general, la distribución está sesgada hacia los puntajes bajos, destacando que la mayoría de las observaciones se encuentran en las categorías de menor severidad o alta resistencia.

Después de filtrar los marcadores monomórficos y aquellos con frecuencia de alelo menor (MAF) inferior al 20%, se utilizaron un total de 9251 SNPs para el análisis de asociación. Las correlaciones de los 9251 SNPs pueden observarse en el mapa de calor. No existen regiones en el mapa de calor donde la mayoría de los SNPs estén fuertemente correlacionados; esto podría indicar que no hay bloques genéticos (Figura 2).

El mapeo asociativo reveló 10 SNPs significativamente ligados a la resistencia a la roya marrón, superando el umbral de significancia de $-\log_{10}(5 \times 10^{-6}) \geq 5,30103$ (Figura 3). Cuando estas secuencias de SNP se analizaron en el genoma de caña de azúcar, solo 6 SNPs se alinearon con regiones genómicas depositadas en la base de datos (Tabla 1).

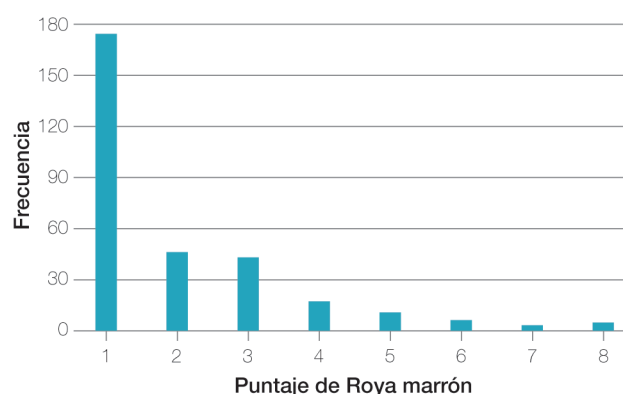


Figura 1. Distribución de frecuencias de la severidad a roya marrón, que varía de 1 a 9 en los 305 genotipos de caña de azúcar.

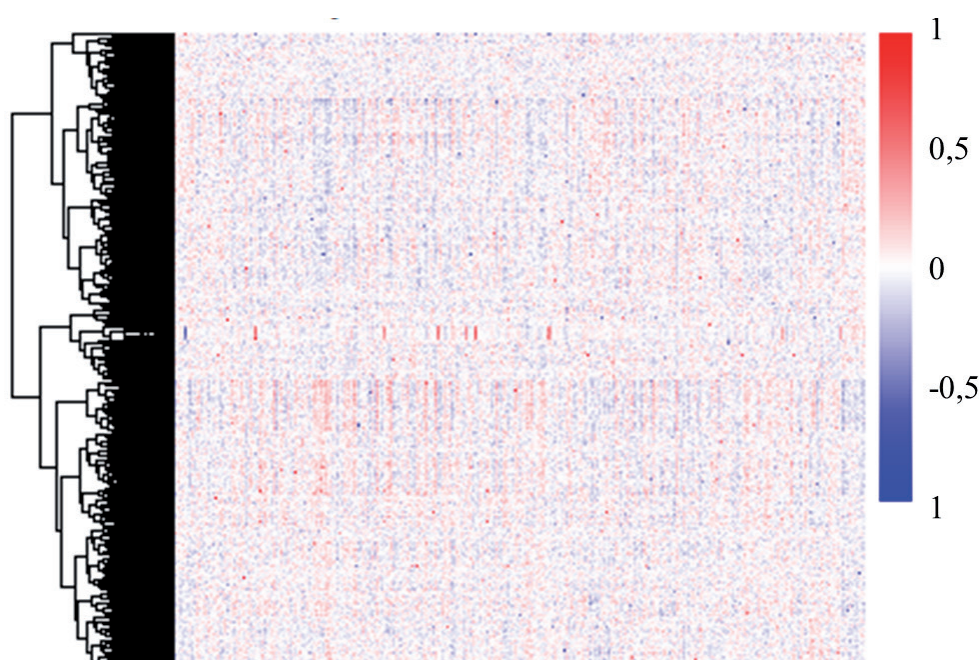


Figura 2. Mapa de calor de 9.251 SNP utilizados para el mapeo asociativo.

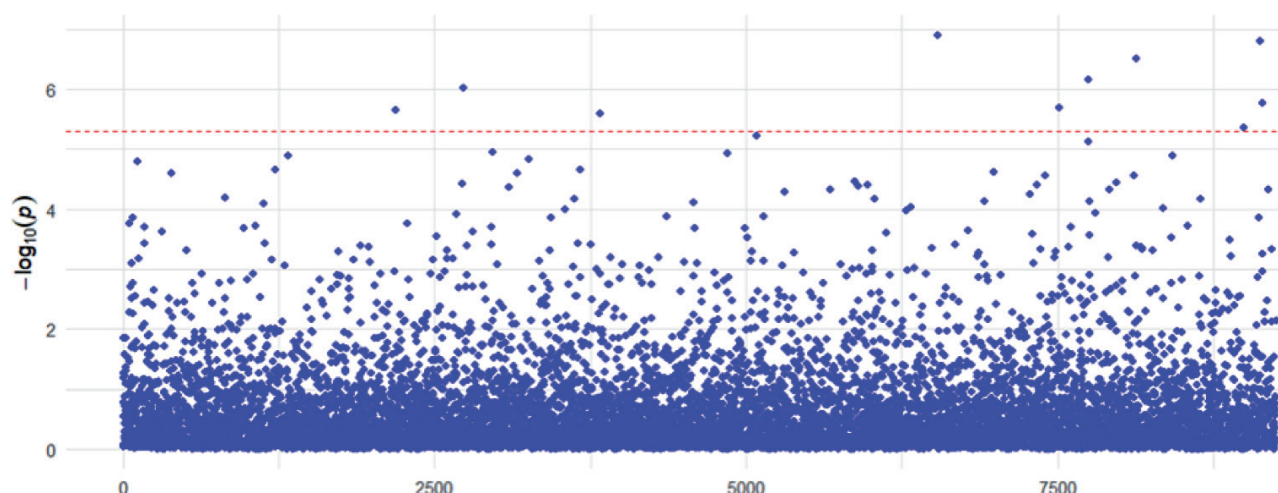


Figura 3. Gráfico Manhattan del modelo K de GWAS que muestra la significancia de cada SNP (escala logarítmica) en la resistencia a la roya marrón de caña de azúcar. La línea roja indica el umbral a nivel de todo el genoma de $-\log_{10}(5 \times 10^{-6}) \geq 5,30103$. El puntaje se presenta en el eje Y como $-\log_{10}(p)$.

Tabla 1. Resultados obtenidos del alineamiento de las secuencias de los 6 SNPs de caña de azúcar, ligados a la resistencia a la roya marrón, con el genoma del cultivar híbrido de *Saccharum* R570.

SNP	Posición en el genoma	Bases alineadas	% Identidad	Nombre del gen	InterPro
SNP1-BR	Chr5_9A:72600379..72600447	68	98,55	NC	
	Chr5C:26937867..26937935	68	98,55	NC	
SNP2-BR	Chr3C:6497759..6497827	68	98,55	SoffiXsponR570.03Cg021800.1	Nucleotidyltransferase superfamily (IPR043519), PAP/25A-associated (IPR002058), TUTase nucleotidyltransferase domain (IPR045100)
	Chr3B:5801183..5801251	68	98,55	SoffiXsponR570.03Bg021900.1	
	Chr3D:5725121..5725189	68	98,55	SoffiXsponR570.03Dg021900.1	
	Chr3A:4096960..4097028	68	98,55	SoffiXsponR570.03Ag020900.1	
	Chr3E:3692772..3692840	68	98,55	SoffiXsponR570.03Eg022700.1	
	Chr3F:3748381..3748448	67	97,10	SoffiXsponR570.03Fg021600.1	
SNP3-BR	Chr10F:33773798..33773866	68	98,55	NC	
	Chr10A:67237884..67237952	68	98,55	NC	
	Chr8_10A:25105163..25105231	68	98,55	NC	
	Chr10D:55218936..55219004	68	98,55	NC	
	Chr10B:62674606..62674674	68	98,55	NC	
SNP4-BR	Chr5F:3195122..3195190	68	98,55	NC	
	Chr5E:2947663..2947731	68	98,55	NC	
	Chr5A:3276992..3277060	68	98,55	NC	
	Chr5B:4481665..4481733	68	98,55	NC	
	Chr5B:4571316..4571384	68	98,55	NC	
	Chr5C:2952672..2952740	68	98,55	NC	
SNP5-BR	scaffold_118:104762..104830	68	98,55	SoffiXsponR570.1Z130300.1	Zinc finger C2H2 superfamily (IPR036236), Zinc finger C2H2-type (IPR013087)
	scaffold_88:9435975..9436043	68	98,55	SoffiXsponR570.6us88g040600.2	
	Chr6_9A:28883801..28883869	68	98,55	SoffiXsponR570.6_9Ag116600.2	
	Chr6A:4485207..4485275	68	98,55	SoffiXsponR570.06Ag020600.1	
	Chr6E:6785048..6785116	68	98,55	SoffiXsponR570.06Eg028600.1	

NC: región no codificante.

CONCLUSIÓN

Los marcadores SNP permiten la identificación de posibles QTLs para la resistencia a la roya marrón y pueden servir como valiosas herramientas moleculares para la selección de genotipos resistentes en el programa de mejoramiento. Actualmente, se está evaluando la contribución individual de cada SNP a la variación fenotípica observada.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Amorim, L.; A. Bergamin Filho; A. Sanguino; C. Cardoso; V. A. Moraes e C. R. Fernandes. 1987.** Metodologia de avaliação da ferrugem da cana-de-açúcar (*Puccinia melanocephala*). Boletim Técnico Copersucar 39: 13-16.
- Barrera, W.; J. Hoy and B. Li. 2013.** Effects of temperature and moisture variables on brown rust epidemics in sugarcane. *Journal of Phytopathology* 161: 98-106.
- Comstock, J. C.; J. M. Shine and R. N. Raid. 1992.** Effect of sugarcane rust on growth and biomass. *Plant Disease* 76: 175-177.
- Chaves, S.; S. Ostengo; R. P. Bertani; A. N. Peña Malavera; M. I. Cuenya; M. P. Filippone; A. P. Castagnaro; M. G. Balzarini and J. Racedo. 2022.** Novel alleles linked to brown rust resistance in sugarcane; Wiley Blackwell Publishing, Inc; *Plant Pathology*; 71; 8; 6-2022; 1688-1699.
- Chen, Z.; M. Boehnke; X. Wen and B. Mukherjee. 2021.** Revisiting the genome-wide significance threshold for common variant GWAS, G3 Genes|Genomes|Genetics, Volume 11, Issue 2, February 2021, jkaa056, <https://doi.org/10.1093/g3journal/jkaa056>
- Daugrois, J. H.; L. Grivet; D. Roques; J. Y. Hoarau; H. Lombard; J. C. Glaszmann and A. D'Hont. 1996.** A putative major gene for rust resistance linked with a RFLP marker in sugarcane cultivar 'R570'. *Theoretical and Applied Genetics* 92: 1059-1064.
- Gruber, B.; A. Georges; O. Berry and P. Unmack. 2017.** dartR: Importing and analyzing SNP and silicodart data generated by genome-wide restriction fragment analysis. R package version 0.93 <https://CRAN.R-project.org/package=dartR>
- Navure Team. 2023.** Navure (2.7.3): A data-science-statistic oriented application for making evidence-based decisions. URL <http://www.navure.com>.
- Ostengo, S.; G. Serino; M. F. Perera; J. Racedo; S. Y. Mamaní González; F. Yáñez Cornejo and M. I. Cuenya. 2021.** Sugarcane breeding, germplasm development and supporting genetic research in Argentina. *Sugar Tech* 24:166-180.
- Peña Malavera, A. N.; C. I. Bruno y M. G. Balzarini. 2018.** Control de falsos descubrimientos en mapeo asociativo con poblaciones estructuradas; Sociedad Argentina de Genética; *Journal of Basic and Applied Genetics* XXIX: 37-49
- R Core Team. 2018.** R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.
- Raboin, L.; K. Oliveira; L. Le Cunff; H. Telismart; D. Roques; M. Butterfield; J-Y. Hoarau; and A. D'Hont. 2006.** Genetic mapping in sugarcane, a high polyploidy, using bi-parental progeny: Identification of a gene controlling stalk colour and a new rust resistance gene. *Theoretical and Applied Genetics* 112: 1382- 1391.
- Racedo, J.; M. F. Perera; R. Bertani; C. Funes; V. González; M. I. Cuenya; A. D'Hont; B. Welin and A. P. Castagnaro. 2013.** *Bru1* gene and potential alternative sources of resistance to sugarcane brown rust disease. *Euphytica* 191: 429-436.



Revista Industrial
y Agrícola de
Tucumán

ISSN 0370-5404

En línea
1851-3018

Tomo 102 (2):
56-58; 2025



ESTACION EXPERIMENTAL
AGROINDUSTRIAL
OBISPO COLOMBRES
Tucumán | Argentina

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

Fecha de
recepción:
30/09/2025

Fecha de
aceptación:
30/09/2025

Huella hídrica del cultivo de caña de azúcar en la provincia de Tucumán, Argentina*

L. Patricia Garolera De Nucci*, Mario Javier Tonatto**, Augusto Gómez*, María Emilia Iñigo Martínez* y Enrique Feijóo*

*Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales y **Subprograma Agronomía de la Caña de Azúcar. EEAOC-Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombares. Av. William Cross 3150 (T4101XAC), Las Talitas, Tucumán, Argentina. Tel.: 381 452100. Email: pgarolera@eeaoc.org.ar

RESUMEN

El estudio cuantificó la huella hídrica del cultivo de caña de azúcar, variedad TUC 03-12, en Tafí Viejo (Tucumán-Argentina), siguiendo las directrices de la Water Footprint Network. Los resultados mostraron una huella hídrica verde de 118,8 m³/t, huella hídrica azul de 0 m³/t (por tratarse de un cultivo de secano) y gris de 678 m³/t, elevada por el uso de herbicidas con triazinas. Esta evaluación servirá como base para futuros análisis en otras etapas de la producción de bioetanol de caña de azúcar.

Palabras clave: caña de azúcar, sustentabilidad, recurso hídrico.

ABSTRACT

Relationship between sugarcane area zoning by production levels and soil fertility in Tucumán province, Argentina, using geotechnologies

The water footprint of the plant crop of sugarcane variety TUC 03-12 in Tafí Viejo (Tucumán-Argentina) was quantified. The study followed the guidelines of the Water Footprint Network. The results showed a green water footprint of 118.8 m³/t, a blue water footprint of 0 m³/t (it is a rainfed crop), and a grey water footprint of 678 m³/t, which was high due to the use of triazine herbicides. This evaluation serves as a basis for future analyses in other stages of sugarcane bioethanol production.

Key words: sugarcane, sustainability, water resource.

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

INTRODUCCIÓN

La escasez de agua dulce es un desafío global creciente, impulsado por las altas demandas de agua en la agricultura, la industria y las poblaciones urbanas y rurales. La formulación de estrategias para promover el uso eficiente del recurso hídrico se vuelve fundamental. La caña de azúcar es un cultivo clave para la producción de azúcar, biocombustibles y otros derivados, por lo que la cuantificación del consumo hídrico durante su crecimiento y procesamiento industrial resulta fundamental para la sostenibilidad del sector. Esta información es esencial tanto para realizar mejoras técnicas en el sector como para diseñar políticas públicas que garanticen un uso eficiente

del agua.

El análisis de la huella hídrica (HH) ha ganado terreno en los últimos años como un indicador para identificar las actividades que contribuyen a la escasez y contaminación de los recursos hídricos a lo largo de la cadena de suministro de un producto. Propuesta por Hoekstra & Hung (2002), y desarrollada por Chapagain y Hoekstra (2004), la HH se compone de tres elementos: la HH verde (agua de lluvia utilizada), la HH azul (agua superficial y subterránea empleada) y la HH gris (agua necesaria para diluir contaminantes hasta niveles aceptables). Si bien la HH por sí sola no es suficiente para evaluar el impacto ambiental completo de un proceso, su estimación puede contribuir a la evaluación de los impactos ambientales y

sociales del uso del agua, promoviendo una distribución más sostenible y equitativa.

Este estudio tiene como objetivo cuantificar la huella hídrica de la caña de azúcar en las condiciones agroecológicas de Tucumán, Argentina, siguiendo las directrices de la Water Footprint Network. Los resultados servirán como referencia para futuras investigaciones de HH en la etapa industrial, con el fin de proporcionar información para promover un uso sostenible y eficiente del recurso.

MATERIALES Y MÉTODOS

El presente estudio evaluó la huella hídrica de la producción de caña de azúcar en el departamento de Tafí Viejo, provincia de Tucumán, Argentina. Se utilizaron datos propios de ensayos de campo realizados en el período 2017/2018, incluyendo estudios fenológicos y de producción cultural. La variedad evaluada, TUC 03-12 en edad de caña planta, ha experimentado un aumento significativo en el área cultivada en los últimos años.

El sistema de manejo agronómico planteado corresponde al sistema de producción convencional de caña de azúcar en Tucumán, que incluye la plantación manual, el uso de agroquímicos convencionales, la ausencia de riego suplementario y un rendimiento estimado de 81 t de caña/ha. El cultivo se abasteció únicamente con agua de lluvia. Se definió una unidad funcional de 1 tonelada de caña de azúcar y un alcance temporal de 1 año.

Para determinar las huellas hídricas verde, azul y gris, se siguió el procedimiento propuesto en el Manual de Evaluación de la Huella Hídrica (Hoekstra *et al.*, 2011).

Para el cálculo de la Huella Hídrica verde y azul se empleó el software CROPWAT 8.0, desarrollado por FAO (FAO, 2010), a fin de estimar los requerimientos hídricos del cultivo y las necesidades de riego.

Los datos agroclimáticos fueron obtenidos de la estación meteorológica de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC) ubicada en El Colmenar (<https://agromet.eeaoc.gob.ar/>). Estos datos incluyeron temperaturas mínimas y máximas, humedad relativa, velocidad del viento, precipitación y horas de luz solar.

La información relacionada con el cultivo y el tipo de suelo (predominantemente franco limoso) se obtuvo de informes de la FAO (FAO, 2006) y de análisis de laboratorio y mediciones directas en campo proporcionadas por la EEAOC.

En CROPWAT 8.0, se trabajó con la opción “Calendario de riego” y se indicó la opción “sin riego”. La HH verde se calculó utilizando la evapotranspiración diaria y la precipitación efectiva diaria. Debido a las condiciones de secano adoptadas en este estudio, la componente azul del uso de agua fue cero. En consecuencia, la huella hídrica azul ($\text{m}^3 \text{ t}^{-1}$) se estimó considerando únicamente el agua incorporada con fertilizantes y herbicidas.

Para el cálculo de la Huella Hídrica gris se utilizó la ecuación:

$$WF_{\text{grey}} = \frac{\alpha AR / (C_{\text{max}} - C_{\text{nat}})}{Y}$$

Donde:

α : factor de lixiviación-escorrentía.

AR: tasa de aplicación de agroquímicos (kg ha^{-1}).

C_{max} : concentración máxima aceptable (kg m^{-3}).

C_{nat} : concentración natural del contaminante en el cuerpo de agua receptor (kg m^{-3}), considerada cero en este caso de estudio para todos los contaminantes.

Y: rendimiento del cultivo.

Los valores de C_{max} se tomaron de la legislación vigente (Decreto 831/93 sobre Residuos Peligrosos de la Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación Argentina), mientras que las fracciones de lixiviación-escorrentía corresponden a valores recomendados en la literatura.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados de la huella hídrica para el sistema de manejo agronómico planteado para la caña de azúcar en la provincia de Tucumán fueron los siguientes:

Huella hídrica verde: 118.8 m^3/t

Huella hídrica azul: 0 m^3/t

Huella hídrica gris: 678 m^3/t

Los bajos valores de HH azul se deben a la consideración de la agricultura de secano; además, solo está asociada al agua de dilución y aplicación de agroquímicos (cercano a cero).

Cabe destacar que el uso de riego suplementario en el cultivo de caña de azúcar en la provincia de Tucumán no es una práctica frecuente, ya que las condiciones ambientales naturales permiten el desarrollo de este cultivo favorablemente. Este se utiliza principalmente en zonas marginales donde el crecimiento del cultivo es restringido. Por lo tanto, el riego es eventual y no está integrado en el ciclo productivo, lo que demuestra una gestión irregular del recurso.

La HH gris presentó valores altos, debido principalmente al uso de herbicidas a base de triazinas. Si bien la mayoría de los estudios indican que la aplicación de fertilizantes nitrogenados es la principal contribución de la HH gris, en este caso el uso de N fue ampliamente superado por la atrazina. La atrazina, un herbicida de postemergencia, resultó ser el contaminante crítico, por encima de los demás agroquímicos.

Los valores de HH gris dependen en gran medida de las concentraciones máximas admisibles y las fracciones de lixiviación-escorrentía de los agroquímicos utilizados en el cultivo de caña de azúcar.

CONCLUSIONES

El estudio de la huella hídrica del cultivo de caña de azúcar en la provincia de Tucumán, Argentina, reveló una huella hídrica verde de 118.8 m^3/t , una huella hídrica azul de 0 m^3/t y una huella hídrica gris de 678 m^3/t . La baja huella hídrica azul se atribuye a las condiciones de cultivo de secano y se limita al agua de dilución y aplicación de agroquímicos. Por otro lado, la elevada huella hídrica gris se debe principalmente al uso de herbicidas a base de triazinas, siendo la atrazina el contaminante crítico, por encima de los fertilizantes nitrogenados en este aspecto.

Estos resultados proporcionan un escenario de referencia importante para la comprensión del consumo de agua en la etapa agrícola de la producción de caña de azúcar en la región. La información obtenida es fundamental para avanzar en la cuantificación de la huella hídrica en las etapas industriales de la cadena productiva del bioetanol de caña de azúcar, así como para informar el desarrollo de políticas públicas que promuevan un uso más eficiente y sostenible de los recursos hídricos en la provincia de Tucumán.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

Chapagain, A. K. & A. Y. Hoekstra. 2004. Water footprints of nations: Water use by people as a function of

their consumption patterns. UNESCO-IHE Institute for Water Education.

FAO. 2006. Crop Evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper 56.

FAO. 2010. CROPWAT 8.0 for Windows: User guide.

Hoekstra, A. Y. & P. Q. Hung. 2002. Water footprint of nations. UNESCO-IHE Institute for Water Education.

Hoekstra, A. Y.; A. K. Chapagain; M. M. Aldaya & M. M. Mekonnen. 2011. The Water Footprint Assessment Manual: Setting the global standard for water footprint assessment. Earthscan.

Secretaría de Ambiente y Desarrollo Sustentable de la Nación Argentina. 1993. Decreto 831/93 sobre Residuos Peligrosos.





**ESTACION EXPERIMENTAL
AGROINDUSTRIAL
OBISPO COLOMBRES**

Tucumán | Argentina