

Libro de resúmenes

XXIV REUNIÓN TÉCNICA NACIONAL DE LA CAÑA DE AZÚCAR

19 y 20 de marzo de 2026

Sociedad Rural de Tucumán

SOCIEDAD ARGENTINA DE TÉCNICOS DE LA CAÑA DE AZÚCAR

SATCA

desde 1982

COMISIÓN DIRECTIVA SATCA 2025–2029

Presidente: Scandaliaris, Jorge

Vicepresidente: Ruiz, Roberto Marcelo

Secretario: Mirande, Juan Carlos

Tesorera: Garolera De Nucci, Lorena Patricia

Prosecretario: Ostengo, Santiago

Protesorero: Del Pino, Fernando

Vocales Titulares:

- Vocal Titular I: Salvatore, Analía Ruth
- Vocal Titular II: Serino, Germán
- Vocal Titular III: Isas, Marcos

Vocales Suplentes:

- Vocal Suplente I: Feijóo, Enrique Alberto
- Vocal Suplente II: Luna, Héctor

Órgano de Fiscalización

Miembros Titulares:

- Miembro Titular I: García, José María
- Miembro Titular II: Salazar, Romina Asunción

Miembros Suplentes:

- Miembro Suplente I: Cruz, Marta Carolina
- Miembro Suplente II: Scandaliaris, Pablo

Editores del libro de resúmenes:

Marcos Gerardo Isas

José Maria Garcia

SOCIEDAD ARGENTINA DE TÉCNICOS DE LA CAÑA DE AZÚCAR

SATCA desde 1982

La Sociedad Argentina de Técnicos de la caña de Azúcar agradece el apoyo de los auspiciantes de este evento:

Auspiciantes ORO

JUAN MESSINA®
de Manufacturas Químicas Juan Messina SA

MERANOL

Grupo Sucroquim
Vand Syrer

KIEEK.
a full solutions company.

GRUPO ZAFRA
Soluciones de valor para el agro

AMARELA

Evolucionando juntos

Auspiciantes PLATA

Auspiciantes colaboradores

La Sociedad Argentina de Técnicos de la caña de Azúcar agradece el apoyo de las instituciones que acompañaron la jornada técnica:













La Sociedad Argentina de Técnicos de la Caña de Azúcar (SATCA) saluda con enorme afecto a la Chacra Experimental Agrícola Colonia Santa Rosa en el 75° aniversario de su fundación. Setenta y cinco años de trabajo sostenido al servicio del sector cañero merecen ser celebrados; por eso compartimos a continuación unas palabras de su director, el Dr. Germán Serino.

75 años de la Chacra Experimental Agrícola Santa Rosa: una institución pequeña, de gran impacto

Hace 75 años, un genetista visionario y pragmático fundó, junto con los ingenios del Norte Argentino, una chacra experimental para desarrollar variedades que permitieran “contribuir al progresivo perfeccionamiento cultural y fabril de la industria azucarera de las provincias de Salta y Jujuy”. Este genetista superó sobradamente ese objetivo. Sus primeras variedades se usaron en el Norte Argentino, en Tucumán y en otros países de Latinoamérica. Una de ellas, la NA56-79, se plantó extensamente en Brasil y llegó a ser, posiblemente, la variedad de caña de azúcar más plantada del mundo.

Una Chacra creada para resolver las necesidades de una región terminó generando genética con impacto mucho más allá de sus fronteras. Lo más notable es haber sostenido durante 75 años una capacidad propia de generar genética adaptada a nuestras condiciones y a las necesidades de nuestra industria. Bajo la dirección de Don Roberto Fernández de Ullívarri, Don Fanor Guillermo López y Ricardo Fernández de Ullívarri, la institución hizo siempre mucho con recursos limitados, o, como la definió Freddy Nicholson, “un monumento a la sensatez”.

Diez años de una nueva gestión

En 2016 la actual gestión asumió con el mandato de continuar el desarrollo varietal y buscar nuevas fuentes de sustentabilidad. Junto con los equipos de los ingenios y colaboradores externos, trabajó casi una década en estandarizar procesos y afinar metodologías. Sus principales logros fueron: ensayos multiambientales y una etapa definitoria en macroparcelas; el Programa de Mejoramiento Expandido, en conjunto con los equipos técnicos de los ingenios; un área regulatoria que permite a la Chacra actuar como desarrolladora de caracteres, y que acaba de obtener la autorización de CONABIA para su evento avanzado de caña transgénica; una batería de genes Bt para resistencia a insectos, y trabajos iniciales en edición genómica; servicios de análisis genéticos para la identificación molecular de variedades; y un sistema de propagación de plantas saneadas que, junto con la caña semilla, busca reducir las pérdidas por RSD y alargar la vida del cañaveral.

Los resultados ya se ven en el campo. Las macroparcelas respaldaron la adopción de la NA05-860 y de la NA03-559, hoy en plena expansión, y posicionan a nuevas líneas promisorias como NA12-1624, NA12-2740, NA14-3542 y NA16-1667. Mirando al futuro Los ingenios que hoy aportan a la Chacra representan cerca de 70.000 hectáreas, una superficie insuficiente para sostener un programa de mejoramiento, por austero que sea. Por eso se trabaja en ampliar la base de sustentación con esquemas de membresía de distinta flexibilidad, en Argentina y en el exterior, sin resignar la independencia, la orientación a resultados y la genética adaptada a la producción real.

En esa línea, la alianza con BOYD en Brasil busca ampliar el cultivo de variedades NA. Aunque está en desarrollo, las pruebas piloto ya validan su competitividad en otras geografías, como ocurrió con la NA56-79. Las variedades NA actuales destacan por su alto contenido de

azúcar y su sólido rebrote tras la cosecha mecánica, que permite sostener rendimientos durante más años y diluir los costos de plantación.

Los 75 años de la Chacra no son solo una historia para recordar, sino la base sobre la cual construir los próximos 75.

ÍNDICE GENERAL

PRESENTACIONES PLENARIAS 13
LA AGROINDUSTRIA DE LA CAÑA EN COLOMBIA: UN SECTOR QUE CONECTA 14
HERRAMIENTAS PARA LA GESTIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO 21
LA BIOENERGÍA COMO POLÍTICA DE ESTADO 27
UNA CADENA PRODUCTIVA CONSTRUIDA SOBRE LA INNOVACIÓN 31
PRESENTACIONES ÁREA AGRÍCOLA 34
APORTES AL MANEJO DEL FÓSFORO EN CAÑA DE AZÚCAR EN TUCUMÁN: BALANCE, REFERTILIZACIÓN Y NUTRICIÓN BALANCEADA 35
INDICADORES EDÁFICOS Y USO DE SENSORES REMOTOS PARA LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA POR AMBIENTES PRODUCTIVOS EN CAÑA DE AZÚCAR 40
EMPLEO DE DOSIS VARIABLES DE FERTILIZANTES EN CAÑA DE AZÚCAR EN AMBIENTES PRODUCTIVOS DIFERENCIALES EN DOS CAMPAÑAS AGRÍCOLAS EN TUCUMAN 46
VARIABILIDAD EDÁFICA Y RESPUESTA ESPECTRAL DEL CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR EN LAS PROVINCIAS DE SALTA Y JUJUY: BASES PARA EL MANEJO POR AMBIENTES 51
RELACIÓN ENTRE LA ZONIFICACIÓN DEL ÁREA CAÑERA SEGÚN LOS NIVELES DE PRODUCCIÓN Y LA FERTILIDAD DE LOS SUELOS EN TUCUMÁN, ARGENTINA, UTILIZANDO GEOTECNOLOGÍAS 56
ACTIVIDAD ENZIMÁTICA TOTAL COMO INDICADOR MICROBIOLÓGICO DE UN SUELO REGADO CON VINAZA 62
PREPARACIÓN TRADICIONAL DE SUELO VS CANTERIZADOR EN LA PLANTACIÓN MECANICA DE CAÑA DE AZÚCAR 67
LEDESMA INCORPORA UNA NUEVA TECNOLOGÍA PARA LA PRODUCCIÓN DE PLANTINES DE CAÑA DE AZÚCAR: TECNOLOGÍA PERRFECTA® 71
EVALUACIÓN DE PÉRDIDAS DE COSECHA DE CAÑA DE AZUCAR POR EXTRACTOR PRIMARIO MEDIANTE METODO DE BALANCE DE MASAS 75
ZONIFICACIÓN DEL ÁREA CAÑERA DE TUCUMÁN POR PERÍODOS DE COSECHA (SERIE 2017-2025) MEDIANTE TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA 80
EVOLUCIÓN DEL VALOR DE COMPRA DEL AZÚCAR Y DE LOS GASTOS DE COSECHA, TRANSPORTE Y FERTILIZACIÓN DEL CAÑAVERAL TUCUMANO, CAMPAÑAS 2015/16-2024/25 86

EVALUACIÓN DE HERBICIDAS PRE Y POSTEMERGENTES PARA EL MANEJO DE ROTTBOELLIA COCHINCHINENSIS: UNA AMENAZA EMERGENTE PARA LA PRODUCCIÓN DE CAÑA DE AZÚCAR EN TUCUMÁN 91

IMPACTO DE DIFERENTES ALTERNATIVAS DE MANEJO EN 3 ESPECIES DE MALEZAS AGRESIVAS EN EL CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR..... 97

EFICACIA DE HERBICIDAS PREEMERGENTES Y SU INDICE DE IMPACTO AMBIENTAL EN CAMPO PARA MANEJO DE SICYOS POLYACANTHUS EN CAÑA DE AZÚCAR TUCUMÁN, ARGENTINA 102

EFECTO DE LAS PRÁCTICAS CULTURALES EN EL ATAQUE Y LA OVIPOSICIÓN DE DIATRAEA SACCHARALIS (LEPIDOPTERA: CRAMBIDAE) EN CAÑA DE AZÚCAR - TUCUMÁN, ARGENTINA 106

EFICACIA E INDICADORES ECONÓMICOS Y AMBIENTALES PARA EL MANEJO SOSTENIBLE DE DIATRAEA SACCHARALIS EN CAÑA DE AZÚCAR 113

PRINCIPALES ENFERMEDADES QUE AFECTARON AL CULTIVO DE LA CAÑA DE AZÚCAR EN TUCUMÁN DURANTE LA CAMPAÑA 2024/2025 118

PROYECTO VITROPLANTAS DE LA EEAOC: LA IMPORTANCIA DEL DIAGNÓSTICO FITOSANITARIO Y SU IMPACTO EN EL ESTADO SANITARIO DE LOS LOTES COMERCIALES EN TUCUMÁN, ARGENTINA 123

CENSO VARIETAL DE CAÑA DE AZÚCAR EN JUJUY Y SALTA – ZAFRA 2025. 129

COMPORTAMIENTO PRODUCTIVO Y FITOSANITARIO DE TUC 08-10, UNA NUEVA VARIEDAD DE CAÑA DE AZÚCAR DESARROLLADA POR LA ESTACIÓN EXPERIMENTAL AGROINDUSTRIAL OBISPO COLOMBRES..... 134

COMPORTAMIENTO MADURATIVO Y POTENCIAL SACARINO DE LAS VARIEDADES TUC 08-10 Y TUC 03-12 EN DIFERENTES AMBIENTES DEL ÁREA CAÑERA DE TUCUMÁN 140

EVALUACIÓN DE INDICADORES DE DAÑO POR HELADAS EN VARIEDADES TUC DE CAÑA DE AZÚCAR EN TUCUMÁN, ARGENTINA 147

INFLUENCIA DE LA SEVERIDAD DE LAS HELADAS EN LA DINÁMICA DE EMERGENCIA DE CAÑA SEMILLA EN TRES VARIEDADES TUC EN TUCUMAN, ARGENTINA 157

CAÑA INTELIGENTE: POTENCIAL GENÉTICO PARA REDUCIR PÉRDIDAS DE NITRÓGENO Y OPTIMIZAR LA FERTILIZACIÓN 162

DESARROLLO DE EVENTOS TRANSGÉNICOS DE CAÑA DE AZÚCAR CON TOLERANCIA INCREMENTADA A SEQUÍA 167

LA EXPRESIÓN DE PROTEÍNAS INSECTICIDAS EN CAÑA DE AZÚCAR TRANSGÉNICA AUMENTA LA RESISTENCIA A DIATRAEA SACCHARALIS 173

IMPLEMENTACIÓN DE MEJORAS EN LA EDICIÓN GENÓMICA DE CAÑA DE AZÚCAR USANDO EL GEN MODELO ALS 179

DIVERSIDAD GENÉTICA EN EL BANCO DE GERMOPLASMA DE LA EEAOC Y EVALUACIÓN DE UNA COLECCIÓN NÚCLEO 184

PRECISIÓN DE LA SELECCIÓN GENÓMICA EN POBLACIONES DEL PROGRAMA DE MEJORAMIENTO DE CAÑA DE AZÚCAR DE LA EEAOC 189
MAPEO ASOCIATIVO Y LOCALIZACIÓN DE MARCADORES MOLECULARES LIGADOS A LA RESISTENCIA A LA ROYA MARRÓN DE LA CAÑA DE AZÚCAR 195
PRESENTACIONES ÁREA INDUSTRIAL 200
EXTRACTO DE LÚPULO COMO ALTERNATIVA NATURAL PARA EL CONTROL DE BACTERIAS ÁCIDO LÁCTICAS RESISTENTES EN FERMENTACIONES DE BIOETANOL 201
COMPORTAMIENTO DE LAS PRINCIPALES VARIABLES ECONÓMICAS DEL SECTOR AZUCARERO ARGENTINO EN EL PERÍODO 2001-2024 207
EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS CENIZAS DE VINAZA COMO ADITIVO PROMOTOR DE LAS REACCIONES DE PIRÓLISIS Y GASIFICACIÓN DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR 213
SIMULACIÓN DINÁMICA AVANZADA DE CALDERAS DE VAPOR BAGACERAS DE ALTA PRESIÓN 218
ESTUDIO DEL DESEMPEÑO TÉRMICO DE INTERCAMBIADORES DE CALOR PARA EL ENFRIAMIENTO DE VINAZA EN UN INGENIO DE TUCUMÁN. 222
CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DE RESIDUO DE TABACO DE LA PROVINCIA DE TUCUMÁN PARA COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN CALDERAS BAGACERAS 227
POTENCIAL DE METANIZACION DE LA VINAZA EN UN REACTOR UASB PILOTO 232
RECUPERACIÓN DE AGUA EN LA AGROINDUSTRIA MEDIANTE BIOCARBÓN ELECTROTÉRMICO Y FIBRAS HIDROFÍLICAS 237
MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE DESTILACIÓN PARA ALCOHOL HIDRATADO 243
EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL BRIXÓMETRO DE MICROONDAS SUCRE-MW MOD. T-25 EN TACHOS DE COCIMIENTO 248
EFECTO DEL COLOR DE LA MELAZA SOBRE EL RENDIMIENTO EN EL PROCESO DE FERMENTACIÓN 259
SISTEMA INTEGRAL DE INFORMACIÓN SUCROALCOHOLERA – IPAAT 266
MODELOS FT-NIRS PARA LA PREDICCIÓN DE VARIABLES DE CALIDAD EN CAÑA DESFIBRADA MEDIANTE SISTEMA BRUKER CPS 271
ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR DE TUCUMÁN PARA LA ESTIMACION DE RANGOS DEGRADACION DE HEMICELULOSA, CELULOSA Y LIGNINA 276
CLASIFICACIÓN TERMOQUÍMICA DE BIOMASAS AGRÍCOLAS DE TUCUMAN PARA SU APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO 280

RENTABILIDAD DEL PELLETIZADO DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR EN INGENIOS DEL NOROESTE ARGENTINO: ANÁLISIS ECONÓMICO Y OPORTUNIDADES 285

TECNOLOGÍA DE LIMPIEZA TOTAL (TCP) DE PHIBRO PARA LA OPTIMIZACION DEL SECTOR SUCROALCOHOLERO 291

IMPLEMENTACIÓN INDUSTRIAL DE SULFITACIÓN MEDIANTE APLICACIÓN DIRECTA DE SO_2 LICUADO (SULFITO LÍQUIDO AZUCARERO) EN JUGO DE CAÑA DE AZÚCAR 293

UNLEASH THE POWER OF DIGITAL TOOLS: PROCESS DEVELOPMENT AND SCALE-UP FOR CHROMATOGRAPHY UNITS ASSISTED BY PERFORM 4.0 296

ASSESSING THE CARBON FOOTPRINT OF INDUSTRIAL EQUIPMENT: A CASE STUDY IN CANE SUGAR PROCESSING 304

AN IMPROVED PROCESS IN CANE SUGAR PRODUCTION WITH A SOFTENING ION-EXCHANGE STEP FOR MAJOR GAINS 316

POSTERS ÁREA AGRÍCOLA 324

CUANTIFICACIÓN, CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA Y EFICIENCIA DE RECOLECCIÓN DE RAC DE CAÑA DE AZÚCAR EN TUCUMÁN 325

IMPORTANCIA DEL AISLAMIENTO DE BACTERIAS PROMOTORAS DEL CRECIMIENTO AUTÓCTONAS ENDÓFITAS DE CAÑA DE AZÚCAR (SACCHARUM OFFICINARUM) EN TUCUMÁN 330

EVOLUCIÓN FITOSANITARIA DE SEMILLEROS BÁSICOS Y REGISTRADOS EN LA PROVINCIA DE TUCUMÁN PERÍODO 2020 - 2024 335

ANÁLISIS RETROSPECTIVO DE PROGENITORES EN EL PROGRAMA DE MEJORAMIENTO GENÉTICO DE CAÑA DE AZÚCAR DE LA ESTACIÓN EXPERIMENTAL AGROINDUSTRIAL OBISPO COLOMBRES DE 1998 A 2020 340

ESTRATEGIAS DE FERTILIZACIÓN NITROGENADA CON NANOFERTILIZANTES EN CAÑA DE AZÚCAR 344

BIOINDICADORES DEL SUELO BAJO SISTEMAS CONTRASTANTES DE MANEJO DEL RESIDUO POSCOSECHA DE CAÑA DE AZÚCAR 347

MUTAGÉNESIS IN VITRO COMO ESTRATEGIA PARA INCREMENTAR LA VARIABILIDAD GENÉTICA EN CAÑA DE AZÚCAR 352

DESEMPEÑO PRODUCTIVO Y ADAPTABILIDAD AMBIENTAL DEL CULTIVAR TUC 03-12 ANALIZADO MEDIANTE DOS ENFOQUES ESTADÍSTICOS 357

IMPACTO DEL CARBÓN DE LA CAÑA DE AZÚCAR EN EL PROCESO DE SELECCIÓN DEL PROGRAMA DE MEJORAMIENTO GENÉTICO DE LA EEAOC DURANTE LOS ÚLTIMOS 10 AÑOS 363

PRINCIPALES ENFERMEDADES QUE AFECTARON AL CULTIVO DE LA CAÑA DE AZÚCAR EN TUCUMÁN DURANTE LA CAMPAÑA 2024/2025 366

EVALUACIÓN DEL DAÑO DE Diatraea saccharalis (LEPIDOPTERA: CRAMBIDAE) EN VARIEDADES TUC DE RECIENTE LIBERACIÓN EN LA PROVINCIA DE TUCUMÁN 372

CONTROL DE VITROPATÓGENOS EN EL ESQUEMA DE PRODUCCIÓN IN VITRO DE CAÑA DE AZÚCAR EN LA EEAOC 378

EFECTO COMBINADO DEL RESIDUO AGRÍCOLA DE COSECHA Y VICIA VILLOSA SOBRE GRUPOS FUNCIONALES DE MALEZAS EN CAÑA DE AZÚCAR 381

LECHERON VARIEGADO, EUPHORBIA GRAMINEA JACQ (EUPHORBIACEAE), NUEVA MALEZA ASOCIADA AL CULTIVO DE CAÑA DE AZUCAR, JUJUY, ARGENTINA. 387

ANÁLISIS DE CICATRICES DE QUEMA DE CAÑAVERALES BAJO LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN EN LA PROVINCIA DE TUCUMÁN 393

RELACIÓN ENTRE LA INTENSIDAD DE INFESTACIÓN DE DIATRAEA SACCHARALIS Y LA EDAD DE CAÑA PLANTA EN CAÑAVERALES UTILIZANDO SIG 398

PRESENTACIONES PLENARIAS

SOCIEDAD ARGENTINA DE TÉCNICOS DE LA CAÑA DE AZÚCAR

SATCA desde 1982

LA AGROINDUSTRIA DE LA CAÑA EN COLOMBIA: UN SECTOR QUE CONECTA

Claudia Calero

Presidenta de ASOCAÑA – Colombia

La caña como eje de un sistema productivo

La agroindustria de la caña de azúcar en Colombia es mucho más que una actividad agrícola e industrial. A lo largo de más de 160 años en el valle del río Cauca, se consolidó como un sistema capaz de articular producción, investigación, innovación, desarrollo territorial, sostenibilidad y generación de oportunidades para miles de personas.

Esa capacidad para vincular actores y propósitos diversos se resume en una idea que recorre toda la experiencia colombiana: la caña sí nos une. Une a productores e ingenios; conecta instituciones científicas y organizaciones gremiales; impulsa a las comunidades; promueve la conservación ambiental y contribuye a la transición energética. Más que una cadena productiva, es un ecosistema sostenido por la cooperación entre múltiples actores.

La magnitud de ese sistema se advierte en su alcance productivo y social. Reúne a doce ingenios azucareros y a miles de familias cultivadoras distribuidas sobre cientos de miles de hectáreas sembradas con caña de azúcar. En conjunto, genera empleo para cientos de miles de personas, produce millones de toneladas de caña y abastece tanto al mercado interno como a numerosos destinos internacionales.

Su proyección, además, trasciende las fronteras colombianas. Cada año, una parte significativa de la producción azucarera se exporta a más de sesenta países, entre ellos Estados Unidos, Chile, el Caribe, la Unión Europea, Perú, Ecuador y Canadá. Así, Colombia se afirma como un proveedor competitivo en los mercados internacionales.

Un ecosistema institucional construido para el desarrollo

Uno de los principales atributos de la cadena colombiana de la caña de azúcar es la solidez de su entramado institucional. Durante las últimas décadas, impulsó organizaciones especializadas que cumplen funciones complementarias y abordan de manera coordinada los desafíos productivos, tecnológicos, ambientales y sociales.

En el centro de ese ecosistema se encuentra Asocaña, organización gremial fundada en 1959 para promover el desarrollo y la sostenibilidad de la actividad. Su labor articula a los ingenios y cultivadores afiliados y genera espacios de coordinación y representación.

La investigación y la innovación tienen como principal referente a Cenicaña, creado en 1977 gracias al aporte voluntario de ingenios y cultivadores. Desde entonces, el centro produce conocimiento científico, desarrolla tecnología y transfiere resultados para mejorar la competitividad y la sostenibilidad de toda la cadena sucroenergética.

Ese mismo año nació Tecnicaña, asociación orientada a la formación continua y al intercambio entre los profesionales de la actividad. Sus capacitaciones, seminarios y encuentros técnicos favorecen una actualización permanente.

La institucionalidad se proyecta también sobre el territorio mediante iniciativas ambientales y sociales. Entre ellas se destaca la restauración de veintiséis cuencas hidrográficas que abastecen de agua a más de tres millones y medio de personas, junto con programas financiados por aportes voluntarios de ingenios y cultivadores para fortalecer la infraestructura social y consolidar la reputación de la cadena.

Este entramado hizo posible sostener una visión de largo plazo basada en cuatro pilares: productividad, innovación, sostenibilidad y desarrollo, concebidos como dimensiones inseparables de la competitividad colombiana.

Productividad basada en innovación y sostenibilidad

Instituciones sólidas y mecanismos estables de cooperación permitieron alcanzar condiciones productivas que hoy distinguen a la cadena de la caña del promedio agropecuario colombiano.

La gestión del agua ofrece un ejemplo elocuente. Mientras solo una proporción reducida de la agricultura nacional dispone de riego tecnificado, en la producción cañera toda la superficie cultivada cuenta con esa infraestructura. Esto mejora la eficiencia en el uso del recurso hídrico y reduce la vulnerabilidad frente a la variabilidad climática.

Otro rasgo diferencial es la asistencia técnica. Frente a la cobertura limitada que caracteriza a buena parte del agro, todos los cultivadores vinculados a esta actividad reciben acompañamiento permanente, lo que facilita la incorporación de tecnologías, buenas prácticas y procesos de mejora continua.

La formalización del empleo aporta un tercer elemento distintivo. Mientras la informalidad sigue siendo uno de los principales desafíos del campo colombiano, la cadena de la caña sostiene relaciones laborales formales y ofrece condiciones salariales superiores al promedio, con efectos directos sobre la estabilidad económica de los trabajadores y sus familias.

Estos resultados muestran que la productividad no depende solo de factores tecnológicos o económicos. También se construye con instituciones sólidas, cooperación entre actores y una visión compartida de largo plazo.

Estabilidad para producir e invertir

La solidez del sistema colombiano se apoya, además, en relaciones que brindan previsibilidad tanto a los ingenios como a los cultivadores. Esa estabilidad explica en parte su continuidad y su capacidad para sostener inversiones de largo plazo.

La mayor parte de la materia prima procesada por los ingenios proviene de productores independientes, que aportan cerca de las tres cuartas partes de la caña industrializada. El resto corresponde a plantaciones propias. Esta estructura integra a productores e industria dentro de un mismo sistema económico.

El vínculo entre ambas partes se formaliza mediante contratos de largo plazo que ofrecen seguridad a quienes producen la caña y a quienes la industrializan. Existen distintas modalidades, entre ellas compraventa, participación y arrendamiento, adaptadas a las diferentes realidades productivas.

Esa previsibilidad favorece la planificación de inversiones, la incorporación de nuevas tecnologías y la continuidad de los programas de asistencia técnica. Se genera así un círculo virtuoso que fortalece la competitividad de toda la cadena.

En este marco, la estabilidad supera su dimensión económica y se vuelve un componente central del desarrollo territorial. Productores, trabajadores e industria comparten un horizonte que facilita la innovación y consolida relaciones de confianza.

Reglas claras para un sector competitivo

El caso colombiano muestra que la competitividad de una agroindustria no depende únicamente de la eficiencia empresarial. Requiere también un marco institucional que reduzca la incertidumbre y genere condiciones estables para invertir.

En el mercado azucarero, uno de los instrumentos más relevantes es la Franja Andina de Precios, diseñada para estabilizar los ingresos de los productores frente a las fuertes oscilaciones internacionales.

El mecanismo funciona de manera contracíclica. Cuando los precios internacionales disminuyen y las importaciones de bajo costo podrían afectar la producción local, contribuye a proteger la rentabilidad de los productores. Cuando esos precios aumentan significativamente, ayuda a moderar el impacto sobre el mercado interno y los consumidores.

La Franja Andina, por lo tanto, no opera solo como una medida de protección. Reduce la volatilidad y crea condiciones favorables para planificar inversiones de largo plazo.

Las reglas previsibles fortalecen el funcionamiento del mercado. Lejos de obstaculizar la competencia, un marco regulatorio estable crea el entorno necesario para que productores e industrias inviertan, innoven y mejoren su productividad con una perspectiva sostenida.

El desarrollo de las comunidades como parte del negocio

La cadena colombiana concibe el bienestar de las comunidades como una dimensión inseparable de su propia sostenibilidad. No se trata de una acción complementaria, sino de una condición que fortalece el territorio y contribuye a la continuidad del sistema productivo.

Esa visión se traduce en programas destinados a promover la economía local, mejorar el acceso a servicios esenciales y ampliar las oportunidades de las familias rurales.

Entre las iniciativas presentadas sobresalen los programas de apoyo al emprendimiento, que impulsaron cientos de pequeños negocios capaces de dinamizar las economías locales y mejorar los ingresos familiares. A ellos se suman acciones de atención sanitaria que acercan servicios especializados a comunidades con acceso limitado.

La infraestructura ocupa otro lugar central. Las inversiones en caminos rurales mejoran la conectividad, facilitan el transporte de personas y mercaderías y refuerzan la integración territorial. A la vez, los programas educativos llegan a miles de estudiantes mediante mejoras en establecimientos escolares y proyectos comunitarios que benefician a decenas de miles de familias.

La articulación con otras actividades productivas amplía todavía más ese impacto. Los programas dirigidos a productores de cacao, café y panela promueven el acceso a mercados, la asistencia técnica y el fortalecimiento de organizaciones locales, en beneficio de familias campesinas, indígenas y afrodescendientes.

Se configura así una concepción amplia del desarrollo rural: el crecimiento asociado a la caña genera oportunidades que exceden el cultivo y fortalecen económica y socialmente a toda la región. La caña une, también, cuando vincula su propio progreso con el de los territorios que la sostienen.

La biodiversidad como parte del paisaje productivo

En Colombia, la sostenibilidad ambiental no se plantea como un objetivo separado de la producción, sino como parte de su funcionamiento. Conservar los ecosistemas integra una estrategia que busca compatibilizar la actividad agrícola con la protección de los recursos naturales.

El corredor ecológico desarrollado en el valle del río Cauca es uno de los ejemplos más representativos. Conecta trece ríos tributarios y ochenta humedales a lo largo de más de 890 kilómetros, favorece la conectividad ecosistémica y contribuye a preservar la biodiversidad de una de las principales regiones cañeras del país.

Las acciones de conservación abarcan aproximadamente 6.500 hectáreas de áreas protegidas, equivalentes a unas nueve mil canchas de fútbol. Buscan resguardar hábitats naturales, conservar los recursos hídricos y mantener servicios ecosistémicos indispensables para la producción agrícola y el bienestar de las comunidades.

Desde esta perspectiva, la competitividad futura dependerá en buena medida de la capacidad de producir sin degradar el capital natural que sustenta la actividad.

Una agroindustria donde nada se desperdicia

El azúcar representa solo una parte del potencial de la caña. En Colombia, el aprovechamiento integral de la biomasa dio lugar a una economía circular en la que prácticamente todos los subproductos encuentran una nueva aplicación.

El bioetanol es uno de los principales ejemplos de esa diversificación. Siete destilerías producen cada año cientos de millones de litros de este biocombustible renovable, destinado a sustituir parcialmente combustibles fósiles y reducir las emisiones asociadas al transporte.

El bagazo, residuo fibroso que queda después de extraer el jugo, es otro recurso estratégico. En lugar de desecharse, alimenta plantas de cogeneración que producen electricidad renovable. En conjunto, estas instalaciones generan cerca de 1.928 GWh por año; una parte se incorpora al sistema eléctrico nacional y abastece a cientos de miles de hogares colombianos.

La valorización alcanza también a la vinaza, utilizada para producir biofertilizantes que sustituyen una cantidad significativa de fertilizantes minerales importados. De este modo se reducen tanto los costos como el impacto ambiental asociado a su fabricación y transporte.

Este uso integral revela que la caña dejó de ser solo una fuente de alimentos: hoy funciona como una plataforma capaz de generar energía, insumos agrícolas y nuevas oportunidades de negocio a partir de una misma materia prima.

La transición energética como oportunidad

Sobre esa base, Colombia identifica para la caña un papel relevante en la transición hacia sistemas energéticos más sostenibles.

Además del bioetanol y de la electricidad obtenida por cogeneración, aparecen nuevas oportunidades vinculadas con el biometano, un combustible renovable con potencial para abastecer una proporción significativa de la demanda residencial de gas natural del valle del río Cauca.

Esta perspectiva amplía el papel tradicional de la actividad. La caña deja de destinarse únicamente al azúcar y se convierte en una fuente diversificada de biomasa, capaz de abastecer distintos mercados energéticos y contribuir a la descarbonización de la economía.

La transición energética surge así no solo como un desafío ambiental, sino también como una oportunidad para abrir nuevas cadenas de valor, incorporar tecnologías innovadoras y fortalecer la competitividad durante los próximos años.

Bioparques: la agroindustria del futuro

La evolución de este enfoque alcanza su máxima expresión en el concepto de bioparque: una plataforma industrial donde la biomasa de la caña se aprovecha de manera integral para obtener alimentos, energía, combustibles e insumos destinados a nuevos procesos productivos.

En esa visión, producir azúcar deja de ser el único propósito de la molienda. El bagazo puede transformarse en electricidad, biogás e hidrógeno; los jugos fermentables, en bioetanol y, en el futuro, en combustibles sostenibles para la aviación (SAF); otros subproductos, a su vez, pueden reincorporarse como fertilizantes orgánicos o materias primas para nuevas industrias.

La presentación proyecta un escenario de enorme potencial. A partir de los actuales volúmenes de molienda, Colombia podría ampliar significativamente su aporte a la transición energética mediante biogás, biometano, hidrógeno verde y combustibles sostenibles para el transporte aéreo, y consolidar así una bioeconomía basada en el aprovechamiento integral de la caña.

Los ingenios se proyectan, de este modo, desde su función azucarera tradicional hacia complejos bioindustriales capaces de producir múltiples bienes y servicios a partir de una única materia prima renovable.

Construir reputación para fortalecer al sector

Después de más de un siglo y medio de historia, la cadena colombiana comprendió que producir con eficiencia ya no era suficiente. En un contexto de creciente escrutinio social sobre

las actividades agroindustriales, también resulta indispensable construir confianza y comunicar el valor que se genera en los territorios.

La diversidad de actores involucrados —ingenios, cultivadores, trabajadores, investigadores, proveedores, organizaciones gremiales y comunidades— planteaba un desafío adicional: ¿cómo comunicar una identidad común sin borrar la riqueza de cada integrante?

La respuesta fue una estrategia colectiva de comunicación, financiada conjuntamente por ingenios y cultivadores, para fortalecer la reputación del conjunto. Partió de una premisa sencilla: detrás del azúcar, el bioetanol y la energía producida con caña hay una historia mucho más amplia, protagonizada por personas, comunidades, conocimiento y desarrollo territorial.

Con ese propósito nació Corazón de Caña, una plataforma común destinada a comunicar ese aporte desde una mirada integradora. Más que difundir información institucional, buscó construir un relato compartido capaz de representar a todos los actores y fortalecer su vínculo con la sociedad.

La reputación se construye con coherencia

Uno de los conceptos centrales de la presentación sostiene que la reputación no resulta de una campaña aislada. Es un proceso acumulativo que exige tiempo, consistencia y coherencia entre lo que una organización hace y lo que comunica.

La metáfora utilizada lo resume con claridad: la reputación se parece más a una maratón que a una carrera de velocidad. No se construye con acciones puntuales, sino mediante un esfuerzo sostenido que consolida credibilidad a lo largo del tiempo.

A partir de ese principio, la estrategia se organizó en cuatro pilares complementarios: investigar para comprender las percepciones de los distintos públicos; construir una narrativa común; desplegar una comunicación multicanal capaz de llegar a diferentes audiencias; y mantener una presencia permanente en el territorio que fortalezca el vínculo directo con las comunidades.

El proceso dejó varios aprendizajes. El primero: la reputación se construye en el territorio y no solo en los medios. El segundo: las historias que generan identificación deben apoyarse en datos verificables y en experiencias reales protagonizadas por personas concretas. Finalmente, quedó claro que la confianza solo se consolida mediante un trabajo constante y sostenido.

Mucho más que producir azúcar

La reflexión final sintetiza el recorrido de la conferencia. La cadena de la caña en Colombia no se define únicamente por los volúmenes de producción, las exportaciones o los indicadores económicos. Su principal fortaleza reside en conectar personas, instituciones y propósitos alrededor de un proyecto compartido.

Ese proyecto reúne investigación científica, innovación tecnológica, producción agrícola, industria, generación de energía, conservación de la biodiversidad, desarrollo comunitario y

construcción de confianza social. Cada componente fortalece a los demás y permite comprender el sistema como un entramado en el que la cooperación resulta tan importante como la eficiencia productiva.

La sostenibilidad, por lo tanto, no depende solo de incorporar tecnologías o mejorar procesos industriales. Exige también instituciones sólidas, reglas estables, oportunidades para las comunidades, protección del patrimonio natural y una comunicación transparente del valor que la actividad aporta a la sociedad.

En definitiva, la expresión “la caña sí nos une” trasciende el eslogan institucional. Resume una forma de entender el desarrollo basada en la articulación entre producción, conocimiento, innovación, territorio y personas. Allí reside la fuerza del caso colombiano: la caña de azúcar puede ser, al mismo tiempo, motor económico, factor de cohesión social y herramienta para construir futuro.

HERRAMIENTAS PARA LA GESTIÓN DEL CAMBIO CLIMÁTICO

Livia Ignácio
Directora para Sudamérica de Bonsucro

Bonsucro y la sostenibilidad de la cadena sucroenergética

El cambio climático se ha convertido en uno de los principales desafíos para la agroindustria de la caña de azúcar. Ante este escenario, Bonsucro impulsa una estrategia integral para que productores e ingenios midan su desempeño ambiental, definan metas de reducción de emisiones y fortalezcan su capacidad de adaptación.

Bonsucro es una plataforma internacional orientada a promover la sostenibilidad ambiental, social y económica de toda la cadena sucroenergética. Su trabajo comprende la producción de caña de azúcar y todos los productos derivados de esta materia prima, entre ellos azúcar, etanol, biogás, biometano, combustible sostenible para aviación (SAF) y otros bioproductos vinculados con la transición hacia una economía de bajas emisiones de carbono.

La organización reúne más de 330 miembros en 55 países y cuenta con 181 ingenios certificados. A escala global, la certificación Bonsucro abarca aproximadamente 2,4 millones de hectáreas, equivalentes al 9 % de la superficie mundial cultivada con caña de azúcar.

Una de sus principales líneas de acción es la certificación, un sistema voluntario que establece criterios sociales, ambientales y productivos para la producción sostenible de caña de azúcar y sus derivados.

El trabajo de Bonsucro, sin embargo, excede ese ámbito. Desde 2022 la organización administra también un Fondo de Impacto destinado a financiar proyectos ambientales y sociales vinculados con la sostenibilidad del sector. Se sostiene con los ingresos generados por los Créditos Bonsucro y ya destinó más de un millón de libras esterlinas a quince proyectos desarrollados en distintos países. La presentación de iniciativas está abierta a todo el sector, independientemente de que las empresas cuenten o no con certificación.

A estas acciones se suma un amplio programa de capacitación y asistencia técnica, mediante el cual Bonsucro acompaña a productores, ingenios y demás actores de la cadena en la incorporación de prácticas productivas sostenibles.

El cambio climático: un desafío para la agroindustria de la caña de azúcar

Hablar hoy de cambio climático implica reconocer una realidad que ya modifica las condiciones de producción de la caña de azúcar en distintas regiones del mundo. No se trata de una amenaza futura, sino de un proceso en curso cuyos efectos comienzan a reflejarse en la productividad agrícola, la disponibilidad de agua, la estabilidad de las cadenas de suministro y las condiciones de trabajo.

Entre los principales impactos previstos figuran la pérdida de biodiversidad, el aumento del estrés hídrico y una mayor frecuencia de eventos climáticos extremos. La alternancia entre períodos prolongados de sequía y precipitaciones intensas eleva el riesgo de inundaciones, erosión y daños en la infraestructura productiva, además de dificultar la planificación de las labores agrícolas.

También aumentan la temperatura media y la concentración atmosférica de dióxido de carbono, factores capaces de modificar el comportamiento fisiológico del cultivo y afectar los rendimientos. A su vez, las nuevas condiciones climáticas favorecen la aparición y expansión de plagas y enfermedades, con desafíos adicionales para el manejo sanitario de los cañaverales.

Las consecuencias trascienden el ámbito productivo. Una menor disponibilidad de materia prima puede interrumpir toda la cadena de abastecimiento y afectar tanto la producción de alimentos como la de biocombustibles y otros derivados de la caña de azúcar.
La dimensión social también resulta crítica. Las altas temperaturas incrementan los riesgos para la salud de quienes trabajan a campo, especialmente durante la cosecha y el manejo del cultivo, por lo que es necesario incorporar medidas específicas de adaptación y protección de los trabajadores.
Considerados en conjunto, estos factores comprometen simultáneamente la productividad, la competitividad y la resiliencia de toda la agroindustria sucroenergética.

Dos caras de una misma moneda

La agroindustria de la caña de azúcar ocupa una posición singular dentro de la transición energética. Por un lado, produce algunos de los principales biocombustibles y biomateriales destinados a sustituir productos de origen fósil. Por otro, como cualquier actividad económica, también genera gases de efecto invernadero.
Esa doble condición exige que el sector participe activamente tanto en la descarbonización de la economía como en la reducción de su propia huella ambiental.
Los derivados de la caña —como el etanol, el biogás, el biometano, los bioplásticos y el combustible sostenible para aviación (SAF)— ofrecen alternativas de bajas emisiones para sustituir combustibles fósiles en sectores estratégicos del transporte y la industria.
A la vez, la producción de caña y su procesamiento industrial originan emisiones que deben medirse y administrarse de manera sistemática.
Según la información recopilada por Bonsucro a través de su sistema de certificación, la cadena sucroenergética emite anualmente alrededor de 400 millones de toneladas de dióxido de carbono equivalente (CO_2e). Aproximadamente el 77 % se origina durante la fase agrícola y el 23 % restante corresponde al procesamiento industrial.
La distribución de esos valores señala dónde se concentra el mayor potencial de mejora. La principal oportunidad para reducir la huella de carbono del sector reside en el manejo agrícola, mediante prácticas de producción más eficientes, nuevas tecnologías y estrategias que disminuyan las emisiones sin comprometer la productividad.
Por lo tanto, descarbonizar la agroindustria no depende solo de desarrollar nuevos biocombustibles, sino también de transformar los procesos productivos que les dan origen.

La medición como punto de partida

Para gestionar las emisiones, primero es necesario conocerlas. Con ese propósito, Bonsucro desarrolló un conjunto de instrumentos que traducen los principales estándares internacionales de contabilidad de carbono a una metodología específica para la producción de caña de azúcar.
El objetivo es que productores e ingenios puedan cuantificar su huella, identificar las principales fuentes de gases de efecto invernadero y definir estrategias de reducción compatibles con las metas internacionales de descarbonización.
El sistema se articula en torno a tres componentes principales.
El primero es el Estándar de Producción Bonsucro, que fija los criterios ambientales, sociales y productivos de una producción sostenible e incorpora umbrales específicos de emisiones para las etapas agrícola e industrial.
El segundo es la Calculadora Bonsucro, diseñada para medir la huella de carbono de las operaciones y evaluar el cumplimiento de los indicadores establecidos por el estándar.

El tercero es la ClimateCane Tracker, que define objetivos de reducción basados en criterios científicos y compatibles con las trayectorias internacionales de mitigación del cambio climático.
Bonsucro amplía este esquema con nuevas aplicaciones destinadas a cuantificar la remoción de carbono en el suelo, establecer metas para las etapas de transporte y procesamiento industrial y evaluar la vulnerabilidad climática de las explotaciones cañeras.
Así, los distintos componentes forman una estrategia integrada que avanza desde la medición hacia la planificación y, finalmente, hacia la implementación de acciones concretas de adaptación y mitigación.

La Calculadora Bonsucro: medir para gestionar

Toda estrategia de mitigación comienza con un diagnóstico preciso. Bajo esa premisa, Bonsucro desarrolló una calculadora capaz de cuantificar la huella de carbono de la producción de caña de azúcar y evaluar el desempeño ambiental de ingenios y establecimientos agrícolas mediante una metodología común para todo el sector.
La aplicación verifica el cumplimiento del Estándar de Producción Bonsucro e identifica las áreas con mayor potencial de mejora. Para ello adopta una metodología de Evaluación del Ciclo de Vida (Life Cycle Assessment, LCA) específica para la caña de azúcar, adaptada a partir de los lineamientos del GHG Protocol, principal estándar internacional para contabilizar gases de efecto invernadero.
La calculadora integra más de 300 indicadores de entrada, genera más de 110 indicadores de salida y utiliza 83 variables directamente vinculadas con las distintas fuentes de emisiones presentes a lo largo del proceso productivo.
Con esa información calcula la huella de carbono de la producción agrícola y de la etapa industrial, y la compara con los valores de referencia establecidos por el estándar.
En la fase agrícola, el objetivo consiste en mantener emisiones inferiores a 40 kilogramos de CO_2 equivalente por tonelada de caña. Para la producción de azúcar, el umbral es de 0,4 toneladas de CO_2 equivalente por tonelada de azúcar, mientras que para el etanol el valor de referencia alcanza los 24 gramos de CO_2 equivalente por megajoule de energía producida.
Además de ofrecer un resultado global, la calculadora desagrega las emisiones según los alcances definidos por el GHG Protocol (Scopes 1, 2 y 3) e identifica las actividades que más contribuyen a la huella de carbono de cada operación.
Ese nivel de detalle resulta especialmente valioso para decidir dónde intervenir. El consumo de combustibles, el uso de fertilizantes, el manejo del suelo, el transporte o determinados procesos industriales pueden analizarse por separado y convertirse en acciones concretas para mejorar el desempeño ambiental.
La calculadora, por lo tanto, no se limita a medir: orienta las inversiones y ayuda a priorizar las intervenciones capaces de generar las mayores reducciones.

ClimateCane Tracker: establecer metas basadas en la ciencia

Una vez conocida la huella de carbono, el siguiente paso es determinar cuánto deben reducirse las emisiones y en qué plazo. Para responder a esa necesidad, Bonsucro desarrolló la ClimateCane Tracker, una plataforma que establece objetivos específicos para la producción de caña de azúcar.
Está dirigida a empresas que buscan alinear sus estrategias de descarbonización con las metas basadas en la ciencia (Science Based Targets initiative, SBTi) y, en particular, con la

metodología FLAG (Forest, Land and Agriculture), desarrollada para actividades vinculadas con el uso del suelo y la producción agropecuaria.
Por el momento, genera metas para las emisiones asociadas a la producción primaria, es decir, hasta la salida de la caña del establecimiento agrícola. Bonsucro ya trabaja en su ampliación para incorporar las etapas de transporte y procesamiento industrial.
El procedimiento es sencillo. El usuario indica la región donde produce caña de azúcar, el volumen correspondiente al año base y la producción prevista para el año objetivo. También incorpora la información disponible sobre emisiones derivadas del manejo del suelo, cambios en el uso de la tierra y remociones de carbono.
Cuando la empresa aún no cuenta con un inventario propio, la plataforma ofrece valores predeterminados adaptados a cada región productora. Así, cualquier organización puede comenzar a definir objetivos de reducción sin disponer previamente de información completa.
Con esos datos, la ClimateCane Tracker calcula el porcentaje de reducción necesario para que la empresa contribuya a las trayectorias globales de mitigación compatibles con el objetivo internacional de limitar el calentamiento del planeta.
Además, genera una curva anual que muestra la evolución esperada desde el año base hasta el año objetivo. Este seguimiento facilita la planificación de inversiones, el monitoreo de resultados y la evaluación del cumplimiento de las metas.
Más que fijar un valor final, la plataforma traza una hoja de ruta para orientar la descarbonización de cada empresa y evaluar periódicamente los avances alcanzados.

Cuantificar las remociones de carbono

Reducir emisiones es solo una parte del balance climático de la producción de caña de azúcar. También debe considerarse la capacidad de los sistemas agrícolas para capturar y almacenar carbono en el suelo.
Con ese fin, Bonsucro desarrolla una aplicación destinada a cuantificar las remociones y completar el cálculo de las emisiones netas de cada establecimiento.
El sistema contempla dos alternativas. La primera se basa en mediciones directas de carbono orgánico en el suelo realizadas a lo largo del tiempo; la segunda utiliza valores predeterminados obtenidos de información científica internacional.
Esta última opción toma como referencia las directrices del Panel Intergubernamental sobre Cambio Climático (IPCC). Para desarrollarla se analizaron 30 combinaciones de prácticas de manejo, distribuidas en nueve regiones climáticas y seis tipos de suelo, y se generaron modelos capaces de estimar la incorporación de carbono en distintas condiciones productivas.
Los valores predeterminados favorecen una adopción inicial, especialmente entre las empresas que aún no disponen de series históricas de mediciones de carbono en el suelo.
A medida que los establecimientos desarrollen programas propios de monitoreo, podrán sustituir esas estimaciones por datos primarios y obtener resultados cada vez más precisos sobre su contribución a la captura de carbono.
De este modo, el análisis deja de concentrarse exclusivamente en lo que la actividad emite e incorpora también la capacidad de los sistemas productivos para remover dióxido de carbono de la atmósfera. El resultado es una visión más completa del desempeño climático de la producción cañera.

Evaluación de la vulnerabilidad climática

Junto con la mitigación, la agroindustria deberá adaptarse a un escenario marcado por una mayor frecuencia de eventos extremos. Para responder a este desafío, Bonsucro desarrolla

una Herramienta de Evaluación de la Vulnerabilidad Climática, concebida para que los productores comprendan el nivel de riesgo de sus explotaciones y planifiquen estrategias de adaptación.
La iniciativa adapta al cultivo de la caña de azúcar la Plataforma de Resiliencia Climática, desarrollada por CIAT & Bioversity Alliance y utilizada previamente en otros cultivos. El proyecto se lleva adelante en colaboración con Better Cotton, con el propósito de aprovechar metodologías ya validadas y adecuarlas a las particularidades de la producción cañera.
A partir de información climática actualizada, la plataforma evaluará las condiciones específicas de cada establecimiento e identificará su vulnerabilidad frente a sequías, lluvias intensas, olas de calor y otros eventos extremos.
Su principal aporte no será solo describir el riesgo, sino traducirlo en recomendaciones prácticas de manejo. Para cada situación detectada, propondrá intervenciones orientadas a reducir la vulnerabilidad y fortalecer la resiliencia de los sistemas productivos.
En una primera etapa, el desarrollo contempla cinco regiones productoras de caña de azúcar. Su cobertura geográfica podrá ampliarse progresivamente a medida que se incorporen nuevos datos climáticos y agronómicos.
La evaluación de la vulnerabilidad completa así el sistema de medición y definición de metas. Mitigación y adaptación dejan de abordarse por separado y pasan a integrarse en una misma estrategia climática para la agroindustria.

Medir para actuar

El cambio climático ya forma parte del contexto productivo de la caña de azúcar. Por eso, adaptarse y reducir la huella ambiental han dejado de ser objetivos independientes: ambos son componentes centrales de la competitividad y la sostenibilidad del sector.
La estrategia de Bonsucro se apoya en la medición sistemática. El principio es sencillo: aquello que no se mide difícilmente puede administrarse.
Conocer la huella de carbono, localizar sus principales fuentes, establecer objetivos compatibles con las trayectorias internacionales de descarbonización y evaluar la vulnerabilidad frente a los riesgos climáticos son los primeros pasos para diseñar planes de acción eficaces.
Cada componente cumple una función dentro de ese recorrido. La Calculadora Bonsucro cuantifica las emisiones; la ClimateCane Tracker traduce las metas internacionales en objetivos concretos para cada empresa; la aplicación de remociones incorpora el carbono almacenado en el suelo; y la evaluación de vulnerabilidad orienta la adaptación frente a escenarios cada vez más inciertos.
Articulados entre sí, estos instrumentos ofrecen un marco común para recopilar información, analizar resultados y orientar decisiones basadas en evidencia.
La mitigación es uno de los pilares de esta estrategia, pero la adaptación tiene la misma relevancia. Muchos efectos del cambio climático ya son visibles y seguirán condicionando la producción durante las próximas décadas. Prepararse para convivir con esa realidad exige conocer el nivel de exposición de cada sistema productivo y adoptar medidas que reduzcan sus riesgos.
Bonsucro pone este conjunto de recursos a disposición de toda la cadena sucroenergética, independientemente de que las empresas cuenten o no con certificación. El propósito es ampliar la capacidad de respuesta del sector mediante metodologías comunes, criterios científicos y procesos de mejora continua.

Avanzar hacia una producción de caña de azúcar más resiliente requerirá, en definitiva, combinar mitigación y adaptación, incorporar información confiable en la toma de decisiones y consolidar una cultura basada en indicadores objetivos. Ese es el camino que Bonsucro propone para fortalecer la sostenibilidad de la agroindustria frente a uno de los mayores desafíos de nuestro tiempo.

LA BIOENERGÍA COMO POLÍTICA DE ESTADO

Hugo Cagno Filho
Presidente de UDOP

Brasil reúne condiciones naturales especialmente favorables para la producción agrícola y, en particular, para el cultivo de la caña de azúcar. Sobre esa base se consolidó una agroindustria integrada que hoy produce azúcar, etanol y bioenergía, genera empleo e ingresos y es uno de los principales motores del desarrollo regional.

La producción de etanol se concentra principalmente en la región Centro-Sur del país. El estado de São Paulo aporta cerca del 42 % del total nacional, seguido por Mato Grosso (16 %), Goiás (15 %), Minas Gerais (11 %) y Mato Grosso do Sul (10 %).

Brasil se ha convertido en una referencia mundial en bioenergía. Produce alrededor de 650 millones de toneladas de caña de azúcar por zafra; es el mayor productor y exportador de azúcar del mundo —con aproximadamente el 40 % de la producción mundial y el 55 % de las exportaciones— y figura entre los mayores productores de etanol, con más de 30.000 millones de litros anuales.

Este desarrollo explica, en buena medida, la composición de la matriz energética brasileña. En 2024, las fuentes renovables representaron el 50 % de toda la energía consumida en el país, un porcentaje que ubica a Brasil como la economía con la matriz energética más limpia entre las diez mayores del mundo.

Dentro de esa matriz, la biomasa proveniente de la caña de azúcar es la principal fuente de energía renovable, con una participación incluso superior a la de las energías hidráulica, eólica y solar. Las demás fuentes renovables incluyen la biomasa forestal, el licor negro proveniente de la industria de la celulosa y otras fuentes menores; el 50 % restante continúa integrado por petróleo, gas natural, carbón mineral, uranio y otros recursos no renovables.

Del Proálcool al vehículo Flex

El gran punto de inflexión para la agroindustria brasileña llegó en 1975, con la creación del Programa Nacional del Alcohol (Proálcool), impulsado por el gobierno como respuesta a la crisis internacional del petróleo.

Tuve la oportunidad de participar desde sus comienzos. Soy ingeniero agrónomo desde 1973 y acompañé de cerca la evolución del programa, sus aciertos y también las dificultades que debió superar.

Ante la fuerte dependencia del petróleo importado, Brasil decidió desarrollar un combustible renovable a partir de la caña de azúcar. Con ello redujo su dependencia energética, impulsó la expansión de la agroindustria sucroenergética, promovió importantes avances tecnológicos tanto en el campo como en la industria y consolidó el etanol como uno de los componentes centrales de la matriz energética nacional.

En 1979 comenzó a circular el primer automóvil brasileño impulsado exclusivamente por etanol: el Fiat 147. En aquel momento se consideraba que el objetivo debía ser sustituir por completo la gasolina.

Con el tiempo comprendimos que ese había sido nuestro principal error. Al intentar reemplazar totalmente un combustible por otro, eliminábamos la posibilidad de elección del consumidor.

La situación cambió en 2003 con la incorporación de la tecnología Flex Fuel. Desde entonces, los vehículos pudieron utilizar cualquier proporción de gasolina y etanol, de modo que cada usuario eligiera el combustible más conveniente según el precio o la disponibilidad.

La adopción fue extraordinariamente rápida. Hoy, el 74 % de los vehículos livianos nuevos vendidos en Brasil utiliza tecnología Flex y alrededor del 76 % de toda la flota en circulación pertenece a esa categoría.
La expansión de esta tecnología fortaleció el mercado del etanol y dio un nuevo impulso a la estrategia brasileña de biocombustibles para el transporte.
El proceso se complementó con una política permanente de incorporación obligatoria de etanol anhidro en la gasolina. La mezcla alcanza hoy el 30 % (E30) y existen estudios técnicos que respaldan su incremento hasta el 35 %, medida que contribuiría a reducir aún más las emisiones de carbono sin afectar el funcionamiento de los motores.
En Brasil se comercializan dos tipos de etanol: el etanol anhidro, destinado a la mezcla con gasolina, y el etanol hidratado, utilizado directamente como combustible en los vehículos Flex.

La consolidación del mercado brasileño de etanol
Brasil posee la mayor proporción de etanol mezclado con gasolina del mundo. Mientras la mezcla obligatoria alcanza el 30 % y avanza hacia el 35 %, en Estados Unidos representa alrededor del 10 %, en Europa oscila entre el 2,5 % y el 5 %, y el promedio mundial también se sitúa en torno al 10 %. En Argentina, la mezcla obligatoria es del 12 %.
Estos datos muestran que incorporar etanol a la gasolina no es una práctica aislada, sino una tendencia cada vez más extendida. El caso brasileño confirma que esa participación puede incrementarse progresivamente sin comprometer el desempeño de los motores, siempre que una política energética estable otorgue previsibilidad a toda la cadena.
Esa estabilidad se apoya, además, en una infraestructura consolidada. Cerca del 80 % de las estaciones de servicio del país comercializa etanol hidratado y la red nacional cuenta con aproximadamente 40.000 puntos de expendio, lo que garantiza su disponibilidad en prácticamente todo el territorio.
El mercado se rige por la oferta y la demanda. El precio del etanol no está regulado por el Estado: se determina libremente según las condiciones del mercado y compite de manera directa con la gasolina.
Tampoco existe una diferenciación comercial entre el etanol producido a partir de caña de azúcar y el elaborado a partir de maíz. Ambos combustibles reciben el mismo tratamiento tributario, abastecen conjuntamente el mercado nacional y llegan al consumidor como un único producto. De este modo se garantiza la seguridad de abastecimiento durante todo el año y se mejora la competitividad del sistema.

Producción prevista para la zafra 2026/2027
Para la zafra 2026/2027 se estima una producción cercana a los 635 millones de toneladas de caña de azúcar en la región Centro-Sur de Brasil.
Se proyecta un ATR promedio de 138,7 kilogramos por tonelada de caña y un rendimiento medio de aproximadamente 88 toneladas por hectárea. El mix de producción destinará un 48 % al azúcar, una participación ligeramente inferior a la registrada en campañas anteriores como consecuencia de la evolución reciente de los precios internacionales.
La producción de etanol alcanzaría aproximadamente los 40.000 millones de litros, distribuidos entre etanol anhidro y etanol hidratado.
A este volumen se suma el crecimiento sostenido del etanol de maíz. En apenas seis años pasó de alrededor de 2.500 millones de litros a casi 12.000 millones, lo que acerca la producción total brasileña de etanol a los 50.000 millones de litros anuales.

RenovaBio: la descarbonización como política pública

En 2017, Brasil puso en marcha RenovaBio, la Política Nacional de Biocombustibles, concebida para reducir las emisiones de gases de efecto invernadero mediante metas nacionales de descarbonización aplicadas al sector de los combustibles.

El programa incentiva la producción eficiente de biocombustibles, reconoce el menor impacto ambiental de los combustibles renovables e integra la política energética con la política climática.

Entre sus principales instrumentos se encuentran los Créditos de Descarbonización (CBIO), certificados negociados en bolsa que representan una tonelada de dióxido de carbono cuya emisión fue evitada. Desde 2020 se emitieron más de 130 millones de CBIO, equivalentes a igual cantidad de toneladas de CO_2 que dejaron de liberarse a la atmósfera.

A mi entender, este es uno de los mayores avances alcanzados por Brasil en materia de bioenergía. Más allá del crecimiento del consumo de etanol, RenovaBio incorporó la reducción efectiva de emisiones como componente económico del sistema y generó un incentivo concreto para producir biocombustibles cada vez más eficientes.

Combustible del Futuro

Sobre esa base, el gobierno brasileño lanzó recientemente el programa Combustible del Futuro, orientado a ampliar el papel de los biocombustibles en la transición energética.

La iniciativa busca fortalecer la participación del etanol en la movilidad sostenible, estimular nuevas tecnologías, reducir las emisiones del transporte y articular innovación, seguridad energética y sostenibilidad.

Entre sus principales medidas se destacan el aumento de la mezcla obligatoria de etanol en la gasolina hasta el 35 %, el impulso al etanol de segunda generación y la expansión del biogás, el biometano y el combustible sostenible para aviación (SAF).

El etanol de segunda generación adquiere importancia estratégica porque representa una de las principales rutas tecnológicas para producir SAF. La aviación y el transporte marítimo son hoy dos de los sectores más difíciles de descarbonizar y, probablemente, serán los principales impulsores de la demanda de estos nuevos combustibles durante la próxima década.

Si esas proyecciones se concretan, la demanda mundial crecerá a un ritmo superior a la capacidad actual de producción y exigirá una expansión significativa de la oferta.

En paralelo, el biogás y el biometano dejaron de considerarse simples subproductos del proceso industrial y pasaron a ocupar un lugar estratégico dentro de la agroindustria.

En nuestro caso, aprovechar el biogás ayuda a reciclar nutrientes, reducir el uso de fertilizantes minerales, disminuir los costos asociados a la renovación de los cañaverales y mejorar la logística de producción. Lo que hace algunos años se trataba como residuo hoy es un insumo de alto valor para el sistema productivo.

Consecana: un modelo de remuneración compartida

Otro pilar del modelo brasileño es Consecana, el sistema de remuneración de la caña de azúcar implementado tras la desregulación del sector sucroenergético ocurrida en 1999.

Más que un mecanismo para determinar el precio de la materia prima, Consecana funciona como una herramienta de gobernanza de la cadena. Busca garantizar transparencia, alinear los intereses de productores e ingenios, reducir conflictos comerciales y dar mayor previsibilidad a las decisiones de inversión y producción.

El sistema se basa en el Azúcar Total Recuperable (ATR), indicador que expresa el potencial de azúcar contenido en la caña y sirve como unidad de referencia para calcular su valor económico.
El precio pagado al productor surge de la evolución conjunta de los mercados de azúcar y etanol, tanto internos como internacionales. Con esos valores se determina un precio promedio por kilogramo de ATR, aplicable a toda la cadena.
Aproximadamente el 65 % del valor generado corresponde al productor de caña y el 35 % restante, a la industria.
Cuando aumentan los precios del azúcar o del etanol, ambos sectores participan de esa mejora. Si el mercado atraviesa un período desfavorable, el impacto también se distribuye entre productores e ingenios. Así se evita que cada eslabón enfrente aisladamente las fluctuaciones y se fortalece la sustentabilidad económica del conjunto.
Como resultado, Consecana redujo significativamente los conflictos comerciales, mejoró la previsibilidad económica y facilitó una planificación más segura de la producción y las inversiones. Al comienzo de cada zafra es posible estimar, con un grado razonable de certeza, los ingresos esperados durante el año y ordenar la planificación financiera de toda la cadena.

Integración entre producción e industria

El modelo brasileño contempla distintas formas de organizar la producción agrícola.
Una parte importante de la caña proviene de productores independientes que abastecen regularmente a los ingenios. A la vez, existe un sistema de arrendamiento de tierras ampliamente difundido: los propietarios ceden sus campos a las empresas para que estas asuman íntegramente las tareas de implantación, manejo y cosecha, mientras ellos perciben la renta correspondiente.
En Brasil, esa producción suele identificarse como caña propia, aunque gran parte se desarrolla sobre tierras arrendadas. El esquema reúne distintos perfiles de productores dentro de un mismo sistema productivo y asegura a la industria un abastecimiento estable y previsible.

UNA CADENA PRODUCTIVA CONSTRUIDA SOBRE LA INNOVACIÓN

Rogério Mian
Director Ejecutivo de UDOP

La agroindustria sucroenergética brasileña no se explica solo por el crecimiento de la producción. Su principal fortaleza radica en haber transformado una actividad tradicional en una cadena industrial diversificada, sostenida por la innovación tecnológica, la articulación institucional y una visión de largo plazo.
Durante las últimas décadas, la caña de azúcar dejó de considerarse exclusivamente una materia prima para producir azúcar y etanol. Hoy es la base de una plataforma de bioeconomía capaz de generar alimentos, energía, combustibles renovables, insumos industriales y nuevos biomateriales.
Esa transformación se apoyó en políticas públicas estables, investigación científica, inversión privada y una sólida coordinación entre los actores de la cadena.
Así, la innovación dejó de ser una herramienta complementaria y pasó a formar parte permanente del sistema productivo.

Una cadena que aprovecha integralmente la caña de azúcar

La agroindustria brasileña evolucionó hacia un modelo que asigna un destino productivo a prácticamente todos los componentes de la caña.
En una primera etapa, el foco estuvo puesto en la fabricación de azúcar. Más tarde se incorporaron el etanol como combustible y, posteriormente, la generación de energía eléctrica a partir del bagazo. El proceso continuó con el desarrollo del etanol de segunda generación, la producción de biogás y biometano, la obtención de bioplásticos, la captura y utilización de dióxido de carbono y, más recientemente, la elaboración de combustibles sostenibles para aviación (SAF) y combustibles renovables para el transporte marítimo.
Cada etapa amplió el aprovechamiento de la biomasa y elevó el valor agregado generado por la cadena.
La competitividad ya no depende únicamente del rendimiento agrícola o industrial, sino también de la capacidad de obtener múltiples productos de una misma materia prima y responder con flexibilidad a las nuevas demandas del mercado.
La lógica de producir un único bien dio paso a una plataforma diversificada de bioenergía y biomateriales.

Los nuevos mercados de la bioeconomía

La transición energética abre oportunidades que, hace pocos años, resultaban difíciles de imaginar.
La descarbonización del transporte terrestre continuará impulsando el consumo de etanol. Sin embargo, el mayor potencial de crecimiento se concentra en los sectores donde sustituir los combustibles fósiles presenta mayores desafíos, especialmente la aviación y el transporte marítimo.
En ese escenario, el combustible sostenible para aviación (SAF) adquiere un papel estratégico. Diversos países ya establecieron metas obligatorias para incorporarlo progresivamente, y la demanda prevista supera ampliamente la capacidad instalada de producción.

Brasil reúne condiciones especialmente favorables para responder a ese desafío: dispone de biomasa, acumula una amplia trayectoria en biocombustibles y alcanzó un importante desarrollo tecnológico durante las últimas décadas.
El etanol de segunda generación es una de las principales rutas tecnológicas para abastecer este nuevo mercado y abre una oportunidad de crecimiento para toda la agroindustria.
A la vez, el desarrollo del biogás, el biometano y otros bioproductos amplía las posibilidades de diversificación, fortalece la sustentabilidad económica de las empresas y mejora el aprovechamiento de los recursos disponibles.

Los pilares del modelo brasileño

El desarrollo de una agroindustria competitiva no depende de una única decisión, sino de varios factores articulados que se fortalecen mutuamente.
En la base del sistema se encuentran las políticas públicas, que generan reglas claras y previsibilidad para las inversiones.
Sobre ese fundamento opera el mercado, encargado de orientar las decisiones productivas y estimular la competitividad.
El tercer componente es la innovación tecnológica permanente, impulsada por la investigación, el desarrollo y la incorporación continua de nuevos procesos y productos.
Completa el modelo la articulación entre productores, industria, instituciones de investigación y organismos públicos, que hace llegar los avances tecnológicos al sistema productivo y los traduce en mejoras concretas de competitividad.
El equilibrio entre estos cuatro pilares explica, en buena medida, la evolución de la agroindustria sucroenergética brasileña durante las últimas décadas.

El papel de UDOP

En este proceso, la União Nacional da Bioenergia (UDOP) ocupa un lugar central como organización de articulación técnica del sector.
La institución promueve la capacitación continua de los recursos humanos, favorece el intercambio entre empresas, coordina comités técnicos especializados y organiza encuentros para difundir conocimientos y acelerar la adopción de innovaciones.
También desarrolla proyectos de cooperación con universidades, centros de investigación y empresas proveedoras de tecnología, y fortalece así el vínculo entre la generación de conocimiento y su aplicación práctica.
Esta tarea resulta especialmente valiosa en un sector que evoluciona de manera permanente y exige la actualización constante de productores, profesionales y equipos técnicos.
Además de representar institucionalmente al sector, UDOP ofrece un ámbito de articulación que facilita la circulación del conocimiento, promueve las mejores prácticas y contribuye al desarrollo sostenible de toda la cadena sucroenergética.

Una visión compartida para el futuro

El crecimiento de la bioenergía en Brasil no responde a una única innovación tecnológica ni a una medida aislada de política pública. Es el resultado de décadas de trabajo sostenido, de consensos construidos entre los actores de la cadena y de una estrategia orientada a agregar valor a la biomasa.
La transición energética abre nuevas oportunidades para los países productores de caña de azúcar. Aprovecharlas exigirá fortalecer la investigación, consolidar marcos regulatorios

estables, promover la innovación y sostener una estrecha articulación entre el sector público, la industria y los productores.

En ese camino, la cooperación internacional y el intercambio adquieren una importancia creciente. Compartir conocimientos, analizar modelos exitosos y adaptarlos a las realidades locales será fundamental para acelerar el desarrollo de una bioeconomía cada vez más competitiva y sostenible.

PRESENTACIONES

ÁREA AGRÍCOLA

SOCIEDAD ARGENTINA DE TÉCNICOS DE LA CAÑA DE AZÚCAR

SATCA

desde 1982

APORTES AL MANEJO DEL FÓSFORO EN CAÑA DE AZÚCAR EN TUCUMÁN: BALANCE, REFERTILIZACIÓN Y NUTRICIÓN BALANCEADA

Romero, J.I. y Romero, E R.
Facultad de Agronomía y Zootecnia- UNT.
juanromerojir@gmail.com

Palabras Clave: suelo, sustentabilidad, longevidad.

Introducción

El fósforo (P) es el segundo nutriente limitante de la productividad en caña de azúcar después del nitrógeno. A pesar de su importancia, su eficiencia de uso es baja debido a su escasa movilidad y alta afinidad por la fracción sólida del suelo.

Por su comportamiento en el suelo, existen herramientas de diagnóstico de disponibilidad P y umbrales de respuesta calibrados localmente, que permiten planificar la fertilización, monitorear evolución y calcular balances. Si bien presenta importantes ventajas operativas y logísticas, el manejo tradicional del fósforo (P) en caña de azúcar, simplificado en una única aplicación al momento de la plantación, puede no resultar suficiente en cañaverales muy productivos y/o longevos.

Estudios locales mostraron balances negativos de P debido a altas extracciones por cosecha, sumadas a pérdidas de nutrientes por quema de residuos (Romero, et al. 2020 y 2022), que generan muchas veces deficiencias “prematuras” de P que comprometen los rendimientos y, finalmente, la longevidad del cañaveral, aun habiendo fertilizado en la plantación.

Los cultivos necesitan cantidades variables de diferentes nutrientes esenciales para el correcto funcionamiento de su metabolismo. El uso agrícola continuado y la no reposición de muchos de estos nutrientes en los suelos, lleva paulatinamente a la aparición de deficiencias de alguno/s de ellos. A veces, no detectar o considerar la falta de un nutriente, lleva a incrementar las dosis de los elementos habitualmente utilizados (N principalmente), sin lograr los incrementos de producción pretendidos y además con implicaciones económicas y ambientales. El concepto de la "fertilización balanceada" invita a armar el plan de fertilización en función de los requerimientos del cultivo, teniendo en cuenta la oferta nutricional del suelo en cuestión y las interacciones entre los mismos. De este modo, para avanzar hacia una mejor integración entre la producción y la sustentabilidad del sistema productivo, será necesario un continuo ajuste en el manejo de la fertilización.

La adopción de estrategias de refertilización y esquemas de nutrición balanceada (NPS) se presentan como alternativas sustentables concretas para limitar las pérdidas de rendimiento y longevidad por deficiencias nutricionales y optimizar el uso de los recursos (Romero, et al.2023 a y b)

El objetivo de este trabajo es integrar resultados de experiencias locales recientes que aportan datos sobre la dinámica del P en nuestros cañaverales y algunas alternativas de manejo de este insumo que pueden aportar a la sustentabilidad del sistema cañero.

Materiales y Métodos

Los estudios referenciados se llevaron a cabo en Tucumán, dentro del área caracterizada por niveles de fósforo disponible (Bray-Kurtz II) bajos, en suelos francos, de pH neutro a ligeramente ácido. Estos trabajos pueden citarse como: A- “Requerimiento, Extracción y Balance de Fósforo” (Overa Pozo; Socas 1 a 4). B- “Refertilización con P en Socas de Edad Avanzada” (socas 4, 5 y 6). C- Nutrición Balanceada NPS en socas (socas 5 y 6).

El ensayo de refertilización en socas de edad avanzada (variedad LCP 85-384 y 1,8% MOrg) se estableció en un suelo con 11 ppm de P Bray II (rango de respuesta segura). Los estudios de requerimiento y extracción de P y el de fertilización balanceada NPS en socas viejas se establecieron en suelos con 21 ppm de P Bray II (rango de respuesta probable al P)

y 2% de MO%. En el ensayo de Fertilización NPS, hay dos tratamientos con los tres nutrientes (T4 y T5). La diferencia entre T4 y T5 es que el primero recibió P (40kg P2O5/ha) solamente en la soca 5 mientras que T5 recibió P en soca 5 y en soca 6 (40+ 40 kg P2O5/ha).

Los diseños experimentales en todos los casos consistieron en bloques completamente aleatorizados con 3 o 4 repeticiones, en microparcelas, donde se estimó el rendimiento cultural a partir de conteo de tallos y peso de tallos evaluados con 3 sub replicas en cada parcela.

Los análisis estadísticos de los datos de rendimiento cultural, están descriptos en cada uno de los trabajos citados. Se utilizó el software Infostat, donde se ajustaron modelos lineales con efectos fijos de tratamiento y bloque y se compararon las medias mediante el test LSD de Fisher.

Resultados

Requerimiento Extracción y Balances Negativos de P

A partir de un estudio realizado durante 4 campañas (socas 1 a 4) en Overa Pozo, se determinó el requerimiento y la extracción de fósforo por cosecha en la variedad LCP 85-384. A partir de los resultados de ese trabajo se construyó la tabla 1 para diferentes niveles productivos.

Tabla 1: Valores de fósforo en biomasa aérea (requerimiento), extracción por cosecha (tallos molibles) y residuos de cosecha (hojas y despunte) expresados como P2O5.

Rendimiento Cultural	Requerimiento (P en BM aérea)	Extracción (P en Tallos)	P en Residuos de Cosecha (RAC)
60 t/ha	30	20	10
80 t/ha	40	26	13
100 t/ha	50	32	17

Valores expresados como **kg de P_2O_5**/ha*año

A partir de lo observado en la tabla 1, podemos señalar que cuando obtenemos rendimientos culturales superiores a 60 t/ha, la extracción de P por cosecha superará la dosis de P de 20kg de P2O5, que es la recomendada para suelos en el rango de “respuesta probable” (de 13 a 25 ppm P Bray K. II). De esta manera, aun fertilizando con P, los balances de P anuales serán negativos. En lotes con altas productividades esa salida de P del sistema se acentúa. Y, si se eliminara el RAC (quema o extracción), vemos que las salidas de P (entre otros elementos) se incrementan considerablemente (+50% aproximadamente).

Refertilización con P en socas de edad avanzada - Nutrición y Longevidad

Cuando los cañaverales alcanzan edades avanzadas, como socas 4 o 5, es común observar una caída en el vigor y rendimiento. Sin embargo, en suelos deficientes en P, incluso si se fertilizó en la plantación, esta caída puede estar más vinculada a la deficiencia de P que a la edad del cañaveral. Con esta hipótesis y considerando el comportamiento residual del P como una ventaja operativa, los tratamientos de refertilización fueron planteados para cubrir la necesidad de dos campañas consecutivas, aplicando una dosis de 60kg de P2O5/ha, siguiendo la tabla de recomendación vigente. Se usaron dos fuentes de P en diferentes tratamientos; el tradicional SFT incorporado en costilla y el Nitrocomplex (Yara) aplicado en superficie, sobre la línea del surco. Habiéndose encontrado respuestas similares al P de ambas fuentes, y a los fines de esta revisión, sólo se mostrará los resultados del tratamiento del super fosfato triple (SFT) incorporado (Tabla 2). Sin embargo, no es un resultado a pasar por alto que el tratamiento de P aplicado chorreado en la superficie del surco mostrara niveles de respuesta similar al SFT incorporado. En la soca 5 sólo se fertilizó con nitrógeno, sin aporte de P. Y en la soca 6 (año 3), nuevamente se fertilizó con N y P en los tratamientos correspondientes.

Tabla 2. Tratamientos evaluados en el ensayo de socas longevas. Taco Palta-Dpto Burruyacu, Tucumán.

	Soca 4 – Campaña 2018-19				Soca 5 – Campaña 2019-20				Soca 6 – Campaña 2020-21		
	Trat	**Producto**	**Dosis Nutriente** (kg/ha)		**Trat**	**Producto**	**Dosis Nutriente** (kg/ha)		**Trat**	**Producto**	**Dosis Nutriente** (kg/ha)
T0	**0**	----	0	→	**0**	----	0	→	**N+P**	Can+ SFT	50 N+40 P_2O_5
T1	**N**	Urea (3kg/surco)	85 N	→	**N**		85 N	→	**N**	Urea (3kg/surco)	85 N
T2	**P**	SFT (2,1 kg/surco)	60 P_2O_5	→	**P residual**	----	0 P2O5	→	**N**	Can	50 N
T3	**N+P**	Urea+ SFT (3+2,1 kg/surco)	85 N+60 P_2O_5	→	**N+P residual**	Urea (3kg/sco)	85 N	→	**N+P**	Can+ SFT (3+1,4 kg/sco)	50 N+40 P_2O_5

En la Figura 1, se observa como T1 (N/N/N) mantuvo sus niveles productivos con una leve caída que podría considerarse propia del envejecimiento de la cepa. Sin embargo, al comparar T1 con T3 durante las 3 campañas puede claramente observarse el aporte del P en la productividad de las socas. En la soca 4, hubo una respuesta significativa al agregado de P del 37%; en la soca 5, la diferencia productiva a favor del tratamiento con P fue del 17% y en la soca 6 del 20%.

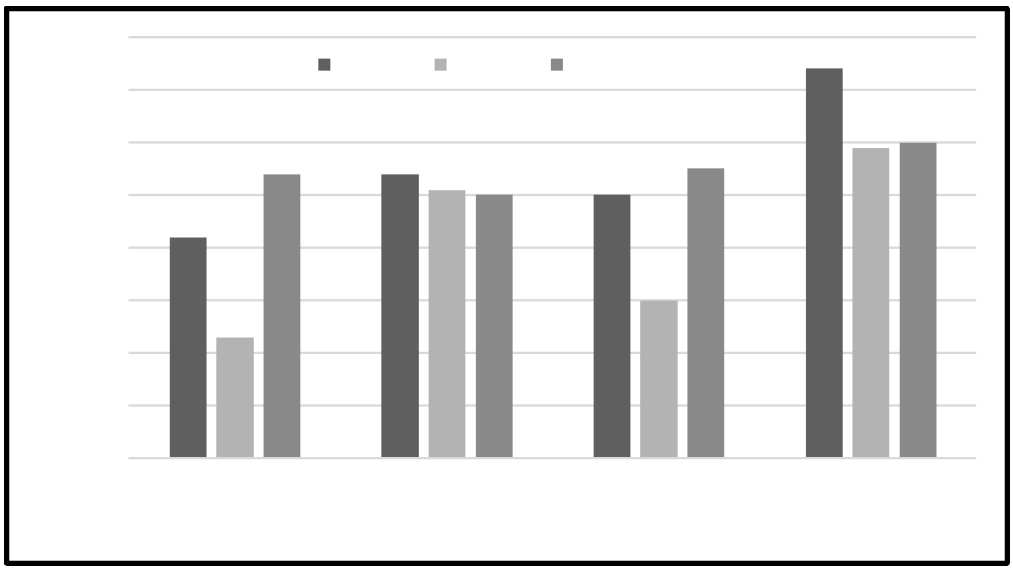


Figura 1: Rendimientos culturales de los tratamientos evaluados en las campañas sucesivas (soca 4, 5 y 6). Taco Palta, Dpto Burruyacu. Tucumán.

Estas investigaciones de Romero et al. (2023) como las experiencias de Zambrosi (2020) coinciden en que la reaplicación de P en cañas soca es una práctica efectiva para mantener la productividad e incrementar la longevidad de la cepa, con todas las ventajas económicas, logísticas y ambientales que esto trae aparejado.

Capacidad de Recuperación de Socas

Como se observa en la Figura 1, los tratamientos T0 y T2, en las socas 4 y 5 se incluyeron a modo de testigos sin fertilizar, para observar la magnitud de la caída de producción ante la falta de N y/o P. Como se esperaba, la deficiencia nutricional y caída en productividad fue muy significativa ambas campañas (especialmente en la soca 5). Entonces, en la soca 6 se decidió refertilizarlos (Tabla 2) para ver la capacidad de recuperación de la cepa ante un nuevo agregado de dichos elementos deficitarios.

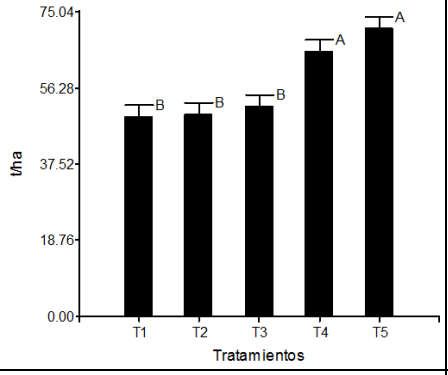
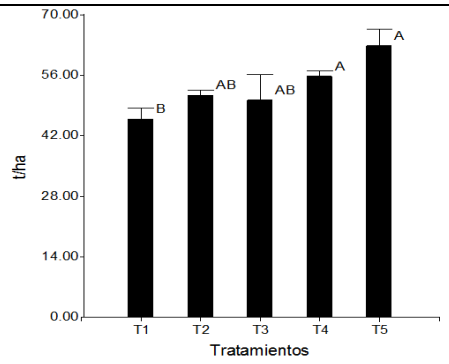
Como se observa en la Figura 1, la capacidad de recuperación de esta soca 6 refertilizada con N y P, luego de dos campañas sin N agregado fue muy significativa, duplicando su producción del año anterior e incluso superando en un 8%-10% al rendimiento de T1 (siempre con N, sin P).

Esta experiencia nos dice que en caso de subfertilizar un cañaveral durante 1 o 2 campañas, por la razón que fuere, pueden recuperarse significativamente ante una refertilización, siempre que el manejo de malezas y la calidad de cosecha hayan sido adecuados y la limitante sea nutricional.

Nutrición Balanceada NPS en cañas socas - Aporte del Azufre

Según Arroyo et al. (2019), el 16% de los suelos de nuestra área cañera (44000 has), presentan contenidos de P entre 13 y 25 ppm, en el rango de "respuesta probable" al agregado de P. En estas situaciones, ante la falta de seguridad de respuesta por el cultivo, muchas veces el productor duda en realizar la inversión en P.

En una situación como la descripta, un ensayo de fertilización balanceada NPS en socas longevas, mostró que la incorporación de Azufre (S) al plan de fertilización N+P, puede ser una herramienta efectiva para mejorar la respuesta a la fertilización y elevar los rendimientos y la longevidad.

Tratamientos T1: N T2: N+P T3: N+S T4: N+P+S T5: N+P+S		
	Rendimiento Cultural (t/ha) – Soca 5.	B) Rendimiento Cultural (t/ha)– Soca 6.

Figuras 2 y 3: Rendimientos (t/ha) de los tratamientos de fertilización evaluados en las socas 5 y 6. Taco Palta-Burruyacu. P Bray II: 21ppm.

Como se observa en las Figuras 2 y 3, a iguales dosis y fuente de N, los tratamientos NP y NS no se diferenciaron estadísticamente del tratamiento N, mientras que los tratamientos NPS lograron incrementos del 30-40% en soca 5 y 20-35% en soca 6, respecto a la fertilización tradicional (solo N o NP). Estos resultados evidenciaron que en esta situación de "respuesta probable al P" (21 ppm Bray II), la falta de respuesta estaba generada por la deficiencia de otro elemento esencial (azufre), que impedía el aprovechamiento efectivo de los otros nutrientes agregados (N y P).

Conclusiones Generales

En función de las experiencias analizadas previamente podemos destacar los siguientes conceptos o ideas disruptivas para seguir evaluando:

A- En suelos deficitarios, realizar aportes de P que superen la extracción por cosecha es la estrategia necesaria para salir de la “zona de carencia”, donde el rendimiento cultural depende sensiblemente del aporte de P.

B- El manejo del fósforo en suelos deficitarios no debe ser una acción aislada en la plantación, sino que debe abordarse como un proceso continuo y racional que contemple el contenido de P disponible del suelo, el balance de P (dosis P - extracción por cosecha) durante el ciclo, y la posibilidad de refertilización en socas.

C- La aplicación superficial de P (nueva fuente) en cañas socas (sobre el surco) mostró respuestas similares que la incorporada. Esto ofrece ventajas operativas y económicas. Analizar cada situación: suelo, dosis, pendiente, pluviometría, cobertura, etc.

D- Socas subfertilizadas, pero bien manejadas, pueden recuperarse significativamente ante una refertilización.

E- La incorporación del azufre (estrategia NPS) en algunas situaciones, puede aumentar la respuesta y eficiencia de uso del nitrógeno y el fósforo.

BIBLIOGRAFÍA

Arroyo, E.; A. Sanzano; H. C. Rojas Quinteros y J. P. Navarro Di Marco.2019. Distribución espacial de los contenidos de fósforo disponible en suelos del área cañera de Tucumán. Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán Tomo 96 (2): 01-06; 2019. ISSN 0370-5404.

Romero, Juan I.; F. Madrid; J. Navarro Di Marco; H. Rojas Quinteros; A. Sanzano; E. R. Romero. 2020. Requerimiento y extracción de nutrientes de una variedad de caña de azúcar bajo riego por goteo y en secano en Tucumán-Argentina. Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán 97 (1).

Romero, Juan I.; F. Madrid; J. Navarro Di Marco; H. Rojas Quinteros; G. Juárez, R. Dellmans, A. Sanzano y E. R. Romero. 2022. Balance aparente de macronutrientes en caña de azúcar con riego por goteo y secano en Tucumán. Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán 99 (1): 53-60.

Romero, Juan I.; Esteban Arroyo*, Agustín Sanchez Ducca, Andrea Peña Malavera, Agustín Sanzano, Eduardo R. Romero. 2023. Respuesta de cañas socas de edad avanzada a la refertilización con fósforo en Tucumán, Argentina. Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán 100 (2): 1-9.

Romero, Juan I; Arroyo, E.; Quintana, D.; Peña Malavera, A.; Rojas Quinteros, H.; Sanzano, A. 2023. La Fertilización balanceada y su impacto en el rendimiento y la longevidad de los cañaverales en Tucumán, Argentina. 12vo Congreso ATALAC. Costa Rica. 18 al 22 septiembre.

Zambrosi, B. F. C. (2020) ‘Phosphorus Fertilizer Reapplication on Sugarcane Ratoon: Opportunities and Challenges for Improvements in Nutrient Efficiency’, Sugar Tech. Springer India, 23(3), pp. 704–708. doi: 10.1007/s12355-020-00925-9.

INDICADORES EDÁFICOS Y USO DE SENSORES REMOTOS PARA LA FERTILIZACIÓN NITROGENADA POR AMBIENTES PRODUCTIVOS EN CAÑA DE AZÚCAR

Martos GG (*) (**); Sopena RA (*), Bustos L (***); Gallac MJ (*) y Sánchez HA (*)

(*) INTA Famaillá, (**) INSIBIO (UNT- CONICET), GeoAgro (***)
ggmartos@gmail.com

PALABRAS CLAVE: indicadores; ambientes productivos, rendimiento

Introducción

La producción de caña de azúcar (Saccharum officinarum L.) se enfrenta al desafío de incrementar su eficiencia productiva bajo criterios de sostenibilidad económica y ambiental. El nitrógeno (N) es el nutriente con mayor impacto en el rendimiento cultural y el de mayor dinamismo en el sistema suelo-planta. Sin embargo, la respuesta del cultivo a la fertilización nitrogenada es altamente variable, ya que depende de la interacción compleja entre el genotipo, el manejo y las condiciones edafoclimáticas (Thorburn et al., 2017).

Tradicionalmente, la fertilización se ha aplicado de manera uniforme, ignorando la variabilidad espacial intra-lote. No obstante, la adopción de la agricultura de precisión ha demostrado que la respuesta al N está condicionada por la capacidad productiva del sitio o "ambiente". Estudios recientes indican que en zonas de baja productividad, factores limitantes físicos o químicos pueden restringir la absorción de N, reduciendo la eficiencia de uso del nitrógeno (EUN) y aumentando el riesgo de pérdidas ambientales por lixiviación o emisión de gases de efecto invernadero (Ranjan et al., 2022).

Para predecir la oferta de N del suelo, se utiliza frecuentemente el Nitrógeno Anaeróbico (Nan) como indicador del potencial de mineralización. Si bien el Nan es un estimador robusto de la fracción orgánica lábil, autores como Geisseler (2024) advierten que, al ser un índice de laboratorio, su capacidad predictiva puede verse limitada en campo por no contemplar restricciones físicas o biológicas del entorno. Complementariamente, el uso de sensores remotos y el índice de vegetación de borde rojo (NDRE) ha ganado relevancia para el monitoreo del estado nutricional en tiempo real, ofreciendo una alternativa no destructiva para estimar la biomasa y el rendimiento (Tejera et al., 2021).

Pese a los avances, persiste la dificultad de integrar indicadores químicos (Nan), dinámicas de nutrientes en suelo (N-NO3) y sensores remotos (NDRE) para explicar las brechas de rendimiento en diferentes ambientes productivos. En este contexto, resulta fundamental validar si la inversión en dosis crecientes de urea se traduce en incrementos reales de biomasa en zonas con limitantes edáficas preexistentes.

El objetivo de este trabajo fue evaluar la respuesta del rendimiento de caña de azúcar a diferentes dosis de fertilización nitrogenada en ambientes de alta y baja productividad, analizando la consistencia de los indicadores de suelo (Nan y nitratos) y sensores remotos (NDRE) como herramientas de diagnóstico y predicción de la respuesta al nutriente en distintas campañas.

Materiales y Métodos

El ensayo se llevó a cabo, durante las campañas 2023/2024 y 2024/2025 en un lote comercial de caña de azúcar de 56,6 ha ubicado en la localidad de Leales, Tucumán (-65,21569; -27,18029). Se realizó una ambientación del lote en 7 clases según el promedio histórico de NDVI. Las clases ambientales resultan del apilamiento y categorización de imágenes de NDVI, obtenidas mediante los sensores Sentinel2 (S2) y/o Landsat8 (L8), en distintas campañas. Posteriormente se realizaron tratamientos de fertilización diferencial en ambientes de Baja productividad (50-60 tn/ha) y Alta productividad (90-100 tn/ha). Tabla 1.

Tabla 1.Tratamientos de Fertilización

Campaña 2023/2024		Ambiente productivo	
		Bajo	Alto
Urea [Kg/ha]	Dosis menor	150	150
	Dosis mayor	270	270

Campaña 2024/2025		Ambiente productivo	
		Bajo	Alto
Urea [Kg/ha]	Dosis menor	90	210
	Dosis mayor	210	330

Fecha de fertilización: 22 de octubre de 2023. Fecha de fertilización: 15 de noviembre de 2024.

Índices NDRE

Se determinó el índice Normalizado Diferencial de Borde Rojo (NDRE) durante el crecimiento del cultivo en los polígonos con diferentes tratamientos de fertilización, en los ambientes de Alta y Baja productividad, utilizando la plataforma Campo 360 de GeoAgro.

Determinación de Nitratos

El contenido de N-NO3- se determinó mediante el método colorimétrico de Harper, en muestras de suelo compuestas de 0-20 cm. Brevemente, diez gramos (10 g) de muestra de suelo acondicionado se pesaron y se mezclaron con 25 mL de una solución extractiva de K2SO4 La mezcla se sometió a agitación horizontal (30 min a 180 rpm.) seguida de centrifugación (15 min a 1500 rpm.). El extracto obtenido fue posteriormente filtrado. Se tomaron 2 mL del extracto filtrado, se llevaron a vasos de precipitación de 50 mL y se evaporaron a sequedad en estufa a 150 °C durante 24 horas. Al residuo seco y frío se le añadió 1 mL de Ácido Fenoldisulfónico para la reacción de nitración, seguido de un tiempo de espera de 10 minutos. Posteriormente, se agregaron 15 mL de agua destilada y 9 mL de NH4OH 1:1. Transcurrida 1 hora, la absorbancia de la solución se leyó en un espectrofotómetro a 420 nm.

Determinación de Nan

Se midió el contenido de N-NH4 mediante la técnica de micro destilación por arrastre de vapor tras una incubación anaeróbica de las muestras durante 7 días a 40°C. Finalizada la incubación, una alícuota del extracto fue transferida a un tubo de destilación, se añadió una solución de KCl 4 M y 0,2 g de MgO. El amoníaco liberado por destilación en un equipo Kjeldahl semiautomático fue recibido en una solución de Ácido Bórico 2%. Finalmente, el amonio capturado fue cuantificado por titulación con Ácido Sulfúrico 0,005 N.

Resultados y discusión

Los rendimientos de caña de azúcar logrados en los ambientes de alta productividad (AP) fueron en promedio 58,7 % mayores a los alcanzados en ambientes de baja productividad (BP) (Tabla 2). Los tratamientos con menor y mayor dosis de N en AP (Tabla 2-B) muestran una diferencia en los rindes de 26,2 t/ha y 30,9 t/ha, en las campañas 2023/2024 y 2024/2025, respectivamente. Sin embargo, esta tendencia no se repitió en los ambientes de baja productividad (Tabla 2- A), donde no hubo diferencias de rendimiento significativas en 2024/2025, e incluso se observó un mayor rendimiento en el tratamiento con menor dosis de N en 2023/2024. Por otra parte, las campañas tuvieron rindes muy contrastantes, con diferencias del orden del 30%, con menores rendimientos en 2024/2025.

ZONA DE BAJA PRODUCTIVIDAD

Campañas			
2023/2024		2024/2025	
Dosis N	Rendimeinto	Dosis N	Rendimeinto
Urea Kg/ha	t/ha	Urea Kg/ha	t/ha
150	74.1	90	38.7
270	57.9	210	39.0

ZONA DE ALTA PRODUCTIVIDAD

Campañas			
2023/2024		2024/2025	
Dosis N	Rendimeinto	Dosis N	Rendimeinto
Urea Kg/ha	t/ha	Urea Kg/ha	t/ha
150	80.3	210	57.6
270	106.4	330	88.5

Tabla 2. Rendimientos de caña de azúcar logrados en diferentes ambientes productivos de un mismo lote de ensayo, con distintas dosis de urea, en las campañas 2023/2024 y 2024/2025.

Las dinámicas de NDRE en la Figura 1 representan el crecimiento vegetativo durante el ciclo del cultivo.

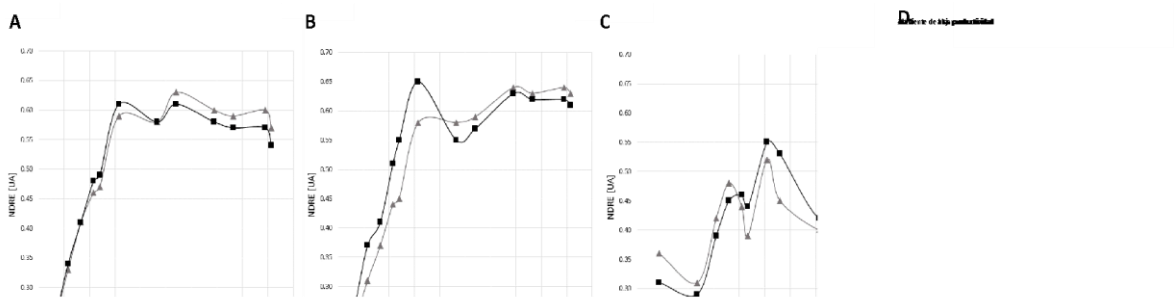


Figura 1. Dinámicas del índice NDRE en distintos ambientes productivos y campañas en el lote de ensayo.

En la campaña 2023/2024 (Figura 1 A y B) los tratamientos con dosis altas de fertilizantes alcanzaron picos de NDRE a los 40 días post fertilización (dpf) mayores a los obtenidos con menores dosis de fertilizante. Esta diferencia fue más notoria en el ambiente de Alta Productividad (AP) (Figura1 B). En la campaña 2024/2025, en ambiente de AP, también se observó una diferencia de NDRE a favor del tratamiento con mayor dosis de N, aunque con una diferencia menor a la observada en 2023/2024 (Figura 1 D). Si bien las diferencias en los tratamientos de fertilización fueron las mismas en ambas campañas (120 kg de urea), las dosis de urea ensayadas en 2024/2025 fueron más elevadas, lo cual posiblemente explique las menores diferencias encontradas en los índices de NDRE, por efecto de saturación donde una vez cubierto un umbral crítico de nitrógeno, el sensor deja de detectar mejoras visuales, aunque el rendimiento pueda seguir aumentando ligeramente. En los ambientes de Baja Productividad (BP), se observaron comportamientos muy distintos en ambas campañas, con picos de NDRE a los 40 dpf y 80 dpf en los tratamientos con mayor dosis de N en las campañas 2023/2024 y 2024/2025 respectivamente (Figura 1 A y C). Sin embargo, hubo otros momentos del ciclo del cultivo donde los tratamientos con menor dosis de N presentaron mayores valores de NDRE, sin mostrar consistencias entre campañas. Por otra parte, en 2024/2025 los índices de NDRE fueron mayores en los ambientes de AP respecto a los de BP, lo cual evidencia un mayor crecimiento vegetativo del cultivo en zonas de mayor productividad durante esa campaña. Estas diferencias no se apreciaron en el 2023/2024, donde los índices de NDRE presentaron valores similares en ambos ambientes (AP y BP). Sin embargo, si analizamos los valores generales de NDRE entre las campañas, se observa una relación directa del mismo con el rendimiento de la caña de azúcar, donde los mayores valores de NDRE registrados en 2023/2024 (Figura 1 A y B) respecto a 2024/2025 (Figura1C y D), se corresponde con una diferencia del 30% en el rendimiento (23,7 tn/ha, promedio) superior en 2023/2024 respecto a 2024/2025 (Tabla 2).

Se analizó también el contenido de nitratos en el suelo a distintos tiempos desde la fertilización (Figura 2).

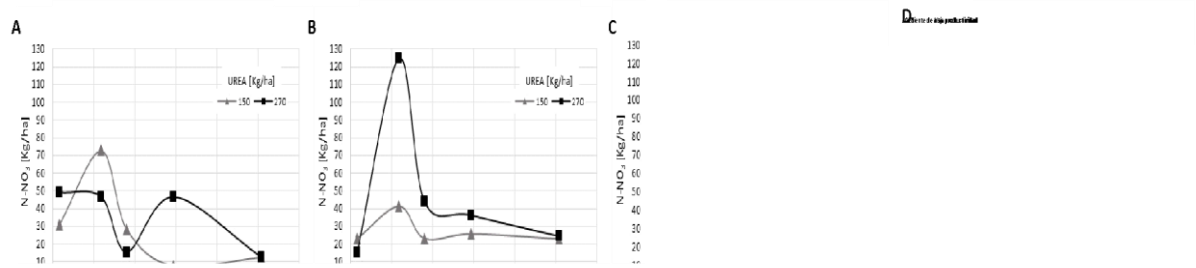


Figura 2. Dinámicas del contenido de N-NO3 en distintos ambientes productivos y campañas en el lote de ensayo.

En la campaña 2023/2024 se observó en el ambiente de AP una notable diferencia en el contenido de nitratos a los 30 dpf, entre los tratamientos con 150 y 270 Kg urea/ha (Fig. 2 B). En 2024/2025 con fertilizaciones de 210 y 330 Kg urea/ha, las diferencias fueron menores (Figura 2 D), posiblemente debido a un efecto “techo” donde la eficiencia de uso del nutriente en esa brecha de concentraciones es menor. Las dinámicas de nitratos observadas en ambientes de AP fueron parcialmente consistentes con los registros de NDRE del cultivo tomados durante el mismo período (Figura 1 B y D). Mayores diferencias en los valores de nitratos en suelo se corresponden con mayores diferencias en los índices de NDRE de los cultivos. El ambiente de BP, en 2024/2025 (Figura 2 C), presentó un comportamiento similar al observado en AP (Figura 2 D), pero con valores menores acordes a las dosis de N suministradas por fertilización. En la campaña 2023/2024, la dosis de 150 Kg urea/ha mostró una dinámica de nitrato en suelo similar a la del resto de los tratamientos ensayados en ambas campañas, con picos de acumulación entre los 30 y 60 dpf (Fig. 2 B, C y D). Sin embargo el tratamiento con 270 Kg urea/ha presentó un comportamiento distinto (Figura 2 A), alcanzando su mayor diferencia respecto a la menor dosis de N a los 150 dpf. En general, se observó un mayor contenido de nitratos en suelos tratados con mayores dosis de fertilizantes (Figura 2 ▬), aunque la consecuencia de esta condición en los rindes del cultivo solo pudo comprobarse en los ambientes de AP, donde mayores dosis de N, significaron mayores rendimientos de caña de azúcar (Tabla 2 A). No se observó lo mismo en BP, donde los tratamientos con mayores dosis de N no produjeron diferencias en los rindes, e incluso en la campaña 2023/2024 se observó un efecto detrimental (Tabla 2 B).

Se determinaron los valores de Nan en los dos ambientes, previo a las fertilizaciones, en ambas campañas (Tabla 3).

Nan	Campañas	
$N\text{-}NH_4$ [ppm]	2023/2024	2024/2025
Nan Baja	30,3 ± 7,3	68,7 ± 2,5
Nan Alta	29,5 ± 6,1	69,0 ± 6,2
Fecha de muestreo	20-10-23	30-10-24

Tabla 3. Valores de Nan en distintos ambientes productivos y campañas. Los valores expresan el promedio de las terminaciones ± la desviación estándar.

No se observaron diferencias en los valores de Nan entre ambientes de baja y alta productividad en ninguna de las dos campañas evaluadas. Sin embargo, los valores entre campañas, en fechas de muestreo similares, fueron muy distintos entre sí, duplicando en 2024/2025 los valores hallados en 2023/2024 para los mismos ambientes. Estos resultados sugieren que las diferencias de rendimientos halladas entre los ambientes, en ambas campañas (Tabla 2) posiblemente estén explicadas por otros factores determinantes distintos de sus potenciales de mineralización. El valor de Nan, estima la fracción de nitrógeno orgánico que puede ser mineralizada y estar disponible para las plantas durante el desarrollo del cultivo. Sin embargo, no se debe dejar de considerar que es un índice de laboratorio, y, por lo tanto, no siempre refleja la dinámica real del campo, ya que no considera limitaciones físicas, químicas o biológicas presentes en el ambiente agrícola (Geisseler, 2024; Wolters, 2001; Bundy y Meisinger, 1994; Marschner, 2012).

Conclusiones

Los resultados presentados en este trabajo demuestran que la respuesta a la fertilización nitrogenada está condicionada por la calidad del ambiente. En ambientes de alta productividad, el nitrógeno fue un factor limitante respondiendo de manera directa al aumento de la dosis de fertilizante. Sin embargo, en los ambientes de baja productividad el agregado de urea fue ineficiente, lo cual indica que posiblemente existan otros factores limitantes (físicos, hídricos o químicos) que prevalecen sobre la disponibilidad de nitrógeno. Los valores medidos de Nan, con grandes variaciones interanuales y sin diferencias entre los ambientes, demuestran que no es un indicador suficiente para predecir la aptitud productiva de un sitio determinado. Por otro lado, las mediciones de NDRE presentaron cierto grado de correlación con los rendimientos logrados en ambas campañas, estas observaciones sugieren que sería valioso explorar con mayor detalle el uso de este índice como herramienta predictiva del rendimiento en el cultivo de caña de azúcar. En conclusión, este trabajo refuerza los criterios de la agricultura de precisión que justifican la necesidad de realizar un manejo sitio específico para ser más eficientes y lograr mejores resultados en nuestros cultivos.

Bibliografía

Bundy, L. G., & Meisinger, J. J. (1994). Nitrogen availability indices. En Methods of Soil Analysis: Part 2—Microbiological and Biochemical Properties (pp. 951–984). Soil Science Society of America.

Geisseler, D. (2024). The multi-faceted relationship between nitrogen mineralization and soil texture. Soil Science Society of America Journal. https://doi.org/10.1002/saj2.20641

Marschner, P. (Ed.). (2012). Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants (3ra ed.). Academic Press.

Ranjan, R., Chopra, N. K., & Gupta, G. K. (2022). Precision nitrogen management for enhancing nutrient use efficiency and crop productivity. Journal of Soil and Water Conservation, 21(2), 145-156.

Tejera, M. M., Hall, A. J., & VanLoocke, A. (2021). Using red-edge vegetation indices for nitrogen status assessment in sugarcane (Saccharum officinarum L.). Remote Sensing Applications: Society and Environment, 22, 100504.

Thorburn, P. J., Biggs, J. S., Skocaj, D. M., & Everingham, Y. L. (2017). Components of the nitrogen balance in sugarcane: A review of the results of the last 20 years. Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists, 39, 21-34.

Wolters, V. (2001). Soil organism influence on ecosystem-level processes – bypassing the ecological hierarchy? Applied Soil Ecology, 17(1), 123–130.

EMPLEO DE DOSIS VARIABLES DE FERTILIZANTES EN CAÑA DE AZÚCAR EN AMBIENTES PRODUCTIVOS DIFERENCIALES EN DOS CAMPAÑAS AGRÍCOLAS EN TUCUMAN

Sopena, R.A. (*); Martos, G.G. (*) (**); Bustos, L. (***); Gallac, M.M. (*) y Sánchez, H. (*)

(*) INTA EEA Famailla, (**) (**) INSIBIO (UNT- CONICET), (***) GeoAgro
sopena.roberto@inta.gob.ar

Palabras Clave: Heterogeneidad intralote, urea, manejo por ambientes

Introducción

La intensificación productiva exige cumplir con objetivos de sustentabilidad económica, ambiental y social, (Bruulsema et al., 2008). En el manejo de la caña de azúcar, una producción rentable demanda una alta disponibilidad de nitrógeno (N). Sin embargo, el suministro biológico y la mineralización de la materia orgánica son insuficientes para cubrir el requerimiento inicial del cultivo, haciendo necesaria la fertilización nitrogenada adicional para lograr resultados económicos positivos, (Pérez Zamora, 2024). Las formas inorgánicas de N, como los nitratos, presentan alta movilidad y son propensas a pérdidas por lixiviación a aguas subterráneas o por volatilización a formas gaseosas. Por consiguiente, la dosificación precisa de N es clave para el manejo sustentable y su eficiencia de uso, (García y González Sanjuan, 2017).

Romero et al. (2018), en Tucumán, establecieron un valor de consumo cercano a 1 kg de N por tonelada de caña fresca, referencia importante para la prescripción adecuada de dosis. En otras investigaciones en cañaverales de Salta, Fernández, (2021) sostiene que el rendimiento de la caña de azúcar depende críticamente de la disponibilidad de agua y N, en tanto la variación espaciotemporal de estos factores dentro del lote reduce la eficiencia de captura y uso de los recursos, limitando el potencial productivo. Las diferencias de productividad, evidenciadas en mapas de rendimiento, reflejan una capacidad productiva diferencial por área, cuyas causas pueden ser identificadas mediante el monitoreo del crecimiento a través de mediciones de reflectancia espectral con medios remotos, (Hatfield et al., 2008).

Vinicio et al. (2025) proponen el manejo de la fertilización nitrogenada sitio-específica para adecuar el aporte de N mineral considerando la variación de los lotes, la demanda de la caña y la capacidad de suministro de N del suelo. El uso de dosis variables de fertilizantes según los distintos ambientes contribuirá con conocimientos actualizados sobre una práctica de gran relevancia productiva, económica y ambiental como es la fertilización en caña de azúcar.

Objetivo

Evaluar la aplicación de Nitrógeno (N) en caña de azúcar, con dosis crecientes y variables, en diferentes ambientes productivos intralote durante dos campañas.

Materiales y métodos

En la campaña agrícola 2023-2024, se llevó adelante un ensayo con dosis creciente de Urea, por ambientes, mientras que para la campaña 2024-2025, los ensayos incluyen dosis variable de Urea, en distintos ambientes productivos intralotes.

Para la selección del lote y la diferenciación de ambientes, se elaboro un mapa de productividad, realizado por la empresa GeoAgro, con la diferenciación de tres clases o zonas, (baja, media y alta productividad) y el cual se compone a partir del análisis histórico de índice

NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada). Se emplearon imágenes entre las campañas 2019 a 2023 para el lote del ensayo elegido y las fechas de estimación de los índices se ubican entre los meses de febrero y marzo de los años detallados, empleando el Satelite Sentinel 2, con resolución de 10 x 10 m en terreno. Los valores de los índices NDVI para los ambientes y periodos analizados fluctúan desde 0,56 mínimo a 0,72 máximo.

El ensayo se ubicó en Loma Verde, Dpto. Leales (Llanura Deprimida Central), un sitio representativo que incluye suelos salinos-no salinos y sin capa freática, en la misma área. Los parámetros analíticos del suelo para los tres ambientes caracterizados, baja, media y alta se expresan a continuación, en la tabla 1, los que fueron determinados por el Laboratorio de Suelos y Agua del INTA EEA Famaillá.

Tabla 1. Valores analíticos de los principales parámetros de suelo analizados y diferenciado por ambientes.

Ambientes	pH	Mat.Org.(%)	Nitratos (ppm)	Fosforo (ppm)	Potasio ($cmol.kg^{-1}$)	Textura
Baja	7.8	1.9	18.0	9.0	0.4	Franco arcilloso
Media	5.9	2.0	8.4	5.8	0.8	Franco arcillo limoso
Alta	6.2	2.0	6.8	7.9	0.7	Franco arcilloso

Descripción de los tratamientos: Para la campaña 2023-2024 (año 1), sobre una caña soca 2, de la variedad LCP 85-384, se evaluaron cinco dosis alternativas crecientes de N, usando urea como única fuente. La dosis de N ha-1 se establece en base a los análisis de suelo, expectativas de rendimiento y edad del cañaveral, en tanto el testigo comercial, (dosis frecuente del productor) fue de 3,5 kilos por surco de Urea o 210 kg Urea/Ha. Los tratamientos fueron:

T0 = 210 kg urea/ha: 96,6 kg N/ha
T1 = 150 kg urea/ha: 69,0 kg N/ha
T2 = 180 kg urea/ha: 82,8 kg N/ha
T3 = 240 kg urea/ha: 110,4 kg N/ha
T4 = 270 kg urea/ha: 124,2 kg N/ha

La prescripción de las dosis se realizó a través de la plataforma digital GeoAgro y para la aplicación se lo compatibilizo con el controlador de dosis variable GreenStar™, incorporado a un equipo múltiple Indujor™. Las dosis se aplicaron por igual en los tres ambientes, en franjas, con el mismo diseño de parcelas, de 1500 m2 por cada una, (12 surcos por 80 metros de largo) adecuadas para el seguimiento satelital. La fecha de fertilización fue el 22 de octubre de 2023.

Próximo a cosecha, (25 de junio de 2024), se realizó el conteo de los tallos en 4 sitios al azar por cada tratamiento, para estimar número de tallos por ha. Luego se recolectaron cuatro muestras de 10 tallos limpios por repetición para determinar el peso fresco individual y estimar finalmente el rendimiento teórico de caña por ha. Los resultados fueron analizados comparando por ambiente, (baja, media y alta), para los distintos tratamientos entre sí y respecto al testigo, utilizando en el contraste de medias la prueba DGC, para un p-valor <

0,05, correspondiente a la versión del software estadístico INFOSTAT 2020 (Di Rienzo et al., 2020).

Resultados Campaña 2023-2024.

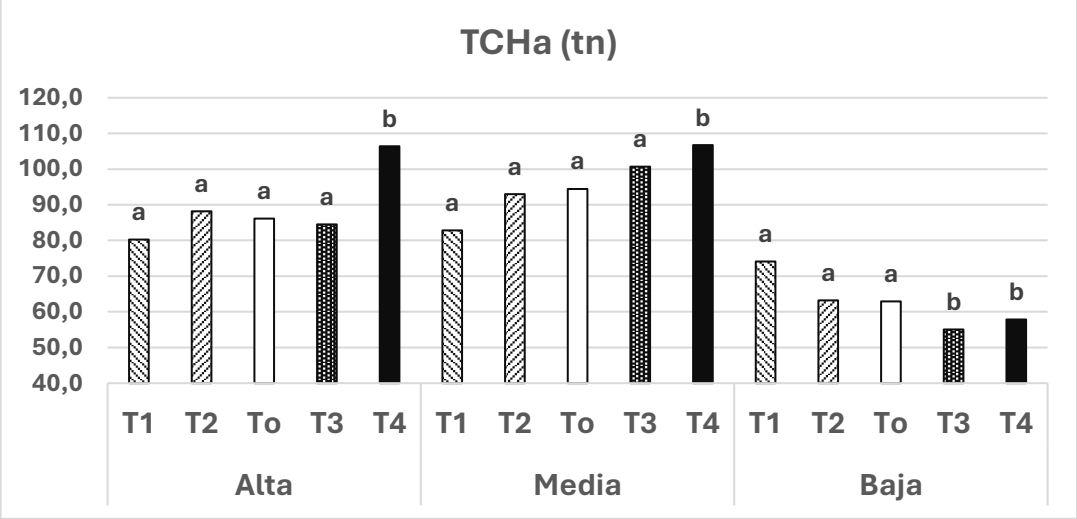


Figura 1. Rendimiento teórico en toneladas de caña por hectárea, (TCHa), para los tres ambientes definidos, alta, media y baja y las cinco dosis aplicadas. Letras distintas sobre las barras explican diferencias significativas entre tratamientos.

Los resultados reflejan respuestas diferenciales a las dosis de urea, siendo más notables en ambientes de media y alta calidad. Las dosis de 4.0 y 4.5 kg de urea/surco aumentaron el rendimiento, en promedio, un 10.2% sobre el testigo, mientras que las dosis menores, de 2,5 y 3,0 kilos de urea por surco, expresan un 4,5 % menos de rendimiento al testigo. En el sector del lote que responde a un patrón de baja fertilidad, (debido a problemas como elevado pH) no mostró respuesta a dosis crecientes, lo que explica que el rendimiento está limitado por factores estructurales.

Para la campaña 2024-2025 (año 2) y sobre los mismos lotes del año anterior, variedad LCP 85-384 y en edad de soca 3, se realizó un ajuste en las dosis aplicadas de urea. Para cada ambiente, previa caracterización por mapas de productividad y de rendimientos de la campaña anterior, se fijan tres dosis, correspondiendo mayores valores de N, en mejor calidad de ambiente. La fecha de fertilización se ajustó a la evolución del cultivo y se la realizó el 25 de noviembre de 2024.

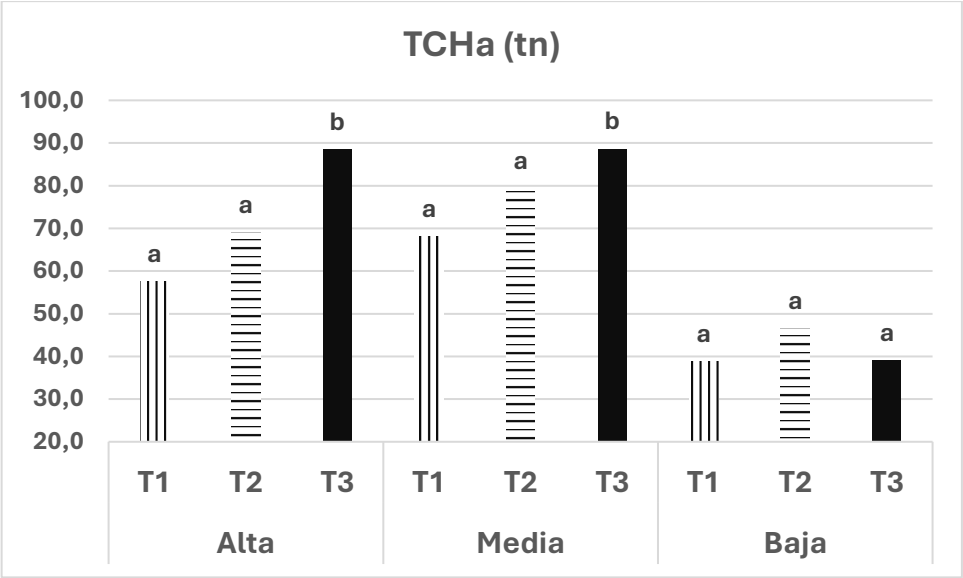
Los tratamientos fueron:

Ambientes	Tratamientos	Dosis (kg N/ha)
Baja	T1	41,4 (1,5 kg surco 100 m)
	T2	69,0 (2,5 kg surco 100 m)
	T3	96,6 (3,5 kg surco 100 m)
Media	T1	69,0 (2,5 kg surco 100 m)
	T2	96,6 (3,5 kg surco 100 m)
	T3	124,2 (4,5 kg surco 100 m)
Alta	T1	96,6 (3,5 kg surco 100 m)
	T2	124,2 (4,5 kg surco 100 m)
	T3	151,8 (5,5 kg surco 100 m)

Resultados Campaña 2024-2025.

Previo a la cosecha, (01 de julio de 2025), se realizaron los muestreos con la misma metodología de estimación del rendimiento cultural de la campaña anterior. En la siguiente figura se observan los valores de rendimiento teórico por cada tratamiento.

Figura 2. Rendimiento teórico en toneladas de caña por hectárea, (TCHa), para los tres ambientes definidos, alta, media y baja y las tres dosis aplicadas. Letras distintas sobre las barras explican diferencias significativas entre tratamientos.



Como en la campaña anterior, se observa una mayor tendencia y mejores respuestas a las dosis crecientes de fertilizantes, en particular en los ambientes de media y alta productividad. En el ambiente de media, para los dos tratamientos de dosis creciente de 3,5 y 4,5 kilos de urea por surco explican un 23,0 % más de rendimiento cultural teórico sobre la dosis menor, mientras que, en el ambiente de alta, las dosis de 4,5 y 5,5 kilos de urea por surco representan un 36,8 % más de producción de caña sobre la dosis menor para este ambiente.

Conclusiones

El análisis de los resultados obtenidos en dos campañas consecutivas permite inferir que la fertilización nitrogenada con dosis crecientes y con dosis variable, por ambientes, son herramientas validas, adecuando los aportes de N a los distintos niveles de fertilidad en los lotes de caña de azúcar.

La caracterización previa de la heterogeneidad intra-lote es fundamental en las decisiones de fertilización con el uso de dosis variables, ya que la ambientación permite delimitar zonas de distinto potencial de producción y con limitantes edafoclimáticas específicas. De esta manera, es posible ajustar el manejo general del lote y asignar los insumos en forma específica a cada sector, lo que no necesariamente implica usar menos fertilizante, sino reasignarlo de manera más

eficiente, para así lograr una mejora de la productividad y a la vez optimizar los recursos disponibles.

Las actividades desarrolladas en esta investigación fueron en el marco del proyecto regional de INTA *“Innovación tecnológica, social y ambiental de los sistemas productivos agrícolas de la región”.*

Agradecimientos: A la empresa COU SA, en las personas de Luis Courel, Calixto Sal y Pablo Peloc para la realización de esta experiencia y al grupo CREA Cañaverales, en particular al Agr. Manuel Ponce por las gestiones para viabilizar la iniciativa.

Bibliografía

Bruulsema T., C. Witt, F. Garcia, S. Li, T.N. Rao, F. Chen y S. Ivanova. 2008. A Global Framework for Fertilizer BMPs. Better Crops 92 (2): 13-15. IPNI. Norcross, GA. USA.

Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., González, L., Tablada, M. y Robledo, C. W. (2020). InfoStat versión 2020. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba. http://www.infostat.com.ar.

Fernández, H.J. 2021. Eficiencia en el uso del nitrógeno y agua en caña de azúcar en zonas de manejo homogéneas. Tesis de Investigación para optar al Grado Académico de Magister en Producción Vegetal, Corrientes, Argentina, 2021. 92 pp.

García, F.O y M.F. González Sanjuan. 2010. Balances de nutrientes en Argentina. ¿Cómo estamos? ¿Cómo mejoramos? Serie de divulgación Fertilizar, N° 17. p 19-25.

Hatfield, J.L., A.A. Gitelson, J.S. Schepers, and C.L. Walthall, 2008. Application of spectral remote sensing for agronomic decisions. Agron. J. 100: S117-S131.

Pérez Zamora, F. 2024. Caña de azúcar. Pp. 609-630, En: H. E. Echeverria, y F, O. Garcia, Fertilidad de Suelos y Fertilización de Cultivos. Ediciones INTA; Centro Regional Buenos Aires Sur, 2024, 878 p.

Romero, J. I., Madrid, F., Navarro Di Marco, J., Rojas Quinteros, H., Juárez, G., Dellmans, R., Sanzano, A., & Romero, E. R. (2022). Balance aparente de macronutrientes en caña de azúcar con riego por goteo y secano en Tucumán-Argentina. Revista Industrial Y Agrícola De Tucumán, 99(1), 53–60.

Vinicio, M.C., Francisco, P.J. and Danniel, T.C. 2025. Site-specific nitrogen management through measuring soil nitrogen to maximize yield response in sugarcane. Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists, volume 32, 760–767, Cali, Colombia,2025.

VARIABILIDAD EDÁFICA Y RESPUESTA ESPECTRAL DEL CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR EN LAS PROVINCIAS DE SALTA Y JUJUY: BASES PARA EL MANEJO POR AMBIENTES

Fernandez, H.J.[1]

[1]Estación Experimental de Cultivos Tropicales Yuto, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Yuto, Jujuy, Argentina.
Correo electrónico: fernandez.hugo@inta.gob.ar

Palabras clave: agricultura por ambientes – sensores remotos – índices de vegetación - NDRE – EVI2

Introducción

El cultivo de caña de azúcar (*Saccharum officinarum L.*) constituye una de las principales actividades agroindustriales del Noroeste Argentino (NOA), donde se desarrolla bajo condiciones edáficas y ambientales altamente heterogéneas. Esta heterogeneidad condiciona de manera directa la disponibilidad de agua y nutrientes y, en consecuencia, el crecimiento, el rendimiento y la eficiencia en el uso de los recursos. Diversos estudios han demostrado que la variabilidad espacial del suelo es uno de los principales determinantes del rendimiento en sistemas agrícolas (Kitchen et al., 2003; Webster & Oliver, 2007). En caña de azúcar, esta situación se ve acentuada por el carácter semiperenne del cultivo, su ciclo prolongado y su elevada demanda hídrica y nutricional. En este contexto, la aplicación de manejos homogéneos sobre ambientes heterogéneos conduce a ineficiencias productivas, económicas y ambientales. La agricultura por ambientes surge como un enfoque estratégico para abordar esta variabilidad mediante la delimitación de zonas relativamente homogéneas, basadas en atributos edáficos con estabilidad temporal. Este enfoque permite ajustar las prácticas de manejo a las características intrínsecas de cada ambiente, mejorando la eficiencia en el uso de los recursos y reduciendo pérdidas (Molin et al., 2015). El desarrollo de los sensores remotos ha potenciado su aplicación, al permitir la obtención sistemática de información espectral del cultivo a diferentes escalas espaciales y temporales. Índices espectrales como NDVI, GNDVI y EVI han sido ampliamente utilizados en caña de azúcar para estimar vigor, biomasa y rendimiento (Bégué et al., 2010; Miphokasap et al., 2012). Sin embargo, en el NOA son escasos los estudios que integren información edáfica y espectral para explicar la variabilidad productiva del cultivo.

Objetivos

Analizar la influencia de la variabilidad edáfica sobre la respuesta espectral del cultivo de caña de azúcar en las provincias de Salta y Jujuy e identificar índices espectrales robustos como herramientas operativas para la delimitación de ambientes y el manejo diferencial del cultivo.

Materiales y Métodos

El estudio se basó en el análisis de 47 puntos de muestreo ubicados en cinco sitios representativos del área cañera de las provincias de Salta y Jujuy (Colonia Santa Rosa, El Tabacal, Urundel, Rodeito y Los Manantiales) (Figura 1). Las muestras de suelo se extrajeron con pala barreno helicoidal a una profundidad de 0–40 cm, correspondiente al estrato de mayor actividad radicular. En cada punto se determinaron propiedades físico-químicas del suelo, incluyendo textura (arena, limo y arcilla), capacidad hídrica de saturación (CHS), pH, conductividad eléctrica (CE), carbono orgánico, materia orgánica (MO), nitrógeno total (Nt), relación C/N, fósforo extractable y potasio intercambiable. La información espectral se obtuvo a partir de imágenes Sentinel-2 procesadas en la plataforma Google Earth Engine. Se analizaron imágenes correspondientes al período 2018–2025 con el fin de capturar la

variabilidad interanual. Se calcularon los índices NDVI, EVI2, GNDVI, NDRE, NDWI y SAVI. Para cada punto se extrajeron valores multitemporales correspondientes al período enero–junio de cada año, que coincide con la fase de mayor desarrollo vegetativo del cultivo., utilizando composiciones temporales que minimizaron la influencia de nubosidad. El análisis estadístico incluyó estadísticos descriptivos, correlaciones de Pearson ($p < 0,05$) y un Análisis de Componentes Principales (ACP) sobre variables estandarizadas. Adicionalmente, los puntos se clasificaron mediante un análisis de agrupamiento no supervisado (k-means, $k = 3$), evaluándose la calidad de la clasificación mediante el índice silhouette. Los análisis se realizaron utilizando InfoStat (versión 2020) y RStudio.

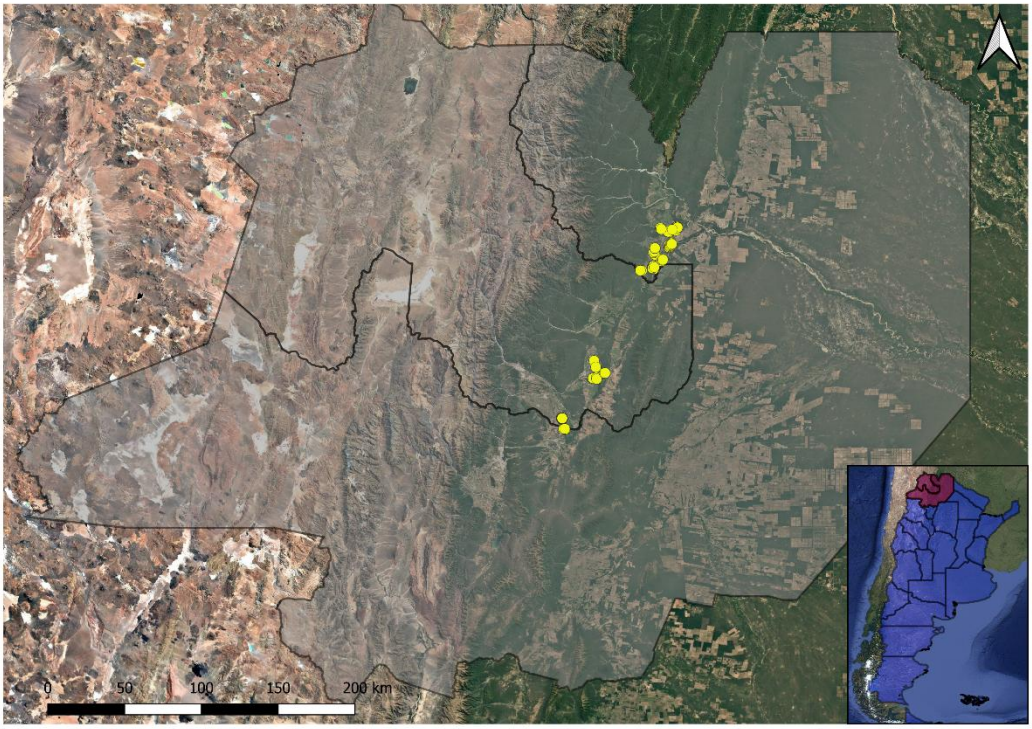


Figura 1. Área de estudio y distribución espacial de puntos de muestreo

Resultados y Discusión

Las variables edáficas evidenciaron una marcada heterogeneidad ambiental entre los 47 puntos analizados (Tabla 1). Las variables texturales presentaron los mayores coeficientes de variación, con valores superiores al 50 % para arena y arcilla, indicando la coexistencia de ambientes con capacidades contrastantes de retención hídrica. La materia orgánica y el nitrógeno total también mostraron elevada variabilidad, reflejando diferencias estructurales en la provisión de nutrientes. En contraste, los índices espectrales presentaron una variabilidad relativa menor (CV entre 12,4 y 17,4 %), lo que sugiere que integran la heterogeneidad edáfica subyacente en una señal funcional del cultivo. La mayor variabilidad relativa observada en EVI2 y NDRE indica una mayor sensibilidad de estos índices para captar contrastes ambientales.

Tabla 1. Valores medios, mínimos, máximos, y coeficiente de variación (CV) de las variables edáficas e índices espectrales analizados.

Variable	Media	Mínimo	Máximo	CV (%)
Arena (%)	37,6	8,0	85,0	52,4
Limo (%)	39,2	12,0	61,0	29,3
Arcilla (%)	23,2	3,0	51,0	52,6
Capacidad hídrica de saturación (CHS)	38,1	22,0	62,0	25,7
Materia orgánica (%)	1,89	0,64	4,35	44,3
Nitrógeno total (%)	0,11	0,03	0,26	42,3
Conductividad eléctrica (dS m^{-1})	0,56	0,16	1,18	46,0
NDVI	0,70	0,52	0,83	12,4
EVI2	0,47	0,33	0,62	17,4
NDRE	0,50	0,33	0,63	17,2
GNDVI	0,63	0,52	0,71	8,4

Se observaron relaciones significativas entre los principales atributos del suelo y los índices espectrales asociados al vigor del cultivo (Tabla 2). El contenido de arcilla, la CHS, la materia orgánica y el nitrógeno total mostraron correlaciones positivas con NDVI, EVI2, GNDVI, SAVI y NDRE, mientras que el contenido de arena presentó correlaciones negativas consistentes. Estos resultados confirman que la variabilidad espacial del cultivo de caña de azúcar en el NOA está principalmente controlada por gradientes edáficos estructurales, en concordancia con estudios realizados en otros sistemas cañeros (Kitchen et al., 2003; Bramley et al., 2019).

Tabla 2. Coeficientes de correlación de Pearson y probabilidades entre contenido de arena, limo y arcilla, capacidad hídrica de saturación (CHS), pH, conductividad eléctrica (CE), materia orgánica (MO), nitrógeno total (Nt), NDVI, EVI2, GNDVI, NDWI, SAVI y NDRE.

	Arena	Limo	Arcilla	CHS	Ph	CE	MO	Nt	NDVI	EVI2	GNDVI	NDWI	SAVI	NDRE
Arena		< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Limo	-0,82		< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,05	< 0,05	< 0,05	0,365	0,124	0,333	0,333	0,148	0,288
Arcilla	-0,842	0,383		< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
CHS	-0,854	0,514	0,895		< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
pH	-0,608	0,624	0,393	0,409		0,085	0,927	0,782	0,184	0,114	0,235	0,235	0,126	0,152
CE	-0,41	0,3	0,38	0,431	0,254		0,463	0,424	0,070	< 0,05	0,064	0,064	< 0,05	0,072
MO	-0,536	0,332	0,553	0,621	0,014	0,11		< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
Nt	-0,54	0,351	0,541	0,611	0,041	0,119	0,975		< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
NDVI	-0,421	0,135	0,553	0,512	0,197	0,266	0,542	0,54		< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
EVI2	-0,454	0,227	0,519	0,501	0,233	0,311	0,575	0,59	0,965		< 0,01	< 0,01	< 0,01	< 0,01
GNDVI	-0,416	0,144	0,536	0,517	0,177	0,272	0,534	0,521	0,978	0,92		< 0,01	< 0,01	< 0,01
NDWI	0,416	-0,144	-0,536	-0,517	-0,177	-0,272	-0,534	-0,521	-0,978	-0,92	-1.000		< 0,01	< 0,01
SAVI	-0,452	0,214	0,528	0,505	0,226	0,305	0,572	0,586	0,975	0,999	0,93	-0,93		< 0,01
NDRE	-0,412	0,158	0,517	0,478	0,212	0,265	0,49	0,496	0,985	0,95	0,975	-0,975	0,959	

El análisis de componentes principales (Figura 2) explicó el 80,4 % de la variabilidad total mediante los dos primeros componentes. El CP1 (64,0 %) representó un gradiente edáfico estructural, diferenciando suelos arenosos de aquellos con mayor contenido de arcilla, CHS, MO, Nt y CE, asociados a una mayor capacidad de retención de agua y nutrientes. Este gradiente condicionó el potencial productivo del cultivo, evidenciado por la asociación positiva de los índices EVI2 y NDRE con las variables edáficas favorables y por valores más bajos en ambientes arenosos, en concordancia con estudios que señalan que los índices multitemporales integran el efecto acumulado de restricciones edáficas e hídricas sobre el crecimiento del cultivo (Canata et al., 2021; de França e Silva et al., 2024). El CP2 explicó el 16,4 % de la variabilidad y estuvo dominado por el NDWI, reflejando un eje funcional asociado al estado hídrico del dosel. La diferenciación del NDWI respecto de EVI2 y NDRE indica que, aun en ambientes edáficamente restrictivos, la condición hídrica puede variar de forma transitoria sin traducirse necesariamente en aumentos sostenidos del vigor o del potencial productivo. Este comportamiento es consistente con la sensibilidad del NDWI al contenido de agua del dosel (Cheng et al., 2006), habiéndose demostrado su utilidad para detectar variaciones hídricas y eventos de sequía en caña de azúcar (Picoli et al., 2017).

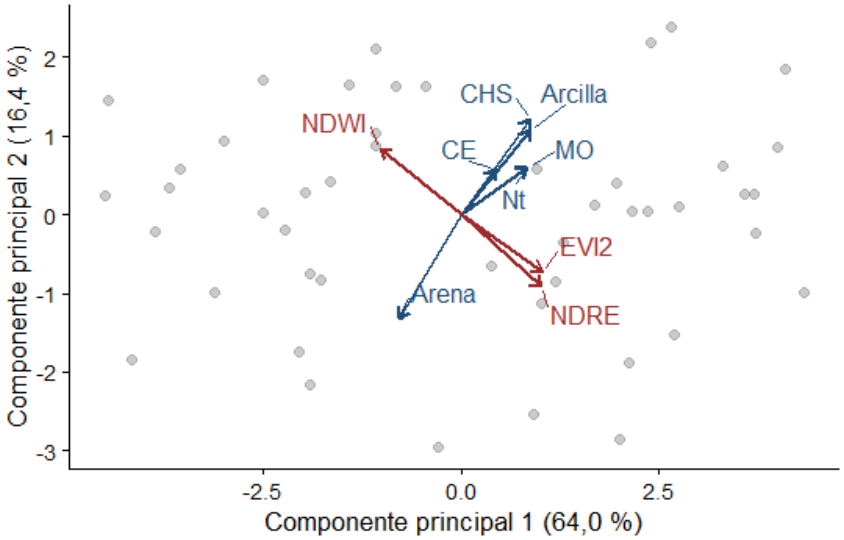


Figura 2. Análisis de componentes principales para contenido de arena, arcilla, capacidad hídrica de saturación (CHS), conductividad eléctrica (CE), materia orgánica (MO), nitrógeno total (Nt), NDVI, EVI2, GNDVI, NDWI, SAVI y NDRE.

El análisis de separabilidad indicó que el NDRE presentó el mayor valor de silhouette (0,63), seguido por NDVI (0,60) y EVI2 (0,56). El EVI2 mostró el mayor poder explicativo respecto de la materia orgánica y el nitrógeno total, en concordancia con su menor saturación en canopeos densos (Huete et al., 2002). El NDRE evidenció una mayor capacidad para discriminar ambientes productivos contrastantes, consistente con la sensibilidad de los índices basados en red-edge al estado nutricional del cultivo.

Conclusiones

La variabilidad espacial del cultivo de caña de azúcar en el NOA está gobernada por gradientes edáficos estructurales persistentes, principalmente textura, capacidad de retención hídrica y fertilidad, que se expresan de manera consistente en la respuesta espectral del cultivo a escala regional y multitemporal.

Los índices espectrales NDRE y EVI2 muestran un alto potencial como herramientas operativas para la delimitación de ambientes y el manejo diferencial del cultivo, aportando bases objetivas para optimizar la fertilización y el uso del agua en sistemas cañeros del NOA.

Apoyo financiero: Proyectos : INTA-PD-2023-I072 ; INTA-PE-2023-I064

Referencias

Bégué, A., Lebourgeois, V., Bappel, E., Todoroff, P., Pellegrino, A., Baillarin, F., & Siegmund, B. (2010). Spatio-temporal variability of sugarcane fields and recommendations for yield forecast using NDVI. International Journal of Remote Sensing, 31(20), 5391–5407. https://doi.org/10.1080/01431160903349057

Bramley, R. G. V., Ouzman, J., & Gobbett, D. L. (2019). Regional scale application of the precision agriculture thought process to promote improved fertilizer management in the Australian sugar industry. Precision Agriculture, 20, 362–378. https://doi.org/10.1007/s11119-018-9571-8.

Canata, T. F., Wei, M. C. F., Maldaner, L. F., & Molin, J. P. (2021). Sugarcane yield mapping using high-resolution imagery data and machine learning technique. Remote Sensing, 13(2), 232. https://doi.org/10.3390/rs13020232.

Cheng, Y. B., Zarco-Tejada, P. J., Riaño, D., Rueda, C. A., & Ustin, S. L. (2006). Estimating vegetation water content with hyperspectral data for different canopy structures and soil backgrounds. Remote Sensing of Environment, 102(3–4), 422–437. https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.02.009.

De França e Silva, N. R., Chaves, M. E. D., Luciano, A. C. S., Sanches, I. D., de Almeida, C. M., & Adami, M. (2024). Sugarcane yield estimation using satellite remote sensing data in empirical or mechanistic modeling: A systematic review. Remote Sensing, 16(5), 863. https://doi.org/10.3390/rs16050863.

Huete, A. R., Didan, K., Miura, T., Rodriguez, E. P., Gao, X., & Ferreira, L. G. (2002). Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. Remote Sensing of Environment, 83(1–2), 195–213. https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00096-2.

Kitchen, N. R., Drummond, S. T., Lund, E. D., Sudduth, K. A., & Buchleiter, G. W. (2003). Soil electrical conductivity and topography related to yield for three contrasting soil–crop systems. Agronomy Journal, 95(3), 483–495. https://doi.org/10.2134/agronj2003.4830

Miphokasap, P., Honda, K., Vaiphasa, C., Souris, M., & Nagai, M. (2012). Estimating canopy nitrogen concentration in sugarcane using field imaging spectroscopy. Remote Sensing, 4(6), 1651–1670. https://doi.org/10.3390/rs4061651.

Molin, J. P., Amaral, L. R., & Colaço, A. F. (2015). Agricultura de precisão. São Paulo: Oficina de Textos. ISBN 978-85-7975-213-1

Picoli, M. C. A., Lamparelli, R. A. C., Sano, E. E., & Victoria, D. C. (2017). Sugarcane drought monitoring using time series of vegetation indices. Remote Sensing, 9(7), 699. https://doi.org/10.3390/rs9070699

Webster, R., & Oliver, M. A. (2007). Geostatistics for Environmental Scientists (2nd ed.). Wiley. https://doi.org/10.1002/9780470517277.

RELACIÓN ENTRE LA ZONIFICACIÓN DEL ÁREA CAÑERA SEGÚN LOS NIVELES DE PRODUCCIÓN Y LA FERTILIDAD DE LOS SUELOS EN TUCUMÁN, ARGENTINA, UTILIZANDO GEOTECNOLOGÍAS

Fandos C.; Soria F. J; Scandaliaris P.; Carreras Baldrés J. I. Sanzano G. A.

Estación Experimental Agroindustrial "Obispo Colombres"
Avenida William Cross 3150, C.C. Nº 9 (T4101XAC), Las Talitas, provincia de Tucumán, Argentina
carminaf@eeaoc.org.ar

Palabras clave: Teledetección y SIG, materia orgánica del suelo (MOS), pH

Introducción

El rendimiento de la caña de azúcar depende de una combinación de factores ambientales y de manejo. Aunque la mejora genética y las nuevas tecnologías a menudo ocultan el problema manteniendo los rendimientos, la disminución de la materia orgánica del suelo (MOS) es crítica, ya que aproximadamente el 50% del nitrógeno (N) requerido por la caña proviene de la MOS, y el pH del suelo también afecta sus propiedades (Arroyo *et al.*, 2022).

Los mapas de fertilidad del suelo son una herramienta esencial para identificar y ubicar áreas con distintos niveles de nutrientes, lo que permite un manejo diferenciado. Por ejemplo, el INTA generó un mapa de almacenamiento de carbono del suelo (COS) para Argentina (Gaitán *et al*., 2023), y a nivel local en Tucumán, Arroyo *et al*. (2022) crearon mapas que muestran la distribución espacial de los porcentajes de MOS, N total y pH en los suelos cañeros, ayudando a planificar prácticas de manejo sostenible.

La identificación de ambientes de producción mediante zonificación es clave para el manejo diferencial de las áreas agrícolas, lo cual se facilita con el uso de teledetección y Sistemas de Información Geográfica (SIG). Localmente, Fandos *et al.* (2022a) zonificaron el área cañera tucumana según los niveles de producción y encontraron altos porcentajes de zonas de baja producción en la región de la Llanura Deprimida. Investigaciones posteriores de Fandos *et al*. (2023a) mostraron una expansión de los cañaverales hacia el norte, este y sur de la zona tradicional, ocupando principalmente la Llanura Chacopampeana, donde se registraron mayores porcentajes de áreas de producción intermedia y alta en comparación con la zona tradicional.

Con el fin de relacionar la zonificación productiva de las plantaciones de caña de azúcar con la fertilidad del suelo, los objetivos del presente trabajo fueron actualizar la zonificación del área cañera en la provincia de Tucumán basada en los niveles de producción hasta el año 2023, y relacionarla con los mapas de fertilidad de los suelos cañeros generados a nivel local.

Materiales y métodos

El área de estudio es la región cultivada con caña de azúcar en Tucumán, que se concentra principalmente en las regiones de Pedemonte, Llanura Deprimida y Llanura Chacopampeana (Figura 1).

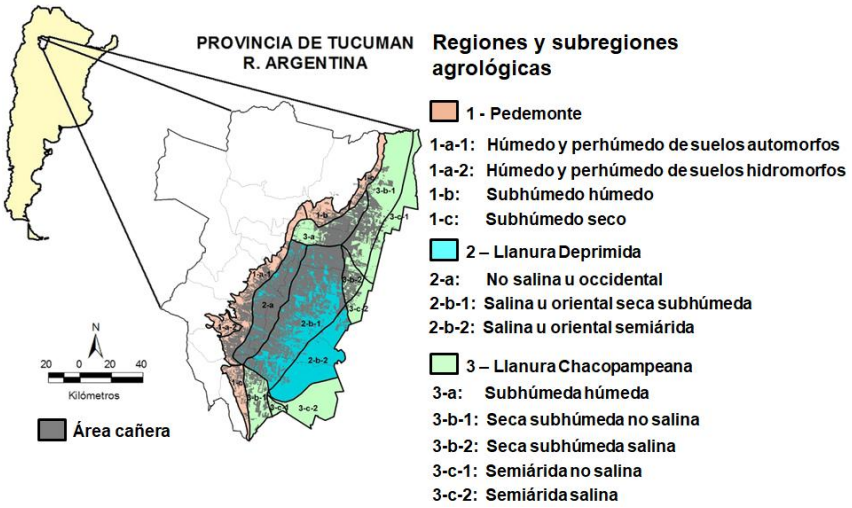


Figura 1. Regiones y subregiones agrológicas del área cañera tucumana. Adaptado de Zuccardi y Fadda (1985)

Materiales y métodos

Se emplearon técnicas de SIG para analizar diversas coberturas temáticas. La base fue la zonificación del área cañera según los niveles de producción de Fandos *et al.* (2022a), generada a partir de imágenes satelitales (Landsat y Sentinel) de los años 2011, 2013, 2016, 2018, 2019 y 2020, obtenidas de los sitios web https://catalogos.conae.gov.ar/landsat8/ y https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home, respectivamente.

Las capas temáticas base de caña de azúcar contenían tres categorías de niveles de producción, según el rendimiento cultural: bajo (menor a 56 t/ha), medio (entre 56 y 75 t/ha) y alto (mayor a 76 t/ha). Para el análisis, a los pixeles correspondientes al nivel bajo se les asignó el valor 1; al nivel medio, el valor 10; y el valor 100 al nivel alto. Las clases sin predominio de valores se asignaron al nivel de producción más bajo. Posteriormente, se superpuso la cobertura de las zonas de producción sobre las regiones agroecológicas de Tucumán (Zuccardi y Fadda 1985).

Para el presente trabajo, utilizando la misma metodología, se actualizó la cobertura agregando la información de niveles de producción correspondientes a las zafras 2021 a 2023 (Fandos *et al.,* 2021; 2022b; 2023b).

Respecto a la fertilidad de suelos, se utilizaron los mapas de Materia Orgánica del Suelo (MOS) y pH desarrollados por Arroyo *et al.* (2022), generados a partir de 2900 muestras extraídas a 0-30 cm de profundidad mediante el método de Kriging Ordinario (Figura 2). Estos mapas fueron reclasificados para el análisis: el mapa de MOS se dividió en suelos con contenido por debajo o por encima del 1,5%. El mapa de pH se simplificó en dos categorías: "pH con limitaciones" (moderadamente ácido a ligeramente o moderadamente alcalino) y "pH sin limitaciones" (ligeramente ácido a neutro), aclarando que los niveles de pH detectados rara vez presentan limitaciones severas para el cultivo de caña de azúcar. Finalmente, las capas reclasificadas de MOS y pH se integraron para crear una categorización de los suelos cañeros basada en la combinación de ambas variables, utilizando los softwares ERDAS Imagine y QGIS.

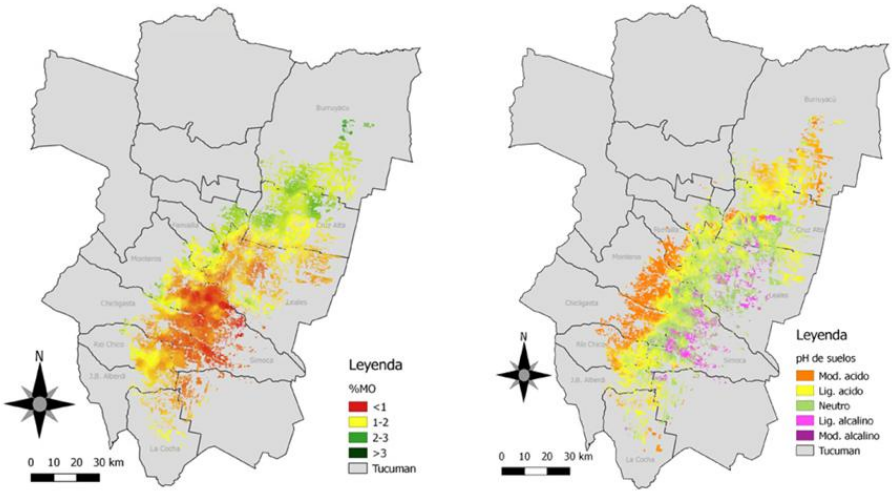


Figura 2. Izquierda: Mapa de distribución del contenido de materia orgánica oxidable % (MOS) (Walkley-Black) en el área cañera de Tucumán. Derecha: mapa de distribución del contenido de pH del suelo (0-30 cm) en el área cañera de Tucumán.

Resultados

En la Figura 3 se presenta la distribución espacial de las zonas de producción de caña de azúcar, mientras que la Figura 4 expone la categorización de los suelos cañeros según contenidos de MOS y pH.

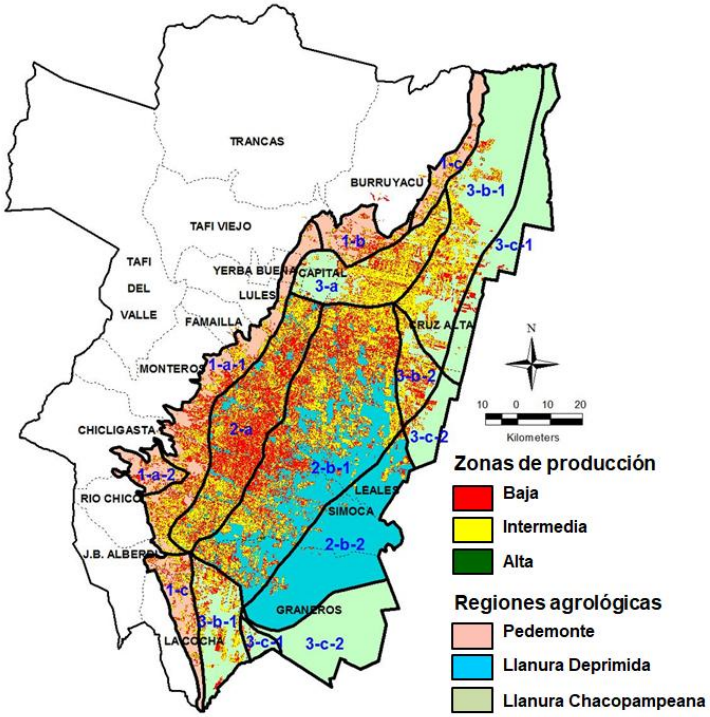


Figura 3. Distribución espacial de las zonas de producción de caña de azúcar según regiones y subregiones agrológicas en Tucumán.

El análisis de la Figura 3 revela que la mayor concentración del área cañera se encuentra en la Llanura Deprimida, específicamente en las subregiones salina seca subhúmeda (2-b-1) y no salina u occidental (2-a). Le siguen las subrregiones de la Llanura Chacopampeana seca subhúmeda no salina (3-b-1), el Pedemonte húmedo y perhúmedo de suelos automorfos (1-a-1) y la Llanura Chacopampeana subhúmeda húmeda (3-a).

En cuanto a la distribución de las zonas de producción, las regiones de la Llanura Deprimida y el Pedemonte concentran las mayores proporciones de zonas de baja

producción, mientras que la Llanura Chacopampeana presenta los mayores sectores de alta producción.

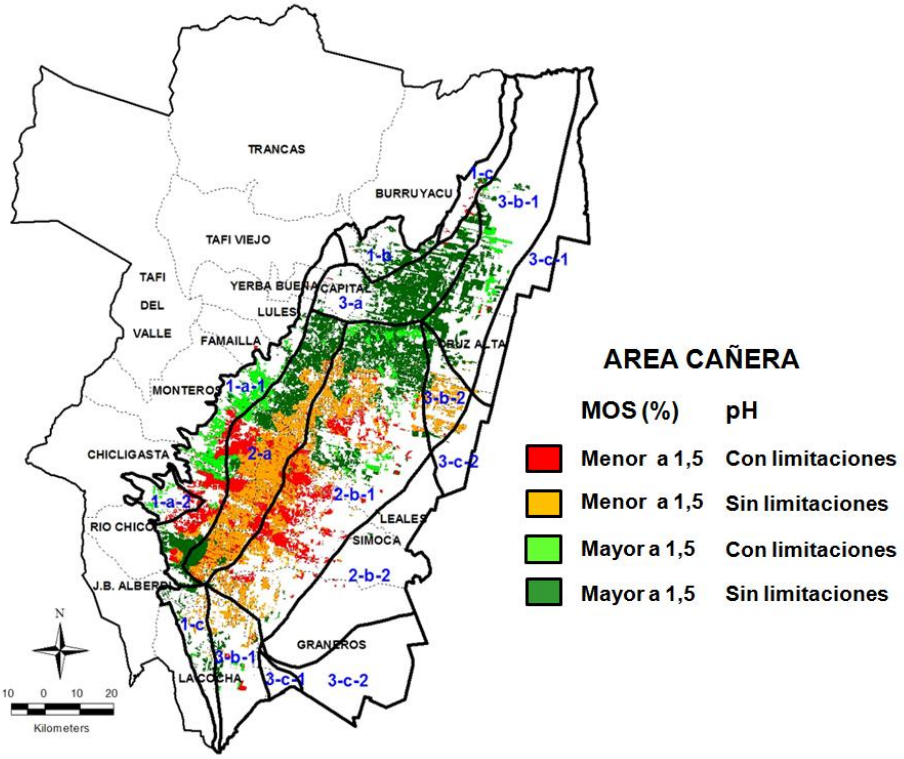


Figura 4. Integración de los mapas de MOS y pH en el área cañera de Tucumán.

Las zonas de baja producción predominan en el sector central (departamentos Simoca, Monteros y Chicligasta), coincidiendo con las subregiones 2-a y 2-b-1, y se correlacionan con contenidos de MOS menores al 1,5% (Figura 4). La baja productividad se podría atribuir al historial de más de 100 años de monocultivo y al predominio de minifundios cañeros (Santillán *et al.,* 2012). Respecto al pH, la subregión 2-b-1 (principalmente Simoca y parte de Leales) presenta limitaciones por alcalinidad, agravadas por la cercanía de la capa freática y la falta de drenaje, lo que causa excesos hídricos.

En la región pedemontana, las bajas producciones podrían asociarse a un manejo inadecuado frente a la torrencialidad de las lluvias, pendientes fuertes y suelos con baja retención de agua, lo que provoca erosión hídrica (Sanzano, 2019). En esta zona predominan suelos con pH moderadamente ácido, especialmente en la subregión 1-a-1, aunque en el sur (departamento Río Chico) hay zonas de mayor producción que coinciden con MOS mayor a 1,5% y pH sin limitaciones.

En las subregiones de la Llanura Chacopampeana, las bajas producciones podrían relacionarse con el déficit hídrico creciente hacia el este y la baja estabilidad estructural del suelo, que causa escurrimientos y erosión hídrica moderada a severa (Sanzano, 2019).

Finalmente, las zonas de mayor producción se concentran en las subregiones 3-a y 3-b-1 (Llanura Chacopampeana) y sectores norte y sur de la Llanura Deprimida, mostrando una alta coincidencia con valores de MOS y pH sin limitaciones. Cabe destacar que estas áreas coinciden mayormente con la zona de expansión de los cañaverales hacia el norte, este y sur del área cañera tradicional, con mayores probabilidades de ocurrencia de heladas y menores precipitaciones (Fandos *et al*., 2023a). También coinciden con departamentos que incluyen a productores o empresas cañeras de mayor escala económica y de base productiva diversificada (Benedetti *et al.,* 2019), con poder negociador en el mercado, situación que facilita la adopción de prácticas de manejo de cultivo que por su costo pueden resultar de difícil incorporación para explotaciones de menor escala.

Conclusiones

La región agrológica con mayor concentración de superficie cañera es la Llanura deprimida, seguida por la Llanura Chacopampeana y por último, el Pedemonte.

Si bien las zonas de producción baja se disponen en toda el área cañera, se constata un predominio en el sector central, mayormente en los departamentos Simoca, Monteros y Chicligasta, en coincidencia con las subregiones 2-a y 2-b-1, donde prevalecen zonas con valores de MOS inferiores a 1,5%. Con respecto al pH, en la subregión 2-b-1 se constata predominio de pH de tipo alcalinos.

Las zonas de baja producción en el Pedemonte están fuertemente relacionadas con suelos que presentan un pH moderadamente ácido, especialmente en la subregión 1-a-1, en el departamento de Monteros.

Con respecto a las zonas de mayor producción, prevalecen en las subregiones 3-a y 3-b-1, y sectores norte y sur de las subregiones 2-a y 2-b-1. En estas zonas los valores de MOS y pH indican alta coincidencia con zonas sin limitaciones para ambas variables.

La metodología utilizada es una herramienta útil para identificar zonas de diferente productividad y fertilidad, lo que permite seleccionar prácticas agrícolas que contribuyan a la sustentabilidad del sistema cañero y sirve de base para futuros estudios con otras variables.

Agradecimientos

Los resultados de este trabajo han sido presentados como ponencia oral en el XXXII ISSCT Congress, Cali, Colombia (23 al 28 de agosto de 2025).

Bibliografía citada

Arroyo, E; A. Sanzano; H. Rojas Quinteros y Y. Navarro Di Marco. 2022. Estado de fertilidad de los suelos cañeros de Tucumán, Argentina: materia orgánica, nitrógeno y pH del suelo. Revista Industrial y Agrícola de Tucumán 99 (1): 37-42.

Benedetti, P. E.; C. del C. Morales; R. A. Moreno. 2019. Dinámica de plantación de caña de azúcar y rotación de cultivos a partir de sensores remotos, campaña 2018-2019. [En línea] Disponible en https://inta.gob.ar/documentos/dinamica-de-plantacion-de-cana-de-azucar-y-rotacion-de-cultivos-a-partir-de-sensores-remotos-campana-2018-2019. (consultado 26 octubre 2020). Ediciones INTA. Tucumán.

Fandos, C.; J. Scandaliaris; P. Scandaliaris et al. 2021. Reporte Agroindustrial 250 EEAOC. Relevamiento satelital de cultivos de la provincia de Tucumán (consultado 30 mayo 2022). https://www.eeaoc.gob.ar/?publicacion=relevamiento-satelital-de-cultivosen-la-provincia-de-tucuman.

Fandos, C.; P. Scandaliaris; J. I. Carreras Baldrés y F. Soria. 2022a. Zonificación del área cañera tucumana según niveles de producción y relación con las regiones agrológicas y el índice de productividad de los suelos. Revista Industrial y Agrícola de Tucumán 99: 21-27.

Fandos, C.; J. Scandaliaris; P. Scandaliaris; J. I. Carreras Baldrés y F. Soria. 2022b. Área cosechable y producción de caña de azúcar y azúcar para la zafra 2022 en Tucumán. Reporte Agroindustrial 250 EEAOC. Relevamiento satelital de cultivos de la provincia de Tucumán (consultado 20 junio 2022). https://www.eeaoc.gob.ar/?publicacion=area-cosechable-y-produccion-de-cana-de-azucar-para-la-zafra-2022-en-tucuman.

Fandos, C.; F. Soria; P. Scandaliaris; J. I. Carreras Baldrés y E. R. Romero. 2023a. Comparative analysis of the production levels in the traditional and expanding sugarcane in Tucumán province, Argentina. Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists 31: 111–117.

Fandos, C.; J. Scandaliaris; P. Scandaliaris; J. I. Carreras Baldrés y F., Soria. 2023b. Área cosechable y producción de caña de azúcar y azúcar para la zafra 2023 en Tucumán. Reporte Agroindustrial 278 EEAOC. Relevamiento satelital de cultivos de la provincia de Tucumán (consultado 30 junio 2023). https://www.eeaoc.gob.ar/?publicacion=area-cosechable-y-produccion-de-cana-de-azucar-para-la-zafra-2023-en-tucuman.

Gaitán, J.; A. Wingeyer y P. L. Peri. 2023. Mapa de almacenamiento de C en los suelos de la R. Argentina (consultado 12 julio 2023). https://www.researchgate.net/publication/370124999_Mapa_de_almacenamiento_de_C_en_los_suelos_de_la_Republica_Argentina.

Santillán, J.; E. Scala; B. Nestasio; J. Valdez l' Perea y S. Bas Nahas. 2012. Plan de Desarrollo Territorial de Tucumán (consultado 10 febrero 2014). https:// www.rides.produccion tucuman.gov. ar.

Sanzano, A. 2019. Suelos productivos de Tucumán, buenas prácticas. Avance Agroindustrial 40: 30-40.

Zuccardi, R. B. y G. S. Fadda. 1985. Bosquejo Agrológico de la Provincia de Tucumán. Miscelánea 86, pp. 63. Facultad de Agronomía y Zootecnia de la UNT.

ACTIVIDAD ENZIMÁTICA TOTAL COMO INDICADOR MICROBIOLÓGICO DE UN SUELO REGADO CON VINAZA

Sotomayor, C.; Navarro Di Marco, JP; Ludueña, L.; Peña Malavera, A. y Sanzano, GA

Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres, Tucumán, Argentina. csotomayor@eeaoc.org.ar

Palabras clave: hidrólisis del diacetato de fluoresceína, riego, efluente

INTRODUCCIÓN

El suelo es un recurso vivo, dinámico y no renovable, cuya condición y funcionamiento es vital para la productividad del ecosistema y para el mantenimiento de la calidad ambiental local, regional y global, según Doran *et al*.; (1999), citado por Cerón Rincón y Melgarejo (2005). Conocer sobre la calidad y salud del suelo es fundamental para definir las prácticas de manejo que permitan conservar o mejorar la misma.

La definición más completa y mundialmente aceptada de calidad de suelo es la capacidad de un específico tipo de suelo de funcionar dentro de los límites de un ecosistema natural o manejado, de sustentar la productividad de plantas y animales, mantener o mejorar la calidad del aire y del agua, y sostener la salud humana y el hábitat (Doran & Parkin, 1994). Su análisis, a través de cambios en las propiedades edáficas es eficaz para evaluar la sustentabilidad de las prácticas de manejo del suelo destinado a producción, con el propósito de conservar o mejorar la fertilidad y la productividad del mismo.

No existe sólo una medida química, física o biológica para determinar la calidad, sino que es necesario seleccionar variables fácilmente medibles y sensibles a una situación dada. Según Etchevers *et al.;* (2008), los indicadores de calidad del suelo deben cumplir con las siguientes funciones: deben ser propiedades que integren características y procesos de índole física, química o biológica que ocurren en el suelo y cuyo cambio sea lo suficientemente sensible y rápido para poder ser medido cuantitativamente por métodos sencillos, o aun apreciados de manera cualitativa, y en el corto plazo. Tienen que ser reproducibles en el tiempo.

Los indicadores físicos son aquellos que reflejan la manera en que el suelo acepta, retiene y transmite agua a las plantas, así como las limitaciones para el crecimiento de las raíces y la emergencia de las plántulas. La densidad aparente, estabilidad de agregados, infiltración y conductividad hidráulica saturada son algunas de ellas (Bautista Cruz *et al.,* 2004). Para Rayo Estrada-Herrera *et al.,* (2017), entre los indicadores químicos más usados están el pH, la conductividad eléctrica, el carbono orgánico total y lábil, la capacidad de intercambio catiónico y el nitrógeno total, entre otros.

Actualmente el principal desafío es determinar cuáles son los indicadores microbiológicos posibles de ser empleados e interpretar dado que no existen valores de referencia de los mismos, a diferencia de los anteriores, para los cuales sí los hay. Considerando la capacidad de resiliencia del ecosistema, puede pensarse que cualquier cambio medioambiental podría ser detectado en su inicio por su componente biológico por ej.; enzimas. De ahí que la presencia o deficiencia de enzimas del suelo puedan ser consideradas como un bioindicador sensible.

Las enzimas son biocatalizadores de naturaleza proteica de alto grado de especialización, que en su gran mayoría necesitan de cofactores para llevar a cabo su rol catalítico. Al igual que en los otros sistemas vivos, la velocidad de la reacción catalizada por una enzima es dependiente del pH, la temperatura (T°), la concentración y la presencia de inhibidores (Ulloa Larrea, 2014). Cada enzima tiene un rango de óptimo de pH y T° para actuar, cuando varía alguno de estos, la conformación de la enzima se altera haciendo más lenta su actividad y valores extremos pueden causar la desnaturalización de las mismas.

Por lo expuesto, podría considerarse a uno de los parámetros bioquímicos, que permite evaluar la actividad microbiológica total del suelo (Lillo *et al.,* 2011), a la hidrólisis del diacetato de fluoresceína (FDA). Esta una reacción que involucra a diversos grupos de enzimas, tales

como proteasas, lipasas, esterasas, constituyendo un indicador sensible de la actividad microbiana total de la hojarasca y el suelo (Adam y Duncan, 2001).
En la provincia de Tucumán, la caña de azúcar es uno de los cultivos de mayor relevancia, estimando una superficie neta cosechable total de 298.930 ha (zafra 2025), considerando solo Tucumán (Fandos *et al.,* 2025). Según el Instituto de promoción del azúcar y alcohol de Tucumán (IPAAT 2026) el total de caña molida bruta al finalizar la zafra fue de 17.670.600 tn y el de alcohol total producido al 9 de enero de 2026 de 351.377.322 l.
La generación de biocombustibles, es un agregado de valor a la cadena de transformación de la caña. Los principales desafíos están vinculados a las altas inversiones necesarias para el incremento de la capacidad de procesamiento instalada y, especialmente, a una buena gestión de los materiales derivados de la producción como la vinaza (Perez *et al*., 2011).
La vinaza, se caracteriza por una elevada carga orgánica, pH ácido y elevado tenor salino (sales de potasio principalmente). La relación promedio de producción alcohol: vinaza es 1:12 cuando proviene de melaza, principal materia prima empleada en la provincia de Tucumán (Sotomayor *et al.,* 2018). La vinaza admite diferentes alternativas de manejo, entre las cuales la más difundida e incorporada por la industria local es la de su aplicación en suelos cultivados con caña de azúcar (Sotomayor, 2022).
Por la importancia que implica el riego con vinaza en los suelos de nuestra provincia, tanto los trabajos de investigación como los de monitoreo establecidos por la Sub Secretaria de Estado y Medio Ambiente de Tucumán (SEMA), han hecho hincapié en la evaluación de indicadores de calidad físicos y químicos y no se ha profundizado sobre los microbiológicos.
Existen trabajos, como el de Serri *et al.,* (2015) que han demostrado en propiedades microbiológicas, tales como carbono de biomasa microbiana respiración microbiana, hidrólisis del diacetato de fluoresceína, actividad deshidrogenasa y proteínas de suelo relacionadas con glomalinas, el efecto de la aplicación de vinaza cruda en suelos cañeros de la provincia de Tucumán, habiendo provocado incrementos significativos en las mismas.
Teniendo en cuenta la escasa información a nivel local, el objetivo de este trabajo fue medir y evaluar la actividad enzimática total (FDA), como indicador microbiológico en un Hapludol tapto árgico regado con diferentes niveles de vinaza durante tres años y así también el efecto sobre la reacción química (pH), salinidad (CE), potasio intercambiable (K^+) y carbono orgánico total (COT) indicadores químicos de calidad del suelo considerados de relevancia por el efecto que la misma podría causar en el suelo en estudio.

MATERIALES Y MÉTODOS

El ensayo se llevó a cabo en un suelo clasificado como Hapludol tapto árgico, cultivado con caña de azúcar, ubicado en la localidad de Delfín Gallo, dpto. Cruz Alta, provincia de Tucumán, República Argentina. Se trabajó en un diseño en bloques completamente aleatorizados con ocho tratamientos resultantes de un bifactorial dado por distintos niveles de vinaza y profundidades, con tres repeticiones de cada uno de ellos. Se evaluaron los siguientes niveles para el factor vinaza: **V0** (testigo sin aplicación de vinaza), **V100** (aplicación equivalente a 100 m^3 ha^{-1} $año^{-1}$), **V150** (aplicación equivalente a 150 m^3 ha^{-1} $año^{-1}$ y **V300** (aplicación equivalente a 300 m^3 ha^{-1} $año^{-1}$). Las aplicaciones se realizaron en caña planta, mediante riegos por surco con vinaza cruda, proveniente de la fermentación de la melaza, durante tres años consecutivos. Una vez culminada la etapa de riego se extrajeron muestras compuestas de suelo en cada parcela experimental a las profundidades de 0-5 cm y 5-15 cm (factor profundidad).
Se analizaron en la vinaza empleada en los riegos, la reacción química (pH), la conductividad eléctrica (CE), la materia orgánica total (MOT), el nitrógeno total (Nt), el fósforo total (Pt) y el potasio total (Kt). También aquellos indicadores de calidad de suelos químicos, los cuales son sensibles al uso de la vinaza, tales como la CE, el pH, el potasio intercambiable (K^+) y el COT.
Para la determinación de la actividad enzimática total, indicador microbiológico seleccionado, se utilizó la técnica de la hidrólisis del diacetato de fluoresceína (FDA), Adam y Duncan (2001). Esta técnica permite cuantificar la actividad de enzimas microbianas tales como proteasas, lipasas y estereasas no específicas asociadas a los procesos bioquímicos de suelo. El

producto liberado en esta reacción enzimática es la fluoresceína la cual puede cuantificarse midiendo absorbancia a 490 nm (A490) en un espectrofotómetro.

Los datos fueron analizados empleando modelos lineales mixtos con el software estadístico InfoStat y su interfaz con R (Di Rienzo *et al.* 2022).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Vinaza

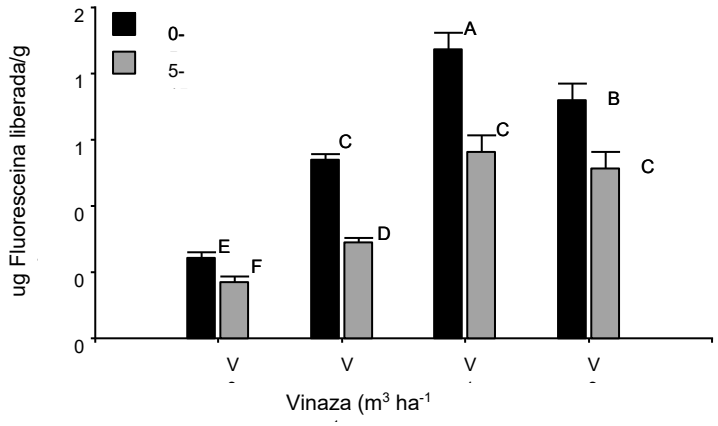
Los resultados del análisis de la vinaza empleada en esta experiencia señalan lo que ya diversos autores como Morandini y Quaia (2013) destacan, una reacción química muy fuertemente ácida, un elevado contenido de sales, de materia orgánica y también de potasio "tabla 1".

Tabla 1. Caracterización química promedio de la vinaza empleada.

Muestra	pH	CE (dS/m)	MOT (%)	Nt (%)	Pt (%)	Kt (%)
Vinaza	4,8	18,1	39,2	0,4	0,2	0,7

Indicador microbiológico: Actividad enzimática total

Se observó que para ambos niveles de profundidad la actividad enzimática fue mayor en todos aquellos tratamientos que recibieron vinaza con respecto al testigo sin aplicar. Quedando demostrado que existe interacción significativa (p=0,0207) entre los dos factores evaluados (vinaza × profundidad), concentrándose la mayor actividad enzimática en los primeros 5 cm de suelo. El tratamiento V150×0-5 tuvo el mayor nivel de FDA, siendo estadísticamente diferente a todos los otros tratamientos, seguido por V300×0-5cm y V100x0-5cm. Los tratamientos V150×5-15cm, V300×5-15cm fueron estadísticamente iguales con valores cercanos a 1 ug fluoresceína liberada/g suelo, seguido por **V100×5–15 cm** y presentando la menor actividad enzimática en ese estrato el testigo sin aplicar.



FDA

Figura 1. Respuesta de la FDA a las distintas dosis de vinaza (m^3 ha^{-1} $año^{-1}$) y a las profundidades 0-5 cm y 5-15 cm. Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05).

Indicadores químicos: pH, CE, K^+ y COT

El pH reveló incrementos significativos en los tratamientos V150 × 0-5 cm y V300 × 0-5 cm con respecto a V0 × 0-5 cm. Este incremento provocó un cambio en la categoría inicial de pH, pasando de moderadamente ácido a neutro. En la profundidad de 5-15 cm todos los niveles

de vinaza aplicada mostraron diferencias significativas con respecto a V0, provovando un cambio en su categoría similar que en los primeros 5 cm.
Para García y Rojas (2006), citado por Sotomayor *et al.,* (2018) el efecto de la vinaza sobre el aumento del pH de suelo, a pesar de su acidez elevada, pudo deberse a la disolución de las diferentes formas de carbonatos, fosfatos de calcio y otros compuestos, provocando su incremento y también una mayor disponibilidad de nutrientes, acompañada de un mejor balance entre ellos.
En la CE las diferencias fueron significativas en los tratamientos V150 × 0-5 cm y V300 × 0-5 cm, con respecto a V0 × 0-5 cm, no evidenciándose diferencias entre este último y V100 × 0-5 cm. En la profundidad de 5-15 cm sólo se diferenció estadísticamente el V300. Si bien los incrementos en el contenido de sales fueron significativos luego de tres años de aplicación, los valores alcanzados no llegaron al valor considerado crítico para el normal crecimiento y desarrollo del cultivo de caña de azúcar (1,7 dS/m), Sanzano y Fadda (2009).
En suelos Acrisoles y Fluvisoles de la zona cañera de Córdoba (Veracruz México), la aplicación de vinaza cruda en macetas aumentó más de cinco veces el valor de la CE, valor que disminuyó con el paso del tiempo pero que queda por arriba del valor inicial una vez finalizada la experiencia Bautista-Zuñiga *et al*., (2000), por lo cual el autor consideró la aplicación de vinaza cruda como de alto riesgo de salinización. Sotomayor *et al.,* (2018) trabajó en columnas de un suelo clasificado como Haplustol fluvacuentico encontrando incrementos significativos en la CE y el K^+ con dosis crecientes de vinaza cruda en los primeros 10 cm de profundidad.
El K^+ mostró incrementos significativos en los tratamientos V150 × 0-5 cm y V300 × 0-5 cm con respecto a V0 × 0-5 cm. En la profundidad de 5-15 cm todos los niveles de vinaza aplicada mostraron diferencias significativas con respecto a V0, concentrándose los mayores valores en V300. Sotomayor *et al.,* (2018) afirman que en un suelo Haplustol fluvacuéntico de Tucumán, la CE y el K^+ aumentaron en todo el perfil del suelo analizado a medida que las dosis de vinaza empleadas fueron mayores, y que las diferencias establecidas entre los tratamientos que recibieron vinaza y el testigo fueron significativas, presentando la mayor concentración en los 10 cm superficiales.
Con respecto al COT, si bien los valores más elevados se encontraron en la profundidad de 0–5 cm, no se evidenciaron diferencias significativas entre los distintos niveles de vinaza aplicada. Así mismo tanto V150 como V300 no mostraron cada uno de ellos diferencias entre ambas profundidades analizadas.
Los resultados anteriormente descriptos de cada una de las variables químicas, para las profundidades de 0-5 y 5-15 cm y los distintos niveles de vinaza aplicada se observan en la "Tabla 2".

Tabla 2. Indicadores de calidad. Las comparaciones se hicieron dentro de cada variable (fila). Letras mayúsculas indican profundidad de 0-5 cm y letras minúsculas de 5-15 cm. Medias con una letra común no son significativamente diferentes (p > 0,05).

Indicadores Químicos	V0		V100		V150		V300	
	0-5	5-15	0-5	5-15	0-5	5-15	0-5	5-15
pH	6,0A	6,2a	6,0A	6,5b	6,6B	6,6b	6,9C	7,0c
CE (dS/m)	1,0A	0,9a	1,0A	1,1ab	1,2B	1,2ab	1,5C	1,4b
K^+ (Cmolc/kg)	2,2A	2,0a	2,2A	3,0b	3,0B	2,9b	3,5C	3,8c
COT (%)	2,1A	1,3d	2,0A	1,5cd	2,2A	2,2a	2,0AB	1,7bc

CONCLUSIONES
La actividad enzimática total (FDA) del suelo resultó ser un indicador sensible a los cambios en la funcionalidad del suelo en estudio con el uso de vinaza. Las diferencias fueron estadísticamente significativas entre los diferentes niveles de vinaza aplicado y en las distintas profundidades evaluadas, obteniéndose una mayor FDA. Los resultados obtenidos en la actividad enzimática total, en esta experiencia, marcan un precedente que permite abrir

nuevos caminos a tener en cuenta en lo referido al manejo de la vinaza en la provincia de Tucumán contando con ya con resultados locales.
Luego de tres años consecutivos de aplicaciones de distintos niveles de vinaza, los valores de los indicadores químicos, CE, K+ y el pH, incrementaron significativamente. Las variaciones significativas en los contenidos de sales en la solución del suelo, el pH y el K^+ coinciden con lo investigado hasta el momento por diversos autores locales e internacionales, lo cual permite concluir que son indicadores altamente sensibles y de utilidad al momento de definir sobre el manejo de la vinaza en los distintos tipos de suelos.

Se requiere el monitoreo frecuente de los indicadores seleccionados en esta experiencia, los cuales son de suma importancia para detectar algún tipo de cambio en la funcionalidad del suelo y de esta manera poder revertir el mismo o bien para prevenir situaciones que pudieran ser adversas.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

Adam G, Duncan H. 2001. Development of a sensitive and rapid method for the measurement of total microbial activity using fluorescein diacetate (FDA) in a range of soils. Soil Biology and Biochemistry 33: 943-951.

Bautista Cruz A, Etchevers Barra J, del Castillo R, Gutiérrez C. 2004. La calidad del suelo y sus indicadores. Ecosistemas 13: 572.

Bautista Zuñiga F, Durán de Bazúa C, Lozano R. 2000. Cambios químicos en el suelo por aplicación de materia orgánica soluble tipo vinazas. Revista Internacional de Contaminación Ambiental 16: 89-10.

Di Rienzo JA, Casanoves F, Balzarini MG, Gonzalez L, Tablada M, Robledo CM. 2022. InfoStat versión 2022. Centro de transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

Doran JW, Parkin TB. 1994. Defining and assessing soil quality. In: Defining and Assessing Soil Quality for Sustainable Environment. Doran JW, Coleman DC, Bezdicek DC, Stewart BA (eds). Soil Science Society of America, Special Publicaction 35: 3-21.

Etchevers JD, Hidalgo C, Pajares S, et al. 2008. Calidad o salud del suelo: Conceptos, indicadores y aplicación en agricultura. En Desarrollo de indicadores ambientales y de sustentabilidad en México, primera edición: 107-121.

Fandos C, Scandaliaris J, Scandaliaris P, Carreras Baldrés JI, Soria FJ. 2024. Estimación del área cosechable y de la producción de caña de azúcar para la zafra 2025 en Tucumán. Reporte Agroindustrial EEAOC, Relevamiento satelital de cultivos en la provincia de Tucumán Nº 344.

Instituto de Promoción del Azúcar y Alcohol de Tucumán. 2024. Ministerio de Economía y Producción, Secretaría de Estado de Producción, Gobierno de Tucumán. Zafra 2026: Reporte final de producción. https://www.ipaat.gov.ar/ (En línea, 09 de enero 2026).

Lillo A, Ramírez H, Reyes F, Ojeda N, Alvear M. 2011. Actividad biológica del suelo de bosque templado en un transecto altitudinal, Parque Nacional Conguillío (38ºS), Chile. Bosque 32: 46-56.

Morandini M, Quaia E. 2013. Alternativas para el aprovechamiento de la vinaza como subproducto de la actividad sucroalcoholera. Revista Avance 34(2): 1-12.

Perez D, Paredes V, Rodriguez G. 2011. Biocombustibles en la Argentina y Tucumán, cifras de la industria en el período 2009-2011. Reporte Agroindustria EEAOC, Estadísticas y márgenes de cultivos tucumanos Nº 52.

Rayo Estrada-Herrera I, Hidalgo-Moreno C, Guzmán-Plazola R, Almaraz Suárez JJ, Navarro-Garza H, Etchevers-Barra JD. 2017. Indicadores de calidad de suelo para evaluar su fertilidad. Agrociencia 51: 813-831.

Sanzano GA, Fadda GS. 2009. Características de los suelos para caña de azúcar. Recomendaciones de manejo. In: Manual del cañero capítulo 2: 23-32.

Serri D, Chavarría D, Portocarrero R, Vallejo J, Galván S, Vargas Gil S. 2015. Efectos de la aplicación de vinaza sobre funciones biológicas del suelo en el cultivo de caña de azúcar. Cuarto Congreso Nacional de Ecología y Biología de Suelos, p. 67.

Sotomayor C, Morandini M, Sanzano GA, Rojas Quinteros HC. 2018. Efecto de la aplicación de vinaza en propiedades químicas y físicas del suelo. Revista industrial y agrícola de Tucumán 95(1): 27-33.

Sotomayor C. 2022. Manejo de la vinaza en la industria sucroalcoholera. Revista Avance Agroindustrial 43(1): 42-47.

Ulloa Larea GA. 2014. Hidrólisis de fluoresceína diacetato y actividad de las enzimas proteasa, celulasa, nitrato reductasa y ureasa del suelo en bosque prístino, sur de chile. http://cybertesis.uach.cl/tesis/uach/2014/fcu.42h/doc/fcu.42h.pdf (accessed 17 March 2025).

PREPARACIÓN TRADICIONAL DE SUELO VS CANTERIZADOR EN LA PLANTACIÓN MECANICA DE CAÑA DE AZÚCAR

Giardina J. A; Duarte D. N.; Brito E.; Fajre S.; Medina M. M. y Perez Alabarce F.

Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres, Av. W. Cross 3150, Las Talitas, Tucumán, Argentina (4101); jgiardina@eeaoc.org.ar

Palabras claves: Plantación mecánica, canterizador, rastra, subsolador.

La preparación del suelo constituye una etapa crítica en la implantación del cultivo de caña de azúcar, ya que determina en gran medida el éxito del establecimiento del cañaveral y la expresión del potencial productivo del cultivo. En sistemas de plantación mecánica, esta etapa adquiere aún mayor relevancia en comparación con la plantación manual, debido a que el material de plantación suele presentar estacas de menor longitud, mayor número de cortes por tallo y una mayor susceptibilidad a la deshidratación, factores que pueden comprometer la brotación y el macollaje inicial si las condiciones del suelo no son adecuadas (Ripoli & Ripoli, 2009; Casante de Lima 2016).
Asimismo, la plantación mecánica es particularmente sensible a deficiencias de humedad y a la presencia de cámaras de aire en el surco, las cuales pueden limitar el contacto suelo–estaca y reducir la emergencia de brotes. En este contexto, una correcta preparación del suelo resulta clave para asegurar una adecuada aireación, una estructura favorable y una correcta conformación del surco de plantación (Orlando Filho et al., 1998; Garside & Bell, 2009).
La preparación tradicional del suelo para caña de azúcar generalmente incluye una o dos pasadas de rastra para el decepado, seguidas de un cincelado para realizar una labranza vertical; en presencia de capas compactadas, se incorpora el uso de subsolador, finalizando con una nueva pasada de rastra para la nivelación superficial. En contraste, el canterizador realiza una preparación del suelo en franjas, bajo un esquema de laboreo reducido o tráfico controlado, conformando canteros específicos donde se disponen los surcos de caña, con el objetivo de mejorar las condiciones físicas del suelo en la zona de implantación y reducir los costos operativos.
El presente trabajo tuvo como objetivo evaluar el comportamiento agronómico y el rendimiento cultural estimado (t/ha) de la caña de azúcar bajo distintos sistemas de preparación de suelo para plantación mecánica.

Material y Métodos

El ensayo se realizó en la localidad de Árbol Solo, departamento Cruz Alta, durante la campaña 2022–2023. Se evaluaron tres sistemas de preparación de suelo para plantación mecánica de caña de azúcar:

1. Sistema de preparación tradicional: empleando rastra y equipo subsolador;
2. Sistema de preparación en franjas: empleando un equipo canterizador; y
3. Sistema de preparación intermedia: combina el uso de un equipo canterizador con el pasaje de un equipo abonador que realiza una labranza vertical (tipo Indujor) en la trocha.

Cada unidad experimental estuvo conformada por seis surcos de 50 m de longitud. La variedad utilizada fue LCP 85-384, con una densidad de plantación de 28 yemas viables/metro. Realizándose la plantación el 13 de julio. El diseño experimental fue completamente aleatorizado, con tres repeticiones por tratamiento. Los análisis estadísticos se realizaron en el entorno R (versión 4.5.1) utilizando la interfaz RStudio. Para la manipulación de datos y la generación de gráficos se empleó el paquete ggplot2. Antes de proceder con el análisis, se evaluó el cumplimiento de los supuestos: la normalidad de los residuos se verificó mediante la prueba de Shapiro-Wilk y la homogeneidad de las varianzas

mediante la prueba de Levene (paquete car). Al cumplirse los supuestos, se aplicó un ANOVA de una vía. En los casos donde se encontraron diferencias significativas ($p < 0.05$), se realizaron comparaciones múltiples *post-hoc* utilizando la prueba de Tukey (HSD). En cada parcela se estableció una estación de muestreo constituida por dos surcos de 10 m de longitud.

Las variables evaluadas incluyeron población de tallos por metro, altura de tallos y rendimiento cultural de caña planta, expresado en t/ha.

Resultados

La Figura 1 presenta la **dinámica de población de tallos (N.º de tallos/metro),** comparando las tres alternativas de **preparación de suelo** en distintos **DDP (días después de plantación).**

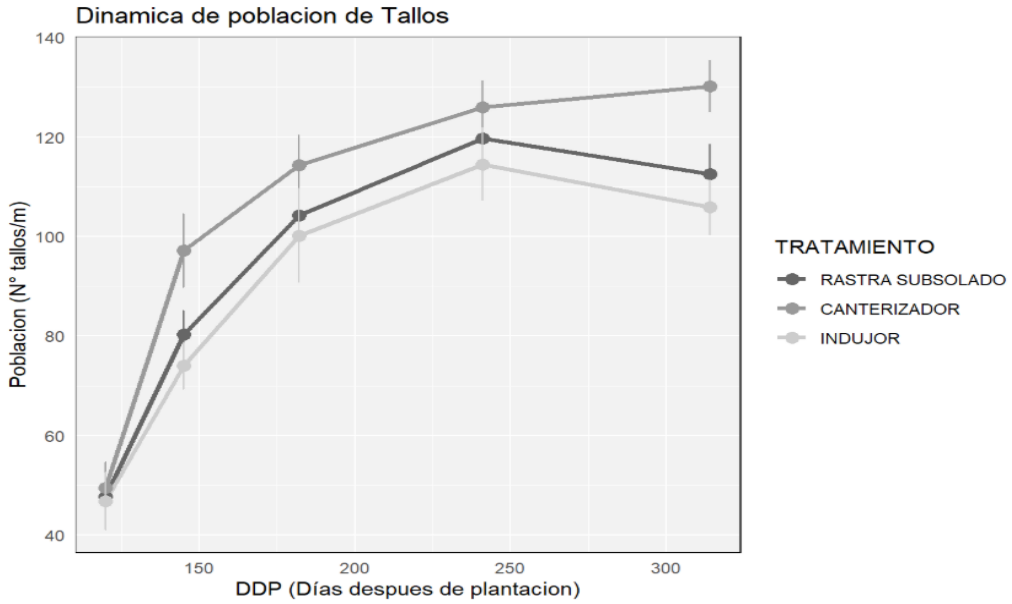


Figura 1: Dinámica de población de tallos según las distintas preparaciones de suelo evaluadas.

En las primeras evaluaciones se observa un incremento rápido de la población de tallos en todos los tratamientos, reflejando un adecuado proceso de brotación. Sin embargo, el tratamiento **canterizado** muestra desde etapas tempranas una **mayor densidad de tallos.** El **canterizado** mantiene una ventaja clara y sostenida en población de tallos, alcanzando los valores más altos del ensayo. La población final de tallos fue de 26 tallos/metro en el canterizador; 22,53 tallos/metro en el sistema rastra –subsolado y 21,2 tallos/metro en el sistema indujor, sin encontrarse diferencias estadísticamente significativas entre los sistemas evaluados.

El tratamiento del sistema rastra-subsolador presenta un comportamiento intermedio, con una evolución favorable, pero sin igualar los niveles de canterizado.

El Sistema de preparación con **indujor** muestra sistemáticamente las menores densidades, lo que indicaría una menor eficiencia debido a la pérdida de humedad del suelo.

La figura 2 evidencia un **efecto significativo de la preparación del suelo sobre la altura de los tallos.**

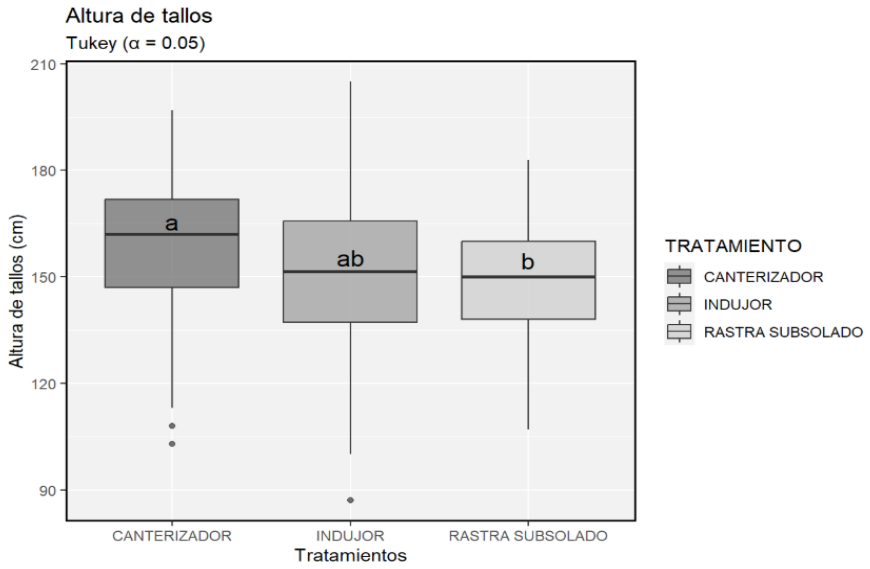


Figura 2. Altura de los tratamientos evaluados según la preparación de suelo evaluadas.

El sistema de **canterizador** presentó la **mayor altura media,** diferenciándose estadísticamente de **rastra subsolador**, lo que indica mejores condiciones para el crecimiento vegetativo. El **indujor** mostró un comportamiento **intermedio,** sin diferencias significativas respecto de los otros dos tratamientos. En contraste, **rastra subsolador** registró las **menores alturas**, reflejando una menor respuesta del cultivo. En conjunto, los resultados destacan al **canterizado** como el sistema más favorable para maximizar la altura de tallos en plantación mecánica. La menor altura registrada bajo rastra–subsolador sugiere que, si bien la descompactación profunda mejora ciertas propiedades del perfil del suelo, la falta de una adecuada conformación superficial puede limitar el crecimiento aéreo del cultivo, tal como lo señalan Orlando Filho et al. (1998) y Ripoli & Ripoli (2009).

La figura 3 muestra diferencias claras en el rendimiento cultural de caña planta (t/ha) según el sistema de preparación de suelo en plantación mecánica.

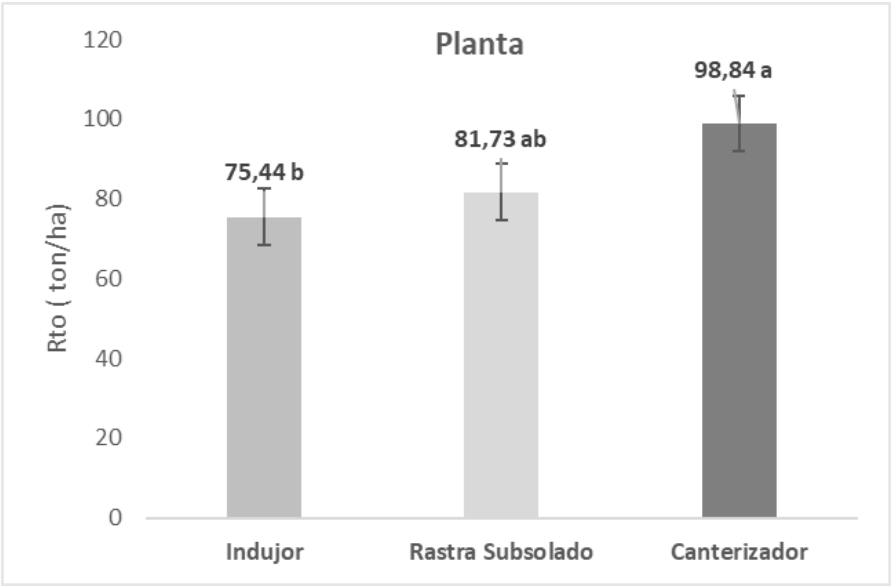


Figura 3: Rendimiento cultural t/ha de los distintos tipos de prepararación de suelo en plantación mecánica de caña de azúcar.

El sistema de preparación (canterizador), alcanzó el mayor rendimiento promedio (98,84 t/ha), superando en 31,0 % al tratamiento indujor (75,44 t/ha) y en 21,0 % al tratamiento rastra subsolado (81,73 t/ha). Estas diferencias, además de ser agronómicamente relevantes, resultaron estadísticamente significativas respecto del indujor.

El tratamiento rastra presentó un rendimiento intermedio, con un incremento del 8,3 % respecto al indujor, aunque sin diferencias estadísticas significativas, lo que indica una mejora parcial en la respuesta del cultivo.

En conjunto, los resultados confirman que el canterizado en este sistema evaluado de preparación de suelo fue más eficiente, permitiendo incrementos superiores al 20–30 % en el rendimiento de caña planta frente a las otras alternativas lo que refuerza su conveniencia para maximizar la productividad en sistemas de plantación mecánica de caña de azúcar. En conjunto, los resultados confirman que el canterizador permite expresar de manera más eficiente el potencial productivo del cultivo, coincidiendo con antecedentes que destacan la importancia del manejo localizado del suelo en sistemas de plantación mecánica (Souza et al., 2015; Casante de Lima 2016).

Conclusión

La preparación del suelo mediante el uso del canterizador se destaca como una herramienta eficaz para la plantación mecánica de caña de azúcar, al combinar una preparación localizada del terreno con un uso más eficiente del tiempo y del combustible. Este sistema mejoró de manera consistente la población y altura de tallos, así como el rendimiento de caña planta, posicionándose como una alternativa técnica y económicamente conveniente frente a los sistemas tradicionales de preparación del suelo. Es necesario realizar más estudios para confirmar esta tendencia dentro de las distintas regiones agroecológicas de nuestra provincia.

Bibliografía

Orlando Filho, J., Rossetto, R., & Casagrande, J. C. (1998). Manejo do solo e da adubação na cultura da cana-de-açúcar. *STAB – Açúcar, Álcool e Subprodutos*, 16(6), 22–28.

Garside, A. L., & Bell, M. J. (2009). Growth and yield responses to soil physical conditions in sugarcane. *Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists*, 31, 1–10.

Ripoli, T. C. C., & Ripoli, M. L. C. (2009). *Plantio mecanizado de cana-de-açúcar*. Editora USP, Brasil.

Souza, Z. M., Marques Júnior, J., & Pereira, G. T. (2015). Soil management systems and sugarcane root development. *Soil & Tillage Research*, 146, 97–106.

Camila Cassante de Lima. Canterizacao con preparo convencional e profundo do solo para cana de acucar: Atributos físicos e sistema radicular. Campina, SP 2016. 150 pag.

COMUNICACIÓN TÉCNICA

LEDESMA INCORPORA UNA NUEVA TECNOLOGÍA PARA LA PRODUCCIÓN DE PLANTINES DE CAÑA DE AZÚCAR: TECNOLOGÍA PERRFECTA®

Funes C.; Easdale C. I. y Gómez J.
Salta s/n, Libertador General San Martín - Jujuy - Argentina.
clfunes@ledesma.com.ar
Ledesma S.A.A.I.

Introducción

La implantación de la caña de azúcar constituye una de las etapas de mayor costo e impacto sobre la productividad y la vida útil de los cañaverales. Tradicionalmente, la plantación comercial se realiza mediante el uso de trozos de tallos ("caña semilla"), lo que implica elevados requerimientos de material vegetal y un riesgo potencial de transmisión de enfermedades sistémicas cuando no se dispone de semilla de adecuada calidad sanitaria.
En este contexto, la producción de caña semilla de alta calidad resulta un componente clave dentro del manejo del cultivo. La conformación de semilleros saneados permite mejorar la implantación, uniformidad y sanidad de los cañaverales comerciales, contribuyendo a una mayor estabilidad productiva.
En los últimos años, el uso de plantas micropropagadas se ha consolidado como una herramienta eficaz para la obtención de semilla inicial de alta sanidad. A partir de esta base, se han desarrollado nuevas tecnologías orientadas a incrementar la eficiencia en la multiplicación de material vegetal, reduciendo costos y tiempos de producción.
Recientemente nuevas tecnologías se incorporaron al sector cañero para generar caña semilla de calidad. Es así, que la empresa Perrfecta, enfocada en la innovación tecnológica para el sector sucroalcolero de Brasil, ha desarrollado y patentado la producción de plantines de caña de azúcar a partir de brotes cortados de plantas donantes micropropagadas. Esta tecnología se encuentra disponible en el mercado desde el 2017 y en el 2023 el grupo Ledesma adquirió la licencia para la conformación de sus semilleros saneados, a partir de este tipo de plántulas.

El presente trabajo tiene como objetivo describir la implementación de esta tecnología en la empresa, detallando las etapas del proceso y los resultados obtenidos durante el primer período de producción.

Etapas del proyecto:

A. Vivero: la metodología consiste en cultivar plantas madre productoras de brotes, los cuales son cosechados con frecuencia; plantados en bandejas con sustrato adecuado y colocados para su enraizamiento en un invernadero con condiciones ambientales controladas. Posteriormente, una vez enraizados, son trasladados al patio de rusticación para completar su desarrollo hasta ser plantados en el campo (lotes semilleros).
Está constituido por tres etapas principales:

- **Patio de producción** (macetones): es el lugar en donde se crían las plantas madre donadoras de brotes. Las mismas provienen de la Chacra Experimental Santa Rosa y son de origen micropropagado. Son plantadas en macetones con un sustrato inerte (arena), regadas y fertilizadas con un sistema presurizado (goteo). Son sometidas a podas formativas para lograr la estructura óptima a partir de la cual se cosecharán los brotes, que serán los futuros plantines (duración entre 45 – 60 días hasta comenzar la colecta). En la **figura 1** se detallan los macetones con las plantas madre donantes de brotes.



Figura 1. Detalle de los macetones con las plantas madre donantes de brotes.

- **Casa de enraizamiento** (Invernadero): constituye la etapa en la que los brotes cortados (cosechados) de las plantas madre son colocados en condiciones ambientales óptimas para su enraizamiento dentro de un invernadero. Esta etapa tiene una duración aproximada de entre 12 -15 días, dependiendo de la variedad y épocas del año. En la **figura 2** se observan los detalles del proceso de plantación de los brotes cosechados y dispuestos en el invernadero para su enraizamiento.

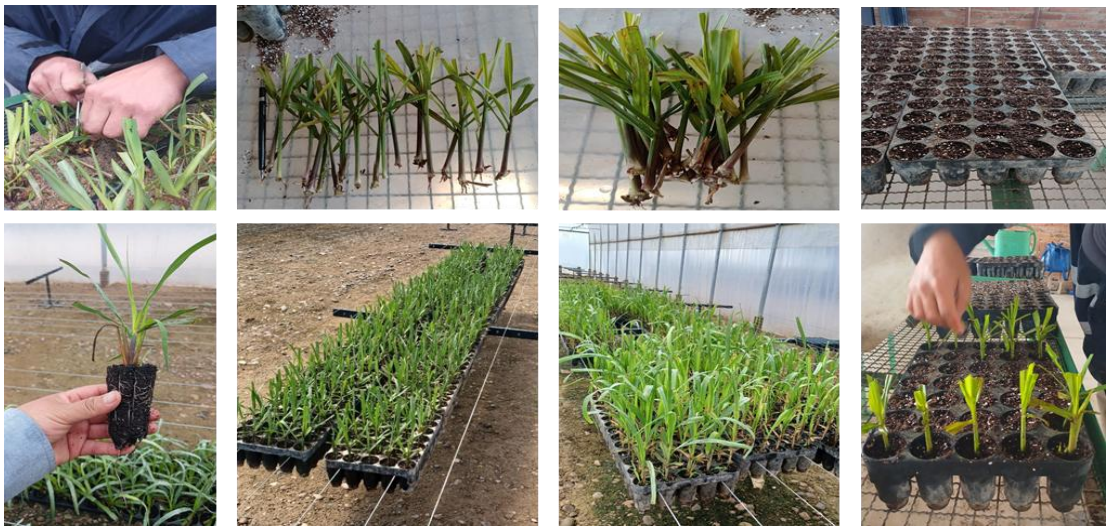


Figura 2. Detalles del proceso de plantación de los brotes cosechados, colocados en bandejas y dispuestos en el invernadero para su enraizamiento.

- **Patio de crecimiento** (Rusticación): es la última etapa en la cual los brotes ya enraizados, se retiran del invernadero y son colocados en el exterior con condiciones ambientales de campo. El período de permanencia puede ser variable entre 30 a 60 días, dependiendo del requerimiento en campo para su plantación. En la **figura 3** se observa la disposición de los plantines en el patio de rusticación y la terminación final de los mismos, listos para su plantación en campo.

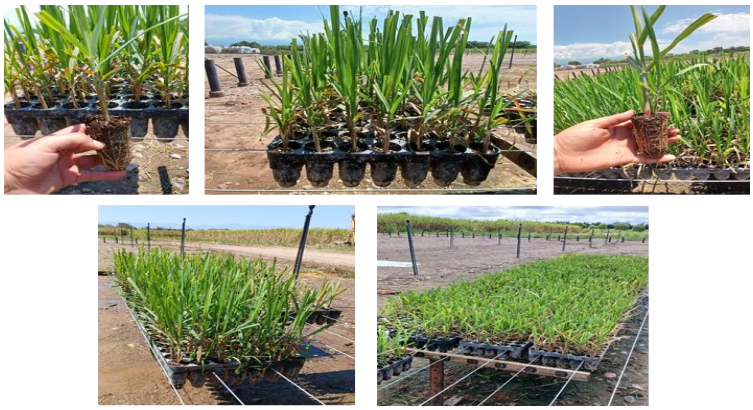


Figura 3. Detalles de la disposición de los plantines en el patio de rusticación y listos para su plantación en campo.

B. Semilleros:
En Ledesma existen tres tipos de semilleros: Básico, Núcleos de Fincas y Comerciales. Los mismos tienen como objetivo incrementar progresivamente la producción de caña semilla de calidad hasta alcanzar las cantidades necesarias, para satisfacer los requerimientos de las plantaciones comerciales.
El semillero Básico de Ledesma constituye la primera multiplicación a campo de caña semilla de calidad. Actualmente se planta con caña tratada con agua caliente (hidrotermoterapia). Se encuentra ubicado en el Campo Experimental de Prediliana, perteneciente al Departamento de Investigación y Calidad de Ledesma, y el manejo es en su totalidad por personal de esta área. A partir de este semillero se plantan los semilleros Núcleos de Fincas.
Los semilleros Núcleos de Fincas, representan la segunda etapa en la multiplicación a campo de la semilla. Éstos, se encuentran en Fincas y son manejos por las mismas.
Los plantines generados en este proyecto son destinados para conformar inicialmente los semilleros Básico y Núcleos de Fincas.

Características de la implementación del Proyecto en Ledesma

El vivero comenzó a producir gradualmente plantines desde diciembre de 2024. Hasta la primera quincena de enero de 2026 se produjeron un total de 302680 plantines.
En cuanto a la parte edilicia, se construyeron y plantaron 10 macetones (76% del programa), en donde se encuentran plantadas 21651 plantas madre (correspondientes a 10 variedades comerciales). Los macetones fueron diseñados siguiendo criterios técnicos para que las plantas puedan soportar las necesidades de drenaje y aireación adecuada ya que se encuentran en arena. Se construyeron con material reciclado de la industria papelera contemplando las necesidades ergonómicas de trabajo del personal (altura de trabajo de las diferentes tareas).
El sistema de riego y fertilización es totalmente automatizado, con programadores ubicados en la casa de bombas. Además, se cuenta con un tanque de 67.000 litros de agua que funciona como reservorio para el consumo de tres días (20.000 litros/día).
La proyección anual de producción es de 1 millón de plantines, con una producción promedio de 3,6 brotes por planta madre por mes. Actualmente la producción de plantines mensual está en su fase de crecimiento, con un promedio de 1,2 brotes por planta madre por mes.
Hasta el momento se plantaron 10 ha de semilleros Básico y Núcleos de fincas.
En la figura **4** se observa la producción mensual de plantines registrada durante el primer año de producción del vivero de Ledesma (diciembre de 2024 hasta primera quincena de enero de 2026).

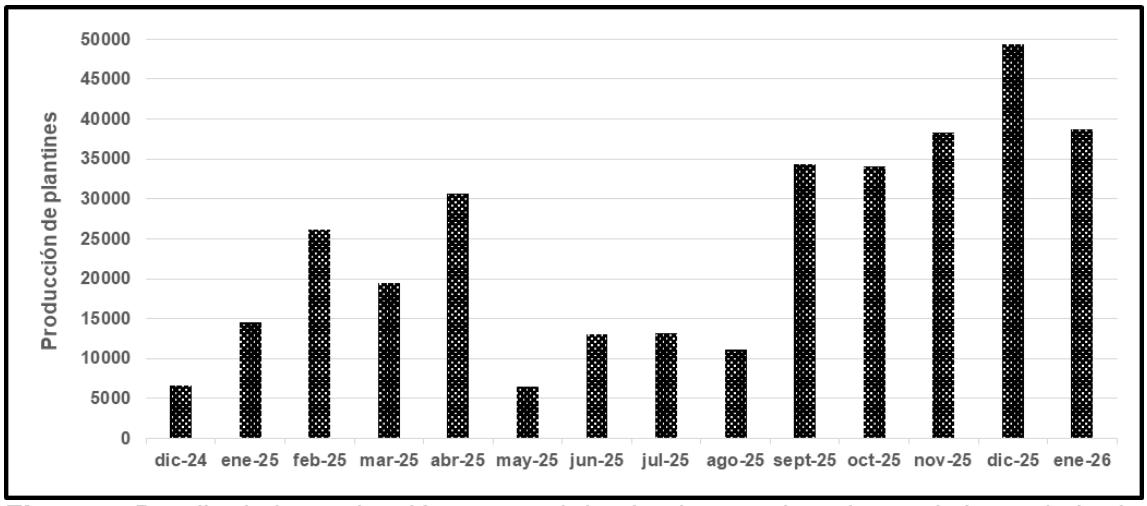


Figura 4. Detalle de la producción mensual de plantines registrada en el vivero de Ledesma desde diciembre de 2024 hasta la primera quincena de enero de 2026.

Los principales desafíos asociados a la implementación de esta tecnología están vinculados a la productividad de las plantas madre a lo largo del año, la cual se encuentra fuertemente influenciada por las condiciones estacionales del clima y por el comportamiento varietal. Asimismo, otro aspecto relevante es la capacidad operativa del sistema, que depende en gran medida del nivel de eficiencia y productividad de los operarios involucrados en las distintas etapas del proceso.

Conclusión

La implementación de la Tecnología Perrfecta® en Ledesma permitió incorporar una nueva alternativa para la producción de plantines de caña de azúcar destinados a la conformación de semilleros Básico y Núcleos de Fincas. Durante el primer período de funcionamiento del vivero se logró establecer un sistema productivo operativo, con volúmenes crecientes de plantines y parámetros de producción que si bien aún no llegan a los objetivos, son acordes a la etapa de desarrollo del proyecto.

Esta tecnología se presenta como una herramienta complementaria a los métodos tradicionales de producción de caña semilla, aportando material vegetal de alta calidad y sanidad, y fortaleciendo el sistema de semilleros de la empresa. Los resultados obtenidos sientan las bases para continuar escalando la producción y optimizando el proceso en campañas futuras.

Una vez que el sistema alcance un régimen estable de producción y en la medida en que el costo del plantín resulte competitivo, esta tecnología permitiría avanzar en las distintas etapas del proceso de plantación, contribuyendo a una disminución de la superficie destinada a la producción de caña semilla, con el consiguiente impacto en la eficiencia del sistema productivo.

EVALUACIÓN DE PÉRDIDAS DE COSECHA DE CAÑA DE AZUCAR POR EXTRACTOR PRIMARIO MEDIANTE METODO DE BALANCE DE MASAS

Vassallo A[1]; Easdale C[1]; Gómez J[1]; Gauna J[1]; Aramayo G[1].

[1] Ledesma SAAI. Salta s/n. Libertador General San Martín. Jujuy 4512 Argentina

Palabras claves: cosecha mecánica; rendimiento sacarino; materia extraña.

INTRODUCCIÓN

Desde la incorporación de la cosecha mecanizada en la industria azucarera en la década de 1970, la reducción de pérdidas de caña se ha convertido en uno de los principales desafíos. Numerosas investigaciones desarrolladas entre la década de 1980 y comienzos de los años 2000 se enfocaron en identificar las fuentes de pérdida durante la cosecha, coincidiendo en señalar a los extractores primario y secundario como los principales responsables (Hurney et al., 1984; Ridge y Dick, 1988; Agnew et al., 2002; Whiteing et al., 2001). Como resultado, la pérdida de caña apta para la molienda extraída por el sistema de limpieza puede ser extrema, con pérdidas de entre el 10 y el 20% (Sugar Research, 2014).

Con la adopción de la cosecha en verde, el rol de los extractores adquirió aún mayor relevancia, ya que estos sistemas deben cumplir simultáneamente la función de remover la materia extraña y preservar la mayor cantidad posible de caña comercial. Por lo tanto, pequeños ajustes en la regulación de los extractores pueden traducirse en cambios significativos tanto en la calidad del material cosechado como en el nivel de pérdidas. Patane et al. (2017) compararon un manejo estándar (798 rpm) con uno recomendado (703 rpm) y un tratamiento control, observando que este último presentó niveles de materia extraña aproximadamente 3% superiores. Los resultados de ingenio indicaron que la práctica recomendada expuso incrementos en el rendimiento de caña (4,9 t/ha) y de azúcar (0,7 t/ha) respecto al manejo estándar. Asimismo, se evidenció una relación entre la velocidad de los extractores y la pérdida de azúcar, concluyendo que velocidades superiores a la capacidad operativa de la cosechadora conducen a mayores pérdidas.

Un aspecto crítico asociado al funcionamiento de los extractores es la generación de pérdidas denominadas “invisibles”. A diferencia de otros tipos de pérdidas fácilmente observables en el campo, la caña extraída por los extractores es fragmentada por las aspas durante su descarga, lo que dificulta su identificación y cuantificación directa. Como consecuencia, estas pérdidas suelen pasar inadvertidas durante la cosecha, a pesar de representar una fracción significativa del total de caña perdida. Esta condición refuerza la necesidad de profundizar en la evaluación del accionar de los extractores y en el desarrollo de criterios objetivos que permitan optimizar su configuración.

OBJETIVO

El objetivo de este trabajo fue cuantificar las pérdidas de caña de azúcar asociadas a modificaciones en la velocidad del extractor primario en cosecha en verde, mediante el método de balance de masas, evaluando su impacto sobre los componentes del rendimiento final de azúcar y sobre el contenido de materia extraña, considerado un parámetro de calidad con influencia sobre el rendimiento y marcada respuesta a los tratamientos aplicados.

MATERIALES Y MÉTODOS

Durante el año 2025 se llevaron a cabo cinco ensayos en dos fincas pertenecientes a la empresa Ledesma, ubicadas en la provincia de Jujuy, Argentina. Todos los ensayos se llevaron a cabo entre los meses de septiembre y octubre, con cosechadoras John Deere CH570. En la tabla 1 se describen las características de cada ensayo.

Tabla 1: Especificaciones de cada ensayo, atributos del cañaveral cosechado y velocidad empleada para la operación.

	Locacion	Variedad	Edad	Ciclo (meses)	TCH	Vel de cosecha
Ensayo 1	Finca Caiman	NA 5 860	Pl. invierno	14	103,5	3,5
Ensayo 2	Finca San lorenzo	CP 70 1133	Pl. invierno	13	55,4	4,5
Ensayo 3	Finca San lorenzo	NA 7 493	Pl. invierno	14	88,74	4,5
Ensayo 4	Finca San lorenzo	NA 5 860	Soca 4	12	84,24	5,5
Ensayo 5	Finca Caiman	NA 96 2929	Soca 1	14	115,58	3,5

Las pérdidas de caña se estimaron mediante el método de balance de masas, el cual permite cuantificar de manera indirecta las pérdidas asociadas a la regulación de la cosechadora a partir de la comparación entre tratamientos operativos contrastantes. Este método se sustenta en la premisa de que, bajo condiciones agronómicas similares, las diferencias observadas en la cantidad de caña cosechada y en los componentes del rendimiento pueden atribuirse a las variaciones en la configuración de la máquina.

En este estudio, se definió un tratamiento control (T0) con una configuración de extractor primario de baja velocidad y extractor secundario apagado, considerado como la mejor aproximación al rendimiento potencial cosechable, asumiendo pérdidas mínimas. Los tratamientos restantes se evaluaron en relación con este control, atribuyendo las diferencias observadas en producción y calidad al accionar del extractor primario.

Los tratamientos evaluados fueron:

a) cosecha en verde con extractor primario a 550 rpm y extractor secundario apagado (T0), representando mínimas pérdidas; b) cosecha en verde con extractor primario a 700 rpm y extractor secundario encendido (T1); c) cosecha en verde con extractor primario a 800 rpm y extractor secundario encendido (T2) representando la configuración de cosecha en Ledesma.

Las variables evaluadas fueron: tonelada de caña cosechada por hectárea (TCH), rendimiento sacarino (%) y el producto de ambas, tonelada de azúcar por hectárea (TAz/ha). Adicionalmente como parámetro de calidad se midió Materia extraña (%). En cada ensayo, a campo se realizaron 10 repeticiones por tratamiento. Cada repetición consistió en el carguío de un carro autovuelco de cosecha, completando un equipo de 10 cajas por cada tratamiento.

La estimación de las toneladas de caña cosechada por hectárea (TCH) se realizó a partir del registro del peso de cada descarga, mediante un carro autovuelco equipado con celdas de carga, y de la distancia recorrida necesaria para completar su llenado. Las mediciones se efectuaron mediante un sistema de posicionamiento RTK, utilizando un receptor en la cabina de la cosechadora. Adicionalmente, el equipo completo fue pesado en báscula al ingresar a fábrica y nuevamente en vacío al salir del predio. Para determinar el contenido de materia extraña, de cada caja se tomó una muestra en la mesa de descarga cuantificando por peso la fracción correspondiente a caña limpia y a materia extraña (hoja, despunte y raíces). Así mismo, se extrajo una muestra de caña desfibrada para el análisis de calidad industrial mediante el método de Prensa. El jugo se analizó mediante espectroscopía NIR para determinación de rendimiento sacarino. Finalmente, la TAz/ha fue el producto de TCH y el rendimiento sacarino.

El procesamiento de los datos se realizó mediante el paquete estadístico InfoStat (Di Rienzo et al., 2020). Se aplicó un análisis de la varianza (ANOVA) con efectos fijos y la comparación de medias se efectuó mediante la prueba LSD de Fisher al 5 % de probabilidad.

RESULTADOS

Tonelada de caña cosechada por hectárea (TCH)

Con respecto a la producción, analizada en toneladas por hectárea (TCH), al evaluar en forma conjunta los ensayos, las tres configuraciones evaluadas difirieron significativamente (Fig. 1). El tratamiento control (T0) registró los valores más elevados, superando a T1 en 7,8 TCH (7,3%) y a T2 en 14,7 TCH (13,7%). La reducción del extractor primario de 800 a 700 rpm (T2 a T1) generó una ganancia de 6,8 TCH equivalente a un 6,9%.

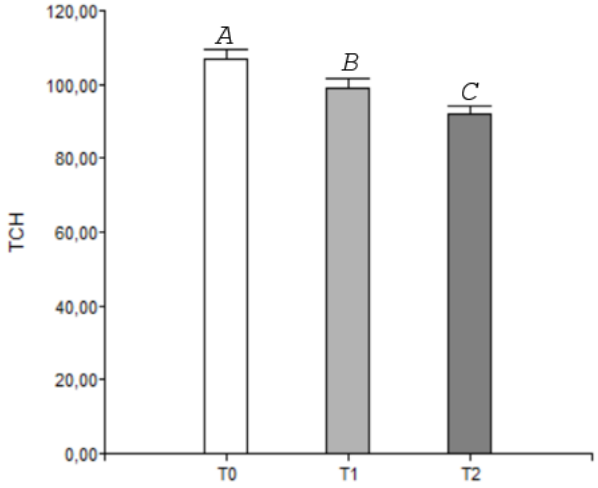


Figura 1: Promedio general de producción (TCH) con sus respectivos tratamientos. *Las letras comunes indican que no hay diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos (LSD Fisher p<0,05).

Materia extraña (EM)

Los niveles de materia extraña (%) se presentan en la Figura 2. Al analizar en conjuntos los resultados obtenidos en los ensayos, se expusieron diferencias significativas entre las tres prácticas. El tratamiento control (T0) mostró valores superiores respecto de T1 y T2, con diferencias de 6 y 8,4 puntos respectivamente. La diferencia entre 700 y 800 rpm fue de 2,35 registrando valores más elevados T1.

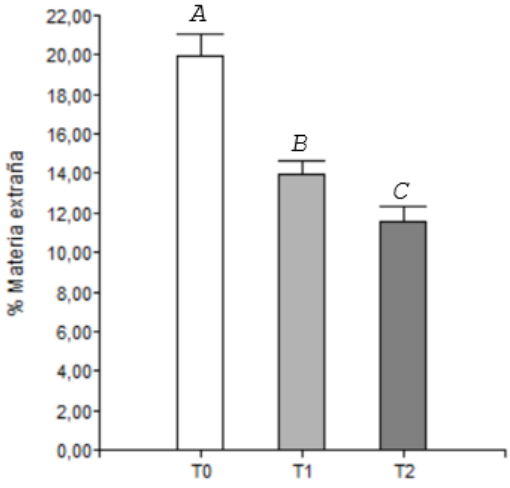


Figura 2: Promedio general de materia extraña (%) con sus respectivos tratamientos. *Las letras comunes indican que no hay diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos (LSD Fisher p<0,05)

Rendimiento sacarino (%)

En relación con el rendimiento sacarino (Fig. 3) al evaluar de manera integral los ensayos se expusieron diferencias significativas entre los tratamientos, con un comportamiento inverso al de TCH. El tratamiento control fue significativamente inferior a T1 en 0,9 puntos implicando una diferencia de 7,9%. Asimismo, fue menor en 1,2 puntos en relación a T2, con una diferencia de 10,5%. La reducción de la velocidad del extractor primario de 800 a 700 rpm se asoció a una disminución de 0,3 puntos porcentuales en el rendimiento sacarino, atribuible al mayor contenido de materia extraña presente en el material cosechado.

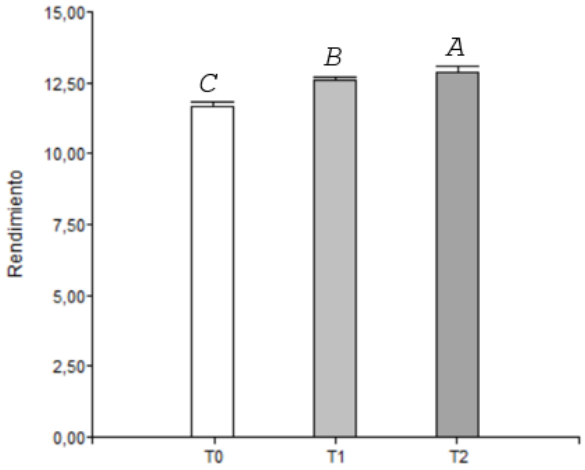


Figura 3: Promedios de rendimiento sacarino (%) con sus respectivos tratamientos. *Las letras comunes dentro de cada ensayo indican que no hay diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos (LSD Fisher p<0,05).

Toneladas de azúcar por hectárea (TAz/ha)

Al analizar el rendimiento final en toneladas de azúcar por hectárea (TAz/ha), no se detectaron diferencias significativas entre tratamientos (Fig 4.). No obstante, se observó una tendencia consistente a la disminución del rendimiento al incrementar la velocidad del extractor primario. En promedio, T0 superó a T1 en 0,03 TAz/ha y a T2 en 0,60 TAz/ha. Mientras que la diferencia entre 700 y 800 rpm fue de 0,57 TAz/ha, favoreciendo al tratamiento de menor velocidad de extractor.

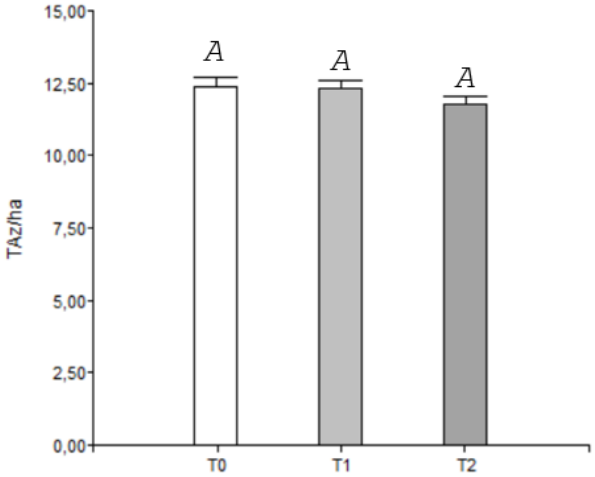


Figura 4: Promedios generales de TAz/ha con sus respectivos tratamientos. *Las letras comunes indican que no hay diferencias estadísticamente significativas entre los tratamientos (LSD Fisher p<0,05).

CONCLUSIONES

En esta investigación, la reducción de 100 rpm en la velocidad del extractor primario ocasionó un aumento de materia prima de un 7%. Asimismo, se registró una disminución del rendimiento sacarino del 2,5%, asociada a un incremento medio del contenido de Materia extraña del 2,35%. En conjunto, el balance final se tradujo en una ganancia de 0,57 TAz/ha, equivalente a un incremento del 4,6% en el rendimiento de azúcar final.

Los resultados evidencian la necesidad de alcanzar un equilibrio adecuado entre limpieza del material cosechado y conservación de caña comercial. Este balance se ve condicionado por el estado del cañaveral, las diferencias varietales y las condiciones operativas, factores que influyen de manera significativa sobre las pérdidas de cosecha y los parámetros de calidad. Asimismo, el método de balance de masas se destacó como herramienta útil para la cuantificación de pérdidas invisibles asociadas al funcionamiento de los extractores; sin embargo, su aplicación requiere elevados niveles de control operativo y una considerable inversión de tiempo y recursos.

En este contexto, resulta necesario profundizar estudios orientados a definir configuraciones óptimas de la cosechadora ajustadas a cada situación productiva, logrando un equilibrio adecuado entre pérdidas y limpieza, así como evaluar el impacto económico asociado a estas modificaciones.

BIBLIOGRAFÍA

Agnew J, Sandell G, Stainlay G, Whiteing C (2002) Increased sugar profitability through harvesting best practice. Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists 24: 8 pp

Hurney AP, Ridge DR, Dick RG (1984) Evaluación de la eficiencia de las cosechadoras de caña en la eliminación de materia extraña y en la limitación de las pérdidas de caña durante el proceso de limpieza. Actas de la Sociedad Australiana de Tecnólogos de la Caña de Azúcar 6: 11–19

Patane P, Landers G, Thompson M, Nothard B, Norris CA, Olayemi M (2020) Investigating losses from green and burnt cane harvesting conditions. Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists 42: 343-351.

Ridge DR, Dick RG (1988) Current research on green cane harvesting and dirt rejection by harvesters. Proceedings of the Australian Society of Sugar Cane Technologists 10: 19–25.

Sugar Research Australia Limited (2014). Manual de buenas prácticas de cosecha. Publicación técnica MN14001. Sugar Research Australia, Brisbane.

Viator, R.P. Richard, E.P., Viator, B.J. Jackson, W., Waugespack, H.L., Birkett, H.S. (2007). "Sugarcane Chopper Harvester Extractor Fan and Groundspeed Effects on Sugar Yield, Cane Quality and Field Losses". Applied Engineering in Agriculture. Vol 23 No 1.

Olivera et.el. (2020) Sugarcane Harvest Losses. Issue 172: htpps//revistacultivat.com/articles/sugarcane-harvest-losses

Whiteing, C.; Norris, C. P.; Paton, D. C. 2001. Extraneous matter versus cane loss: finding a balance in chopper harvestered green cane. Volume 2 (pp. 276-282). Australian Society of Sugar Cane Technologists.

ZONIFICACIÓN DEL ÁREA CAÑERA DE TUCUMÁN POR PERÍODOS DE COSECHA (SERIE 2017-2025) MEDIANTE TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Fandos C.; Scandaliaris P.; Carreras Baldrés J.I.
Estación Experimental Agroindustrial "Obispo Colombres"
Avenida William Cross 3150, C.C. Nº 9 (T4101XAC), Las Talitas, provincia de Tucumán, Argentina
carminaf@eeaoc.org.ar

Palabras clave: Teledetección y SIG, caña de azúcar, análisis multitemporal

Introducción

La cosecha es una etapa crítica en la producción de caña de azúcar, con una alta incidencia en los costos de producción y un gran impacto en la rentabilidad del cultivo. En la provincia de Tucumán, la zafra usualmente se extiende desde mayo-inicios de junio hasta fines de octubre-mediados de noviembre, con variaciones interanuales. La fecha de cosecha es relevante porque influye significativamente en la producción de azúcar del año en curso y en el crecimiento y producción del cañaveral del año siguiente.

En Tucumán se distinguen cuatro períodos durante la zafra: inicial, intermedio, final y tardío. El período inicial se desarrolla mayormente entre los meses de mayo y junio; el intermedio, desde julio a mediados de setiembre; el final, entre mediados de setiembre y mediados de octubre; y el tardío, desde fines de octubre en adelante (Fernández de Ullivarri *et al*., 2015).

Según Romero *et al.* (1991), a medida que avanza la primavera en Tucumán, desde octubre a diciembre, las condiciones para la cosecha van desmejorando paulatinamente. Las lluvias y las elevadas temperaturas dificultan o imposibilitan por algunos días la recolección de la materia prima, se incrementan los niveles de trash, disminuye la calidad, y aumentan los efectos negativos del estacionamiento, entre otros efectos. Lo expuesto determina caídas en los rendimientos fabriles, que se acentúan si la caña está helada, florecida o volcada.

De allí la importancia de monitorear las fechas y el modo en que se lleva a cabo la cosecha con el fin de minimizar pérdidas por heladas, ajustar las estimaciones de producción y planificar el manejo futuro del cañaveral.

Las Tecnologías de Información Geográfica (TIG), incluyendo la Teledetección y los Sistemas de Información Geográfica (SIG), han facilitado el seguimiento de prácticas agrícolas. Las imágenes satelitales permiten un seguimiento temporal de las fases de los cultivos. El procesamiento de estas imágenes, combinado con técnicas de SIG, posibilita la detección y análisis de cambios territoriales y la zonificación de áreas agrícolas.

La Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres monitorea anualmente la cosecha de caña de azúcar en Tucumán con TIG. Utilizando esta información, Fandos *et al.* (2023a) zonificaron el área cañera tucumana según sus períodos de cosecha abarcando el quinquenio 2017-2021.

El objetivo de este trabajo fue actualizar la zonificación del área cañera de Tucumán según períodos de cosecha (2017-2021), incorporando la información anual correspondiente a las zafras comprendidas entre 2022 y 2025.

Materiales y métodos

El área de estudio fue la región cultivada con caña de azúcar en Tucumán y zonas de influencia en las provincias de Santiago del Estero y Catamarca (Figura 1).

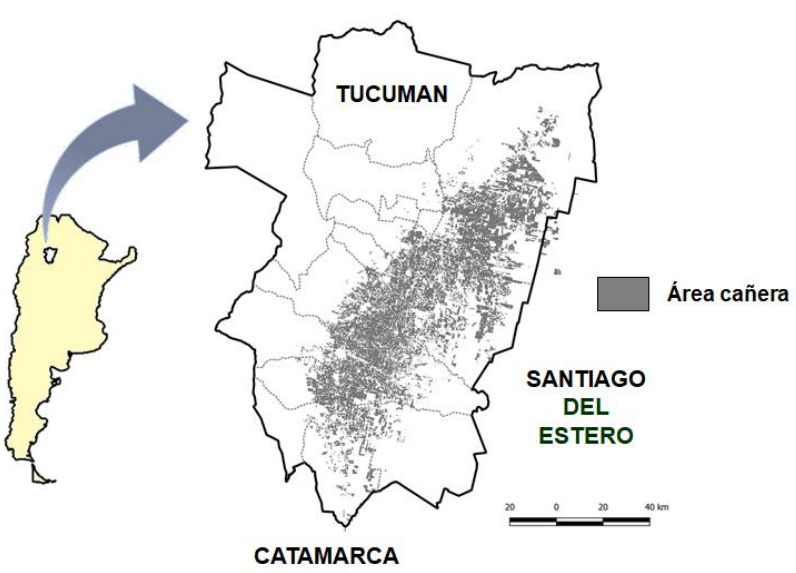


Figura 1. Área cultivada con caña de azúcar en las campañas 2022-2025.

Se emplearon técnicas de SIG para analizar diversas coberturas temáticas. La base fue la zonificación del área cañera según períodos de cosecha de Fandos *et al.* (2023a), generada a partir de imágenes satelitales ópticas (Landsat y Sentinel) de los años 2017 a 2021, obtenidas de los sitios web https://catalogos.conae.gov.ar/landsat8/ y https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home, respectivamente.

Las capas temáticas base contenían cuatro categorías, según periodos de cosecha: inicial, intermedio, final y tardío. Para el análisis, a los pixeles correspondientes al período inicial se les asignó el valor 1, mientras que a los pixeles de los periodos intermedio, final y tardío se les asignó el 10, 100 y 1000, respectivamente. La zonificación del área cañera se efectuó asignando cada clase al período cuyo valor numérico (unidad, decena, centena o unidad de mil) fuera el predominante. Las clases en las que no predominaba ningún valor fueron asignadas a otro grupo que se denominó “período variable” (Fandos *et al.,* 2023a).

Para el presente trabajo, utilizando la misma metodología, se actualizó la cobertura agregando la información de períodos de cosecha correspondientes a las zafras 2022 a 2025 (Fandos *et al*., 2022; 2023b y 2024).

Se utilizaron los softwares ERDAS Imagine y QGIS.

Resultados

En la Figura 2 se expone el inicio y el final de la cosecha de caña de azúcar entre los años 2017 y 2025, por quincenas. Se constata un adelanto progresivo en el inicio de la zafra, culminando en 2025 con un comienzo registrado en la primera quincena de abril. En cuanto al cierre de la campaña, si bien la fecha es variable, la primera quincena de noviembre es el período de finalización que se observó con mayor frecuencia en la serie analizada.



Figura 2. Inicio y final de la zafra de caña de azúcar en Tucumán, por quincenas. Años 2017 a 2025.

La Figura 3 muestra la superficie ocupada por cada uno de los periodos considerando la serie 2017-2025, a nivel provincial, mientras que las Figuras 4 y 5 muestran la distribución departamental en superficie y en el espacio, respectivamente. Los porcentajes de superficie cosechada para los periodos inicial, intermedio, final, tardío y variable a nivel provincial alcanzaron el 18%, 60%, 8%, 1% y 13%, respectivamente. Dichos registros representan promedios diarios de 0,30%, 0,78%, 0,26% y 0,02% para cada una de las primeras cuatro etapas mencionadas.

La comparación, a nivel provincial, de los porcentajes alcanzados por cada período de cosecha con los registrados por Fandos *et al.* (2023a), evidencia un adelanto en el inicio de la zafra. En efecto, la proporción correspondiente al período inicial aumentó del 13% al 18% en el presente estudio, mientras que los períodos intermedio, final y tardío mantuvieron valores similares. Por su parte, el período variable presentó un descenso, pasando del 17% al 13%.

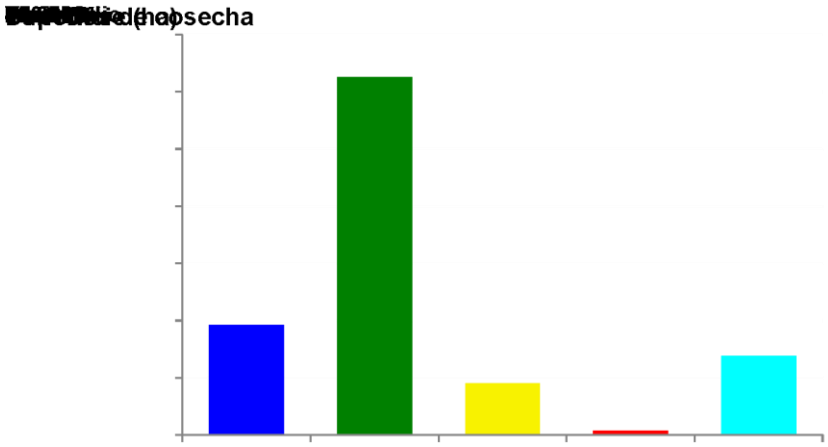


Figura 3. Superficie ocupada por los diferentes períodos de cosecha.

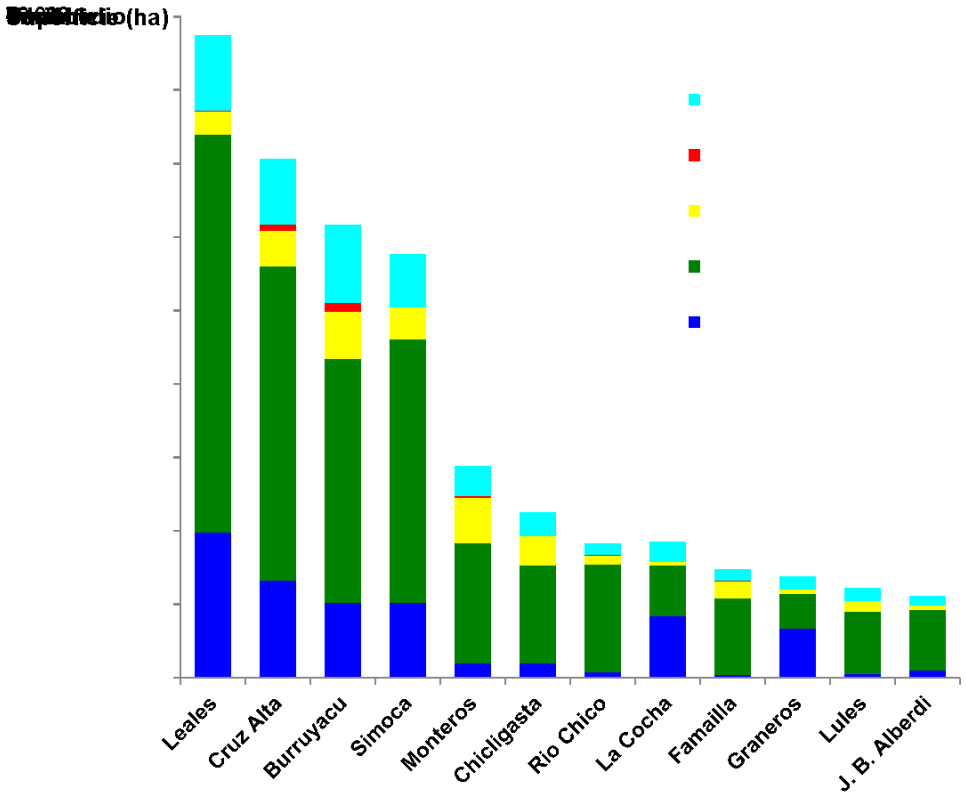


Figura 4. Superficie ocupada por los diferentes períodos de cosecha, por departamentos.

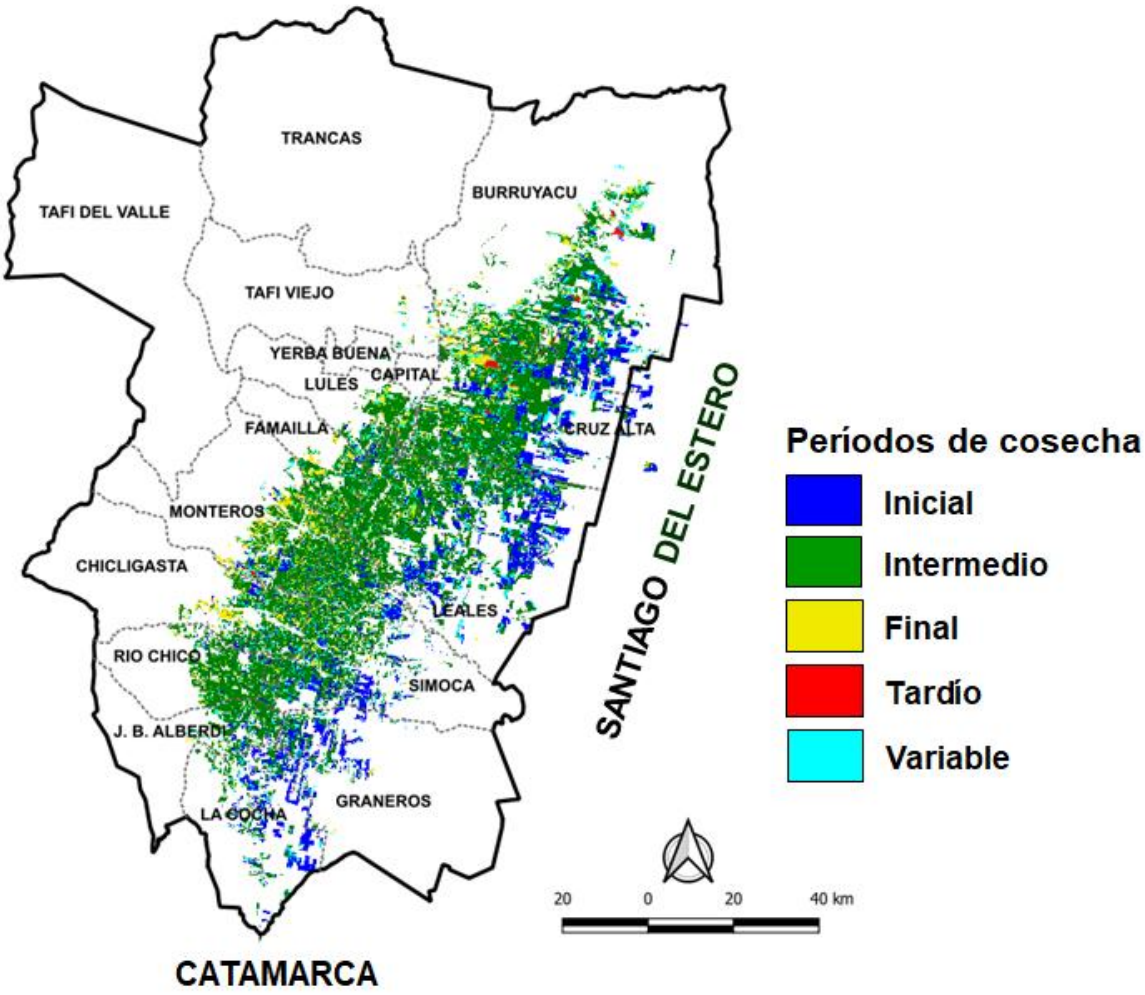


Figura 5. Distribución espacial de la zonificación por períodos de cosecha.

El análisis de la distribución de la superficie cañera según los períodos de cosecha revela una clara predominancia del período intermedio en todos los departamentos. Leales, Cruz Alta, Burruyacu, Graneros y La Cocha presentan los mayores valores de superficie cosechada tempranamente mientras que Burruyacu, Cruz Alta y Monteros destacan por presentar los mayores valores en el período final.

El período tardío tiene escasa incidencia, siendo principalmente importante en Burruyacu, Cruz Alta y Monteros; mientras que el período variable presenta la mayor superficie en Leales y Burruyacu.

Las diferencias espaciales en la cosecha se vinculan con factores ambientales que varían entre años y zonas. Las precipitaciones y la humedad atmosférica disminuyen de oeste a este, donde aumenta la probabilidad de heladas, lo que explica la concentración inicial de la cosecha en los sectores este y sur, áreas más expuestas al frío. Adicionalmente, en estas mismas áreas se ubican los cañaverales orgánicos, los cuales deben ser cosechados al comienzo de la zafra para evitar cualquier posibilidad de contaminación en el proceso fabril.

Durante el período intermedio, la recolección se distribuye de forma homogénea, y hacia el final se concentra en el norte y oeste, especialmente en zonas pedemontanas con menor riesgo de heladas.

El período variable combina rasgos de las etapas inicial e intermedia y está condicionado por la lluvia, la edad y la productividad de los cañaverales, factores que determinan ajustes en los frentes de cosecha. En general, el primer corte (caña planta) se cosecha al final de la zafra para extender su ciclo, mientras que los cañaverales destinados a

renovación se cosechan en las primeras etapas para permitir la preparación temprana de suelos.

Conclusiones

La metodología aplicada permitió identificar y cuantificar las distintas combinaciones de épocas de cosecha, así como delimitar áreas con períodos de recolección recurrentes y otras con mayor variabilidad temporal.

Del total de la superficie cañera, el 18% correspondió al período inicial, el 60% al intermedio, el 8% al tardío y el 1% al final, mientras que el 13% restante se asignó al período variable.

Aunque se verificó un adelanto en el inicio de la cosecha, se mantuvo una marcada concentración de la molienda durante la etapa intermedia.

Al comienzo de la zafra la cosecha se concentró principalmente en los sectores este y sur del área cañera.

Hacia el final de la campaña, la recolección se focalizó en los sectores norte y oeste.

Los mapas temáticos generados aportaron información para la planificación operativa de la cosecha, la identificación de los factores que condicionan su desarrollo, y para futuros estudios sobre zonificación productiva y variables ambientales, agronómicas o económicas.

Bibliografía citada

Fandos, C.; P. Scandaliaris; J. I. Carreras Baldrés y F. Soria. 2022. Dinámica de la cosecha de caña de azúcar en Tucumán, zafra 2022. Reporte Agroindustrial 261 EEAOC. Relevamiento satelital de cultivos de la provincia de Tucumán (consultado 07 octubre 2025). https://www.eeaoc.gob.ar/?publicacion=dinamica-de-la-cosecha-de-cana-de-azucar-en-tucuman-zafra-2022.

Fandos, C.; F. J. Soria; J. Forciniti; J. I. Carreras Baldrés; P. Scandaliaris y E. R. Romero. 2023a. Utilización de tecnologías de información geográfica en la zonificación del área cañera según períodos de cosecha. Tucumán, República Argentina. Revista Industrial y Agrícola de Tucumán 100 (1): 21-28.

Fandos, C.; P. Scandaliaris; J. I. Carreras Baldrés y F. Soria. 2023b. Dinámica de la cosecha de caña de azúcar en Tucumán, zafra 2023. Reporte Agroindustrial 294 EEAOC. Relevamiento satelital de cultivos de la provincia de Tucumán (consultado 07 octubre 2025). https://www.eeaoc.gob.ar/?publicacion=dinamica-de-la-cosecha-de-cana-de-azucar-en-tucuman-zafra-2023.

Fandos, C.; P. Scandaliaris; J. I. Carreras Baldrés y F. Soria. 2024. Dinámica de la cosecha de caña de azúcar en Tucumán, zafra 2024. Reporte Agroindustrial 336 EEAOC. Relevamiento satelital de cultivos de la provincia de Tucumán (consultado 07 octubre 2025). https://www.eeaoc.gob.ar/?publicacion=dinamica-de-la-cosecha-de-cana-de-azucar-en-tucuman-zafra-2024.

Fernández de Ulivarri J.; Tonatto M., Romero E. R.; Scandaliaris J.; Leggio Neme F.; Alonso L. G.; Digonzelli P. A. y Pérez Taboada, S. 2015. Capítulo D4: Cosecha de la caña de azúcar. En: Guía técnica del cañero. Digonzelli, P. A., Romero, E. R.; y Scandaliaris J. (eds.). EEAOC. Disponible en https://www.researchgate.net/publication/281239697_Guia_Tecnica_del_Canero/link/55dc7a5f08ae9d659494f2d7/download (consultado 05 abril 2022).

Romero E. R. y Scandaliaris J.. 1991. Problemas asociados a la cosecha tardía y a la caña en pie. Gacetilla Agroindustrial Nº 42. EEAOC.

EVOLUCIÓN DEL VALOR DE COMPRA DEL AZÚCAR Y DE LOS GASTOS DE COSECHA, TRANSPORTE Y FERTILIZACIÓN DEL CAÑAVERAL TUCUMANO, CAMPAÑAS 2015/16-2024/25

Pérez, D. y Rodriguez, G.
Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres, Sección Economía, danielaperez@eeaoc.org.ar
Avenida William Cross 3150, C.C. Nº 9 (T4101XAC), Las Talitas, provincia de Tucumán, Argentina

Palabras claves: urea, arranque, tipo de cambio, caña de azúcar

Introducción

La producción de caña de azúcar en Tucumán se desarrolla en un contexto con fuertes fluctuaciones en los precios relativos y en los costos de los principales insumos y servicios. En este marco, la evolución del precio local del azúcar, tanto en moneda pesos como en dólares, resulta un factor clave para evaluar la capacidad del productor de absorber incrementos en los gastos de producción y sostener la rentabilidad del sistema. Sin embargo, el análisis del precio del azúcar en forma aislada resulta insuficiente si no se lo vincula con la dinámica de los costos más relevantes del cañaveral, particularmente aquellos asociados a la cosecha, el transporte y la fertilización. La estructura de gastos del cañaveral en Tucumán se caracteriza por una fuerte concentración en pocos rubros. Diversos estudios económicos realizados para la provincia muestran que los costos asociados a la cosecha y al transporte de la caña hasta el ingenio representan, en conjunto, alrededor del 55 % del gasto de la producción de caña de azúcar, lo que los convierte en los principales determinantes del costo del sistema (Pérez D. *et. al*, 2021, 2023, 2024; Pérez G, *et. al,* 2023). Por su parte, la fertilización nitrogenada, si bien representa una proporción menor del gasto total —del orden del 10 %— constituye un insumo estratégico para sostener los niveles de productividad del cultivo (Paredes *et. al,* 2024; Pérez *et. al*, 2025).

El objetivo del presente fue abordar el análisis conjunto de la evolución del precio del azúcar, las tarifas de los servicios de cosecha y flete, y el precio de la urea, incorporando además un indicador del poder de compra.

Materiales y métodos

El análisis se realizó a partir de series de datos elaboradas para el período 2014/15–2024/25. Los precios del azúcar se expresaron en pesos corrientes y en dólares corrientes por tonelada, utilizando información mensual del Centro de Cañeros Tucumán (CACTU). Las tarifas de los servicios de cosecha y transporte y los precios de la urea corresponden a valores relevados en cada campaña del período en análisis a oferentes de servicios y agroinsumos locales. Asimismo, se emplearon presupuestos técnicos-económicos del cultivo de caña de azúcar para Tucumán, elaborados por la Sección Economía y Estadísticas de la EEAOC, a fin de estimar la participación relativa de los distintos rubros de gasto dentro del costo de producción a cosecha. A partir de esta información se determinó la relación insumo producto, que refiere al poder de compra del azúcar frente a los principales costos del sistema.**Resultados**

Precio del azúcar

En la Figura 1 se muestra la evolución mensual del precio del azúcar entre enero de 2015 y octubre de 2025, expresado tanto en pesos corrientes por tonelada como en dólares corrientes por tonelada. En pesos, se observa una trayectoria fuertemente creciente, con una aceleración marcada a partir de 2021 y un salto significativo durante 2022 y 2023, reflejando el impacto de la inflación y de los ajustes cambiarios, para luego estabilizarse en niveles elevados durante 2024 y comienzos de 2025. En dólares, el precio presenta una mayor volatilidad: se mantiene relativamente estable entre 2015 y 2020, registra un fuerte aumento entre 2021 y mediados de 2023 —alcanzando valores máximos cercanos a 1.400 USD/t— y posteriormente muestra una corrección a la baja durante 2024 y principios de 2025. En

conjunto, el gráfico evidencia cómo la fuerte suba del precio del azúcar en moneda local convive con una dinámica más cíclica en dólares, lo que resulta clave para interpretar la evolución de los ingresos del sector y su capacidad de absorber aumentos de costos internos.

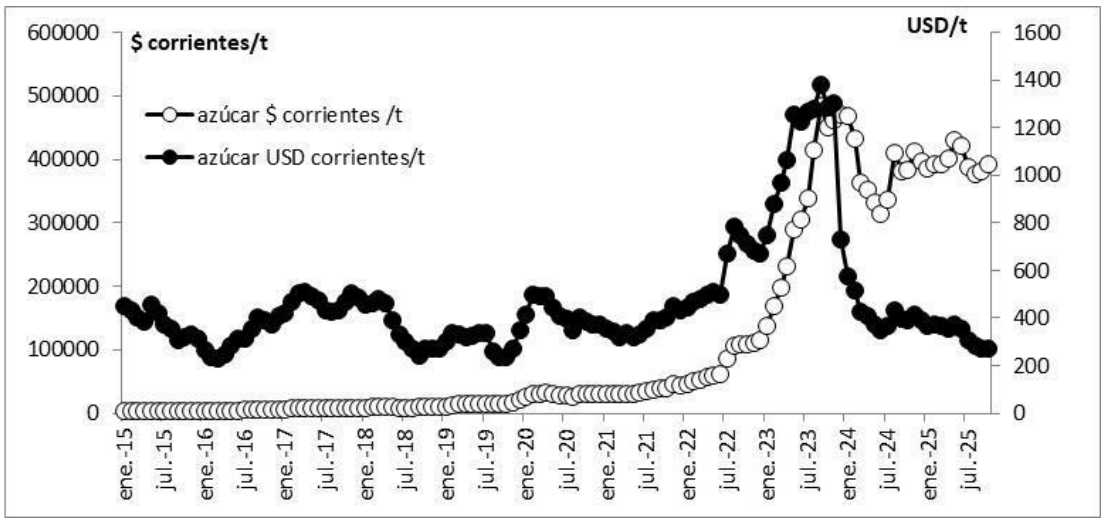


Figura 1. Evolución mensual del precio del azúcar blanco común en Tucumán, expresada en pesos y dólares corrientes por tonelada. Período 2015-2025. Elaborado con datos de CACTU.

Tarifas de los servicios

En la Figura 2 se presenta la evolución del costo del servicio de cosecha de caña de azúcar y del componente de arranque más kilómetro, ambos expresados en pesos por tonelada, entre las campañas 2015/16 y 2024/25. Se observa un aumento continuo y significativo en ambos rubros a lo largo del período, con valores de cosecha que pasan de 100 $/t en 2015/16 a 7.700 $/t en 2024/25, mientras que el costo de arranque más el km (30 km) se incrementa de 60 $/t a 4.750 $/t, respectivamente. La dinámica de crecimiento se acelera a partir de la campaña 2021/22, en un contexto de fuerte inflación y mayores costos operativos, logísticos y laborales.

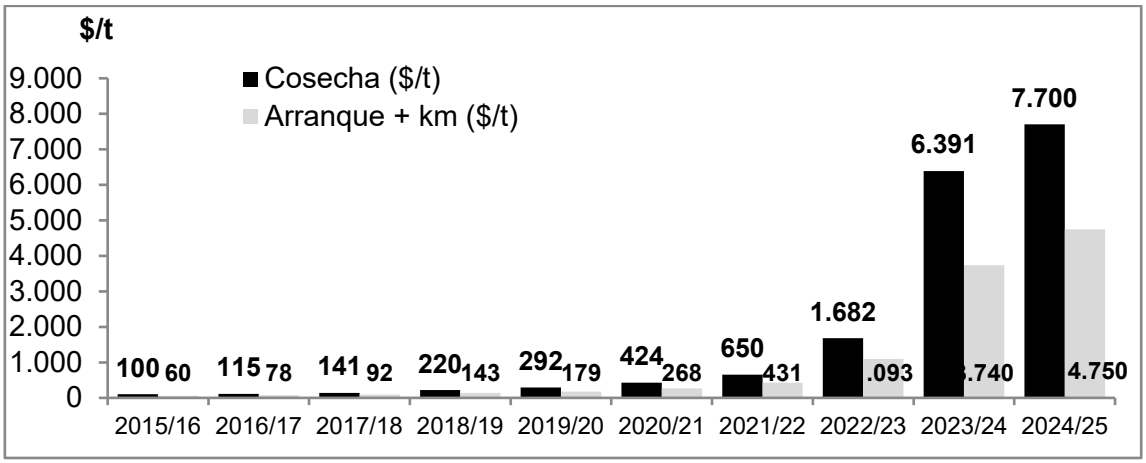


Figura 2. Costo del servicio de cosecha y transporte de caña de azúcar en Tucumán, expresado en $ corrientes/t. Período 2015/16-2024/25.

Precio de la urea

La evolución del precio de la urea, altamente influenciada por los mercados internacionales, introduce un factor adicional de incertidumbre en la planificación económica

del cañaveral. En la Figura 3 se muestra la evolución mensual del precio local de la urea, expresado en dólares por tonelada, entre enero de 2015 y octubre de 2025. Durante el período 2015–2020, el precio se mantuvo relativamente estable, con oscilaciones moderadas en torno a valores de 400–500 USD/t. A partir de 2021 se observa un fuerte incremento, que culmina en un pico excepcional de 1.380 USD/t a comienzos de 2022, reflejando tensiones en los mercados internacionales de fertilizantes. Posteriormente, el precio inicia una fase de corrección, con una marcada volatilidad durante 2022 y 2023, y una tendencia a la baja en 2024, aunque sin retornar a los niveles previos al récord de 2022 (1.380 USD/t). Hacia mediados de 2025, la urea se estabiliza en torno a 600–620 USD/t, evidenciando un nuevo escalón de precios -más alto- que el observado en la segunda mitad de la década pasada, con implicancias directas sobre los costos de fertilización

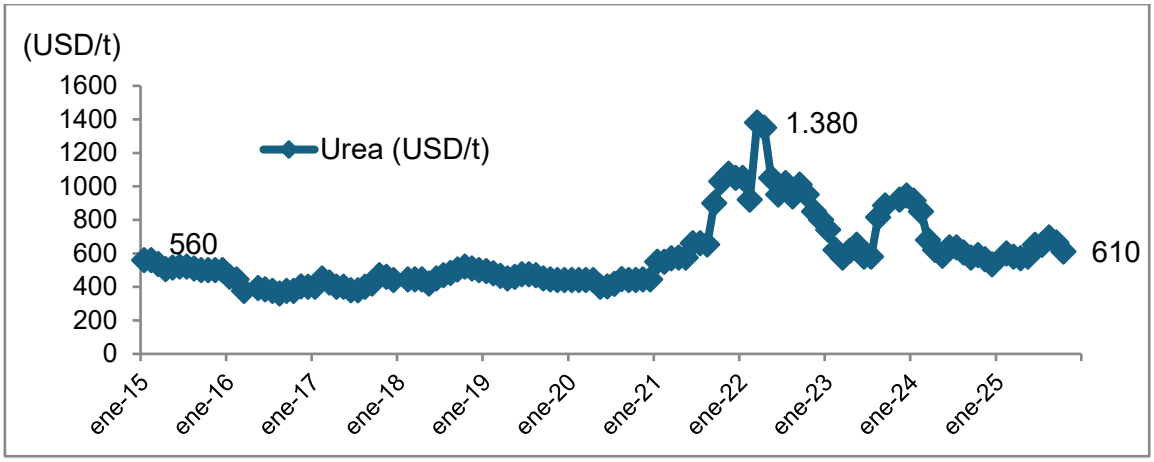


Figura 3. Precio mensual de la urea en Tucumán, expresado en USD corrientes/t. Período 2015-Octubre 2025.

Poder de compra del azúcar

La relación entre el precio del azúcar y los rubros de gasto permite evaluar no solo la evolución nominal de los costos, sino también el poder de compra del producto frente a los insumos y servicios más relevantes.

En la Figura 4 se muestra la evolución de la relación entre el precio del azúcar y tres costos clave del sistema cañero (cosecha, transporte y fertilizante), entre las campañas 2015/16 y 2024/25. Por un lado, se observa la cantidad de bolsas de azúcar necesarias para cubrir el servicio de cosecha y el flete (expresadas en bolsas por tonelada), rubros que en conjunto representan alrededor del 55 % del gasto de producción a cosecha y transporte de la caña hasta 30 km. Ambos costos presentan una tendencia descendente hasta la campaña 2019/20, con mínimos del período analizado en 2022/23, cuando el mayor precio relativo del azúcar mejora el poder de compra frente a estos servicios. A partir de 2023/24 se registra un nuevo incremento en la cantidad de bolsas requeridas, reflejando un encarecimiento relativo de la cosecha y el flete respecto del precio del azúcar. Para pagar estos servicios, en el período en análisis en promedio se requirieron en términos de bolsas de azúcar: 0, 27 (13,5 kg) y 0,17 (8,5 kg) por tonelada de caña cosechada y transportada a 30 km, respetivamente.

En paralelo, la relación azúcar/urea (bolsas de azúcar cada 100 kg de urea, promedio anual), muestra una marcada variabilidad, con un pico en 2020/21 y una fuerte mejora en 2022/23, seguida de un deterioro en las últimas campañas.

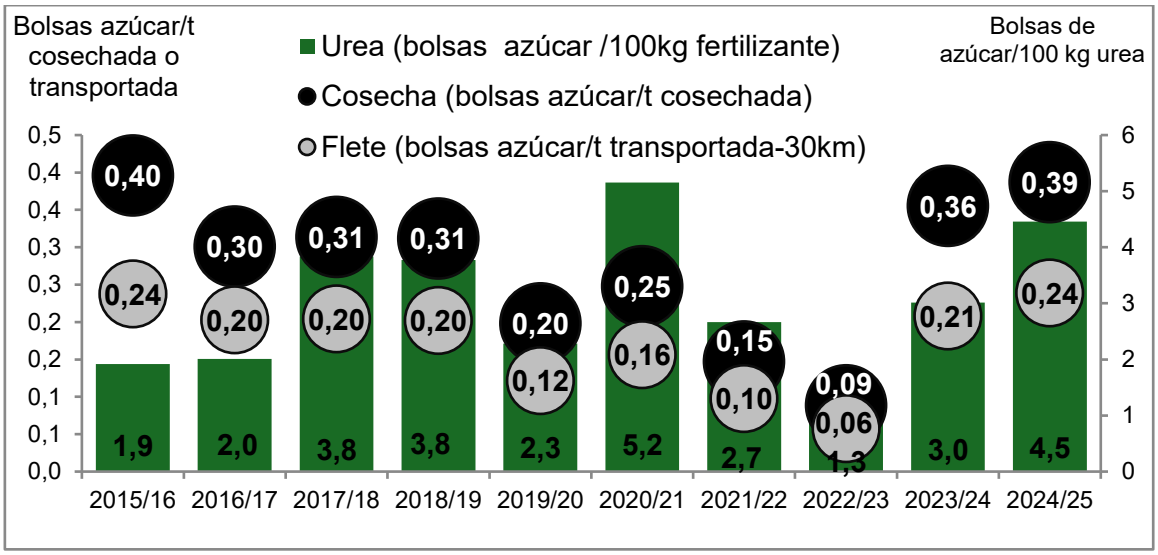


Figura 4. Evolución de la relación precio del azúcar vs cosecha, flete y urea en Tucumán, período 2015/16-2024/25.

Consideraciones finales

El análisis conjunto de los precios del azúcar, las tarifas de los servicios de cosecha y transporte, y el precio de la urea pone de manifiesto la importancia de los precios relativos como determinantes de la situación económica del cañaveral. Si bien el precio del azúcar mostró un fuerte crecimiento en pesos corrientes a lo largo del período analizado, esta dinámica convive con una evolución más volátil en dólares y con incrementos significativos en los costos de los insumos.

Los indicadores de poder de compra evidencian que, durante algunas campañas —en particular 2022/23—, el aumento relativo del precio del azúcar permitió mejorar transitoriamente la capacidad de afrontar los costos de cosecha, flete y fertilización. No obstante, la reversión parcial de esta tendencia en las campañas más recientes señala un nuevo deterioro en los términos de intercambio entre el producto y los principales rubros de gasto.

Los resultados resaltan la necesidad de analizar la evolución del precio del azúcar en relación con los costos claves del sistema, y no de manera aislada.

Bibliografía

Paredes, V.; Pérez, D.; Rodriguez, G.; Alonso, L. y Romero, E. 2024. Gasto de fertilización de caña soca en Tucumán para la zafra 2024, influencia del precio de la urea y del azúcar en la rentabilidad de la práctica. Reporte agroindustrial N° 303, marzo 2024. Disponible en; https://www.eeaoc.org.ar/gasto-de-fertilizacion-de-cana-soca-en-tucuman-para-la-zafra-2024-influencia-del-precio-de-la-urea-y-del-azucar-en-la-rentabilidad-de-la-practica/

Pérez, D.; V. Paredes, G. Rodriguez, A. Sanchez Ducca, L. Alonso y E.R. Romero. 2021. Cultivo de caña de azúcar en Tucumán, margen bruto zafra 2020 y comparación de costos de fertilización, control de malezas y plantación entre las campañas 2019/20 y 2020/21. Reporte Agroindustrial EEAOC, Nº208. Disponible en https://www.eeaoc.org.ar/cultivo-de-cana-de-azucar-en-tucuman-margen-bruto-zafra-2020-y-comparacion-de-costos-defertilizacion-control-de-malezas-y-plantacion-entre-las-campanas-2019-20-y-2020-21/

Pérez, D. R; Paredes, M.V. y Rodriguez, G.V. 2023. Comparación de indicadores económicos del cultivo de caña de azúcar en Tucumán, Argentina en el período 2012/2013-2022/2023. XXIII Reunión Técnica SATCA.Pérez, D.; Paredes, V. y Rodriguez, G. 2024. Gastos de producción y margen bruto del cultivo de caña de azúcar en Tucumán en las campañas 2022/23 y 2023/24. Reporte agroindustrial N° 308. Disponible en https://www.eeaoc.org.ar/gastos-de-produccion-y-margen-bruto-del-cultivo-de-cana-de-azucar-en-tucuman-en-las-campanas-2022-23-y-2023-24/

Pérez, D.; Paredes, V. y Rodriguez, G. 2025. Fertilización en caña de azúcar: variaciones de costos y poder de compra del azúcar en Tucumán (2020–2025) Reporte agroindustrial N° 354. Disponible en https://www.eeaoc.org.ar/fertilizacion-en-cana-de-azucar-variaciones-de-costos-y-poder-de-compra-del-azucar-en-tucuman-2020-2025/

Pérez G.; A. Felipe, F. Rostán. 2023. Evaluación económica del cultivo de caña de azúcar Campaña 2022/2023.Informe técnico INTA EEA Famaillá Disponible en https://www.argentina.gob.ar/sites/default/files/2024/05/informe_costos_cana_22-23.pdf

EVALUACIÓN DE HERBICIDAS PRE Y POSTEMERGENTES PARA EL MANEJO DE ROTTBOELLIA COCHINCHINENSIS: UNA AMENAZA EMERGENTE PARA LA PRODUCCIÓN DE CAÑA DE AZÚCAR EN TUCUMÁN

Sánchez Ducca, A[1]; Barceló M. F[2]; Sabaté, S [2]; García J. M[3]; Felipe, A [3] y Vargas P. D.[4]
[1]Docente Facultad de Agronomía y Zootecnia – UNT. [2]Investigador Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres. [3]Investigador Estación Experimental Agropecuaria INTA Famailla. [4]Ensayista privado.

Palabras Claves: Malezas invasoras; Prevención; Control.

Introducción

Rottboellia cochinchinensis (Lour.) Clayton, conocida comúnmente como caminadora o paja peluda, es una planta anual de la familia *Poaceae*, con metabolismo C4, y es considerada a nivel mundial una de las malezas más problemáticas en el cultivo de caña de azúcar (Arévalo y García-López, 2013). Esta condición se debe a su elevada agresividad, alta capacidad de producción de semillas, rápida tasa de crecimiento y fuerte competencia por recursos. En regiones cañeras de distintos países, su presencia se ha asociado a importantes pérdidas de rendimiento, incrementos significativos en los costos de control y dificultades operativas durante la cosecha.

En la provincia de Tucumán, si bien esta especie no presenta aún una distribución generalizada, se han detectado al menos dos focos con presencia confirmada y alta presión de infestación, lo que representa una señal de alerta temprana para el sistema productivo cañero provincial. La experiencia regional e internacional indica que, una vez establecida y dispersada, *R. cochinchinensis* resulta extremadamente difícil de manejar, reforzando la importancia de actuar de manera anticipada.

Uno de los principales desafíos que presenta esta maleza es la limitada disponibilidad de herramientas químicas eficaces, tanto herbicidas preemergentes como postemergentes. A ello se suma la necesidad de utilizar estrategias que sean selectivas para el cultivo, compatibles con los sistemas actuales de producción y que no comprometan la sustentabilidad del manejo a mediano y largo plazo.

En este contexto, cobra especial relevancia la identificación temprana de la especie, el monitoreo sistemático de los lotes y la implementación de acciones de manejo rápidas y contundentes, priorizando la erradicación de focos incipientes antes de que se produzca la dispersión masiva de semillas hacia nuevas áreas. La erradicación temprana aparece, en este sentido, como la herramienta más eficiente y económica para evitar que *R. cochinchinensis* se transforme en un problema estructural dentro del sistema cañero tucumano.

El presente trabajo tiene como objetivo evaluar, bajo condiciones locales, las distintas alternativas químicas disponibles en Argentina para el manejo pre y postemergente de *R. cochinchinensis*.

Materiales y Métodos

Los ensayos se realizaron en un lote experimental de la Estación Experimental Agropecuaria INTA Famaillá, especialmente acondicionado y con alta presión de *Rottboellia cochinchinensis*. El lote fue preparado mediante dos pasadas de rastra previas a la instalación de los ensayos, con el objetivo de simular condiciones similares a las observadas luego de la bajada de bordo en caña planta.

Se llevaron a cabo dos ensayos independientes, sin cultivo de caña de azúcar implantado:

- Ensayo 1 (preemergencia), aplicado el 15 de octubre de 2025, en ausencia de malezas emergidas.
- Ensayo 2 (postemergencia), aplicado el 15 de noviembre de 2025, con *R. cochinchinensis* emergida, presentando plantas con una altura comprendida entre 10 y 20 cm.

El diseño experimental utilizado en ambos ensayos fue completamente aleatorizado, con tres repeticiones, y la unidad experimental estuvo conformada por parcelas de 3 m de

ancho por 8 m de largo. Las aplicaciones se realizaron con mochila presurizada con CO_2, utilizando un volumen de aplicación de 180 l·ha^{-1} para el ensayo de preemergencia y 151 l·ha^{-1} para el de postemergencia. En ambos casos se emplearon boquillas ADI 11002.

Las evaluaciones de efecto herbicida (EH) se realizaron de forma visual, utilizando como referencia la escala propuesta por la Asociación Latinoamericana de Malezas (ALAM). Los valores porcentuales de EH obtenidos en todas las fechas de evaluación se transformaron mediante arco seno de la raíz cuadrada, a fin de cumplir con los supuestos del análisis de varianza (ANOVA), presentándose los resultados en su escala original. Para la comparación de medias se utilizó el test DGC (Di Rienzo *et al.* 2002) con un nivel de significancia de $p \leq 0,05$. El tratamiento sin herbicida (T1) no fue incluido en el análisis estadístico, dado que los valores de EH fueron 0 % en todas las evaluaciones, sin variación, lo que impide si inclusión en el modelo.

Ensayo 1: En el ensayo de preemergencia, las evaluaciones se efectuaron a los 20, 28, 44 y 70 días después de la aplicación (DDA). Los tratamientos herbicidas evaluados se presentan en la Tabla 1.

Tabla 1. Tratamientos herbicidas evaluados en preemergencia, ingrediente activo (IA), producto comercial (PC) y dosis

Trat	**Herbicida 1**		**g o cm³/ha**	**Herbicida 2**		**g o cm³/ha**
	IA	**P.C.**		**IA**	**P.C**	
1	Testigo					
2	Pendimetalin (45 %)	Herbadox	2000			
3	Pendimetalin (45 %)	Herbadox	3000			
4	Pendimetalin (45 %)	Herbadox	4000			
5	Pendimetalin (45 %)	Herbadox	3000	Diclosulam	Morrigan	60
6	Pendimetalin (45 %)	Herbadox	3000	Atrazina 90%	Gesaprim	2000
7	S-metaloclor	Dual Gold	1300			
8	Acetoclor	Harnnes	2000			
9	Pyroxasulfone (48 %)	Yamato Top	400			
10	Isoxaflutole + Indaziflam	Merlin Total	300			
11	Terbutrina (50%)	Terbutrex	2000			
12	Imazapic + Imazapic	Mayoral	500			
13	Diclosulam	Morrigam	60			
14	Clomazone (36%)	Comman	1500			
15	Clomazone (36%)	Comman	2200			
16	Clomazone (36%)	Comman	2200	Diclosulam	Morrigan	60
17	Clomazone (36%)	Comman	2200	Atrazina 90%	Gesaprim	2000

Todos los tratamientos fueron combinados con aceite metilado de soja (76% i.a.) a 0,5 v/v.

Ensayo 2: En el ensayo de postemergencia, las evaluaciones se realizaron a los 7, 13, 19 y 31 DDA. Los tratamientos evaluados se detallan en la Tabla 2.

Tabla 2. Tratamientos herbicidas evaluados en postmergencia, ingrediente activo (IA), producto comercial (PC) y dosis

Trat	Herbicida 1		g o cm^3/ha	Herbicida 2		g o cm^3/ha
	IA	P.C.		IA	P.C	
1	Testigo					
2	Tolpyralate	Brucia	100	Atrazina 90%	Gesaprim	1000
3	Tolpyralate	Brucia	100	Diuron 80%	Diurex	1000
4	Tolpyralate	Brucia	100	Amicarbazone	Dinamic	1000
5	Tolpyralate	Brucia	100	Terbutrina 50%	Terbutrex	1000
6	Tolpyralate	Brucia	100	Metribuzin 48%	Sencorex	1000
7	Topramezone	Convey	100	Atrazina 90%	Gesaprim	1000
8	Topramezone	Convey	100	Diuron 80%	Diurex	1000
9	Topramezone	Convey	100	Amicarbazone	Dinamic	1000
10	Topramezone	Convey	150	Atrazina 90%	Gesaprim	1000
11	Topramezone	Convey	100	Terbutrina 50%	Terbutrex	1000
12	Topramezone	Convey	100	Ametrina 80%	Ametrex	1000
13	Isoxaflutole + Indaziflam	Merlin Total	300	Atrazina 90%	Gesaprim	1000
14	MSMA	Arsonex	1300			
15	Asulam	Asulox	8000			
16	Ametrina (80%)	Ametrex	1500			

Todos los tratamientos fueron combinados con aceite metilado de soja (76% i.a.) a 0,5 v/v.

Las lluvias registradas durante el desarrollo los dos ensayos se presentan en la figura 1.

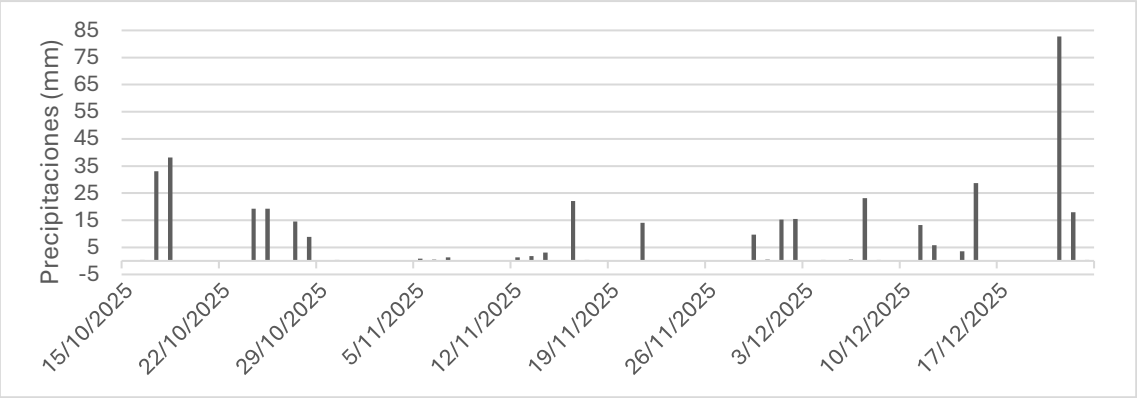


Figura 1. Precipitaciones registradas durante el período del ensayo.

Resultados

Los resultados del ensayo de preemergencia (Tabla 3) indican que la mayoría de los tratamientos lograron altos niveles de control inicial de *R. cochinchinensis*. En la primera evaluación, a los 20 días después de la aplicación (20 DDA), todos los tratamientos evaluados, excepto T11, se ubicaron dentro del rango excelente de efecto herbicida (EH), sin diferencias estadísticas entre ellos.

Tan solo 8 días después, en la evaluación realizada a los 28 DDA, los tratamientos T7, T13 y T14 mostraron una disminución del EH, ubicándose en el rango muy bueno y diferenciándose estadísticamente del grupo inicial de mayor control, aunque manteniéndose significativamente superiores al bajo EH observado en T11.

A partir de los 44 DDA comenzaron a evidenciarse diferencias en la residualidad de los tratamientos. Solo los tratamientos T3, T4, T5, T6, T10, T12, T15, T16 y T17 mantuvieron un EH clasificado como excelente, diferenciándose estadísticamente del muy buen control registrado en T2, T7, T8, T9, T13 y T14.

En la última evaluación, realizada a los 70 DDA, únicamente un grupo reducido de alternativas conservó niveles elevados y estables de control, destacándose los tratamientos que contenían pendimetalin en dosis iguales o superiores a 3 $l \cdot ha^{-1}$, ya sea solo o en mezcla (T3, T4, T5 y T6), así como isoxaflutole + indaziflam (T10) y la mezcla clomazone + diclosulam (T16). Estos tratamientos se diferenciaron estadísticamente del resto de las alternativas evaluadas. Resultados similares fueron reportados por Ramos et al. (2023), quienes observaron un buen control de *R. cochinchinensis*. mediante el uso de herbicidas residuales, entre ellos pendimetalin, indaziflam y clomazone.

Tabla 3. Efecto de herbicidas preemergentes sobre *Rottboellia cochinchinensis* en los distintos momentos de evaluación.

Trat.	20 DDA		28 DDA		44 DDA		70 DDA	
T2	91,3	A	91,0	A	87,3	B	80,7	C
T3	94,0	A	93,3	A	95,3	A	90,7	A
T4	97,7	A	94,3	A	97,7	A	92,0	A
T5	97,7	A	93,0	A	97,3	A	93,3	A
T6	97,7	A	93,0	A	97,3	A	92,7	A
T7	95,0	A	87,0	B	86,0	B	60,0	E
T8	94,3	A	91,3	A	83,7	B	58,3	E
T9	94,3	A	92,7	A	88,7	B	73,3	D
T10	97,3	A	93,3	A	97,3	A	92,7	A
T11	56,7	B	50,0	C	16,7	C	10,0	G
T12	97,3	A	92,0	A	93,0	A	81,0	C
T13	92,7	A	85,0	B	86,0	B	61,7	E
T14	94,7	A	83,7	B	87,0	B	51,7	F
T15	94,3	A	93,7	A	93,3	A	81,3	C
T16	95,7	A	93,7	A	96,0	A	91,0	A
T17	96,0	A	93,3	A	93,7	A	84,3	B

Los resultados del ensayo de postemergencia se presentan en la Tabla 4. En la primera evaluación, a los 7 días después de la aplicación (7 DDA), los tratamientos T3, T4, T5 y T6, correspondientes a tolpyralate en mezcla con herbicidas inhibidores del Fotosistema II, alcanzaron niveles de efecto herbicida (EH) clasificados como excelentes, diferenciándose estadísticamente del resto.

A los 13 DDA se observó un incremento del EH en varios tratamientos. Se destacaron T3, T5 y T14, que alcanzaron valores excelentes, mientras que los tratamientos T8 y T12 presentaron un EH muy bueno. El resto de los tratamientos se ubicó en rangos de EH bueno a pobre.

En la evaluación intermedia, a los 19 DDA, los tratamientos T3, T5 y T14 mantuvieron niveles de control excelentes, observándose en estos casos un control prácticamente total de *R. cochinchinensis*. Por su parte, alternativas como T4, T12 y T15 se ubicaron dentro del rango muy bueno. En el resto de los tratamientos se observó una disminución del EH, asociada al rebrote de las plantas tratadas.

En la última evaluación, realizada a los 31 DDA, solo los tratamientos T5 (tolpyralate + terbutrina) y T14 (MSMA) lograron sostener un EH clasificado como excelente, diferenciándose significativamente del muy buen control observado en T3 (tolpyralate + diuron) y T13 (isoxaflutole + indaziflam + atrazina). El caso de T13 resultó particularmente

llamativo, ya que, si bien el control inicial fue bajo, con el transcurso de los días se observaron fallas en el enraizamiento de las plantas de *R. cochinchinensis*, produciéndose acamado, mayores síntomas de estrés hídrico y, en algunos casos, la muerte de las plantas tratadas.

En concordancia con estos resultados, Correia (2016) señala que el control químico de *R. cochinchinensis* en caña de azúcar es limitado y destaca, entre las alternativas postemergentes disponibles, la mezcla MSMA + diuron, herbicidas que presentan ciertos niveles de toxicidad para el cultivo. En este contexto, los resultados observados en el presente trabajo con la combinación tolpyralate + terbutrina —considerando que tolpyralate corresponde a un herbicida de registro reciente y actualmente disponible solo en Argentina— constituyen un hallazgo relevante, que justifica su reevaluación y profundización en futuras experiencias.

El resto de los tratamientos evidenció una marcada pérdida de eficacia, alcanzando niveles de control pobres, lo que pone de manifiesto las limitadas opciones postemergentes realmente eficaces para el manejo de esta maleza.

Tabla 4. Efecto de herbicidas postemergentes sobre *R. cochinchinensis* en los distintos momentos de evaluación.

Trat.	7 DDA	13 DDA	19 DDA	31 DDA
T2	77,7 C	81,7 B	60,0 D	40,0 C
T3	95,0 A	96,7 A	91,0 A	83,0 B
T4	95,0 A	91,7 A	82,7 B	79,3 B
T5	97,0 A	97,7 A	95,7 A	94,0 A
T6	91,0 A	86,0 B	76,7 C	67,0 B
T7	46,7 E	30,0 F	23,3 G	20,0 D
T8	85,0 B	84,7 B	77,7 C	70,0 B
T9	50,0 E	33,3 F	30,0 F	16,7 D
T10	63,3 D	40,0 E	36,7 F	23,3 D
T11	78,3 C	78,3 C	71,0 C	56,7 C
T12	81,7 B	83,3 B	80,7 B	71,3 B
T13	73,3 C	76,7 C	73,3 C	81,3 B
T14	68,3 D	91,3 A	95,0 A	97,0 A
T15	30,0 F	70,3 D	84,3 B	85,0 B
T16	73,3 C	70,0 D	50,0 E	46,7 C

Conclusiones

Los resultados obtenidos indican que las alternativas químicas disponibles para el manejo de *R. cochinchinensis* en caña de azúcar son escasas. En aplicaciones preemergentes, solo algunos principios activos, como pendimetalin, isoxaflutole + indaziflam y clomazone + diclosulam lograron alta eficacia y residualidad,constituyendo herramientas claves para evitar la instalación y dispersión de esta especie.

En el manejo postemergente, las opciones resultaron aún más limitadas, destacándose únicamente MSMA y la mezcla de tolpyralate + terbutrina, que alcanzaron niveles de control excelentes en la última evaluación. El resto de los tratamientos no fueron eficaces confirmando la dificultad de manejar esta maleza una vez establecida.

Este escenario resulta preocupante, ya que una eventual expansión de la maleza implicaría pérdidas de rendimiento por competencia y un incremento significativo en los costos de manejo. Por lo tanto, la detección temprana, el manejo preventivo y la erradicación inmediata de focos se presentan como estrategias clave para evitar la propagación de *R. cochinchinensis* en los cañaverales de Tucumán.

Bibliografía

Arévalo, R. A., & García-López, E. 2013. Biología y manejo de malezas en caña de azúcar (Saccharum spp). Publicación Especial del Colegio de Postgraduados, Campus Tabasco. H. Cárdenas, Tabasco, México. 98 p.

Christoffoleti, P. J. 2020. Biologia e manejo do capim-camalote (Rottboellia cochinchinensis) na cultura da cana-de açúcar. Curitiba, Brasil. 22 p.

Correia, N. M. (2016). Biology and management of Rottboellia cochinchinensis. Revista Brasileira de Herbicidas, 15(1), 89–96. https://doi.org/10.7824/rbh.v15i1.437

Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., González, L., Tablada, M., & Robledo, C. W. (2021). InfoStat versión 2021. Grupo InfoStat, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

Ramos, G. C., da Silva, R. O., Schedenfeldt, B. F., Hirata, A. C. S., & Monquero, P. A. (2023). Herbicide association for simultaneous control of seeds and emerged plants of Rottboellia exaltata L. Research, Society and Development, 12(7), e11712742623. https://doi.org/10.33448/rsd-v12i7.42623

IMPACTO DE DIFERENTES ALTERNATIVAS DE MANEJO EN 3 ESPECIES DE MALEZAS AGRESIVAS EN EL CULTIVO DE CAÑA DE AZÚCAR

Ortiz, F.A; Rearte, M.A.; Ascárate, S.; Leggio Neme, M.F.; Ginel, I.; Sal, P.E; Digonzelli, P.A; Cabrera, D.C.
Facultad de Agronomía, Zootecnia y Veterinaria, UNT
carinacabrera@outlook.com.ar

Palabras clave: Pasto ruso; Cebollín; Grama; Vicia; Malezas perennes; Cultivo de servicio.

Introducción

Argentina produce caña de azúcar en Tucumán, Salta y Jujuy, siendo este cultivo el de mayor importancia económica y social. En 2024 se molieron 24.482.989 t de caña de azúcar. Esta agroindustria genera, casi 61.000 empleos directos (CAA, 2025).

Tucumán es la principal productora de caña, azúcar y bioetanol del país, con una superficie cultivada de 298.930 ha (Ipaat, 2025). Para producir la caña de azúcar se utiliza una importante cantidad de insumos y tecnologías. Según Kuva *et al.* (2003), las malezas son uno de los principales componentes del agroecosistema cañero que interfieren en la productividad del cultivo, por ello se invierten muchos recursos, especialmente agroquímicos, para su control. Las pérdidas producidas por malezas en muchos casos pueden ser supriores al 50%, dependiendo de las especies presentes, el porcentaje de cobertura y el periodo de competencia, entre los aspectos más importantes (Cabrera *et al.,* 2014).

Actualmente, la atención está puesta en el desarrollo de paquetes tecnológicos que favorezcan la sustentabilidad del sistema productivo. Así, desde 2004, en Tucumán está prohibida la quema de la caña ya sea en pie antes de la cosecha o del residuo agrícola de cosecha (RAC) que queda en el campo después de la cosecha mecánica. La cosecha en verde del cañaveral deja sobre el suelo 7 a 18 t de RAC/ha, dependiendo de la variedad, nivel productivo del lote, momento de cosecha, etc. (Digonzelli *et al.,* 2016). El RAC, como cobertura sobre el suelo, tiene múltiples beneficios, entre ellos ayuda al control de malezas, entre los efectos más importantes (Digonzelli et al., 2011 a y b;). Si bien el control químico es el método más utilizado por los productores cañeros para limitar la competencia de malezas (Christoffoleti *et al.,* 2004), con miras a un sistema productivo más sustentable es conveniente combinar herramientas de manejo sumando al control químico las prácticas mecánicas y culturales. Dentro de estas últimas, el mantenimiento del RAC como cobertura sobre el suelo constituye una alternativa interesante. Por otra parte, hay experiencias donde, además de la cobertura con RAC, se siembran cultivos de invierno en las costillas del surco de caña de azúcar, estos se conocen como cultivos de servicio. Estos cultivos se desarrollan en una "ventana" de tiempo que va entre la cosecha de una caña soca y el cierre de la soca siguiente. Su finalidad es aportar MO, mejorar la estructura del suelo, reducir compactación, minimizar la lixiviación de nitratos, incrementar el contenido de carbono y nitrógeno del suelo, evitar la erosión y constituirse en un impedimento para las malezas (Martínez calsina *et al.,* 2024). La siembra de cultivos de servicio, como práctica para limpiar los lotes de malezas, tendría una acción más duradera que los herbicidas residuales normalmente utilizados.

Por ello el objetivo de este trabajo fue caracterizar, cuantificar y comparar fitosociológicamente el comportamiento de *Cyperus rotundus, Cynodon dactylon* y *sorghum halepense* presentes en un manejo con y sin RAC y en un manejo con RAC consociado a *Vicia Villosa* como cultivo de servicio.

Materiales y Métodos

En la localidad de Bella Vista, departamento Leales. En las campañas 2023 y 2024, en el cultivar LCP 85-384, en edad de soca 1, en un diseño en bloques completos al azar con 4 repeticiones, se realizaron los siguientes tratamientos:

a) Sin cobertura de residuo agrícola de cosecha (RAC) (suelo desnudo).

b) Sin RAC, con siembra de *Vicia Villosa* en el espacio entre surcos (SRCV).

c) con RAC + Siembra de *V.* villosa (CRCV);

d) Solamente RAC (CRSV).

El tamaño de las unidades experimentales fue de 20 surcos de 45 m de largo. Quincenalmente desde emergencia hasta cierre del cañaveral, se evaluaron 3 especies de malezas: *Cyperus rotundus, Cynodon dactylon* y *sorghum halepense.* Para ello se caminó cada tratamiento en forma de W, lanzando 30 veces un aro de 1 m^2. El material vegetal, que se encontró dentro del aro, fue cortado al ras del suelo, etiquetado, guardado en bolsas y llevado al laboratorio, donde se identificó y cuantificó por especie. Las muestras se secaron en estufa a 70°C hasta peso constante, para obtener biomasa seca. Se cuantificó N° de individuos (N) y Biomasa en g. Se calcularon los parámetros fitosociológicos: frecuencia (F) que evalúa la distribución de las especies en el campo, densidad (D) que es la cantidad de plantas de cada especie por unidad de área, y dominancia (DO) que indica la biomasa de la especie en relación al área total colectada. Para cada especie, las variables se analizaron en función del tratamiento mediante modelos lineales generalizados con enlace log. La variable N se ajustó con distribución binomial negativa (nbinom2), mientras que biomasa, F, D y DO se ajustaron con distribución Tweedie. Cuando correspondió, las diferencias entre tratamientos se determinaron mediante comparaciones múltiples de Tukey ($p<0.05$). El software estadístico utilizado fue R Core Team (2024).

Resultados

Cyperus rotundus presentó un número de individuos significativamente mayor en el tratamiento de suelo desnudo (SRSV), con un promedio de 126 individuos, en comparación con los tratamientos con presencia de RAC (CRSV) y RAC + Vicia (CRCV), que registraron 41 y 32 individuos, respectivamente. Estos dos últimos tratamientos no difirieron estadísticamente entre sí (Figura 1a). En relación con los parámetros fitosociológicos frecuencia (F), densidad (D) y dominancia (DO), no se detectaron diferencias estadísticas significativas entre tratamientos. No obstante, para F y D se observó una tendencia consistente con la registrada para el número de individuos y la biomasa, donde los tratamientos CRSV y CRCV mostraron valores inferiores en comparación con SRSV (Figura 1b). En conjunto, los resultados sugieren que la presencia de RAC, independientemente de la inclusión de *Vicia*, tiende a reducir el establecimiento y/o crecimiento de *C. rotundus*; sin embargo, la magnitud de esta respuesta fue moderada, dado que las diferencias no se reflejaron de manera consistente en todos los parámetros evaluados.

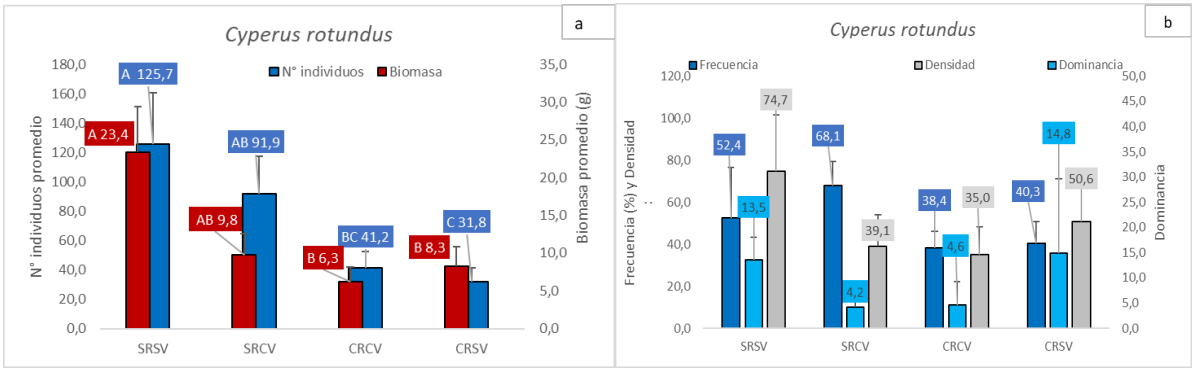


Figura 1: Parámetros evaluados para *C. rotundus* con diferentes alternativas de manejo. a) Número de individuos y biomasa b) Frecuencia, Densidad y Dominancia - *Letras diferentes, indican diferencias significativas según test Tukey (p= 0,05)*

Para *C. dactylon*, todos los parámetros medidos y calculados presentaron diferencias estadísticas significativas entre al menos dos manejos. El tratamiento más supresor fue CRCV, particularmente en el número de individuos (8,6) y la biomasa seca (5 g), mostrando diferencias marcadas respecto de SRSV, SRCV y CRSV (Figura 2a). Para estos parámetros, se destaca que SRCV representó el escenario más desfavorable para el cultivo y más favorable para *C. dactylon*, con los valores más elevados de número de individuos (149,8) y biomasa (75,7 g). Estos resultados indican que, bajo las condiciones del ensayo, la inclusión de Vicia sin cobertura de RAC no actuó como herramienta supresora de esta maleza. Por el contrario, podría estar asociada a un ambiente que favorece su desarrollo, posiblemente vinculado a una mayor disponibilidad de recursos o a un menor nivel de disturbio, lo cual resulta consistente con la biología de especies perennes estoloníferas y/o rizomatosas. En la Figura 2b, el tratamiento CRCV también redujo significativamente la frecuencia, densidad y dominancia, lo que refuerza que la combinación RAC + Vicia constituye el manejo más eficaz para la supresión de *C. dactylon*. El tratamiento CRSV presentó respuestas intermedias, aunque no alcanzó los niveles de supresión observados en CRCV.

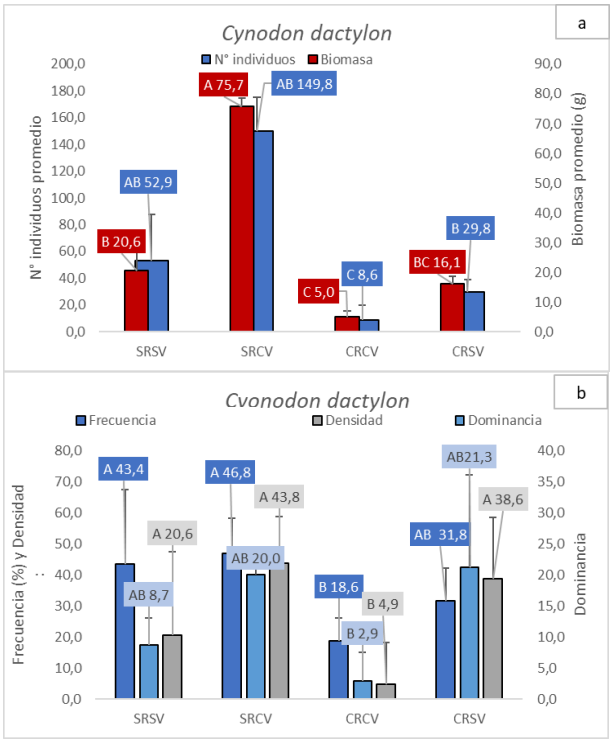


Figura 2: Parámetros evaluados para *C. dactylon* con diferentes alternativas de manejo. a) Número de individuos y biomasa b) Frecuencia, Densidad y Dominancia - *Letras diferentes, indican diferencias significativas según test Tukey (p= 0,05)*

Para *S. halepense*, la biomasa fue el parámetro más afectado por los tratamientos, registrándose la mayor supresión en el manejo CRSV, con un valor promedio de 0,8 g. Este tratamiento difirió estadísticamente de SRSV y SRCV, mientras que el manejo CRCV no presentó diferencias significativas respecto de CRSV (Figura 3a). El impacto sobre el número de individuos fue menos marcado: CRSV mostró valores inferiores, pero el resto de los tratamientos tendió a agruparse (Figura 3a), lo que concuerda con la biología de la especie, donde el manejo afecta principalmente el crecimiento (biomasa) más que la emergencia. Los parámetros densidad y dominancia mostraron un comportamiento similar al de la biomasa, mientras que la frecuencia fue comparable al número de individuos, sin diferencias estadísticas significativas entre tratamientos, aunque con una tendencia consistente (Figura 3).

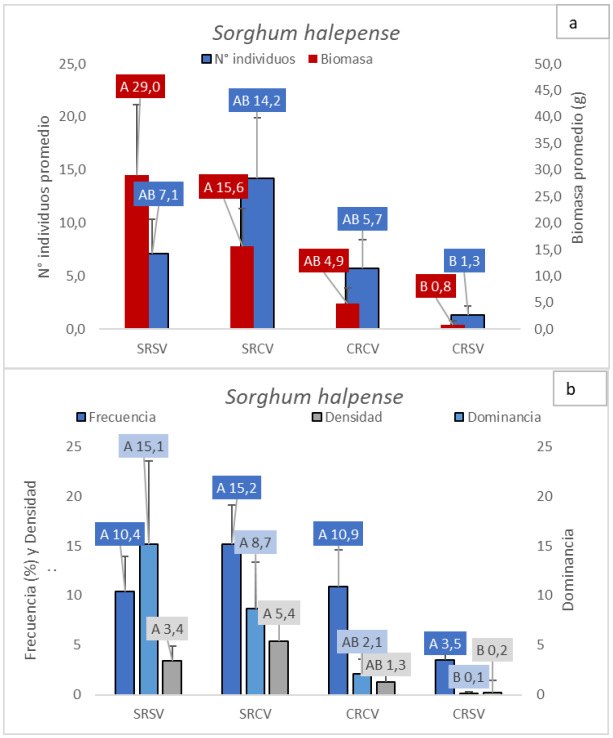


Figura 3: Parámetros evaluados para *S. halepense* con diferentes alternativas de manejo. a) Número de individuos, biomasa b) Frecuencia, Densidad y Dominancia - *Letras diferentes, indican diferencias significativas según test Tukey (p= 0,05)*

Conclusiones

- ✓ En las tres malezas evaluadas, la alternativa más consistente asociada a menores niveles de infestación, fue la presencia de RAC, con respuestas particularmente claras en biomasa, dominancia y densidad.
- ✓ La combinación RAC + *V. villosa* (CRCV) fue la estrategia más efectiva para *C. dactylon*, superando al tratamiento con RAC solo.
- ✓ Para ***S. halepense***, el tratamiento con **solo RAC (CRSV)** mostró la **mayor supresión**, especialmente en biomasa; el manejo RAC + *V. villosa* presentó una supresión similar o intermedia según la variable evaluada.

- ✓ Para ***C. rotundus***, el RAC redujo el número de individuos y la biomasa en comparación con el suelo desnudo: sin embargo, la magnitud del efecto fue **más moderada** que en las otras especies, lo que sugiere una mayor tolerancia y/o persistencia.

- ✓ ***Vicia villosa* sin RAC (SRCV) no se comportó como una alternativa supresora** para las malezas estudiadas; en *C. dactylon* se asoció al mayor nivel de infestación. En consecuencia, su adopción como herramienta de control requiere su **integración con RAC** y validación bajo condiciones locales.

Agradecimientos

A José Minetti y Cía, y a los Ing. Sebastián Ascárate y Carlos Abregú por el apoyo operativo y la colaboración en las tareas de campo.

Financiamiento

Trabajo financiado por el proyecto PIUNT A712.

Bibliografía

Arévalo, R. A.; Cerrizuela, E. A. y Olea, I. (1977). Competencia de las malezas en caña de azúcar. II. Sorghumhalepense (L.) Per. Revista Agronomía Noroeste Argentino, v. 14, n.14, p. 39-51.

CAA (Centro Azucarero Argentino). Estadisticas. Disponible en: Producción de azúcar-2020-2029 - Centro Azucarero Argentino.

Cabrera, D. C., Chaila, S., Sobrero, M. T., & Varela, A. E. 2014. Interferencia de Panicum maximum en el cultivo de caña de azúcar para tres localidas de Tucumán (AR). XXIX Congresso Brasileiro Da Ciencia Das Plantas Daninhas.

Cabrera DC; Sobrero MT; Chaila S; Pece MG. 2015. Germinación y emergencia de *Megathyrsus maximus* (Jacq.) B.K. Simon& S.W.L. Jacobsvar. Maximus. Planta Daninha 33 (4): 663-670. ISSN: 1806-9681.

Chaila, S., et al.,2004. Competencia de Sicyos polyacanthus en caña de azúcar. Planta daninha 22:545-551.

Christoffoleti, P. J., *et al.,*2004. Manejo de plantas daninhasna cultura da cana-de-açúcar: novas moléculas herbicidas. II Simpósio de Tecnologia de Produção de Cana-de-Açúcar. https://doi.org/10.1590/S0100-83582012000400025

Digonzelli, P. A.; Fernández de Ullivarri, J.; Medina, M.; Pérez Taboada, S., Rojas Quinteros, H. y Leggio, M.F. 2016. Análisis de la descomposición del residuo de la cosecha en verde del cañaveral (RAC) en tres ensayos diferentes. XX Reunión Técnica Nacional de la Caña de Azúcar. Trabajo completo en CD: 5 pp.

Digonzelli, P.; Romero, E.; Alonso, L.; Fernández de Ullivarri, J.; Rojas Quinteros, H.; Scandaliaris, J. and Fajre, S. 2011a. Assesing a sustainable sugar cane production system in Tucumán, Argentina. Part one: Sugar cane harvest residue (trash) decomposition dynamics. Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán 88 (1): 1-12.

Digonzelli, P.; Tonatto, M. J.; Romero, E. R.; Sanzano, G. A.; Fernández de Ullivarri, J.; Giardina, J. A. and Scandaliaris, J. (2011b). Assessing a sustainable sugar cane production system in Tucumán, Argentina. Part II: soil water and thermal regime, stalks population dynamics and sugarcane production. Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán 88(2): 1-10. ISSN 0370-5404.

IPAAT (Instituto de promoción de azúcar y alcohol de Tucumán). EEAOC presenta la estimación de superficie cosechable y producción de caña de azúcar 2025 en Tucumán. Disponible en: https://www.ipaat.gov.ar/nota/596/eeaoc-presenta-la-estimacion-de-superficie-cosechable-y-produccion-de-cana-de-azucar-2025-en-tucuman.

Kuva, M.A.; et al.,2003. Períodos De Interferência Das Plantas DaninhasNa Cultura Da Cana-De-Açúcar.–Capim-Braquiária (Brachiariadecumbens) e capimcoloniao(Panicummaximum). PlantaDaninha 21:37–44.

Martínez Calsina, L; Sáez, J.V; Fontana, P.D; Felipe, A; Zerrizuela, S.C; Gallac, M; Pérez Gómez, S; Vallejo, J.; Acreche, M.M.; Erazzú, L.E, 2024. Beneficios de *Vicia villosa* en el intercultivo con caña de azúcar: análisis del arreglo espacial y rendimiento. XXIII Reunión Nacional de Técnicos de la caña de azúcar.

R Core Team. (2024). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. https://www.R-project.org/

EFICACIA DE HERBICIDAS PREEMERGENTES Y SU INDICE DE IMPACTO AMBIENTAL EN CAMPO PARA MANEJO DE SICYOS POLYACANTHUS EN CAÑA DE AZÚCAR TUCUMÁN, ARGENTINA

Barceló M. F.[1]; Sánchez Ducca A.[2]; Vargas, Pablo[3]; Sabaté S.[1]
[1] Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC) Tucumán-Argentina
[2] Facultad de Agronomía,Zootecnia y Veterinaria– UNT
[3] Asesor privado
fbarcelo@eeaoc.org.ar

Palabras claves: manejo de malezas, medio ambiente, productividad, sostenibilidad.

INTRODUCCIÓN

Sicyos polyacanthus es una cucurbitácea trepadora anual, nativa de la selva tucumano–boliviana, caracterizada por su rápido crecimiento, elevada agresividad, numerosas cohortes de emergencia y su adaptación al manejo de caña verde. En los sistemas cañeros de Tucumán se ha convertido en una de las principales malezas problema, con alta capacidad de interferir con el desarrollo del cultivo, provocar pérdidas de productividad y dificultar las labores de cosecha (Sánchez Ducca *et al.*, 2020). Su biología compleja intensifica los desafíos para el manejo químico y favorece la persistencia de infestaciones.

En este contexto, el uso de herbicidas preemergentes constituye una herramienta fundamental para el manejo temprano de la maleza. Sin embargo, la selección de estos productos no solo debe fundamentarse en su eficacia de control, sino también en su impacto ambiental, especialmente en sistemas agrícolas donde la sostenibilidad cobra creciente relevancia. Una de las herramientas más empleadas para estimar dicho impacto es el **Environmental Impact Quotient (EIQ)**, propuesto por Kovach en 1992. Este indicador integra doce parámetros vinculados a toxicidad y comportamiento ambiental del plaguicida: toxicidad cutánea, crónica y sistémica; toxicidad para peces, aves, abejas y artrópodos benéficos; potencial de lixiviación; movilidad en superficie; y tiempos de degradación en suelo y superficie foliar (Carbonaria *et al.*, 2020). El EIQ permite sintetizar múltiples dimensiones del riesgo ambiental en un valor único, facilitando la comparación entre alternativas de manejo.

A pesar de su importancia, no se conoce de estudios que relacionen la eficacia de herbicidas para el control de *S. polyacanthus* con su impacto ambiental. En este sentido, resulta de gran interés **abordar esta temática** con el fin de aportar información que contribuya al diseño de estrategias de manejo más efectivas y ambientalmente responsables para *esta difícil maleza*.

OBJETIVO

Evaluar la eficacia de diferentes herbicidas preemergentes y mezclas para el control de *Sicyos polyacanthus* y estimar su impacto ambiental mediante el índice EIQ en campo.

MATERIALES Y MÉTODOS

El ensayo se llevó a cabo en un lote comercial de caña de azúcar ubicado en la localidad de Los Porceles, departamento Cruz Alta (Tucumán, Argentina). El cultivo correspondía a la variedad TUC 95-10 en edad de soca 1, establecida en un lote con historial de alta infestación de *S. polyacanthus*.
Se utilizó un diseño experimental en bloques completos al azar con tres repeticiones. Cada unidad experimental tuvo una superficie de 24 m² (6 × 4 m).
Previo a la instalación del ensayo se realizó una aplicación selectiva y sin efecto residual con el fin de eliminar plantas emergidas de *S. polyacanthus* y evitar interferencias en la evaluación

de los tratamientos preemergentes. Esta aplicación se efectuó el 7 de noviembre de 2024 utilizando fluroxipir 48% (0,3 l ha-^{1}) en mezcla con bromoxinil 34,9% (1,5 l ha^{-1})
Los **tratamientos preemergentes** (Tabla 1) se aplicaron el **14 de noviembre de 2024**, mediante una mochila experimental presurizada con CO_2, equipada con una barra de seis picos de abanico plano TT11002, espaciados a 50 cm. El volumen de aplicación fue de **110 l ha^{-1}**. Las aplicaciones se realizaron con el cultivo en **estado fenológico de macollaje.**

Tabla 1 Tratamientos evaluados para control preemergente de *S. polyacanthus*

Tratamiento	Herbicida	Dosis (l o kg PC.ha^{-1})
1	Atrazina 90% + acetoclor 90%	2+2
2	Amicarbazone 70%	1
3	Isoxaflutole 45% + indaziflam 15%	0,3
4	Flumetsulam 12%	1,5
5	Diclosulam 84%	0,06

Se evaluó el efecto herbicida (EH) a los 11, 28, 43 y 63 días después de la aplicación (DDA), utilizando la escala visual propuesta por la Asociación Latinoamericana de Malezas (ALAM, 1974). Esta escala clasifica el nivel de control en seis categorías: pobre (0–40%), regular (41–60%), suficiente (61–70%), bueno (71–80%), muy bueno (81–90%) y excelente (91–100%).
Los datos se sometieron a **análisis de varianza (ANOVA)** y las medias se compararon mediante el test **DGC ($p \leq 0,05$)**, recomendado para la comparación simultánea de cinco o más tratamientos (Di Rienzo *et al.,* 2021).
Los valores de **EIQ en campo** de los tratamientos se obtuvieron utilizando la **calculadora desarrollada por la Universidad de Cornell (Grant, 2010-2020)**, basada en la ecuación propuesta por Kovach (1992). Para el caso de amicarbazone, el EIQ fue determinado mediante un cálculo asistido por inteligencia artificial empleando la misma ecuación base, ya que no se encuentra disponible en la calculadora.
Para la clasificación del impacto ambiental se utilizó la escala sugerida por Kovach, que establece las siguientes categorías:

- **Muy bajo impacto**: EIQ < 5
- **Bajo impacto**: 5–25
- **Medio-alto impacto**: 25–45
- **Muy alto impacto**: EIQ > 45

RESULTADOS

El efecto herbicida (EH) mostró diferencias claras entre los tratamientos evaluados (Figura 1). La mezcla atrazina + acetoclor presentó el desempeño más bajo, con valores de EH que disminuyeron progresivamente desde 78% a los 11 DDA hasta aproximadamente 55% a los 63 DDA, lo cual refleja un control inicial bueno, según la escala de ALAM, con pérdida de residualidad en el tiempo.
El tratamiento de isoxaflutole + indaziflam registró un **muy buen control** inicial (89% a los 11 DDA), con un leve descenso hacia el final del período evaluado, finalizando en la categoría de buen control.
Los tratamientos de flumetsulam y amicarbazone fueron los de mejor desempeño durante todo el periodo evaluado, diferenciándose significativamente del resto a los 28 DDA. Ambos alcanzaron niveles de excelencia y lo mantuvieron en el tiempo. Por su parte, diclosulam evidenció un control excelente hasta los 43 DDA con una ligera reducción hacia el final del período aun conservando muy buen control.

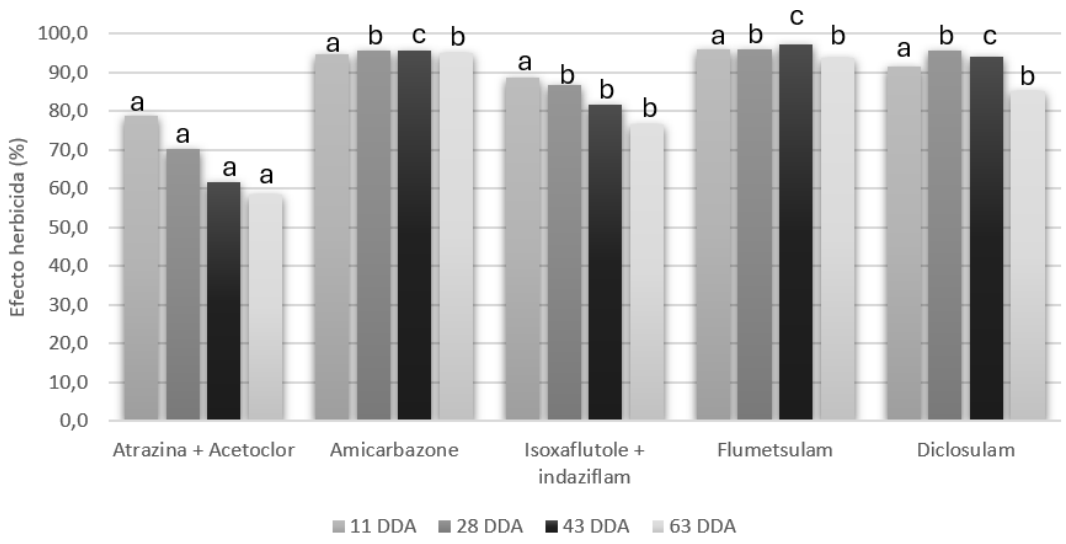


Figura 1 Efecto herbicida de los distintos tratamientos evaluados sobre *S. polyacanthus*. Letras distintas indican diferencias estadísticamente significativas (p<0,05)

La evaluación del impacto ambiental mediante el índice EIQ a campo mostró diferencias marcadas entre las estrategias de manejo analizadas (Tabla 2). El tratamiento con atrazina + acetoclor registró el mayor impacto ambiental, clasificándose dentro de la categoría de impacto muy alto (EIQ 127,8).

Amicarbazone alcanzó un EIQ de 16,33, clasificado como bajo impacto. Los valores más reducidos correspondieron a los tratamientos con indaziflam + isoxaflutole (EIQ 4,3), flumetsulam (EIQ = 3,8) y diclosulam (EIQ = 1,3), dentro de la categoría de impacto muy bajo, evidenciando un perfil ambiental significativamente más favorable.

Mientras que la mezcla con atrazina incremento notablemente el valor del EIQ, los herbicidas amicarbazone, indaziflam + isoxaflutole, flumetsulam y diclosulam se posicionaron como alternativas de menor impacto, ofreciendo un margen más amplio para estrategias de manejo sustentable.

Tabla 2: EIQ en campo e impacto ambiental de los tratamientos evaluados

ESTRATEGIA DE MANEJO	EIQ en campo	IMPACTO AMBIENTAL
Atrazina 90% + acetoclor 90%	127,8	Muy alto
Amicarbazone 70%	16,33	Bajo
Isoxaflutole 45% + indaziflam 15%	4,3	Muy bajo
Flumetsulam 12%	3,8	Muy bajo
Diclosulam 84%	1,3	Muy bajo

CONCLUSIONES

En conjunto, los resultados muestran que flumetsulam y amicarbazone fueron los herbicidas más eficaces y persistentes en el control de *S. polyacanthus*, seguidos por diclosulam. El tratamiento isoxaflutole + indaziflam tuvo un muy buen EH inicial pero perdiendo control al finalizar la evaluación y atrazina +acetoclor se ubicó como la alternativa con peor desempeño a lo largo del tiempo.

La integración de EH y EIQ a campo demuestra que los herbicidas más eficaces coincidieron con los de menor impacto ambiental, reforzando su valor para estrategias de manejo sustentable.

La combinación de eficacia e índice impacto ambiental constituye una herramienta útil para orientar decisiones de manejo más responsables en caña de azúcar, promoviendo estrategias de control que maximicen la eficacia y minimicen los riesgos ambientales asociados al uso de herbicidas.

BIBLIOGRAFÍA

Asociación Latinoamericana de Malezas (ALAM) (1974). Recomendaciones para el control de malezas en América Latina. Asociación Latinoamericana de Malezas.

Carbonaria Caio A.; Velini Edivaldo D. 2021. Risk assessment of herbicides compared to other pesticides in Brazil. Advances in Weed Science 39 (e21202032). https://doi.org/10.51694/AdvWeedSci/2021;39:00006

Di Rienzo, J. A., Casanoves, F., Balzarini, M. G., González, L., Tablada, M., & Robledo, C. W. (2021). InfoStat versión 2021. Grupo InfoStat, Facultad de Ciencias Agropecuarias, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina.

Grant, J. A. (2010-2020). Calculator for Field Use EIQ (Environmental Impact Quotient). New York State Integrated Pest Management Program, Cornell Cooperative Extension, Cornell University. https://cals.cornell.edu/new-york-state-integrated-pest-management/risk-assessment/eiq/eiq-calculator

Kovach, J., Petzoldt, C., Degni, J., & Tette, J. (1992). A method to measure the environmental impact of pesticides. NY State IPM Program, Cornell University.

Sánchez Ducca, A.; Vargas, P. D.; Sabaté, S.; Romero, E. R. (2020). Relevamiento sobre el manejo de malezas en caña de azúcar en la provincia de Tucumán, encuesta 2018. Avance Agroindustrial, 41(1), 24–28.

EFECTO DE LAS PRÁCTICAS CULTURALES EN EL ATAQUE Y LA OVIPOSICIÓN DE DIATRAEA SACCHARALIS (LEPIDOPTERA: CRAMBIDAE) EN CAÑA DE AZÚCAR - TUCUMÁN, ARGENTINA

Salvatore[1] AR, Páez Jerez[1,2] PG, Nadra[1] G, Isas[3] MG y Krapovickas[1] L
[1]Facultad de Agronomía Zootecnia y Veterinaria, Universidad Nacional de Tucumán, Tucumán, Argentina; analiasalvatore@hotmail.com
[2]Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Tucumán, Argentina
[3]Bulacio Argenti SA, Tucumán, Argentina

Palabras clave: Gusano perforador, fertilización nitrogenada, resíduos de la industria citrícola

INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar (*Saccharum hybrids*) se cultiva en 294.470 ha en *San Miguel de Tucumán*, *Argentina* (Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres, 2024). En los últimos años, este cultivo adquirió mayor importancia debido a su papel en la producción de bioetanol tras la implementación de la "ley de combustibles" (*Ley 26.093*), que exige aumentar el nivel de etanol mezclado con la gasolina del 10 % al 12 % (Cárdenas et al. 2009). Como resultado, más del 60 % del área sembrada con granos en Tucumán fue reemplazada por caña de azúcar destinada a la producción de bioetanol (Fandos et al. 2021). Debido a este cambio, la producción de caña de azúcar se expandió rápida y desordenadamente hacia áreas no tradicionales que, en muchos casos, requieren fertilización y riego como prácticas necesarias para lograr rendimientos aceptables.

Muchos autores han estudiado la relación entre los aportes de nitrógeno y la abundancia de plagas (particularmente pulgones y ácaros) en una amplia gama de cultivos (manzano, poroto, tomate, sorgo, etc.) (Atkinson y Nuss 1989). En Sudáfrica, Goebel et al. (2005) encontraron una correlación positiva entre el suministro de nitrógeno y los niveles de infestación del barrenador africano del tallo *Eldana saccharina* Walker (Lepidoptera: Pyralidae). En *Panamá*, Atencio Valdespino et al. (2019) también encontraron que el daño causado por *Diatraea tabernella* Dyar (Lepidoptera: Crambidae) se correlacionó positivamente con la dosis de nitrógeno. Steward (2001) afirmó que una fertilización adecuada y equilibrada tiene un efecto muy importante sobre la producción y la protección ambiental; sin embargo, no debe olvidarse que una mala proporción de los nutrientes puede ocasionar problemas de plagas. Chaboussou (2006) sostuvo que los insectos no tienen la capacidad de descomponer las proteínas en aminoácidos; por lo tanto, los aminoácidos deben encontrarse en forma libre dentro de las plantas para poder ser asimilados, razón por la cual atacan a las plantas bien nutridas con nitrógeno. Por lo tanto, es necesario manejar el cultivo y los nutrientes mediante prácticas agronómicas adecuadas y respetuosas con el ambiente.

El barrenador *Diatraea saccharalis* (F.) (Lepidoptera: Crambidae) es la plaga más importante de la caña de azúcar en Tucumán. Aunque se trata de una plaga ampliamente estudiada debido a las pérdidas económicas que provoca, es necesario evaluar el efecto de nuevas prácticas agrícolas sobre la intensidad de infestación con el fin de identificar posibles daños en la caña de azúcar y prevenirlos. Una práctica que se ha empleado durante varios años en la producción de caña de azúcar es el uso de residuos de la industria citrícola (CIR) para mejorar la estructura del suelo, incrementar la actividad microbiana y mantener la salud de las raíces de este cultivo perenne durante la primavera seca (Morandini et al. 2015). Además, la cachaza proveniente de la producción de azúcar se ha utilizado como fertilizante orgánico rico en fósforo, calcio y nitrógeno, y bajo en potasio (Romero et al. 2009).

Estudios iniciales realizados por Salvatore et al. (2021) en Tucumán mostraron que el aumento en las dosis de nitrógeno y el uso de CIR incrementaron la incidencia de la plaga y afectaron indirectamente los rendimientos, provocando pérdidas importantes de azúcar debido a la entrada de microorganismos en los entrenudos perforados. El objetivo de nuestro estudio fue evaluar el efecto de diferentes tratamientos de fertilización nitrogenada y del riego con CIR y cachaza sobre los niveles de infestación y la preferencia de oviposición de *D. saccharalis*.

METODOLOGÍA

Experimentos de campo

Se realizaron dos ensayos de campo para evaluar el efecto de la fertilización nitrogenada y del riego con residuos de la industria citrícola en la finca de *San Genaro S.A.*, ubicada en el departamento *Leales*, en la provincia de Tucumán.

En un primer ensayo de campo, se utilizaron dos fuentes diferentes de nitrógeno a una dosis de 2 kg por surco: urea (48 % N) y nitrato de amonio cálcico (CAN, 27 % N). También se incluyó un tratamiento sin fertilización (Control). Las unidades experimentales fueron parcelas de 20 surcos de ancho por 100 m de largo, con tres repeticiones por tratamiento. La fertilización nitrogenada se realizó en noviembre de 2023 y las parcelas se cosecharon en mayo de 2024. El daño causado por *Diatraea saccharalis* se evaluó determinando el número de entrenudos perforados en relación con el número total de entrenudos.

En un segundo ensayo de campo, la caña de azúcar fue regada con residuos de la industria citrícola (CIR) o con agua limpia durante los meses de septiembre a noviembre. También se incluyó un tratamiento sin riego (Control). Las unidades experimentales fueron parcelas de 50 surcos de ancho por 100 m de largo, con tres repeticiones por tratamiento. El daño causado por *D. saccharalis* se evaluó mediante el número de entrenudos perforados en relación con el número total de entrenudos.

Experimentos de preferencia de oviposición en condiciones de semicampo.

Los experimentos de semicampo utilizaron adultos de *D. saccharalis* obtenidos de una colonia originalmente establecida a partir de ejemplares proporcionados por *Seaboard S.A.* Ingenio y mantenida en el laboratorio de Terapéutica Vegetal de la Facultad de Agronomía, Zootecnia, Veterinaria y Medicina (FAZyV) de la Universidad Nacional de Tucumán (UNT). Las larvas se criaron con dieta artificial hasta completar su desarrollo (Osores et al. 1982).

Los experimentos se realizaron a campo en la FAZyV–UNT. Se utilizaron macetas de 5 L con dos plantas de caña de azúcar por maceta (variedad LCP 85-384). Cuando las plantas presentaron cinco hojas verdaderas, se iniciaron los experimentos utilizando un diseño de prueba de elección con tres repeticiones. Las repeticiones se dispusieron en jaulas metálicas de 1 m × 1 m × 1 m cubiertas con malla fina.

En una primera prueba de preferencia de oviposición se colocaron nueve macetas dentro de cada jaula: tres macetas fertilizadas con urea (48 % N), tres con CAN (27 % N) y tres sin fertilización. En pruebas posteriores de preferencia de oviposición, los tratamientos fueron: plantas de caña de azúcar irrigadas con CIR versus agua; plantas de caña de azúcar irrigadas con cachaza versus agua; y plantas de caña de azúcar irrigadas con CIR versus cachaza versus agua. Se colocaron tres macetas por tratamiento dentro de cada jaula experimental.

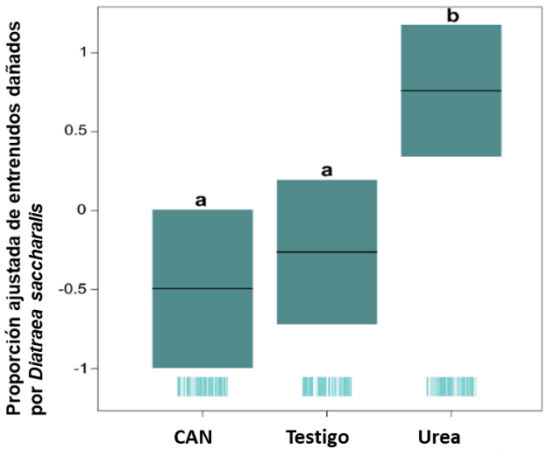
En cada ensayo se liberaron 10 parejas de adultos de *D. saccharalis* por jaula metálica. Después de 10 días, las hojas de caña de azúcar se examinaron individualmente y se registró el número de masas de huevos por planta y el número de huevos por masa.

RESULTADOS

Experimentos de campo

Se observaron diferencias significativas ($\chi^2 = 13{,}91$; gl = 2; $P < 0{,}001$; Figura 1) entre los tratamientos de fertilización. La mayor proporción de entrenudos perforados por *Diatraea saccharalis* se registró en el tratamiento con urea. La caña de azúcar fertilizada con CAN no presentó diferencias significativas en comparación con el control.

Figura 1. Proporción ajustada de entrenudos dañados por *D. saccharalis* en plantas de caña de azúcar fertilizadas con urea o CAN, o sin fertilización (Control). Diferentes letras indican



diferencias significativas (P ≤ 0,05) según todas las comparaciones múltiples por pares de las medias de mínimos cuadrados utilizando el método de corrección de Holm-Sidak.

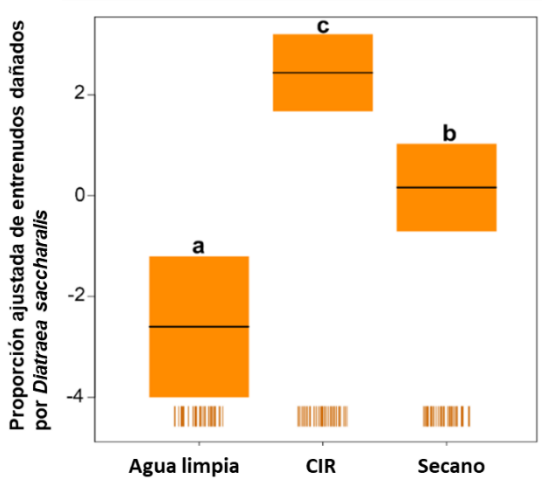


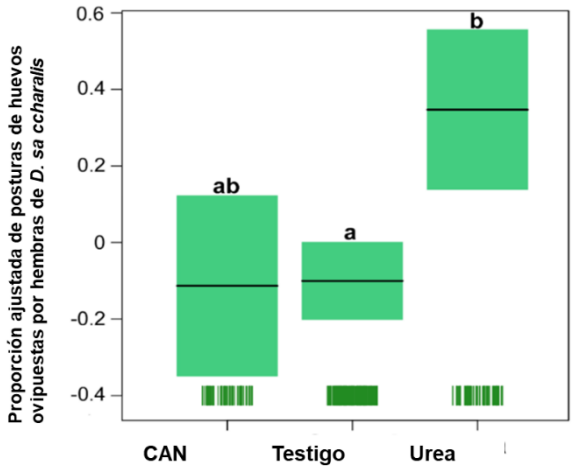
Figura 2. Proporción ajustada de entrenudos dañados por *D. saccharalis* en plantas de caña de azúcar irrigadas con residuos de la industria citrícola (CIR) o con agua limpia, o sin riego. Diferentes letras indican diferencias significativas (P ≤ 0,05) según todas las comparaciones múltiples por pares de las medias de mínimos cuadrados utilizando el método de corrección de Holm-Sidak.

Se observaron diferencias significativas (χ^2 = 74,26; gl = 2; P < 0,001; Figura 2) entre los tratamientos de riego. La mayor proporción de entrenudos perforados por *D. saccharalis* se registró en la caña de azúcar irrigada con CIR, en comparación con el riego con agua limpia y con la ausencia de riego.

Experimentos de preferencia de oviposición en condiciones de semicampo

Se observaron diferencias significativas (χ^2 = 14,96; gl = 2; P < 0,001; Figura 3) entre los tratamientos de fertilización nitrogenada. Se observó un mayor número de huevos en plantas de caña de azúcar fertilizadas con urea. No se registraron diferencias entre las plantas fertilizadas con CAN y el control.

Figura 3. Proporción ajustada de posturas de huevos por hembras de *D. saccharalis* en plantas de caña de azúcar fertilizadas con urea, CAN y sin fertilización (control). Diferentes letras indican diferencias significativas (P ≤ 0,05) según todas las comparaciones múltiples



por pares de las medias de mínimos cuadrados utilizando el método de corrección de Holm-Sidak.

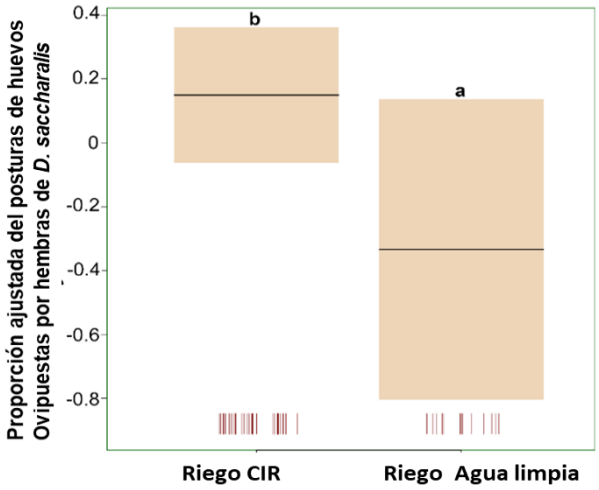


Figura 4. Número medio ajustado de huevos ovipositados por hembras de *D. saccharalis* en plantas de caña de azúcar irrigadas con residuos de la industria citrícola (CIR) y en plantas irrigadas únicamente con agua. Diferentes letras indican diferencias significativas (P ≤ 0,05) según todas las comparaciones múltiples por pares de las medias de mínimos cuadrados utilizando el método de corrección de Holm-Sidak.

Se observaron diferencias significativas entre la caña de azúcar irrigada con CIR y la caña de azúcar irrigada con agua (χ^2 = 5,46; gl = 1; P = 0,01; Figura 4). El mayor número de huevos se registró en las plantas de caña de azúcar irrigadas con CIR en comparación con el control.

También se observaron diferencias significativas entre la caña de azúcar irrigada con cachaza y la caña de azúcar irrigada con agua (χ^2 = 4,1; gl = 1; P = 0,04; Figura 5). El mayor número de huevos se registró en las plantas de caña de azúcar tratadas con cachaza en comparación con el control.

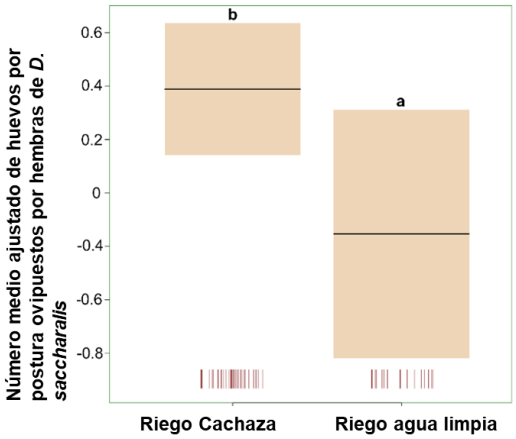


Figura 5. Número medio ajustado de huevos por postura ovipositados por hembras de *D. saccharalis* en plantas de caña de azúcar irrigadas con cachaza y en plantas irrigadas únicamente con agua. Diferentes letras indican diferencias significativas (P ≤ 0,05) según todas las comparaciones múltiples por pares de las medias de mínimos cuadrados utilizando el método de corrección de Holm-Sidak.

Además, los resultados mostraron diferencias significativas entre las plantas de caña de azúcar irrigadas con: CIR, Cachaza y Agua limpia (χ^2 = 12,33; gl = 2; P = 0,002; Figura 6). El mayor número de huevos por postura se registró en las plantas de caña de azúcar irrigadas con CIR.

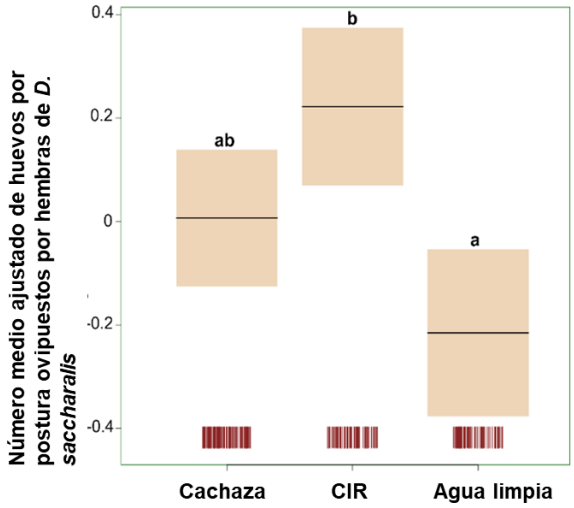


Figura 6. Número medio ajustado de huevos por postura puestos por hembras de *D. saccharalis* en plantas de caña de azúcar irrigadas con residuos de la industria citrícola (CIR), solo con agua y con cachaza. Diferentes letras indican diferencias significativas (P ≤ 0,05) según todas las comparaciones múltiples por pares de las medias de mínimos cuadrados utilizando el método de corrección de Holm-Sidak.

DISCUSIÓN

Nuestros ensayos de campo mostraron diferencias significativas en los niveles de infestación de *D. saccharalis* en caña de azúcar cuando se utilizó urea como fertilizante o riego por manto (CIR). En contraste, las plantas fertilizadas con nitrato de amonio cálcico (CAN) no presentaron diferencias significativas en comparación con el control. La aplicación

de Cachaza y CIR puede modificar la composición química de la planta al aumentar la concentración de azúcares solubles, aminoácidos o compuestos nitrogenados en los tejidos vegetales. Estos cambios podrían mejorar el atractivo de la planta y su valor nutricional para *D. saccharalis*, promoviendo así su desarrollo y oviposición. Nuestros hallazgos coinciden con los de Salvatore et al. (2016), Martínez (2012) y Atencio Valdespino et al. (2019), quienes informaron que la fertilización nitrogenada en caña de azúcar incrementa las infestaciones de *D. saccharalis*. Además, otros estudios han demostrado una relación directa entre la nutrición del cultivo y los ataques de insectos, donde los sistemas de cultivo fertilizados con nitrógeno muestran un mayor daño debido al crecimiento poblacional de insectos masticadores de hojas y ácaros (Nicholls y Altieri 2008).

Los ensayos de campo revelaron un patrón similar en la preferencia de oviposición de *D. saccharalis* al evaluar el número de huevos en plantas fertilizadas con urea y nitrato de amonio cálcico (CAN). Según Pérez y Cuevas (2018), los desequilibrios nutricionales o la aplicación excesiva de nitrógeno debido a una sobredosificación o una mala distribución del fertilizante aumentan los ataques de barrenadores en las plantas de arroz. Phelan et al. (1995) enfatizaron la necesidad de considerar otros mecanismos al examinar los vínculos entre el manejo de la fertilización y la susceptibilidad de los cultivos a las plagas de insectos. Sus estudios demostraron la preferencia de oviposición de los insectos defoliadores por plantas tratadas con nitrógeno químico. La aplicación de enmiendas minerales en los cultivos puede influir en la oviposición, las tasas de crecimiento, la supervivencia y la reproducción de los insectos que utilizan estas plantas como hospedantes. El aumento en los niveles de nitrógeno soluble en los tejidos vegetales puede reducir la tolerancia a las plagas, aunque esto podría no ser un fenómeno universal.

Las hembras de *D. saccharalis* depositaron un mayor número de huevos en plantas de caña de azúcar irrigadas con CIR y Cachaza como fertilizantes orgánicos, en comparación con el control irrigado con agua limpia. Los compuestos volátiles liberados por las plantas tratadas con estos residuos podrían resultar más atractivos para las hembras de *D. saccharalis*, promoviendo mayores tasas de oviposición. Los cambios en la composición química de las hojas y los tallos podrían influir en la preferencia alimentaria de las larvas, aumentando su supervivencia y desarrollo en estas plantas. Estas hipótesis deberían evaluarse en estudios futuros.

CONCLUSIONES

Este es el primer estudio que presenta el impacto del riego con residuos de la industria citrícola (CIR) en las infestaciones de *D. saccharalis* en caña de azúcar, mostrando un aumento en las infestaciones y en el número de huevos puestos por las hembras. El aumento de las infestaciones de *D. saccharalis* en plantas con Cachaza y CIR sugiere que estos tratamientos afectan las interacciones planta-insecto, posiblemente al mejorar la calidad nutricional de la planta huésped o al debilitar sus defensas. Esto podría tener implicaciones para el manejo de plagas en los cultivos de caña de azúcar y justificar estudios adicionales sobre la relación entre la fertilización, la microbiota del suelo y la resistencia de la planta.

BIBLIOGRAFÍA

Atkinson PR, Nuss KJ. 1989. Associations between host-plant nitrogen and infestations of the sugarcane borer, *Eldana saccharina* Walker (Lepidoptera: Pyralidae). *Bulletin of Entomological Research* 79: 489-506.

Atencio Valdespino R, Goebel FR, Guerra A. 2019. Effect of silicon and nitrogen on *Diatraea tabernella* Dyar in sugarcane in Panama. *SugarTech* 21: 113-121.

Chaboussou F. 2006. *Plantas doentes pelo uso de agrotóxicos: a teoria da trofobiose. 2ed.* Porto Alegre, L&PM. 272 pp.

Fernández FJ, Hodaifa G. 2014.Valorization of citrus by-products in agriculture: compost and vermicompost production and application. In: Galanakis, C. M. (Ed.), *Food Waste Recovery: Processing Technologies and Industrial Techniques.* Elsevier, Amsterdam, pp. 263-286.

Gava GJC. 2003. Uso de subprodutos da indústria sucroalcooleira como fertilizantes. In: Dinardo-Miranda LL, Vasconcelos ACM. Landell MGA (Eds.), *Cana-de-açúcar*. Campinas: Instituto Agronômico, pp. 421-446.

Goebel FR, Sallam N. 2011. New pest threats for sugarcane in the new bioeconomy and how to manage them. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 3: 81-89.

Martínez G. 2012. Aplicación de dosis creciente de nitrógeno y su efecto sobre la producción de caña de azúcar y el ataque de *Diatraea saccharalis* F. Tesis para optar al título de Ingeniero Agrónomo, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Asunción, San Lorenzo, Paraguay, 67 pp.

Morandini M, Sotomayor C, Quaia E, *et al*. 2015. Manejo de efluentes industriales en la provincia de Tucumán. Aportes de la EEAOC al dictado de las resoluciones de la Secretaria de Estado de Medio Ambiente de la provincia de Tucumán. *Avance Agroindustrial* 36: 40-43.

Nicholls C, Altieri M. 2008. Suelos saludables, plantas saludables: la evidencia agroecológica. evista de Agroecológica. *LEISA* 24(2): 6-8.

Pannuti LER, Baldin ELL, Castro Gava GJ, Gonçalves Franco da Silva JP, de Santana Souza E, Kölln OT. 2014. Interaction between N-fertilizer and water availability on borer-rot complex in sugarcane *Bragantia, Campinas* 74: 75-83.

Pérez C, Cuevas A. 2018. *Manejo Integrado de insectos en el cultivo del arroz.* FEDEARROZ - Fondo Nacional del ARROZ. Manual Tecnico. Bogota, Colombia. 64 pp.

Phelan PL, Mason JF, Stinner BR. 1995. Soil fertility management and host preference by European corn borer, *Ostrinia nubilalis*, on *Zea mays*: a comparison of organic and conventional chemical farming. *Agriculture, Ecosystems and Environment* 56:1-8.

Romero ER, Alonzo L, Casen S, *et al.* 2009. Fertilización de la caña de azúcar. Criterios y recomendaciones. In: *El Manual del Cañero* (Romero ER, Digonzelli PA, Scandarialis J Eds. Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres, Tucumán, pp. 87-100.

Salvatore AR, Isas MG, Pérez PML, *et al.* 2016. Incidence of *Diatraea saccharalis* attack on irrigated and nitrogen-fertilized sugarcane in Tucumán, Argentina. *Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists* 29: 415-419.

Schoonhoven LM, Van Loon JJ, Dicke M. 2005. *Insect-plant biology*. Oxford University Press, Oxford.

Stasinopoulos DM, Rigby RA, Heller GZ, Voudouris V, De Bastiani F. 2017. *Flexible regression and smoothing: using GAMLSS*. Chapman and Hall /CRC, Florida, USA.

Steward W. 2001. Fertilizantes y el ambiente. Instituto de la Potasa y el Fósforo. *Informaciones Agronómicas* 44: 6-7.

EFICACIA E INDICADORES ECONÓMICOS Y AMBIENTALES PARA EL MANEJO SOSTENIBLE DE DIATRAEA SACCHARALIS EN CAÑA DE AZÚCAR

Pérez[1], M. L. del P.; Isas[2], M. G.; Brito[3], E.; Carabaca[1] L.; Hernández[4] D; Rodríguez D.; Gastaminza[4] G

1 AACREA, Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.
2 Bulacio Argenti SA, Ruta 302 km 7, Cevil Pozo, Tucuman, R. Argentina.
3 Cía. Azucarera Los Balcanes, La Florida, Departamento Cruz Alta, R. Argentina.
4 Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC), Las Talitas, Tucumán, R. Argentina.

Palabras clave: sostenibilidad, manejo de plagas, costo, beneficio económico.

Introducción

El barrenador del tallo de la caña de azúcar, *Diatraea saccharalis* (Fabricius) (Lepidoptera: Crambidae), constituye la plaga insectil de mayor importancia económica en los sistemas cañeros de Argentina y de gran parte de América Latina. El daño ocasionado por las larvas, que se alimentan y desarrollan dentro del tallo, provoca pérdidas directas de rendimiento y disminución del contenido de sacarosa, con impacto negativo tanto a nivel de campo como industrial.

Si bien existe abundante información sobre la biología, ecología y dinámica poblacional de *D. saccharalis*, el control químico continúa siendo un desafío. El rápido ingreso de las larvas al interior del tallo reduce la ventana de exposición a los insecticidas, lo que obliga a realizar aplicaciones oportunas basadas en monitoreo y umbrales económicos, pilares fundamentales del manejo integrado de plagas (MIP). En este contexto, el desarrollo y adopción de insecticidas con modos de acción más selectivos ha cobrado relevancia. Metoxifenozide, un regulador del crecimiento de insectos (IGR) con acción como antagonista de ecdisona, presenta alta selectividad hacia larvas de lepidópteros. Clorantraniliprole, perteneciente al grupo de las diamidas, actúa sobre los receptores de rianodina y se caracteriza por su elevada eficacia y persistencia. No obstante, las diferencias en costo, estabilidad económica e impacto sobre organismos no blanco requieren una evaluación integral para su correcta inserción en programas de MIP.

En la actualidad, la toma de decisiones en sanidad vegetal demanda no solo eficacia biológica, sino también sostenibilidad económica y ambiental. Herramientas como el Cociente de Impacto Ambiental (EIQ) y PRORIPEST permiten cuantificar riesgos potenciales para operarios, consumidores, organismos benéficos y el ambiente. Integrar estos indicadores con el análisis económico ofrece una visión más completa del desempeño de las estrategias de control.

El objetivo de este trabajo fue realizar una evaluación integrada del uso de metoxifenozide y clorantraniliprole para el manejo de *D. saccharalis* en caña de azúcar, combinando información de eficacia a campo, análisis económico extendido, impacto sobre enemigos naturales y evaluación del riesgo ambiental.

Materiales y Métodos

Ensayos a campo y evaluación de eficacia

Entre los años 2017 y 2022 se llevaron ensayos a campo en lotes comerciales de caña de azúcar en la provincia de Tucumán, Argentina. Se evaluaron dos tratamientos insecticidas: metoxifenozide (Intrepid®), con una dosis de 48 g de ingrediente activo (i.a.) ha^{-1} y clorantraniliprole (Coragen®) aplicado a 50 g i.a. ha^{-1}. La decisión de aplicación se tomó en base al monitoreo de porcentaje de infestación de larvas, el cual se estimó aplicando la siguiente fórmula: número de tallos con presencia de larvas chicas vivas/número total de tallos*100. Las aplicaciones se realizaron por vía aérea (avión aplicador) cuando el monitoreo indicó que la infestación superaba el umbral económico de 5 % de tallos con larvas chicas. Los ensayos se dispusieron bajo un diseño en bloques completos aleatorizados

(DBCA) con cuatro repeticiones. Se incluyó un tratamiento testigo sin aplicación. A cosecha se evaluó el daño registrando el porcentaje de intensidad de infestación (II %) aplicando la siguiente formula: Número de entrenudos perforados/Numero de entrenudos totales*100.

Análisis económico

El desempeño económico de los tratamientos se evaluó mediante tres indicadores: costo de control (USD ha^{-1} y Bolsas de azúcar ha^{-1}), Ingreso marginal (USD ha^{-1} y Bolsas de azúcar ha^{-1}) y beneficio marginal (USD ha^{-1} y Bolsas de azúcar ha^{-1}).

En primer lugar, se calculó para cada insecticida evaluado la reducción promedio de entrenudos perforados de todos los ensayos realizados con cada insecticida:

Reducción de entrenudos perforados (RII) = (II parcelas testigo – II parcelas tratadas).

En segundo lugar, se estimó la pérdida de azúcar a partir de la tasa de pérdida de sacarosa estimada por *Salvatore et al.* (2010), para un rendimiento cultural de 60 t/ha. Con el valor promedio de mercado del azúcar correspondiente a cada año (Fuente CACTU), se calculó el ingreso marginal de acuerdo con la siguiente expresión:

Ingreso marginal = RII × tasa de pérdida de azúcar × precio promedio anual del azúcar (USD) × porcentaje de maquila.

Para el cálculo del costo de control se consideró el precio de los insecticidas comerciales, incluyendo además los costos de monitoreo y de aplicación aérea.

Finalmente, el beneficio neto se calculó como la diferencia entre el ingreso marginal y el costo de control. El análisis se extendió al período 2017–2025, incorporando la actualización de costos y condiciones de mercado.

Evaluación del impacto sobre parasitoides

El impacto potencial sobre enemigos naturales se evaluó mediante bioensayos de laboratorio utilizando masas de huevos de *D. saccharalis* naturalmente parasitadas por *Trichogramma* sp. Las hojas de caña con huevos parasitados se recolectaron en el campo y se sumergieron durante 10 segundos en una solución de clorantraniliprole al 0,50% (dosis de campo) o en agua (control). Cada hoja se colocó en un recipiente plástico de 250 mL, cerrado con tela voile y banda elástica. Luego de siete días bajo condiciones controladas, se registró la emergencia de parasitoides y la presencia de anormalidades. Los datos se analizaron mediante análisis de varianza (ANOVA) con un nivel de significancia de $\alpha = 0,05$.

Evaluación del impacto ambiental

El impacto ambiental se evaluó utilizando dos herramientas complementarias: el Cociente de Impacto Ambiental (EIQ) y PRORIPEST. Los valores de EIQ se calcularon mediante la calculadora de Gestión Ambiental CREA, estimando los componentes de riesgo para el operario, el consumidor y el riesgo ecotoxicológico, así como el EIQ total como promedio ponderado de dichos componentes.

PRORIPEST se utilizó para estimar un índice de riesgo ambiental (R), integrando peligro ecotoxicológico, presencia ambiental, probabilidad de exposición y riesgo total. Los datos de entrada provinieron de marbetes aprobados por SENASA y de bases de datos internacionales, como la Pesticide Properties Database (PPDB). El índice R varía entre 0 (riesgo despreciable) y 1 (máximo riesgo registrado).

Resultados

Eficacia de control

Los resultados de los ensayos a campo mostraron una reducción significativa de la intensidad de infestación (II %) de *D. saccharalis* en ambos tratamientos insecticidas respecto al testigo sin aplicación (Figuras 1 y 2). En el caso de clorantraniliprole, la reducción del daño osciló entre 58 y 89%, evidenciando una elevada eficacia y una marcada respuesta en la mayoría de los sitios evaluados. Metoxifenozide presentó reducciones de la infestación más moderadas, con valores comprendidos entre 30 y 69%, aunque con un comportamiento más homogéneo entre ensayos.

El análisis comparativo por sitio mostró que clorantraniliprole tendió a maximizar el nivel de control en situaciones de mayor presión de la plaga, mientras que metoxifenozide mantuvo un control consistente aun cuando la magnitud de la respuesta fue inferior. Esta diferencia se refleja en los valores promedio, donde clorantraniliprole presentó la mayor reducción media de entrenudos dañados, mientras que metoxifenozide evidenció menor variabilidad entre repeticiones.

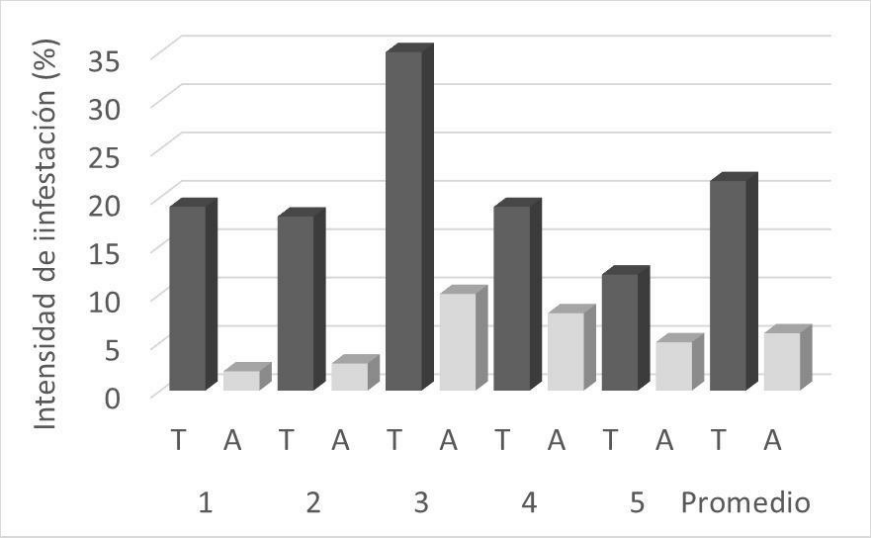


Figura 1. Intensidad de infestación (II %) de *Diatraea saccharalis* en parcelas testigo (T) y tratadas (A) con clorantraniliprole en cinco sitios experimentales y promedio general.

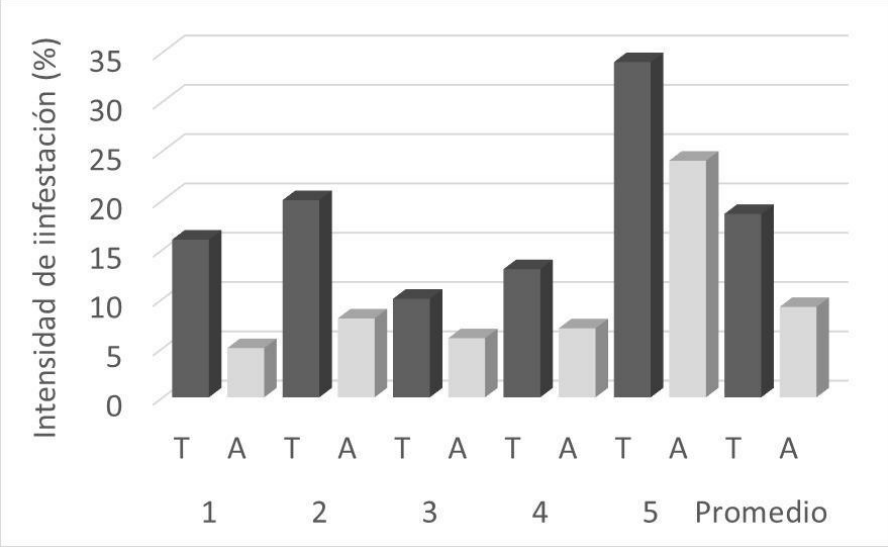


Figura 2. Intensidad de infestación (II %) de *Diatraea saccharalis* en parcelas testigo (T) y tratadas (A) con metoxifenozide en cinco sitios experimentales y promedio general.

Impacto económico

El análisis económico anual (2017–2025) evidenció contrastes claros entre ambos insecticidas en términos de costo de control, ingreso marginal y beneficio marginal (Figuras 3 y 4). Metoxifenozide presentó un costo de control bajo y estable a lo largo del período analizado, lo que se tradujo en beneficios marginales positivos y relativamente constantes entre años. Si bien los ingresos marginales fueron moderados, la baja inversión requerida

permitió sostener retornos económicos favorables incluso en campañas con menor presión de la plaga o precios menos favorables del azúcar.

En contraste, clorantraniliprole mostró ingresos marginales más elevados, alcanzando picos de beneficio marginal en años puntuales. Sin embargo, su mayor costo de control generó una mayor variabilidad interanual en el beneficio marginal, con años de retornos elevados y otros de resultados económicos ajustados. Estos resultados reflejan un claro compromiso entre maximización de la eficacia y estabilidad económica, donde clorantraniliprole ofrece mayores retornos potenciales y metoxifenozide mayor previsibilidad.

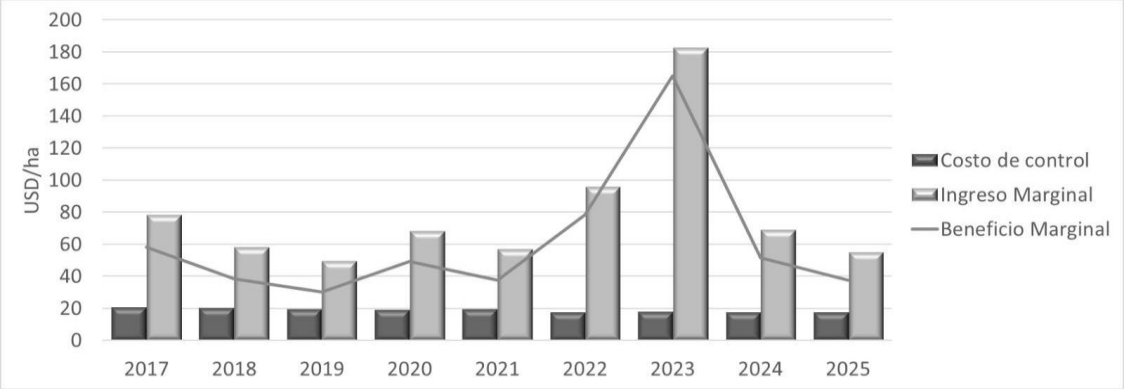


Figura 3. Evolución anual del costo de control, ingreso marginal y beneficio marginal del tratamiento (USD) con Metoxifenozide en el período 2017–2025.

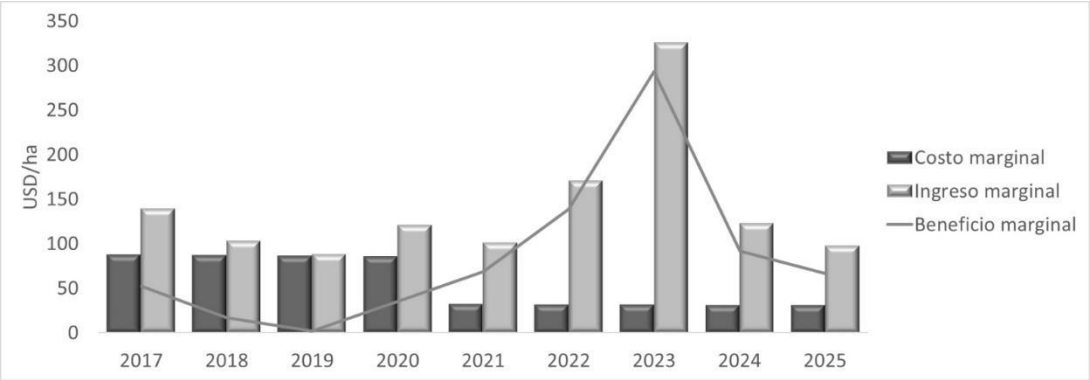


Figura 4. Evolución anual del costo de control, ingreso marginal y beneficio marginal (USD) del tratamiento con *Clorantraniliprole* en el período 2017–2025.

Impacto sobre enemigos naturales y riesgo ambiental

En los bioensayos de laboratorio, la emergencia de *Trichogramma* spp. fue del 97% en hojas tratadas con *Clorantraniliprole* y del 93% en el control con agua, sin diferencias estadísticamente significativas ($p = 0,45$). Estos resultados indican que la aplicación del insecticida, bajo las condiciones evaluadas, no afectó el desarrollo del parasitoide.

Los indicadores ambientales EIQ y PRORIPEST mostraron valores bajos para ambos insecticidas, aunque con diferencias en la composición de los riesgos evaluados. En el análisis mediante EIQ, metoxifenozide presentó mayores valores de riesgo para el operario (3,007) y riesgo ecológico (3,524) en comparación con clorantraniliprole (2,136 y 1,736, respectivamente), mientras que el riesgo para el consumidor fue superior en clorantraniliprole (1,736) respecto a metoxifenozide (0,893). Como resultado de estos componentes, el EIQ total fue ligeramente mayor para metoxifenozide (2,475) que para clorantraniliprole (1,869), aunque ambos se ubicaron en rangos considerados de bajo impacto ambiental.

El análisis mediante PRORIPEST confirmó estos resultados, con valores muy bajos del índice global de riesgo ambiental (R), de 0,002 para metoxifenozide y 0,003 para clorantraniliprole. La presencia ambiental estimada fue similar para ambos insecticidas, con valores comparables en suelo (0,04), aire (0,6), agua superficial (0,02) y agua subterránea (0,5). En conjunto, estos indicadores evidencian que tanto metoxifenozide como clorantraniliprole presentan un riesgo ambiental reducido y compatible con su utilización dentro de programas de manejo integrado de *D. saccharalis*.

Conclusiones

Los resultados obtenidos confirman que ambos insecticidas evaluados son alternativas viables para el manejo de *D. saccharalis* en caña de azúcar, aunque presentan perfiles diferenciados en términos de eficacia y desempeño económico. Clorantraniliprole mostró la mayor reducción del daño, especialmente bajo condiciones de alta presión de la plaga, lo que se tradujo en mayores ingresos marginales en campañas favorables. Sin embargo, su mayor costo de control generó una elevada variabilidad interanual en el beneficio marginal.

Metoxifenozide, en cambio, presentó una eficacia más moderada pero consistente, asociada a un bajo y estable costo de control. Esta combinación permitió obtener retornos económicos positivos y previsibles a lo largo del período analizado, incluso en escenarios de menor presión de infestación o precios menos favorables del azúcar.

Desde el punto de vista ecológico y ambiental, ninguno de los tratamientos afectó significativamente la emergencia de *Trichogramma* spp. bajo condiciones controladas, y los indicadores EIQ y PRORIPEST confirmaron un bajo riesgo ambiental para ambos insecticidas. En conjunto, la integración de indicadores de eficacia, económicos y ambientales respalda la incorporación de metoxifenozide y clorantraniliprole dentro de programas de manejo integrado de *D. saccharalis*, favoreciendo estrategias de control más eficientes, sustentables y adaptadas a las condiciones productivas del sector cañero.

Citas bibliográficas

Centro Azucarero y Alcoholero de Tucumán (CACTU). Publicaciones técnicas y estadísticas del sector sucroalcoholero. San Miguel de Tucumán, Argentina. Disponible en: https://www.cactu.org.ar

CREA. Gestión Ambiental CREA (GAC): Herramientas para la evaluación del impacto ambiental en sistemas productivos. Disponible en: https://www.crea.org.ar/gestion-ambiental

INTA. PRORIPEST / RiPEST: Herramienta para la evaluación del riesgo ambiental de productos fitosanitarios. Disponible en: https://inta.gob.ar/documentos/proripest-herramienta-para-evaluacion-de-riesgo-ambiental

Salvatore, A.R., M.B. García, E. Romero, and E. Willink. 2010. Sugar losses caused by the sugarcane borer (Diatraea saccharalis) in Tucumán, Argentina. Proceeding International Society Sugarcane Technologist. 27: 1–9.

PRINCIPALES ENFERMEDADES QUE AFECTARON AL CULTIVO DE LA CAÑA DE AZÚCAR EN TUCUMÁN DURANTE LA CAMPAÑA 2024/2025

Lobo, J. A.[1]; Huvierne, L. G.[1]; Monachesi, M. A.[2] y Joya, C.M.[2]

[1]Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC). Av. William Cross 3150, C.P. T4101XAC, Las Talitas, Tucumán, R. Argentina. jalobo@eeaoc.org.ar
[2]Instituto de Tecnología Agroindustrial del Noroeste Argentino (ITANOA), Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC) - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Las Talitas, Tucumán, República Argentina, T4101XAC

Palabras clave: monitoreo, estado sanitario, comportamiento varietal.

Introducción

Comprender el comportamiento varietal y la dinámica epidemiológica en las distintas zonas productoras de la provincia es fundamental para el diseño de estrategias de manejo integrado. Con este objetivo, la Sección Fitopatología de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC) lleva a cabo relevamientos fitosanitarios durante cada campaña agrícola, generando información que facilita al productor la toma de decisiones para preservar el estatus sanitario del cultivo.

El escenario fitosanitario en Tucumán es dinámico y está influenciado por factores como la aparición de nuevas variantes de patógenos y los impactos del cambio climático. Enfermedades como el carbón de la caña de azúcar (*Sporisorium scitamineum*), que mostró un resurgimiento notable en 2020/2021 (Bertani *et al*., 2021), conviven con patologías de aparición estacional como la roya marrón (*Puccinia melanocephala*), cuya manifestación puede variar entre campañas. Asimismo, el monitoreo constante permite evaluar la incidencia de patologías como la estría roja (*Acidovorax avenae* subsp. *avenae*) y otras enfermedades de importancia secundaria como Pokkah boeng (complejo *Fusarium fujikuroi*) y mancha en ojo (*Bipolaris sacchari*).

Finalmente, el raquitismo de la caña soca (RSD), causado por la bacteria *Leifsonia xyli* subsp. *xyli*, es una de las enfermedades sistémicas de mayor impacto económico en el cultivo de caña de azúcar (Joya *et al*., 2015). Dado que su diseminación ocurre principalmente a través del uso de "caña semilla" infectada y herramientas de corte contaminadas, el diagnóstico preciso constituye una herramienta fundamental que el Laboratorio de la Sección Fitopatología pone a disposición del sector productivo.

En este trabajo, se presenta el estado sanitario de la caña de azúcar en Tucumán durante la campaña 2024/2025, a partir del monitoreo de lotes comerciales y los resultados del servicio de diagnóstico de RSD que la Sección Fitopatología brinda a los productores.

Materiales y métodos

Prospección de enfermedades en los cañaverales de Tucumán

Entre septiembre de 2024 y abril de 2025, se llevó a cabo el relevamiento fitosanitario en los cañaverales de Tucumán. Este estudio incluyó la evaluación de las variedades: LCP 85-384, TUC 97-8, TUCCP 77-42, TUC 00-19, TUC 03-12, TUC 06-7, TUC 02-22 y TUC 00-65. Se consideraron diferentes edades del cultivo, desde caña planta hasta soca 6. Las evaluaciones se realizaron en los departamentos: Burruyacú, Chicligasta, Cruz Alta, Famaillá, Graneros, Juan Bautista Alberdi, La Cocha, Leales, Lules, Río Chico, Simoca y Tafí Viejo.

Evaluación de la prevalencia e incidencia del carbón de la caña de azúcar

Entre octubre de 2024 y enero de 2025, se realizó un relevamiento en 135 lotes comerciales con el objetivo de determinar la prevalencia (porcentaje de lotes afectados) y la incidencia (porcentaje de tallos enfermos) del carbón de la caña de azúcar. Se implementó una metodología estandarizada, delimitando cuatro sitios de muestreo por hectárea, compuestos por cuatro surcos de 5 metros lineales cada uno. En estos puntos se procedió al conteo de tallos totales y tallos enfermos.

Evaluación de la severidad de roya marrón

Se evaluaron 103 lotes distribuidos en distintos departamentos de la provincia. La severidad se estimó a partir de 20 puntos de muestreo aleatorios por lote, utilizando la escala diagramática de 1 a 9 propuesta por Amorin *et al*. (1987), la cual se correlaciona con el porcentaje de área foliar afectada. En dicha escala, el valor 4 se considera un umbral de referencia: valores inferiores indican un comportamiento resistente, mientras que valores superiores, susceptibilidad.

Prospección de estría roja de la caña de azúcar

Entre diciembre de 2024 y abril de 2025 se llevó a cabo la prospección de estría roja en el área cañera de Tucumán. A diferencia de campañas anteriores, este año se extendió el período de monitoreo, debido a que en ciclos previos se había registrado una aparición temprana de la enfermedad. Se evaluaron 82 lotes distribuidos en los departamentos de Burruyacú, Cruz Alta, Graneros, Juan Bautista Alberdi, Leales, Lules, Río Chico, Simoca y Tafí Viejo. En cada lote, se establecieron diez puntos muéstrales aleatorios de 5 m lineales cada uno y se registró el número de tallos con síntomas de la enfermedad. Adicionalmente, se seleccionaron cinco puntos muéstrales aleatorios de 1 m lineal cada uno, en los que se contabilizo la población total de tallos.

Enfermedades secundarias detectadas durante la campaña

Por segunda campaña consecutiva, los cañaverales de Tucumán se vieron afectados por la presencia de Pokkah boeng (PB) y mancha en ojo (MO). La evaluación de estas enfermedades se realizó utilizando incidencia para PB y severidad para MO, esta última determinada a través de una escala visual de 0 a 9, donde cada valor representa un porcentaje de tejido foliar afectado.

Análisis de la incidencia de RSD en lotes comerciales

Un factor clave para una buena plantación es el uso de “caña semilla” de alta calidad, por lo cual resulta fundamental conocer el estado sanitario de los lotes destinados a semilleros. La Sección Fitopatología recomienda no utilizar como “caña semilla” aquellos lotes cuyas muestras presenten un nivel de infección de RSD mayor al 5% (Joya *et al.,* 2024). Entre marzo y junio del 2025 en el Laboratorio de Diagnóstico de la Sección Fitopatología, se recibieron 627 muestras de tallos provenientes de lotes comerciales, con el objetivo de detectar la bacteria *Leifsonia xyli* subsp. *xyli*, agente causal del RSD. El diagnóstico se realizó empleando la técnica serológica TBIA (Tissue Blot Immunoassay), utilizando el tercio basal de aproximadamente 20 tallos por muestra. Para cada una de ellas se calculó el porcentaje de incidencia (nº de tallos enfermos/nº total de tallos x 100) y luego se agruparon por rangos de incidencia de la enfermedad.

Resultados

El carbón de la caña de azúcar presentó una marcada disminución durante la campaña 2024/2025

La prevalencia de carbón observada en los cañaverales de Tucumán durante esta campaña fue del 28,1%, lo que representa una disminución significativa respecto a campañas anteriores. Este menor nivel de la enfermedad puede atribuirse a las condiciones climáticas predominantes. El desarrollo del carbón de la caña de azúcar requiere temperaturas cálidas (25°C a 30°C) y períodos de sequía (Bertani *et al*., 2021). Si bien la campaña 2024/2025 se caracterizó por presentar temperaturas medias cercanas a los 24°C, las precipitaciones registradas entre octubre y noviembre fueron superiores a los promedios históricos (Forciniti, 2025), lo que limitó la manifestación de la enfermedad, manteniéndola en niveles bajos. LCP 85-384 continúa siendo la variedad más susceptible, con una prevalencia del 66,7% (Figura 1) y valores máximos de incidencia de carbón superiores al 30% en los departamentos de Graneros (33%) y Burruyacú (31%) (Figura 2). En contraste, los cultivares TUC desarrollados por el Subprograma de Mejoramiento Genético de Caña de Azúcar (SMGCA-EEAOC), no

mostraron síntomas de la enfermedad o, en su defecto, solo presentaron trazas en algunos lotes (Figura 1).

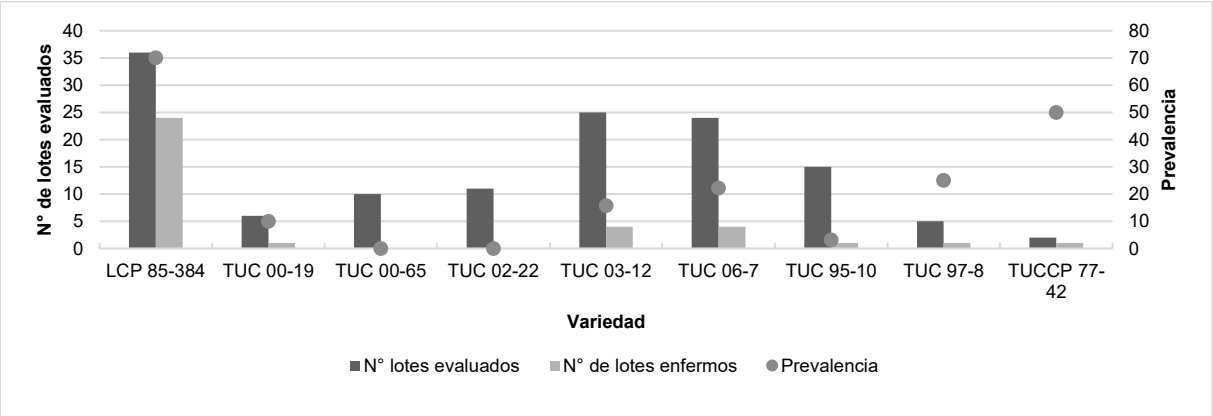


Figura 1. Número de lotes evaluados, número de lotes enfermos y prevalencia de carbón en diferentes variedades de caña de azúcar en Tucumán. Campaña 2024/2025.

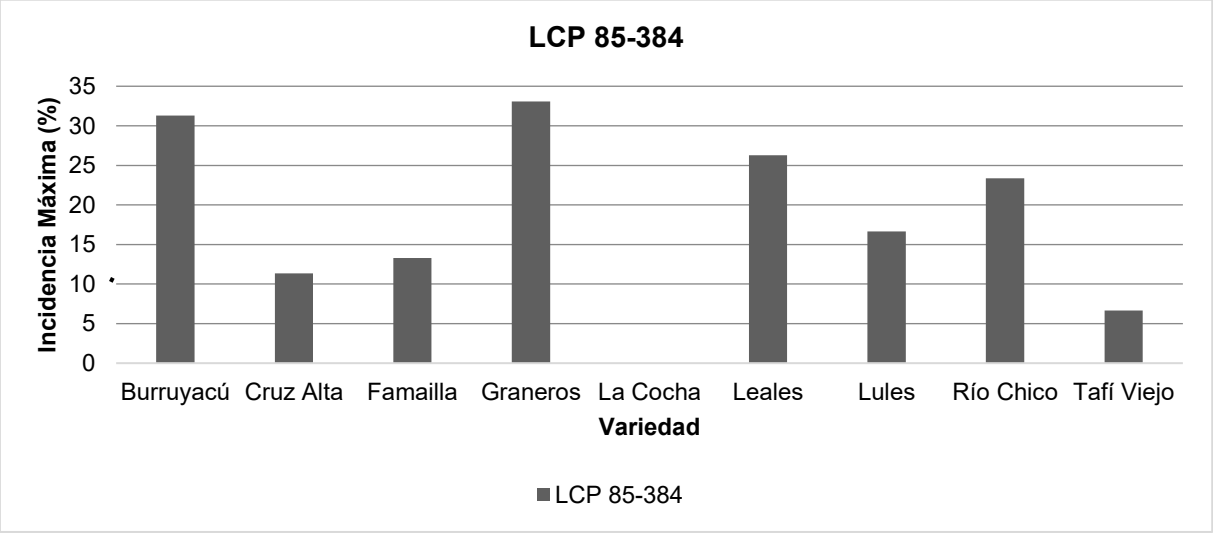


Figura 2. Valores máximos puntuales de incidencia de carbón en la variedad LCP 85-384 en diferentes departamentos de Tucumán, campaña 2024/2025. (·) La línea horizontal indica un valor de incidencia del 10 %.

LCP 85-384 continúa siendo la variedad más afectada por roya marrón

En septiembre de 2024 se detectó, de forma anticipada, la presencia de roya marrón en un lote ubicado en el departamento de Lules, correspondiente a la variedad TUC 06-7 en edad de soca 1, con un valor de severidad de 9. Ante esta situación, se comenzó con el monitoreo fitosanitario en los cañaverales de la provincia, observándose una presencia generalizada de la enfermedad a partir de diciembre, determinándose una prevalencia provincial de roya marrón del 56,3%. LCP 85-384 presentó los mayores promedios de severidad, superando el valor de 4 en seis departamentos. Las variedades TUC 06-7 y TUC 95-10 también mostraron una susceptibilidad considerable, registrando valores de severidad iguales o superiores a 4 en tres y cuatro departamentos, respectivamente (Figura 3). Es importante señalar que, el valor máximo de severidad observado es en la variedad TUC 06-7, en el departamento de Burruyacú, donde corresponde a un único lote evaluado. El resto de las variedades TUC evaluadas presentaron ausencia o niveles muy bajos de roya marrón.

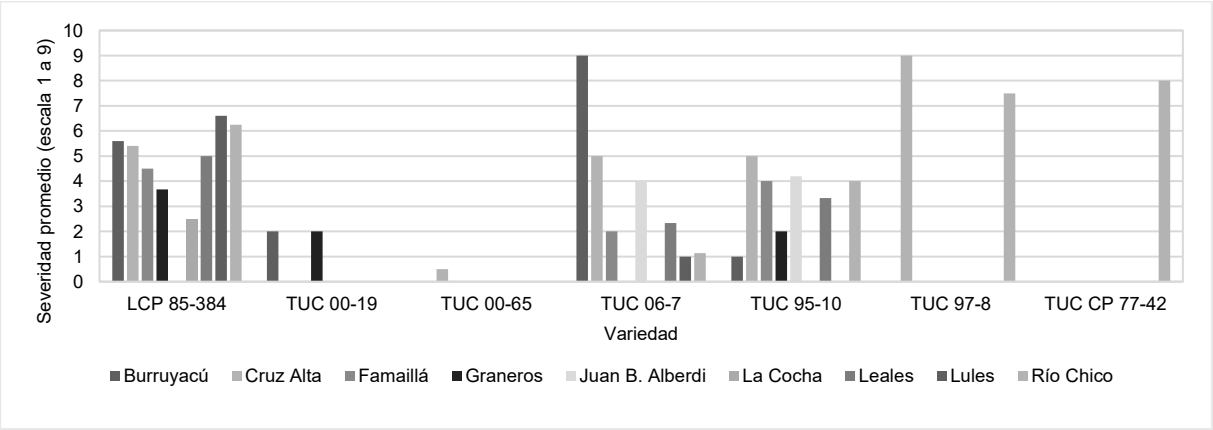


Figura 3. Valores máximos promedios de severidad de roya marrón, en diferentes variedades de caña de azúcar por departamento de la provincia de Tucumán, campaña 2024/2025. (-) La línea horizontal indica un valor de severidad de 4, valor donde se produce un cambio de reacción de resistente a susceptible.

La estría roja registró una baja prevalencia en las zonas productoras de Tucumán

La prevalencia de estría roja en Tucumán fue baja (2,4%), con síntomas detectados únicamente en dos lotes durante el mes de diciembre. En uno de ellos, ubicado en El Chañar (Burruyacú), la variedad TUC 06-7 presentó una incidencia promedio de ER del 14,1% y de polvillo menor al 1%. En otro lote situado en Simoca, la variedad TUC 00-19 exhibió incidencias promedio de ER y P del 1,3% y 0,1%, respectivamente. Cabe señalar que en campañas anteriores, ambas variedades se destacaron por ser las más afectadas por esta enfermedad. En evaluaciones realizadas en los lotes inicialmente afectados y en otras áreas con antecedentes de la enfermedad, no se observaron síntomas durante los meses siguientes. Las condiciones climáticas de la campaña, con lluvias abundantes en primavera y un mes de enero con precipitaciones irregulares (Forciniti, 2025), probablemente interrumpieron el ciclo del patógeno al no mantenerse una humedad foliar sostenida. Estos resultados destacan el rol del clima en la aparición de la estría roja y la importancia de un monitoreo preventivo, especialmente en variedades susceptibles.

El monitoreo detectó la presencia de mancha en ojo y Pokkah boeng

En cuanto a MO, los niveles más altos de severidad se registraron entre febrero y marzo. La variedad TUC 06-7 fue la más afectada, con valores de severidad que oscilaron entre 5 y 8. Respecto a PB, en diciembre se detectó un valor de incidencia del 24,0% en un lote puntual ubicado en la localidad de Donato Álvarez, departamento de Juan Bautista Alberdi, en la variedad TUC 06-7, en edad de planta. Las variedades LCP 85-384 y TUC 03-12 solo mostraron trazas de ambas enfermedades, mientras que el resto de las variedades TUC presentaron un buen comportamiento sanitario frente a ellas.

Diagnóstico de RSD en muestras de lotes comerciales

En el 76,1% de las muestras evaluadas no se detectó la bacteria causal del RSD. Por otro lado, el 85,5% de las muestras resultó apta para ser utilizada como “caña semilla” en las nuevas plantaciones (incidencia ≤ 5%) (Tabla 1), resaltando la eficiencia del esquema de producción y multiplicación de semilla de alta calidad.

Tabla 1. Incidencia del raquitismo de la caña soca (RSD) en muestras de lotes comerciales procesa das en el laboratorio de la Sección Fitopatología-EEAOC durante el período marzo-junio 2025.

Rangos de incidencia de RSD (%)	N° muestras	Porcentaje de muestras (%)
0	477	76,1
> 0 ≤ 5	59	9,4
> 5 ≤ 10	30	4,8
> 10	61	9,7
Total	627	-

Conclusiones

La disminución de la prevalencia del carbón durante la campaña 2024/2025 no debe interpretarse como una reducción de su riesgo epidemiológico. Esto se debe a que el patógeno sigue presente y con potencial de desarrollo, especialmente en la variedad LCP 85-384, bajo condiciones ambientales favorables. En contraste, los cultivares TUC continúan ofreciendo una respuesta sanitaria favorable, reafirmando su valor como una herramienta clave en el manejo integrado de la enfermedad.

En las dos últimas campañas la roya marrón se manifestó de forma anticipada, lo que subraya la necesidad de adelantar las evaluaciones fitosanitarias. En 2024/2025, LCP 85-384 mantuvo su alta susceptibilidad, registrando los valores más elevados de severidad y prevalencia. Le siguieron en importancia las variedades TUC 06-7 y TUC 95-10.

La estría roja presentó baja prevalencia en Tucumán. Se detectaron síntomas en dos lotes ubicados en distintas localidades, correspondientes a las variedades TUC 06-7 y TUC 00-19, lo que evidencia una predisposición de estos cultivares a expresar sintomatología. No se observó reaparición de la enfermedad en visitas posteriores ni en otras zonas con antecedentes. La falta de humedad foliar sostenida, consecuencia de la variabilidad climática durante la campaña, podría haber interrumpido el ciclo del patógeno.

En cuanto al estado sanitario de los lotes semilleros, más del 85% de las muestras analizadas en el laboratorio de la Sección Fitopatología resultaron aptas para su empleo como “caña semilla” por presentar incidencia de RSD inferior al 5%.

Citas bibligráficas

Amorim, L.; Bergamin Filho, A.; Sanguino, A.; Cardoso, C.O.N.; Moraes, V.A. y C. Fernandes R. (1987). Metodologia de avaliação da ferrugem da cana-de-açúcar (Puccinia melanocephala). Boletim Técnico Copersucar, 39, 13-16.

Bertani, R.P., Gutierrez, H., Funes, C., Joya, C.M., Chaves, S., Lobo, J.A., Monachesi, M.A., González, V., & Cuenya, M.I. (2023). Evaluación de la incidencia del carbón de la caña de azúcar en variedades comerciales cultivadas en Tucumán durante el año 2020. Revista Industrial Y Agrícola De Tucumán, 99 (2), pp. 49–54

Bertani, R.P., Funes, C., Gutierrez, H., Chaves, S., Joya, C.M., & González, V. (2021). Ficha técnica: Carbón de la caña de azúcar. Revista Avance Agroindustrial, 42 (2), pp. 22-23.

Forciniti, J. (2025). Informe sobre las precipitaciones en Tucumán: octubre 2024 – enero 2025. En J. Forciniti, M.L. Soulé Gómez, Á. M. Leal & J.M. Medina (Eds.), Lluvia atípicas y su efecto en los cultivos. Revista Avance, 45(4), Sección Panorama. Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC).

Joya, C.M.; Bertani, R.P.; Henriquez, D.D.; Funes, C. & González, V. (2015). Ficha técnica: raquitismo de la caña soca. Revista Avance Agroindustrial, 36 (1), pp 22.

Joya, C.M.; Bertani, R.P.; Fajre, S.; González, V.; Giardina, J.A. and Noguera, A.S. (2024). EEAOC Vitroplants Project: the importance of phytosanitary diagnosis and its impact on the health status of commercial sugarcane fields in Tucumán, Argentina. Abstract Book XIII Pathology and XI Entomology Workshop 2024 (p. 15). International Society of Sugar Cane Technologists (ISSCT).

PROYECTO VITROPLANTAS DE LA EEAOC: LA IMPORTANCIA DEL DIAGNÓSTICO FITOSANITARIO Y SU IMPACTO EN EL ESTADO SANITARIO DE LOS LOTES COMERCIALES EN TUCUMÁN, ARGENTINA

Joya, C. M.[1]; Bertani, R. P.[2]; Perera, M. F.[1]; Fajre, S.[2]; Giardina, J. A.[2] y Noguera A. S.[2]
[1]Instituto de Tecnología Agroindustrial del Noroeste Argentino (ITANOA), Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC) - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Las Talitas, Tucumán, República Argentina, T4101XAC; contijoya@gmail.com
[2]Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC), Las Talitas, Tucumán, República Argentina, T4101XAC

Palabras clave: caña semilla de alta calidad, manejo de enfermedades, diagnóstico molecular, TBIA

Introducción

La caña de azúcar es susceptible a diversas infecciones causadas por bacterias y virus, cuyo control solo es posible mediante la detección temprana y un diagnóstico preciso. Entre los principales factores que limitan su producción se destacan las enfermedades sistémicas, debido a que la multiplicación comercial se realiza de forma agámica a través de caña semilla, lo que favorece la rápida propagación de estos patógenos. Desde 2001, la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC) produce caña semilla de alta calidad a través del Proyecto Vitroplantas, con el fin de propagar cultivares comerciales y nuevas variedades élite liberadas por el Programa de Mejoramiento Genético de Caña de Azúcar de la EEAOC (PMGCA-EEAOC). Para eliminar enfermedades bacterianas y virales, el estado sanitario del material vegetal se asegura mediante el cultivo *in vitro* de meristemas apicales provenientes de plantas donantes, previamente saneadas por hidro-termoterapia. Posteriormente, los plantines son multiplicados masivamente por micropropagación.

A fin de garantizar que las plantas donantes de meristemas y las líneas micropropagadas estén libres de enfermedades, el material vegetal se evalúa mediante técnicas de diagnóstico molecular. Estos análisis se aplican de manera rutinaria para cinco enfermedades de importancia regional: raquitismo de la caña soca (*Leifsonia xyli* subsp. *xyli*), escaldadura de la hoja (*Xanthomonas albilineans*), estría roja (*Acidovorax avenae* subsp. *avenae*), mosaico (virus del mosaico de la caña de azúcar – SCMV – y virus del mosaico del sorgo – SrMV) y amarillamiento de la hoja (virus del amarillamiento de la hoja de la caña de azúcar – SCYLV). Una vez propagadas en el laboratorio, las líneas *in vitro* atraviesan un proceso gradual de adaptación al crecimiento *ex vitro* bajo condiciones controladas en invernadero, y posteriormente se establecen en un semillero Básico.

Todas las plantas son propagadas convencionalmente en semilleros Registrados y Certificados antes de ser distribuidas entre los productores para la multiplicación comercial (Digonzelli *et al*., 2009). El diagnóstico serológico se utiliza para evaluar el estado fitosanitario de los semilleros, ya que permite procesar un gran número de muestras en un tiempo reducido. Por lo tanto, resulta esencial evaluar el estado sanitario del material, tanto en la etapa de laboratorio como durante la propagación en campo, mediante métodos diagnósticos adecuados que eviten la diseminación de enfermedades sistémicas y contribuyan a mejorar la productividad del cultivo. La disponibilidad de herramientas de diagnóstico eficientes y de estrategias de manejo efectivas es fundamental para el control de enfermedades y la producción sostenible del cultivo.

En este trabajo se analizan los resultados del diagnóstico molecular realizado en plantas donantes de meristemas y líneas *in vitro*, así como del diagnóstico serológico del material propagado de manera convencional en semilleros Registrados durante los últimos cinco años. Asimismo, se presentan datos sobre la incidencia de raquitismo de la caña soca (RSD) en lotes comerciales.

Materiales y métodos

Entre 2020 y 2024 se analizaron: i) 349 muestras del establecimiento de la colección de plantas madre (EPM); ii) 172 de la colección de plantas madre (PM); iii) 182 de líneas *in vitro* (LI) y iv) 76 de líneas *in vitro* introducidas desde cañaverales comerciales (LIC).

La extracción de ácidos nucleicos totales se realizó mediante el método CTAB modificado (Aljanabi *et al*., 1999) y la calidad del material se evaluó por electroforesis en gel de agarosa al 1% teñido con GelRed y se visualizó bajo luz UV (λ = 320 nm).

Se emplearon dos protocolos con cebadores específicos: a) PCR para la detección de enfermedades bacterianas: raquitismo de la caña soca (RSD, del inglés *ratoon stunting disease* - *Leifsonia xyli* subsp. *xyli*) (Sun *et al*., 2019), escaldadura de la hoja (LS, del inglés *leaf scald* - *Xanthomonas albilineans*) (Pan *et al*., 1997, 1999) y estría roja (RS, del inglés *red stripe* - *Acidovorax avenae* subsp. *avenae*) (Li *et al*., 2017); y b) RT-PCR para los virus, *Sugarcane mosaic virus* (SCMV) y *Sorghum mosaic virus* (SrMV) (Yang and Mirkov, 1997), causantes de la enfermedad del mosaico, y del *Sugarcane yellow leaf virus* (SCYLV), agente causal del amarillamiento de la hoja (Girard *et al*., 2012).

Los productos de amplificación se separaron en geles de agarosa al 1,5% teñidos con bromuro de etidio, y se visualizaron bajo luz UV (λ = 320 nm) (Sambrook *et al*., 1989).

Para evaluar las condiciones sanitarias de los semilleros Registrados, se determinó la incidencia de RSD y LS mediante diagnóstico serológico. El muestreo consistió en la recolección aleatoria de la parte basal de 20 tallos por hectárea (un tallo por cepa) incluyendo diferentes cultivares y edades de caña semilla. Para que los patógenos puedan ser detectados por esta técnica, el material vegetal debe tener entre siete y nueve meses de edad, lo que en Tucumán corresponde aproximadamente al mes de abril.

Las muestras se analizaron mediante *tissue-blot immunoassay* (TBIA), (Davis *et al.*, 1994, con modificaciones).

La incidencia se calculó como la relación entre el número de tallos infectados y el total de tallos evaluados. Para estimar la incidencia promedio, se aplicó una media ponderada en función del número de surcos correspondientes a cada cultivar.

Previo a la plantación de caña de azúcar, es fundamental evaluar el estado sanitario del lote destinado a semilleros. La Sección Fitopatología de la EEAOC brinda un servicio de diagnóstico a productores e ingenios, para determinar los niveles de incidencia de RSD.

Entre 2020 y 2024 se procesaron 3261 muestras, cada una compuesta por la porción basal de 20 tallos cada 5 hectáreas. Se calculó el porcentaje de incidencia (tallos infectados/ tallos totales × 100) y los resultados se clasificaron en rangos: 0%, >0% ≤5%, >5% ≤10% y >10%.

Resultados

El diagnóstico molecular reveló que el virus del amarillamiento de la hoja (YL) presentó la mayor incidencia y estuvo presente en todos los tipos de muestras analizadas (Figura 1). En EPM, YL alcanzó su máxima incidencia en 2021 y disminuyó significativamente en 2022 y 2023 (Figura 1). En PM, la incidencia se mantuvo baja a lo largo de los años, registrándose el valor más alto en 2024 con un 8,20% (Figura 1). En LIC, YL alcanzó su mayor incidencia en 2022, mientras que en 2023 y 2024 no se detectaron plantas infectadas; un comportamiento similar se observó en LI, con la mayor incidencia en 2022 y un descenso posterior en 2023 (Figura 1). Estudios previos de nuestro grupo demostraron que el virus se encuentra ampliamente distribuido en los cultivares comerciales de Tucumán, y que afecta tanto a plantas sintomáticas como asintomáticas, con un incremento marcado durante la campaña 2020/2021 (Bertani *et al*., 2023). Estos resultados destacan la importancia de contar con técnicas diagnósticas precisas y de utilizar caña semilla sana como base para implementar estrategias de manejo de enfermedades efectivas en la región.

A pesar de su menor incidencia, también se detectaron SrMV, RS y RSD (Figura 1). Los niveles de incidencia de SrMV fueron bajos en comparación con YL, aunque se registró un incremento significativo en 2022 en EMP. RSD se detectó únicamente en EMP en 2020. En cuanto a estría roja, tanto LI como LIC presentaron una incidencia notable en 2022 (Figura 1).

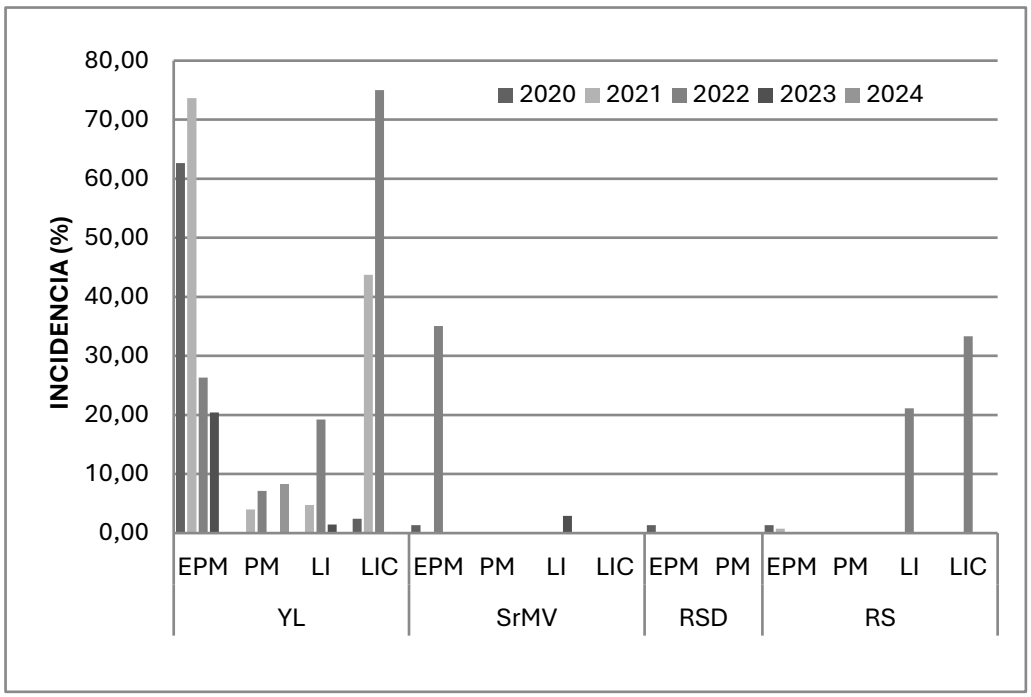


Figura 1. Incidencia promedio de las enfermedades detectadas durante 2020-2024. EPM: muestras para establecer la colección de plantas madre; PM: plantas madre; LI: líneas *in vitro*; LIC: líneas introducidas desde cañaverales. YL: amarillamiento de la hoja; SrMV: virus del mosaico del sorgo; RSD: raquitismo de la caña soca; RS: estría roja.

Todas las muestras positivas para cualquiera de las enfermedades evaluadas son descartadas del esquema de producción del Proyecto Vitroplantas, lo que garantiza la calidad fitosanitaria del material propagado.

El diagnóstico serológico de los semilleros Registrados mostró que la incidencia de RSD se mantuvo en niveles bajos, con valores inferiores al 1% en 2021 y menores al 0,5% en los demás años, mientras que la de LS fue inferior al 0,4% en todos los casos (Figura 2). Estos resultados coinciden con los obtenidos previamente entre 2014 y 2018, período en el cual la incidencia máxima de RSD fue de 0,43% y la de LS alcanzó 0,33% (Joya *et al*., 2019).

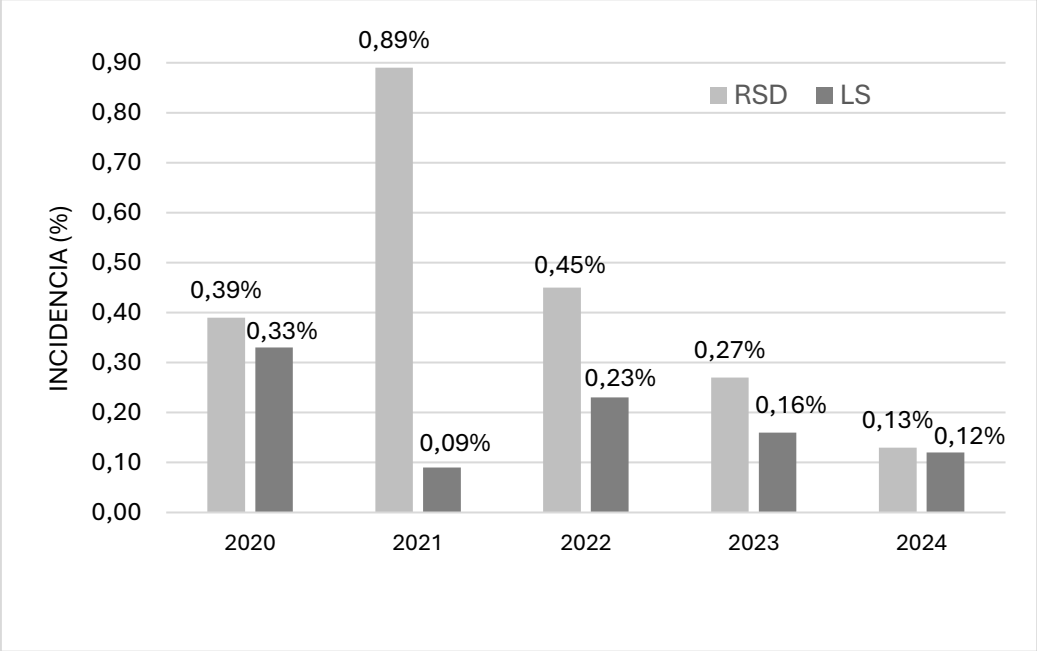


Figura 2. Incidencia promedio de RSD y LS en semilleros Registrados en Tucumán.

Al analizar la incidencia de las enfermedades por variedad, la mayor incidencia de RSD se registró en LCP 85-384 (0,39%), seguida de TUC 95-10 (0,25%) y TUC 00-65 (0,17%). Respecto a LS, la mayor incidencia se observó en TUC 97-8 (0,51%), seguida de TUC 00-65 (0,18%) y TUC 95-10 (0,16%).

Los semilleros Registrados presentaron muy buenas condiciones sanitarias, con incidencias de RSD y LS por debajo de los umbrales de tolerancia aceptados en Argentina, 1% para RSD y 2,5% para LS (Giardina *et al*., 2013). Si bien las técnicas moleculares constituyen herramientas altamente específicas, no resultan factibles para analizar el gran volumen de muestras provenientes de semilleros. En este contexto, el diagnóstico serológico se presenta como la alternativa más eficiente, al permitir la obtención de resultados rápidos.

En lo que respecta a los cañaverales comerciales, la Sección Fitopatología de la EEAOC recomienda no utilizar como caña semilla aquellos lotes cuyas muestras presenten un nivel de infección de RSD superior al 5% (Bertani *et al*., 2024). Al clasificar la incidencia de RSD por rangos, se observó que aproximadamente el 80% de las muestras analizadas resultaron aptas para ser utilizadas como caña semilla (incidencia < 5%). Entre 2020 y 2024 se registró un incremento en la proporción de muestras por debajo de este umbral (Figura 3), lo que respalda la eficiencia del esquema de producción de caña semilla de alta calidad implementado a través del Proyecto Vitroplantas de la EEAOC.

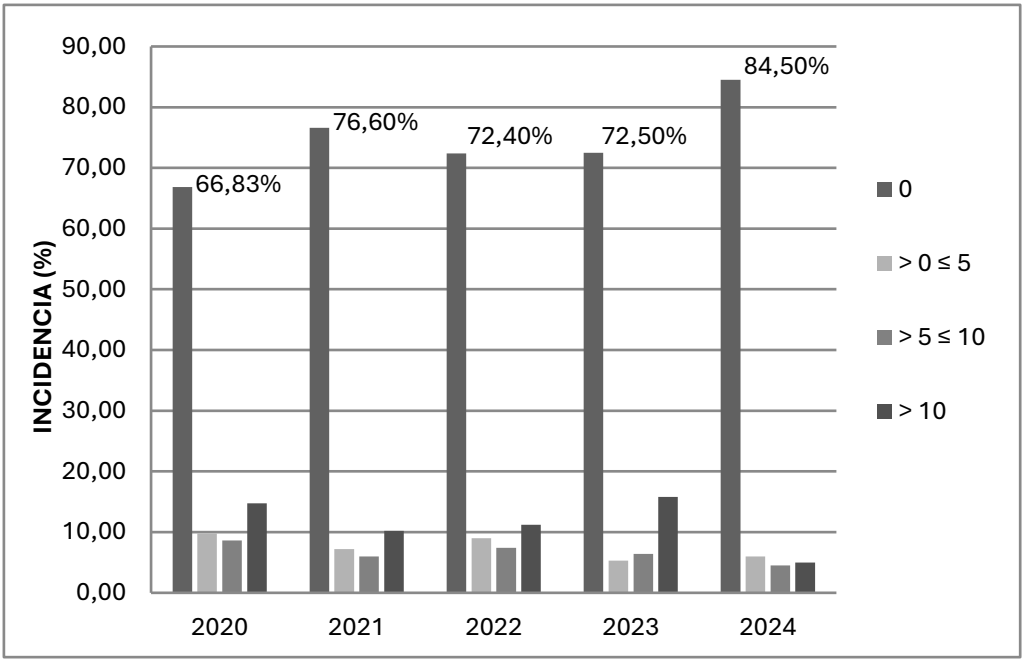


Figura 3. Incidencia promedio de RSD en lotes comerciales en Tucumán.

Con estos resultados, los productores pueden identificar y seleccionar de manera confiable cañaverales sanos para destinarlos a nuevos semilleros o para plantación comercial.

Aunque se observa una leve tendencia a la disminución de muestras positivas (Figura 3), es importante enfatizar que el monitoreo rutinario y sistemático resulta esencial. La ausencia de síntomas visibles favorece la utilización de caña semilla infectada, lo que puede conducir a la introducción del patógeno en nuevas áreas de cultivo. En este sentido, la detección correcta y rápida del patógeno en el material de plantación es clave para un manejo efectivo de la enfermedad.

Con un esquema de manejo basado en caña semilla sana, la incidencia de RSD y LS en cañaverales comerciales de Ecuador se redujo del 42% (2001) al 0,02% (2021) (Castillo *et al*., 2023). De manera similar, en Guatemala, durante 2020-2021, el 94,6% de los semilleros estaban libres de RSD, con un nivel promedio de infección del 0,12% entre los semilleros afectados. Asimismo, el 88% de los semilleros estuvieron libres de LS, con un nivel promedio de infección del 0,30% (García *et al*., 2021).

Conclusiones

Actualmente, el 74,5% del área de producción de caña de azúcar en Tucumán se encuentra implantada con caña semilla de alta calidad proveniente del Proyecto Vitroplantas de la EEAOC (Henriquez *et al*., 2023). Nuestros resultados evidencian la adopción progresiva de este esquema por parte de los productores, dado que constituye una herramienta clave de manejo y, al mismo tiempo, facilita la rápida difusión de las nuevas variedades liberadas en los últimos años por la EEAOC.

Asimismo, conocer el estado fitosanitario y realizar una correcta identificación de los fitopatógenos son aspectos esenciales para reducir las pérdidas en el cultivo y asegurar la calidad sanitaria del material de plantación.

Citas bibliográficas

Aljanabi, S. M.; L. Forget and A. Dookun. 1999. An improved and rapid protocol for the isolation of polysaccharide and polyphenol free sugarcane DNA. Plant Molecular Biology Reporter 17: 1–8.

Bertani, R. P.; C. Funes; J. A. Lobo; C. M. Joya and S. Chaves. 2023. Status of the Sugarcane yellow leaf virus in Tucumán, the main sugarcane-producing area in Argentina. Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists 31: 855–860.

Bertani, R. P.; J. A. Lobo; L. G. Huvierne; M. A. Monachesi; C. M. Joya y V. González. 2024. Los desafíos sanitarios de la caña de azúcar en Tucumán durante la campaña 2023/2024. Reporte Agroindustrial 314. Sanidad del cultivo de caña de azúcar.

Castillo, R. O.; E. Silva; J. Mendoza; B. Aucatoma; M. Salazar; F. Garcés; M. Valdez; C. Buenaventura; F. Gualpa; J. Saltos and C. Avellaneda. 2023. Long-term sustainability in sugarcane production in Ecuador driven by research results. Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists 31: 1109–1115.

Davis, M. J.; J. L. Dean; J. D. Miller and Jr. J. M. Shine. 1994. A method to screen for resistance to ratoon stunting disease of sugarcane. Sugar Cane 6: 9–16.

Digonzelli, P. A.; J. A. Giardina; J. Fernández de Ullivarri; S. D. Casen; J. Tonatto; M. F. Leggio; E. R. Romero y L. G. P. Alonso. 2009. Caña semilla de alta calidad: obtención y manejo. En: Romero, E. R.; P.A. Digonzelli y J. Scandaliaris (eds.), *Manual del Cañero.* Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC), Las Talitas, pp. 45-56.

García, S.; M. Catalán y D. Juda. 2021. Incidencia de patógenos en semilleros de caña de azúcar en la Zafra 2020–2021. CENGICAÑA: Mem. Presentac. Result. Invest. Zafra 2020–2021: 178–185.

Giardina, J. A.; P. A. Digonzelli; D. Duarte; F. Pérez Alabarce; C. Funes; R. P. Bertani; A. Sánchez Ducca and J. Scandaliaris. 2013. Planting, distribution of new varieties, and sanitary conditions of registered nurseries in the 2011 season, Tucumán-Argentina. Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists 28: 424–434.

Girard, J. C.; E. Fernandez; J. H. Daugrois; D. Roques; P. Roumagnac and P. Rott. 2012. Genetic diversity of Sugarcane yellow leaf virus in a sugarcane selection plot in Guadeloupe (FWI). Int. Sugar J. 114 (1358): 96–100.

Henriquez, D. D.; P. Medina; M. Aybar Guchea; M. F. Figueroa; D. D. Costilla; J. V. Díaz; C. Díaz Romero y S. Ostengo. 2023. Relevamiento de la distribución varietal y del uso de otras tecnologías en el cultivo de la caña de azúcar en la provincia de Tucumán: campaña 2022/2023. Reporte Agroindustrial 282. Adopción de tecnología en el cañaveral.

Joya, C. M.; R. P. Bertani; C. Funes; S. Chaves; D. D. Henriquez; M. F. Perera; A. S. Noguera; V. González; A. P. Castagnaro and P. A. Digonzelli. 2019. Diagnosis and sanitary status of sugarcane propagation material in different stages of the Vitroplantas Project during 2014/2018. Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists. 30: 470–475.

Li, X.Y.; H. D. Sun; P. C. Rott; J. D. Wang; M. T. Huang; Q. Q. Zhang and S. J. Gao. 2017. Molecular identification and prevalence of *Acidovorax avenae* subsp. *avenae* causing red stripe of sugarcane in China. Plant Pathology. 67: 929–937.

Pan, Y. B.; M. P. Grisham; D. M. Burner; B. L. Legendre and Q. Wei. 1997. A polymerase chain reaction protocol for the detection of *Xanthomonas albilineans*, the causal agent of sugarcane leaf scald disease. Plant Disease. 81: 189–194.

Pan, Y. B.; M. P. Grisham; D. M. Burner; B. L. Legendre and Q. Wei. 1999. Development of polymerase chain reaction primer highly specific for *Xanthomonas albilineans*, the causal bacterium of sugarcane leaf scald disease. Plant Disease. 83: 218–222.

Sambrook, J.; E. F. Fritsch and T. Maniatis. 1989. Molecular Cloning: A Laboratory Manual. 2. ed. Cold Spring Harbor Laboratory Press, Cold Spring Harbor, NY.

Sun, S. R.; J. L. Chen; Y. Y. Duan; N. Chu; M. T. Huang; H. Y. Fu and S. J. Gao. 2019. Improved primers for the specific detection of *Leifsonia xyli* subsp. *xyli* in sugarcane using a conventional PCR assay. Plant Disease. 103: 3251–3258.

Yang, Z. N. and T. E. Mirkov. 1997. Sequence and relationships of sugarcane mosaic and sorghum mosaic virus strains and development of RT-PCR-based RFLPs for strain discrimination. Phytopathology 87: 932–939.

CENSO VARIETAL DE CAÑA DE AZÚCAR EN JUJUY Y SALTA – ZAFRA 2025

Nanni ML[1]; Blesa T[2]; Easdale C[3]; López F[4]; Capobianco M[5]; Serino G[1]; Yañez Cornejo F[1]

1- Chacra Experimental Agrícola Santa Rosa. Colonia Santa Rosa, Salta, Argentina
2- UCIJS - Unión Cañeros Independientes de Jujuy y Salta. San Pedro, Jujuy, Argentina
3- Ledesma. Libertador General San Martín, Jujuy, Argentina
4- Seaboard Alimentos y Energías Renovables. San Martín de Tabacal, Salta, Argentina
5- Ingenio Río Grande. La Mendieta, Jujuy, Argentina
mnanni@chacraexperimental.org, fyanez@chacraexperimental.org.

Palabras clave: Adopción varietal; Cultivares; Caña de Azúcar; Norte Argentino; Mejoramiento Genético; Superficie cultivada

Introducción

Las provincias de Jujuy y Salta concentran aproximadamente el 25 % de la superficie cosechada de caña de azúcar de la Argentina. En estas provincias la escala promedio de las explotaciones cañeras es superior a la observada en la provincia de Tucumán, con una alta proporción de superficies propias de ingenio y un predominio de unidades productivas de mayor escala. Asimismo, la región presenta diferencias agroecológicas relevantes respecto a Tucumán, particularmente en el régimen térmico, la frecuencia de heladas, el régimen hídrico y la proporción de superficie bajo riego.

La Chacra Experimental Agrícola Santa Rosa desarrolla cultivares de caña de azúcar adaptados a las condiciones productivas de la región Norte. En este contexto, el presente trabajo tiene por objetivo cuantificar la adopción varietal de caña de azúcar en los sistemas productivos de Jujuy y Salta, con el fin de aportar información objetiva que sirva de base para la definición de lineamientos estratégicos en las actividades de investigación y desarrollo.

Objetivos

Este trabajo tiene como objetivo describir la composición varietal actual de la región cañera del Norte Argentino (Jujuy y Salta) y analizar su evolución en relación con el censo varietal 2022. Además, se recabó información complementaria sobre características de la estructura productiva en la región, con el propósito de iniciar un registro sistemático de información que permita orientar los esfuerzos del programa de mejoramiento de la Chacra Experimental Agrícola Santa Rosa en función de las prácticas productivas vigentes.

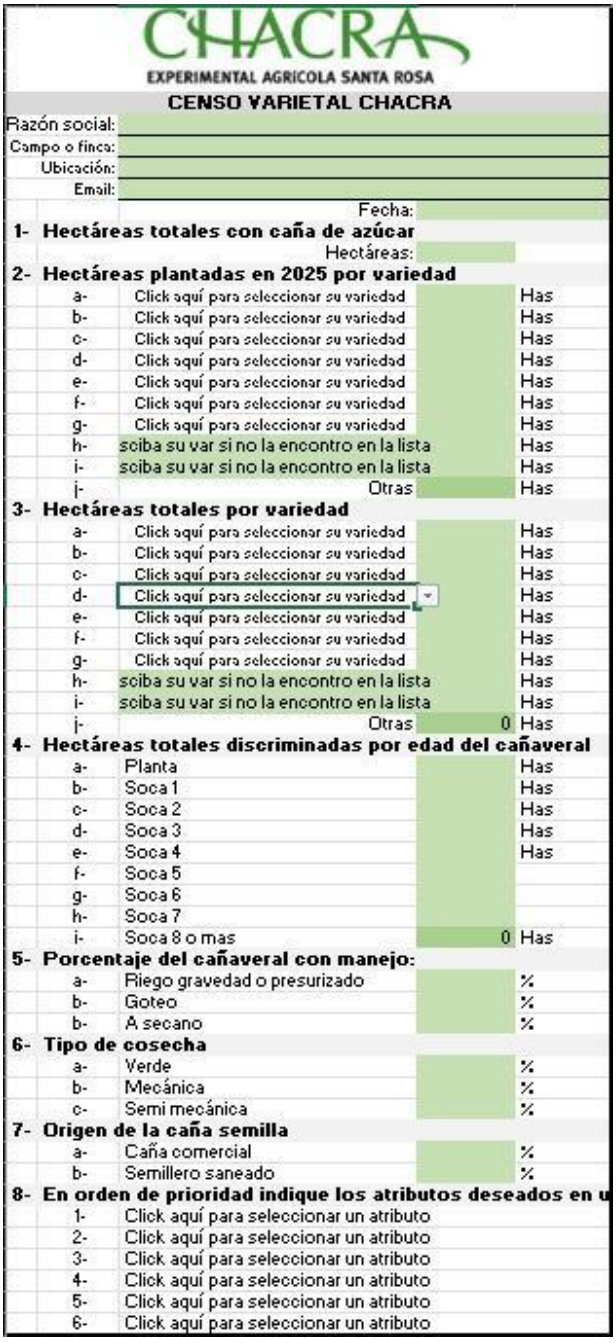
Materiales y métodos

Se realizó un relevamiento mediante encuesta a productores de caña de azúcar de las provincias de Jujuy y Salta, incluyendo productores asociados a la Unión de Cañeros Independientes de Jujuy y Salta, productores no asociados e ingenios azucareros. La encuesta se diseñó como un formulario digital con información precargada, con el fin de facilitar y estandarizar la carga y el procesamiento de los datos (Tabla 1).

Se recabó información sobre superficie total cosechada y superficie renovada durante la zafra 2025, discriminada por variedad y edad de los cañaverales. Adicionalmente, se solicitó información relativa a superficie bajo riego, tipo de cosecha, origen de la caña semilla y atributos considerados relevantes en un clon comercial; estos últimos aspectos no forman parte del análisis presentado en este trabajo.

La encuesta fue distribuida a los productores y la información recolectada fue remitida a la Chacra Experimental Agrícola Santa Rosa, donde se realizó la carga, validación, procesamiento y análisis de los datos.

Tabla 1. Formulario de encuesta sobre la que se basa el censo



CHACRA

EXPERIMENTAL AGRICOLA SANTA ROSA

CENSO VARIETAL CHACRA

Razón social:				
Campo o finca:				
Ubicación:				
Email:				
		Fecha:		
1-	**Hectáreas totales con caña de azúcar**			
		Hectáreas:		
2-	**Hectáreas plantadas en 2025 por variedad**			
	a-	Click aquí para seleccionar su variedad		Has
	b-	Click aquí para seleccionar su variedad		Has
	c-	Click aquí para seleccionar su variedad		Has
	d-	Click aquí para seleccionar su variedad		Has
	e-	Click aquí para seleccionar su variedad		Has
	f-	Click aquí para seleccionar su variedad		Has
	g-	Click aquí para seleccionar su variedad		Has
	h-	sciba su var si no la encontro en la lista		Has
	i-	sciba su var si no la encontro en la lista		Has
	j-	Otras		Has
3-	**Hectáreas totales por variedad**			
	a-	Click aquí para seleccionar su variedad		Has
	b-	Click aquí para seleccionar su variedad		Has
	c-	Click aquí para seleccionar su variedad		Has
	d-	Click aquí para seleccionar su variedad		Has
	e-	Click aquí para seleccionar su variedad		Has
	f-	Click aquí para seleccionar su variedad		Has
	g-	Click aquí para seleccionar su variedad		Has
	h-	sciba su var si no la encontro en la lista		Has
	i-	sciba su var si no la encontro en la lista		Has
	j-	Otras	0	Has
4-	**Hectáreas totales discriminadas por edad del cañaveral**			
	a-	Planta		Has
	b-	Soca 1		Has
	c-	Soca 2		Has
	d-	Soca 3		Has
	e-	Soca 4		Has
	f-	Soca 5		
	g-	Soca 6		
	h-	Soca 7		
	i-	Soca 8 o mas	0	Has
5-	**Porcentaje del cañaveral con manejo:**			
	a-	Riego gravedad o presurizado		%
	b-	Goteo		%
	b-	A secano		%
6-	**Tipo de cosecha**			
	a-	Verde		%
	b-	Mecánica		%
	c-	Semi mecánica		%
7-	**Origen de la caña semilla**			
	a-	Caña comercial		%
	b-	Semillero saneado		%
8-	**En orden de prioridad indique los atributos deseados en u**			
	1-	Click aquí para seleccionar un atributo		
	2-	Click aquí para seleccionar un atributo		
	3-	Click aquí para seleccionar un atributo		
	4-	Click aquí para seleccionar un atributo		
	5-	Click aquí para seleccionar un atributo		
	6-	Click aquí para seleccionar un atributo		

La información fue validada mediante controles de consistencia interna de los datos declarados y contraste con información provista por ingenios que concentran la mayor proporción de la superficie cultivada en la región.

Para el análisis de la adopción varietal, se sumaron las superficies declaradas para cada cultivar, obteniéndose la superficie total implantada por variedad. El porcentaje de participación de cada cultivar se calculó como la relación entre la superficie implantada con dicho cultivar y la superficie total relevada.

La variación de la superficie implantada con cada cultivar se estimó en referencia al censo varietal 2022 (Nanni et al., 2022), considerando que, de acuerdo con información provista por los ingenios —que concentran la mayor proporción de la superficie cultivada—, la superficie total no presentó variaciones significativas entre ambos relevamientos.

Resultados

La información relevada corresponde a un total de 85.136 ha, lo que representa aproximadamente el 86,8 % de las 98.092 ha cosechables de caña de azúcar en las provincias de Jujuy y Salta, según lo reportado por Benedetti (2018). Este nivel de cobertura otorga una alta representatividad regional a los resultados obtenidos.

El relevamiento incluyó cañaverales pertenecientes a los ingenios San Isidro (Emaisa), Río Grande, Seaboard y Ledesma, así como a 23 productores independientes, asociados y no asociados a la Unión de Cañeros Independientes de Jujuy y Salta (UCIJS). En comparación con el censo varietal de 2022 (Nanni et al., 2022), la superficie relevada presentó una reducción de 3.704 ha.

En el año 2025, siete cultivares concentran el 84,7 % de la superficie relevada con caña de azúcar. El cultivar de mayor adopción fue NA 05-860, que ocupa el 23,1 % de la superficie total (Figura 1). Este cultivar, registrado en 2014, ya ocupaba el primer lugar en el ranking en 2022, con 14,6 % de la superficie relevada.

En segundo lugar se ubicaron NA 96-2929 y LCP 85-384, cada uno con el 14,1 % de la superficie, sin cambios relevantes respecto del censo anterior, en el que representaron 13,1 % y 13,4 % de la superficie relevada, respectivamente.

El cultivar TUCCP 77-42 ocupó el 11,3 % de la superficie, incrementando su participación respecto al 9,4 % en 2022, mientras que CP 70-1133 alcanzó el 10,5 %, aumentando su participación desde el 8,9 %. Completaron el grupo de los cultivares más difundidos NA 97-3152, con el 6 % de la superficie – mostrando una marcada reducción respecto al 14,5 % del censo anterior, y NA 03-3300, ocupando un 5,6 % de la superficie, frente al 4,7 % registrado en 2022.

El 15,3 % de la superficie relevada se encontró implantada con cultivares NA experimentales en fase de prueba piloto y otros materiales en proceso de discontinuación (11,4 %), así como con cultivares pertenecientes a otros programas de mejoramiento (3,9 %). La adopción global de cultivares del programa NA se mantuvo prácticamente estable, alcanzando el 60,2 % de la superficie relevada, valor similar al registrado en el censo 2022.

En relación con la renovación de cañaverales durante el año 2025, el cultivar más implantado fue NA 05-860, que representó el 36,3 % de la superficie renovada. Le siguió un grupo de cultivares con participaciones individuales comprendidas entre el 12 y el 5 %, integrado por NA 96-2929 (12,0 %), CP 70-1133 (10,4 %), LCP 85-384 (10,1%), TUCCP 77-42 (9,7 %), el cultivar en proceso de registro NA 03-559 (6 %), y el cultivar NA 03-3300 (5%). El resto de la superficie renovada correspondió a cultivares experimentales en pruebas piloto y a variedades en proceso de remisión, todas con participaciones individuales inferiores al 2 %.

La edad promedio de los cultivares adoptados fue de 33,2 años, lo que representa un envejecimiento respecto de los 30,9 años registrados en 2022 (Nanni et al 2022).

Conforme a los datos de edad de los cañaverales relevados, se observa una distribución relativamente uniforme desde caña planta hasta soca 3. A partir de soca 4, la superficie relativa de los cañaverales disminuye de manera progresiva, registrándose únicamente un 3 % de la superficie en soca 7. Los cañaverales con edades iguales o superiores a soca 8 representan en conjunto aproximadamente el 10 % de la superficie total.

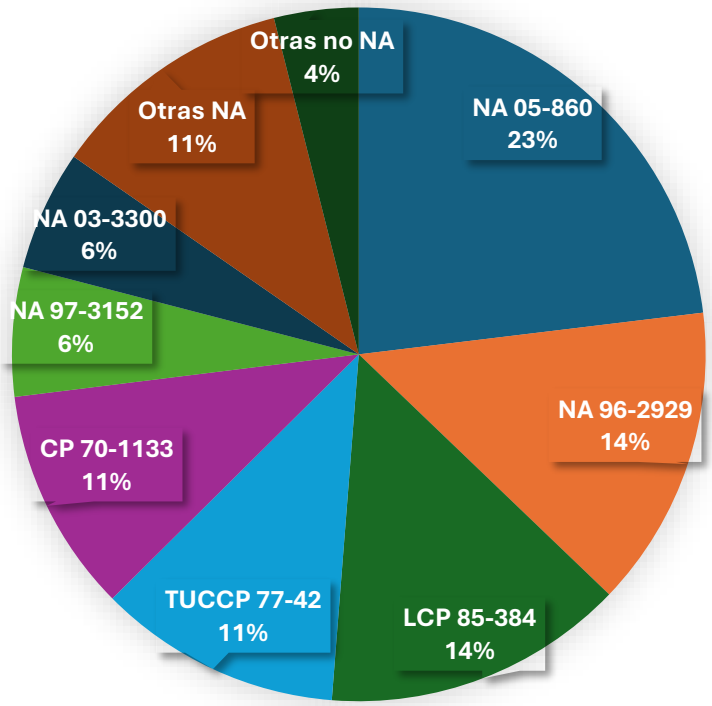


Figura 1. Participación relativa de cultivares en la superficie implantada con caña de azúcar en Jujuy y Salta relevada en la zafra 2025.

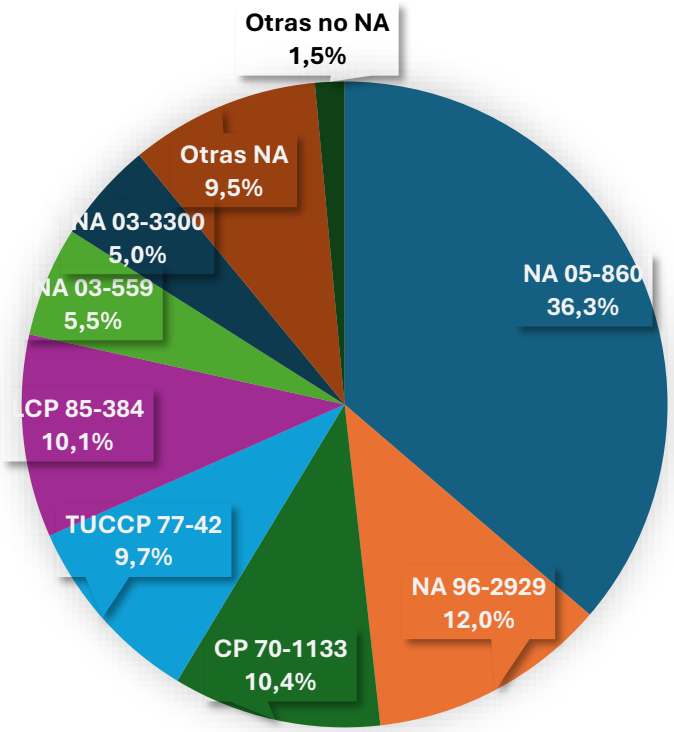


Figura 2. Participación relativa de cultivares en la superficie renovada con caña de azúcar en Jujuy y Salta en la zafra 2025.

Conclusiones

Este trabajo representa el tercer censo de adopción de cultivares en el Norte Argentino, abarcando aproximadamente 87 % de la superficie de caña de azúcar implantada en las provincias de Jujuy y Salta. Se identifican siete cultivares predominantes, que ocupan cerca de 84,7% de la superficie total relevada. Se destaca la participación de NA 05-860, que lidera el ranking varietal con 23,1 % de la superficie, incrementando significativamente su adopción respecto al 14,6 % registrado en el censo 2022 y consolidándose como el principal cultivar en la superficie renovada durante 2025. La adopción global de cultivares del programa NA se mantuvo estable (60,2%), lo que evidencia la consolidación de estos materiales en los sistemas productivos regionales. Se observa una estructura varietal relativamente diversificada, aunque con predominio marcado de un cultivar líder. Asimismo, se evidencia la adopción incipiente de cultivares en etapas finales del proceso de mejoramiento, particularmente NA 03-559, lo que sugiere un recambio varietal gradual en la región.

La edad promedio de los cultivares (33,2 años) indica una tendencia al envejecimiento del cañaveral, aspecto de relevancia estratégica para los programas de mejoramiento y difusión varietal.

La continuidad en la publicación de censos periódicos de adopción varietal en Jujuy y Salta permite disponer de información objetiva y sistemática sobre la dinámica de la genética comercial, contribuyendo a la toma de decisiones del sector productivo y a la orientación de los programas de mejoramiento de la región.

Bibliografía

Benedetti, P.E., 2018, Primer relevamiento del cultivo de caña de azúcar de la República Argentina a partir de imágenes satelitales para la campaña 2018. EEA INTA Famailla. https://inta.gob.ar/sites/default/files/intainformerelevamientodelcultivodecanadeazucarenargentinaduranteel_2018_a_partide_imagenes_satelitales_1_0.pdf.

Ostengo S.; Serino G.; Perera M.F.; Racedo J.; Mamaní González S.Y.; Yañez Cornejo F.; Cuenya M.I. 2021, Sugarcane Breeding, Germplasm Development and Supporting Genetic Research in Argentina. Sugar Tech (Jan-Feb 2022) 24(1):166–180.

Nanni M.L.; Blesa T.; Easdale C.; López F.; Capobianco M.; Serino G.; Yañez Cornejo F., Censo Varietal de Caña de Azúcar 2022 en Jujuy y Salta. Reunión XXII Reunión Técnica Nacional de la Caña de Azúcar. Tucumán, Argentina. Noviembre de 2022.

COMPORTAMIENTO PRODUCTIVO Y FITOSANITARIO DE TUC 08-10, UNA NUEVA VARIEDAD DE CAÑA DE AZÚCAR DESARROLLADA POR LA ESTACIÓN EXPERIMENTAL AGROINDUSTRIAL OBISPO COLOMBRES

Ostengo, S[1].; Díaz Romero, C[1].; Costilla, D[1].; Díaz, J[1].; Medina, P[1].; Henriquez, D[1].; Figueroa, F[1].; Ghio, C[1].; Lobo, J[2]. y Sorol, N[3]. [1] Mejoramiento Genético de Caña de Azúcar. Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC), [2] Sección Fitopatología (EEAOC), [3] Sección Química de Productos Agroindustriales. Las Talitas, Tucumán, R. Argentina, T4101XAC. sostengo@eeaoc.org.ar

Palabras clave: nuevo cultivar, rendimiento cultural y fabril, diversificación varietal

INTRODUCCIÓN

Las variedades de caña de azúcar constituyen la tecnología clave en el desarrollo de las industrias sucroalcoholeras en casi todos los países productores de esta especie en el mundo, ya que cumplen un rol fundamental en el incremento de la productividad y en el manejo de las principales enfermedades y plagas que afectan el cultivo. El Subprograma de Mejoramiento Genético de Caña de Azúcar de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (SMGCA-EEAOC) de Tucumán, Argentina, lleva a cabo todas las etapas necesarias para el desarrollo de un cultivar "TUC" de caña de azúcar. Además, se ejecutan diferentes líneas interdisciplinarias de investigación que sirven de soporte al proceso de obtención y caracterización de nuevas variedades. En los últimos años, el SMGCA-EEAOC ha realizado un aporte significativo al medio productivo a partir de la liberación de nuevos cultivares de caña de azúcar (Cuenya *et al.*, 2009a, 2009b, 2011, 2013, 2015, 2019a, 2019b, 2019c), los cuales están contribuyendo a la diversificación varietal de los cañaverales tucumanos. En efecto, en la campaña 2022/2023 el 44,1% de las plantaciones realizadas en el área cañera de la provincia fueron efectuadas con cinco variedades TUC, liberadas en los últimos 12 años (Henriquez *et al.*, 2023).

En 2025, el SMGCA-EEAOC presentó el desarrollo de una nueva variedad: TUC 08-10. En este trabajo se muestra un resumen del comportamiento productivo y fitosanitario del nuevo cultivar.

MATERIALES Y MÉTODOS

La variedad TUC 08-10 fue obtenida a partir del cruzamiento entre LCP 85-384 (progenitor femenino) y TUC 95-37 (progenitor masculino), realizado en 2005 en la EEAOC, en Las Talitas (Tucumán). Las semillas sexuales obtenidas de dicho cruzamiento fueron conservadas y sembradas posteriormente, en 2008, en almácigos bajo condiciones de invernáculo para la obtención de plantines individuales. Estos fueron implantados en campo ese mismo año. Entre 2010 y 2022, se evaluó su comportamiento productivo y fitosanitario a campo tanto en etapas tempranas de selección como en Ensayos Comparativos de Variedades (ECV) distribuidos en seis ambientes representativos del área cañera de la provincia de Tucumán. Estos ensayos experimentales presentaron un diseño en bloques completamente aleatorizados (DBCA), con 3 repeticiones, donde cada variedad estuvo representada por una parcela conformada por 3 surcos de 10 m de longitud, distanciados a 1,60 m. El cultivar testigo utilizado como referencia fue LCP 85-384.

Para cada cosecha (combinación de una localidad y una edad de corte), se evaluó la capacidad de brotación y crecimiento inicial, el tipo agronómico, el número total de tallos molibles por parcela y el peso del tallo (calculado a partir de una muestra de 30 tallos). El rendimiento cultural, expresado en toneladas de caña por hectárea, se estimó para cada parcela a partir del número de tallos y el peso unitario de los mismos.

El comportamiento madurativo se evaluó a partir de valores de pol % caña obtenidos en muestreos (10 tallos de cada parcela) realizados en el mes de mayo, para estimar el contenido sacarino a inicio de cosecha, y en algunos casos también en el mes de julio.

En ensayos particulares se realizaron muestreos cada 15 días, con el fin de evaluar parámetros de calidad industrial importantes en cuanto a la recuperación de azúcar en fábrica,

de acuerdo a métodos (extracción por prensa) establecidos por la Sección Química de Productos Agroindustriales de la EEAOC. Finalmente, en aquellas cosechas donde se evaluó el rendimiento cultural, se estimó el rendimiento fabril a partir de las determinaciones de pol % caña obtenidas vía trapiche (mes de mayo) con el propósito de estimar la producción de azúcar por hectárea a partir de ambas variables.

La evaluación sanitaria a campo de TUC 08-10 fue realizada en todos los ensayos en los que participó este cultivar, considerando las siguientes enfermedades de importancia en Tucumán: mosaico de la caña de azúcar (*Sugarcane mosaic virus*), carbón (*Sporisorium scitamineum*), escaldadura de la hoja (*Xanthomonas albilineans*), estría roja (*Acidovorax avenae* subsp. *avenae*), pokkah boeng (especie del complejo *Fusarium fujikuroi*) y roya marrón (*Puccinia melanocephala*). Se valoró visualmente la severidad de los síntomas utilizando las escalas diagramáticas de consenso propuestas por la International Society of Sugar Cane Technologists (ISSCT). La caracterización final del comportamiento fitosanitario se realizó a partir de los valores máximos de severidad obtenidos para cada enfermedad.

RESULTADOS

Comportamiento productivo de TUC 08-10 en diferentes localidades de Tucumán

TUC 08-10 alcanzó un promedio general de 81,4 t/ha. Este valor supera en aproximadamente 3 toneladas al estimado para LCP 85-384 (testigo). Asimismo, obtuvo un rendimiento (t/ha) superior al testigo en cinco de las seis localidades evaluadas.

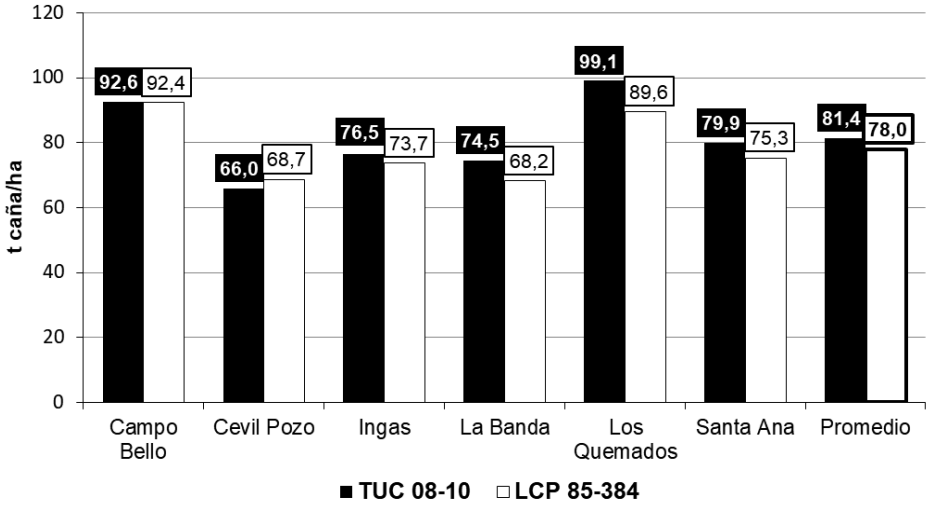


Figura 1. Promedios de toneladas de caña/ha (a través de edades de corte) de TUC 08-10 y LCP 85-384 en seis localidades de Tucumán.

Comportamiento madurativo y calidad industrial

Pol % caña

TUC 08-10 presentó valores promedio de pol % caña superiores a LCP 85-384 a través de 39 cosechas evaluadas en el mes de mayo y 21 cosechas en el mes de julio (Tabla 1). Para el primer caso (mayo) la diferencia fue de 1,5 %, mientras que para el segundo fue de 1,2 %. Es importante destacar que el nuevo cultivar registró una mayor pol % caña en relación al testigo en el 94,9% y 85,7% de las cosechas evaluadas en mayo y julio, respectivamente (Tabla 1).

Tabla 1. Pol % caña en dos momentos del período de cosecha (mayo y julio). Valores medios a través de diferentes localidades y edades de corte de TUC 08-10 y LCP 85-384, obtenidos a partir de trapiche.

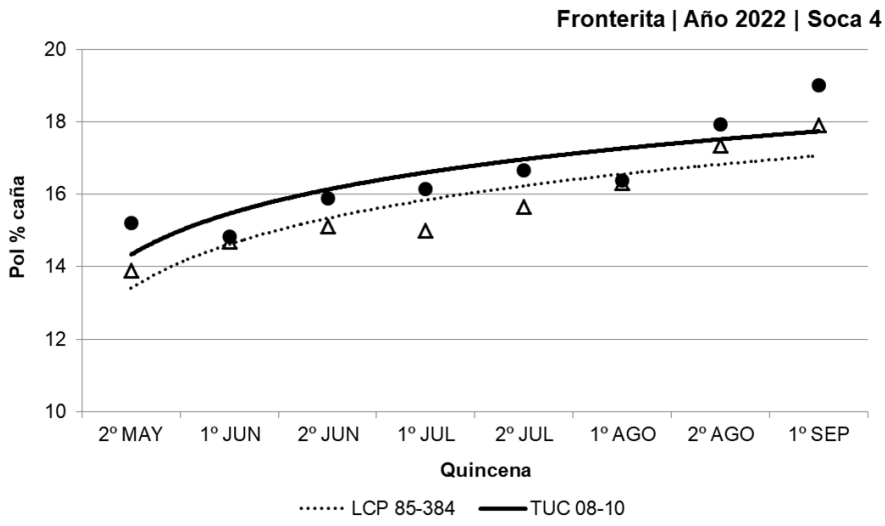
Mes		Pol % caña	Cosechas en las que

	N° de cosechas evaluadas			TUC 08-10 fue superior	
		TUC 08-10	**LCP 85-384**	N°	%
Mayo	39	14,5	13,0	37	94,9
Julio	21	15,7	14,5	18	85,7

Curvas de maduración

En la Figura 2 se observa el destacado comportamiento madurativo de este nuevo cultivar a lo largo de toda la zafra en dos de las campañas y ambientes evaluados, superando a LCP 85-384 en valores de pol % caña desde el inicio de la cosecha hasta su finalización.

a)



b)

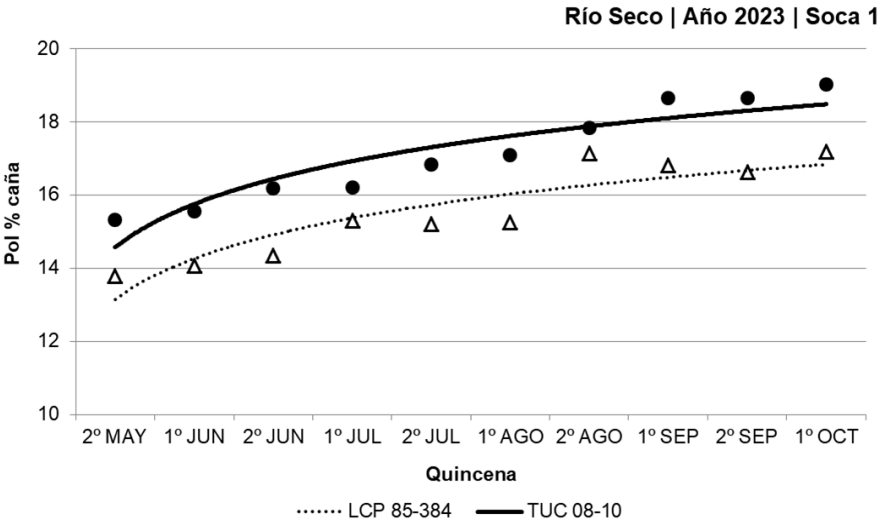


Figura 2. Evolución quincenal de la pol % caña de las variedades TUC 08-10 y LCP 85-384 durante las zafras 2022 en la localidad de Fronterita (a) y 2023 en la localidad de Río Seco (b). Valores obtenidos a partir de prensa.

Rendimiento fabril estimado

Los valores promedio de rendimiento fabril % estimado para el mes de mayo en los ECV se presentan en la Figura 3. En ella se observan las diferencias registradas a favor de TUC 08-10 en todas las localidades evaluadas.

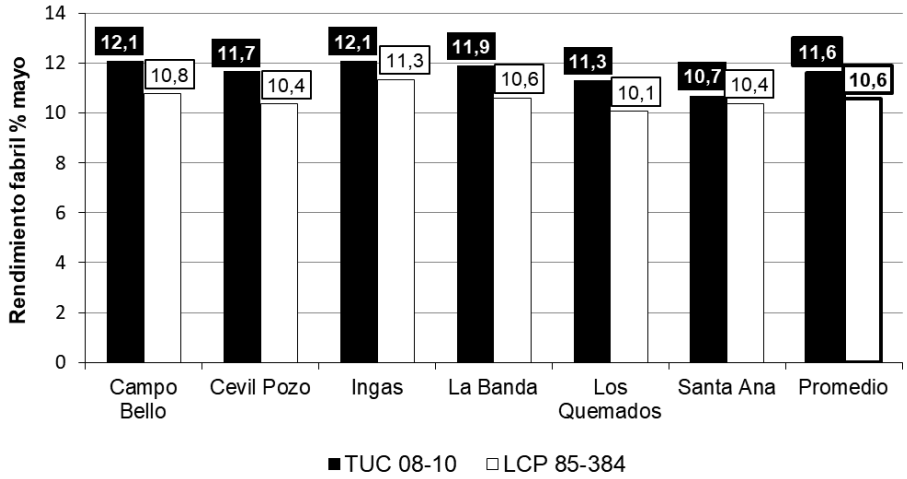


Figura 3. Valores promedio de rendimiento fabril % para el mes de mayo, estimados a través de edades de corte en los Ensayos Comparativos de Variedades Regionales.

Producción de azúcar por hectárea

Las estimaciones del rendimiento de azúcar por hectárea, obtenidas a partir de ECV (Figura 4), indican que TUC 08-10 logró un promedio general de 9,5 t/ha. La nueva variedad registró mayor producción de azúcar que LCP 85-384 en todas las localidades evaluadas, según promedio a través de diferentes edades de corte.

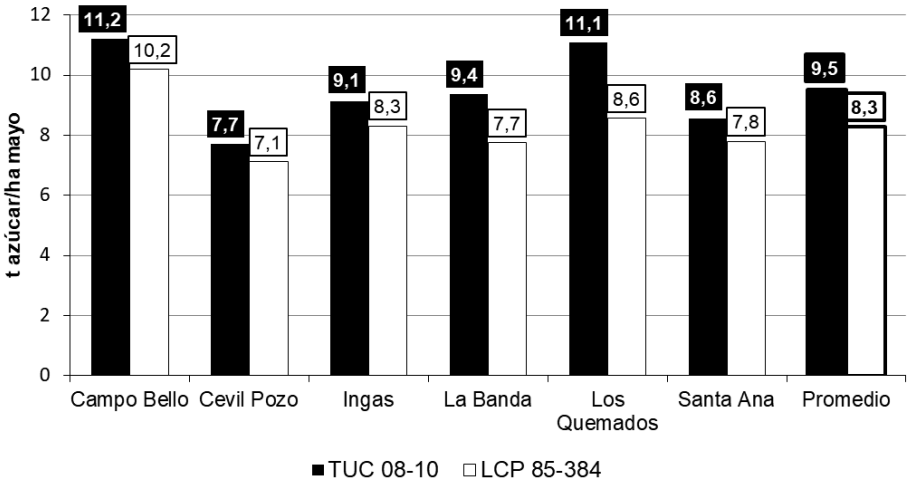


Figura 4. Valores promedio de producción de azúcar (t/ha) en el mes de mayo, estimada a través de edades de corte en los Ensayos Comparativos de Variedades Regionales.

Comportamiento fitosanitario

En la Tabla 2 se resume el comportamiento fitosanitario de TUC 08-10. Se observa que la nueva variedad se comportó como resistente a tres enfermedades: mosaico (*Sugarcane mosaic virus*), escaldadura de la hoja (*Xanthomonas albilineans*) y estría roja (*Acidovorax avenae* subsp. *avenae*), mientras que mostró un comportamiento moderadamente resistente a carbón (*Sporisorium scitamineum*), roya marrón (*Puccinia melanocephala*) y pokkah boeng (especies del complejo *Fusarium fujikuroi*).

Tabla 2. Comportamiento de TUC 08-10 con respecto a las enfermedades de importancia fitosanitaria en Tucumán.

Enfermedades	*Nivel de resistencia (*)*
Mosaico	**R**
Carbón	**MR**
Escaldadura de la hoja	**R**
Roya marrón	**MR**
Estría roja	**R**
Pokkah boeng	**MR**

(*) Calificación en función de la escala internacional (establecida por la International Society of Sugar Cane Technologists, ISSCT) de 1 a 9, en donde: 1 a 2 = R (resistente); 3 a 4 = MR (moderadamente resistente); 5 a 6 = MS (moderadamente susceptible) y 7 a 9 = S (susceptible).

CONCLUSIONES

La evaluación experimental del comportamiento productivo y fitosanitario de TUC 08-10 la presenta como una variedad con características sobresalientes que justifican su liberación al medio productivo. Entre ellas, se destaca principalmente su muy buen comportamiento madurativo a inicio de cosecha (maduración temprana) y durante el período de zafra. Es importante considerar la relevancia de este atributo, dado que una alta concentración de sacarosa por tonelada de caña no solo repercute favorablemente en la producción de azúcar por hectárea, sino que también contribuye a reducir los costos marginales asociados a la cosecha, el transporte y la molienda. Además tiene un impacto positivo en la sustentabilidad global del sistema productivo, donde a mayor rendimiento con igual manejo, genera que la huella ambiental disminuya.

Este cultivar se suma como una nueva alternativa a las variedades ya provistas por la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres en los últimos años. Desde el Subprograma de Mejoramiento Genético de Caña de Azúcar de esta institución, se recomienda la diversificación varietal de los campos comerciales a través de la incorporación de nuevos cultivares y la prueba de su adaptación en las diferentes situaciones ambientales y de manejo. Esta práctica es clave para expresar plenamente el potencial productivo de las nuevas variedades liberadas y para optimizar su desempeño en las distintas zonas productivas evaluadas.

AGRADECIMIENTOS

Expresamos nuestro reconocimiento a las empresas agroindustriales José Minetti y Cía. Ltda. SACI, Complejo Alimenticio San Salvador SA, Estancia Ingas SRL, Colombres Hnos SRL, Arcor SAIC, Bulacio Argenti SA, Cañamelares del Tucumán SRL y a la Coop. Trabajadores Unidos Ltda. Campo de Herrera, por la valiosa y desinteresada colaboración puesta de manifiesto al ceder sus lotes y realizar el manejo agronómico de ensayos experimentales.

REFERENCIAS

Cuenya, M. I.; Chavanne, E. R.; García, M. B.; Ostengo, S.; Ahmed, M. A.; Costilla, D. D.; Díaz Romero, C. y Espinosa, M. A. 2009a. Comportamiento productivo y fitosanitario de TUC 95-37, una nueva variedad de caña de azúcar para la provincia de Tucumán. Gac. Agroindustrial EEAOC (73).

Cuenya, M. I.; Chavanne, E. R.; García, M. B.; Ostengo, S.; Ahmed, M. A.; Costilla, D. D.; Díaz Romero, C. y Espinosa, M. A. 2009b. Comportamiento productivo y fitosanitario de TUC 97-8, una nueva variedad de caña de azúcar para la provincia de Tucumán. Gac. Agroindustrial EEAOC (74).

Cuenya, M. I.; Chavanne, E. R.; Ostengo, S.; García, M. B.; Ahmed, M. A.; Costilla, D. D.; Díaz Romero, C.; Espinosa, M. A.; Delgado, N. y Díaz, J. 2011. TUC 95-10: Una nueva variedad de caña de azúcar altamente productiva. Gac. Agroindustrial EEAOC (75).

Cuenya M. I.; Chavanne, E. R.; Ostengo, S.; García, M. B.; Ahmed, M. A.; Costilla, D. D.; Díaz Romero, C.; Espinosa, M. A.; Díaz, J. V. y Delgado N. 2013. TUC 00-19: una nueva variedad de caña de azúcar altamente productiva y de maduración temprana. Gac. Agroindustrial EEAOC (77).

Cuenya, M. I.; Chavanne, E. R.; Ostengo, S.; Costilla, D. D.; García, M. B.; Díaz Romero, C.; Díaz, J. V.; Espinosa, M. A.; Ahmed, M. A.; García, J. M. y Aybar Guchea, M. 2015. Comportamiento productivo y fitosanitario de TUC 03-12, una nueva variedad de caña de azúcar para la provincia de Tucumán. Gac. Agroindustrial EEAOC (79).

Cuenya, M. I.; Chavanne, E. R.; Ostengo, S.; Costilla, D. D.; García, M. B.; Díaz Romero, C.; Díaz, J. V.; Espinosa, M. A. y Aybar Guchea, M. 2019a. Comportamiento productivo y fitosanitario de TUC 00-65, una nueva variedad de caña de azúcar para la provincia de Tucumán. Gac. Agroindustrial EEAOC (82).

Cuenya, M. I.; Chavanne, E. R.; Ostengo, S.; García, M. B.; Costilla, D. D.; Espinosa, M. A.; Díaz Romero, C.; Díaz, J. V. y Aybar Guchea, M. 2019b. Comportamiento productivo y fitosanitario de TUC 02-22, una nueva variedad de caña de azúcar de maduración temprana, altamente productiva. Gac. Agroindustrial EEAOC (83).

Cuenya, M. I.; Chavanne, E. R.; Ostengo, S.; Costilla, D. D.; García, M. B.; Díaz Romero, C.; Díaz, J. V.; Espinosa, M. A. y Aybar Guchea, M. 2019c. Comportamiento productivo y fitosanitario de TUC 06-7, una nueva variedad de caña de azúcar desarrollada por la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres. Gac. Agroindustrial EEAOC (84).

Henriquez, D. D.; Medina, P.; Aybar Guchea, M.; Figueroa, M. F.; Costilla, D. D.; Díaz, J. V.; Díaz Romero, C. y Ostengo, S. 2023. Relevamiento de la distribución varietal y del uso de otras tecnologías en el cultivo de caña de azúcar en la provincia de Tucumán: campaña 2022/2023. Reporte Agroindustrial EEAOC Nº 282.

Ostengo S.; Serino, G.; Perera, F.; Racedo, J; Mamani Gonzáles, S.; Yáñez Cornejo, F. y Cuenya, M. I. 2022. Sugarcane breeding, germplasm development and supporting genetics research in Argentina. Sugar Tech 24, 166–180. https://doi.org/10.1007/s12355-021-00999-z

COMPORTAMIENTO MADURATIVO Y POTENCIAL SACARINO DE LAS VARIEDADES TUC 08-10 Y TUC 03-12 EN DIFERENTES AMBIENTES DEL ÁREA CAÑERA DE TUCUMÁN

Henriquez, D.D; Figueroa, M.F.; Medina, L.P.; Costilla, D.D.; Díaz, J.V.; Ghio, A. C.; Díaz Romero, A.C.; Sorol, N.R. y Ostengo S
Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres. Av. William Cross 3150, C.P. T4101XAC, Las Talitas, Tucumán, Argentina. dhenriquez@eeaoc.org.ar

Palabras Clave: curvas de maduración, Pol % caña, cosecha temprana.

Introducción

Tucumán, la principal provincia productora de caña de azúcar en Argentina (Fandos *et al*., 2025), manifiesta en los últimos ocho años una tendencia creciente al adelanto del inicio de la zafra (Fandos, 2025). Esto ocurre especialmente en campañas afectadas por heladas intensas, y es una estrategia que busca minimizar el impacto de las bajas temperaturas sobre el contenido sacarino de la caña, para asegurar niveles adecuados de calidad industrial. En este contexto, los cultivares de maduración temprana adquieren un rol estratégico, al permitir cosechas anticipadas con valores aceptables de sacarosa. El Subprograma de Mejoramiento Genético de Caña de Azúcar de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (SMGCA-EEAOC) orienta sus líneas de trabajo al desarrollo de variedades TUC con maduración temprana, además de otras características agronómicas e industriales de interés. En la caracterización de los cultivares que se liberan al medio productivo, uno de los parámetros clave evaluados es el porcentaje de Pol en caña (Pol % caña) en distintos momentos de la cosecha. Este indicador permite conocer la evolución del contenido sacarino a lo largo del período de zafra y elaborar curvas de maduración para cada variedad (Henriquez *et al.*, 2024). Entre los materiales desarrollados por el SMGCA, TUC 03-12, variedad liberada para cultivo comercial en 2015 (Cuenya *et al.*, 2015) y en creciente adopción por el sector productivo y TUC 08-10, recientemente liberada (Ostengo *et al.*, 2025), se destacan por su excelente comportamiento madurativo y elevado contenido sacarino en fechas iniciales de zafra. El presente estudio tuvo como objetivo evaluar el desempeño sostenido de estos materiales, en comparación con la variedad testigo LCP 85-384, durante cuatro campañas agrícolas en distintas localidades representativas de la región cañera de Tucumán.

Materiales y métodos

Se evaluaron las curvas de maduración de las variedades TUC 08-10, TUC 03-12 y LCP 85-384, esta última utilizada como testigo reconocido por su calidad industrial. Los datos se obtuvieron de diferentes sitios y campañas en los que participaron TUC 08-10 y TUC 03-12 como parte de la red de ensayos multiambientales del SMGCA-EEAOC. Las localidades seleccionadas comprendieron Campo Bello (Graneros), Fronterita (Famaillá), Santa Ana (Río Chico), Campo de Herrera (Famaillá), Río Seco (Monteros) y Los Pérez (Cruz Alta), ambientes representativos del área cañera de Tucumán. Se utilizó un diseño en bloques completamente aleatorizados (DBCA), con tres repeticiones por tratamiento. Cada parcela estuvo formada por tres surcos de 10 metros de longitud, separados por 1,60 metros. La evaluación se extendió durante cuatro campañas consecutivas (2022-2025), con muestreos quincenales entre el 15 de mayo y el 15 de octubre, en los que se determinó el Pol % caña como indicador del contenido sacarino. Cada muestra consistió en 10 tallos deshojados y despuntados en el punto natural de quiebre, tomados al azar de cada parcela. Las muestras se procesaron en el laboratorio de Química de Productos Industriales de la EEAOC con una desfibradora a martillo (“open cell” aproximadamente del 95%). El jugo se extrajo con prensa hidráulica, a una presión de 240 kg/cm^2 durante un minuto. Se empleó la metodología de análisis descrita por Diez *et al*. (2000) conocida como método directo de determinación de calidad.

El Pol % caña se calculó siguiendo la siguiente ecuación:

Pol % caña = [Pol % jugo x W% + Pol % bagazo x (100 - W%)]/100,

donde: W% es el peso del jugo obtenido en 100 g de caña desfibrada (“Extracción”); Pol % jugo fue medido usando un polarímetro *AntonPaar MCP 500 Sucromat*; Pol % bagazo fue determinado a partir del método de Norris (Spencer Meade, 1967).

El Pol % caña cuantifica el contenido sacarino total de la caña y refleja directamente la calidad azucarera inherente a la variedad. Está fuertemente relacionada con el contenido de sacarosa en el jugo y la cantidad de fibra en la caña cuyo valor influye en la extracción y se incluye en el cálculo de Pol % en el bagazo.

Resultados

Campaña 2022

En la localidad de Fronterita, TUC 03-12 y TUC 08-10 manifestaron valores elevados de Pol % caña en la segunda quincena de mayo: 15,17% y 15,19%, respectivamente (Figura 1). Ambas superaron al testigo LCP 85-384 (13,88%) en aproximadamente 1,3 puntos porcentuales (pp). Las dos variedades TUC mantuvieron un desempeño madurativo superior al testigo, con incrementos sostenidos de sacarosa (Pol % caña) durante todo el período evaluado. Al final de la zafra, TUC 03-12 registró el valor más alto, superando a TUC 08-10 por 0,35 pp. Ambas variedades se impusieron al testigo con diferencias de 1,44 y 1,09 pp, respectivamente.

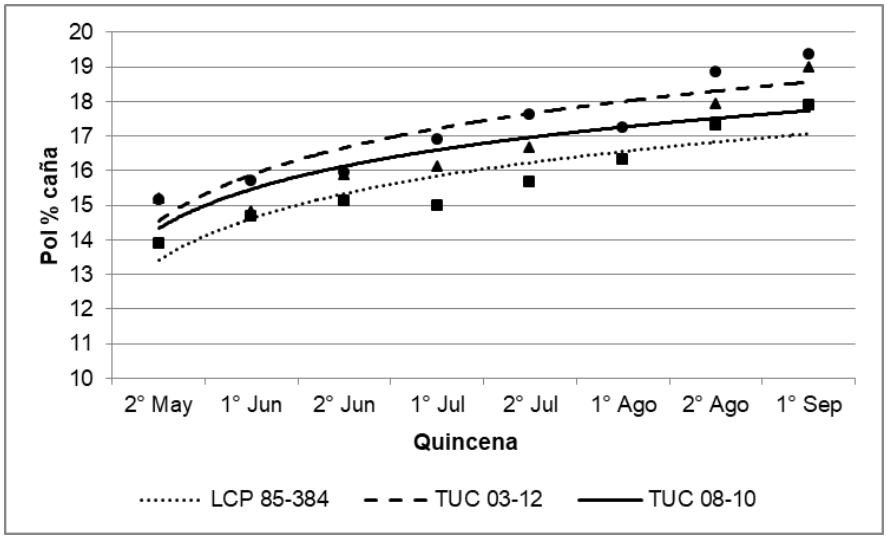


Figura 1. Evolución quincenal del Pol % caña de las variedades TUC 03-12, TUC 08-10 y LCP 85-384 en edad soca 4, durante la campaña 2022 en Fronterita.

Los muestreos realizados en Campo Bello, debieron ser interrumpidos prematuramente en la segunda quincena de julio, lo que limitó la evaluación completa del ciclo madurativo. A pesar de ello, las variedades TUC mostraron un desempeño destacado desde la segunda quincena de mayo con valores de Pol % caña que superaron al testigo en más de 1,6 pp (Figura 2). En los dos últimos muestreos LCP 85-384 superó a TUC 03-12 con valores levemente superiores de sacarosa, mientras que TUC 08-10 alcanzó el valor más alto a mitad de zafra (segunda quincena de julio), superando al testigo por 0,83 pp y a TUC 03-12 por 1,13 pp (Figura 2).

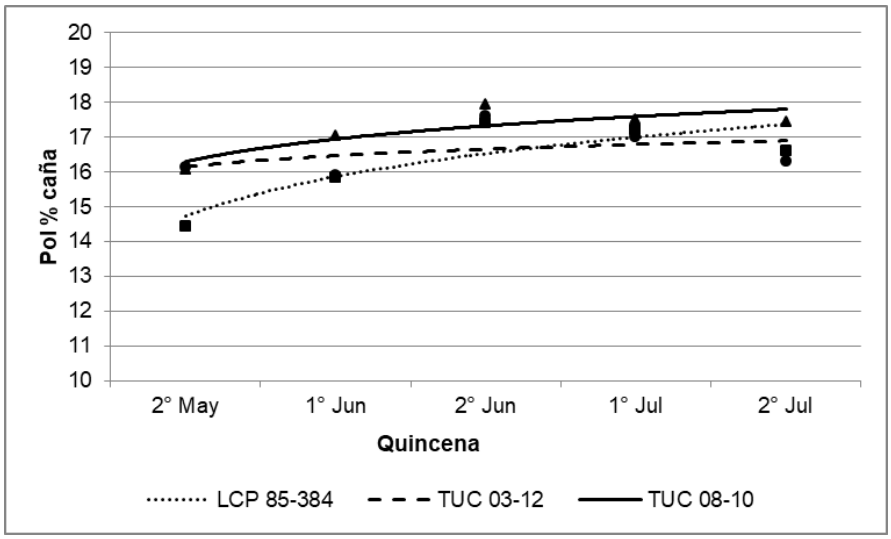


Figura 2. Evolución quincenal del Pol % caña de las variedades TUC 03-12, TUC 08-10 y LCP 85-384 en edad soca 4, durante la campaña 2022 en Campo Bello.

Campaña 2023

La dinámica de acumulación de sacarosa para la campaña 2023, en el ensayo ubicado en Río Seco, puede ser visualizada en la Figura 3. Las variedades TUC exhibieron un rendimiento sacarino (Pol% caña) superior y consistente en comparación con el testigo durante todo el periodo de zafra. Desde el muestreo inicial (2° quincena de mayo) TUC 08-10 y TUC 03-12 superaron al testigo en 1,53 y 0,77 pp respectivamente. En la última evaluación (1° quincena de octubre), TUC 08-10 alcanzó el valor máximo de Pol % caña, manteniendo una diferencia de 1,83 pp sobre LCP 85-384. TUC 03-12 finalizó con un elevado contenido sacarino, 0,84 pp por encima del testigo. Es importante destacar que TUC 08-10 demostró un mayor potencial de acumulación de sacarosa a finales de zafra, superando a TUC 03-12 en 0,99 pp en el último muestreo.

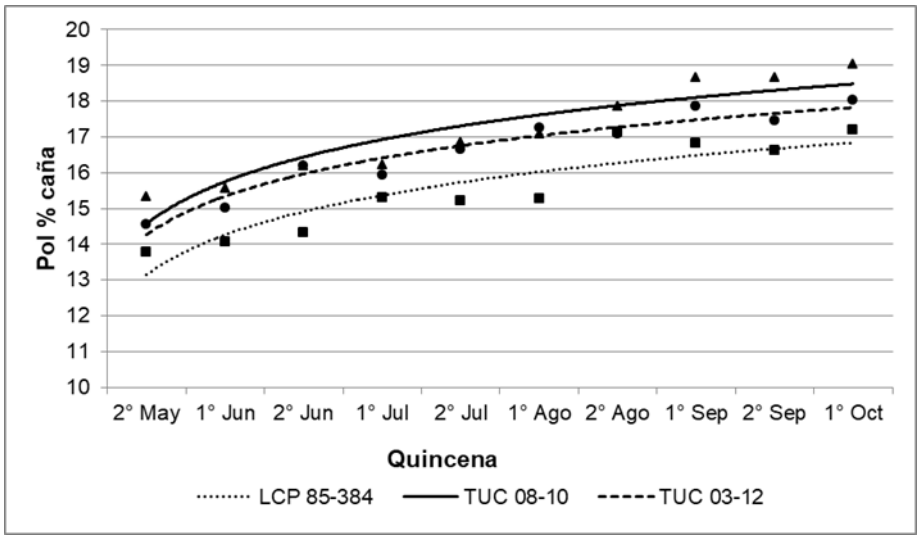


Figura 3. Evolución quincenal del Pol % caña de las variedades TUC 03-12, TUC 08-10 y LCP 85-384 en edad soca 1, durante la campaña 2023 en Río Seco.

En la localidad de Campo de Herrera (Figura 4), las variedades TUC 03-12 y TUC 08-10 alcanzaron una performance sacarina significativamente superior a la variedad testigo LCP 85-384, replicando el comportamiento observado en Rio Seco. TUC 08-10 presentó un contenido inicial de Pol % caña de 15,45% en la 2° quincena de mayo, superando en 1,90 pp al testigo. Por su parte, TUC 03-12 con un valor de Pol % caña de 13,97%, también superó al testigo en 0,43 pp al inicio de la zafra. En la 1° quincena de septiembre TUC 08-10 alcanza su máximo valor con 18,81% de Pol % caña. Este valor representa una ventaja de 3,44 pp sobre LCP 85-384 y 1,71 pp sobre TUC 03-12.

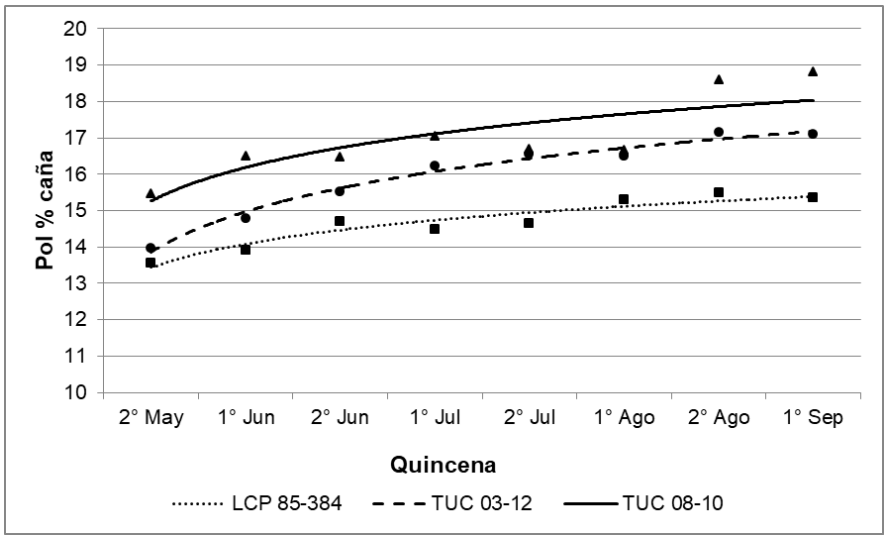


Figura 4. Evolución quincenal del Pol % caña de las variedades TUC 03-12, TUC 08-10 y LCP 85-384 en edad soca 1, durante la campaña 2023 en Campo de Herrera.

Campaña 2024

Durante la segunda quincena de mayo, en el ensayo ubicado en la localidad de Río Seco, ambas variedades TUC exhibieron un contenido sacarino superior al de LCP 85-384 (Figura 5). Concretamente, TUC 03-12 registró 14,23%, superando al testigo en 2,03 pp, mientras que TUC 08-10 registró una diferencia de 1,01 pp sobre LCP 85-384. En la 1° quincena de octubre TUC 08-10 alcanzó el valor máximo de la campaña, superando al testigo y a TUC 03-12 por diferencias de 0,30 y 0,39 pp respectivamente.

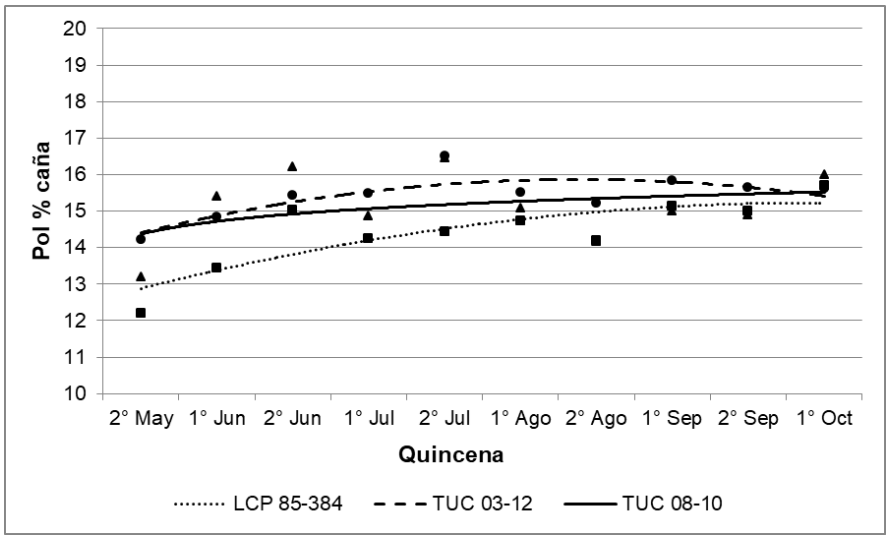


Figura 5. Evolución quincenal del Pol % caña de las variedades TUC 03-12, TUC 08-10 y LCP 85-384 en edad soca 2 durante la campaña 2024. Localidad Río Seco.

En la localidad de Los Pérez la serie de muestreos se interrumpió prematuramente tras la evaluación de la primera quincena de julio. No obstante, los datos recolectados hasta ese momento muestran una tendencia de maduración temprana muy favorable para las variedades TUC. Desde el muestreo inicial, ambas variedades TUC mostraron un contenido sacarino muy similar, superando al testigo LCP 85-384 en aproximadamente 1,4 pp (Figura 6). Esta tendencia se observó hasta la primera quincena de julio, fecha en la que las variedades TUC 03-12 y TUC 08-10 superaron los niveles de sacarosa del testigo por 0,63 y 0,34 pp respectivamente

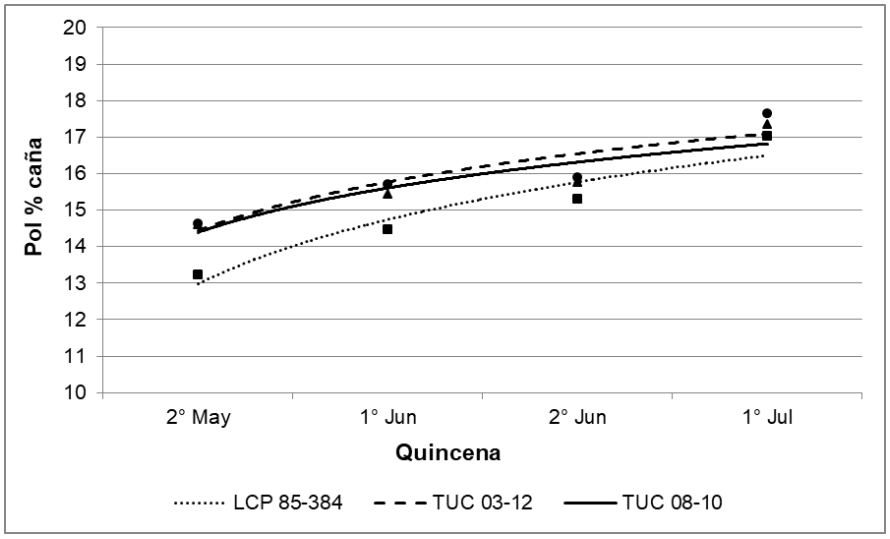


Figura 6. Evolución quincenal del Pol % caña de las variedades TUC 03-12, TUC 08-10 y LCP 85-384 en edad soca 2 durante la campaña 2024. Localidad Los Perez.

Campaña 2025

En Río Seco, desde el muestreo inicial, las variedades TUC presentaron valores de Pol % cañasuperiores al testigo LCP 85-384. En particular, TUC 08-10 y TUC 03-12 mostraron ventajas de 1,42 y 1,05 pp, respectivamente. Durante la segunda quincena de agosto, TUC

08-10 alcanzó el valor máximo de Pol % caña, superando a TUC 03-12 en 0,73 pp y al testigo en 1,86 pp (Figura 7).

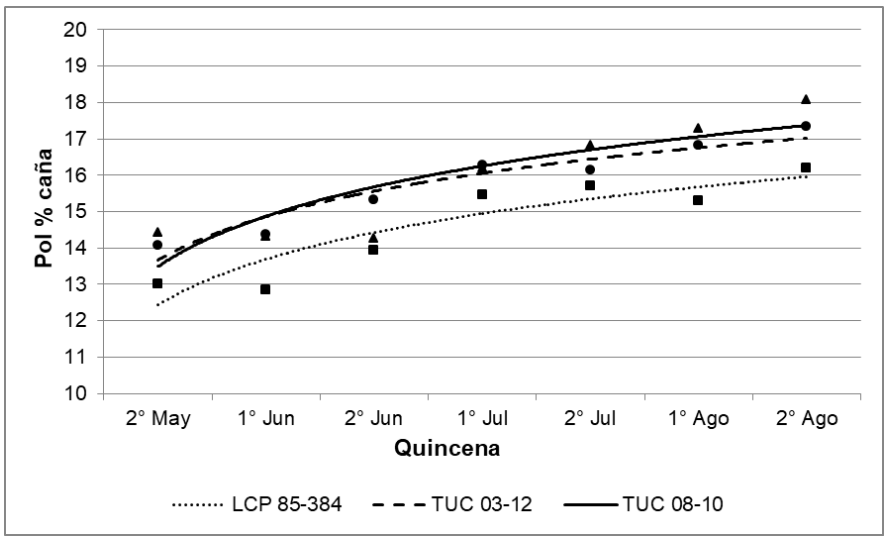


Figura 7. Evolución quincenal del Pol % caña de las variedades TUC 03-12, TUC 08-10 y LCP 85-384 en edad soca 3 durante la campaña 2025. Localidad Río Seco.

La Figura 8 presenta la evolución del Pol % caña en la localidad de Santa Ana durante la Campaña 2025. TUC 08-10 registró el mayor contenido sacarino inicial superando al testigo en 0,93 pp, mientras que TUC 03-12 también lo hizo con una mínima diferencia (0,27 pp). En la segunda quincena de agosto TUC 08-10 registró 17,73 % de Pol % caña. Si bien las diferencias respecto del testigo y de TUC 03-12 fueron inferiores a 0,5 pp, esta variedad presentó de manera consistente los valores más elevados de Pol durante el período evaluado.

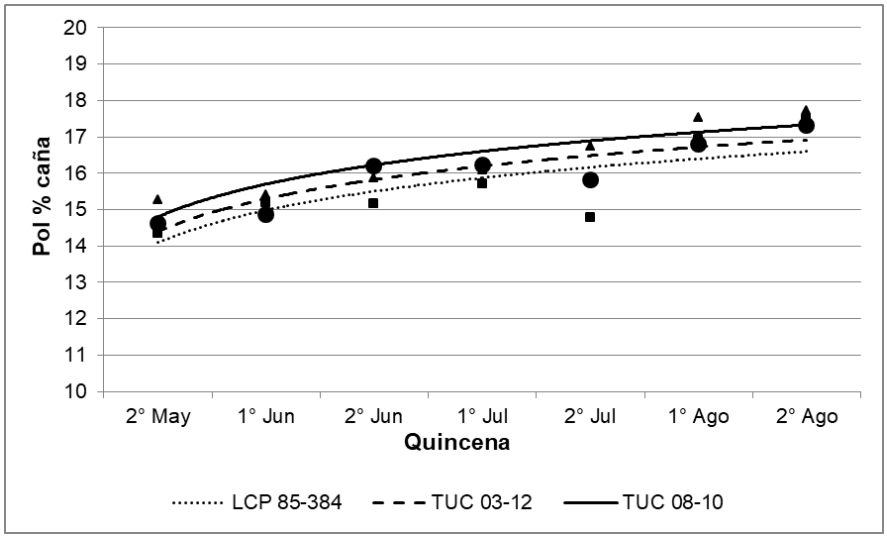


Figura 8. Evolución quincenal del Pol % caña de las variedades TUC 03-12, TUC 08-10 y LCP 85-384 en edad soca 3 durante la campaña 2025. Localidad Santa Ana.

Conclusiones

Las variedades TUC 08-10 y TUC 03-12 presentaron elevados valores de Pol % caña desde el inicio de la cosecha, acompañados de una alta tasa de acumulación de sacarosa a lo largo de la zafra, en todos los ambientes y campañas evaluadas. En particular, el cultivar TUC 08-10 se destacó por superar a TUC 03-12 en el inicio de la zafra en cuatro de los ocho

ensayos, mientras que TUC 03-12 solo fue superior en dos y con resultados similares en los dos restantes. Esta tendencia se consolidó hacia el final de la zafra, donde TUC 08-10 mostró un rendimiento superior en seis de los ocho ensayos evaluados. Estos hallazgos sugieren que TUC 03-12 y en especial TUC 08-10, presentan un alto potencial sacarino y una buena adaptabilidad en los ambientes evaluados, posicionándolas como variedades promisorias para zonas con inicio de zafra anticipado, capaces de aportar flexibilidad operativa y estabilidad en la calidad industrial de la producción azucarera de Tucumán.

Citas bibliográficas

Cuenya, M.I.; E. R. Chavanne; S. Ostengo; D. D. Costilla; M. B. García; C. Díaz Romero; J. V. Díaz; M. A. Espinosa; M. A. Ahmed, J. M. García y M. Aybar Guchea. 2015. Comportamiento productivo y fitosanitario de TUC 03-12, una nueva variedad de caña de azúcar para la provincia de Tucumán. Gac. Agroindustrial EEAOC (79).

Diez O.; Zossi S.; Chavanne E.; y Cárdenas G. 2000. Calidad industrial de las variedades de caña de azúcar de maduración temprana LCP 85-384 y LCP 85-376 en Tucumán. Análisis de sus principales constituyentes físico-químicos. Revista Industrial y Agrícola de Tucumán 77 (2): 39-48.

Fandos 2025. Dinámica espacial y temporal de la cosecha de caña en la zafra 2025. (En línea). Consultado el 06/11/2025. Disponible en https://www.youtube.com/watch?v=_0h_rm7hWyE&list=PLcH7mJf11evuFl3GLyH-F6lwxYaIqmFzH&index=5

Fandos C., Scandaliaris J., Scandaliaris P. y Carreras Baldrés J. 2025. Estimación del área cosechable y de la producción de caña de azúcar para la zafra 2025 en Tucumán. Reporte Agroindustrial N° 344.

Henriquez, D. D.; Costilla, D. D.; Díaz J. V.; Medina, L. P.; Sorol N. R. y Ostengo, S. 2023.

Evolución madurativa de tres variedades de caña de azúcar “tuc”, durante la campaña 2023. Libro de resúmenes XXIII reunión nacional de técnicos de la caña de azúcar: 108-112.

Ostengo S., Díaz Romero C., Costilla D., Díaz J., Medina P., Henriquez D., Figueroa F., Ghio C., Lobo J. y Sorol N. 2025. Comportamiento productivo y fitosanitario de TUC 08-10, una nueva variedad de caña de azúcar desarrollada por la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres. Gac. Agroindustrial EEAOC (86).

Spencer - Meade. 1967. Manual del Azúcar de Caña, Editorial: Montaner y Simón, p. 457.

EVALUACIÓN DE INDICADORES DE DAÑO POR HELADAS EN VARIEDADES TUC DE CAÑA DE AZÚCAR EN TUCUMÁN, ARGENTINA

Henriquez, D.D; Figueroa, M.F.; Medina, L.P.; Costilla, D.D.; Díaz, J.V.; Ghio, A. C.; Díaz Romero, A.C.; Sorol, N.R. y Ostengo S.

Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC), Las Talitas, Tucumán, R. Argentina, T4101XAC. Email: dhenriquez@eeaoc.org.ar

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

Introducción

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

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

Diversas estrategias de manejo pueden mitigar las pérdidas de sacarosa causadas por este evento climático, entre ellas el uso de cultivares de maduración temprana y/o con mayor tolerancia al deterioro post-helada, la aplicación de maduradores químicos para acelerar la acumulación de sacarosa y la coordinación eficiente de las operaciones de cosecha y molienda, priorizando las áreas más afectadas. En este contexto, un objetivo clave del Programa de Mejoramiento Genético de la Caña de Azúcar en la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (PMGCA-EEAOC) es el desarrollo de nuevas variedades “TUC” de maduración temprana, cruciales en las regiones más propensas a heladas. Estos cultivares permiten la acumulación de sacarosa antes del inicio del período de bajas temperaturas, a diferencia de los cultivares de maduración intermedia o tardía que aún estarían en fases de crecimiento activo y serían más vulnerables a las pérdidas de rendimiento y calidad. Dado este escenario, el PMGCA-EEAOC tiene un gran interés en caracterizar el comportamiento de las principales variedades TUC, que actualmente ocupan el 30,3% del área cultivada con caña de azúcar (Henriquez *et al.,* 2023), a fin de generar información valiosa para optimizar las estrategias de manejo y cosecha. Por ello, el objetivo de este estudio fue evaluar la respuesta al deterioro posterior a una helada de las cinco variedades de caña de azúcar TUC más cultivadas.

Materiales y métodos

Variedades evaluadas

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

Implementación del ensayo de campo

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

Muestreo y evaluación de parámetros relacionados con las heladas

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

Datos meteorológicos

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

Análisis de datos

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

$$\text{Sacarosa (g/100g)} = \alpha + (\beta 1 * x) * (x < \gamma) + [\beta 1 * \gamma + \beta 2 * (x - \gamma)] * (x \geq \gamma) + \varepsilon,$$

donde:

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

β1 corresponde a la pendiente del primer segmento y describe la tasa inicial de pérdida de sacarosa en función del tiempo x (código de la fecha de muestreo).

β2 es la pendiente del segundo segmento y representa la tasa final de pérdida de sacarosa a lo largo del tiempo.

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

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

Resultados

La primera helada significativa ocurrió el 11 de julio de 2024, con una intensidad moderada en Los Quemados (−3,5 °C durante 8 h) y una intensidad severa en Santa Ana (−4,2°C durante 10 h). Este evento marcó el comienzo de una serie de heladas consecutivas, con temperaturas mínimas que oscilaron entre −2°C y −4°C y duraciones prolongadas, que se extendieron hasta mediados de julio. Posteriormente, los eventos de heladas continuaron con menor intensidad hasta el 10 de agosto, con temperaturas mínimas alrededor de −2°C y duraciones más cortas (Figura 1).

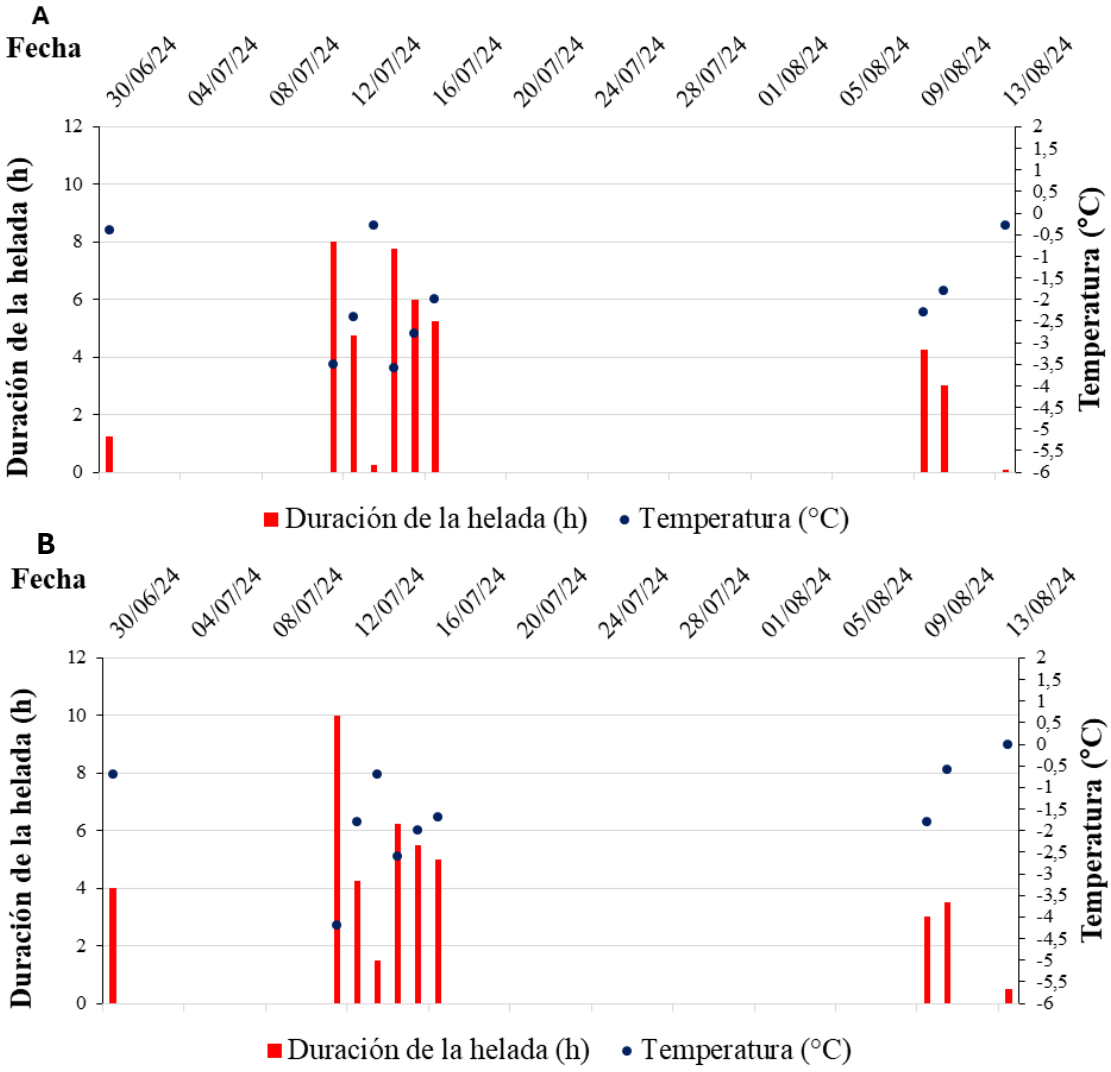


Figura 1. Temperaturas mínimas y su duración en (A) Los Quemados, Leales, y (B) Santa Ana, Río Chico (Tucumán, Argentina), durante la temporada 2024.

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

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

En Los Quemados, LCP 85-384 exhibió 17,42% de sacarosa el día 0 después de la helada, con la tasa inicial de disminución más baja (β1=−0,03) que no fue estadísticamente significativa (p=0,880), lo que refleja su notable estabilidad durante las primeras etapas del ciclo posterior a la helada (Tabla 1). Por el contrario, TUCCP 77-42 mostró el valor de sacarosa más bajo el día 0 después de la helada (16,64%), con la tasa inicial de disminución más alta (β1=−0,85; p=0,004), lo que indica una pérdida abrupta de sacarosa desde el principio.

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

LCP 85-384 mostró un punto de inflexión moderado (y=4,25), manteniendo una baja pérdida de sacarosa hasta 57 días después de la helada (Figura 2B); su tasa de disminución final fue significativa (β2=−1,53; p=0,019), lo que indica una marcada reducción después del punto de inflexión. Con respecto a TUCCP 77-42, aunque su punto de inflexión fue posterior (y=5,76; 78 días después de la helada) (Figura 2C), la pérdida de sacarosa se intensifica aún más después de este punto debido a su alta y significativa tasa de disminución final (β2=−2,77; p=0,027). Estas características la posicionan como la variedad más susceptible a las heladas.

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

Con respecto a la tasa final de disminución de sacarosa (β2), TUC 06-7 mostró una caída brusca y significativa en el contenido de sacarosa después del punto de inflexión (Tabla 1, Figura 2F), seguida por TUC 03-12 (Tabla 1, Figura 2E) y TUC 02-22 (Tabla 1, Figura 2G), mientras que TUC 95-10 (Tabla 1, Figura 2D) y TUC 00-65 (Tabla 1, Figura 2H) exhibieron valores de β2 significativos similares a LCP 85-384.

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

Variedad	α[1]	β1[2] (P-valor)	γ[3]	β2[4] (P-valor)
LCP 85-384	17,42	-0,03 (0,880)	4,25	-1,53 (0,019)
TUCCP 77-42	16,64	-0,85 (0,004)	5,76	-2,77 (0,027)
TUC 95-10	17,19	-0,34 (0,041)	4,62	-1,52 (0,004)
TUC 03-12	17,33	-0,12 (0,728)	3,82	-2,10 (0,003)
TUC 06-7	17,18	-0,22 (0,186)	5,65	-3,18 (0,018)
TUC 02-22	19,18	-0,53 (0,056)	4,00	-1,81 (0,009)
TUC 00-65	17,38	-0,64 (0,043)	3,93	-1,46 (0,003)

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

En el ensayo de Santa Ana, LCP 85-384 exhibió un contenido de sacarosa de 18,50% el día 0 después de la helada, mostrando un comportamiento similar al observado en Los Quemados, con una baja tasa de disminución inicial (β1= −0,17), que no fue estadísticamente significativa, lo que indica estabilidad durante las primeras etapas (Tabla 2). TUCCP 77-42 comenzó con el contenido de sacarosa más bajo (16,95%); sin embargo, a diferencia de Los Quemados, exhibió una tasa de disminución inicial moderada pero estadísticamente significativa, lo que resultó en una menor pérdida de sacarosa en comparación con esa localidad (Tabla 2). Las variedades TUC 95-10 y TUC 03-12 mostraron valores de sacarosa similares a LCP 85-384 el día 0 después de la helada (Tabla 2), excepto TUC 02-22, que alcanzó valores más altos (19,53%), y TUC 06-7, que tuvo valores más bajos (17,94%) (Tabla 2). Con respecto a la tasa de disminución inicial de sacarosa, las variedades TUC 95-10, TUC 06-7 y TUC 03-12 exhibieron valores bajos y no significativos (Tabla 2), lo que demuestra una notable estabilidad al comienzo del ciclo.

LCP 85-384 presentó un punto de inflexión temprano (y=4,00; 54 días después de la helada), después del cual la pérdida de sacarosa se aceleró ligeramente (β2=−0,89; p=0,039), lo que señala un comportamiento relativamente estable bajo condiciones de heladas (Figura 3B). En el caso de TUCCP 77-42, se observó un punto de inflexión intermedio (y=4,68; 63 días después de la helada), con una tasa de disminución final moderadamente alta que fue significativa, lo que sugiere una respuesta menos favorable (Tabla 2) (Figura 3C). De las variedades TUC evaluadas, TUC 06-7, TUC 95-10, TUC 03-12 y TUC 02-22 mostraron puntos de inflexión que ocurrieron entre 63 y 81 días después de la helada (Figuras 3F, D, E y G).

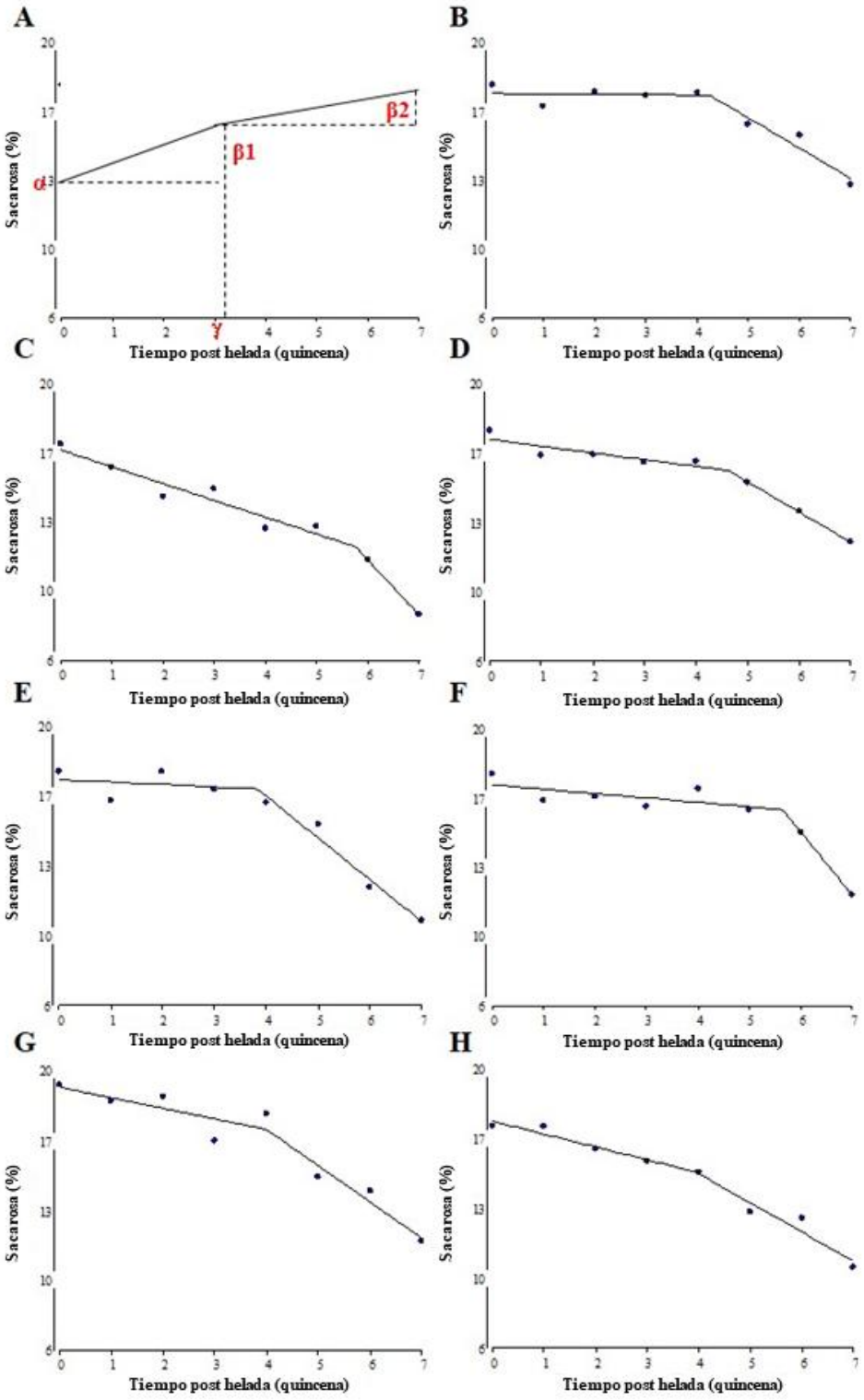


Figura 2. Cambios en el contenido de sacarosa (%) en variedades de caña de azúcar en edad soca 2 durante la temporada 2024, analizados a partir de la primera helada registrada. Los Quemados, Departamento de Leales, Tucumán, Argentina. (A) Modelo gráfico, (B) LCP 85-384, (C) TUCCP 77-42, (D) TUC 95-10,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

En cuanto a la tasa de disminución final de sacarosa (β2), TUC 02-22 exhibió el valor más alto y significativo (Tabla 2; Figura 3G), lo que refleja una pérdida acelerada de sacarosa

después de su punto de inflexión, seguida por TUC 03-12 (Figura 3E), TUC 95-10 (Figura 3D) y TUC 06-7 (Figura 3F), todas las cuales fueron significativas (Tabla 2). La variedad TUC 02-22 estaba caída al momento del muestreo, lo que probablemente afectó su resistencia al daño por heladas. La caña caída es más susceptible al daño por heladas, ya que las temperaturas cerca del suelo son más bajas (Romero *et al*., 2009).

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

Variedad	α[1]	β1[2] (P-valor)	γ[3]	β2[4] (P-valor)
LCP 85-384	18,50	-0,17 (0,599)	4,00	-0,89 (0,039)
TUCCP 77-42	16,95	-0,27 (0,050)	4,68	-1,05 (0,012)
TUC 95-10	18,18	-0,11 (0,618)	4,63	-1,38 (0,035)
TUC 03-12	18,49	-0,07 (0,653)	4,82	-1,40 (0,015)
TUC 06-7	17,94	-0,02 (0,981)	5,29	-0,76 (0,014)
TUC 02-22	19,53	-0,68 (0,004)	5,96	-3,69 (0,006)

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

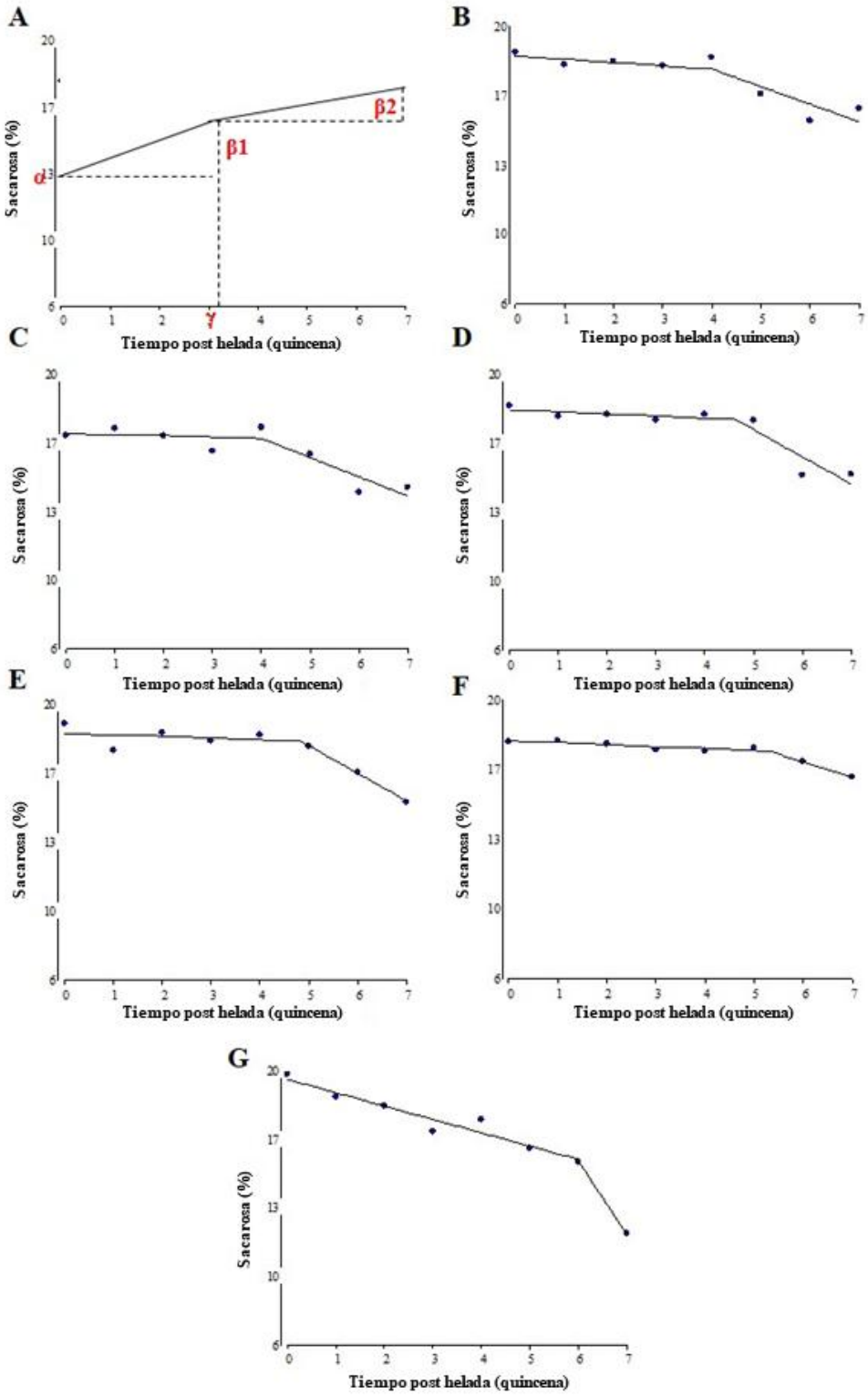


Figura 3. Cambios en el contenido de sacarosa (%) en variedades de caña de azúcar en edad soca 2 durante la temporada 2024, analizados a partir de la primera helada registrada. Santa Ana, departamento de Río Chico, Tucumán, Argentina. (A) Modelo gráfico, (B) LCP 85-384, (C) TUCCP 77-42, (D) TUC 95-10,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

En el presente estudio, tanto el control LCP 85-384 como las variedades TUC de maduración temprana mostraron generalmente una menor disminución inicial de sacarosa (valores de β1), en comparación con el control TUCCP 77-42, particularmente en la localidad

de Los Quemados, donde el daño por heladas fue más severo. Esta observación apoya la hipótesis de que la maduración temprana puede ayudar a mitigar el impacto inmediato de las heladas. Sin embargo, es importante señalar que, a pesar de su clasificación como de maduración temprana, todas las variedades TUC exhibieron una disminución final significativa en el contenido de sacarosa (valores de β2). Esto sugiere que, una vez que el tejido de la caña de azúcar sufre estrés por heladas, se inicia un proceso de deterioro irreversible que causa la pérdida progresiva de sacarosa.

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

Las condiciones ambientales, particularmente la disponibilidad de agua, parecieron influir en el rendimiento varietal entre las localidades. Si bien la intensidad de la helada se clasificó como moderada en Los Quemados y severa en Santa Ana, la pérdida de sacarosa posterior a la helada fue más pronunciada en Los Quemados para la mayoría de las variedades (tanto en las etapas iniciales como finales, con pendientes de β2 más pronunciadas). Esta aparente contradicción puede explicarse por el estado hídrico contrastante observado en ambos sitios. De febrero a octubre de 2024, Los Quemados experimentó balances hídricos negativos recurrentes y un menor almacenamiento de agua en el suelo, particularmente durante el período crítico posterior a la helada (julio a septiembre), lo que sugiere la presencia de estrés hídrico. Con respecto a Santa Ana, mantuvo un mayor almacenamiento de agua en el suelo y menos déficits hídricos durante el mismo período.

La combinación de una intensidad de helada moderada y un déficit de agua sostenido en Los Quemados puede haber exacerbado el daño, lo que llevó a una degradación acelerada de la sacarosa. Por el contrario, las condiciones más húmedas en Santa Ana podrían haber amortiguado el impacto fisiológico de la helada, lo que resultó en menores pérdidas de sacarosa, incluso bajo condiciones de heladas severas. El control susceptible TUCCP 77-42 ofrece un claro ejemplo de esta interacción entre la disponibilidad de agua y la respuesta a las heladas. En Los Quemados, TUCCP 77-42 mostró una marcada disminución inicial de sacarosa (β1=−0,85) y una alta tasa final de pérdida de sacarosa (β2=−2,77) (Tabla 1), lo que refleja su vulnerabilidad en condiciones combinadas de heladas y estrés hídrico. Sin embargo, en Santa Ana, a pesar de la mayor intensidad de la helada, la misma variedad presentó una disminución inicial de sacarosa considerablemente menor (β1=−0,27) y una menor tasa de pérdida de sacarosa final (β2=−1,05) (Tabla 2).

Conclusiones

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

LCP 85-384, confirmó su valor como referencia de estabilidad bajo frío, manteniendo niveles de sacarosa consistentes incluso en condiciones contrastantes. TUC 06-7 se destacó por su estabilidad y punto de inflexión tardío, lo cual sugiere una ventana de cosecha más extensa. TUC 95-10 mostró un comportamiento equilibrado, adecuado para cosechas intermedias. TUC 03-12 demostró una excelente estabilidad inicial. Sin embargo, su punto de inflexión temprano, observado particularmente en Los Quemados, resalta la necesidad de un momento óptimo de cosecha para maximizar la recuperación de sacarosa después de la helada. TUC 02-22 se caracterizó por su elevado contenido inicial de sacarosa, que actuó como un amortiguador parcial frente al impacto de las heladas, permitiéndole conservar niveles aceptables en las etapas tempranas del ciclo. No obstante, esta ventaja inicial se diluyó rápidamente debido a su alta tasa de pérdida posterior, lo que redujo su estabilidad bajo frío. Este desempeño fue notablemente inferior en Santa Ana, probablemente debido al

vuelco observado. Por lo tanto, es crucial reevaluar su performance en condiciones de cultivo normales, aunque su comportamiento sugiere que una cosecha temprana es altamente recomendable para capitalizar su buen contenido inicial de sacarosa. TUC 00-65 en Los Quemados mostró una rápida pérdida inicial de sacarosa bajo condiciones de heladas, pero aún con mejor desempeño que TUCCP 77-42. No pudo evaluarse en Santa Ana, por lo que se necesitan más ensayos para una caracterización más precisa. Sin embargo, su comportamiento sugiere considerar una cosecha temprana en condiciones de heladas. TUCCP 77-42, el control susceptible, ratificó su alta sensibilidad al frío, reafirmando su carácter inadecuado para zonas con heladas recurrentes.

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

Citas bibliográficas

Di Rienzo, J. A.; F. Casanoves; M. G. Balzarini; L. Gonzalez; M. Tablada y C. W. Robledo. 2020. InfoStat versión 2020. Centro de Transferencia InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. http://www.infostat.com.ar.

Eggleston, G.; B. L. Legendre and T. R. C. Tew. 2004. Indicators of freeze-damaged sugarcane varieties which can predict processing problems. Food Chemistry 87: 119-133.

Härter, A.; W. Rodrigues Antunes; A. A. Campos de Azeredo; S. D. dos A. e Silva and R. A. de Oliveira. 2023. Early screening for cold tolerance in sugarcane breeding. Pesquisa Agropecuária Brasileira 58, e02711.

Henriquez, D. D.; P. Medina; M. Aybar Guchea et al. 2023. Relevamiento de la distribución varietal y del uso de otras tecnologías en el cultivo de caña de azúcar en la provincia de Tucumán: campaña 2022/2023. Reporte Agroindustrial EEAOC 314.

Ostengo, S. 2020. Aproximaciones metodológicas para la caracterización de la calidad industrial de genotipos de caña de azúcar. Tesis Doctoral inédita. Universidad Nacional de Tucumán, Tucumán, Argentina.

Romero, E. R.; P. A. Digonzelli; M. J. Tonatto et al. 2009. Heladas. Efecto sobre los cañaverales y alternativas de manejo. En: Romero, E. R.; P. A. Digonzelli y J. Scandaliaris (eds.), Manual del Cañero, EEAOC, Argentina, pp. 197-206.

INFLUENCIA DE LA SEVERIDAD DE LAS HELADAS EN LA DINÁMICA DE EMERGENCIA DE CAÑA SEMILLA EN TRES VARIEDADES TUC EN TUCUMAN, ARGENTINA

Pérez Alabarce, J.; Medina, M.; Fajre, S. y Giardina, J.
William Cross 3150, Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres, Las Talitas, Tucumán, Argentina, jfperezalabarce@eeaoc.org.ar.

Palabras clave: Caña de azúcar, caña semilla, tolerancia a heladas, variedades TUC

Introducción

En Argentina, las heladas afectan la mayor parte del área cultivada con caña de azúcar, Tucumán y Santa Fe son las provincias en las cuales se registran con mayor frecuencia los efectos de este fenómeno, con intensidades y duraciones variables según el año y las distintas zonas agroecológicas. Al respecto, Giardina *et al.* (2019) sostienen que la ocurrencia de heladas provoca disminuciones importantes en la producción de azúcar, así como también en la disponibilidad de caña semilla para las plantaciones y/o renovaciones comerciales.

La caña semilla afectada por heladas muestra daños en sus yemas a lo largo del tallo, cuya distribución y severidad responden a patrones variables en función del evento meteorológico, la localización y topografía de los lotes, la producción de los mismos, el grado de vuelco de los tallos y, especialmente, las variedades implantadas. Asimismo, se evidencia una disminución en su potencial de brotación y según el nivel de daño alcanzado por las bajas temperaturas, su empleo en plantaciones comerciales puede dar como resultado cañaverales con numerosas fallas, lotes de baja productividad e incluso el fracaso total de la plantación.

En este escenario, donde el impacto de las heladas sobre la caña semilla condiciona **la implantación y el comportamiento productivo de los cañaverales**, la composición varietal adquiere un rol determinante. El área cañera de la provincia se encuentra atravesando un proceso de diversificación varietal, en el cual las variedades TUC, liberadas por el Subprograma de Mejoramiento Genético de la Caña de Azúcar de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (SMGCA-EEAOC), han desempeñado un papel fundamental. En este sentido, los cultivares liberados en 2019, TUC 02-22 y TUC 06-7, presentan una creciente adopción por parte del sector cañero, mientras que se observa un interés incipiente por TUC 00-65 (Costilla *et al*., 2024).

Por tal motivo, conocer el comportamiento de la oferta varietal de la caña de azúcar en la provincia resulta fundamental, no solo para alcanzar el potencial productivo de cada material en los distintos ambientes de producción, sino también para orientar el manejo adecuado de la caña semilla según su tolerancia a heladas, asegurando la disponibilidad de material de propagación que permita cumplir con el propósito de plantación establecido.

A la fecha, son escasos los estudios comparativos sobre la tolerancia de las variedades TUC recientemente liberadas, a distintos niveles de heladas en la provincia de Tucumán, bajo manejo agronómico convencional.

El objetivo de este trabajo fue evaluar la influencia de distintos niveles de helada sobre la dinámica de emergencia de caña semilla en tres variedades TUC de caña de azúcar en la provincia de Tucumán.

Materiales y métodos

El ensayo se llevó a cabo en el predio de la EEAOC ubicado en la localidad de Las Talitas, provincia de Tucumán-Argentina, entre los meses de julio de 2024 y mayo de 2025. Se trabajó con las variedades TUC 06-7, TUC 02-22 y TUC 00-65 provenientes de tres semilleros Registrados del Proyecto Vitroplantas, ubicados en las localidades de El Naranjo (Dpto. Burruyacu), Soldado Maldonado (Dpto. Monteros) y en Los Quemados (Dpto. Leales).

De acuerdo a los registros de las estaciones meteorológicas de la Sección Agrometeorología de la EEAOC, durante los meses de julio y agosto de 2024, en las localidades de estudio se registraron dos niveles de heladas: suave y moderada (Tabla 1).

Tabla 1. Registros de intensidad, duración acumulada y días con helada por localidad durante julio-agosto de 2024 (EEAOC).

Localidad	Intensidad (°C)	Duración acumulada (hs)	Días con helada
El Naranjo	-2.40	22.00	6
Soldado Maldonado	-3.20	44.6	9
Los Quemados	-3.60	39.80	11

Para caracterizar el daño por helada en el cañaveral, 15 días después de la ocurrencia de las mismas, los lotes se monitorearon de acuerdo a la escala de daños propuesta por Digonzelli *et al.* (2015). Se destaca que todos los lotes semilleros superaron las 80 t/ha de producción y se encontraban en pie al momento del muestreo.

Al establecer el ensayo, se trabajó con una densidad de plantación de entre 12 y 15 yemas por metro lineal de surco (a dos cañas). Los tallos se trocearon logrando estacas de dos a tres yemas. Cada parcela estuvo formada por cuatro surcos de tres metros de largo y se evaluó en estaciones fijas de conteo establecidas en los dos surcos centrales. El diseño experimental fue de bloques al azar con tres repeticiones. El cultivo se manejó bajo prácticas agronómicas convencionales, que incluyeron control químico y mecánico de malezas, fertilización con 2 kg de urea por surco y no se efectuaron riegos suplementarios.

Se utilizó un diseño factorial completo para evaluar el efecto de tres factores: Variedad (3 niveles), Helada (3 niveles) y tiempo medido en días después de plantación (DDP). La variable de respuesta directa fue: población de tallos (número de tallos/metro), determinado a los 60, 80, 110 y 210 DDP.

Dada la variabilidad de los datos de población de tallos, derivados de conteos realizados a campo, se aplicó la transformación raíz cuadrada ($\sqrt{(x + 0.5)}$ con el objetivo de estabilizar la varianza (homocedasticidad) y aproximar la normalidad de los residuos, garantizando así la validez de los supuestos de las pruebas paramétricas. El procesamiento de datos, la modelación no lineal y las pruebas de hipótesis se realizaron utilizando el entorno estadístico RStudio (R version 4.5.1), empleando los paquetes dplyr y stringr para la estructuración de las bases de datos.

La dinámica de población de tallos se caracterizó mediante el ajuste de modelos no lineales logísticos utilizando el paquete drc (Dose-Response Curves). Para cada combinación de variedad y nivel de helada, se estimaron los parámetros de población máxima asintótica (A; tallos m^{-1}), tiempo requerido para alcanzar el 50% de dicha población (T_{50}; DDP) y la pendiente (b). A partir de estos componentes, se derivaron los siguientes indicadores: el tiempo de inicio de la emergencia (T_e; DDP) y la tasa media de incremento poblacional (TM; tallos m^{-1} $día^{-1}$), esta última calculada como el cociente entre A y T_{50}. La bondad de ajuste se verificó mediante el coeficiente de determinación (R^2) y el análisis de la varianza de la regresión.

Tanto las variables directas como los parámetros derivados del modelo logístico fueron sometidos a un análisis de varianza (ANOVA). En los casos donde se detectaron diferencias significativas ($p \leq 0.05$), se procedió a realizar la prueba de comparaciones múltiples de Tukey (HSD) con un nivel de confianza del 95% para la separación de medias. Finalmente, la representación gráfica se realizó con el paquete ggplot2. Para facilitar la interpretación de los resultados, los gráficos muestran los valores originales, permitiendo una lectura directa de la densidad de tallos real frente al impacto de las heladas.

Resultados

De acuerdo con el relevamiento de campo y siguiendo los criterios de severidad propuestos por Digonzelli *et al.* (2015), se establecieron tres escenarios para el análisis, con tres niveles: helada suave, moderada y severa. En la Tabla 2 se describe el daño tisular observado en las tres variedades, en las localidades evaluadas. Sobre la base de esta

caracterización, se procedió al análisis del comportamiento de las variedades provenientes de cada escenario.

Tabla 2. Caracterización de las heladas en función de los daños observados en el cultivo de las tres variedades, en tres localidades de Tucumán-Argentina. 2025

Localidad	Helada	Daños
El Naranjo	Suave	Amarillamiento del follaje, brote guía no afectado.
Soldado Maldonado	Moderada	Follaje totalmente afectado, brote guía dañado, ennegrecimiento de tejidos.
Los Quemados	Severa	Destrucción del follaje, daño en brote guía, yemas y porciones apicales del tallo.

Bajo estas condiciones preestablecidas, se llevó a cabo el ensayo para evaluar la respuesta de las tres variedades ante situaciones de estrés por bajas temperaturas.

Como se observa en la Figura 1, la población de tallos alcanzó su máximo a los 110 DDP en todos los tratamientos, seguida de una reducción por competencia entre tallos hacia los 210 DDP. En condiciones de helada Suave y Moderada no se registraron diferencias entre las variedades. Sin embargo, ante helada Severa, la variedad TUC 06-7 mostró una tolerancia significativamente mayor ($p \leq 0.05$).

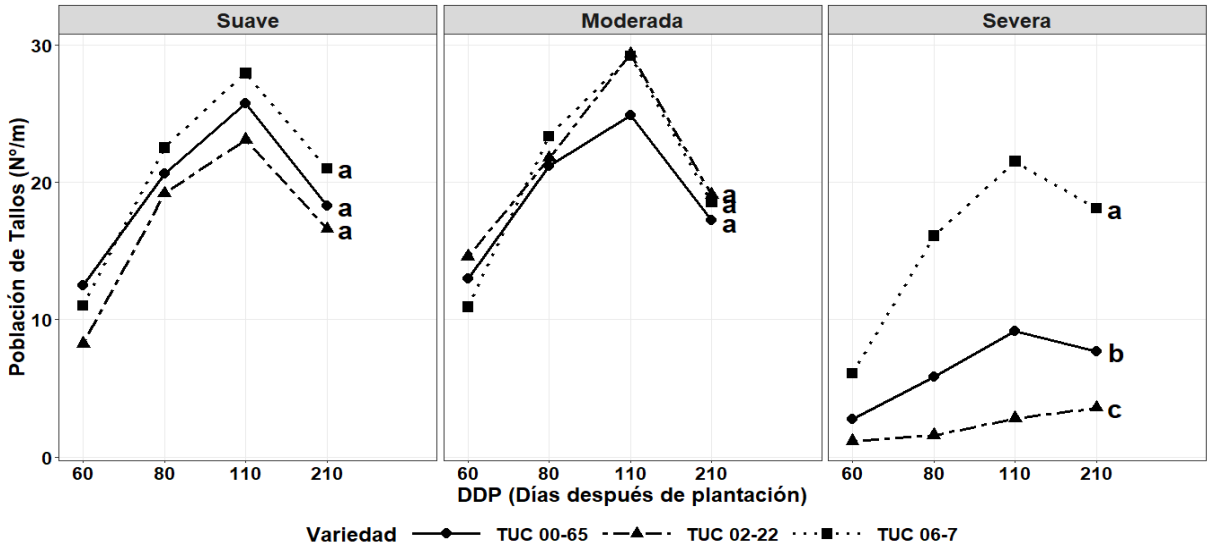


Figura 1. Población de tallos (Número de tallos/m) en tres variedades de caña de azúcar sometidas a diferentes niveles de helada. Los puntos representan las medias ajustadas. Letras distintas (210 DDP) indican diferencias significativas según la prueba de Tukey ($p \leq 0.05$).

En la Tabla 3 se muestran los resultados del ANOVA para la población de tallos. El análisis reveló efectos altamente significativos ($p < 0.001$) para los tres factores evaluados: Variedad, Helada y DDP.

Tabla 3. Análisis de varianza (ANOVA) para la población de tallos de las variedades estudiadas, bajo diferentes niveles de helada. Se detallan los grados de libertad (GL), suma de cuadrados (SC), cuadrados medios (CM), estadístico F y valor de probabilidad (*p-value*).

Fuente de Variación	GL	SC	CM	F	p-valor
Variedad (V)	2	1131.89	565,95	24.30	0.0000

Helada (H)	2	6453.09	3226.54	138.51	0.0000
DDP (Tiempo)	3	4384.49	1461.50	62.74	0.0000
Interacción (V x H)	4	1280.67	320.17	13.74	0.0000
Variedad x DDP	6	282.17	47.03	2.02	0.0653
Helada x DDP	6	498.09	83.02	3.56	0.0023
Interacción Triple	12	163.46	13.62	0.58	0.8527
Residuales	180	4192.92	23.29		

CV: 30.70%. Datos transformados mediante raíz cuadrada.

El análisis de varianza mostró efectos altamente significativos ($p < 0.001$) para los factores variedad (V), helada (H) y tiempo (DDP). El factor Helada fue el principal determinante de la variabilidad observada, con el valor de Fisher más elevado ($F = 138.51$) y la mayor suma de cuadrados (SC = 6453.09), superando la influencia genética y temporal.

La interacción V x H resultó altamente significativa ($F = 13.74$; $p < 0.001$), confirmando que las variedades respondieron de manera diferencial según la intensidad del estrés térmico; esto justifica el desglose de promedios mediante el test de Tukey. Asimismo, la interacción H x DDP fue significativa ($p = 0.0023$), indicando que el impacto de cada nivel de helada sobre el número de tallos evolucionó de manera distinta a lo largo de las fechas de muestreo.

Por el contrario, la interacción Variedad x DDP y la Interacción Triple no fueron significativas ($p > 0.05$), lo que sugiere que el comportamiento relativo de las variedades fue estable a través del tiempo. El modelo presentó un coeficiente de variación del 30.71%, valor adecuado para ensayos de campo bajo condiciones de estrés por bajas temperaturas.

El análisis de la dinámica poblacional reveló un comportamiento diferencial de las variedades condicionado por la intensidad de la helada (Tabla 4).

Tabla 4. Dinámica poblacional de las tres variedades evaluadas bajo tres niveles de helada. Te (inicio de emergencia), T50 (tiempo en alcanzar el 50% de la brotación), Población máxima de tallos por metro y Tasa Media (incremento poblacional de tallos por día).

Nivel de Helada	Variedad	Inicio (*Te*)	Medio (*T50*)	Pob. Máx. (tallos/m)	Tasa Media (TM)
Suave	TUC 06-7	32.1	55.2	27.5 a	0.50
Suave	TUC 00-65	35.4	58.1	25.1 a	0.43
Suave	TUC 02-22	40.2	62.4	23.2 a	0.37
Moderada	TUC 06-7	36.5	60.1	24.3 a	0.40
Moderada	TUC 00-65	38.2	65.4	21.2 a	0.32
Moderada	TUC 02-22	45.1	85.2	18.5 a	0.22
Severa	TUC 06-7	39.8	69.7	21.9 a	0.31
Severa	TUC 00-65	29.7	75.3	10.1 b	0.13
Severa	TUC 02-22	n.d.	n.d.	4.0 c	n.d.

Medias con una letra común no difieren significativamente (Tukey, $p \leq 0,05$). n.d. (no determinado por falta de ajuste en el modelo)

Los valores de T_e mostraron un retraso de la brotación a medida que aumentó la intensidad de la helada en las tres variedades. En condiciones de helada suave y moderada, TUC 06-7 presentó los menores valores de T_e, indicando una recuperación inicial más rápida

respecto de TUC 00-65 y TUC 02-22. Sin embargo, bajo helada severa, TUC 00-65 mostró el menor T_e, lo que sugiere una mayor precocidad en el inicio de la emergencia frente a un evento de alta intensidad.

En cuanto al T_{50}, se registró un incremento consistente de este parámetro con el aumento de la severidad de la helada, reflejando una desaceleración en la dinámica de emergencia. En todos los niveles de helada, TUC 06-7 alcanzó el 50% de emergencia en menor tiempo, mientras que TUC 02-22 presentó los mayores valores de T_{50} en todos los tratamientos. Bajo helada severa, las diferencias entre materiales se acentuaron.

La población máxima de tallos *(A)* disminuyó de manera marcada con el aumento de la severidad de la helada en las tres variedades, lo que evidencia el impacto negativo de las bajas temperaturas sobre la viabilidad de las yemas y la supervivencia de brotes. No obstante, en todos los niveles de helada, TUC 06-7 mantuvo los mayores valores de población, seguida por TUC 00-65 y TUC 02-22, lo que indica diferencias varietales en la capacidad de sostener la emergencia de tallos frente al estrés térmico.

La tasa media (*TM*) también se redujo a medida que aumentó la intensidad de la helada, indicando una menor velocidad de emisión de brotes bajo condiciones de mayor daño. En este contexto, TUC 06-7 presentó los mayores valores en los tres niveles de helada, mientras que TUC 02-22 mostró las menores tasas, evidenciando una mayor sensibilidad al estrés por bajas temperaturas.

Conclusiones

La intensidad de las heladas fue el factor determinante en la población de tallos, superando la influencia de la variedad y el tiempo. Sin embargo, la interacción significativa entre estos factores confirmó que la tolerancia a las heladas depende de la variedad evaluada, permitiendo identificar las que presentan un mejor desempeño ante condiciones de estrés por bajas temperaturas.

La variedad TUC 06-7 se destacó como la variedad más tolerante, manteniendo la mayor tasa media de emergencia *(TM)* y poblaciones máximas estables y significativamente superiores en todos los niveles de helada.

TUC 00-65 mostró una respuesta intermedia, fue la más rápida en iniciar la emergencia *(T_e)* bajo helada severa, pero su población máxima cayó, demostrando que un inicio temprano no garantiza valores altos de población de tallos.

La variedad más afectada fue TUC 02-22, presentando los mayores retrasos en la emergencia. Bajo helada severa, el daño fue tan crítico que impidió el ajuste de los parámetros dinámicos, confirmando su vulnerabilidad ante este tipo de estrés.

Bibliografía

Costilla, D.; Henriquez, D.; Ghio, C.; Medina, P.; Figueroa, F.; Ostengo, S. (2024). Guía para la identificación a campo de variedades TUC de caña de azúcar. Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres, Tucumán, Argentina.

Digonzelli, P.A.; Romero, E.R.; Giardina, J.A.; Leggio Neme, M.F.; Scandaliaris, J.; Tonatto, J. (2015). Guía técnica del cañero. Ministerio de Agroindustria de la Nación – Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres, Tucumán, Argentina.

Giardina, J.A.; Digonzelli, P.A.; Romero, E.R.; Pérez Alabarce, F.; Duarte, D.; Medina, M. (2019). Efecto de la severidad de las heladas en la capacidad potencial de brotación y en la emergencia a campo de tres variedades de caña de azúcar (Saccharum spp.). Revista Industrial y Agrícola de Tucumán, Tomo 96(2): 23–29. Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres, Tucumán, Argentina.

R Core Team (2025). R: A Language and Environment for Statistical Computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. https://www.R-project.org/.

CAÑA INTELIGENTE: POTENCIAL GENÉTICO PARA REDUCIR PÉRDIDAS DE NITRÓGENO Y OPTIMIZAR LA FERTILIZACIÓN

Delaporte Quintana P [1, 2]; Carrizo M [3, 4]; García J [1]; Acreche M [3, 4]; Chalco Vera J [4, 5]
[1] Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Famaillá, Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), Famaillá, Tucumán, Argentina. [2] Catedra de Microbiología Agrícola, Facultad de Agronomía, Zootecnia y Veterinaria (FAZyV), Universidad Nacional de Tucumán (UNT). [3] EEA Salta, INTA, Cerrillos, Salta, Argentina. [4] Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). [5] Instituto de Investigación Animal del Chaco Semiárido (IIACS), INTA, Leales, Tucumán, Argentina. chalcovera.jorge@inta.gob.ar delaportequintana.p@inta.gob.ar

Palabras clave: Eficiencia en el uso del nitrógeno; Nitrificadores; Mejoramiento genético; *Saccharum*; Argentina.

INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar (*Saccharum* spp.) es un cultivo estratégico para la economía del noroeste argentino (NOA) y para la matriz energética nacional (Jorrat *et al.*, 2018). Su crecimiento óptimo requiere un aporte significativo de nitrógeno (N), lo que representa uno de los principales costos de producción a escala comercial (Paredes *et al.*, 2022).

En Argentina, el mejoramiento genético de la caña se ha orientado principalmente a incrementar la productividad y mejorar la resistencia a plagas y enfermedades (García *et al.*, 2025), dedicando escasa atención a la eficiencia en el uso del nitrógeno (EUN) en las variedades liberadas en la última década (Acreche, 2017). Optimizar la EUN no solo mejora la utilización de este nutriente esencial, sino que constituye una estrategia clave para reducir el impacto ambiental asociado a la fertilización nitrogenada, como las pérdidas por lixiviación de nitrato (NO_3^-) y las emisiones de óxido nitroso (N_2O), un potente gas de efecto invernadero (Chalco Vera *et al.*, 2022).

Estudios previos muestran que la EUN varía según el genotipo y la forma de N suministrada: algunos trabajos reportan mayor eficiencia con NO_3^- (Hajari *et al.*, 2015), mientras que otros indican mejor respuesta al amonio (NH_4^+) (Kölln *et al.*, 2022), lo que evidencia una fuerte influencia del ambiente y del sistema de cultivo. Además, se ha demostrado que la caña puede prolongar la permanencia del NH_4^+ en el suelo mediante la inhibición biológica de la nitrificación (IBN), un mecanismo que reduce la conversión microbiana de NH_4^+ a NO_3^- (Mawan & Kaewpradit, 2022).

Dado que la nitrificación es uno de los principales procesos responsables de la pérdida de N y de las emisiones de N_2O, la expresión de IBN en determinadas variedades podría constituir una estrategia clave para mejorar la EUN y mitigar el impacto ambiental. Sin embargo, los mecanismos que favorecen una mayor EUN en caña de azúcar no están claramente descritos (Kölln *et al.*, 2022) y se desconocen en variedades nacionales.

En este contexto, el objetivo de este estudio fue evaluar en condiciones controladas el potencial de IBN en seis variedades comerciales de caña de azúcar en Argentina, analizando tasas potenciales de nitrificación y poblaciones de bacterias nitrificadoras.

MATERIALES Y MÉTODOS

Condiciones del ensayo y diseño experimental

El estudio se realizó en invernadero utilizando macetas de 3,3 L con suelo proveniente de la Estación Experimental Agropecuaria (EEA) Famaillá, caracterizado por pH 6,0, textura arcillosa y contenido moderado de materia orgánica (2,5%). Se evaluaron seis variedades de caña de azúcar seleccionadas por criterios de diversidad genética y año de liberación: dos materiales antiguos, dos variedades modernas y dos recientemente incorporadas por el Programa de Mejoramiento Genético de INTA (Tabla 1). Cada maceta recibió una yema uninodal de aproximadamente 5 cm, con ocho repeticiones por variedad, más controles sin plantas. Las macetas se mantuvieron en capacidad de campo durante seis meses.

Tabla 1. Variedades de caña de azúcar seleccionadas y año de liberación.

Variedades	Año de liberación	Referencia
CP 34-120	1950	Acreche, 2017
NA 56-79	1964	Acreche, 2017
LCP 85-384	2001	Acreche, 2017
TUC 95-10	2011	Cuenya *et al.*, 2011
INTA TUC 03-663	2022	García *et al.*, 2025
INTA TUC 03-617	2022	García *et al.*, 2025

Procesamiento de muestras de suelo

Al finalizar el período de crecimiento, se tomaron muestras de suelo de cada tratamiento y de los controles. Las muestras se orearon, homogeneizaron y tamizaron (malla de 2 mm) para análisis posteriores.

Determinación de las tasas potenciales de nitrificación

Se incubaron submuestras de suelo (n=4) en condiciones controladas (30 °C, oscuridad, 60% capacidad de campo) durante seis días, tras aplicar una dosis equivalente a 100 kg N ha^{-1} en forma de sulfato de amonio. Como controles, se utilizaron muestras sin plantas con y sin adición de N. Se realizaron extracciones periódicas (días 0, 1, 2, 4 y 6) con KCl 1 M y se determinaron las concentraciones de NH_4^+, nitrito (NO_2^-) y NO_3^- por métodos colorimétricos (Mulvaney, 1996; Cataldo *et al.*, 1975; ISO, 2003). Las tasas se calcularon como la pendiente de la regresión lineal entre NO_3^- y tiempo.

Estimación de bacterias nitrificadoras

Se utilizó el método del número más probable (NMP) para estimar bacterias oxidantes de amonio (BOA) y nitrito (BON), mediante diluciones seriadas y siembra en medios específicos (Soriano & Walker, 1968; Koops & Moller, 1992). Las incubaciones se realizaron a 30 °C durante 21 días, con lecturas en días 10 y 21.A

Análisis estadístico

Se aplicó ANOVA unidireccional y prueba de Fisher ($p \leq 0,05$) para comparar tasas de nitrificación entre tratamientos, previo testeo de normalidad. Las correlaciones entre formas de N se evaluaron mediante Pearson. Los análisis se realizaron en R (Posit team, 2023).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Dinámica de formas nitrogenadas

Durante la incubación, todos los tratamientos fertilizados mostraron una disminución sostenida en los niveles de NH_4^+ (Figura 1a), mientras que los niveles de NO_2^- se mantuvieron bajos (<0,125 mg kg^{-1}) (Figura 1b). El NO_3^- aumentó progresivamente, aunque con variabilidad entre tratamientos (Figura 1c).

La correlación entre la disminución de NH_4^+ y el incremento de NO_3^- no fue significativa ($p = 0,4$), probablemente por pérdidas gaseosas durante la nitrificación (Schreiber *et al.*, 2012; Hu *et al.*, 2015). Sin embargo, al considerar promedios por tratamiento, se observaron correlaciones negativas en suelos con N y en la variedad TUC 95-10, lo que sugiere diferencias en la regulación del proceso.

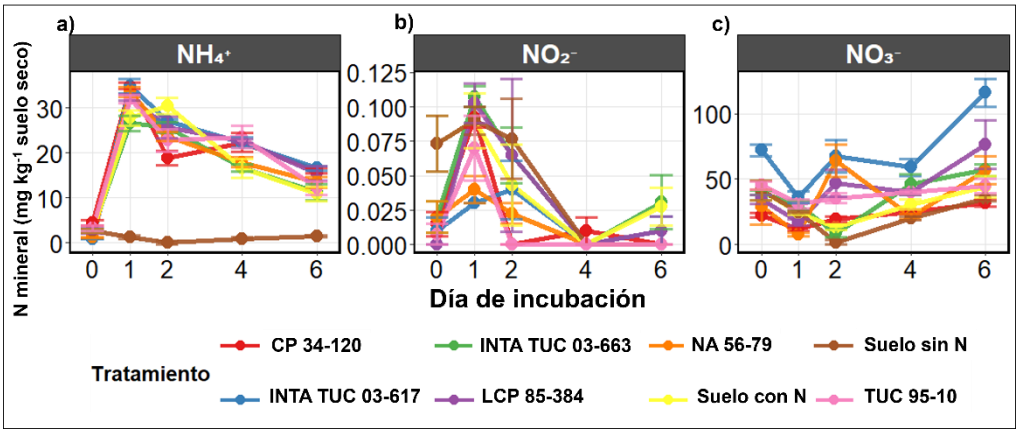


Figura 1. Dinámica temporal de formas nitrogenadas - amonio (a), nitrito (b) y nitrato (c) - durante los días de incubación. Medias ± error estándar por tratamiento.

Tasas potenciales de nitrificación

Las tasas máximas se registraron entre los días 1 y 2 de incubación (Figura 2), aunque los controles sin plantas y la variedad INTA TUC 03-663 alcanzaron su pico entre los días 2 y 4. Este retraso temporal podría deberse a que los controles sin plantas no recibieron el estímulo de los compuestos liberados por las raíces, los cuales incrementan la actividad y biomasa microbiana en el suelo (Zhang et al., 2025; Wankhade et al., 2025). Por otra parte, que una de las seis variedades evaluadas presente este retraso en alcanzar su tasa máxima sugiere un posible efecto de regulación sobre las comunidades de BOA y BON.

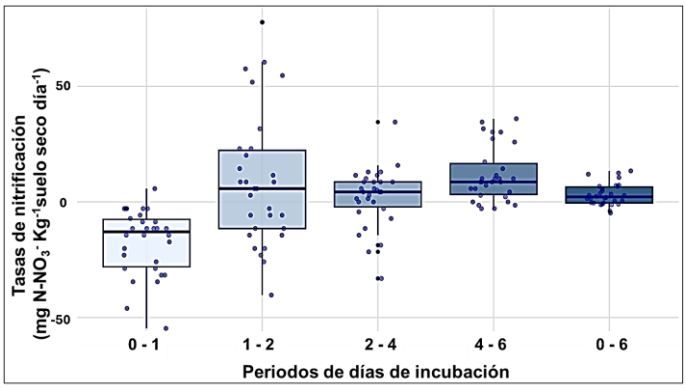


Figura 2. Diagrama de cajas para las tasas de nitrificación calculadas para diferentes periodos de días de incubación.

Las diferencias en las tasas de nitrificación entre tratamientos fueron significativas ($p = 0,041$) (Figura 3). Las variedades INTA TUC 03-617 y LCP 85-384 presentaron las tasas más altas, mientras que TUC 95-10 y CP 34-120 mostraron las más bajas, junto con los controles. Este comportamiento sugiere que ciertos genotipos podrían ejercer un efecto regulador sobre la nitrificación.

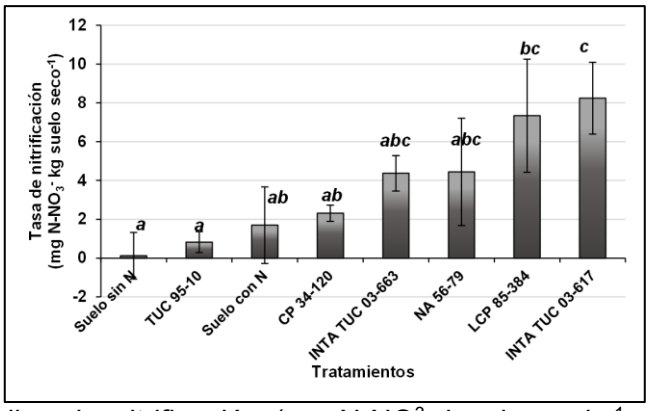


Figura 3. Tasas medias de nitrificación (mg $N\text{-}NO^{3-}$ kg de $suelo^{-1}$ $día^{-1}$) para el período completo de la incubación. n = 4; las barras indican errores estándar. Letras diferentes indican diferencias significativas a según ANOVA y test de Fisher con un nivel de $p \leq 0,05$.

Comunidades nitrificadoras

La estimación de bacterias oxidantes de amonio (BOA) y nitrito (BON) mostró incrementos generales entre los días 10 y 21, con diferencias entre variedades (Tabla 2). Estas estimaciones reflejan tendencias poblacionales, ya que la relación entre abundancia y actividad nitrificante no es necesariamente lineal y no se incluyeron determinaciones funcionales moleculares específicas de actividad.

Los valores más bajos de BOA en TUC 95-10 y CP 34-120 coincidieron con sus menores tasas de nitrificación, mientras que INTA TUC 03-663 presentó los niveles más bajos de BON, sugiriendo una regulación diferencial sobre la comunidad nitrificante. Considerando el total BOA+BON, INTA TUC 03-663 mostró valores consistentemente bajos en ambos momentos, lo que refuerza su potencial para la IBN (Tabla 2).

Tabla 2. Estimación de bacterias oxidantes de NH_4^+ (BOA) y de NO_2^- (BON) y valores totales de BOA + BON ( ) en los días 10 y 21 de incubación, a partir de muestras compuestas y expresados como Log_{10} de UFC/gr ss.

Tratamientos	Día 10			Día 21		
	BOA	BON		BOA	BON	
Control	2,91	7,36	10,27	3,13	> 8,10	11,24
INTA TUC 03-663	3,36	4,26	7,62	4,61	5,77	10,38
INTA TUC 03-617	3,61	8,10	11,72	4,26	> 8,10	12,36
NA 56-79	2,56	8,10	10,67	4,94	> 8,10	13,04
LCP 85-384	3,36	5,83	9,19	4,36	> 8,10	12,46
CP 34-120	2,56	8,10	10,67	4,83	> 8,10	12,94
TUC 95-10	2,44	8,10	10,54	5,94	> 8,10	14,04

CONCLUSIONES

Las variedades de caña de azúcar evaluadas mostraron diferencias significativas en las tasas potenciales de nitrificación y en la abundancia de bacterias nitrificadoras, lo que confirma la existencia de variabilidad genotípica en la regulación de este proceso.

La variedad INTA TUC 03-663 presentó el menor número total de bacterias nitrificantes y un retraso significativo en alcanzar la máxima tasa de nitrificación, lo que sugiere un alto potencial para la IBN como característica fisiológica de interés.

Estos resultados posicionan a la IBN como una línea promisoria para el mejoramiento genético orientado a la sostenibilidad, aunque las implicancias productivas y ambientales

deben ser validadas en ensayos a campo que permitan evaluar la EUN y las pérdidas de N en condiciones reales de manejo.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por INTA (PD I072). MC es becario doctoral de CONICET.

REFERENCIAS

Acreche M.M., 2017. Nitrogen-, water- and radiation-use efficiencies affected by sugarcane breeding in Argentina. Plant Breed., 136:174–181.

Cataldo D.A.; Haroon M.H.; Schrader L.E.; Youngs V.L., 1975. Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitration of salicylic acid. Commun. Soil Sci. Plant Anal., 6:71–80.

Chalco Vera J.; Portocarrero R.; Piñeiro G.; Acreche M.M., 2022. Increases in nitrogen use efficiency decrease nitrous oxide emissions but can penalize yield in sugarcane. Nutr. Cycl. Agroecosyst., 122:41–57.

García J.M.; Felipe A.; Pérez S.; Di Pauli V.; Mieja Andrada C.N.; Zerrizuela S.; Fontana P.D., 2025. Programa de Mejoramiento Genético de Caña de Azúcar de INTA: variedades de elevada productividad y sanidad. Horiz. Agroaliment., 12:11–17.

Hajari E.; Snyman S.J.; Watt M.P., 2015. Nitrogen use efficiency of sugarcane (Saccharum spp.) varieties under in vitro conditions with varied N supply. Plant Cell Tissue Organ Cult., 122:21–29.

Hu H.W.; Chen D.; He J.Z., 2015. Microbial regulation of terrestrial nitrous oxide formation: Understanding the biological pathways for prediction of emission rates. FEMS Microbiol. Rev., 39:729–749.

ISO, 2003. Soil quality — Determination of nitrate, nitrite and ammonium in field-moist soils solution — by extraction with potassium chloride Part 1: Manual method. ISO/TS 14256-1.

Jorrat M.M.; Araujo P.Z.; Mele F.D., 2018. Sugarcane water footprint in the province of Tucumán, Argentina. Comparison between different management practices. J. Clean. Prod., 188:521–529.

Kölln O.T.; Boschiero B.N.; Franco H.C.J.; Soldi M.C.M.; Sanches G.M.; Castro S.G.D.Q.; Trivelin P.C.O., 2022. Preferential mineral N form uptake by sugarcane genotypes contrasting in nitrogen use efficiency. Exp. Agric., 58:1–10.

Mawan N.; Kaewpradit W., 2022. Sugarcane root exudate impact on the potential nitrification rate and N dynamics in the rhizosphere. Rhizosphere, 23:100551.

Mulvaney R.L., 1996. Nitrogen-Inorganic Forms. In: Methods of Soil Analysis Part 3. Chemical Methods. SSSA Book Series 5, Madison.

Paredes V.; Pérez D.; Rodriguez G.; Alonso L.; Romero E.R., 2022. Estimación del gasto de fertilización de caña soca para la zafra 2023 en Tucumán y análisis de precios de los fertilizantes nitrogenados entre 2015-2022. Rep. Agroind. No 263.

Posit team, 2023. RStudio: Integrated Development Environment for R. Posit Software, Boston.

Schreiber F.; Wunderlin P.; Udert K.M.; Wells G.F., 2012. Nitric oxide and nitrous oxide turnover in natural and engineered microbial communities: Biological pathways, chemical reactions, and novel technologies. Front. Microbiol., 3:372.

Wankhade A.; Wilkinson E.; Britt D.W.; Kaundal A., 2025. A Review of Plant–Microbe Interactions in the Rhizosphere and the Role of Root Exudates in Microbiome Engineering. Appl. Sci., 15:7127.

Zhang X.C.; Zhang S.T.; Carrillo Y.; Zhai H.L.; Zeng Y.Z.; Liu M.; Dong X.F.; Sun W.; Ma J.Y., 2025. Root exudates increase microbial biomass but decrease diversity and richness: A meta-analysis. J. Plant Ecol., Advance online publication.

DESARROLLO DE EVENTOS TRANSGÉNICOS DE CAÑA DE AZÚCAR CON TOLERANCIA INCREMENTADA A SEQUÍA

Enrique R.; Budeguer F.; Ostengo S.; Castagnaro A. y Noguera A.
Instituto de Tecnología Agroindustrial del Noroeste Argentino (ITANOA)-Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC). William Cross 3150, Las Talitas, Tucumán, Argentina.
E-mail: ramon.enrique.ar@gmail.com

Palabras Clave: *Saccharum spp*.; *Hahb11*; biomasa; estrés hídrico

Introducción

El cambio climático impacta de manera significativa sobre la producción agrícola global. La productividad de la caña de azúcar se ve afectada por múltiples estreses abióticos, tales como la sequía y la salinidad, los cuales reducen de forma considerable el rendimiento potencial del cultivo (Budeguer et al., 2021). En este contexto, la ingeniería genética representa una herramienta estratégica para el desarrollo de cultivos tolerantes al estrés abiótico. Mediante transgénesis se han incorporado genes con el objetivo de conferir tolerancia a dichas condiciones (Verma et al., 2022). Entre estas aproximaciones, la sobreexpresión de factores de transcripción (FT) constituye una estrategia particularmente promisoria, habiéndose demostrado incrementos en la tolerancia a estas condiciones adversas en cultivos como soja, trigo y maíz, sin ocasionar reducciones en el rendimiento (González et al., 2019; Ribichich et al., 2020; Raineri et al., 2022). Los FT regulan la expresión génica mediante su unión a secuencias específicas de ADN y modulan la respuesta de las plantas frente a condiciones ambientales adversas (Latchman, 1997).

El factor de transcripción HaHB11 de *Helianthus annuus* ha mostrado efectos positivos en la biomasa y en la tolerancia al estrés hídrico y salino en diversas especies. En este trabajo se propone la incorporación de dicho gen en la variedad élite de caña de azúcar TUC 03-12 mediante transformación por biobalística, con el objetivo de evaluar su efecto sobre el crecimiento y la tolerancia al estrés hídrico en condiciones controladas de invernadero.

Objetivo

Introducir el gen *Hahb11* mediante transformación genética en la variedad elite de caña de azúcar TUC 03-12 con el fin de obtener líneas genéticamente transformadas con incremento de biomasa y tolerancia a estrés hídrico.

Materiales y Métodos

Material vegetal y condiciones para el cultivo de tejidos

Los callos embriogénicos de la variedad TUC 03-12 utilizados para el bombardeo con ADN fueron preparados según Bower and Birch (1992).

Transformación genética de caña de azúcar

La construcción genética (pASTα) contiene el gen de interés *Hahb11* y el gen *npt*II para la selección con geneticina. Ambos genes están fusionados a promotores constitutivos fuertes como el promotor de ubiquitina de maíz y el promotor de actina de arroz, respectivamente. El bombardeo de los callos se llevó a cabo siguiendo el procedimiento descripto por Noguera et al. (2015).

Condiciones de selección, regeneración y micropropagación

La selección de los callos transformados (1735) fue llevada a cabo utilizando un medio de cultivo suplementado con 45 mg l^{-1} de geneticina de acuerdo a Noguera et al. (2015).

Los callos seleccionados fueron regenerados en medio suplementado con 0,7 mg l^{-1} de BAP sin 2,4-D y el respectivo agente selectivo bajo un régimen de luz de 16 h. Los brotes regenerados fueron micropropagados y enraizados siguiendo los protocolos previamente optimizados para la variedad de caña de azúcar RA 87-3 (Noguera et al., 2015) y posteriormente aclimatados en invernadero bajo condiciones especiales para el crecimiento *ex vitro* (2500 lux y 80–100 % HR).

Detección de plantas transgénicas por PCR

La detección de plantas transgénicas se realizó a partir de material foliar de 208 líneas resistentes a geneticina y plantas control no transformadas (NT) obtenidas por cultivo de tejido convencional, mediante el método de PCR descrito por Enrique et al. (2024). Se amplificó por PCR un fragmento de 174 pb del gen *Hahb11* utilizando los cebadores HB11f3 (5´-TCAAAACAGAAGGGCTCGCT-3´) y HB11r3 (5´-TCCTCCGTTTTCAGACCCAC-3´) para la detección de líneas genéticamente transformadas. La reacción de amplificación se realizó durante 30 ciclos de acuerdo a las siguientes condiciones: desnaturalización a 95 ºC durante 30 s, anillado a 59 ºC durante 30 s y extensión a 72 ºC durante 60 s. Los productos de amplificación fueron analizados en geles de agarosa 1,5 % (p/v) teñidos con Gel Red (Biotium, EEUU). La eficiencia de transformación (%) se calculó aplicando la siguiente fórmula: Eficiencia de transformación (%) = (N° Total de plantas PCR positivas / Número Total de callos bombardeados) ×100.

Dinámica de brotación y caracterización morfológica de brotes

Diez estacas uninodales de cada línea transgénica y de las plantas NT fueron plantadas en bandejas conteniendo la mezcla comercial de suelo Grow Mix Multipro (Terrafertil, Argentina). La brotación y crecimiento de las estacas se realizó en invernadero bajo condiciones de luz natural y temperatura controlada (25 ± 5 ºC). La brotación de yemas fue registrada semanalmente durante un período experimental de 30 días después de plantadas (DDP) para determinar el Índice de Velocidad de Emergencia (IVE) utilizando la formula descripta por Maguire (1962). La altura de los tallos fue medida desde el nivel del suelo hasta la lígula de la hoja +1 (parcial o totalmente expandida). Las raíces fueron colocadas separadamente en bolsas de papel, secadas en estufa a 65 ºC y pesadas en una balanza de precisión hasta peso constante. Los experimentos fueron realizados por triplicado con un diseño de bloques completamente aleatorizados. Los datos fueron analizados utilizando modelos lineales mixtos, y las comparaciones de medias se realizaron mediante la prueba DGC (Di Rienzo et al., 2012).

Análisis histológico de raíces

Los estudios histológicos se llevaron a cabo con plantas de líneas transgénicas y plantas NT de 60 días de edad, crecidas en invernadero en condiciones normales. Las raíces fueron fijadas en FAA (formaldehído/ácido acético/etanol,1:1:8). Se realizaron cortes transversales de diferentes porciones de las raíces; las cuales fueron decoloradas en una solución 1:1 de NaClO/agua destilada, enjuagadas cinco veces con agua destilada y teñidas con los colorantes Astral blue y Safranina. Finalmente, los cortes fueron montados en una solución de agua-glicerina (1:1) y observados con un microscópio Leica DM500. Las imágenes fueron tomadas con una cámara digital.

Ensayos de tolerancia a estrés hídrico

Plantas de líneas transgénicas y NT (control) de 90 días de edad, fueron transplantadas a macetones de 20L (3 clones de la misma línea por maceta) y mantenidas con riego a capacidad de campo por 20 días. A continuación, se suspendió el riego durante 45 días hasta aparición de síntomas de estrés severo en las plantas control. Se midió el contenido de agua retenido (%RWC) según el protocolo de Silva et al. (2010). Los datos fueron

analizados utilizando modelos lineales mixtos, y las comparaciones de medias se realizaron mediante la prueba DGC (Di Rienzo et al., 2012).

Propagación en campo de líneas transgénicas

Tallos correspondientes a veinticinco líneas transgénicas, producidos en invernadero, fueron establecidos en un lote experimental con un diseño en bloques completamente aleatorizado. Cada línea transgénica y el control no transgénico (NT) se dispusieron en parcelas de tres surcos de tres metros de longitud, con dos repeticiones.

Resultados

Obtención de líneas transgénicas de caña de azúcar que expresan *Hahb11*

Un total de 1735 callos de la variedad comercial TUC 03-12 fueron transformados con el vector pASTα, que porta los transgenes *Hahb11* y *npt*II. Se obtuvieron *in vitro* un total de 208 líneas transformadas resistentes a geneticina, las cuales se aclimataron en condiciones *ex vitro* en invernadero. De estas 208, 117 resultaron PCR positiva para la presencia del gen de interés (6,74 % de eficiencia de transformación).

Evaluación de líneas transgénicas en condiciones normales de crecimiento en invernadero

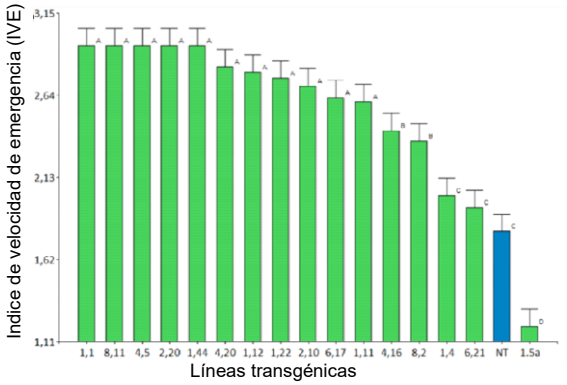


Figura 1. **Evaluación de la velocidad de brotación.** Determinación del Indice de velocidad de emergencia (IVE) en 16 líneas transgénicas a los 30 DDP. Las plantas no transformadas están indicadas por la barra azul. Las medias con letra en común no son significativamente diferentes ($p > 0.05$).

De las 117 líneas transgénicas aclimatadas, se seleccionaron 16 en función de su similitud fenotípica con la variedad parental no transformada TUC 03-12 (NT). Estas líneas fueron evaluadas desde la brotación de estacas uninodales hasta el establecimiento de los plantines, bajo condiciones controladas de crecimiento. A los 30 días después de la plantación (DDP), todas las líneas transgénicas con excepción de las líneas 1.5, 6.21 y 1.4 presentaron mayor IVE en comparación con las plantas control NT. Asimismo, cinco líneas transgénicas (1.1, 8.11, 4.5, 2.20 y, 1.44) alcanzaron el 100 % de brotación de yemas a los 7 DDP (Figura 1). Además, nueve líneas (1.12, 1.22, 4.5, 8.11, 2.10, 4.20, 1.1, 6.21 y 6.17) mostraron mayor altura de tallo respecto al control NT a los 30 DPP (datos no mostrados).

Análisis del sistema radicular de las líneas transgénicas

Por otro lado, se evaluaron los sistemas radiculares de las siete líneas transgénicas con mejor desempeño y de la línea 1.5 que presentó el peor desempeño con respecto a las plantas NT. Las siete líneas transgénicas seleccionadas presentaron un mayor desarrollo radicular respecto al control NT, mientras que la línea 1.5 presentó un desarrollo radicular inferior (Figura 2A). Asimismo, los sistemas radiculares fueron cuantificados mediante

determinación de peso seco. Todas las líneas transgénicas, con excepción de la 1.5 presentaron un peso seco radicular aproximadamente dos veces superior al de las plantas NT. En particular, la línea 8.11 mostró un peso seco radicular cuatro veces mayor en comparación con el control NT (datos no mostrados).

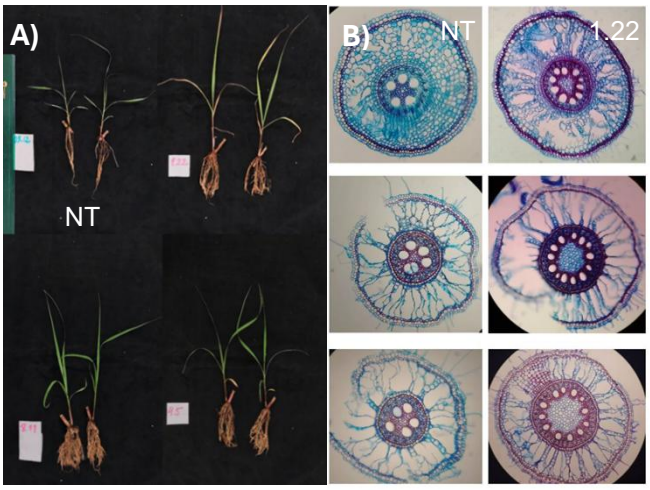


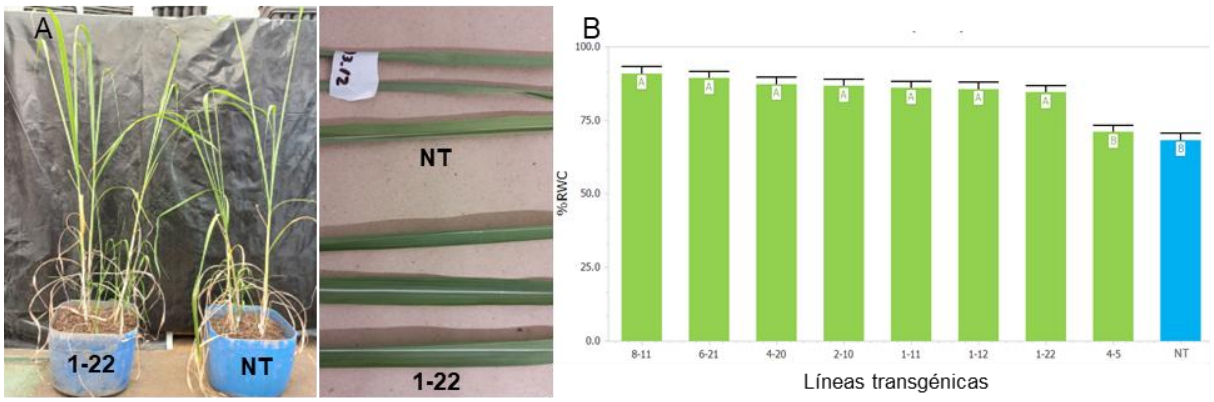
Figura 2. Fenotipado de las líneas transgénicas en condiciones normales. A) La figura muestra tres líneas transgénicas (1.22, 8.11 y 1.5) y plantas control NT a los 60 DDP, bajo condiciones normales de crecimiento. B) Análisis histológico de tres cortes de raíces de la línea 1.22 comparada con la planta NT.

Las raíces de la línea transgénica 1.22 presentaron modificaciones histológicas significativas en comparación con las raíces de las plantas NT. El sistema vascular mostró un mayor grado de desarrollo, con un incremento en el número de vasos y mayor lignificación de sus paredes respecto al control (Figura 2B). Asimismo, se observó una mayor proporción de parénquima medular en las líneas transgénica en comparación con las plantas NT.

Ensayos de tolerancia a estreses abióticos

Se evaluaron ocho líneas transgénicas y el control NT luego de 45 días sin riego. La línea 1.22 se destacó por presentar un mayor desarrollo respecto a la planta control NT durante el tratamiento (Figura 3A). Por su parte, la línea 8.11 no mostró incremento en altura; sin embargo, su follaje mantuvo una coloración verde intensa al final del ensayo (datos no mostrados). Asimismo, el contenido relativo de agua (RWC) de la planta control fue del 68%, mientras que alcanzó el 86% y 91% en las líneas 1.22 y 811, respectivamente (Figura 3B). Finalmente, las 25 líneas transgénicas seleccionadas por su desempeño destacado en los análisis fenotípicos y ensayos realizados en condiciones de invernadero fueron establecidas en campo, en cumplimiento con la normativa vigente de CONABIA. Estas líneas fueron propagadas y evaluadas en condiciones de campo con el objetivo de seleccionar las diez líneas de mejor desempeño para futuros ensayos, en el marco de un proceso de desregulación comercial.

Figura 3. Estudio de las líneas transgénicas bajo estrés hídrico. A) Plantas de la linea 1.22 y NT luego de 45 días sin riego. Detalle del acartuchamiento observado en las hojas post tratamiento B) Cuantificación del %RWC en hojas de plantas transgénicas y NT. Las plantas



no transformadas están indicadas por la barra azul. Las medias con letra en común no son significativamente diferentes (p > 0.05).

Conclusiones

- Mediante bombardeo con partículas de oro recubiertas con el vector pASTα se obtuvieron 117 líneas transgénicas que expresan *Hahb11* en la variedad TUC 03-12.
- En ensayos de fenotipado realizados en condiciones normales de crecimiento en invernadero, se identificaron líneas transgénicas con mayor índice de velocidad de crecimiento (IVE), longitud de tallo y desarrollo radicular, respecto a las plantas NT a los 30 días post plantación.
- Bajo condiciones de estrés hídrico se detectaron diferencias en el comportamiento de las líneas transgénicas, evidenciando distintos niveles de tolerancia al déficit de agua.
- Veinticinco líneas transgénicas seleccionadas por su desempeño fueron establecidas en campo con el objetivo de propagar el material vegetal y seleccionar las diez líneas de mejor desempeño para avanzar en el proceso de desregulación comercial.

Bibliografía

Bower R.; Birch R.G. 1992. Transgenic sugarcane plants via microprojectile bombardment. Plant J. 2(3): 409-416.

Budeguer F.; Enrique R.; Perera M.F.; Racedo J.; Castagnaro A.P.; Noguera A.S. and Welin B. 2021. Genetic Transformation of Sugarcane, Current Status and Future Prospects. Front. Plant Sci. 12:768609. doi: 10.3389/fpls.2021.768609

Di Rienzo J.A.; Macchiavelli R. and Casanoves F. 2012. Modelos lineales mixtos. Aplicaciones en InfoStat. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. http://www. infostat. com. ar.

Enrique R.; Budeguer F. and Noguera A. 2024. A pseudo-colony PCR method for rapid identification of transgenic sugarcane lines at in vitro stage. Crop Breed. Appl. Biotechnol. 24: e48162439.

González F. G.; Capella M.; Ribichich K. F.; Curín F.; Giacomelli J. I.; Ayala F. and Chan R. L. 2019. Field-grown transgenic wheat expressing the sunflower gene HaHB4 significantly outyields the wild type. J. Exp. Bot. 70(5), 1669-1681.

Latchman D.S. 1997. "Transcription factors: an overview". Int. J. Biochem. Cell Biol. 29 (12): 1305–12. doi:10.1016/S1357-2725(97)00085

Maguire J.D. 1962. Speed of germination - aid in selection and evaluation for seedling emergence and vigor. Crop Sci. 2: 176-177

Noguera A.; Enrique R.; Cuenya M.I. and Castaganro A.P. 2015. Genetic characterization and field evaluation to recover parental phenotype in transgenic sugarcane: a step toward commercial release. Mol. Breed. 35(5):1-15.

Raineri J.; Caraballo L.; Rigalli N.; Portapila M.; Otegui M.E. and Chan R.L. 2022. Expressing the sunflower transcription factor HaHB11 in maize improves waterlogging and defoliation tolerance. Plant Physiol. 189 (1):230-247, https://doi.org/10.1093/plphys/kiac054

Ribichich K. F.; Chiozza M.; Ávalos-Britez S.; Cabello J. V.; Arce A. L.; Watson G. and Chan R. L. 2020. Successful field performance in warm and dry environments of soybean expressing the sunflower transcription factor HB4. J. Exp. Bot. 71(10), 3142-3156

Silva M. A.; Sharma, V.; Jifon J. L. and Da Silva, J. A. G. 2010. Assessment of chlorophyll and leaf relative water content as indicators of drought tolerance on sugarcane initial growth. In International Society of Sugar Cane Technologists: Proceedings of the XXVIIth Congress, March 7-March 11, 2010, Veracruz, Mexico. Asociación de Técnicos Azucareros de México, AC (ATAM) & The XXVIIth ISSCT Organising Committee

Verma K.K.; Song X-P.; Budeguer F.; Nikpay A.; Enrique R.; Singh M.; Zhang B-Q.; Wu J-M. and Li Y-R. 2022. Genetic engineering: an efficient approach to mitigating biotic and abiotic stresses in sugarcane cultivation. Plant Signal. Behav. 17:1, DOI: 10.1080/15592324.2022.2108253

LA EXPRESIÓN DE PROTEÍNAS INSECTICIDAS EN CAÑA DE AZÚCAR TRANSGÉNICA AUMENTA LA RESISTENCIA A DIATRAEA SACCHARALIS

Budeguer F.[1], Enrique R.[1], García Degano F.[2], Rodríguez D.B.[2], Mocoroa M.[2], Hernández D.[2], Gastaminza G.[2], Ostengo S.[1], Noguera A.S.[1], Perera M.F.[1] y Racedo J.[1]

[1]Instituto de Tecnología Agroindustrial del Noroeste Argentino (ITANOA), Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC) - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Las Talitas, Tucumán, Argentina.
[2]Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC), Las Talitas, Tucumán, Argentina. florbudeguer88@gmail.com

Palabras clave: Biolística, Estrés biótico, Manejo de plagas, Genes Bt piramidados, *Saccharum* spp.

INTRODUCCIÓN

Diatraea saccharalis (Lepidoptera: Crambidae) es una de las principales plagas de la caña de azúcar en las Américas (Ostengo et al. 2022), incluida Argentina. Las larvas neonatas se alimentan del parénquima foliar y de las vainas, mientras que las larvas más desarrolladas perforan los tallos, afectando la integridad fisiológica de la planta. Los túneles formados en los entrenudos favorecen además la colonización por hongos y bacterias asociados al complejo de podredumbre roja, lo que reduce indirectamente el rendimiento y la calidad del azúcar y el etanol.

Los avances tecnológicos han permitido un rápido progreso en el desarrollo de plantas transgénicas para la protección contra plagas mediante la transferencia de genes derivados de plantas, insectos y bacterias (Budeguer et al. 2021). Las proteínas insecticidas más relevantes son producidas por la bacteria *Bacillus thuringiensis* (Bt), que las sintetiza tanto en su fase vegetativa (Vip) como en la fase de esporulación (Cry). Los genes *cry* y *vip* se han utilizado ampliamente para generar plantas transgénicas con un control efectivo de plagas lepidópteras de importancia económica. Estas proteínas poseen modos de acción similares, pero sin homología estructural y con sitios de unión diferentes en el intestino medio larval, lo que reduce notablemente la posibilidad de resistencia cruzada (Carrière et al. 2016).

Tras la adopción masiva de cultivos portadores de tecnologías Bt, se ha detectado resistencia en algunas poblaciones de plagas objetivo (Tabashnik et al. 2013). Para disminuir la presión de selección y retrasar el incremento en la frecuencia de alelos de resistencia, se aplican estrategias de manejo como la expresión de altos niveles de toxina Bt en la planta ("high-dose"), la piramidación de proteínas con diferentes sitios de acción y la utilización de refugios no-Bt (Cristofoletti et al. 2018). En caña de azúcar, actualmente no existe ninguna variedad transgénica comercial con genes Bt apilados.

El desarrollo de variedades comerciales de caña de azúcar con genes Bt piramidados podría constituir una herramienta valiosa para el manejo de plagas, reduciendo el uso de insecticidas químicos, disminuyendo costos de producción y contribuyendo a la sostenibilidad del cultivo.

El objetivo de este estudio fue desarrollar y caracterizar eventos transgénicos de la variedad local TUC 03-12, de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres, que expresen genes Bt apilados (*cry* y *vip*) para conferir resistencia a *D. saccharalis*.

MATERIALES Y MÉTODOS

Material vegetal, vector y transformación genética

Los callos embriogénicos de TUC 03-12 utilizados para los bombardeos fueron preparados según lo descripto por Bower y Birch (1992). Las transformaciones se llevaron a cabo en dos ensayos independientes: el primero entre diciembre de 2022 y abril de 2023, y el segundo entre diciembre de 2023 y abril de 2024. Se utilizaron tres plásmidos: 1) gen *cry* bajo el promotor Zm-UBI1; 2) gen *vip* bajo el promotor Zm-UBI1; y, 3) gen *nptII* (bajo el control del

promotor Actina). El gen *nptII* codifica una proteína que confiere resistencia al antibiótico geneticina. Para el bombardeo de los callos, los tres plásmidos purificados se co-precipitaron siguiendo el protocolo descripto por Altpeter y Sandhu (2010). Se utilizó un acelerador de micropartículas desarrollado por el Centro de Tecnología Copersucar (actual Centro de Tecnologia Canavieira) y uno de BioRad, siguiendo las especificaciones del fabricante.

Condiciones de selección, regeneración y micropropagación

Los callos transformados se seleccionaron en un medio de cultivo con 50 mg L^{-1} de geneticina. Los brotes seleccionados se regeneraron en un medio con 0,7 mg L^{-1} de 6-bencil amino purina (BAP) bajo un régimen de luz de 16 h (Noguera et al. 2015). Los brotes regenerados fueron luego micropropagados y enraizados siguiendo un protocolo previamente optimizado (Noguera et al. 2010), y aclimatados bajo condiciones especiales de invernadero (2500 lux y 80–100% de humedad) antes de ser transferidos a condiciones de crecimiento *ex vitro*.

Detección de eventos transgénicos por PCR

Se extrajo ADN genómico a partir de tejido foliar de líneas potencialmente transgénicas resistentes a geneticina, de maíz Bt comercial con ambos genes *cry* y *vip* apilados (control positivo) y de plantas no transgénicas (control negativo), utilizando el método descripto por Aljanabi et al. (1999). La presencia de los genes *cry*, *vip* y *nptII* se detectó por PCR utilizando cebadores específicos y condiciones de termociclado descriptas en Budeguer et al. (2024). Los productos de PCR se analizaron por electroforesis en gel de agarosa (1% p/v). La eficiencia de transformación se calculó como el total de las líneas transgénicas para al menos un gen de interés en función del número de callos transformados.

Determinación de niveles de expresión de transcriptos por RT-qPCR

Se utilizaron hojas jóvenes de los 21 eventos más promisorios del ensayo 2022–2023 y de la variedad no transformada TUC 03-12 para la extracción de ARN total, siguiendo las instrucciones del fabricante (SV Total RNA Isolation Kit; Promega, USA), empleando los cebadores y condiciones descritos en Budeguer et al. (2024). TUC 03-12 se usó como control de referencia y los datos se normalizaron con el gen actina. La expresión relativa se calculó mediante el método $2^{-\Delta\Delta Ct}$ (Livak y Schmittgen, 2001), con muestras por triplicado. Los datos se analizaron mediante un modelo lineal generalizado con distribución binomial y enlace logit, seguido de la prueba DGC a posteriori en Navure (Navure 2023).

Detección de proteínas mediante tiras de flujo lateral

La presencia de las proteínas Cry y Vip en los eventos transgénicos se evaluó cualitativamente mediante el kit AgraStrips® ELISA lateral flow (Romer Lab®), siguiendo las instrucciones del fabricante. Una variedad comercial de maíz Bt con ambos genes apilados se utilizó como control positivo. Se analizaron todos los eventos del ensayo 2022–2023 que sobrevivieron a la aclimatación ex vitro, mientras que en el ensayo 2023–2024 se evaluaron únicamente los eventos apilados y aquellos que contenían solo el gen vip.

Ensayos fenotípicos contra *D. saccharalis* en condiciones controladas

Se realizaron ensayos fenotípicos en bandejas Pitman para evaluar la resistencia de las líneas transgénicas obtenidas en el ensayo 2022–2023 frente a *D. saccharalis*. Las líneas del ensayo 2023–2024 no fueron evaluadas debido a que no alcanzaron el tamaño adecuado al momento del estudio. En cada pocillo se colocó un fragmento foliar de cada línea y una larva L1 de *D. saccharalis*. Después de cuatro días, se registró la mortalidad larval y se corrigió mediante la fórmula de Abbott (Abbott, 1925). Se utilizó como control negativo la variedad no transformada TUC 03-12, mientras que un maíz Bt se empleó como control positivo.

En una primera etapa se evaluaron 134 líneas transgénicas, con valores promedio calculados a partir de triplicados. Posteriormente, las 50 líneas más resistentes se sometieron a una segunda evaluación con seis repeticiones. Los datos se analizaron mediante un modelo lineal generalizado con distribución binomial y enlace logit, seguido de la prueba DGC a posteriori en Navure.

RESULTADOS

Transformación, selección y detección de eventos transgénicos por PCR

En la Tabla 1 se presentan los resultados obtenidos en los ensayos 2022–2023 y 2023-2024.

Tabla 1. Resultados obtenidos de la transformación, selección y detección por PCR para dos ensayos de transformación.

Ensayos transformación	Gene gun	Callos bombardeados	Eventos seleccionados	Evaluados por PCR	Número de eventos PCR+			Eficiencia de transformación (%)
					cry	*vip*	*cry* + *vip*	
2022-2023	Copersucar	3960	600	374	229	0	18	6.24
2023-2024	BioRad	660	345	231	143	4	63	31.82

Niveles de expresión de transcriptos por RT-qPCR

Entre los eventos del ensayo 2022–2023, la línea 294 mostró el nivel más alto de expresión para ambos genes (143,09 y 313,63 veces para *cry* y *vip*, respectivamente) (Figura 1). En las demás líneas, la expresión relativa del gen *cry* varió entre 3 y 34 veces respecto a las plantas control no transformadas (Figura 1a). Los niveles relativos de expresión del gen *vip* detectados fueron entre 2 y 1400 veces mayores respecto al control. Cuatro líneas (Grupo A, Figura 1b) se destacaron con niveles de expresión entre 280 y 1400 veces. La línea 114 presentó el mayor nivel de expresión para *vip* (1443,9 veces) (Figura 1b).

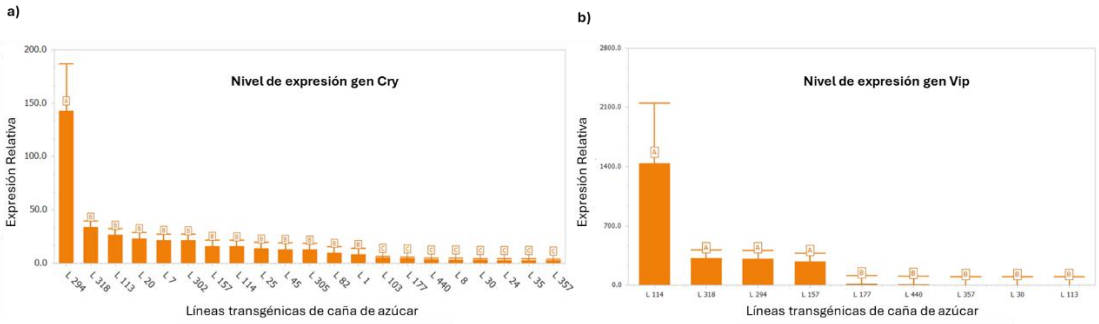


Figura 1. Cuantificación de los niveles de expresión génica mediante análisis de RT-qPCR en líneas transgénicas, relativas a la expresión de la variedad sin transformar. a) gen *cry* en 21 líneas transgénicas. b) gen *vip* en nueve líneas transgénicas.

Detección de proteínas Bt mediante tiras de flujo lateral

La proteína Cry se detectó en 131 de las 171 líneas evaluadas (76,6%) del ensayo 2022–2023. La proteína Vip se detectó en tres de las nueve líneas sobrevivientes, que resultaron apiladas (33,3%). De las 50 líneas obtenidas en el ensayo 2023–2024 evaluadas, 36 fueron positivas para Cry y 14 para ambas proteínas, lo que indica un 100% de expresión del gen Cry.



Figura 2. Detección de proteínas Bt en líneas transgénicas mediante tiras de flujo lateral para las proteínas Cry y Vip. El control de maíz Bt presentó bandas positivas para ambas proteínas. La línea 5 fue negativa para Cry y Vip. En la línea 8 se detectó Cry, pero no Vip.

Ensayos fenotípicos

En la primera prueba, se evaluaron 134 líneas y se seleccionaron las 50 más resistentes, que pasaron a una segunda etapa de evaluación. En el segundo ensayo, 30 líneas (Grupo A) exhibieron mortalidades entre 78 y 99%. Dieciocho líneas se destacaron con mortalidad >90%, incluyendo dos eventos que expresaban ambas proteínas Bt, las líneas 157 y 294 (Figura 3). La Figura 4 muestra la respuesta de *D. saccharalis* (mortalidad de Abbot) en hojas de diferentes líneas transgénicas.

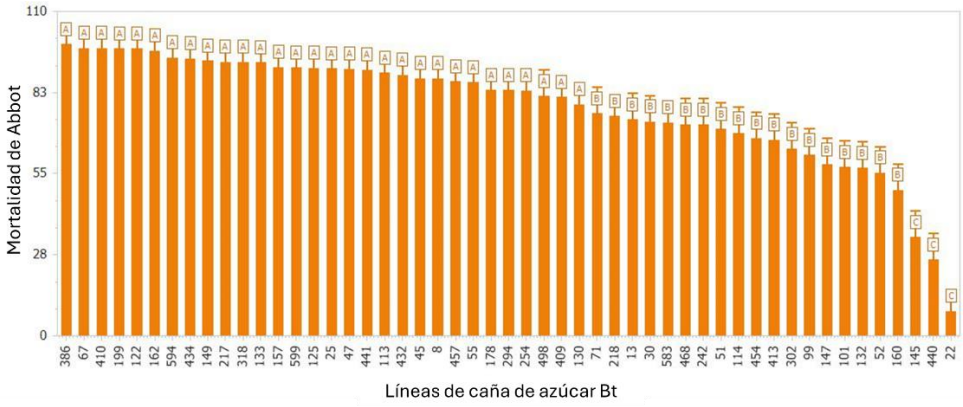


Figura 3. Ensayos fenotípicos en hojas bajo condiciones controladas para evaluar la resistencia frente a *D. saccharalis*. Porcentaje de mortalidad de Abbot obtenido para las 50 líneas transgénicas evaluadas.

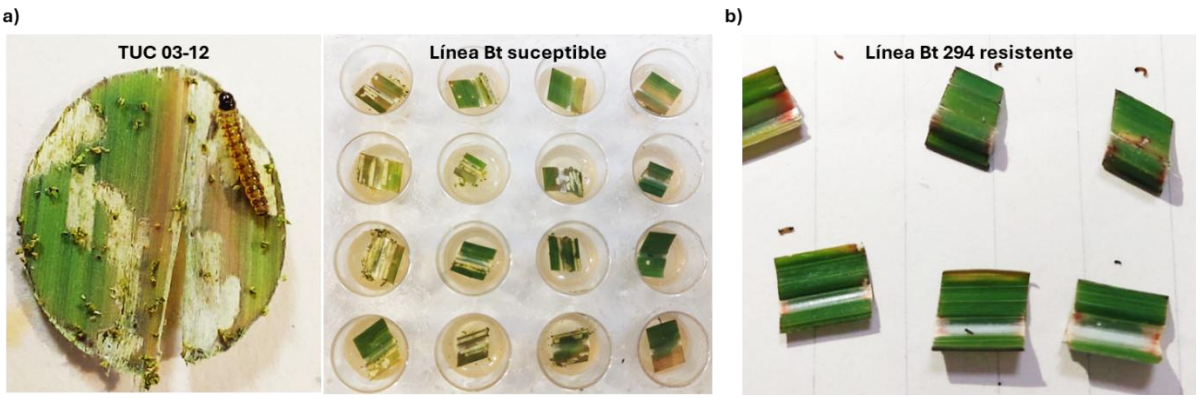


Figura 4. Ensayos fenotípicos en hojas desprendidas bajo condiciones controladas. a) Daño foliar causado por *D. saccharalis* en hojas de plantas control y línea susceptible, tras cuatro días de ensayo. b) Línea resistente con daño mínimo y larvas muertas al cuarto día de ensayo.

CONCLUSIONES

En este trabajo se desarrollaron y evaluaron líneas transgénicas de caña de azúcar con resistencia a *D. saccharalis* mediante la expresión de las proteínas Cry y Vip. La

implementación de un protocolo optimizado de transformación permitió obtener eficiencias notablemente superiores a las reportadas previamente para la misma variedad, especialmente en el ensayo 2023–2024, donde el uso de un equipo de biobalística más eficiente contribuyó a mejorar significativamente la recuperación de eventos transformados.

Los constructos utilizados, diseñados con promotores constitutivos fuertes (Zm-Ubi1 y Act), permitieron alcanzar niveles elevados de expresión para los transgenes, en particular para *cry*, cuyos valores superaron ampliamente los informados en estudios anteriores (Budeguer et al. 2024). Asimismo, un porcentaje considerable de las líneas evaluadas expresó las proteínas Bt, lo que confirma la eficacia del diseño molecular empleado y la estabilidad de la expresión en caña de azúcar. Aunque la expresión de vip fue más variable, los resultados sugieren que intervenciones adicionales, como la optimización de codones, podrían incrementar su eficiencia.

Las líneas transgénicas que expresaron proteínas Bt mostraron niveles de resistencia significativamente mayores que los controles, con mortalidades larvales superiores al 90% en varias de ellas. Estos resultados evidencian que la expresión de Cry y Vip confiere una protección efectiva contra la población local de *D. saccharalis*.

En conjunto, los avances logrados en eficiencia de transformación, niveles de expresión transgénica y control de plagas permiten identificar eventos con alto potencial para avanzar hacia evaluaciones a campo. Las líneas más prometedoras constituyen candidatas firmes para futuros procesos de desregulación y eventual liberación comercial, contribuyendo al desarrollo de variedades más productivas y sostenibles para la industria cañera.

APOYO FINANCIERO

Este proyecto fue financiado por la EEAOC y por los proyectos PIP 2021-2023 GI (11220200101941CO01 de CONICET).

REFERENCIAS

Abbott WS. 1925. A method of computing the effectiveness of an insecticide. *Journal of Economic Entomology* 18(2): 265-267.

Aljanabi S, Forget L, Dookun A. 1999. An improved and rapid protocol for the isolation of polysaccharide and polyphenol free sugarcane DNA. *Plant Molecular Biology Report* 17: 281.

Altpeter F, Sandhu S. 2010. Genetic transformation- biolistics. In *Plant cell culture: essential methods* (pp. 217-237). Wiley.

Baranek J, Konecka E, Kaznowski A. 2017. Interaction between toxin crystals and vegetative insecticidal proteins of Bacillus thuringiensis in lepidopteran larvae. *BioControl* 62: 649-658. doi:10.1007/s10526-017-9828-6.

Bower R, Birch RG. 1992 Transgenic sugarcane plants via microprojectile bombardment. *The Plant Journal* 2(3): 409-416. doi:10.1111/j.1365-313X.1992.00409.x

Budeguer F, Enrique RA, Perera MF, *et al*. 2021. Genetic transformation of sugarcane, current status and future prospects. *Frontiers in Plant Science* 2467.

Budeguer F, Racedo J, Enrique R, *et al*. 2024. Transgenic sugarcane for the sustainable management of the sugarcane borer *Diatraea saccharalis*. *Sugar Ind*ustry *149*: 133-138.

Carrière Y, Fabrick JA, and Tabashnik BE. 2016. Can pyramids and seed mixtures delay resistance to Bt crops? *Trends in Biotechnology* 34: 291-302.

Cristofoletti PT, Kemper EL, Capella AN, *et al.* 2018. Development of transgenic sugarcane resistant to sugarcane borer. *Tropical Plant Biology* 11: 17-30. doi:10.1007/s12042-018-9198-y

CTC, https://ctc.com.br/produtos/. Accessed 11 February 2025

Livak KJ, Schmittgen TD. 2001. Analysis of Relative gene expression data using real-time quantitative PCR and the 2-DDCT method. *Methods* 25(4):402–408

Navure Team. 2023. Navure (1.2.0): A data-science-statistic oriented application for making evidence-based decisions. URL http;//www.navure.com

Noguera A, Enrique R, Perera MF, *et al*. 2015. Genetic characterization and field evaluation to recover parental phenotype in transgenic sugarcane: a step toward commercial release. *Molecular Breeding* 35: 115.

Noguera A, Paz N, Díaz E, *et al*. 2010. Proyecto Vitroplantas: La producción de caña semilla de alta calidad comienza en el laboratorio. Publicación Especial Nº40 Proyecto Vitroplantas: producción de caña semilla de alta calidad Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC), Las Talitas.

Ostengo S, Serino G, Perera, *et al.* 2022. Sugarcane breeding, germplasm development and supporting genetic research in Argentina. *Sugar Tech 24*(1): 166-180.

Tabashnik BE, Brévault T, Carrière Y. 2013. Review Insect resistance to Bt crops: lessons from the first billion acres. *Nature Biotechnology* 31: 510–521. doi:10.1038/nbt.2597

Trumper EV 2014. Resistencia de insectos a cultivos transgénicos con propiedades insecticidas . Teoría, estado del arte y desafíos para la República Argentina. *Agriscientia* 31: 109–126. doi: 10.31047/1668.298x.v31.n2.1 6538

Wang WZ, Yang BP, Feng XY, *et al*. 2017. Development and characterization of transgenic sugarcane with insect resistance and herbicide tolerance. *Frontiers in Plant Science* 8: 1535.

IMPLEMENTACIÓN DE MEJORAS EN LA EDICIÓN GENÓMICA DE CAÑA DE AZÚCAR USANDO EL GEN MODELO ALS

García, J.E.[1]; Serino, G.[2] y Giampaoli, G.[2]

[1]Instituto de Agrobiotecnología del Litoral (IAL). Colectora Ruta Nac. Nº168 km. 0 - Paraje el Pozo s/n. Centro Científico Tecnológico Santa Fe (CCT). Santa Fe 3000, Argentina.

[2]Chacra Experimental Agrícola Santa Rosa. Camino Vecinal no. 8 km 6. Colonia Santa Rosa. Salta 4531, Argentina; ggiampaoli@chacraexperimental.org

Palabras clave: CRISPR/Cas9, acetolactato sintasa, reparación dirigida por homología.

Introducción

La caña de azúcar (*Saccharum* sp.) es un cultivo de gran importancia a nivel mundial, aportando cerca del 80% del azúcar y el 40% del bioetanol producidos globalmente (Zhang *et al*., 2018). Las variedades actuales provienen de cruzamientos entre *Saccharum officinarum* (2n = 80, x = 10) y *Saccharum spontaneum* (2n = 40–128, x = 8) (Piperidis & D'Hont, 2020). Esta compleja estructura genómica hace que el mejoramiento genético tradicional resulte lento y altamente laborioso. En respuesta a esta demanda, en los últimos años se han incorporado herramientas biotecnológicas con el potencial de obtener mejoras genéticas de manera más rápida y eficiente.

Entre ellas se destaca la edición de genes con tecnologías que emplean nucleasas específicas, como es el caso de las nucleasas con dedos de zinc (ZFNs, siglas en inglés de *Zinc Finger Nucleases*), las nucleasas efectoras tipo activador de la transcripción (TALENs¸ siglas en inglés de *Transcription Activator-Like Effector Nucleases*) y las repeticiones palindrómicas cortas agrupadas y regularmente interespaciadas-asociadas a la nucleasa Cas (sistema CRISPR/Cas, siglas en inglés de *Clustered Regularly Interspaced Short Palindromic Repeats*). El sistema CRISPR/Cas9 se ha convertido en el método más utilizado en edición genómica de plantas (Liu *et al*., 2022). Mediante esta tecnología, la endonucleasa Cas9 es dirigida por una molécula de ARN guía (sgRNA, siglas en inglés de *single guide RNA*) a una región específica del genoma donde la enzima corta las dos cadenas del ADN. Esto puede repararse mediante cuatro mecanismos citados hasta la fecha, aunque dos de ellos siguen siendo los predominantes: la unión de extremos no homólogos (NHEJ, siglas en inglés de *Non-Homologous End Joining*)) y la reparación dirigida por homología (HDR, siglas en inglés de *Homology-Directed Repair*) (Přibylová & Fischer, 2024). La reparación mediada por NHEJ es propensa a errores, y puede dar lugar a pequeñas deleciones o inserciones en el sitio blanco que alteran la función del gen (Voytas, 2013). Por el contrario, HDR emplea un molde de reparación y da como resultado una edición precisa (Huang & Puchta, 2019).

La acetolactato sintasa (ALS) o acetohidroxiácido sintasa (AHAS) es una enzima clave que cataliza el primer paso en la biosíntesis de aminoácidos de cadena ramificada valina, leucina e isoleucina, y es el blanco de cinco clases de herbicidas: sulfonilureas, imidazolinonas, triazolopirimidinas, pirimidinil-tiobenzoatos y sulfonil-aminocarbonil-triazolinonas, los cuales son usados en cultivos como maíz y trigo debido a su efectividad y baja toxicidad en mamíferos. Estos herbicidas son potentes inhibidores de ALS, interfiriendo así con la síntesis de los aminoácidos mencionados y ocasionando la muerte de la planta (Powles & Yu, 2010). Algunas mutaciones específicas en el gen *ALS,* tales como la modificación de los aminoácidos Ala122, Pro197, Ala205, Asp376, Trp574, Ser653 (posiciones de los aminoácidos correspondientes a la secuencia de la proteína ALS de *Arabidopsis thaliana*) confieren tolerancia a los herbicidas inhibidores (Tan *et al*., 2006).

En trabajos previos desarrollados en la Chacra, el gen *ALS* fue editado mediante HDR utilizando CRISPR/Cas9, con una guía de sgRNA y un molde de reparación de simple cadena de ADN. Si bien se detectaron 33 eventos editados por PCR seguida de restricción enzimática (PCR/RE) y la secuenciación confirmó HDR en 13 de ellos, las plantas no sobrevivieron al herbicida, sugiriendo que el número de copias/alelos editados fue insuficiente (Giampaoli *et al.*, 2025).

El objetivo de este trabajo fue evaluar el uso de un molde de reparación de ADN doble cadena (dsDNA, siglas en inglés de *double-stranded DNA*) para incrementar la eficiencia de la edición genómica en caña de azúcar mediante la tecnología CRISPR/Cas9. Se plantea que un molde de reparación dsDNA permitiría la edición de un mayor número de copias o alelos probablemente debido a la mayor estabilidad y disponibilidad del molde dentro de la célula durante el proceso de reparación.

Materiales y métodos

1. Diseño de un molde de reparación de ADN de doble cadena

Tomando como referencia el molde de reparación RT1 previamente descripto por Giampaoli *et al.* (2025) y la secuencia del gen *ALS* de caña de azúcar, se diseñó un nuevo molde dsDNA de 1845 pb destinado a promover la reparación dirigida por homología. Este conserva todas las modificaciones introducidas en RT1, incluyendo la sustitución W574L (TGG→CTC), la mutación silente en el sitio PAM (AGG→AAG) para evitar la acción recurrente de Cas9 tras la edición, y la eliminación del sitio de restricción BtsCI (GGA→GAA) para su empleo como herramienta de diagnóstico molecular. A diferencia de RT1, que tenía una longitud de 127 nt, este nuevo molde presenta una extensión notablemente mayor y un formato de doble cadena. El molde fue sintetizado y clonado por Macrogen (Macrogen, Inc.), resultando en un vector final de 4555 pb.

2. Cultivo de tejidos, transformación y regeneración de plantas

Para la generación de callos embriogénicos, se utilizaron cogollos de caña de azúcar de la variedad NA 05-860, esterilizados y procesados siguiendo protocolos establecidos (Sosa *et al*., 2024; Giampaoli *et al*., 2025). La transformación se realizó mediante bombardeo de partículas utilizando el sistema PDS-1000/He™ Biolistic Particle Delivery System (Bio-Rad Laboratories, Inc). Los callos fueron cobombardeados con tres plásmidos: el vector de edición (pEG-G1), el molde de reparación (pMG-Molde) y un vector conteniendo el gen *nptII* para selección *in vitro* (pNPTII). El plásmido pEG-G1, diseñado y validado previamente por la Chacra (Sosa *et al*., 2024; Giampaoli *et al*., 2025), presenta alta especificidad por el sitio blanco y baja actividad *off-target*. El ADN fue precipitado siguiendo el protocolo del fabricante con modificaciones, manteniendo una relación de 1:1:4 entre el pEG-G1, el pNPTII y el pMG-Molde respectivamente. Los callos transformados se seleccionaron en medio MSE3 conteniendo 45 mg/L de geneticina (MSE3-Gen45) durante 2 meses, con repiques a medio fresco cada dos semanas y en oscuridad a 26 °C. Posteriormente se transfirieron a medio basal MSR y se incubaron en condiciones de fotoperíodo de 16 horas de luz y 8 horas de oscuridad a 27 °C para promover la formación de embriones somáticos.

3. Análisis por PCR/RE y secuenciación

Se extrajo ADN de plantas regeneradas y controles no transformados siguiendo el protocolo de Doyle y Doyle (1990) con modificaciones. Se amplificó un fragmento de 759 pb del gen *ALS* utilizando los cebadores específicos Oli 314F y Oli 315R bajo las condiciones descriptas por Sosa *et al*. (2024). Los amplicones fueron digeridos con BtsCI para detectar la mutación en el sitio de reconocimiento de la enzima. Los productos de PCR que presentaron el patrón esperado tras la digestión enzimática se utilizaron como molde para una PCR anidada con los cebadores Oli 314F y Oli 12R, obteniéndose fragmentos de 404 pb derivados

del amplicón de 519 pb original que contiene el sitio blanco editado. Los productos amplificados se purificaron y se enviaron a secuenciar (Premium PCR Sequencing Service, Plasmidsaurus, Inc.). Las secuencias obtenidas se analizaron mediante MEGA12. La inserción del vector conteniendo *Cas9* (pEG-G1) se evaluó mediante PCR con cebadores específicos.

Resultados

1. Transformación, selección y regeneración de plantas de caña de azúcar

Se obtuvo un total de 103 plantas regeneradas a partir del co-bombardeo de callos embriogénicos con los tres plásmidos necesarios para la edición mediante CRISPR/Cas9.

2. Evaluación molecular de líneas regeneradas

Las plantas regeneradas se analizaron mediante PCR seguida de restricción enzimática con BtsCI. Todas las muestras evaluadas evidenciaron una modificación en el sitio de reconocimiento de la enzima mostrando dos bandas características: una de aproximadamente 520 pb, correspondiente al fragmento que contiene ambos sitios mutados (incluyendo el codón editado y el sitio de BtsCI modificado), y otra de 239 pb, derivada del sitio de restricción que permaneció sin modificaciones. La presencia de *Cas9* se detectó en todas las líneas analizadas.

3. Secuenciación

Para corroborar el tipo de edición, se enviaron a secuenciar cinco muestras independientes, cada una obtenida a partir de una línea regenerada. Se obtuvieron cinco mil lecturas por cada muestra. Después del filtrado inicial, se conservaron aquellas que presentaban alguna modificación en el sitio blanco, incluida la mutación deseada, mientras que se descartaron aquellas que mantenían la secuencia original del gen *ALS* sin modificaciones.

Tras el alineamiento y comparación de las lecturas seleccionadas, se observó que en todas las líneas analizadas hubo edición mediada por HDR. Además, se identificaron lecturas que contenían inserciones y deleciones, ocasionadas por el mecanismo de reparación NHEJ (Figura 1).

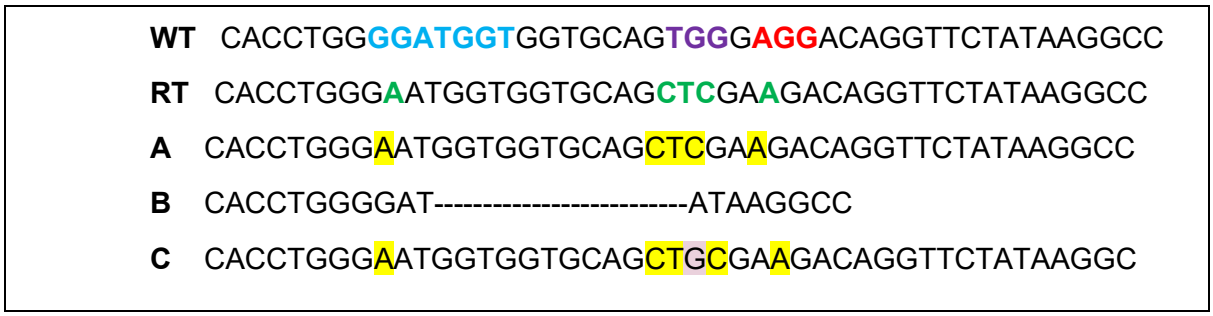


Figura 1. Secuencias editadas en plantas transformadas. WT representa un fragmento del gen de *ALS* no editado en caña de azúcar. En celeste se señala el sitio de reconocimiento de BtsCI, en violeta el codón a editar y en rojo el sitio PAM. RT muestra la secuencia del molde de reparación, con las sustituciones deseadas indicadas en letras verdes. Las lecturas A, B y C corresponden a lecturas de plantas editadas. La lectura A presenta las mutaciones generadas por HDR, resaltadas en amarillo. La lectura B muestra una deleción de 26 pb resultante de NHEJ. La lectura C evidencia una reparación incompleta por HDR (resaltado en amarillo) debido a la inserción de 1 nucleótido (resaltado en rosa) en el codón a editar.

Discusión

La edición génica mediada por HDR constituye una herramienta central en biotecnología vegetal, especialmente cuando se requieren modificaciones precisas y dirigidas en cultivos de alto valor. A diferencia de la reparación por NHEJ, que genera inserciones y/o deleciones al azar, HDR permite introducir sustituciones específicas (González *et al.*, 2025). Esta precisión resulta particularmente valiosa en cultivos de relevancia agronómica, donde cambios puntuales en un determinado gen pueden conferir tolerancia a una amplia gama de herbicidas (Powles & Yu, 2010). No obstante, la eficiencia de HDR en plantas continúa siendo un desafío, debido a la baja frecuencia natural de este mecanismo y a la fuerte predominancia de NHEJ (Chen *et al.*, 2022). Aun así, existen reportes de implementaciones exitosas en diversas especies (Hahn *et al*., 2018; Barone *et al*., 2020; Sony *et al*., 2023), incluyendo caña de azúcar (Oz *et al*., 2021; Giampaoli *et al*., 2025), que demuestran su potencial cuando se optimizan las condiciones experimentales.

Entre los factores que determinan la eficiencia de HDR, el diseño del molde de reparación ocupa un rol decisivo. Variables como la cantidad, la longitud y simetría de los brazos de homología, así como el tipo de molécula utilizada (ssDNA vs. dsDNA), influyen de manera directa en la probabilidad de que la célula lo utilice durante la reparación (Song & Stieger, 2017).

En trabajos previos realizados en la Chacra, el gen *ALS* fue editado mediante HDR utilizando CRISPR/Cas9 y moldes ssDNA. De 123 líneas regeneradas, solo 33 mostraron modificación del sitio blanco por PCR/RE y, entre ellas, únicamente 13 evidenciaron HDR tras la secuenciación (Giampaoli *et al.*, 2025). En contraste, en el presente trabajo todos los regenerantes presentaron modificación del sitio blanco diagnosticado mediante PCR/RE, alcanzando una eficiencia de edición del 100%. Para determinar el mecanismo de reparación interviniente, se secuenciaron cinco líneas seleccionadas al azar y, en todos los casos, se detectaron lecturas compatibles con HDR. Estos resultados sugieren que el uso de un molde de reparación de ADN de doble cadena mejora notablemente la disponibilidad y estabilidad del donante dentro de la célula, favoreciendo su incorporación durante la reparación y aumentando las probabilidades de obtener mutaciones precisas. No obstante, para determinar el alcance real de esta mejora será necesario secuenciar un mayor número de eventos y evaluar el fenotipo de tolerancia al herbicida, lo que permitirá establecer cuántas copias o alelos fueron efectivamente reparados a través de HDR.

Conclusiones

En este trabajo conseguimos incrementar la eficiencia de edición del gen *ALS* al 100% empleando un molde de reparación de doble cadena de ADN, lo cual fue corroborado mediante ensayos de PCR/RE. Si bien no se ha evaluado un número significativo de muestras, los resultados sugieren una mayor frecuencia de edición mediante reparación por el mecanismo HDR. Aún se requiere la secuenciación completa de las líneas regeneradas y las evaluaciones fenotípicas para determinar la eficiencia efectiva de HDR y su impacto en la tolerancia al herbicida.

Bibliografía

Barone, P.; Wu, E.; Lenderts, B.; Anand, A.; Gordon-Kamm, W.; Svitashev, S.; Kumar, S. 2020. Efficient Gene Targeting in Maize Using Inducible CRISPR-Cas9 and Marker-free Donor Template. Mol Plant. 13(8), 1219–1227.

Chen, J.; Li, S.; He, Y.; Li, J.; Xia, L. 2022. An update on precision genome editing by homology-directed repair in plants.Plant Physiol. 188(4), 1780–1794.

Doyle, J.J.; Doyle, J.L. 1990. Isolation of plant DNA from fresh tissue. Focus 12: 13-15.

Giampaoli, G.; Sosa, M.M.; Saavedra Pons, A.; Serino, G. 2025. CRISPR/Cas9 mediated homology directed repair enables precise modification in sugarcane *ALS* gene. Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists, volume 32, 840-845.

González, M. N.; Salaria, N.; Friberg, M.; Liu, Y.; Alverup, J.; Andersson, M.; Hofvander, P. 2025. Single-stranded DNA (ssDNA) donor repair templates and CRISPR/Cas9 enable a high-frequency of targeted insertions in potato. Front Genome Ed. 7, 1661829.

Hahn, F.; Eisenhut, M.; Mantegazza, O.; Weber, A. P. M. 2018. Homology-Directed Repair of a Defective Glabrous Gene in Arabidopsis With Cas9-Based Gene Targeting. Front Plant Sci. 9, 424.

Huang, T.K.; Puchta, H. 2019. CRISPR/Cas-mediated gene targeting in plants: finally a turn for the better for homologous recombination. Plant Cell Rep. 38: 443-453.

Liu, H.; Chen, W.; Li, Y.; Sun, L.; Chai, Y.; Chen, H.; Nie, H.; Huang, C. 2022. CRISPR/Cas9 Technology and Its Utility for Crop Improvement. Int. J. Mol. Sci. 23(18), 10442.

Oz, M.T.; Altpeter, A.; Karan, R.; Merotto, A.; Altpeter, F. 2021. CRISPR/Cas9-mediated multi-allelic gene targeting in sugarcane confers herbicide tolerance. Front. Genome Ed. 15.

Piperidis N.; D'Hont A. 2020. Sugarcane genome architecture decrypted with chromosome-specific oligo probes. Plant J. 103(6):2039-2051.

Powles, S.B.; Yu, Q. 2010. Evolution in action: plants resistant to herbicides. Annu. Rev. Plant Biol. 61: 317-347.

Přibylová, A.; Fischer, L. 2024. How to use CRISPR/Cas9 in plants: from target site selection to DNA repair. J Exp Bot, 75(17), 5325–5343

Song, F.; Stieger, K. 2017. Optimizing the DNA Donor Template for Homology-Directed Repair of Double-Strand Breaks. Mol Ther Nucleic Acids, 7, 53–60.

Sony, S. K.; Kaul, T.; Motelb, K. F. A.; Thangaraj, A.; Bharti, J.; Kaul, R.; Verma, R.; Nehra, M. 2023. CRISPR/Cas9-mediated homology donor repair base editing confers glyphosate resistance to rice (Oryza sativa L.). Front Plant Sci. 14, 1122926.

Sosa, M.M; Giampaoli, G.; Palacio, G. C.; Serino, G.; Saavedra Pons, A. B. 2024. Advances in genome editing of sugarcane using ALS genes as a model. Sugar Tech, 27, 173–178.

Tan, S.; Evans, R.; Singh, B. 2006. Herbicidal inhibitors of amino acid biosynthesis and herbicide-tolerant crops. Amino Acids 30: 195-204.

Voytas, D.F. 2013. Plant genome engineering with sequence-specific nucleases. Annu. Rev. Plant Biol. 64: 327-350.

Zhang, J.; Zhang, X.; Tang, H.; Zhang, Q.; Hua, X.; Ma, X.; ... ; Ming, R. 2018. Allele-defined genome of the autopolyploid sugarcane Saccharum spontaneum L. Nat. genet. 50(11), 1565-1573.

DIVERSIDAD GENÉTICA EN EL BANCO DE GERMOPLASMA DE LA EEAOC Y EVALUACIÓN DE UNA COLECCIÓN NÚCLEO

Perera, MF; Peña Malavera, AN; Noguera, AS; Racedo, J y Ostengo, S
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. franciscaperera@yahoo.com.ar; franciscaperera@eeaoc.org.ar

Palabras clave: marcadores DArT-seq; estructura poblacional; diversidad capturada

Resumen

Comprender la diversidad genética y la estructura poblacional de los bancos de germoplasma de caña de azúcar proporciona información valiosa para producir progenies con la máxima variabilidad. Para ello, se genotiparon 350 accesiones del banco de germoplasma de la EEAOC con 74.969 loci de SNP bialélicos mediante la tecnología DArT-seq. La diversidad genética y la estructura genética de toda la colección se analizaron mediante un método bayesiano y análisis de coordenadas principales (ACoP), mientras que la variabilidad se estimó mediante análisis de varianza molecular (AMOVA). También, se sugirieron colecciones núcleo de diferentes tamaños. La heterocigosidad media observada (HO) de todos los SNP fue de 0,28 (0 a 1), mientras que su heterocigosidad esperada (HE) varió de 0 a 0,5, con una media de 0,3. El contenido de información polimórfica (PIC) de los SNP varió de 0 a 0,38, con un valor medio de 0,22 y una media del poder discriminante (Dj) de 0,28. El análisis de la estructura genética y el ACoP revelaron que las accesiones se agruparon en tres grupos (I: 71 genotipos; II: 243 genotipos y III: 34 genotipos). El AMOVA sugirió un mayor porcentaje de variación dentro de cada subpoblación (89,75%) que entre ellas (10,25%; $p<0,0001$), mientras que el valor de ΦFST del 10% indicó una diferenciación genética moderada entre estos tres grupos. Por otro lado, una colección núcleo de 35 genotipos (10%) capturó casi el 96% de la diversidad, mientras que al incluir 104 genotipos (30%) se capturó más del 98% de la diversidad. Los resultados permitirán la explotación eficiente de la diversidad genética del germoplasma de caña de azúcar y el desarrollo de estrategias para obtener nuevos cultivares con características superiores.

Introducción

En los programas de mejoramiento genético, la variabilidad genética y su manipulación mediante métodos adecuados conducen a la generación de genotipos superiores con características agronómicas interesantes. En este sentido, los bancos de germoplasma desempeñan un papel esencial en la preservación de esta variabilidad genética, aunque su manejo puede ser complejo debido al gran número de accesiones (de Oliveira et al., 2020). A fin de ampliar la base y el acervo genéticos, la redundancia de alelos debe minimizarse mientras que la introducción de nuevas accesiones debe ser optimizada.

El conocimiento de la diversidad genética y la estructura poblacional de los bancos de germoplasma permite planificar y conservar genotipos para garantizar el empleo de recursos genéticos en los programas de mejoramiento, a largo plazo (Kanaka et al., 2023). En general los bancos contienen numerosas accesiones, sin embargo, solo una pequeña proporción de estos recursos se utiliza en la práctica. Por lo tanto, es crucial optimizar el uso de estos recursos agrupando suficientes accesiones en una colección núcleo que maximice la diversidad genética descrita en toda la colección.

En Argentina, existen tres programas de mejoramiento genético de caña de azúcar; el de la EEAOC produce variedades TUC, y su importancia para la provincia de Tucumán (responsable de del 70% de la producción total) es tal que ha liberado nueve nuevas variedades desde 2009. Además, el último censo varietal reveló que más del 98% del área de caña de azúcar relevada en Tucumán está plantada con variedades liberadas por este programa de mejoramiento (Henriquez et al. 2023). Previamente, la diversidad genética y la estructura poblacional de algunos genotipos del banco de germoplasma se caracterizaron

mediante AFLP (Perera et al., 2012) y marcadores TRAP y SSR (Perera et al., 2023). Sin embargo, actualmente los polimorfismo en nucleótidos simples (SNP) son los marcadores empleados por excelencia para estudios de diversidad genética (Yirgu et al., 2023). Considerando lo expuesto, el objetivo del trabajo fue cuantificar la diversidad genética y determinar la estructura genética del banco de germoplasma de la EEAOC mediante la caracterización molecular de 350 individuos con la tecnología DArT-seq y sugerir la composición de una colección núcleo.

Materiales y métodos

Material vegetal y extracción de ADN

La población incluyó 350 genotipos de caña de azúcar de los 789 que conforman la colección de germoplasma del programa de mejoramiento genético de la EEAOC (Ostengo et al., 2021). Si bien la mayoría se utilizó frecuentemente como progenitores para el cruzamiento, otros se incluyeron para capturar la diversidad alélica.

El ADN se extrajo de tejido foliar molido con nitrógeno líquido siguiendo el protocolo de Diversity Arrays Technology (DArT) (www.diversityarrays.com/orderinstructions/plant-dna-extraction-protocol-for-dart/). La calidad y la cantidad del ADN se verificaron en geles de agarosa al 0,8 %, teñidos con gelred.

DArT-seq

Todos los individuos fueron genotipados utilizando la plataforma DArT-seq (Yarralumla, Australia), una tecnología de alto rendimiento basada en un método de reducción de la complejidad genómica mediante la selección inteligente de fracciones genómicas que corresponden predominantemente a genes activos. Estas fracciones genómicas se secuenciaron posteriormente mediante plataformas NGS. Los datos obtenidos se filtraron, depuraron excluyendo SNP monomórficos y se clasificaron en tres clases: 0: homocigota de referencia; 1: homocigota para SNP; y 2: heterocigota, dado que no se infirió la dosis alélica.

Nivel de polimorfismo

Se calcularon estadísticas descriptivas del nivel de polimorfismo en todas las accesiones utilizando R: número de alelos efectivos (Ne), frecuencia de alelos nulos (NA), heterocigosidad observada (HO), heterocigosidad esperada (HE), contenido de información poloimórfica (PIC) y poder discriminante (Dj).

Análisis de estructura genética

Se determinó mediante un método bayesiano, donde se ejecutaron modelos para K=2-10, análisis de coordenadas principales (ACoP) y análisis de varianza molecular (AMOVA) con el software R.

Colecciones núcleo

Se generaron diferentes muestras modificando el tamaño de las colecciones núcleo de 0,1 (10%) a 0,3 (30%), para identificar el subconjunto de genotipos que pudiera capturar la mayor diversidad genética utilizando el paquete R corehunter 3.0.

Resultados

Nivel de polimorfismo

Se caracterizaron 350 genotipos del banco de germoplasma del EEAOC mediante DArT-seq. Se obtuvieron 74.969 SNP. En el primer análisis, se identificaron dos genotipos fuera de grupo (L 79-1002 y POJ 2878) y se eliminaron de la matriz original para realizar el segundo análisis. Los análisis descriptivos se presentan en la Tabla 1.

Análisis de estructura genética

En el análisis de la estructura genética a través del método bayesiano se obtuvo un K óptimo = 3, los genotipos fueron asignados a uno de los tres grupos considerando su mayor

probabilidad de pertenecer a cada uno. El grupo I consistió en 71 genotipos, el grupo II: 243 genotipos y el grupo III: 34 genotipos (Figura 1). El grupo II agrupó la mayoría de los genotipos, principalmente aquellos de diferentes orígenes (CB, CO, CP, FAM, NA, NCO, R, SP, US y VESTA). Los genotipos TUC, HO, HOCP, L y LCP se distribuyeron en los tres grupos. Posteriormente, se representó el patrón de diversidad de la colección a través de un ACoP, que reveló que los genotipos se agruparon en tres grupos al igual que en el análisis de estructura genética.

Tabla 1. Número de alelos efectivos (Ne), frecuencia de alelos nulos (NA), heterocigosidad observada (HO), heterocigosidad esperada (HE), contenido de información polimórfica (PIC) y poder discriminante (Dj) de los 74.969 SNP en los 348 genotipos de caña de azúcar.

Variable	Media	D.E.	Min	Max
Ne	1,54	0,40	1,00	2,00
NA	134,60	79,51	0,00	316
HO	0,28	0,33	0,00	1,00
HE	0,30	0,20	0,00	0,50
PIC	0,22	0,15	0,00	0,38
Dj	0,28	0,20	0,00	0,50

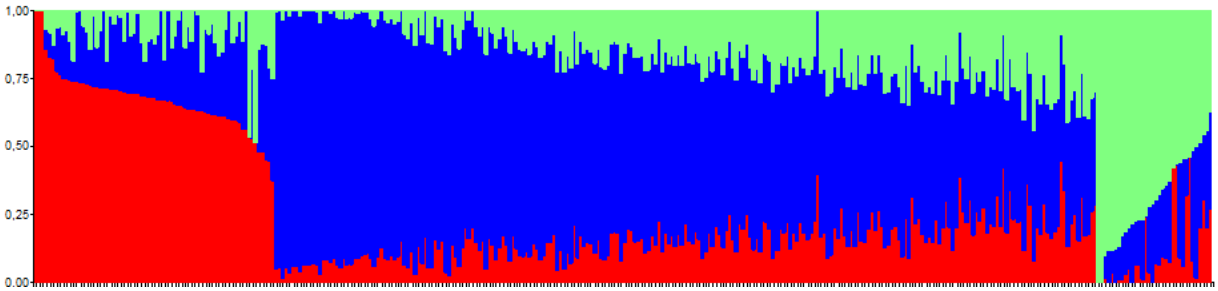


Figura 1. Estructura genética de 348 accesiones de caña de azúcar obtenida con 74,969 SNPs. Cada genotipo está representado por una sola línea vertical, dividida en colores según su pertenencia estimada en cada grupo. En rojo, grupo I; en azul, el grupo II; y grupo III en color verde.

Considerando los tres grupos detectados, se realizó un AMOVA que sugirió un mayor porcentaje de variación dentro de cada subpoblación (89,75%) que entre ellas (10,25%; p <0,0001). El índice ΦFST (10%) indicó una diferenciación genética moderada entre los tres grupos.

Colecciones núcleo

Para detectar una colección núcleo que capture la mayor parte de la diversidad genética en un número menor de genotipos, se evaluaron tres tamaños diferentes. Una colección de 35 genotipos (10%) capturó casi el 96% de la diversidad (Tabla 2), pero la mayoría de los genotipos en la colección núcleo más pequeña estuvieron incluidos en las más grandes.

Tabla 2. Diversidad capturada por diferentes tamaños de colecciones núcleo.

Tamaño	Número de genotipos	Número de alelos	Diversidad capturada
0,1	35	137.040	95,78%
0,2	70	139.013	97,16%
0,3	104	140.554	98,24%
1,0	348	143.063	100%

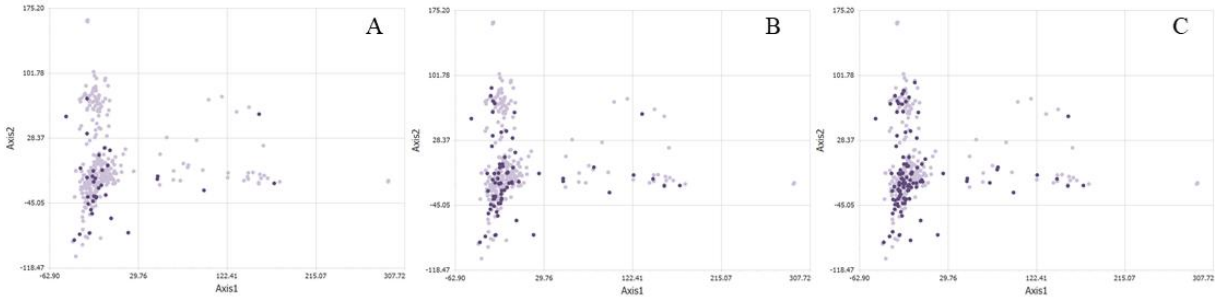


Figura 3. ACoP de 348 accesiones de caña de azúcar obtenido con 74.969 SNP. **A**: Colección núcleo con 35 genotipos (10%). **B**: Colección núcleo con 70 genotipos (20%) y **C**: Colección núcleo con 104 genotipos (30%). Los genotipos de las colecciones núcleo se indican en morado oscuro.

En un estudio previo, 47 genotipos del banco de germoplasma de la EEAOC, también incluidos en el presente estudio, se caracterizaron utilizando marcadores TRAP y SSR (Perera et al, 2023). La mayoría de estos genotipos no quedaron incluidos en las colecciones núcleo sugeridas; solo un genotipo de los 47 se incluyó en la colección núcleo del 20% (TUC 96-52), 3 en la colección núcleo 30% (TUC 00-23, TUC 01-2 y TUC 02-22), mientras que 4 se incluyeron en ambas colecciones (LCP 85-376, TUC 00-19, TUC 07-21 y TUC95-46). Estas colecciones núcleo serán de utilidad para que el programa de mejoramiento incluya nuevos progenitores en su esquema de cruzamientos, en ese sentido genotipos de diferentes orígenes como CB, CO, R y SUMATRA pueden aportar nuevos alelos, además individuos diferentes a los utilizados de los programas CP, FAM, HO, HOCP, L, NA y TUC podrían ser fuente de variabilidad.

Conclusión

La implementación de herramientas moleculares permite un uso más racional de la diversidad genética de los bancos de germoplasma para diseñar cruzamientos que permitan la introgresión eficiente de alelos favorables, aumentando la probabilidad de obtener variedades más productivas y/o resistentes.

Referencias

de Oliveira GL, de Souza AP, de Oliveira FA, Zucchi MI, de Souza LM, Moura MF, 2020. Genetic structure and molecular diversity of Brazilian grapevine germplasm: Management and use in breeding programs. PLoS ONE 15: e0240665,

Henriquez DD, Medina P, Aybar Guchea M, et al, 2023. Relevamiento de la distribución varietal y del uso de otras tecnologías en el cultivo de caña de azúcar en la provincia de Tucumán: campaña 2022/2023. Reporte Agroindustrial 282.

Kanaka KK, Sukhija N, Goli RC, et al, 2023. On the concepts and measures of diversity in the genomics era, Current Plant Biology 33: 100278.

Ostengo S, Serino G, Perera MF, et al, 2021, Sugarcane breeding, germplasm development and supporting genetic research in Argentina. Sugar Tech 24:166-180.

Perera MF, Arias ME, Costilla D, et al, 2012. Genetic diversity assessment and genotype identification in sugarcane based on DNA markers and morphological traits. Euphytica 185: 491-510.

Perera MF, Ostengo S, Peña Malavera AN, et al, 2023, Genetic diversity and population structure of Saccharum hybrids. PLoSONE 18: e0289504.

Yirgu M, Kebede M, Feyissa T, et al, 2024, Single nucleotide polymorphism (SNP) markers for genetic diversity and population structure study in Ethiopian barley (Hordeum vulgare L,) germplasm. BMC Genome 24: 7.

PRECISIÓN DE LA SELECCIÓN GENÓMICA EN POBLACIONES DEL PROGRAMA DE MEJORAMIENTO DE CAÑA DE AZÚCAR DE LA EEAOC

Racedo J. *; Rossi E. **; Peña A. N. *; Ghio A. C. ***; Henriquez D. D. ***; Díaz J. V. ***; Noguera A. S. *; Perera M. F. * y Ostengo S. *
* Instituto de Tecnología Agroindustrial del Noroeste Argentino (ITANOA), Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC) - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). CCT CONICET NOA Sur. Las Talitas, Tucumán, T4101XAC, República Argentina; joracedo@gmail.com
** Instituto de Investigaciones Agrobiotecnológicas (INIAB, CONICET-UNRC). Río Cuarto, Córdoba, Argentina.
*** Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC). Las Talitas, Tucumán, T4101XAC, República Argentina.

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

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 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), 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 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. 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 interpoblacionales para evaluar la precisión de las estimaciones.

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. 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 (Tafí Viejo, Tucumán, Argentina), donde cada genotipo estuvo representado por parcelas de 2 surcos × 3 m. 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 kg cm^{-2} 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, mediante DArTseq. Los datos fenotípicos se recolectaron en ensayos con diseño de bloques completos al azar (RCBD) de 3 surcos × 3 metros, con dos repeticiones y dos cortes sucesivos en un sitio. Se midieron contenido de sacarosa (SC%), 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):

$$\mathbf{SC\%=0{,}98\cdot Pol\%jugo-0{,}28\cdot Brix}$$

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 × 8 metros, con diseño RCBD y tres repeticiones, evaluándose durante dos cortes consecutivos en dos localidades (El Colmenar y Santa Ana, 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 multiambiental, obteniéndose los predictores genéticos (BLUPs).

Caracterización de poblaciones mediante Análisis de Coordenadas Principales (PCoA)

A partir de todos los marcadores polimórficos se calculó la distancia genética de Nei (1972), y se construyeron matrices de distancia para el ordenamiento. Las relaciones genéticas entre las tres poblaciones se visualizaron mediante PCoA (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 < 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 and 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 TR 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 de todas las poblaciones mediante DArTseq. Tras filtrar los SNPs con frecuencia alélica menor (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).

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. Para visualizar las relaciones genéticas entre las tres poblaciones estudiadas, se realizó un análisis de coordenadas principales (Figura 1). Nuestros resultados sugieren que la población BG podría entrenar de manera efectiva modelos para 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. Estos hallazgos resaltan la importancia de seleccionar una población de entrenamiento que equilibre de manera óptima diversidad, estructura genética y parentesco para mejorar la precisión de la predicción genómica.

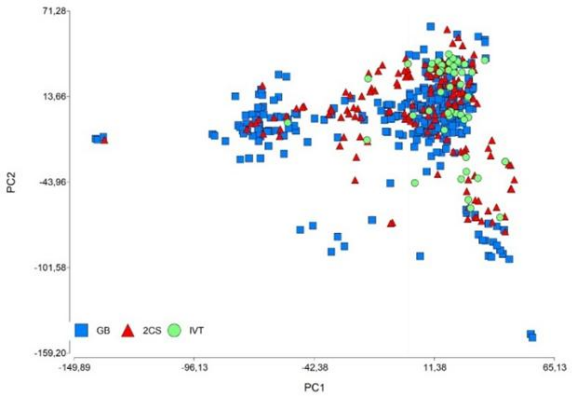


Figura 1. Análisis de Coordenadas Principales. Se utilizaron 35.869 SNPs derivados de DArT-seq para visualizar las relaciones genéticas entre las poblaciones de caña de azúcar BG, 2C e I.

Selección genómica

Para BG, la población de entrenamiento 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 población de entrenamiento 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 azúcar recuperada cuando ambas poblaciones se analizaron conjuntamente (r = 0,41; Tabla 4) y cuando la población de entrenamiento consistió únicamente en 2C (r = 0,43; Tabla 2).

Tabla 1. Valores medios de los coeficientes de correlación (N=100) y desviación estándar para el modelo de selección genómica G-BLUP aplicado a la población del Banco de Germoplasma (BG), con validación intrapoblación 80:20.

Variable	Media	Desvío estándar
Pol%	0.43	0.13
Azúcar recuperada	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 intrapoblacional 80:20 usando el modelo G-BLUP de selección genómica aplicado a la población de la Segunda Etapa Clonal (2C).

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 interpoblacional considerando la población de la Segunda Etapa Clonal (2C) como conjunto de entrenamiento y la población de Ensayos Internos de Variedades (I) como conjunto de prueba. Los GEBVs estimados para I se correlacionaron con sus valores fenotípicos.

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 intrapoblacional 80:20 usando el modelo G-BLUP de selección genómica aplicado a las poblaciones combinadas Segunda Etapa Clonal (2C) e Internos (I).

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

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 población de entrenamiento. Además, la relación genética entre la población de entrenamiento (TR) 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 mediante 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.

APOYO FINANCIERO

Esta investigación fue financiada por la EEAOC y el Instituto de Tecnología Agroindustrial del Noroeste Argentino (ITANOA, EEAOC-CONICET), como parte del proyecto PICT A-CatI-2021-110 de la Agencia Nacional de Promoción Científica y Tecnológica.

REFERENCIAS

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.

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.

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. We; 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.

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.

MAPEO ASOCIATIVO Y LOCALIZACIÓN DE MARCADORES MOLECULARES LIGADOS A LA RESISTENCIA A LA ROYA MARRÓN DE LA CAÑA DE AZÚCAR

Peña Malavera, A.N., Costilla D., Noguera, A.S., Castagnaro A.P, Ostengo S. y Racedo J.
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. *andreapema@eeaoc.org.ar.

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

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. *Bru*2 (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 diagnósticos 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 utilizaban 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 obtenidos fueron filtrados y depurados excluyendo los SNP monomórficos.

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 la progresión 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, *xβ* 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 elevados 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.

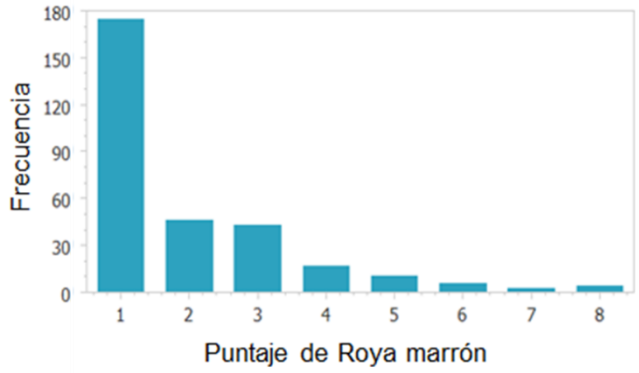


Figura 1. Distribución de frecuencias de la severidad a roya marrón, que varía de 1 a 9 en los 305 genotipos de caña de azúcar.

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).

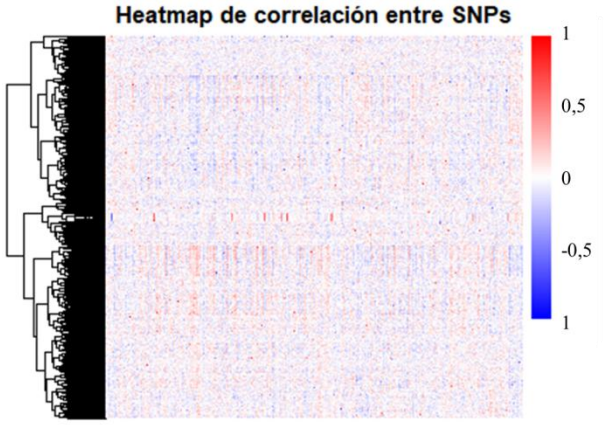


Figura 2. Mapa de calor de 9.251 SNP utilizados para el mapeo asociativo.

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).

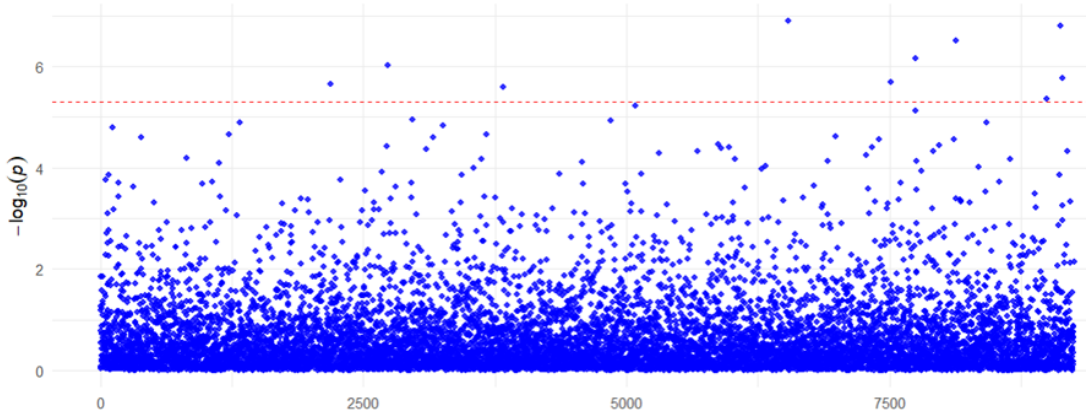


Figura 3. Gráfico Manhattan del modelo K de GWAS que muestra la significancia de cada SNP (escala logarítmica) en la resistencia a la roya marrón de caña de azúcar. La línea roja indica el umbral a nivel de todo el genoma de $-log_{10}(5 \times 10^{-6}) \geq 5{,}30103$. El puntaje se presenta en el eje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

Citas bibliográficas

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.

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.

PRESENTACIONES

ÁREA INDUSTRIAL

SOCIEDAD ARGENTINA
DE TÉCNICOS DE LA
CAÑA DE AZÚCAR

SATCA
desde 1982

EXTRACTO DE LÚPULO COMO ALTERNATIVA NATURAL PARA EL CONTROL DE BACTERIAS ÁCIDO LÁCTICAS RESISTENTES EN FERMENTACIONES DE BIOETANOL

Castagnaro[1], A.; Canseco[1], M. A; Vera[2], L.; Ruíz[1], R. M.; Welin[2], B.

[1]EEAOC, Sección Química - Lab. Microbiología; [2]ITANOA (EEAOC–CONICET), Tucumán, Argentina

anacastagnaro@eeaoc.org.ar

Apoyo financiero: Aporte no reembolsable, en el marco del "Programa Nacional Biodesarrollo Argentino", lanzado por la SECRETARÍA DE AGRICULTURA, GANADERÍA Y PESCA (SAGYP) del MINISTERIO DE ECONOMÍA. Año 2023.

Palabras clave: Fitocompuestos - contaminación bacteriana - fermentación alcohólica - resistencia a antibióticos - melaza

INTRODUCCIÓN

En la producción industrial de bioetanol, la contaminación bacteriana es uno de los principales factores que comprometen el rendimiento de fermentación. Las bacterias del ácido láctico (BALs) presentes en los fermentadores, no solo compiten con la levadura *Saccharomyces cerevisiae* por el sustrato, sino que también segregan metabolitos tóxicos, como el ácido láctico, capaces de suprimir su actividad fermentativa (Walker & Basso, 2020). En Tucumán, para su control, se emplean principalmente antibióticos como penicilina, cuyo uso inadecuado ha favorecido el desarrollo de resistencia bacteriana. Además de este problema, factores como la toxicidad, el costo y las restricciones regulatorias limitan el uso extendido de antibióticos en procesos industriales.

En este contexto, se ha intensificado la búsqueda de alternativas naturales para el control bacteriano. Las plantas sintetizan una gran diversidad de compuestos bioactivos cuyo potencial ofrece alternativas prometedoras. Entre ellas, *Humulus lupulus* L. destaca por sintetizar fitocompuestos con reconocido efecto inhibitorio sobre bacterias Gram positivas (Rodino *et al*., 2014). En los últimos años, surgieron enfoques que proponen una coacción positiva entre fitocompuestos y antibióticos: un fenómeno en el cual los componentes bioactivos del lúpulo podrían favorecer la permeación de antibióticos a través de la membrana bacteriana, aumentando su eficacia y permitiendo el uso de dosis menores (Cheesman *et al*., 2017).

Si bien esta hipótesis no fue evaluada directamente en el presente trabajo, constituye un marco conceptual relevante para explorar nuevas estrategias de control bacteriano en fermentaciones industriales. Considerando su acción selectiva y su bajo impacto ambiental, los compuestos del lúpulo podrían representar candidatos interesantes dentro de futuras estrategias combinacionales.

OBJETIVO

Desarrollar y caracterizar un extracto de lúpulo para el control de BALs resistentes a penicilina en fermentaciones destinadas a la producción de bioetanol, y evaluar su efectividad.

MATERIALES Y MÉTODOS

Preparación de extractos y cuantificación de compuestos fenólicos totales (CFT): Se elaboraron extractos hidroalcohólicos de lúpulo cv. Cascade, con 40, 60 y 80 % de etanol (v/v), mediante maceración asistida con ultrasonido. La CFT se realizó por espectrofotometría utilizando el reactivo de Folin-Ciocalteu.

Determinación de actividad antibacteriana de los extractos: Se llevó a cabo mediante ensayo de difusión en agar, partiendo de extractos liofilizados hasta peso seco (PS), frente a 3 BALs resistentes a penicilina: M-PC1-2 y L-C2-413B correspondientes a cepas de *Lactiplantibacillus* y K-C3-234, *Enterococcus*.

Estudios de concentración inhibitoria mínima (CIM): se efectuó combinando métodos de microdilución en medio líquido, con estudios de cinéticas de crecimiento. Se realizaron sobre el extracto seleccionado por presentar mayor actividad antibacteriana.

Ensayos de fermentación a escala laboratorio: se realizaron utilizando como sustrato melaza diluida al 20% de azúcares reductores totales (% ART), pasteurizada. Se trabajó con una masa final de fermentación de 90g. Cada sistema de fermentación fue inoculado con 30g de "pie de cuba" con una concentración de 15% levaduras (v/v). A partir de ese diseño base, se armaron los distintos tratamientos: tratamiento control; tratamiento contaminado con adición de pool bacteriano; contaminado y tratado con extracto a base de lúpulo propio; contaminado y tratado con penicilina; contaminado y tratado con extracto de lúpulo comercial. Las fermentaciones se llevaron a cabo a 30°C, durante 9h, sin ajustar el pH. Se cuantificó carga bacteriana mediante recuento en placa, al inicio y al final de la fermentación, y ácido láctico utilizando un Test enzimático.

RESULTADOS

La Figura 1 muestra el efecto inhibitorio de las formulaciones de extracto etanólico de lúpulo (EELU) con solución hidroalcohólica de 40, 60 y 80% v/v, CL3c40, CL3c60 y CL3c80 respectivamente, sobre las cepas bacterianas aisladas, correspondientes a una concentración sembrada de 50 mg de PS/mL. El extracto al 60% de etanol mostró la mayor actividad antibacteriana, con halos de inhibición significativamente mayores (19,6 ± 0,7 mm), asociada a su mayor contenido de compuestos fenólicos (59,2 mg EAG/g), en comparación con las formulaciones al 40% y 80%, CFT de 29,9 y 53,3 mg EAG/g pellet, respectivamente.

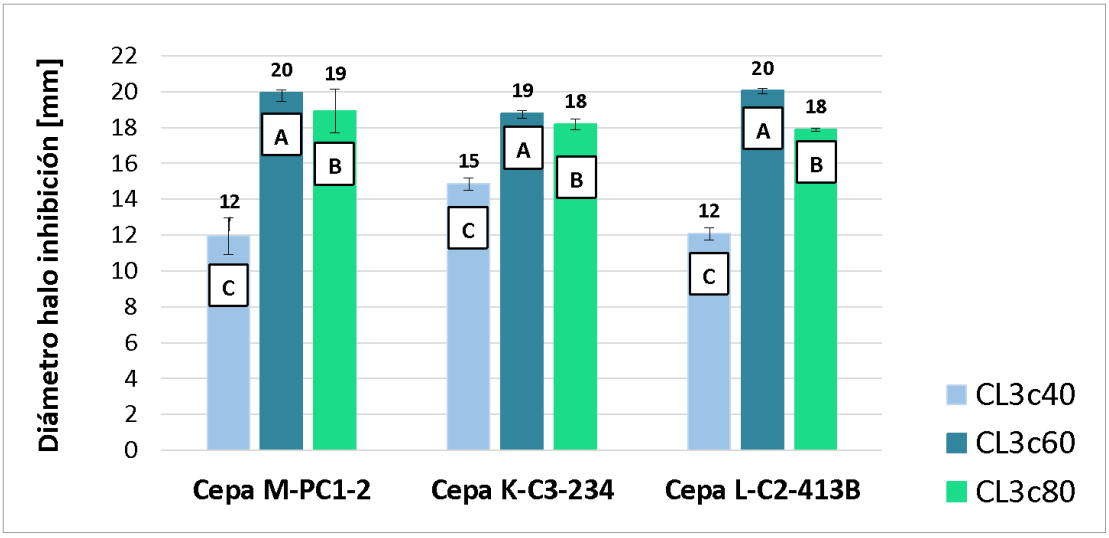


Figura 1. Efecto inhibitorio del extracto de lúpulo.

En función de los resultados obtenidos, se seleccionó para los ensayos posteriores el extracto etanólico de lúpulo preparado con una solución hidroalcohólica al 60%, dado que presentó la mayor actividad inhibitoria frente a BALs resistentes a penicilina. En lo sucesivo, este extracto será referido como $EELU_{60}$.

Para la evaluación de la capacidad inhibitoria in vitro se empleó un método basado en el cultivo de los aislados sometidos a concentraciones crecientes del $EELU_{60}$.

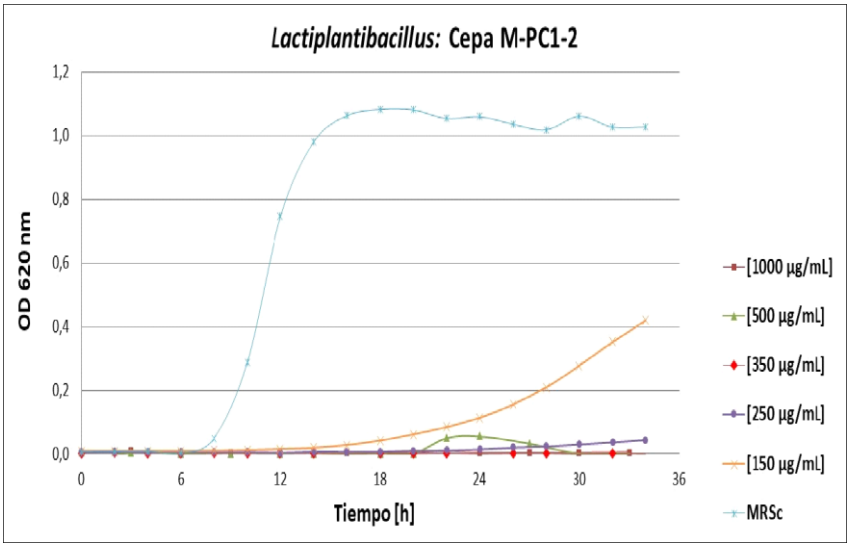
En todos los casos el $EELU_{60}$ presentó actividad bacteriostática y no bactericida, dentro de las concentraciones estudiadas, permitiendo que las tres cepas crezcan en agar MRS con incubación a 30°C, una vez que fueron retiradas del medio que contenía extracto.

Estos ensayos mostraron valores de CIM que variaron entre 150 y 350 µg/mL, dependiendo de la cepa. La cepa K-C3-234 fue muy sensible (inhibición completa a 150 ppm)

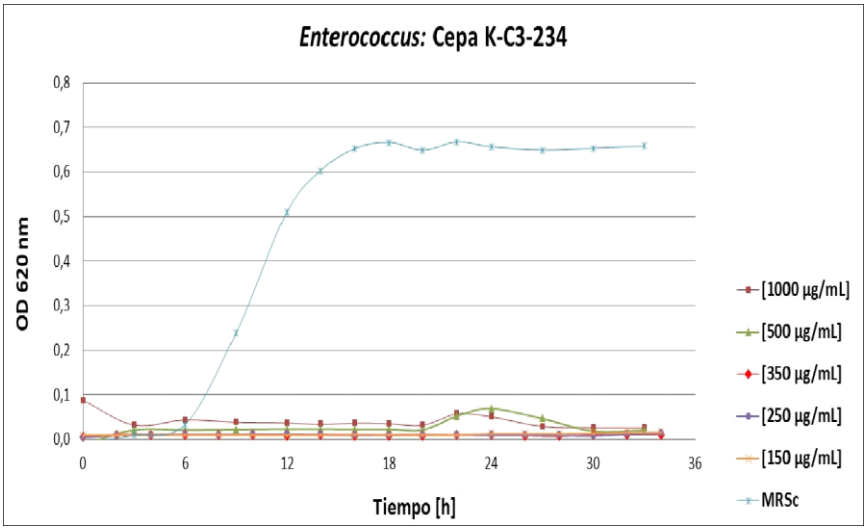
(Figura 2 B.), la M-PC1-2 tuvo una CIM entre 150 y 250 ppm (Figura 2 A.), y la L-C2-413B fue la más resistente (> 80% de inhibición a 350 ppm) (Figura 2 C.).

Un valor de CIM de 350 µg/mL, encontrado para la cepa L-C2-413B, confirma que se trata de una cepa altamente resistente, lo cual es una característica común en bacterias aisladas de procesos con recirculación de levaduras.

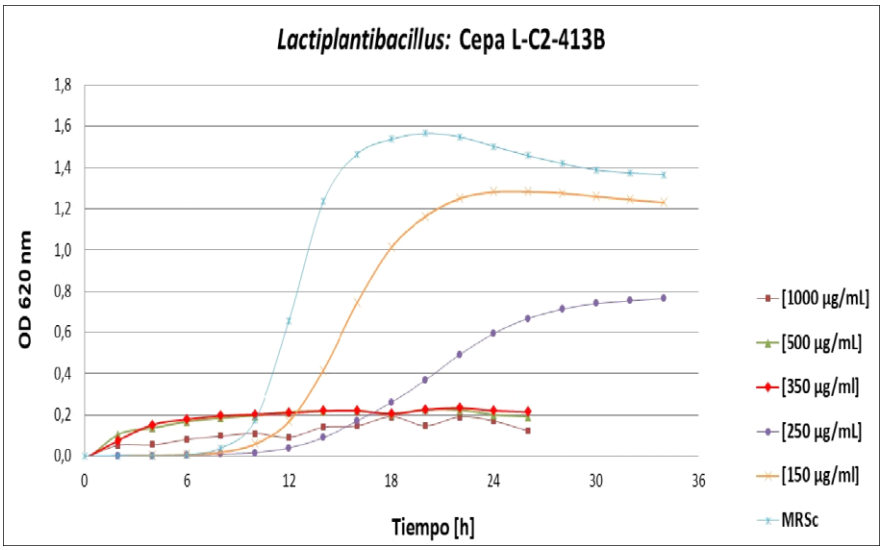
Para poder avanzar en el estudio de aplicación del extracto formulado, se consideró como requisito imprescindible que el mismo no tuviera acción negativa frente al crecimiento de la levadura *Saccharomyces cerevisiae*. En contraste con el comportamiento cinético observado en los aislados bacterianos, no se observó inhibición sobre *S. cerevisiae* en medio YPD a 30°C, lo que pone en evidencia la selectividad del extracto (Figura 3).



A.



B.



C.

Figura 2 A, B y C. CIM del $EELU_{60}$ mediante evaluación del crecimiento bacteriano en MRS a 30ºC.

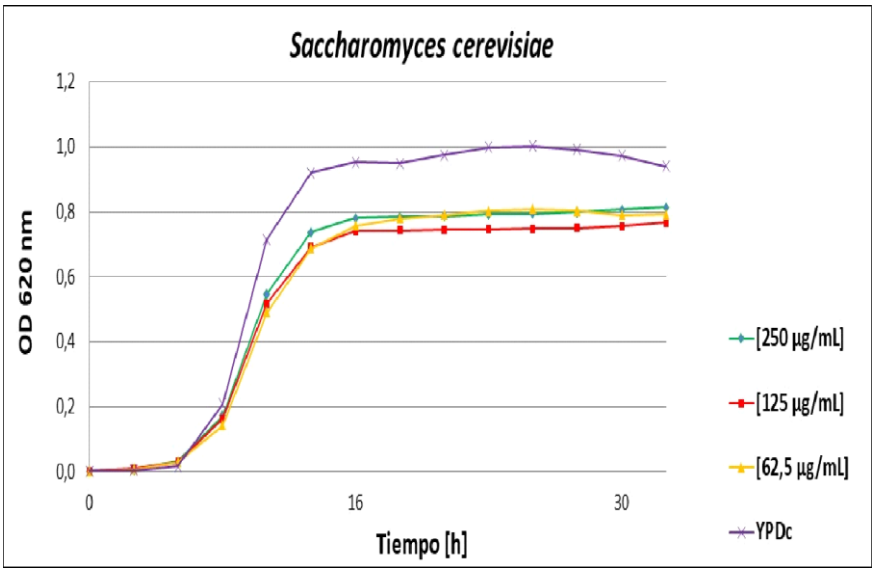


Figura 3. Evaluación del crecimiento de la levadura *S. cerevisiae* en YPD (*Yeast extract Peptone Dextrose*) a 30°C, sometida a concentraciones crecientes del $EELU_{60}$.

Finalmente, con el propósito de estudiar la efectividad del extracto formulado en relación al control de infecciones causadas por bacterias lácticas, en el proceso de fermentación para producción de bioetanol, se llevaron a cabo ensayos de fermentación en lotes. Para ello, se trató de imitar a escala laboratorio las condiciones reales de un sistema industrial con un inóculo mixto de tres cepas resistentes a penicilina, en un orden de 7,5 Log UFC/mL. La Figura 4 presenta los recuentos de levaduras y bacterias al inicio y al final de la fermentación, para las cinco condiciones evaluadas, a saber: Fermentación Testigo (sin contaminar); Fermentación Contaminada (con cultivo mixto de aislados bacterianos resistentes); Fermentación Contaminada y tratada con 350 ppm del $EELU_{60}$ (T1); Fermentación Contaminada y tratada con 5ppm de penicilina (T2); Fermentación Contaminada y tratada con 20ppm de Extracto de lúpulo Comercial (T3).

El tratamiento con $EELU_{60}$ (T1) redujo la carga bacteriana de 7,4 Log UFC/mL a 5,5 Log UFC/mL, manteniéndola por debajo del límite aceptable (< 6 Log UFC/mL) en sistemas industriales. Con la penicilina (T2) no se presentaron diferencias estadísticas significativas respecto a la fermentación contaminada sin tratamiento, lo que indica la alta resistencia de las cepas aisladas del proceso continuo Melle Boinot. El extracto comercial (T3) provocó una caída en la concentración bacteriana inicial (efecto inmediato) y logró una reducción final de 4 unidades logarítmicas (a 2,0 Log UFC/mL).

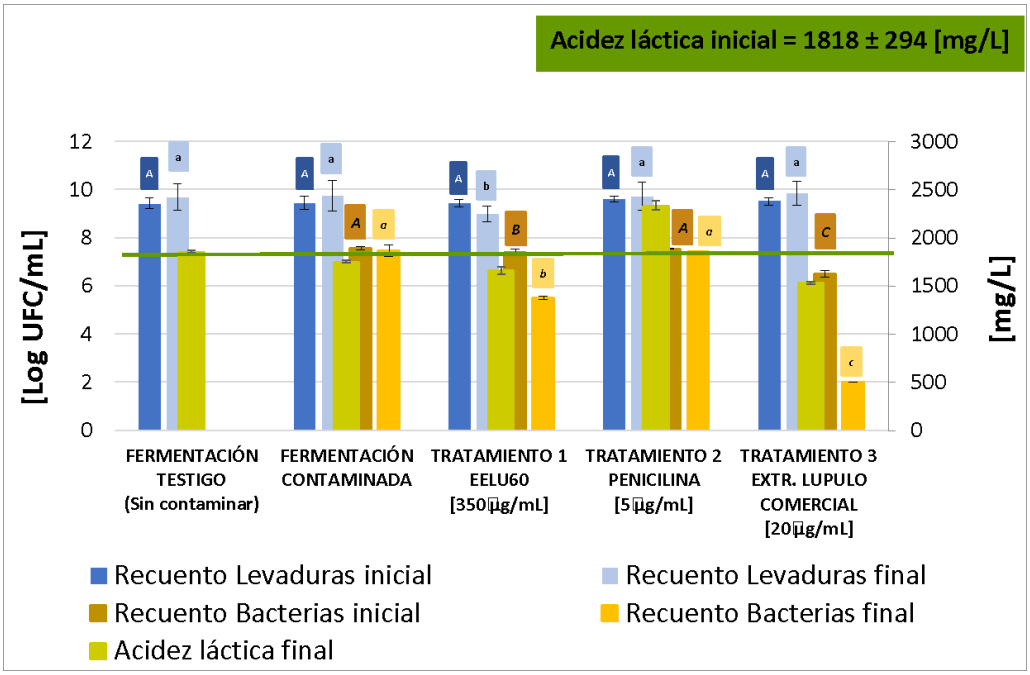


Figura 4. Comparación del efecto de diferentes tratamientos en el control de la contaminación bacteriana y en el control de la producción de ácido láctico.

En relación a la producción de ácido láctico, las fermentaciones tratadas con el $EELU_{60}$ y con extracto comercial de lúpulo, presentaron comportamientos similares (acidez final de 1383 ± 208 y 1312 ± 193 mg/L, respectivamente). Cuando se aplicó penicilina, la concentración de ácido láctico creció a 2225 ± 209 mg/L, similar a la concentración alcanzada por las fermentaciones contaminadas sin tratamiento (2279 ± 182 mg/L).

CONCLUSIONES

El tratamiento con extracto $EELU_{60}$ logró una reducción significativa de la carga bacteriana y de la producción de ácido láctico en fermentaciones a escala laboratorio contaminadas con cepas de BALs resistentes a penicilina, sin afectar el crecimiento de *Saccharomyces cerevisiae.* Esto sugiere un importante potencial del $EELU_{60}$ como antibacteriano de origen natural, en la producción industrial de etanol.

Los resultados obtenidos indican que el $EELU_{60}$ podría incorporarse en protocolos de fermentación a escala piloto, para seguir evaluando su desempeño en escenarios de contaminación recurrente.

Si bien este estudio se centró en la caracterización de la actividad del extracto y su efecto en fermentaciones contaminadas, el enfoque sobre la coacción positiva entre compuestos de lúpulo y antibióticos abre nuevas líneas de investigación no abordadas aquí y que podrían fortalecer futuras aplicaciones.

Avanzar en estas líneas permitiría aprovechar mejor el potencial de estos extractos y optimizar estrategias de control bacteriano en fermentaciones industriales de bioetanol.

BIBLIOGRAFIA

Rodino, S.; Butu, A.; Negoescu, C.; Petrache, P.; Condei, R.; Nicolae, I. & Cornea, C. P. (2014). Antimicrobial activity of Humulus lupulus extract. Journal of Biotechnology, 185, S66. https://doi.org/10.1016/j.jbiotec.2014.07.222

Walker, G. M. & Basso, T. O. (2020). Mitigating stress in industrial yeasts. Fungal Biology, 124(5), 387-397. https://doi.org/10.1016/j.funbio.2019.10.010

Cheesman, M.; Ilanko, A.; Blonk, B. & Cock, I. (2017). Developing new antimicrobial therapies: Are synergistic combinations of plant extracts/compounds with conventional antibiotics the solution? Pharmacognosy Reviews, 11(22), 57-72. https://doi.org/10.4103/phrev.phrev_21_17

COMPORTAMIENTO DE LAS PRINCIPALES VARIABLES ECONÓMICAS DEL SECTOR AZUCARERO ARGENTINO EN EL PERÍODO 2001-2024

Fossati G.; Franck F y Tonatto J.

Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC)–Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Instituto de Tecnología Agroindustrial del Noroeste Argentino (ITANOA), William Cross 3150, C.P. T4101XAC, Las Talitas, Tucumán, R. Argentina. gfossati@eeaoc.org.ar

Palabras Clave: azúcar, Argentina, comercio exterior, precios, volatilidad.

INTRODUCCIÓN

El sector azucarero representa una de las principales actividades económicas del noroeste de la Argentina. La interacción entre producción, consumo interno, comercio exterior y su consecuente impacto en precios determina la sostenibilidad económica de la actividad. Este trabajo analiza la evolución de las principales variables vinculadas a la formación del ingreso en el período 2001-2024, proporcionando una visión general de su impacto en el desempeño del sector en el siglo XXI.

OBJETIVO: Analizar el comportamiento de las principales variables económicas formadoras del ingreso del sector azucarero argentino durante el período 2001-2024: evolución de la superficie cultivada, producción de azúcar y alcohol, consumo, comercio exterior de azúcar y la volatilidad de precios internacionales y domésticos.

MATERIALES Y MÉTODOS

El estudio empleó análisis de series de tiempo (2001-2024). Se emplearon datos estadísticos oficiales, sin tener en cuenta posibles diferencias de cálculos estadísticos en distintos periodos. Los datos de producción de azúcar físico se obtuvieron del Centro Azucarero Argentino expresadas en toneladas métricas valor crudo (TMVC); las exportaciones e importaciones del INDEC en TMVC; la producción de bioetanol se obtuvo de la Secretaría de Energía de la Nación, expresada en m^3; los precios nacionales desde CACTU y los internacionales desde Asocaña ajustados a dólares constantes.

El consumo interno de azúcar se estimó tomando una variable proxy del consumo medio anual del azúcar mediante la Ec. 1, despreciando la variación de Stock en el tiempo (ΔStock), lo que permite analizar la tendencia desde un punto de vista cualitativo

$$\text{Consumo} = \text{Producción} + \text{Importación} - \text{Exportación} + \Delta\text{Stock}. \qquad \text{Ec 1.}$$

Los precios internacionales corresponden al Contrato N°5 de Londres, mientras que los precios domésticos al precio "vagón ingenio". Todos los valores nominales se convirtieron a valores reales de diciembre 2024. El análisis de volatilidad utilizó desviación estándar.

En el desarrollo no se tuvieron en cuenta variables vinculadas a la productividad agrícola e industrial.

RESULTADOS

Producción de azúcar, contexto nacional e internacional

Para contextualizar el entorno internacional del periodo bajo estudio, el PBI per cápita de la economía mundial creció un 68%, lo que nos da una tasa de crecimiento anual promedio del 2,24% anual. En lo que respecta a la producción mundial de azúcar en TMVC creció aproximadamente un 43% lo que implica una tasa anual promedio del 1,5%. Esto puede deberse probablemente a la baja elasticidad ingreso que caracteriza a los alimentos y/o a la tendencia de un menor consumo de azúcar en términos per cápita en los países más desarrollados.

En lo concerniente a la producción local de azúcar en el periodo 2001-2024 (Figura 1) ésta creció un 31%, lo que da una tasa anual de crecimiento del 1,1% similar a la tasa de crecimiento del PBI per cápita de Argentina en el mismo periodo. La producción de azúcar registró un crecimiento exponencial hasta 2007, cuando alcanzó un récord histórico,

incremento que se explica principalmente por el contexto nacional e internacional favorable de precios, sin considerar otras variables asociadas a mejoras en la productividad como aumentos de rendimientos culturales y fabriles. A partir del año 2009 empezó un ligero descenso en la producción hasta el año 2020. Desde el año 2021 al 2023 el descenso en la producción fue casi exponencial alcanzando ese año un valor de producción similar a la del año 2001.

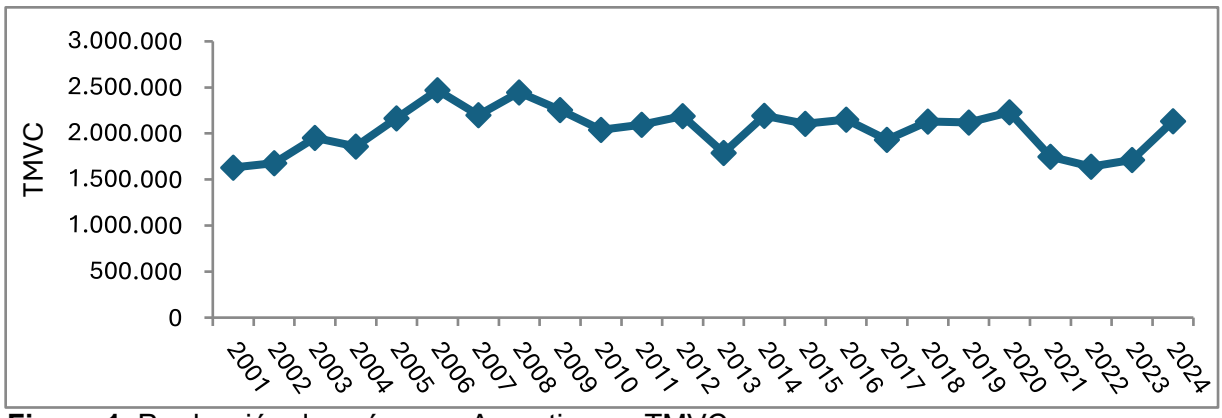


Figura 1. Producción de azúcar en Argentina en TMVC.

Elaboración propia en base a datos del Centro azucarero argentino

Consumo de azúcar en Argentina

La Figura 2 presenta la evolución de consumo interno obtenido mediante Ec. 1 despreciando ΔStock. Puede apreciarse una tendencia creciente hasta el año 2008, acompañando la recuperación de la economía Argentina. A partir del año 2008 empieza una fluctuación importante en el consumo estimado, con una tendencia decreciente que encuentra un piso en el año 2022. Esto, sumado a las características de los alimentos de tener una baja elasticidad ingreso, indica un comportamiento similar al de los países más desarrollados que tiende a disminuir el consumo de azúcar per cápita. La línea de tendencia indica que en promedio el consumo del azúcar se mantuvo prácticamente constante, sin embargo, si se compara con el aumento de la población Argentina (27% en el periodo bajo estudio) esto implica una disminución significativa del consumo de azúcar en términos per cápita.

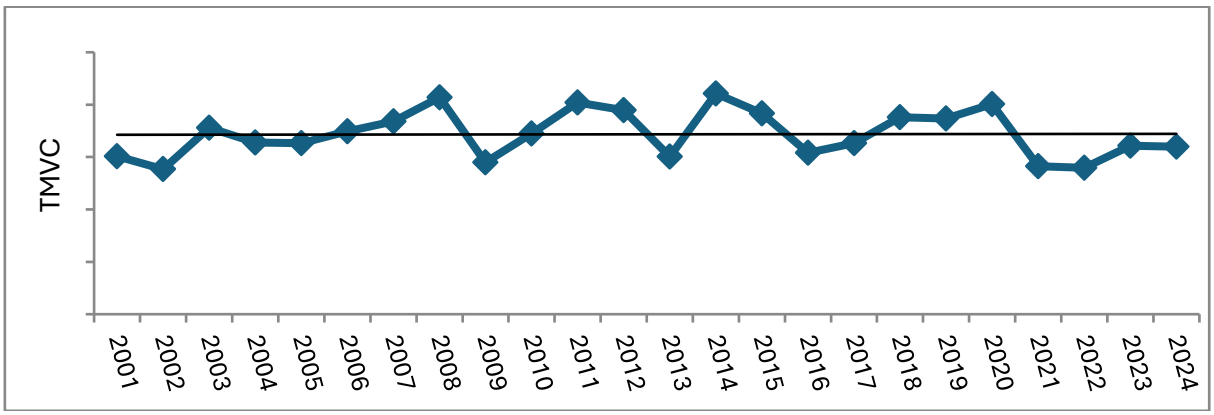


Figura 2. Consumo proxy de azúcar en la Argentina.

Elaboración propia en base a datos del Centro azucarero argentino e INDEC

Interacción bioetanol, superficie de caña, producción azucarera

En la Figura 3 podemos apreciar cómo a pesar de que la superficie de caña tuvo una tendencia en aumento, la producción de azúcar se mantuvo relativamente estable. Esto es consecuencia de la implementación a partir de año 2009 del corte de bioetanol en naftas (Ley 26.093). Esta ley posibilitó la expansión de la superficie cultivada de caña de azúcar, la cual fue absorbida

mediante la producción de bioetanol lo que evito una mayor oferta de azúcar. Sin el programa de biocombustibles la oferta de azúcar se hubiera visto incrementada en un promedio de al menos un 15% anual, que surge de convertir el bioetanol en azúcar equivalente, con la consecuente caída de su precio y el correspondiente impacto negativo en los ingresos del sector azucarero.

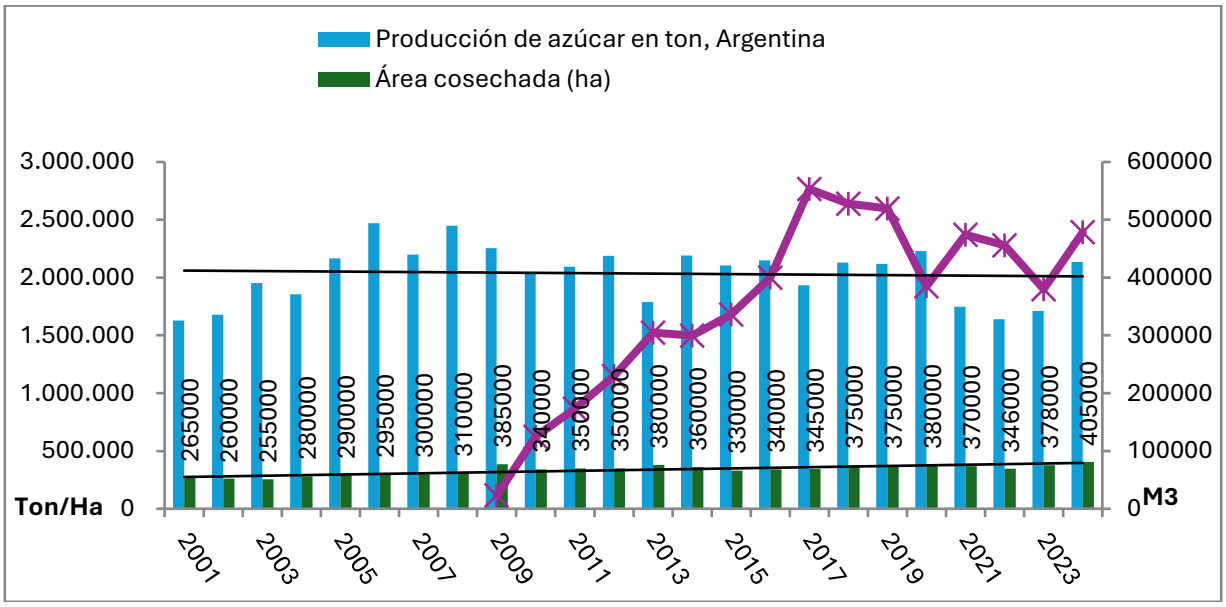


Figura 3. Argentina, producción de azúcar (t), superficie plantada con caña de azúcar (ha) y producción de bioetanol (m^3).

Elaboración propia en base a datos del Centro azucarero argentino y USDA

Comercio internacional del azúcar

El mercado doméstico de azúcar en la mayoría de los países del mundo está fuertemente protegido a través de diferentes instrumentos de intervención económica (aranceles fijos y variables, cuotas, etc.) que generalmente dan lugar a precios internos mayores a los que rigen en el mercado mundial. Argentina no está exenta de estas regulaciones e impone básicamente un arancel del 20% a las importaciones del Mercosur.

Exportaciones

La Figura 4 muestra las exportaciones del periodo estudiado. Puede observarse que tuvieron un crecimiento exponencial hasta el año 2009 donde alcanzaron un record de 808.000 TMVC representando el 36% de lo producido en ese año. Esto fue acompañado por precios internacionales altos y un tipo de cambio real todavía competitivo. Por el contrario tan solo 5 años después, las exportaciones encontraron su piso con escasas 85.000 TMVC lo que representa el 10% del record alcanzado en el 2009, lo que implica una varianza muy importante en el volumen exportado. Las exportaciones argentinas entre su máximo y el mínimo variaron un 850% cuando entre los principales exportadores de azúcar la variación porcentual es de un máximo un 200% en el mismo periodo analizado.

No tener una política de comercio internacional de largo plazo clara y estable hace que las exportaciones tengan gran varianza lo que influye en el Stock de azúcar del país y consecuentemente en el precio del mercado interno.

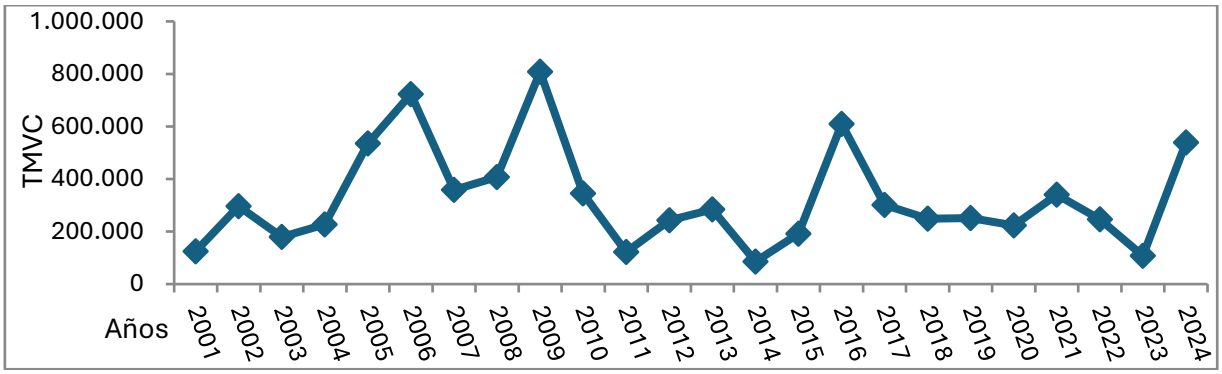


Figura 4. Exportaciones argentinas de azúcar, expresadas en TMVC, periodo 2001-2024.
Fuente: elaborado con datos del INDEC y estimaciones propias

Si se tiene en cuenta los promedios de producción, consumo e importaciones, el piso de exportaciones anuales que aseguran minimizar Stock de azúcar interno y en consecuencia mayor precio en el mercado interno, sería de alrededor de 350 mil TMVC, para ello es importante sostener relaciones de largo plazo con los clientes extranjeros. Para ello sería conveniente bajar los costos relacionados a la exportación como los de logística, comisiones financieras de exportación, aduanas, incertidumbre cambiaria, etc. variables que afectan en especial a la industria azucarera por su lejanía a los principales puertos de Argentina. Llegando a representar en la actualidad estos costos un 25% del precio internacional.

Importaciones

Normalmente las importaciones son marginales (Figura 5) y solamente tienen una reacción mayor cuando aumenta el precio del mercado interno, lejos de lo que fueron los valores de importación en los años 90. En los últimos 4 años las importaciones rondaron las 5 mil toneladas anuales con valores CIF de 6,7 millones de dólares anuales, siendo el principal abastecedor en el año 2024 Brasil con 2,5 millones de dólares y 2.385 TMVC.

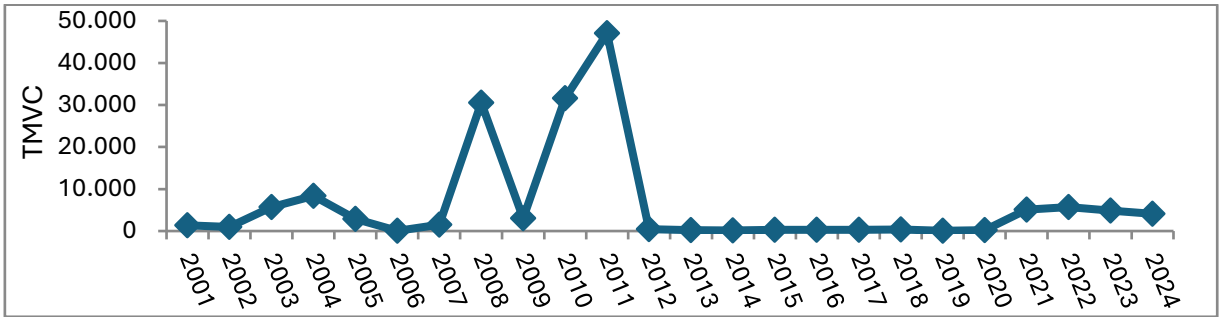


Figura 5. Importaciones argentinas de azúcar expresadas en TMVC
Fuente: Elaborado con datos del INDEC

Precio internacional y doméstico del azúcar

En el presente análisis se llevaron los valores nominales históricos del contrato 5 (Londres) a valores reales de diciembre de 2024. Por más que los niveles inflacionarios sean sensiblemente menores en EEUU que en la Argentina, la inflación lo mismo existe - para tener una idea 1 dólar del año 2000 equivale a 1,84 del año 2024 - no actualizarlos generaría la falsa creencia de que los precios internacionales aumentaron de manera continua.

En la Figura 6 se puede apreciar que los precios doméstico e internacional del azúcar comparten básicamente el mismo comportamiento. El precio internacional del azúcar tuvo un promedio de U$S477, mientras que el doméstico se encuentra en U$S 469 dólares, es decir que en promedio el precio de Londres fue solamente un 2% superior al precio doméstico. Esto indica que en promedio se cumple la ley de precio único, es decir que el comercio internacional tiende a igualar los precios internacionales de los bienes entre países a pesar de las restricciones arancelarias que tiene el azúcar en Argentina para el azúcar importada de Brasil, por ejemplo.

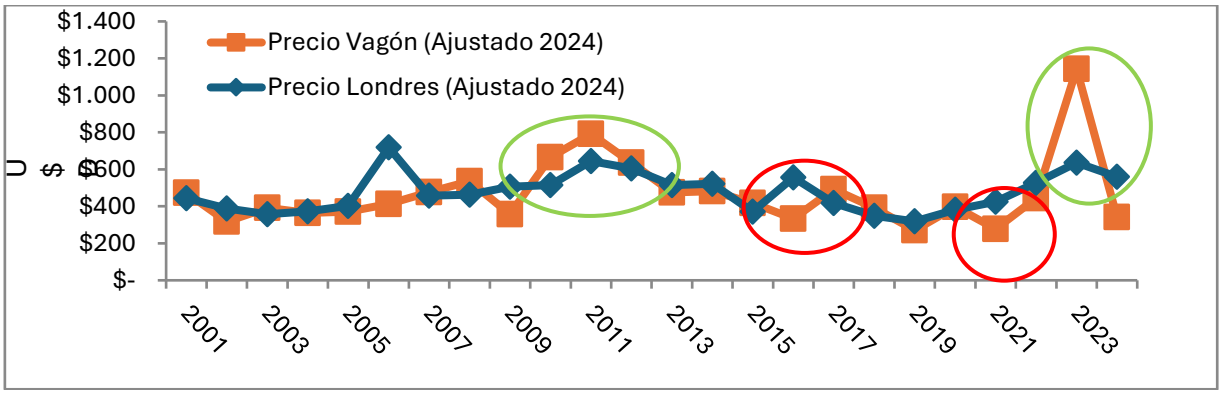


Figura 6. Precios internacionales del azúcar y del precio mercado interno (vagón ingenio).
Fuente: elaboración con datos de CACTU y Asocaña

En lo que respecta a los precios internacionales estos encontraron su máximo en el año 2006 con U$S 718 y el precio tuvo un periodo de precios máximos entre el año 2010 al 2014 con un promedio de U$S560. En ese mismo periodo el precio domestico del azúcar se encontró varios años por encima del internacional gracias a la combinación de volúmenes exportados adecuados y la entrada en vigencia del programa bioetanol en Argentina que actúa disminuyendo Stock de azúcar del mercado doméstico. El precio tanto del mercado internacional como del doméstico se maneja principalmente por el Stock disponible de azúcar, si hay mucho Stock el precio baja y si hay poco el precio tiende a subir.

El precio máximo del azúcar a nivel doméstico se encontró en el año 2023 con U$S 1.143 es decir un 63% superior al máximo del precio internacional registrado en el 2006.

En lo que concierne a los precios mínimos, tanto el internacional como el doméstico ocurrieron en el año 2019, con U$S318/t y U$S 270/t respectivamente.

Como se mencionó anteriormente los precios locales e internacionales en la mayoría de los años son muy similares, pero cuando hay diferencias estas tienden a amplificarse sustancialmente en el mercado doméstico, lo que se puede apreciar en las respectivas desviaciones estándar, en el precio internacional es de U$S 105 mientras que la desviación estándar del precio doméstico es de U$S 189. Es decir que la desviación estándar del precio local es un 78% superior a la del precio internacional, este valor es un indicador de la volatilidad del precio doméstico (Tabla 1).

Tabla 1. Resumen de estadísticos de los precios internacionales y domésticos de Argentina.

Estadístico	Precio Londres	Precio vagón ingenio	Vagón ingenio vs Londres
Promedio	$ 477	$ 469	-2%
Máximo	$ 718	$ 1.143	59%
Mínimo	$ 319	$ 270	-15%
Desviación estándar	$ 106	$ 189	79%

Elaboración propia en base a datos de CACTU y Asocaña

Analizando la serie de 24 años encontramos que en 8 años el precio local es igual o muy cercano al internacional, en 8 años el local es superior al internacional y en 8 años es inferior al internacional. Se podría decir que en promedio el precio local es cada tres años un año superior, uno igual y otro inferior al internacional.

CONCLUSIONES

La producción de azúcar en Argentina en el periodo 2001-2024 creció a una tasa promedio anual del 1,1% (alternando años de crecimiento exponencial y años con caídas), valor inferior a la producción mundial que creció a una tasa anual del 1,5%.

El programa de bioetanol posibilitó la expansión de la superficie cultivada de caña de azúcar. De no ser por el programa de biocombustibles, la oferta de azúcar se hubiera visto

aumentada en promedio al menos en un 15% anual, con el consecuente impacto negativo en los ingresos del sector azucarero.

Los precios del mercado interno se caracterizan por tener fuertes fluctuaciones, muy superiores a las del precio internacional. Es fundamental tener una política de comercio exterior que anualmente asegure exportaciones de por lo menos 350 mil TMVC para morigerar las fuertes fluctuaciones en el precio del mercado interno.

BIBLIOGRAFÍA

Centro Azucarero Argentino. 2024. Estadísticas de producción, molienda y comercio exterior. Recuperado de [URL del Centro Azucarero Argentino].

INDEC. 2024. Cuentas Nacionales y Comercio Exterior. Instituto Nacional de Estadística y Censos de la República Argentina. Recuperado de https://www.indec.gob.ar/.

Lustig, N. 2018. Commodity Prices: A Review. Annual Review of Resource Economics.

Mundlak, Y. 2000. Agriculture and Economic Growth: Theory and Measurement. Harvard University Press.

USDA. 2024. Sugar: World Markets and Trade. Foreign Agricultural Service. Recuperado de https://www.fas.usda.gov/.

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LAS CENIZAS DE VINAZA COMO ADITIVO PROMOTOR DE LAS REACCIONES DE PIRÓLISIS Y GASIFICACIÓN DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR

Golato, M. A.[1]; Kamiya, N. I.[2]; Avila, A. M.[3]

[1]Facultad de Ciencias Exactas y Tecnología (FACET), Universidad Nacional de Tucumán (UNT). mgolato@herrera.unt.edu.ar. [2] normakamiya@gmail.com. [3]INQUINOA, Universidad Nacional de Tucumán, CONICET, DIPyGI-FACET-UNT. aavila@herrera.unt.edu.ar

Palabras clave: Biocombustibles, biomasa, valorización de residuos, promotor térmico.

INTRODUCCIÓN

La búsqueda de alternativas energéticas sustentables ha impulsado el estudio de procesos como la gasificación de biomasa residual. La presencia de metales alcalinos (K, Na, Ca y Mg) es fundamental para reducir la formación de alquitranes y mejorar la reactividad del char (Acevedo *et al.*, 2019). Estudios previos indicaron que la fortificación de biomasa con óxidos puros mejora la liberación de volátiles (Golato *et al.*, 2024). En este contexto, la vinaza calcinada (CzVz) surge como un aditivo estratégico para integrar este residuo industrial como promotor de las reacciones termoquímicas de las biomasas combustibles de la industria azucarera.

OBJETIVOS

Analizar el mecanismo de degradación térmica del bagazo de la caña de azúcar fortificado con CzVz mediante un análisis termogravimétrico (TGA). Validar el impacto de la adición de CzVz y de la velocidad de calentamiento en la distribución de productos utilizando un reactor de pirolisis de biomasa de escala banco.

MATERIALES Y MÉTODOS

A partir de antecedentes previos (Golato *et al.,* 2025), se realizó un nuevo análisis térmico TGA, donde se evaluaron las curvas de pérdida de masa (TG) y sus derivadas (ΔTG), pero bajo diferentes condiciones atmosféricas. Se prepararon muestras de 1,5g de bagazo de caña de azúcar original (Bzo 100%) y muestras de bagazo fortificado con 15% p/p de CzVz (Bzo+15% CzVz), manteniendo la misma masa de biomasa como referencia. Para ello, se utilizó un equipo marca LECO, modelo TGA701, perteneciente a la EEAOC. Esta experiencia se realizó inicialmente solo bajo atmósfera inerte (N_2) entre 25 a 900 °C, con rampa de calentamiento de 5 °C/mín. Posteriormente, se realizó la experiencia bajo una secuencia programada de dos tipos de atmósferas, inicialmente inerte (N_2), con flujo de 5 lpm a 2,4 bar de presión para las etapas de deshidratación (entre 25 a 105 °C) y volatilización (entre 105 a 550 °C); seguida de la operación de calcinación (550 a 900 °C), realizada en atmósfera oxidante (O_2 al 99,5%) con igual flujo, presión y rampa de calentamiento.

Por otro lado, se evaluó experimentalmente la reacción de pirolisis del bagazo en un reactor de lecho fijo de 4 litros de capacidad de escala banco, también perteneciente a la EEAOC. En esta experiencia se utilizó bagazo fortificado con 30% p/p de CzVz. Se llevaron a cabo 9 ensayos utilizando 160 g de muestra de bagazo original (Bzo 100%) y 5 ensayos utilizando la misma cantidad de biomasa más el agregado de CzVz (Bzo+30% CvVz). Se analizó el efecto de la rampa térmica de calentamiento del reactor (5; 6,4 y 10 °C/min) sobre el rendimiento de los productos (gas, bio-oil y char).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Análisis de mecanismo térmico (TG / ΔTG)

La Figura 1 corresponde a los perfiles TG encontrados, se observó que para Bzo 100% sin aditivos, trabajando en atmósfera de N_2, la masa de volátiles fue de 1,03 g, equivalente al 69% de la masa original (1,5 g), con una tasa de degradación de $-0{,}3.10^{-3}$ g/°C entre 700° y 900°C, con una masa residual de 21% (0,31 g). Con la adición de 15% p/p CzVz en bagazo, la masa de volátiles se elevó hasta 1,15 g para igual atmósfera, lo que representa un aumento del 12% aproximadamente. La muestra con CzVz obtuvo una tasa de degradación de $-0{,}5.10^{-3}$ g/°C, extendiendo su actividad térmica hasta ~ 950 °C, logrando una masa residual final del 25% (0,43 g). Este incremento sugiere que la vinaza deshidratada actúa como un promotor eficaz de la volatilización, desplazando la reacción hacia la fase gaseosa.

La Figura 2A (atmósfera inerte, N_2) muestra que la descomposición de la hemicelulosa en el bagazo puro ocurre en dos etapas (entre 220–300 °C), mientras que con el agregado de CzVz se unifica en un solo evento. En la pirólisis de la celulosa (320–400 °C), el aditivo ejerció un efecto moderador, registrando un pico de intensidad levemente menor (0,219 g) al del bagazo puro (0,234 g), sugiriendo una carbonización inicial controlada. Entre 400 y 500 °C, la vinaza promueve el craqueo de los vapores condensables derivados de la lignina hacia gases incondensables, mecanismo clave para minimizar los alquitranes.

La Figura 2B (atmósfera oxidante, N_2/O_2) evidencia el efecto promotor sobre el char, entre 400 a 500°C se observa cómo la CzVz modifica la reactividad del mismo, facilitando el ataque del oxígeno sobre las estructuras carbonosas complejas antes de la zona de máxima descomposición. Si bien la vinaza desplazó la temperatura de máxima reactividad de 588 °C a 607 °C (indicando mayor estabilidad inicial), la gasificación se intensificó notablemente, alcanzando un pico de 0,183 g superior al de la biomasa pura (0,168 g). Este fenómeno se encuentra en concordancia con lo observado por Mészáros *et al.* (2004) para biomasas similares. Adicionalmente, durante la conversión oxidativa se observó que la adición de vinaza calcinada ensancha la ventana operativa del proceso. Mientras que el bagazo puro concentra su degradación entre 422 °C y 711 °C (un rango de ~289 °C), la mezcla fortificada extiende su actividad desde los 416 °C hasta los 728 °C (un rango de ~312 °C). Este comportamiento indica que la vinaza no solo anticipa el inicio de la oxidación, sino que sostiene la reacción química hasta temperaturas más altas. Respecto al balance de masa final, los residuos sólidos confirman la formación de estructuras estables: en atmósfera inerte (N_2), la mezcla Bzo+15%CzVz dejó un remanente de 0,438 g, significativamente mayor al obtenido bajo atmósfera oxidante (N_2/O_2), donde el residuo descendió a 0,263 g (superando los 0,083 g del bagazo puro). Esta diferencia evidencia que, si bien la oxidación consume gran parte del material carbonoso, la carga inorgánica de la vinaza promueve la formación de cenizas y complejos estables que persisten al final del proceso.

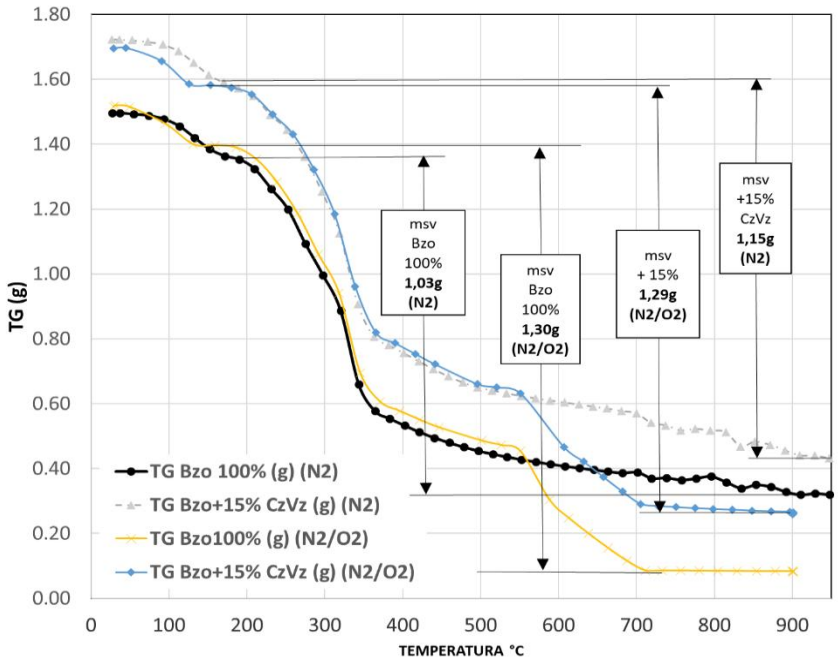


Figura 1. Comparación de las pérdidas de masa TG para bagazo y mezclas bagazo/CzVz,

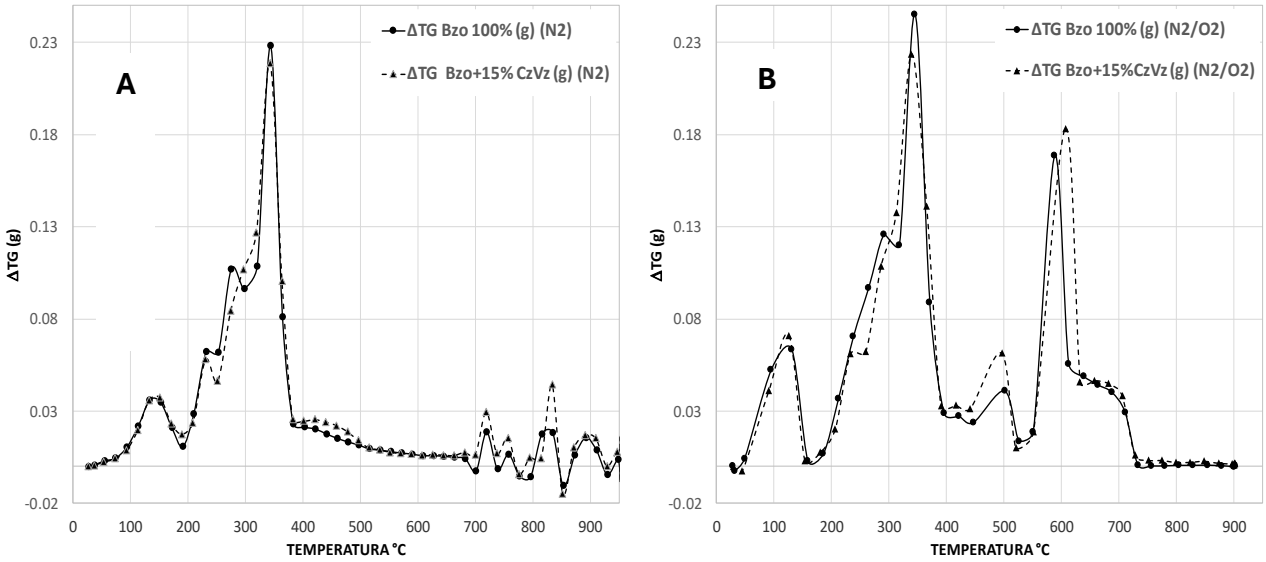


Figura 2. Comparación de ΔTG (variación de masa) en función de la temperatura para bagazo y mezclas bagazo+15% CzVz, trabajando en atmósferas de N_2 (Figura 2A) y N_2/O_2 (Figura 2B).

trabajando en atmósferas de N_2 y N_2/O_2.

Resultados de pirolisis en reactor banco

Los resultados experimentales presentados en la Figura 3 detallan cómo la interacción entre la rampa térmica y el aditivo modifica la selectividad de los productos. En el escenario base con Bagazo 100% a 5 °C/min, se observa un rendimiento de gas del 30,5%. Al aumentar

ligeramente la velocidad de calentamiento (6,4 °C/min) sin aditivo, la biomasa tiende a maximizar la fase líquida (50,0% de Bio-oil), reduciendo la producción de gas al 19,9%. Esto sugiere que, por sí solo, el bagazo favorece la despolimerización hacia volátiles condensables cuando dispone de mayor energía térmica. Por el contrario, la mezcla Bzo+30% CzVz altera radicalmente esta ruta de reacción. Al mantener la rampa en 5 °C/min, la vinaza actúa como un estabilizador de la fase sólida, reduciendo el gas al 24,1% y elevando el residuo carbonoso (Char) al 48,3%. Sin embargo, al aumentar la velocidad a 10 °C/min, se disparó el rendimiento de gas al 43,9% y limitando el bio-oil al 26,1%. Este comportamiento sugiere que la mezcla Bzo+30% CzVz funciona bajo un mecanismo termodependiente, o sea se requiere una rampa de 10 °C/min para activar el craqueo secundario de los alquitranes y transformarlos en gases. El aumento de gases observado sugiere además un efecto promotor en la formación de volátiles a través de la adición de minerales de la vinaza (K, Na, Ca y Mg), mecanismo de optimización y eliminación de alquitranes documentado por Jie Ren *et al.* (2020).

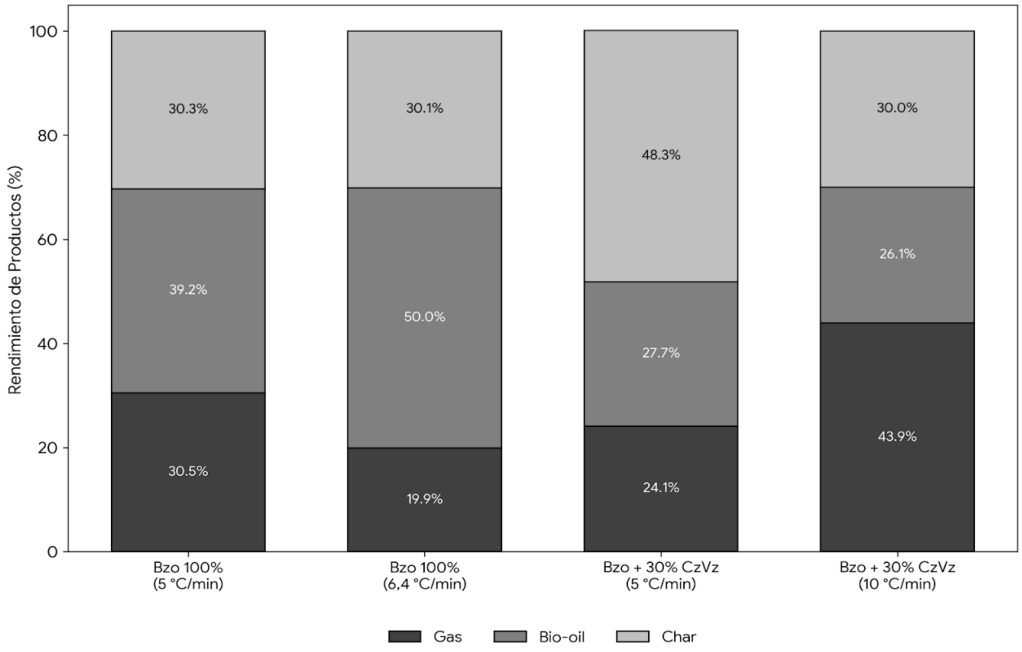


Figura 3. Variación de los productos de la pirolisis de Bzo 100% y Bzo+30% CzVz en función de la rampa de calentamiento.

CONCLUSIONES

Las curvas de TG demostraron que la adición de cenizas de vinaza (CzVz) incrementa la masa de volátiles en un 12%, eleva la masa residual del 21% al 25% en atmósfera inerte de nitrógeno y extiende la degradación hasta los 950 °C. El perfil diferencial entre 400 y 500 °C confirmó el craqueo de volátiles pesados hacia gases incondensables, validando la minimización de alquitranes. Bajo atmósfera oxidante, la presencia de metales alcalinos promueve la interacción temprana del oxígeno con el char, acelerando la descomposición aromática y ensanchando el rango térmico en 23 °C (312 °C vs. 289 °C). En escala banco, los resultados obtenidos indicarían que el bagazo puro tiende a maximizar la producción de bio-oil (50%) para una rampa baja (5 °C/min). La mezcla Bzo+30% CzVz a 10 °C/min, invirtió esta selectividad, logrando un incremento relativo del rendimiento gaseoso del 44% (43,9% vs. 30,5%). La utilización de CzVz como promotor térmico permitiría, por un lado, incrementar la gasificación del bagazo, produciendo un gas combustible más limpio que puede ser integrado directamente en calderas de vapor o en motogeneradores con sistemas de limpieza del gas más reducidos, aumentando la eficiencia de cogeneración de la planta. Por otro lado, ofrece una vía tecnológica para la valorización, reuso o reciclado de la vinaza dentro de la

planta sucroalcoholera, mitigando la problemática ambiental asociada a la gestión y almacenamiento de este efluente líquido.

BIBLIOGRAFÍA

Acevedo, J. C.; Arenas, E.; Zapata, Z.; Posso, F. R. (2019). La importancia de los catalizadores en la gasificación de biomasa: Una revisión de la literatura. Desarrollo e innovación en ingeniería. 4: 153-171.

Golato, M. A.; Kamiya, N.; Avila, A. M. (2024). Influencia de óxidos alcalinos en los componentes volátiles de bagazo y RAC de caña de azúcar de Tucumán, Argentina. XXIII Reunión Nacional de Técnicos de Caña de Azúcar.

Golato, M. A.; Kamiya, N.; Ruíz, M.; Avila, A. M. (2025). Adding alkaline metal oxides to boost the gasification reactions of sugarcane bagasse. XXXII ISSCT Congress, Cali, Colombia.

Jie Ren; Yi-Ling Liu; Xiao-Yan Zhao; Jing-Pei Cao. (2020). Biomass thermochemical conversion: A review on tar elimination from biomass catalytic gasification. Journal of the Energy Institute. 93 (3): 1083-1098.

Mészáros, E.; Jakab, E.; Várhegyi, G. (2004). Comparative study of the thermal behavior of wood and bark of young shoots of willow. Journal of Analytical and Applied Pyrolysis. 72 (2): 173-185.

SIMULACIÓN DINÁMICA AVANZADA DE CALDERAS DE VAPOR BAGACERAS DE ALTA PRESIÓN

Golato M.A. y D.J. Aguirre Grazio

GESA ENGINEERING GROUP, Tucumán, Argentina. mgolato@gesaengineeringgroup.com

INTRODUCCIÓN

La industria sucroalcoholera Argentina ha evolucionado hacia la cogeneración en alta presión para maximizar su eficiencia termodinámica (Golato *et al.,* 2008), aunque enfrenta desafíos operativos debido a la variabilidad del bagazo y a la demanda de vapor. Si bien existen modelos estacionarios (Frank Colombres *et al.,* 2011), la simulación de la dinámica transitoria del domo resulta indispensable para la seguridad y el control avanzado (Åström y Bell, 2000), siendo crítico el manejo del fenómeno de "falso nivel" para evitar ineficiencias o paradas de emergencia.

OBJETIVO

Validar un modelo de simulación dinámica de una caldera bagacera de alta presión, analizando la respuesta transitoria del domo para determinar la factibilidad de reducir el exceso de aire y cuantificar el ahorro de combustible.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se utilizó el software Steamly (2026) basado en el estándar IAPWS-IF97, para simular la operación de una caldera de vapor bagacera, marca Mellor Goodwind, modelo VU40, de la industria azucarera de Tucumán, Argentina. La misma produce 110 t/h de vapor a una presión de 45,7 bar y 421 °C de temperatura, según Cruz *et al.,* 2013. El modelo resuelve el acoplamiento entre la cinética de combustión y la termodinámica de cambio de fase por medio de las siguientes estrategias computacionales:

- Fundamento Térmico: Por medio de la implementación del método ε - NTU (Efectividad - Número de Unidades de Transferencia), propuesto por Kays y London (1964), para modelar la transferencia de calor en los bancos de tubos (evaporadores, sobrecalentador, economizador y precalentador de aire). Además, consideró el parámetro UA (conductancia térmica global) para equilibrar la capacidad de recuperación energética de cada equipo según los datos de planta.
- Dinámica del Domo: Se aplicó el modelo no lineal de Åström-Bell (2000) para simular el comportamiento del nivel ante transitorios, considerando la distribución de fases y la generación de falso nivel por variaciones súbitas de la demanda de vapor.
- Estrategia de control de nivel: Se configuró un lazo de control PID de tres elementos (nivel, flujo de vapor y flujo de agua) con sintonía fina: Kp (ganancia proporcional) = 90, Ki (ganancia integral) = 30 y Kd (ganancia derivativa) = 10, para estabilizar la cantidad de masa de agua en el interior del domo (5619 kg).

Para cuantificar el ahorro de bagazo se estableció un cálculo de las pérdidas por calor sensible en gases de chimenea ($q_{sensible}$) en función del flujo másico y la temperatura de salida, para luego determinar el ahorro porcentual de combustible al comparar dos escenarios: caso base con factor de dilución (λ) de 1,43 y un caso optimizado con 1,30.

En este estudio se configuró el simulador con un poder calorífico superior (PCS) de 17.584 kJ/kg (base seca) y un poder calorífico inferior (PCI) de 6.374 kJ/kg (base húmeda), para un bagazo con 52,94% de humedad, conforme a los ensayos de laboratorio informados por Cruz *et al.,* 2013.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La Tabla 1 muestra los resultados de la comparación de las principales variables críticas de operación de la caldera Mellor Goodwin VU40 y los correspondientes resultados de la simulación con el software Steamly (2026). Se observa que los valores obtenidos en el simulador presentan una alta correlación con el comportamiento operativo de la unidad VU40 descriptos por Cruz *et al.,* 2013, con desviaciones relativas inferiores al 1,1% en todas las variables críticas.

Tabla 1. Validación del desempeño estacionario de la caldera Mellor Goodwin VU40 (Cruz *et al.,* 2013), respecto al simulador Steamly (2026).

Variable de Proceso	Unidad	Cruz et al., 2013	Steamly	Desviación (%)	UA (kJ/s·°C)
Producción de vapor	kg/h	110	110	0,00	—
Presión de operación	bar	45,7	45,7	0,00	—
Temp. Vapor sobrecalentado	°C	440,0	442,5	+0,57	50,0
Temp. salida de gases	°C	125,4	124,8	-0,48	18,0
Temp. aire caliente	°C	228,9	226,5	-1,05	58,0
Eficiencia térmica	%	77,0	77,8	+1,04	—

La Figura 1 muestra la respuesta dinámica del nivel del domo ante un escalón de carga (simulado como una caída de presión sostenida), comparando la operación en alta presión (45,7 bar) con un escenario de baja presión (20,0 bar). La figura evidencia una marcada disparidad en la respuesta dinámica: a 45,7 bar, el pico de falso nivel se limita al 49,7% (~50 mm), manteniéndose dentro de la capacidad de regulación del sistema. En contraste, a 20 bar, el pico escala hasta un valor crítico del 170,5%, desbordando el rango instrumental (+100 mm) y detonando paradas de emergencia. Este comportamiento confirma que la menor diferencia de volúmenes específicos (v_g - v_f) a mayor presión actúa como un amortiguador natural de las perturbaciones.

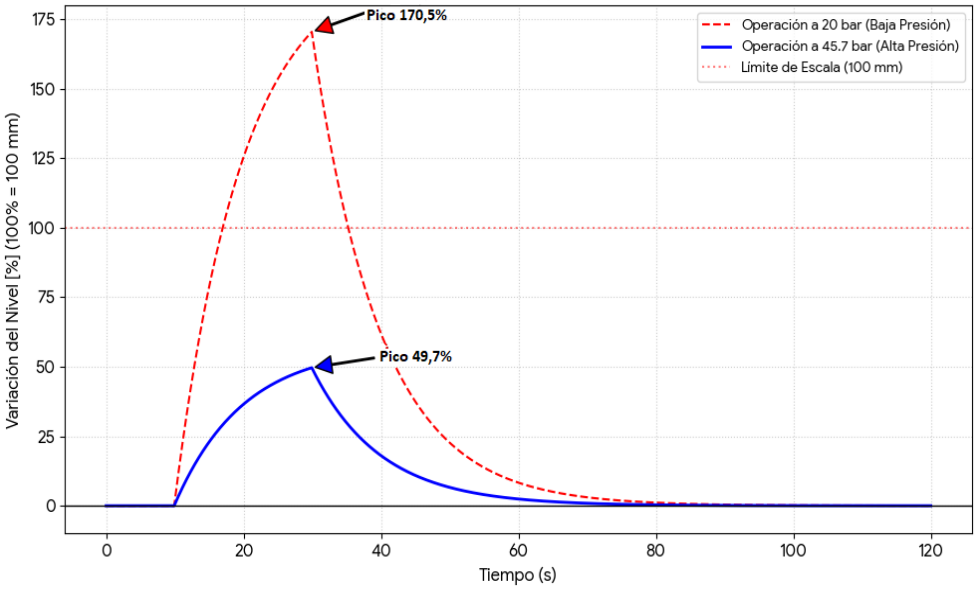


Figura 1. Comparación de la dinámica del falso nivel en calderas de alta y baja presión, ante un escalón de carga (caída de presión), obtenida mediante el simulador Steamly (2026).

La Figura 2 vincula el exceso de aire con las pérdidas por calor sensible ($\%P_{Sensible}$). Se observa que reducir el factor de dilución de 1,43 a 1,30, disminuye las pérdidas en 0,6 puntos (una reducción relativa del 8,3% respecto al PCS del bagazo). Esta optimización es viable gracias a la estabilidad dinámica en alta presión, que minimiza el falso nivel y permite al sistema de control de tres elementos operar con mayor precisión y menor exceso de aire, evitando así el desperdicio de energía en calentar aire inerte.

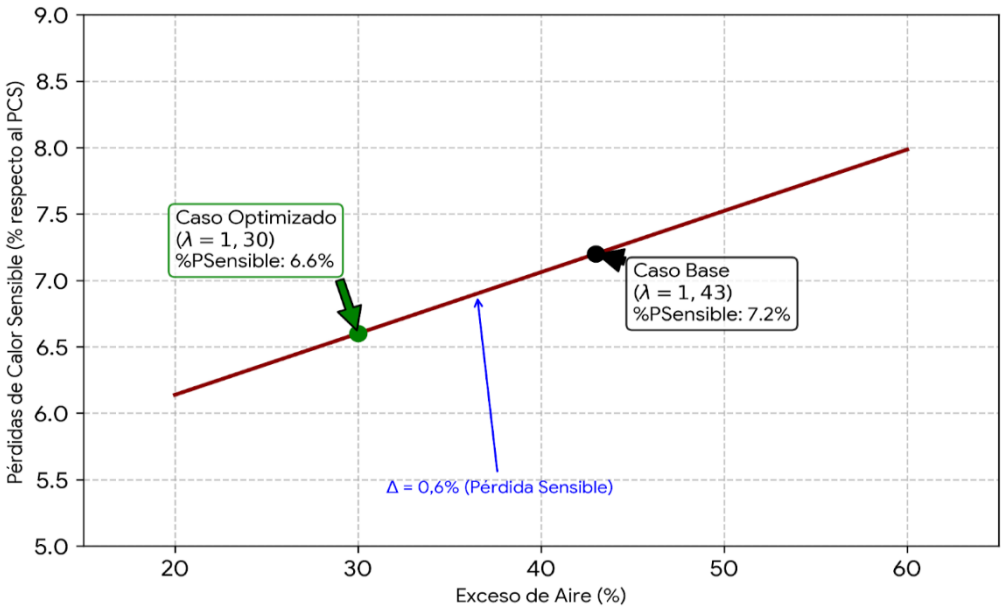


Figura 2. Relación entre el exceso de aire y las pérdidas por calor sensible en los gases de combustión, obtenida mediante el simulador Steamly (2026).

La Tabla 2 muestra los resultados que evidencia que la reducción del factor de dilución, disminuye significativamente las pérdidas de calor sensible. Al reducir la masa de gases de

escape, la eficiencia térmica se incrementa del 77,8% al 81,0%, lo que se traduce en un ahorro neto de bagazo de 2.392 kg/h (4,0%) manteniendo la misma producción de vapor.

Tabla 2. Efecto de la reducción del factor de dilución de 1,43 a 1,30 en la operación de la caldera de vapor Mellor Goodwind VU40.

Parámetro operativo	**Unidad**	**Escenario Base (λ=1,43)**	**Escenario Optimizado (λ=1,30)**	**Impacto**
Exceso de Aire	%	43,0	30,0	Reducción del 13%
Temp. Salida Gases	°C	124,8	121,5	Reducción del 2,6%
Eficiencia Calculada	%	77,8	81,0	Aumento del 4,1%
$\%P_{Sensible}$	%	7,2	6,6	Reducción del 8,3%
Consumo de Bagazo	kg/h	59.778	57.386	-2.392 kg/h

CONCLUSIONES

El método de validación confirma la fiabilidad del simulador, registrando desviaciones inferiores al 1,1% respecto a los datos industriales de referencia (Cruz *et al.,* 2013). El análisis dinámico demostró que la presión de 45,7 bar aporta una estabilidad intrínseca, limitando el falso nivel al 49,7% (frente a un 170,5% simulado en baja presión). Esta robustez hidrodinámica, entendida como la capacidad del sistema para amortiguar las fluctuaciones del nivel de agua frente a perturbaciones bruscas de carga, permite una sintonía precisa del control PID y habilita la reducción segura del exceso de aire del 43% al 30%. Esta optimización disminuye las pérdidas por gases en un 8,3%, logrando un ahorro potencial de bagazo del 4,0% y validando a Steamly como una herramienta eficaz para la mejora operativa y energética.

BIBLIOGRAFÍA

Åström, K. J. y R. D. Bell. 2000. Drum-boiler dynamics. Automatica, 36 (3), 363-378.

Cruz, M. C.; F. J. Franck Colombres; M. A. Golato; W. D. Morales y D. Paz. 2013. Mejora en la eficiencia de calderas bagaceras de alta presión en la Argentina, mediante secado de bagazo. Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán, 90 (2), 7-16.

Franck Colombres, F. J.; M. A. Golato; W. D. Morales; C. Cruz y D. Paz. 2011. Rendimiento térmico de calderas bagaceras modernas en Tucumán, R. Argentina. Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán, 88 (2): 41-49.

Golato, M. A.; F. J. Franck Colombres; G. Aso; C. A. Correa y D. Paz. 2008. Metodología de cálculo de la eficiencia térmica de generadores de vapor. Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán, 85 (2), 17-31.

Kays, W. M. y A. L. London. 1964. Compact Heat Exchangers (2nd ed.). McGraw-Hill.

Steamly (2026). Steam Boiler Simulator. Documentación técnica. Disponible en: https://www.gesaengineeringgroup.com/downloads/Steamly_Steam_Boiler_Simulator.pdf

ESTUDIO DEL DESEMPEÑO TÉRMICO DE INTERCAMBIADORES DE CALOR PARA EL ENFRIAMIENTO DE VINAZA EN UN INGENIO DE TUCUMÁN.

Gómez F. N.; Cruz M. C. y Franck Colombres F.

Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC). C.P. 4101- Las Talitas- Tucumán.

ccruz@eeaoc.org.ar

Palabras Clave: Coeficientes de transferencia de calor**,** calentadores, destilería, vinaza

INTRODUCCIÓN

La industria sucroalcoholera ocupa un papel central en la economía del Noroeste Argentino, especialmente en la provincia de Tucumán, que concentra casi el 60 % de la producción de bioetanol de la región. Sin embargo, junto con los beneficios productivos, este sector enfrenta el desafío del manejo adecuado de la vinaza, subproducto del proceso de destilación de alcohol.

La vinaza se caracteriza por su elevada temperatura de salida y su composición (Franck *et al.,* 2016; Medina *et al.,* 2024), lo que la convierte en una corriente con potencial para su aprovechamiento energético dentro del propio proceso industrial. El control térmico de la vinaza permitiría recuperar energía sensible que puede ser integrada a otras etapas del proceso de destilación, contribuyendo a una mejora en la eficiencia energética global del sistema. En este sentido, el enfriamiento de la vinaza no solo constituye una operación necesaria para su acondicionamiento posterior, sino también una oportunidad para optimizar el uso de la energía en ingenios azucareros y destilerías de bioetanol.

En la actualidad, los ingenios de la región continúan empleando principalmente sistemas convencionales de enfriamiento basados en intercambiadores de calor de tubos. Sin embargo, en los últimos años ha aumentado el interés por tecnologías alternativas más eficientes, como los intercambiadores de placas, que presentan ventajas en términos de eficiencia energética. La selección del tipo de intercambiador de calor exige un análisis detallado de su desempeño térmico y comportamiento en condiciones reales de operación en planta, considerando fenómenos propios del proceso, como el ensuciamiento del equipo. Esto podría representarse en parte mediante el coeficiente de transferencia de calor, cuyo valor para el manejo de esta sustancia difícilmente se encuentra en bibliografía.

OBJETIVO

Determinar los coeficientes de transferencia de calor en intercambiadores tubulares y de placa en condiciones reales de operación para el enfriamiento de vinaza de un ingenio de Tucumán.

Analizar el ahorro de agua de consumo mediante una configuración alternativa del sistema de enfriamiento.

MATERIALES Y MÉTODOS

1. Planta y sistema de enfriamiento de vinaza

Durante la zafra del año 2025 se realizaron 15 secuencias de mediciones a lo largo de un día, en una planta industrial de producción de bioetanol a partir de caña de azúcar perteneciente a un ingenio ubicado en la provincia de Tucumán. El sistema empleado para el enfriamiento de vinaza consta de dos etapas. En la primera, la vinaza proveniente de la columna de destilación es enfriada en seis intercambiadores de coraza y tubos utilizando vino como fluido frío (Figura 1). En la segunda etapa, el enfriamiento se lleva a cabo mediante un

intercambiador de placas, donde el fluido frío es agua de proceso (Figura 2). Las mediciones se realizaron durante la operación normal de la planta, bajo condiciones de régimen estacionario y sin modificaciones en las condiciones habituales de operación.

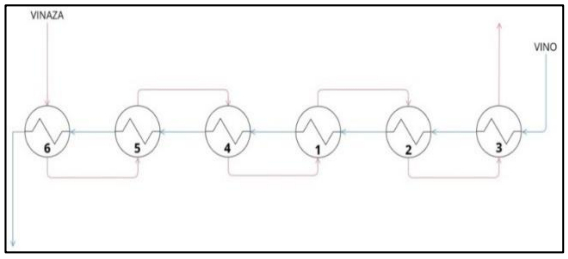


Fig. 1 Primera etapa de enfriamiento con intercambiadores de tubos

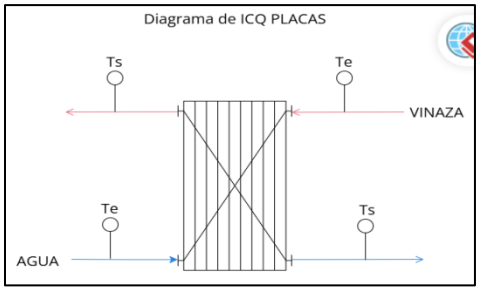


Fig. 2 Segunda etapa de enfriamiento con intercambiador de placas

2. Equipos de medición empleados

Las variables involucradas en el proceso de enfriamiento de vinaza en ambas etapas se midieron utilizando equipos no invasivos portátiles de la EEAOC. Para caudal, se usaron medidores de caudal por tiempo de tránsito, marca Flexim, modelo fluxus F60. Los valores medidos, con los equipos de la EEAOC, de caudal de vino y de agua de proceso se compararon con los valores registrados por caudalímetros en línea que posee la planta. Manteniendo la lectura durante el tiempo en que se realizaron las mediciones de temperatura. Para medición de temperatura, se usó pirómetro óptico, marca Raytek y cámara termográfica, marca TESTO 881-2. Ambos se calibraron ajustando el valor de la emisividad. Para medir el °Brix se analizaron muestras de vinaza para determinar la concentración de esta, usando un refractómetro digital portátil para jugos y melado (marca Milwaukee, modelo MA871) con límite máximo de medición de 85°Bx; realizando la medición por duplicado. Las mediciones se realizaron bajo condiciones de operación estacionarias, verificándose la estabilidad de los caudales y temperaturas durante cada ensayo.

3. Procedimiento de cálculo

El coeficiente global de transferencia de calor (U) se calculó a partir de balances de energía y la ecuación de diseño de intercambiadores de calor, obteniéndose la Ecuación 1:

$$U = \frac{q \cdot \rho \cdot cp \cdot (T_e - T_s)}{A \cdot \Delta T_{ml}} \qquad \text{Ec. 1}$$

Donde U el coeficiente global de transferencia de calor (kW/m²·°C), q es el caudal volumétrico (m^3/s), ρ es la densidad del fluido (kg/m^3), cp la capacidad calorífica específica del fluido (kJ/kg·°C), T_e la temperatura del fluido de entrada (°C). T_s la temperatura del fluido de salida (°C), A el área de intercambio (m²) y ΔTml la diferencia media logarítmica de temperatura (°C). Los valores de ρ y cp de la vinaza se estimaron a partir de correlaciones experimentales en función del °Brix (Rein, 2012) adoptando los valores 970 kg/m^3 y 0,88 kcal/kg°C correspondientemente.

4. Rendimiento térmico

Se calculó el rendimiento térmico (R) mediante la ecuación 2 y así se cuantificó el desempeño actual del equipo. Con este parámetro se puede evaluar el impacto del ensuciamiento sobre la transferencia de calor.

$$R = \frac{U}{U_{max}} \cdot 100 \qquad \text{Ec. 2}$$

Donde U es el coeficiente global de transferencia de calor experimental para el intercambiador de placas a un tiempo determinado de operación y U_{max} es el coeficiente global de transferencia de calor en condiciones limpias del intercambiador de placas a partir de los datos del ensayo de puesta en marcha del equipo, realizado luego de su instalación, cuando las superficies de intercambio se encontraban libres de ensuciamiento. Este coeficiente se

determinó con la ecuación 1 antes mencionada, empleando los caudales y temperaturas medidos durante ese ensayo inicial.

5. Propuesta de una configuración alternativa del sistema de intercambio térmico

Se evaluó el desempeño de una configuración alternativa al sistema de enfriamiento de vinaza actual, considerando intercambiadores de placas en la primera etapa y equipos de coraza y tubos en la segunda. El análisis se realizó manteniendo constantes los caudales de vinaza y la temperatura final requerida. La propuesta se evaluó comparando el área de intercambio térmico y el consumo de agua de refrigeración.

El análisis se desarrolló mediante balances de energía en estado estacionario para cada etapa. En la primera, se determinó la temperatura de salida de vinaza hacia la siguiente etapa. En la segunda, el área requerida se determinó mediante la ecuación 3.

$$A = \frac{\dot{m}_V \cdot cp \cdot (T_e - T_S)}{U \cdot \Delta T_{ml}} \quad \text{Ec. 3}$$

Donde A es el área de intercambio necesaria (m^2), m_V es el caudal másico de vinaza (kg/h), cp la capacidad calorífica específica de la vinaza (kcal/kg°C), T_e la temperatura del fluido de entrada (°C), T_s la temperatura del fluido de salida (°C), U el coeficiente global de transferencia de calor (kcal/h m²°C) y ΔTml la diferencia media logarítmica de temperatura (°C).

El área calculada se comparó con el área instalada disponible (seis intercambiadores de coraza y tubos de 20 m² cada uno); esta comparación permitió evaluar la factibilidad térmica de la configuración propuesta y, a partir del balance energético entre la vinaza y el agua de enfriamiento, estimar el caudal de agua de proceso requerido.

RESULTADOS y DISCUSIÓN

La tabla 1 muestra los valores promedio de los parámetros utilizados para determinar los coeficientes de transferencia.

Tabla 6. Cuadro resumen de los valores promedio de las variables medidas

Parámetro	Unidad	Valor promedio
Caudal de vinaza	m^3/h	75,9
Caudal de agua de proceso	m^3/h	143,1
°Brix vinaza	°Bx	8,0
Temperatura promedio entrada de vinaza 1° Etapa	°C	105,7
Temperatura promedio salida de vinaza 1° Etapa	°C	73,9
Temperatura promedio salida de vinaza 2° Etapa	°C	50,9
Temperatura promedio entrada de vino 1° Etapa	°C	58,5
Temperatura promedio salida de vino 1° Etapa	°C	79,7
Temperatura promedio entrada de agua 2° Etapa	°C	24,6
Temperatura promedio salida de agua 2° Etapa	°C	39,1

La tabla 2 presenta los coeficientes globales de transferencia de calor calculados a partir de las mediciones experimentales para los dos tipos de intercambiadores. Los valores se calcularon a partir de las temperaturas promedio medidas.

Tabla 7. Valores de los coeficientes de transferencia para equipos de enfriamiento de vinaza.

Intercambiador de calor	Tipo de equipos	Área de intercambio (m^2)	Temperatura de entrada Vinaza (°C)	Temperatura de salida Vinaza (°C)	∆Tml (°C)	U (kW/m²°C)
6	Tubos	20	105,7	99,8	25,3	**0,84**
5	Tubos	20	99,8	96,4	25,1	**0,49**
4	Tubos	20	96,4	91,2	25,1	**0,74**
1	Tubos	20	91,2	85,7	23,1	**0,85**
2	Tubos	20	85,7	80,5	20,7	**0,89**
3	Tubos	20	80,5	73,9	17,5	**1,37**
7	Placas	74	73,9	50,9	30,8	**1,02**

Los coeficientes para los intercambiadores de tubos y coraza se determinaron con un valor promedio de 0,86 kW/m²°C. Las diferencias observadas en los valores de los equipos pueden atribuirse a diferencias en las condiciones locales de operación, así como al grado de ensuciamiento acumulado en cada intercambiador. El intercambiador de placas presentó un valor de 1,02 kW/m²°C, aproximadamente un 18% superior al valor medio obtenido para los equipos de primera etapa, valor consistente con la bibliografía (Rein, 2012). El intercambiador de placas presentó valores de U, superiores a los obtenidos en **cinco de los seis** intercambiadores de tubos y coraza evaluados, lo que evidencia un mejor desempeño térmico bajo las condiciones analizadas.

No obstante, el coeficiente obtenido en planta resulta significativamente inferior al coeficiente máximo informado para el equipo en condiciones limpias (U_{max}), cuyo valor se estimó en **1,88 kW/m²·°C**. Resultando en un rendimiento térmico cercano al **54%**. Este valor puede asociarse principalmente al **ensuciamiento,** provocado por la elevada concentración de sólidos disueltos presentes en la vinaza, que incrementan la resistencia térmica total del sistema. Con respecto al estudio de una configuración alternativa del sistema, los resultados obtenidos se indican en la tabla 3.

Tabla 8. Resultados del estudio de la nueva configuración

Parámetro	Unidad	Valor
Temperatura entrada vinaza 2° Etapa	°C	70,4
Área requerida 2°etapa	m^2	56,6
Área disponible 2°etapa	m^2	120,0
Consumo de agua de nueva configuración	Tn/h	87,3
Ahorro de agua de proceso	-	39%

Se puede observar que la incorporación de un intercambiador de placas en la primera etapa permite una menor temperatura de entrada de la vinaza a la etapa siguiente. Como consecuencia de la menor carga térmica, el balance energético indica que el caudal de agua de proceso requerido en la segunda etapa podría reducirse, estimándose un ahorro de agua de enfriamiento del 39% respecto de la configuración actual. Asimismo, los cálculos de área de intercambio térmico muestran que el área necesaria para el enfriamiento de la vinaza es aproximadamente de 57 m^2. Siendo el área excedente de 63,4 m². No obstante, su aplicación debería complementarse con estudios de ensuciamiento y formación de incrustaciones en intercambiadores de placas operando en la primera etapa del proceso.

CONCLUSIONES

Los coeficientes globales de transferencia de calor determinados en condiciones reales de operación resultaron inferiores a los valores reportados para equipos en condiciones

limpias. Si bien los intercambiadores de placas presentan mayores coeficientes de transferencia, también muestran sensibilidad a la formación de incrustaciones lo que podría requerir tanto frecuencia de limpieza como controles más estricto de las condiciones de operación.

La selección del intercambiador de calor para el enfriamiento de vinaza no debe basarse únicamente en los valores de sus coeficientes de transferencia sino también en criterios operativos y de mantenimiento.

El análisis de una configuración alternativa del sistema de enfriamiento sugiere que la utilización de un intercambiador de placas en la primera etapa podría reducir la carga térmica de la etapa final y permitir una disminución del consumo de agua de proceso sin requerir un incremento del área de intercambio instalada en la segunda etapa.

BIBLIOGRAFÍA

Medina N.E.S.; Salazar R.A.; Quaia E. 2024. Comparación de dos alternativas para el tratamiento de vinazas generadas en la producción de alcohol de caña de azúcar. Rev.Ind. y agríc. de Tucumán, 101(2): 5-12.

Franck F. J.; Golato M. A.; Feijóo E.; Morales W.; Paz D.; Octaviano M. 2016. Combustión de vinaza con materiales celulósicos en calderas bagaceras de ingenios de la provincia de Tucumán (R. Argentina), 93(1):9-18.

Rein P. 2012.Ingeniería de la caña de azúcar, Bartens, Berlín.

CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA DE RESIDUO DE TABACO DE LA PROVINCIA DE TUCUMÁN PARA COMBUSTIBLE ALTERNATIVO EN CALDERAS BAGACERAS

Gutierrez, C.; Zamora Rueda, G.; Armella, G.; Cantos, B.; Zalazar, H. y Feijoo, E.

Laboratorio de Ensayos y Mediciones Industriales (LEMI). Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales. Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC). C.P. 4101- Las Talitas- Tucumán. www.eeaoc.org.ar - Tel. 0381-4521000 e-mail: cgutierrez@eeaoc.org.ar

Palabras clave: campaña tabaco, análisis inmediato, Burley.

INTRODUCCIÓN

La matriz energética argentina continúa dominada por los combustibles fósiles, que representan cerca del 83 % de la oferta total de energía primaria, lo que evidencia una fuerte dependencia del petróleo, el gas y el carbón mineral, en contraste con las metas de diversificación y descarbonización impulsadas a nivel nacional e internacional (Aneise *et al.*, 2024; Ministerio de Relaciones Exteriores, Comercio Internacional y Culto, 2024; Green Economy Tracker, 2025).

En provincias con fuerte base agroindustrial, como Tucumán, la biomasa cumple un rol central en la matriz energética, particularmente en la industria azucarera, pilar histórico de la economía provincial, que utiliza biomasa sólida para la generación de energía mediante calderas bagaceras, empleando principalmente bagazo de caña y, en períodos de interzafra o ante limitaciones de disponibilidad, combustibles complementarios como el RAC o chip de madera. En este marco, la diversificación de las fuentes de biomasa destinadas a estas calderas se presenta como una oportunidad estratégica para fortalecer la seguridad del suministro energético, reducir costos operativos y disminuir la presión sobre los recursos forestales, mediante el aprovechamiento de residuos agrícolas de otras cadenas productivas regionales, técnica y ambientalmente viables (INTA, 2021a; EEAOC, 2022, 2023; Secretaría de Energía de la Nación, 2024; FAO, 2025).

Dentro de este marco, el cultivo de tabaco genera una cantidad significativa de residuos lignocelulósicos, especialmente los tallos descartados luego de la cosecha, que pueden ser valorizados con fines energéticos. Estos tallos presentan características físicas y energéticas similares a las del bagazo de caña de azúcar y al chip de madera, lo que los convierte en una opción potencialmente viable para su utilización como combustible sólido en calderas bagaceras, ya sea como sustituto parcial o como complemento del RAC o del chip de madera actualmente utilizados. Su incorporación permitiría, además, articular dos cadenas agroindustriales relevantes de la provincia, mejorando la integración entre los sectores productivos locales y optimizando el uso de los recursos disponibles (FAO, 2020; INTA, 2021b).

En la provincia de Tucumán, la superficie cultivada con tabaco durante la campaña 2024/2025 fue estimada en 3.850 hectáreas (Scandaliaris *et al.,* 2025). A partir de una densidad promedio de 20.000 tallos por hectárea y un peso medio de 0,187 kg por tallo, se estima una disponibilidad anual cercana a las 14.399 toneladas de residuos, correspondientes a biomasa potencialmente apta para su aprovechamiento energético (Gutierrez *et al.,* 2024). Este volumen adquiere especial relevancia al analizar su posible incorporación en sistemas de generación energética ya existentes, como las calderas bagaceras de la industria azucarera tucumana, contribuyendo a la sustitución de combustibles convencionales y al fortalecimiento de la matriz energética provincial (Gutierrez *et al.,* 2024).

OBJETIVOS

Evaluar la viabilidad del aprovechamiento energético del tallo de tabaco a través de la caracterización integral de esta biomasa, estos valores se compararán con los de la zafra anterior y otras biomasas.

MATERIALES Y MÉTODOS

El trabajo de caracterización energética se llevó a cabo en el Laboratorio de Ensayos y Mediciones Industriales (LEMI), que forma parte de la Sección de Ingeniería y Proyectos Agroindustriales de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC). Los tallos de tabaco evaluados fueron picados en el campo y luego trasladados al LEMI, donde se dejaron secar de manera natural. Se recolectaron ocho muestras de tallos de tabaco mensualmente, a las que se les realizaron las siguientes determinaciones

La distribución del tamaño de partículas según la metodología de la norma ASTM C 136-01.

Contenido de humedad (W), se utilizó la norma ASTM D 5142-02 modificada. Posteriormente, las muestras secas fueron trituradas en un molino hasta obtener una granulometría de 1 mm.

Se determinaron los contenidos de cenizas (CZ), sólidos volátiles (SV) y carbono fijo (CF) en base seca (b.s.)., mediante un analizador termogravimétrico (TGA), marca LECO, modelo TGA701, ajustado y calibrado específicamente para biomasa. Esta metodología sigue el procedimiento de la norma ASTM D 5142-02, modificada.

Se determinó el poder calorífico superior (PCS) en b.s. empleando una Bomba Calorimétrica marca Parr, modelo 6000, según metodología indicada en la norma ASTM D 2015-96.

El cálculo del poder calorífico inferior (PCI) en base húmeda (b.h.), se determinó utilizando la siguiente Ecuación:

$$PCI = PCSx(1 - W) - 2442x[9xHx(1 - CZ)x(1 - W) + W] \qquad \text{Ec. 1}$$

Dónde:
PCI: poder calorífico inferior en base húmeda [KJ/Kg]
PCS: poder calorífico superior [KJ/Kg]
H: contenido de hidrogeno, en composición centesimal.
W: contenido de humedad, en composición centesimal.
CZ: contenido de cenizas, en composición centesimal.

La determinación de cloro (Cl) se llevó a cabo siguiendo la metodología establecida en la norma ASTM E 776-87 modificada (Gutierrez *et al.,* 2016), mientras que la de azufre (S) se realizó conforme a la norma ASTM D 3177-02 modificada (Mistretta *et al.,* 2019).

Para determinar el contenido de SiO_2, se utilizó el método gravimétrico descrito en la norma ASTM E 887-88 (Gutierrez *et al.,* 2018).

En cuanto al análisis de composición elemental, se siguió la metodología basada en la norma ASTM D 5373-08. Para este análisis, se empleó un equipo de composición elemental de la marca LECO, modelo 628, que permite determinar el contenido de hidrógeno (H), carbono (C) y nitrógeno (N) en matrices orgánicas.

matrices orgánicas.

RESULTADOS

En la figura 1, se presenta la curva de secado natural de los tallos de tabaco que fueron procesados y almacenados en la EEAOC.

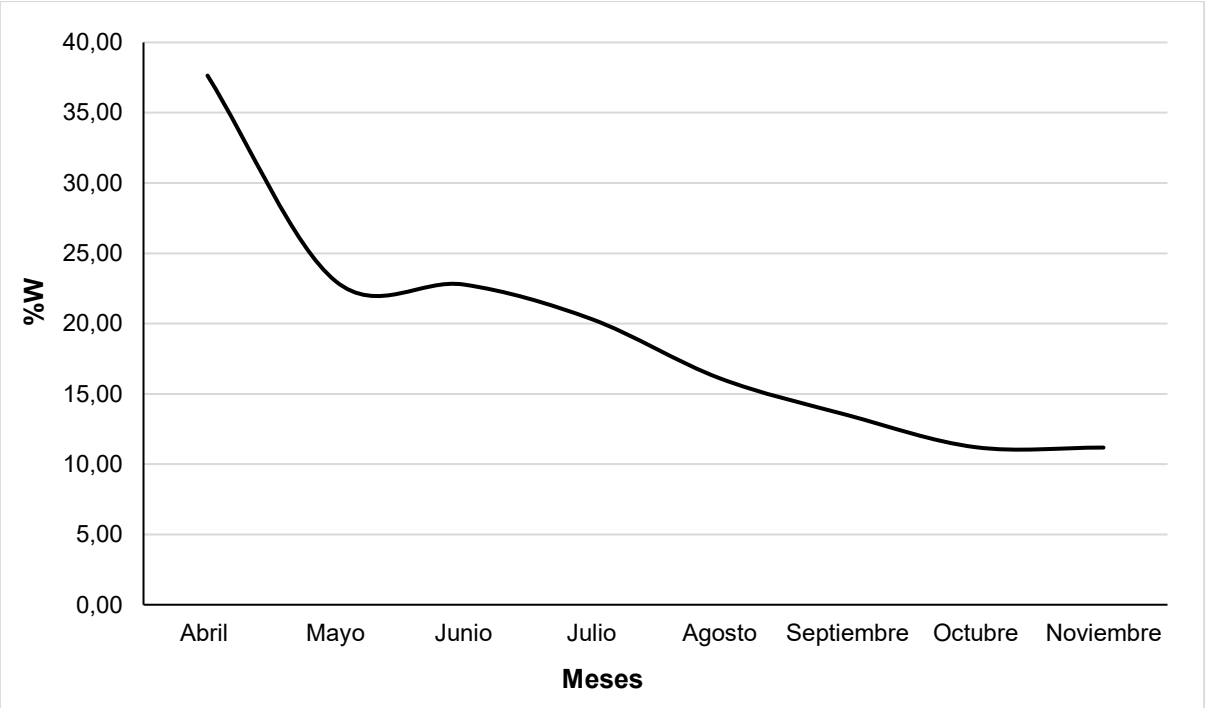


Figura 1: Curva de secado de tallos de Tabaco de la campaña 2024/2025 en Tucumán.

A continuación, en la tabla 1, se muestran los valores promedio del diámetro de partícula, el análisis inmediato en b.s. y la caracterización energética de los tallos de tabaco. El PCS está en b.s. y el PCI en b.h. También se incluye el análisis estadístico realizado para el lote de muestras ensayadas, junto con sus respectivos coeficientes de variación % CV.

Tabla1. Valores promedio del diámetro de partícula, análisis inmediato y caracterización energética, determinados en los tallos de tabaco estudiados.

	Dp (mm)	**SV (%) b.s.**	**CZ (%) b.s.**	**CF (%) b.s.**	**PCS b.s. [kJ/kg]**	**PCI b.h. [kJ/kg]**
Promedio	1,21	71,79	11,72	16,48	15.840	11.505
Rango	[1,11 - 1,30]	[68,14 - 73,70]	[8,59 - 15,98]	[14,93 - 18,98]	[15.106 – 16.907]	[10.540 – 12.814]
%CV	0,11	0,03	0,16	0,08	0,04	0,10

La Tabla 2 presenta los resultados de la composición elemental, incluyendo los contenidos de Cl, S y SiO_2 en las muestras de tallos de tabaco que se analizaron. También se incluye el análisis estadístico, junto con sus respectivos coeficientes de variación % CV.

Tabla 2: *Valores promedio del* Análisis elemental, el contenido de Cl, S y de SiO_2, *determinados en los tallos de tabaco estudiados.*

	Cl (%) b.s.	**S (%) b.s.**	**N (%) b.s.**	**C (%) b.s.**	**H (%) b.s.**	**SiO_2 (%) b.s.**
Promedio	0,36	0,37	2,19	39,32	6,28	1,01
Rango	[0,49 - 0,52]	[0,15 - 0,18]	[2,050 - 2,425]	[38,530 - 40,781]	[5,937 - 6,519]	[0,80 - 1,19]
%CV	0,24	0,53	0,08	0,03	0,04	0,19

En la Tabla 3, podemos ver una comparación de los valores promedio del análisis inmediato y de la caracterización energética de los tallos de tabaco para las campañas

2023/2024 y 2024/2025 (Gutierrez *et al.,* 2024). y del bagazo (Zamora *et. al,* 2023). RAC determinar el contenido de SiO_2, (Gutierrez *et al.,* 2018).

Tabla 3. Valores promedio del análisis inmediato y caracterización energética, para los tallos de tabaco en ambas campañas

	SV (%) b.s.	**CZ (%) b.s.**	**CF (%) b.s.**	**PCS b.s. [kJ/kg]**	**PCI b.h. [kJ/kg]**
Tallos de tabaco 2023/2024	73,23	9,11	17,66	17.619	9.579
Tallos de tabaco 2024/2025	71,79	11,72	16,48	15.840	11.505
Bagazo	77,21	5,77	16,65	17.584	6.538
RAC	70,64	12,36	17,00	16.668	12.726
Chip de madera	76,00	3,8	20.2	19.420	18.230

En la Tabla 4 se observa una comparación de los valores promedio de la composición elemental, el contenido de Cl, el de S y el de SiO_2, de los tallos de tabaco para ambas campañas.

Tabla 4. Valores promedio del Análisis elemental, del contenido de Cl, S y del SiO_2*, para las dos campañas.*

	Cl (%) b.s.	**S (%) b.s.**	**N (%) b.s.**	**C (%) b.s.**	**H (%) b.s.**	**SiO_2 (%) b.s.**
Tallos de tabaco 2023/2024	0,51	0,17	2,26	43,05	6,19	2,50
Tallos de tabaco 2024/2025	0,36	0,37	2,19	39,32	6,28	1,01
Bagazo	0,14	0,16	0,40	43,90	5,80	54,25
RAC	0,18	0,25	0,69	43,46	5,72	57,66
Chip de madera	0,08	0,05	0.40	41,00	6,00	-

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos nos llevan a concluir que los tallos de tabaco de la campaña 2024/2025 en la provincia de Tucumán son un residuo agroindustrial con un gran potencial para ser aprovechado energéticamente. Desde la perspectiva energética, los valores de PCS que se han obtenido son comparables a los de otras biomasas agrícolas que se utilizan en calderas, lo que sugiere que el residuo de tabaco puede ser una opción viable como biocombustible sólido. Además, la baja variabilidad de los parámetros analizados indica que su composición es relativamente homogénea, lo que favorece su uso continuo en sistemas industriales.

Los contenidos de %CZ, %Cl y %S medidos, se mantienen dentro de rangos aceptables. También, el bajo valor % SiO_2 ayuda a reducir el riesgo de incrustaciones severas, mejorando las condiciones operativas en comparación con otras biomasas agrícolas. En comparación con la campaña anterior, los tallos de tabaco de 2024/2025 presentan diferencias significativas en el contenido de % SiO_2. Estos cambios podrían deberse a que los tallos fueron procesados previamente antes de su almacenamiento. Por lo tanto, los tallos de tabaco se consolidan como una alternativa energética renovable que es técnicamente viable

y tiene el potencial de complementar el uso de combustibles fósiles en el sector agroindustrial de la región.

BIBLIOGRAFÍA

Aneise, A. J., Möhle, E. y Schteingart, D. 2024. Transición energética. Argendata. Fundar. Disponible en: https://argendata.fund.ar/categorias/ambiente/

EEAOC. 2022. La industria azucarera tucumana: producción, energía y sustentabilidad. Tucumán, Argentina.

EEAOC. 2023. Uso de biomasa complementaria en calderas bagaceras de ingenios azucareros de Tucumán. Tucumán, Argentina.

FAO. 2020. Energía derivada de biomasa: Situación y perspectivas en la Argentina. Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Disponible en: https://www.fao.org/argentina/publicaciones

FAO. 2025. Sustainable bioenergy from agriculture (bioenergía sustentable desde la agricultura). Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura. Disponible en: https://www.fao.org/energy/areas-of-work/sustainable-bioenergy-from-agriculture/en

Green Economy Tracker. 2025. Argentina: Energy profile and transition outlook (Actualización 2025). Green Economy Coalition. Disponible en: https://greeneconomytracker.org/country/argentina

Gutierrez, C. E.; Mistretta, G.; Zamora Rueda, G.; Peralta, F. L.; Golato, M. A.; Coronel, M.; Ruiz, M.; Paz, D. y Cárdenas, G. J. 2016. Contenido de cloro total en residuos agrícolas de cosecha de caña de azúcar (RAC) en Tucumán. RIAT. Tomo 93 (2): 15-19. Disponible en: http://www.scielo.org.ar/pdf/riat/v93n2/v93n2a04.pdf. Consultado: 15 de enero 2022.

Gutierrez, C. E.; Mistretta, G.; Zamora Rueda, G.; Peralta, F. L.; Golato, M. A.; Juárez, G.; Ruiz, M.; Paz, D. y Cárdenas, G. J. 2018. Contenido de sílice total en cenizas de residuos agrícolas de cosecha de caña de azúcar (RAC) en Tucumán, Argentina. RIAT 95 (1): 21-26.

Gutierrez, C. E.; Zamora Rueda, G.; Armella, G.; Morales, W. D.; Golato, M. A.; Feijóo, E. y Ruiz, M. 2024. Caracterización energética de residuo de tabaco de la provincia de Tucumán – Argentina para biocombustible. XXIII Jornada Nacional de Técnicos de la Caña de Azúcar.

INTA. 2021a. Residuos agrícolas y agroindustriales con potencial bioenergético. Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria. Disponible en: https://www.inta.gob.ar/temas/bioenergia

INTA. 2021b. Bioenergía a partir de biomasa agroindustrial: aportes del sector azucarero. Buenos Aires, Argentina.

Ministerio de Agricultura, Ganadería y Pesca & Secretaría de Energía. 2025. PROBIOMASA: Proyecto para la promoción de la energía derivada de biomasa. Gobierno de la República Argentina. Disponible en: https://www.probiomasa.gob.ar/sitio/es/institucional.php

Ministerio de Relaciones Exteriores, Comercio Internacional y Culto. 2024. Producción energética argentina en la transición mundial hacia las energías limpias. : https://cancilleria.gob.ar/es/cei/publicaciones/produccion-energetica-argentina-en-la-transicion-mundial-hacia-las-energias

Mistretta, G.; Gutierrez, C.; Zamora Rueda, G.; Peralta, F.; Golato, M. A.; Paz, D.; Cárdenas, G. y Ruiz, M. 2019. Contenido de azufre total del residuo agrícola de la cosecha de caña de azúcar de Tucumán, Argentina. RIAT. Tomo 96 (1): 49-54. Disponible en: http://www.scielo.org.ar/pdf/riat/v96n1/v96n1a01.pdf. Consultado: 15 de enero 2022.

Scandaliaris, P.; Fandos, C.; Carreras Baldrés, J. y Villares, A. 2025. Estimación satelital de la superficie cultivada con tabaco en la provincia de Tucumán en la campaña 2024/2025 y su comparación con campañas precedentes. Reporte Agroindustrial EEAOC. Nº 338, ISSN 2346-9102. Disponible en: https://www.eeaoc.org.ar/estimacion-satelital-de-la-superficie-cultivada-con-tabaco-en-la-provincia-de-tucuman-en-la-campana-2024-2025-y-su-comparacion-con-campanas-precedentes/

Secretaría de Energía de la Nación. 2024. Balance energético nacional y participación de la biomasa. Buenos Aires, Argentina.

Zamora Rueda, G del H.; Mistretta, M. G.; Gutierrez, C. E.; Golato M. A.; Paz, D. y Ruiz, M. 2023. Caracterización energética de bagazo de caña de azúcar en Tucumán, Argentina. Revista Industrial y Agricola de Tucuman. Tomo 100 (1):47-53. ISSN 0370-5404

POTENCIAL DE METANIZACION DE LA VINAZA EN UN REACTOR UASB PILOTO

Molina C.F.; Machado W. Daniel; Quaia Eugenio A.

Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres, Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales, Estudios Ambientales, Av. William Cross 3150-Las Talitas- Tucumán- Argentina

INTRODUCCIÓN

En la industria sucroalcoholera, la vinaza es el principal residuo líquido generado durante la destilación del bioetanol. Su volumen está directamente asociado al crecimiento de la producción de este biocombustible.

En Argentina, la producción de etanol de caña alcanzó los 578.492 m³ en la temporada 2024/25, de los cuales la provincia de Tucumán aportó casi el 60% (IPAAT, 2026), consolidándose como el principal polo bioenergético del país. Considerando que por cada m³ de etanol se generan entre 10 y 12 m³ de vinaza, las industrias sucroalcoholeras ubicadas en la provincia, produjeron en esa misma temporada en el orden de 3,4 a 4,2 millones de m³ de vinaza.

Actualmente el uso de la vinaza en la provincia, en su mayoría, consiste en el riego de cañaverales o disposición en tierras no productivas. La digestión anaeróbica de vinaza emerge como una alternativa técnica madura, capaz de reducir su carga orgánica, mitigar impactos ambientales y generar biogás con contenidos de metano superior al 60%. La sustitución de vinaza cruda por digestato en fertirriego puede reducir las emisiones de GEI en más de un 40–50% (Moraes *y col.*, 2017), mientras que la captura del biogás permite transformar un residuo de alto impacto en una fuente energética renovable.

OBJETIVOS

Analizar la capacidad del sistema para remover materia orgánica y estimar el potencial máximo de metanización (PM o BMP) bajo condiciones operativas controladas, a diferentes velocidades de carga orgánica (VCO).

MATERIALES Y MÉTODOS

Reactor UASB con sistema de recirculación

Se utilizó un reactor anaeróbico de manto de lodos y flujo ascendente (UASB) construido en tubo de PVC transparente, con 2 m de altura y 30 cm de diámetro interno, lo que proporcionó un volumen útil de 15 L (Figura 1). Debido a la elevada carga orgánica de la vinaza y con el objetivo de optimizar la eficiencia del proceso y garantizar la velocidad ascensional necesaria para mantener el manto de lodos en suspensión, se incorporó un sistema de recirculación externa, siguiendo los lineamientos propuestos por Chernicharo (2022). El sistema de recirculación incluyó un tanque de mezcla de 10 L, provisto de calefacción y un sistema de agitación combinado (hidráulica y mecánica), destinado a homogenizar la vinaza fresca con el efluente recirculado desde el reactor. La mezcla resultante fue impulsada hacia la base del UASB mediante una bomba dosificadora, regulando el caudal de alimentación de modo de mantener una velocidad ascensional (Va) superior a 1,5 $m \cdot h^{-1}$, condición indispensable para sostener la biomasa en suspensión y favorecer la formación de gránulos (Von Sperlin y Chernicharo, 2007).

Este régimen se mantuvo durante 16 días, controlando regularmente el pH y la relación entre alcalinidad parcial y total (factor α), indicador clave de la capacidad buffer del sistema. Un valor cercano a 0,3 se considera representativo de operación estable, aunque puede variar según el sustrato (Chernicharo, 2022).

Durante la operación, la suspensión de biomasa y el sustrato permanecieron en contacto el tiempo suficiente para permitir la bioconversión anaeróbica de la materia orgánica en biogás. Al alcanzar el sistema trifásico de separación gas-líquido-sólido (GLS), ubicado a 190 cm desde la base, el flujo ascendente se dividió: el gas continuó su ascenso y fue captado mediante un colector superior, mientras que la fase líquida descendió por un conducto de rebalse hacia el tanque de mezcla, cerrando el ciclo de recirculación.

El reactor se operó por etapas, definidas por la velocidad de carga orgánica (VCO). Una vez alcanzada la estabilidad en cada etapa y transcurrido al menos un tiempo de retención hidráulica con excepción de las dos primeras etapas, que evidenciaron una estabilización más temprana se procedió a medir los parámetros de interés. Los parámetros de estabilidad elegidos fueron: la VCO, pH y la relación de AGV/Alcalinidad (datos no mostrados) y las variables de respuesta fueron: Remoción de DQO, determinada por la diferencia de DQO a la salida y entrada del reactor referida a la DQO de entrada y la tasa de metano, determinada por la cantidad de metano producido por gramos de DQO abatido. Los valores mostrados en la tabla 3, corresponden a la media aritmética de las últimas 10 mediciones de cada etapa.

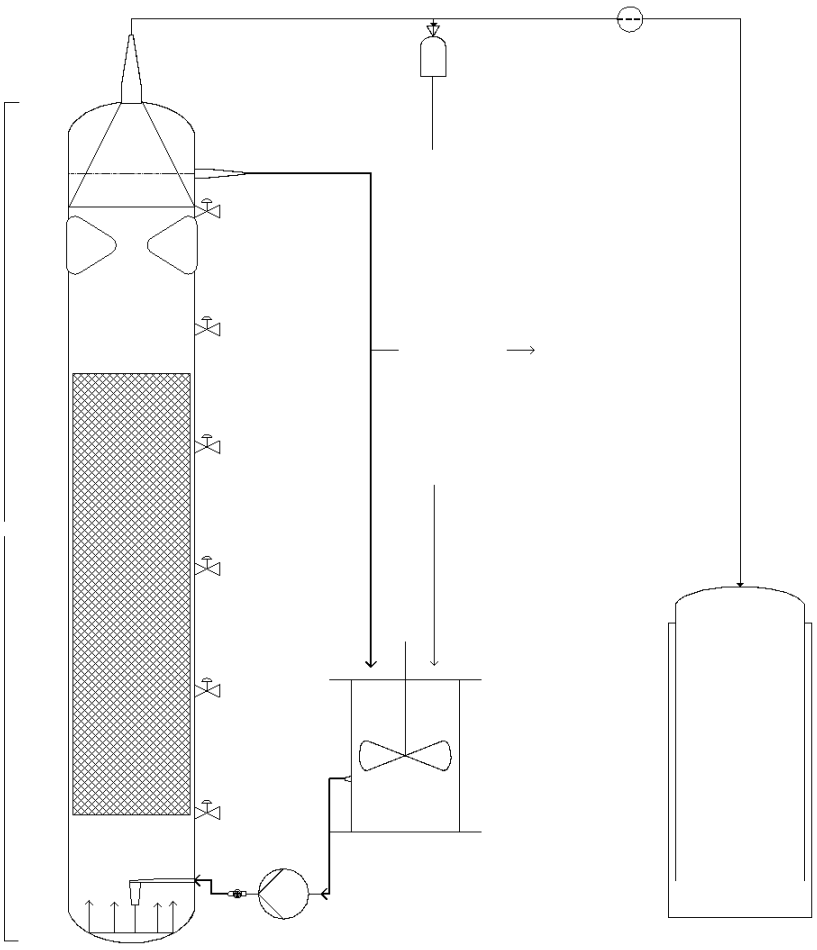


Figura 1. Esquema del sistema del reactor UASB y sus componentes.

Inóculo

Se utilizó un lodo proveniente de un reactor tipo UASB que trataba vinaza generada en una destilería de alcohol. Dentro del reactor se inocularon 5 L de lodo y se completó el volumen del mismo con agua corriente. Una vez lleno se tomó una muestra y se determinaron: sólidos suspendidos volátiles (SSV) y actividad metanogénica especifica (AME), siguiendo las técnicas descriptas por Field J y col. (1988).

Sustrato

Se utilizó vinaza provista por una destilería de Tucumán durante la zafra. En total se utilizaron seis lotes, recolectados en distintas épocas del año. En cada lote se determinaron DQO, pH y conductividad. Estas determinaciones se realizaron siguiendo las técnicas establecidas en el Standard Methods 24th edit (2023). Todos los análisis se realizaron por triplicado y se tomó como válido el promedio de los tres resultados.

RESULTADOS Y DISCUSIONES

Las características del inóculo se muestran en la Tabla 1.

La carga máxima teórica que pueden soportar esos lodos (VCO_{max}), se calculó a partir de multiplicar la concentración de los lodos por la actividad metanogénica especifica (AME). El reactor fue alimentado con vinaza cruda sin corrección de pH, ajustando el caudal para que el valor de la VCO no supere a la VCO_{max} calculada (0,6 gDQO/L.d).Este valor está dentro de lo sugerido en las directrices de arranque de reactores UASB (Lettinga y col., 1980).

Tabla 1. Concentración y actividad de los lodos dentro del reactor al momento de arranque.

SSV [g/L]	AME [gDQOCH_4/gSSV.d]	VCO $_{max.}$ [gDQO/L.d]
5,06	**0,12**	**0,6**

En la Tabla 2 se muestran los resultados de la caracterización de los lotes de vinaza utilizados para alimentar el reactor UASB.

Tabla 2. Caracterización fisicoquímica de los lotes de vinazas utilizadas como sustrato en el reactor UASB.

LOTES	DQO [g/L]	pH	Cond. [mS/cm]
1	45,89 ± 3,95	4,98 ± 0,15	16,98 ± 1,18
2	116,94 ± 10,23	4,87 ± 0,69	32,10 ± 086
3	77,21 ± 2,23	4,08 ± 0,13	19,81 ± 1,13
4	51,11 ± 5,66	4,61 ± 0,36	20,21 ± 0,42
5	71,75 ± 9,91	4,72 ± 0,23	22,93 ± 3,67
6	55,87 ± 5,21	5,00 ± 0,11	22,93 ± 3,67

En la Tabla 3, se muestran los resultados obtenidos de las mediciones de remoción de materia orgánica y producción de biogás correspondientes a cada etapa, así como la velocidad de carga orgánica de las mismas.

Tabla 3. Remoción de materia orgánica y producción de biogás por día en las etapas de operación del reactor UASB.

ETAPAS	I	II	III	IV	V
Duración [d]	**16**	**42**	**93**	**27**	**35**
VCO [gDQO/L.d]	0,6	0,9	2,9	5,3	11,7
Remoción [%]	99 ± 0,01	96 ± 0,02	74 ± 0,10	80 ± 0,18	61 ± 0,359
Caudal biogás [LBiogas/d]	3,64	8,06	S/D	14,70	12,80
Tasa de CH_4 [LCH_4/ gDQOr]	0,250	0,358	S/D	0,148	0,123

S/D: sin datos

Los resultados muestran que, a medida que se incrementa la carga orgánica aplicada al reactor, la eficiencia de remoción de materia orgánica disminuye progresivamente, comportamiento consistente con la aproximación del sistema a su capacidad máxima de tratamiento. Esta tendencia coincide con lo reportado por Cabrera Díaz *y col.* (2017) para reactores UASB alimentados con vinaza. Los rendimientos de metano (L $CH_4 \cdot g^{-1}$ $DQO_{(r)}$) (Tasa de metano), mostraron un aumento gradual respecto al aumento de la VCO, hasta llegar a un máximo en la etapa II. A partir de allí mostró una reducción asociada al aumento de la carga orgánica. En la etapa III la cuantificación del biogás se vio afectada por una excesiva formación de espumas, lo que impidió la obtención de mediciones confiables.

La etapa II, operada a una VCO de 0,9 g $DQO \cdot L^{-1} \cdot d^{-1}$, presentó el mayor rendimiento en la producción de metano (0,358 L $CH_4 \cdot g^{-1}$ $DQO_{(r)}$), superando los valores promedio informados por Cabrera Díaz (2017), quien reportó 0,237 L $CH_4 \cdot g^{-1}$ DQO para condiciones similares. En la etapa IV, una vez estabilidada a una VCO de 5,3 g $DQO \cdot L^{-1} \cdot d^{-1}$, el rendimiento promedio fue de 0,148 L $CH_4 \cdot g^{-1}$ $DQO_{(r)}$, ligeramente inferior a los valores informados por Barros *y col.* (2016), quienes registraron 0,185 L $CH_4 \cdot g^{-1}$ DQO para cargas entre 5,0 y 7,5 g $DQO \cdot L^{-1} \cdot d^{-1}$.

En concordancia con lo observado en estudios previos (Cabrera Díaz *y col.*, 2017), el incremento de la carga orgánica provocó una reducción en la estabilidad operacional del reactor, evidenciada por la disminución del rendimiento y la tendencia al deterioro de los indicadores de estabilidad.

CONCLUSIONES

El UASB mostró un desempeño eficiente a bajas cargas orgánicas, alcanzando remociones de 96–99% para VCO entre **0,6 y 0,9 $gDQO \cdot L^{-1} \cdot d^{-1}$. L**o que confirma una buena adaptación del lodo granular al sustrato vinaza.

Los mayores rendimientos de metano se obtuvieron en condiciones subcríticas de carga, particularmente en la etapa II (0,9 $gDQO \cdot L^{-1} \cdot d^{-1}$), con **0,358 L $CH_4 \cdot gDQO^{-1}$ removido**, valores superiores a los reportados para sistemas similares (Cabrera Díaz, 2017; Gomes de Barros y col., 2016).

L**a etapa III presentó valores atípicos de producción de biogás por problemas operativos asociados a formación excesiva de espuma**, un fenómeno frecuente en digestión de vinaza y documentado en experiencias previas. Esto refuerza la necesidad de sistemas anti-espuma o estrategias de control para operación estable en cargas medias.

El sistema toleró cargas de hasta 5,3 $gDQO \cdot L^{-1} \cdot d^{-1}$ (etapa IV) con un rendimiento de metano aún aceptable (0,148 L $CH_4 \cdot gDQO^{-1}$), aunque por debajo de valores de referencia (Gomes de Barros y col., 2016). Esto sugiere que el reactor posee un margen operativo útil, pero con necesidad de control más estricto de la estabilidad.

Cargas cercanas a 10–12 gDQO·L^{-1}·d^{-1} (etapa V) superan claramente el umbral de operación estable del UASB para vinaza cruda, confirmando que este tipo de sustrato requiere estrategias de alimentación escalonada para evitar inhibición ácida.

En conjunto, la experiencia demuestra que el UASB piloto es altamente eficiente en condiciones de baja y media carga, logrando altas remociones y buenos rendimientos de metano, pero **su estabilidad se compromete en cargas elevadas**, en concordancia con lo reportado para digestión de vinaza en sistemas reales.

BIBLIOGRAFÍA

American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environment Federation. Lipps WC, Braun-Howland EB, Baxter TE, eds. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. 24th ed. Washington DC: APHA Press; 2023.

Barros V. G., Duda R. M. and De Oliveira R. A. (2016). "Biomethane production from vinasse in UASB reactors inoculated with granular sludge". Brazilian Journal of Microbiology, ISSN: 1517-8382. http://dx.doi.org/10.1016/j.bjm.2016.04.021 Elsevier BV., Brazil

Cabrera Diaz, A.; Urbano Quintero, M.; Paredes Reyes, I.; Diaz Marrero M.A.; Chavez Fando I. 2017 Digestión anaerobia de vinaza pura cubana en un sistema combinado UASB-filtro anaerobio. Ingeniería Hidráulica y Ambiental, VOL. XXXVIII, No. 3, Sep-Dic 2017, p. 3-16.

Chenicharo, Carlos Augusto de Lemos Reactores Anaerobios / Carlos Augusto de Lemos Chenicharo; (2022) traducción Iván Andrés Sánchez Ortiz 2 ª Ed. San Juan de Pasto: Editorial Universidad de Nariño. ISBN: 978-628-7509-37-5 e-book.

Field, J., Sierra Alvarez, R., Lettinga, G., 1988. Ensayos Anaerobios en: Depuración Anaerobia de Aguas Residuales. Actas del 4° Seminario D.A.A.R, Ed. Coordinada por F.Fdz Polanco; P.A García; S. Hernando; Secretariado de Publicaciones Universidad de Valladolid. Valladolid, España.1988.

Gomes de Barros, V.; Dudab, R.M.; Alves de Oliveira, R. 2016; Biomethane production from vinasse in upflow anaerobic sludge blanket reactors inoculated with granular sludge. ; Brazilian Journal of Microbiology; 47: 628–63

IPAAT 2026: visto online Marzo 2026: https://www.ipaat.gov.ar/nota/610/finalizo-la-campana-de-alcohol-20242025-en-argentina

Lettinga, G.; van Velsen, A. F. M.; Hobma, S. W.; de Zeeuw, W.; Klapwijk, A. 1980. Use of the upflow sludge blanket (USB) reactor concept for biological wastewater treatment, especially for anaerobic treatment. Biotechnology and Bioengineering, 22(4), 699–734. https://doi.org/10.1002/bit.260220402

Moraes, B.S.; Petersen S.; Zaiat, M.; Sommer, S.G.; Triolo, J.M. (2017) Reduction in greenhouse gas emissions from vinasse through anaerobic digestión. Applied Energy 189: 21-30.

Von Sperling, M.; Chernicharo, C. 2007. Biological wastewater treatment in warm climate regions (1): 740

RECUPERACIÓN DE AGUA EN LA AGROINDUSTRIA MEDIANTE BIOCARBÓN ELECTROTÉRMICO Y FIBRAS HIDROFÍLICAS

Paz, J.S.[1], Lai, T.A.[2]; Adorno, M.M.[2]; Lucero, M.B.[2]; Chaile, A.P.[1]; Herrera, J.P.[1]; Madrid, R.E.[3]; Avila, A. M.[1, *]
[1]INQUINOA, Universidad Nacional de Tucumán, CONICET, Tucumán, Argentina. [2]Universidad Nacional de Tucumán, Tucumán, Argentina. [3]LAMEIN, Departamento de Bioingeniería, FACET-Universidad Nacional de Tucumán / INSIBIO-CONICET, Tucumán, Argentina. *Autor de correspondencia: aavila@herrera.unt.edu.ar

Palabras clave: Desalinización; Destilación por membrana; Membranas electrificadas; Recuperación de agua; Economía circular.

INTRODUCCIÓN

El agua es un fluido esencial utilizado en la agroindustria, riego agrícola, el sector urbano, minería, operaciones de petróleo y gas, y plantas generadoras de energía. Cada necesidad específica de uso o reciclado de agua implica el acondicionamiento del fluido a niveles específicos de salinidad. A diferencia de la ósmosis inversa, las tecnologías de destilación por membrana ofrecen la posibilidad de recuperar agua dulce a partir de soluciones altamente concentradas en sólidos disueltos. En particular, un concepto atractivo en términos de productividad de agua y consumo de energía es la integración completa de la etapa térmica y el agente separador en un único contactor de membrana eléctricamente conductor. Sin embargo, la magnitud del calor latente de vaporización del agua es significativa, lo que implica requerimientos de energía considerables para vaporizar el fluido en contacto con la membrana. Esto representa un factor limitante para maximizar la productividad de agua dulce en los procesos de destilación por membrana. Así, en una estrategia de operación continua, la producción de agua dulce podría maximizarse a través de diferentes enfoques asociados tanto al proceso como a los materiales o agentes de separación. En tal sentido, el interés tecnológico se centra actualmente en alternativas que puedan integrar materiales multifuncionales, ya sea a través del concepto de destilación por membrana (Subrahmanya *et al.*, 2023), o sin membrana con transporte de agua por acción capilar (Chen *et al.*, 2024). A su vez, se requieren opciones económicas, escalables y robustas desde el punto de vista operativo.

Particularmente, el uso de biocarbón en procesos de separación emergentes avanza consistentemente en términos de soluciones sostenibles para el reciclaje de agua y gases, fomentando así la economía circular (Avila y Araoz, 2023). Tubos de biocarbón electroactivos (obtenidos a partir de residuos de biomasa de la agroindustria de la caña de azúcar) funcionan como contactores de membrana electrotérmicas para la recuperación de agua dulce a partir de soluciones salinas altamente concentradas (Trejo Gonzalez *et al.*, 2022). Consecuentemente, una alternativa conveniente a explorar es la combinación funcional de materiales como el biocarbón electroactivo y fibras hidrofílicas para avanzar hacia el desarrollo de una propuesta de recuperación de agua en la agroindustria.

OBJETIVOS

El presente trabajo tiene como objetivo realizar un estudio experimental sobre un nuevo enfoque de recuperación de agua dulce mediante el desarrollo de módulos de contactores de membrana que combinan una fase hidrofóbica de biocarbón electrotérmico y una fase hidrofílica en base a fibras de algodón. Asimismo, un sistema de recuperación de este tipo genera nuevas alternativas para brindar soluciones tecnológicas en la industria azucarera. Entre posibles aplicaciones se mencionan, el acondicionamiento o pulido de corrientes de condensado para ser usado como agua de alimentación de calderas; la concentración del efluente vinaza y otras adicionales vinculadas al acondicionamiento de agua de procesos.

MATERIALES Y MÉTODOS

Contactores de membrana de biocarbón electrotérmicos

Se desarrollaron contactores de membrana electroactivos en forma tubular y monolitos cilíndricos con cavidades axiales múltiples (Fig. 1a) a partir de residuos de cosecha de caña

de azúcar siguiendo el método de preparación reportado por Araoz *et al.* (2021). Se utilizó un microscopio Zeiss Supra 55 V P (CIME CONICET UNT) para la caracterización SEM del material de biocarbón. La Figura 1b muestra las imágenes SEM del biocarbón. Se observaron dos estructuras porosas diferentes. Una parte de la estructura de carbono se asoció con los residuos de biomasa (Zona 1). La Zona 2 representa un tipo diferente de estructura porosa que se atribuyó al aglomerante utilizado como precursor en la preparación del material (Liu *et al.*, 2010; Zhao *et al.*, 2009). Esta estructura porosa entrelazada resultó ventajosa en términos de mejorar la conductividad eléctrica del material (Avila y Araoz, 2023; Trejo Gonzalez *et al.*, 2022).

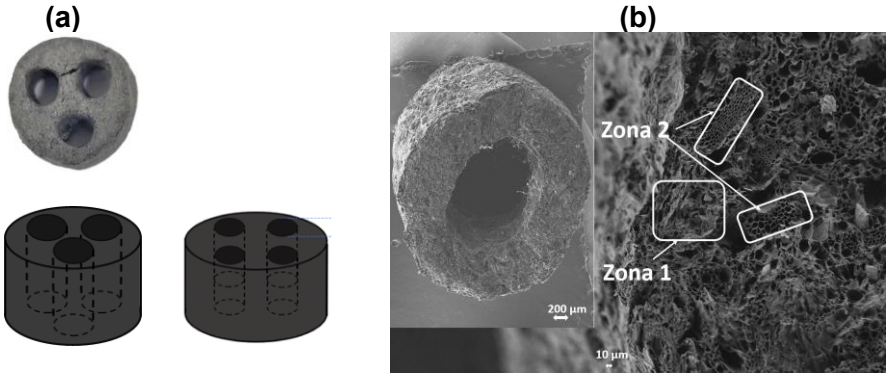


Figura 1. a) Tubos y monolitos de biocarbón electroactivos conformados para destilación por membrana de calentamiento directo continuo. b) Imágenes SEM de la superficie frontal del contactor de membrana tubular; Zona 1: estructura de carbono asociada al precursor de biomasa, Zona 2: estructura porosa atribuida al aglomerante. Imagen insertada: imagen SEM de la membrana tubular.

Propiedades electrotérmicas de los contactores de membrana de biocarbón

El calentamiento directo del material mediante el efecto Joule se llevó a cabo utilizando una fuente de alimentación de CC (UTP1306-0/32V-0/6A). Se aplicó un conjunto de valores de voltaje crecientes (de 1,0 a 3,0 V) entre los extremos del contactor. Después de cada valor de voltaje aplicado, la fuente de alimentación se apagó y el tubo se enfrió a temperatura ambiente. Se ubicó un termopar tipo K en el lado interior del biocarbón. La temperatura dentro del contactor de membrana se monitoreó y registró utilizando un dispositivo registrador de datos (*data logger*). La Figura 2 muestra la evolución de la temperatura dentro del tubo. Como se observa, se alcanzaron picos más pronunciados al aplicar valores de voltaje crecientes entre los extremos del biocarbón. Se obtuvieron perfiles de temperatura análogos para todos los contactores de membrana.

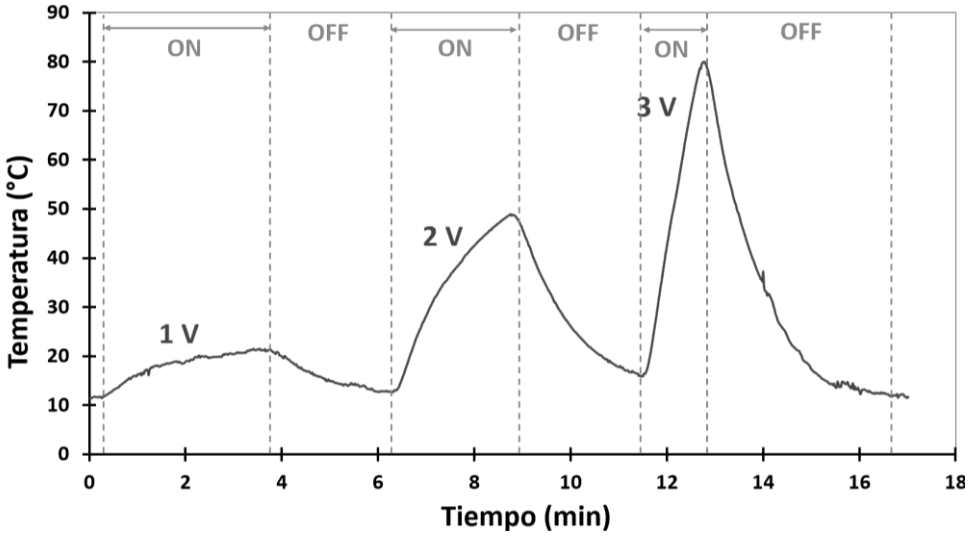


Figura 2. Temperatura evaluada dentro del tubo de biocarbón en intervalos consecutivos y crecientes de voltaje aplicado (encendido y apagado).

Configuración experimental

La configuración experimental se diseñó para lograr una operación continua mediante la circulación del fluido de alimentación. Se adoptó una fase hidrofílica basada en tejidos de punto por trama de algodón (densidades en seco y húmedo de 236 y 926 GSM, respectivamente; velocidad capilar estimada en $5{,}3\ x\ 10^{-4}\ \frac{m}{s}$), la cual se conectó íntimamente a la superficie del contactor tubular poroso de biocarbón electrotérmico. Esta configuración garantizó la alimentación continua de solución salina al contactor mediante transporte capilar, mientras el fluido circulaba a través del sistema manteniendo un nivel mínimo.

El calor requerido para la vaporización fue suministrado exclusivamente por el contactor electrotérmico. El sistema se complementó con una fuente de alimentación de CA (3200 Hz, 0–9 V, $I_{máx} = 2{,}7\ A$), una bomba de agua (CC, 12V), suministro de aire con compresor y una boquilla Venturi.

La alimentación principal fue agua de pozo con valores de conductividad entre 500 y 650 µS/cm. Se operó bajo una configuración de flujo de aire de barrido. El proceso se optimizó aplicando un ligero vacío (~3,4 kPa) desde la parte superior junto con un caudal de aire ascendente, logrando así una transferencia de masa y calor eficiente mediante el uso de materiales escalables, económicos y de alta disponibilidad.

Se fabricó un módulo hermético para realizar los ensayos. El montaje se estructuró en tres secciones principales interconectadas mediante accesorios de polipropileno (PP) y polietileno (PE), garantizando la estanqueidad mediante el uso de cinta de politetrafluoroetileno (PTFE) y selladores de silicona en todas las uniones roscadas y pasantes (Figura 3). La sección central alberga el cartucho electroactivo conformado por la combinación funcional del monolito de biocarbón electrotérmico y las fibras de algodón hidrofílicas. El monitoreo térmico *in situ* se realizó mediante una termocupla insertada en la fase hidrofílica. La sección inferior cumplió una doble función: actuó como reservorio para el fluido de alimentación y como puerto de inyección para el aire de barrido suministrado por el compresor. La sección superior permitió recolectar el vapor generado para canalizarlo hacia el condensador externo.

Para evaluar la eficiencia energética del proceso, se determinó el Consumo Específico de Energía (SEC, por sus siglas en inglés). Cabe destacar que, para este estudio, el cálculo del SEC contempla únicamente la potencia eléctrica aplicada de forma directa al biocarbón, excluyendo el consumo energético derivado de los equipos periféricos. Este parámetro se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$SEC = \frac{P_w}{J_p} x1000$$

Donde P_w es la potencia eléctrica (W) suministrada para calentar el contactor de membrana a través del efecto Joule y J_p es el caudal de permeado en mL/h. Nótese que el agua salina de alimentación operó a temperatura ambiente, es decir, no se utilizó calor residual para precalentar la corriente de alimentación y no hubo ningún sistema de recuperación de calor para el condensado.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos a través de este nuevo enfoque de recuperación de agua mostraron valores de productividad de agua dulce de hasta ~10 L/m²h con rechazos de sólidos disueltos del 93-98% cuando se alimentó con agua subterránea (500 - 650 µS/cm) continuamente por acción capilar. Para el módulo descrito, el consumo específico de energía estimado (métrica SEC) alcanzó valores de ~1200 - 1300 kWh/m³. Los resultados del módulo de la Figura 3 se reportan en la Tabla 1. Los valores de SEC obtenidos resultan competitivos con los observados para módulos de destilación por membrana de contacto directo (DCMD) que carecen de recuperación térmica. Se proyecta una reducción sustancial de este consumo

en aplicaciones de campo, mediante el aprovechamiento de calor residual y la integración de sistemas de recuperación de energía. En la Figura 4 se observa el monitoreo continuo de los valores de temperatura evaluados en la fase hidrofílica durante todo el ensayo a diferentes condiciones de operación (caudal de aire, vacío y recirculación de agua).

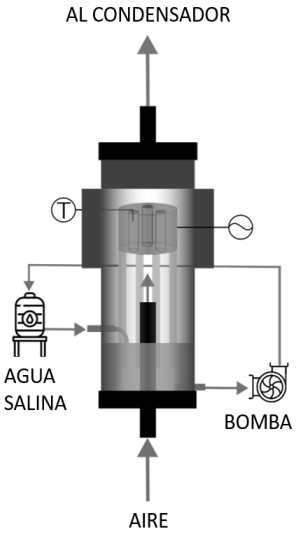


Figura 3. Montaje del prototipo para realizar los experimentos.

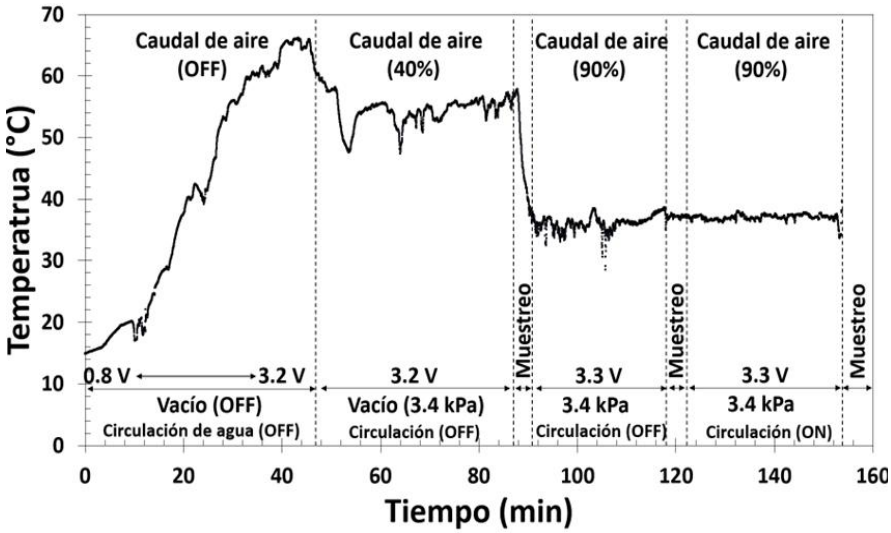


Figura 4. Temperatura evaluada en la fase hidrofílica durante todo el ensayo. Vacío: 3,4 kPa; Voltaje aplicado: 3,3 V; Flujo de aire (100 %): 3,3 L/min (298 K, 101,3 kPa). La leyenda "Muestreo" indica el periodo de tiempo en el que se midieron el volumen de permeado y la conductividad.

Tabla 1. Resultados del prototipo para ensayo con agua de pozo: productividad de agua dulce, rechazo de solutos y consumo específico de energía. Vacío: 3,4 kPa; Voltaje aplicado: 3,3 V; Flujo de aire (100 %): 3,3 L/min (298 K, 101,3 kPa).

Caudal de aire	Productividad de agua dulce	Conductividad		Rechazo	Potencia / SEC
%	$\frac{L}{m^2 h}$	$\frac{\mu S}{cm}$		%	W / $\frac{kWh}{m^3} \times 10^3$
		Alimentación	Permeado		
40	2.5	539	26	95.2	8.9 / 3.2
90	6.0	539	15	97.3	9.0 / 1.5
90	6.1	539	15	97.3	9.0 / 1.3

Previamente, se desarrolló un prototipo análogo que exhibió un desempeño efectivo bajo condiciones de salmuera (~58000 µS/cm), logrando tasas de rechazo del 99,9% y observando que la mayor fracción de sal cristalizada permaneció en las fibras de algodón hidrofílicas. Esta característica constituye una ventaja operativa significativa, ya que facilita la

regeneración del sistema mediante el reemplazo directo de materiales de bajo costo, como las fibras de algodón empleadas. Los resultados de los ensayos con salmuera y agua de pozo se resumen en la Tabla 2.

Tabla 2. Resultados de ensayos con salmuera comparados con los de agua subterránea: productividad de agua dulce, rechazo de solutos y consumo específico de energía.

Alimentación	Presión diferencial	Productividad de agua dulce	Conductividad		Rechazo	Potencia / SEC
	kPa	$\frac{L}{m^2h}$	$\frac{\mu S}{cm}$		%	$W/\frac{kWh}{m^3}\times 10^3$
			Alimentación	Permeado		
Agua de pozo	3.4	15.5	575	18	97.0	12.0 / 2.9
Salmuera	3.4	14.8	57600	50	99.9	12.0 / 3.0

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo reflejan que un enfoque de desalinización basado en una integración efectiva de las funcionalidades de los materiales como el biocarbón electrotérmico y las fibras de algodón demuestran relevancia y potencial en términos de productividad, consumo de energía y regeneración de materiales. El sistema refleja facilidad para el escalamiento y la manufactura de cartuchos electrotérmicos reemplazables y, a la vez regenerables. El prototipo desarrollado, basado en el concepto y configuración descriptos, reviste particular interés para diversos sectores, entre ellos, la agroindustria. Su capacidad para recuperar agua dulce de fluidos con alta concentración de sólidos disueltos y material particulado ofrece una alternativa técnica viable donde las tecnologías convencionales encuentran sus mayores limitaciones operativas. Se destaca, a su vez, el uso y valorización de materiales provenientes de biomasa de caña de azúcar (RAC) lo cual contribuye a fortalecer el desarrollo de la economía circular dentro de la actividad sucroalcoholera.

APOYO FINANCIERO

Este trabajo fue financiado por el Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET): Beca doctoral de CONICET y la Universidad Nacional de Tucumán (UNT): Proyecto PIUNT-2022-E705.

REFERENCIAS

Araoz, M. E.; Marcial, A. F.; Trejo Gonzalez, J. A.; Avila, A. M. 2021. Renewable and electroactive biomass-derived tubes for CO2 capture in agroindustrial processes. ACS Sustain. Chem. Eng. 9, 7759-7768.

Avila, A. M.; Araoz, M. E. 2023. Merging Renewable Carbon-Based Materials and Emerging Separation Concepts to Attain Relevant Purification Applications in a Circular Economy. Ind. Eng. Chem. Res. 62, 4793-4799.

Chen, Y.; Yang, S.; Wang, Z.; et al. 2024. Transforming membrane distillation to a membraneless fabric distillation for desalination. Nat Water 2, 52–6.

Liu, G.; Li, J.; Qiao, G.; Xu, S.; Wang, H.; Lu, T. 2010. Hierarchical macroporous carbon processed with ethylene glycol and starch as double porogens. Mater. Lett. 64, 2696-2699.

Subrahmanya, T. M.; Widakdo, J.; Austria, H. F. M.; Hung, W. S.; Kurkuri, M. D.; Wang, C. F.; Lai, J. Y. 2023. Flow-through in-situ evaporation membrane enabled self-heated membrane distillation for efficient desalination of hypersaline water. Chem. Eng. J. 452, 139170.

Trejo Gonzalez, J. A.; Araoz, M. E.; Herrera, J. P.; Avila, A. M. 2022. Scalable and renewable electromembrane contactors for freshwater recovery through membrane distillation. Ind. Eng. Chem. Res. 61, 5493-5501.

Zhao, S.; Wang, C. Y.; Chen, M. M.; Sun, J. H. 2009. Mechanism for the preparation of carbon spheres from potato starch treated by NH4Cl. Carbon 47, 331-333.

MODELADO Y SIMULACIÓN DE UN SISTEMA DE DESTILACIÓN PARA ALCOHOL HIDRATADO

Pedernera, M.A.; Russo, M.N.; Medina, S.X.

Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres, Sección de Ingeniería y Proyectos Agroindustriales, Planta Piloto, Av. Willian Cross 3150 - Las Talitas - Tucumán - Argentina

Palabras clave: simulación de procesos, consumo específico de vapor, análisis paramétrico.

OBJETIVOS

Modelar en un simulador un sistema industrial de destilación para la obtención de alcohol hidratado empleando un modelo termodinámico adecuado para el sistema binario etanol-agua, analizando su desempeño energético y productivo.

Cuantificar el consumo específico de vapor en cada columna y en el sistema global, bajo las condiciones operativas nominales de la planta, analizando también la sensibilidad del proceso simulado frente a variaciones del caudal de alimentación de vino y de la temperatura de entrada del mismo.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los caudales se midieron mediante caudalímetros ultrasónicos de tiempo de tránsito y se efectuaron siete mediciones durante la zafra 2025, cuyos resultados fueron promediados.

Las corrientes monitoreadas fueron: vino de alimentación, reflujo y mal gusto en la columna destiladora; y producción, mal gusto, reflujo y fusel en la columna rectificadora. Debido a la cavitación en las líneas de medición, no fue posible determinar los caudales de vinaza ni de flemaza en la planta relevada (figura 1).

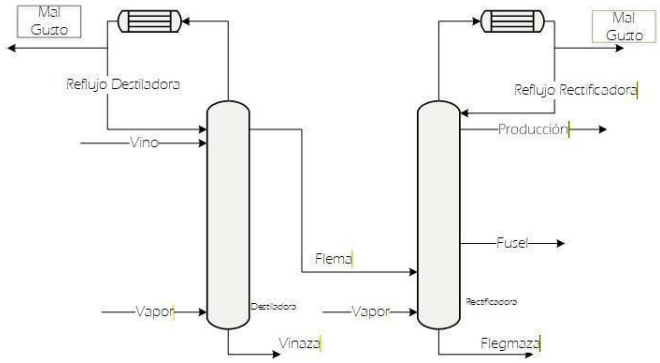


Fig. 1: Planta de destilación de alcohol buen gusto.

La instalación consiste en una columna destiladora de agotamiento con cabeza concentradora de vapores, conectada a una columna rectificadora donde la flema alcohólica de salida de la primera columna ingresa en fase gaseosa a la segunda columna.

Para determinar la concentración de etanol se tomaron muestras de vino de alimentación, mal gusto de la columna destiladora, producción y mal gusto de la columna rectificadora. Estas se analizaron en el laboratorio de calidad de biocombustible mediante determinación aerométrica, expresado el resultado como grado alcohólico (°GL).

La simulación del proceso se realizó mediante un simulador de código abierto de tipo secuencial modular. Se asumió operación adiabática en los equipos, despreciando pérdidas de calor hacia el entorno. El modelo termodinámico utilizado fue NRTL.

Las condiciones de presión de operación se establecieron a partir de valores reportados en la bibliografía para sistemas de destilación similares (Zarpelon, 2023, p. 167), verificándose su correspondencia con las temperaturas medidas industrialmente. Se consideraron entonces 3,5 m.c.a. en el fondo y 0,9 m.c.a. en la cabeza de la columna destiladora, y de 0,9 m.c.a. y 0,8 m.c.a. en el fondo y la cabeza de la columna rectificadora, respectivamente.

Se compararon los resultados simulados con los datos industriales medidos, contrastando principalmente el caudal de la corriente de producción.

Como condición de entrada del modelo de simulación, el caudal volumétrico de alimentación de vino se fijó en 27 m³/h a 70 °C considerando 8,5 °GL en la mezcla binaria etanol-agua, correspondientes a las condiciones operativas registradas en la planta.

RESULTADOS

Los valores promedios de las mediciones realizadas en planta se presentan en la tabla 1.

Tabla 1: Resultados del relevamiento realizado en la planta.

	Caudal [m³/h]	°GL
Vino	27	8,5
Reflujo Destiladora	1,8	-
Mal gusto Destiladora	0,2	90
Producción	2,2	96
Mal gusto Rectificadora	0,5	93,5
Reflujo Rectificadora	19,5	-
Fusel	0,3	-

Se realizó un caso de estudio variando el caudal de vapor de escape (0,7 bar manométricos y 115,2 °C) en la columna destiladora sobre la concentración de etanol en flema y vinaza (figura 2). Los resultados indican que un caudal de 5200 kg/h de vapor inyectado maximiza la concentración de etanol en la flema, y minimiza la concentración de etanol en la vinaza.

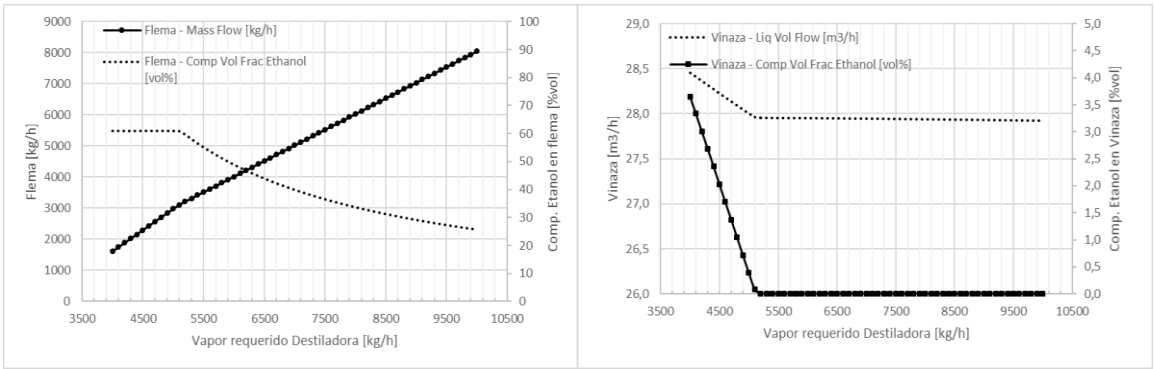


Fig. 2 : Variación de Flema y Vinaza y sus composiciones en función del consumo de vapor.

Por otro lado, en lo que respecta a la rectificadora, la figura 3 muestra el comportamiento lineal tanto del caudal de flemaza como de la relación de reflujo en función del caudal de vapor, estableciéndose un valor de 2000 kg/h como el mínimo requerido para cumplir las condiciones nominales de operación.

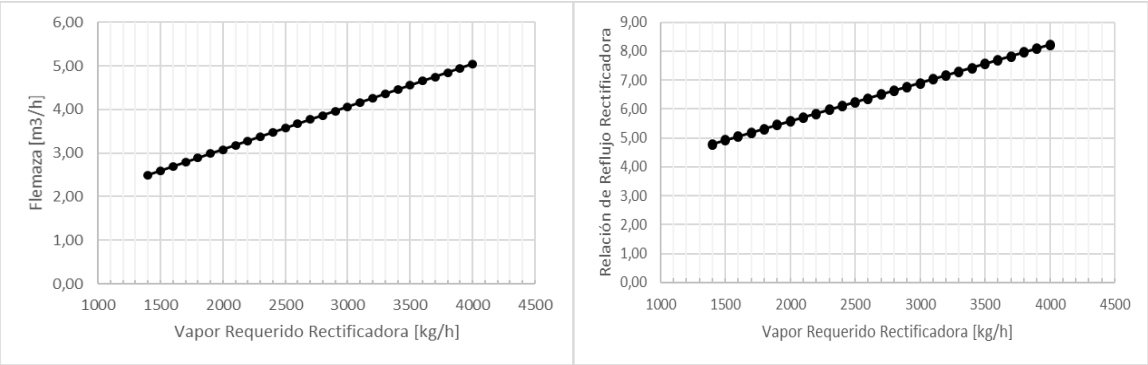


Fig. 3: Variación de Flemaza y relación de reflujo en función del consumo de vapor.

Los resultados obtenidos en las simulaciones, teniendo en cuenta las condiciones operativas relevadas en planta, se presentan en la tabla 2. La columna destiladora genera una corriente de flema con 1673,77 kg/h de etanol, mientras que la vinaza residual presenta una concentración de etanol prácticamente despreciable. En la columna rectificadora se obtiene una corriente de producción con 1658,19 kg/h de etanol y una flemaza con contenido de etanol despreciable.

Tabla 2: Resultados de la simulación.

	DESTILADORA				RECTIFICADORA		
	Vino	Vapor	Flema	Vinaza	Vapor	Producción	Flemaza
T [°C]	70	115,2	94,64	108,4	115,2	77,88	102,30
[m^3/h]	27,0	-	-	28,0	-	2,14	3,03
Etanol[v/v]	0,085	-	-	6,63E-05	-	0,96	0,00
Etanol[kg/h]	1826,8	0	1673,77	1,50	-	1658,19	0,00
Total [kg/h]	26482,0	5200	3072,86	28443,23	2000	1744,84	3078,87

A partir de los resultados de la simulación, se calcularon algunos indicadores de desempeño (tabla 3) los cuales permiten analizar la eficiencia de separación y demanda energética.

Tabla 3: Indicadores de desempeño de la destilación.

Producción diaria [m3/día]	51,34
Recuperación Etanol [%]	99,22
Tn vapor total/m^3 AH producido	3,37

La recuperación global de etanol, definida como la suma del etanol recuperado en las corrientes de producción y mal gusto, es consistente con esquemas convencionales (Zarpelon, 2023, p. 177).

La comparación entre la producción simulada y el valor medido en planta (tabla 4) muestra una desviación relativa inferior al 5 %.

Tabla 4: Comparación con los resultados reportados.

Producción [m3/h]	Valor de planta	Valor simulado	|Diferencia|	Error relativo [%]
	2,2	2,14	0,06	2,73%

En la figura 4 pueden verse los resultados de la simulación al variar el caudal de alimentación de vino que ingresa a la destiladora (25–35 m³/h) sobre el requerimiento de vapor en cada columna, el consumo específico de vapor, la producción de alcohol hidratado y la recuperación global de etanol.

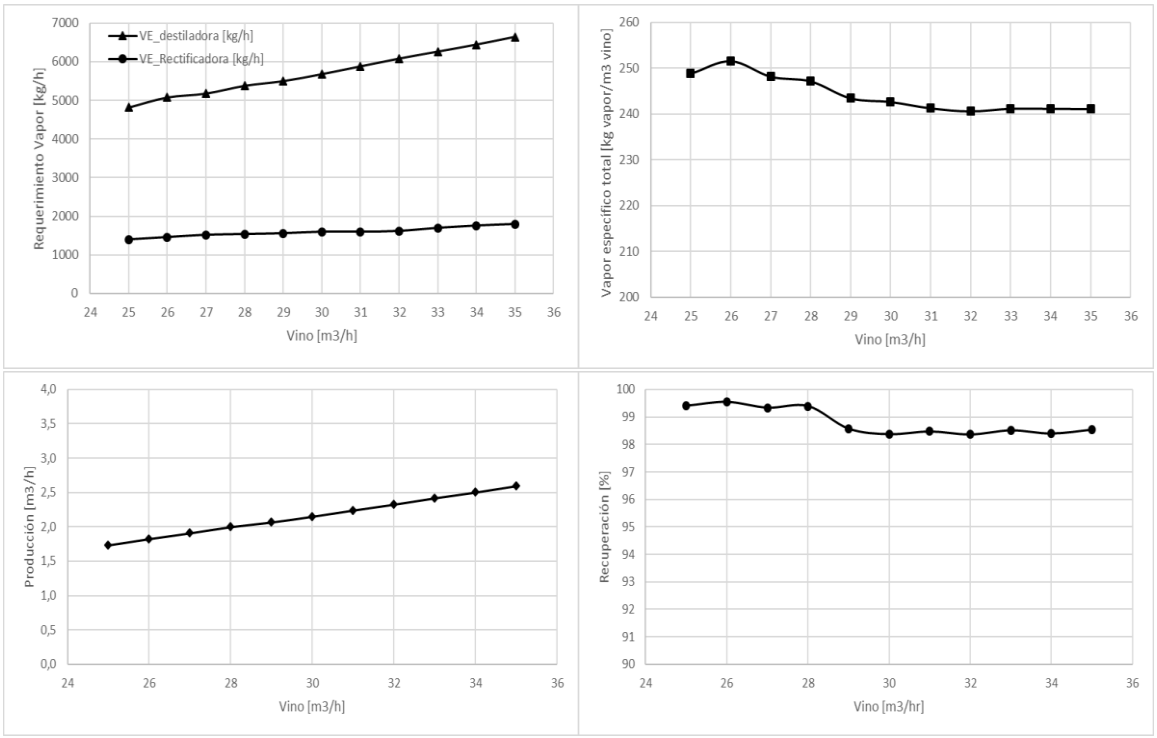


Fig. 4: La variación del vino en la demanda energética y el desempeño global del proceso.

Se observa que, en las columnas, el requerimiento de vapor aumenta linealmente con el caudal de vino. El consumo específico de vapor disminuye levemente y luego se estabiliza. La producción crece linealmente, mientras que la recuperación global de etanol disminuye ligeramente y luego se estabiliza. Estos resultados sugieren la posibilidad de operar a mayores caudales de vino sin afectar el desempeño dentro del intervalo estudiado.

Por último, la figura 5 muestra la influencia en la variación de temperatura en la alimentación de vino (70-90 °C) sobre el requerimiento de vapor y la recuperación global de etanol.

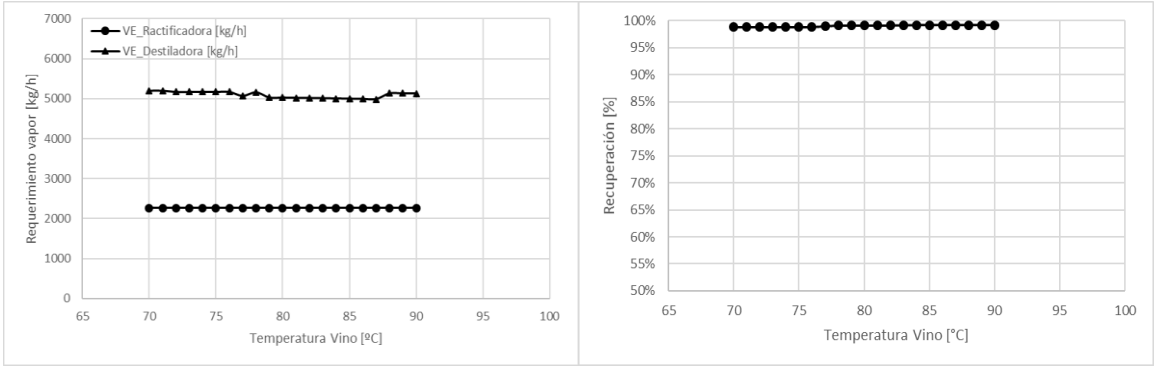


Fig. 5: Requerimiento de vapor y recuperación global al variar la temperatura del vino.

El incremento de la temperatura de alimentación produce cambios mínimos en el requerimiento de vapor en ambas columnas. La recuperación global de etanol permanece prácticamente constante, sin afectar significativamente el equilibrio de separación.

CONCLUSIONES

El sistema de destilación simulado ajustó los valores de producción de alcohol hidratado como variable de referencia, obteniéndose un error relativo inferior al 5%, lo que evidencia buena concordancia con los datos operativos de la planta.

A partir del modelo simulado se cuantificó el requerimiento de vapor permitiendo estimar la demanda energética del sistema de destilación. El incremento del caudal de alimentación mostró una respuesta favorable en la simulación, permitiendo vislumbrar la posibilidad de operar con mayores caudales sin afectar el desempeño del sistema. En contraste, la variación de la temperatura de alimentación evidenció una baja sensibilidad del proceso en el intervalo térmico evaluado.

El modelo simulado respondió de manera estable a los casos de estudios planteados, mostrándose como una alternativa de herramienta de análisis para diferentes circunstancias de operación de planta y evaluación de algunos cambios o mejoras operacionales.

BIBLIOGRAFÍA

Florenal Zarpelon. 2023. Destilación de etanol, 1ª ed.

Y. Lauzurique-Guerra, L. Zumalacárregui-de Cárdenas, O. Pérez-Ones, G. Molina-Rivero. 2016. Evaluación de técnicas de deshidratación de etanol aplicando la simulación.

EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL BRIXÓMETRO DE MICROONDAS SUCRE-MW MOD. T-25 EN TACHOS DE COCIMIENTO

Téc. Soler Valls J. M. ; Ing. Cisneros J. ; Ing. Peluffo S. ; Ing. Ruiz M. ; Ing. Russo M.

jm@solervalls.com.ar

Palabras Clave: Cristalización, Sensor de Brix, Tachos de Cocimiento.

Introducción

El proceso de cristalización en la industria azucarera es uno de los más relevantes y, sin embargo, continúa siendo altamente dependiente del factor humano, el Maestro de Tachos. La automatización de estos equipos ha sido ampliamente estudiada y documentada en la bibliografía especializada. Pero ésta no sería posible sin el corazón de esta estrategia de control que es el equipo sensor de la concentración de los sólidos solubles de soluciones de sacarosa, Brix %, particularmente en los Tachos de Cocimiento.
En nuestro país, algunos ingenios han incorporado sistemas desarrollados en el exterior como DSSE de Dinamarca, Berthold Technologies GmbH y ProMtec, de Alemania, Cail & Fletcher Hydrotrac Brix Probe, de Francia, Inmec de Finlandia, etc. Otros han realizado intentos aislados con controles básicos, pero la mayoría aún carece de algún tipo de medición del Brix en los Tachos y de sistemas integrales de automatización. Con el avance de la electrónica digital, los esfuerzos se han renovado. No obstante, persiste una tendencia a abordar el problema desde una perspectiva meramente económica, dado el elevado costo del equipamiento importado, o de capacidad instalada, sin considerar los beneficios de una operación uniforme que garantice la calidad del producto y el máximo agotamiento de mieles. Es importante reconocer que no todos los Tachos están en condiciones de recibir una automatización integral. Será necesario evaluar previamente la viabilidad técnica, considerando factores como la presencia de agitadores, geometría del diseño, rendimiento operativo, tipo de vapor utilizado, existencia de condensadores individuales, entre otros. Es posible lograr un gran avance, simplemente instalando en los Tachos de Cocimiento el elemento más importante del sistema de automatización futuro que es el sensor de Brix, el cual, aunque no integre un lazo de control, será de gran ayuda para el Maestro de Tachos.

Objetivos

1. Instalación y evaluación experimental del Brixómetro con tecnología de Microondas ***SUCRE-MW Mod. T-25***, en Tachos de Cocimiento.
2. Someterlo a pruebas de campo para verificar su funcionamiento durante un período razonablemente extenso, obteniendo registros de la concentración de la Masa Cocida en un Tacho de Cocimiento para azúcar Blanco Directo, operando las 24 hs del día.
3. Obtención de Muestras de Masa Cocida en distintos ensayos para ser analizadas en el Laboratorio de la EEAOC(Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres), de tal suerte que las lecturas del equipo, en Milivoltios (mV), pudieran ser convertidas en Brix%.
4. Generar una ecuación de conversión estadísticamente representativa.
5. Certificar la inclusión del Brixómetro de Microondas en un lazo de control y automatización de la operación de Tachos de Cocimientos en la industria azucarera.

Materiales y Métodos

El ***Coeficiente de Sobresaturación*** yq es un parámetro crítico en el control del proceso de cristalización de sacarosa. Depende de la pureza del jarabe, el contenido de sólidos disueltos $q_{ds/w}$ y la temperatura.

$$yq = \frac{\frac{w_s}{w_w}}{(w_s/w_w)_{sat}} \qquad (1)$$

- w_s: *fracción másica de sacarosa*
- w_w: *fracción másica de agua*
- $()_{sat}$: $condiciones\ de\ saturación$

Muchos artículos técnicos presentan la ***Fig. 1*** como ejemplo de curvas de sobresaturación en función de la temperatura, donde se destacan las clásicas cuatro zonas. Este gráfico es muy general y solo considera la sacarosa pura. La realidad de una fábrica azucarera donde se procesa las soluciones de sacarosa técnica, es diferente, aunque el concepto básico se aplica. Para mantener una alta tasa de cristalización, se requiere una sobresaturación elevada junto con una agitación eficiente, que favorezca la remoción de la capa fronteriza agotada en contacto con la cara del cristal.

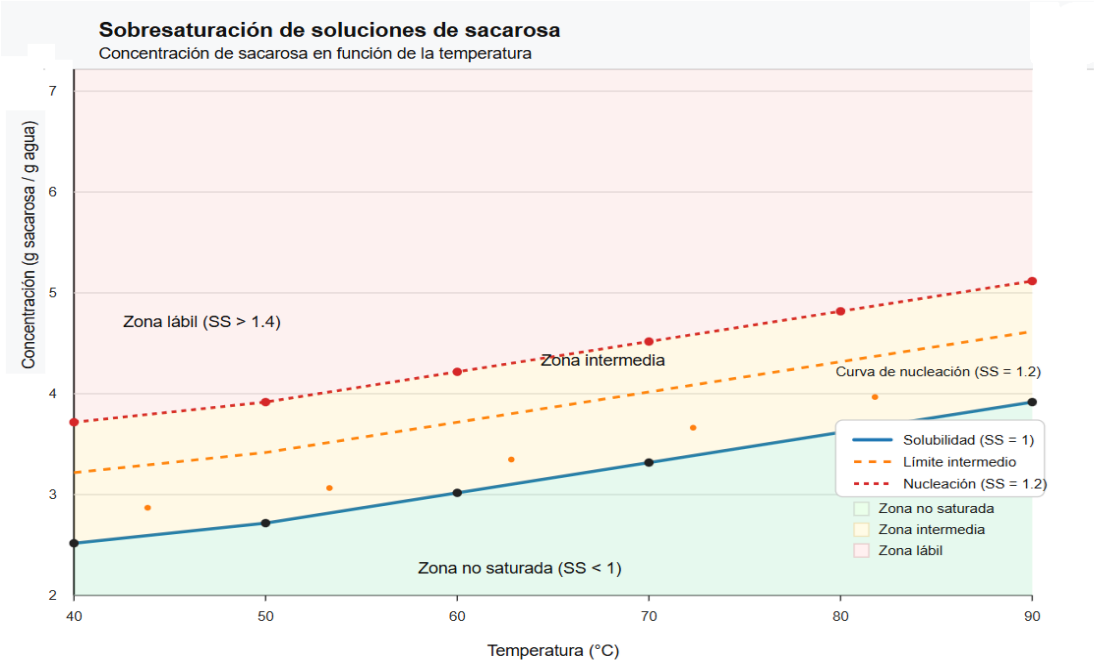


Fig. 1

- **Zona 1 – Subsaturada:** Sobresaturación < 1.00. No hay nucleación; los cristales tienden a disolverse.
- **Zona 2 – Metaestable:** Sobresaturación < 1.20. No hay nucleación espontánea, pero los cristales sembrados crecen muy lentamente.
- **Zona 3 – Intermedia:** Sobresaturación entre 1.20 y 1.30. Los cristales sembrados crecen rápidamente con muy poca posibilidades de nucleación durante la siembra.
- **Zona 4 – Lábil:** Sobresaturación > 1.40. La nucleación es espontánea y puede producirse una proliferación de cristales.

La ***Sobresaturación*** yq puede calcularse a partir de la medición de la concentración de los sólidos solubles, expresados como Brix %, mediante diversos métodos:

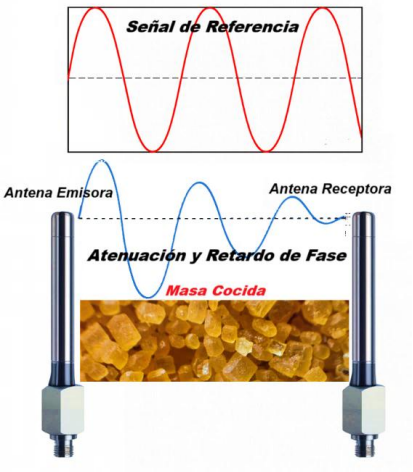
- *Elevación del punto de ebullición*

- *Índice refractométrico del licor madre*
- *Viscosidad o movilidad de la masa*
- *Constante dieléctrica*
- *Conductividad eléctrica*
- *Microondas*

Microondas

En la actualidad, la tecnología de microondas ha revolucionado la medición de Brix en la industria azucarera, desplazando métodos tradicionales, particularmente el hasta ahora muy usado, la conductividad, muy sensible a la presencia de sales disueltas de variado origen que distorsionan el principio de medición. Esta nueva tecnología, se basa en la interacción de las microondas con las propiedades dieléctricas de la solución azucarada. La medición precisa de Brix % es un parámetro crítico en la industria azucarera, para el cálculo del *Coeficiente de Sobresaturación* yq. Tradicionalmente, esta medición ha dependido de equipos importados de alto costo y complejidad operativa. En respuesta a esta necesidad, se ha desarrollado en Tucumán un instrumento de última generación, ***SUCRE-MW Mod. T-25*** y ***SUCRE-MW Mod. T-26*** diseñados para ofrecer precisión, robustez y competitividad tecnológica frente a soluciones extranjeras.

Funcionamiento: Las microondas atraviesan el producto, generando un ***desplazamiento de fase y una atenuación***, proporcionales al contenido de agua principalmente, porque las microondas son absorbidas por las moléculas de agua libres. La concentración o Brix se determina con precisión mediante una calibración lineal basada en estos parámetros físicos.



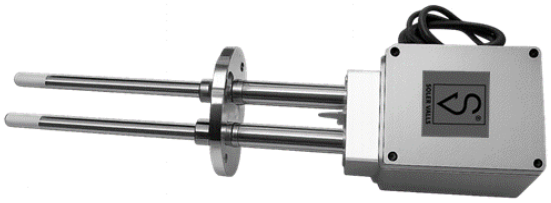


Fig. 2 *- Esquema de medición de concentración mediante señales de alta frecuencia. El gráfico ilustra cómo una señal de alta frecuencia (HF) o micoondas (MW), se transmite a través de la Masa Cocida. Se comparan la señal de referencia y la señal modificada, destacando los* ***cambios en fase y amplitud****. Este principio es clave para determinar la concentración de sólidos disueltos en tiempo real.*

SUCRE-MW Mod. T-25

- **Sonda doble de acero inoxidable:** *Las antenas de emisión y recepción están encapsuladas en el extremo de Teflon de alta dureza. Proporciona medición simultánea de fase y amplitud, clave para determinar la concentración de sólidos.*
- **Brida de montaje universal:** *Facilita la integración en sistemas existentes sin modificaciones estructurales.*

- **Electrónica encapsulada:** *Protege contra humedad, vibraciones y variaciones térmicas.*
- **Interfaz digital configurable:** *Compatible con sistemas SCADA y protocolos industriales estándar, ModBus, Ethernet Industrial, WiFi, etc.*
- **Desarrollo nacional:** *Fabricado íntegramente en el país, con componentes locales y soporte técnico directo.*
- **Costo optimizado:** *Menor inversión inicial y gastos de mantenimiento reducidos.*
- **Adaptabilidad:** *Diseñado para las condiciones específicas de los ingenios locales.*
- **Soporte técnico inmediato:** *Sin dependencia de proveedores extranjeros ni tiempos de espera prolongados.*
- **Certificación industrial:** *Cumple con normas de seguridad eléctrica, compatibilidad electromagnética y estándares alimentarios.*
- **Calidad de los materiales a nivel internacional:** *estructura principal en acero inoxidable y componentes electrónicos certificados.*
- ***Aplicaciones Industriales en Cristalización y Evaporación:*** *El control de Brix permite determinar el punto óptimo de siembra de cristales y monitorear la calidad del magma B o C, asegurando cristales uniformes y mejorando la eficiencia de la cristalización.*
- ***Producción continua:*** *Sistemas diseñados para funcionamiento 24/7, con alta estabilidad y mínima necesidad de mantenimiento.*
- ***Otras aplicaciones:*** *Para la medición de densidad y concentración en jugos crudos, jarabes, magmas de semillas, mezcladores, melazas, etc., se dispone del modelo* ***SUCRE-MW Mod. T 26,*** *insertable directamente roscado en un buje soldado a la cañería o pequeño recipiente de mezcla*



SUCRE-MW Mod. T-25



Fig. 3

Resultados
Análisis del día 23/10

El registro obtenido durante las 24 hs., del 23/10, se muestra en la ***Fig. 4***. Este gráfico permite observar con total claridad la metodología de trabajo del Maestro de Tachos: la alimentación de melado-miels-jarabe se regula manualmente, abriendo o cerrando la válvula durante un tiempo que resulta de la observación de la movilidad que tiene la Masa Cocida en las lunetas de vidrio, que en definitiva es la **"medida del Brix"** para el operario. Y éste es el punto crucial donde esa observación tan primaria es la clave de la ineficiente operación del equipo. Se

amplía el registro para mayor claridad entre las ***04:00 y las 08:00*** *hs. ,* ***Fig. 5***, detallando aún más el procedimiento.

Fig. 4

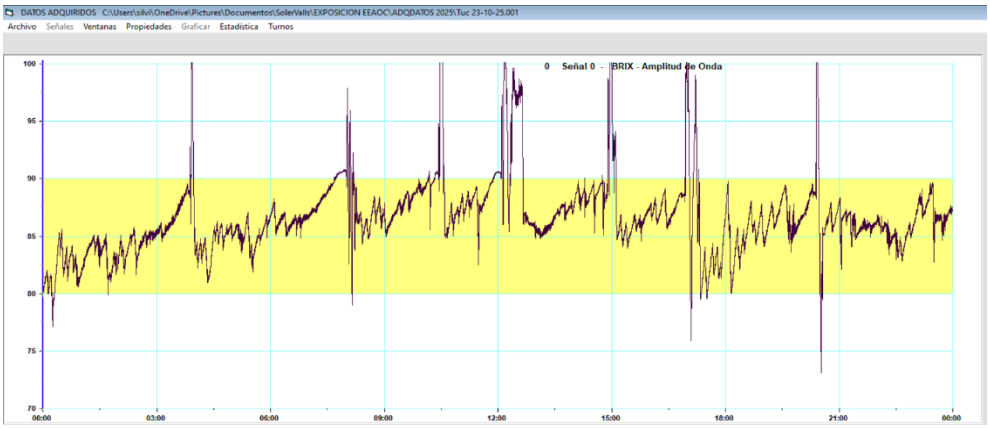


Fig. 4



Fig. 5

Para hacer un análisis exhaustivo, ampliamos más, entre las ***04:00 y las 04:30***, ***Fig. 6***, período de alimentación del Tacho de Cocimiento de la manera usual, abriendo la válvula, hasta las ***04:21*** hs., lo cual produce una caída significativa del Brix: ***81.10 %***. Utilizando el programa ***SugarProp,*** con ese valor, en ***Fig. 6***, completamos datos asumiendo una presión (vacío) normal en este tipo de ingenios de ***0.22 bara***. El vapor vegetal saturado en la cabeza del Tacho es de ***62.13 ºC***. Suponiendo que el objetivo es obtener una *Templa A* de ***85 %*** de Pureza, vemos, ***Fig. 6***, que el aumento del punto de ebullición es de ***8.5 ºC***, es decir que la Templa en sí tiene una temperatura de ***70.63 ºC*** en su punto de ebullición, lo que da como resultado un ***Coeficiente de Sobresaturación*** $yq = 1.114$ **.**

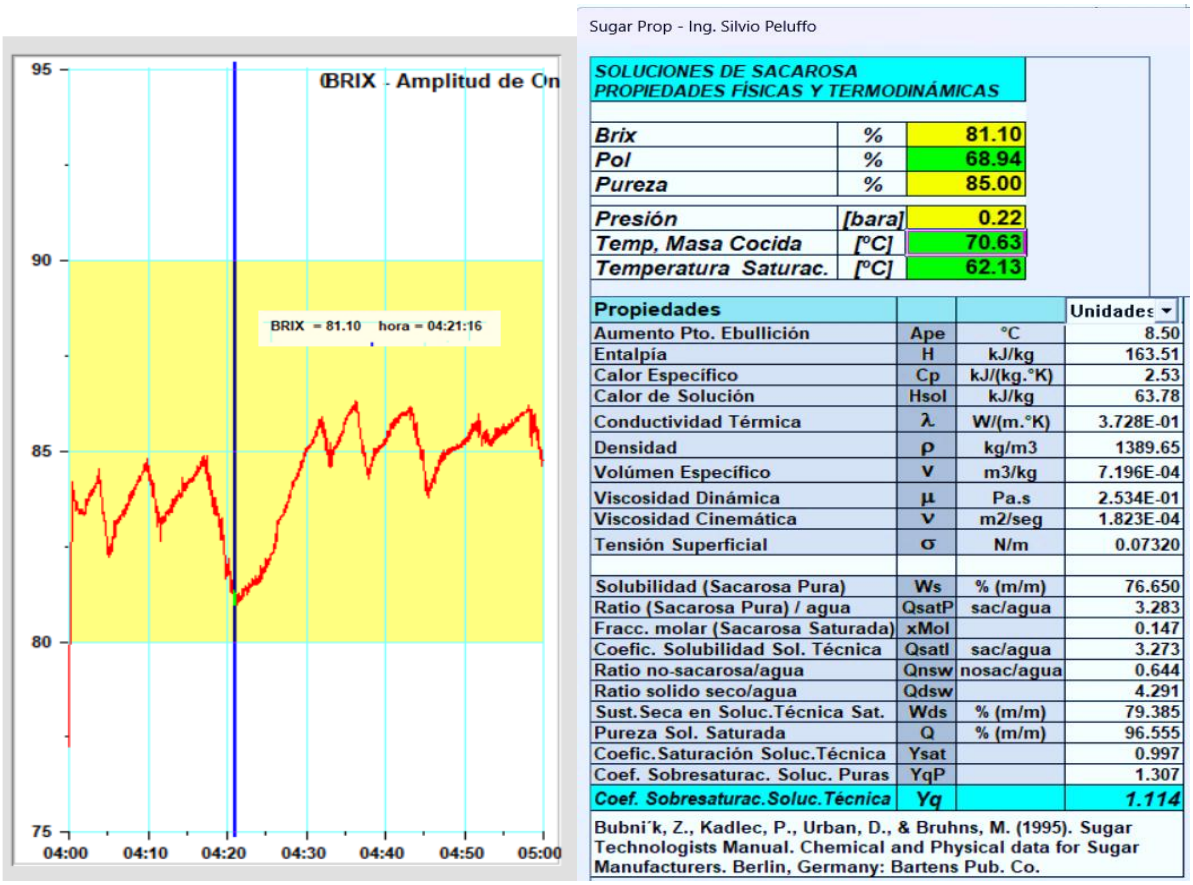


Fig. 6

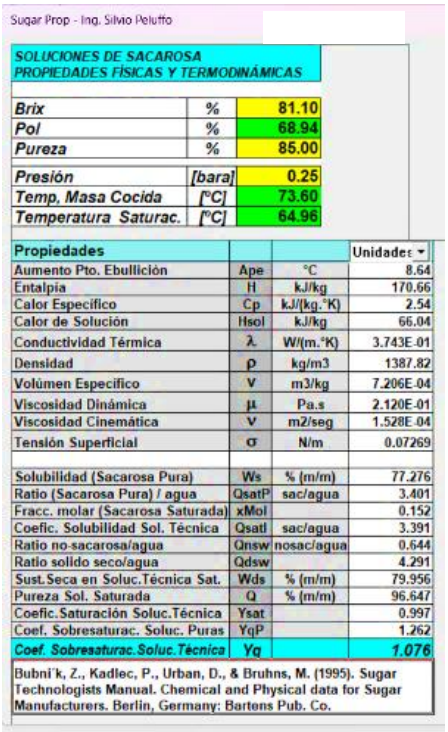
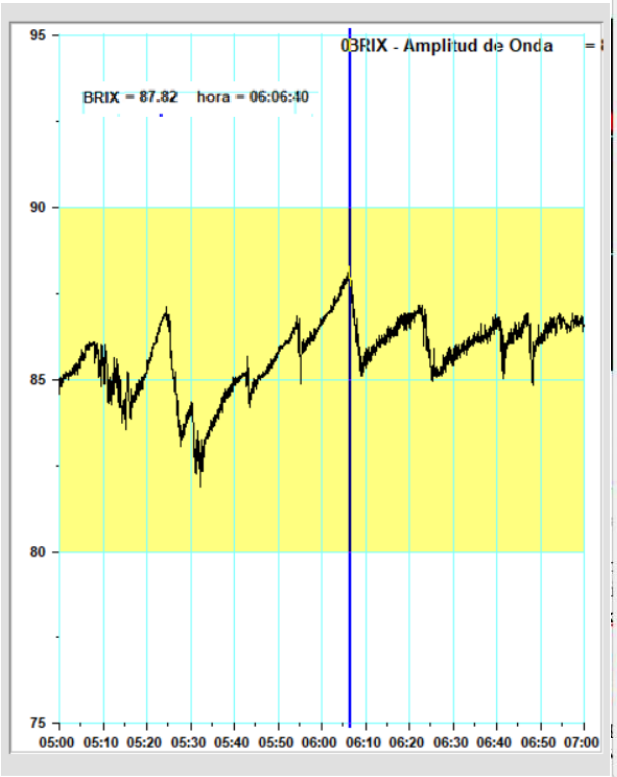


Fig. 7

Ese valor de *Sobresaturación*, es muy bajo y si consideramos que el mínimo es ***yq = 1.2*** para que haya transferencia de sacarosa desde el licor madre hacia el cristal, es posible que esté ocurriendo lo contrario, disolviéndose cristales, o al menos sólo evaporando agua, con pérdida de tiempo y mayor consumo de vapor. Ahora vamos a suponer una condición peor de trabajo del Tacho, con una presión de ***0.25 bara***, ***Fig. 7***, lo cual es muy normal dado el deterioro esperado por lo avanzado de la zafra, de bombas de vacío, cañerías, válvulas, etc. En estas condiciones la temperatura sube a ***73.6 ºC***, y la ***Sobresaturación*** calculada baja a ***yq = 1.076***, situación muy desfavorable, y seguramente se disolverán cristales, se prolongará el tiempo y aumentará el consumo de vapor. El Maestro, por alguna razón, dejó caer, o no pudo hacer nada para impedir que el Brix baje a un valor no deseado. Para corregirlo, se cierra la válvula a ***las 04:17 hs.*** y se concentra para alcanzar casi el mismo Brix % , ***85 %*** a las ***04:30 hs***., unos ***13 minutos después***. Podemos concluir entonces que con una alimentación automática, manteniendo constante el *Brix en* ***85 %*** ,que se tenía inicialmente, el tiempo se hubiera reducido por el tipo de curva, descenso *y ascenso, casi la mitad*, es decir que se perdieron unos ***6 minutos solamente en esa etapa tan breve de la Templa. Extrapolado a un Cocimiento completo, el tiempo perdido es muy significativo, probablemente más de 30 minutos por Templa.***

Por el contrario si analizamos la porción del gráfico entre las ***06:00 hs.*** *y las* ***06:30 hs***., donde tenemos un pico de Brix, vemos en la ***Fig. 8***, que éste ocurre a las ***06:06 hs.*** con un valor de *Brix %,* ***87.82*** Aplicado a ***SugarProp***, para las condiciones normales de trabajo, ***0.22 bara*** *y* ***85.00%*** *de Pureza*, el valor de *Sobresaturación* es ***yq = 1.625, más que suficiente para que haya cristalización espontánea (falso grano).***



Sugar Prop - Ing. Silvio Peluffo

SOLUCIONES DE SACAROSA
PROPIEDADES FÍSICAS Y TERMODINÁMICAS

Brix	%	87.82
Pol	%	74.65
Pureza	%	85.00
Presión	[bara]	0.22
Temp, Masa Cocida	[°C]	76.43
Temperatura Saturac.	[°C]	62.13

Propiedades			Unidades
Aumento Pto. Ebullición	Ape	°C	14.29
Entalpía	H	kJ/kg	166.67
Calor Específico	Cp	kJ/(kg.°K)	2.43
Calor de Solución	Hsol	kJ/kg	73.13
Conductividad Térmica	λ	W/(m.°K)	3.516E-01
Densidad	ρ	kg/m3	1431.07
Volúmen Específico	v	m3/kg	6.988E-04
Viscosidad Dinámica	μ	Pa.s	2.065E+00
Viscosidad Cinemática	ν	m2/seg	1.443E-03
Tensión Superficial	σ	N/m	0.07288
Solubilidad (Sacarosa Pura)	Ws	% (m/m)	77.949
Ratio (Sacarosa Pura) / agua	QsatP	sac/agua	3.535
Fracc. molar (Sacarosa Saturada)	xMol		0.157
Coefic. Solubilidad Sol. Técnica	Qsatl	sac/agua	3.771
Ratio no-sacarosa/agua	Qnsw	nosac/agua	1.082
Ratio solido seco/agua	Qdsw		7.210
Sust.Seca en Soluc.Técnica Sat.	Wds	% (m/m)	81.604
Pureza Sol. Saturada	Q	% (m/m)	95.521
Coefic.Saturación Soluc.Técnica	Ysat		1.067
Coef. Sobresaturac. Soluc. Puras	YqP		2.040
Coef. Sobresaturac.Soluc.Técnica	***Yq***		***1.625***

Bubni´k, Z., Kadlec, P., Urban, D., & Bruhns, M. (1995). Sugar Technologists Manual. Chemical and Physical data for Sugar Manufacturers. Berlin, Germany: Bartens Pub. Co.

Fig. 8

La evaluación experimental del Brixómetro de Microondas ***SUCRE-MW Mod. T-25*** en Tachos de Cocimiento, tenía como objetivo principal someterlo a pruebas de campo, obtener registros del desarrollo de una Templa en un Tacho de Cocimiento para azúcar Blanco Directo, operando las 24 hs del día, y tomar muestras de Masa Cocida en distintos ensayos para analizarlas en el Laboratorio de la EEAOC. Los datos de cuatro sesiones de muestras se graficaron, ***Fig. 9,*** obteniéndose las ecuaciones de la regresión lineal para cada una. Finalmente y teniendo en cuenta que las ecuaciones son muy similares, con un alto R^2, es posible agrupar la totalidad de las muestras para una regresión lineal única. La ecuación ***(2)*** resulta muy significativa porque permite concluir que las mediciones efectuadas durante el

$$Bx\% = 0.058725 * mV + 56.8875 \quad R^2 = 0.96051 \qquad \textbf{(2)}$$

período de prueba, son consistentes, ya que se han obtenido registros muy parecidos en los distintos ensayos llevados a cabo aleatoriamente en condiciones operativas con alimentación de melado, mieles, jarabes, etc., de origen variado, confirmando que el sensor de Brix de microondas es muy poco sensible a los materia seca en sí misma, al menos dentro del rango del ensayo, 70-100 Brix %, y solo el agua participa como el factor más importante en la atenuación y desfasaje de la señal de microondas emitida, que se confirma con la ecuación

final, regresión lineal de todas las muestras, que tiene un R^2 que explica que el 96 % de las lecturas del instrumento serán correctas.

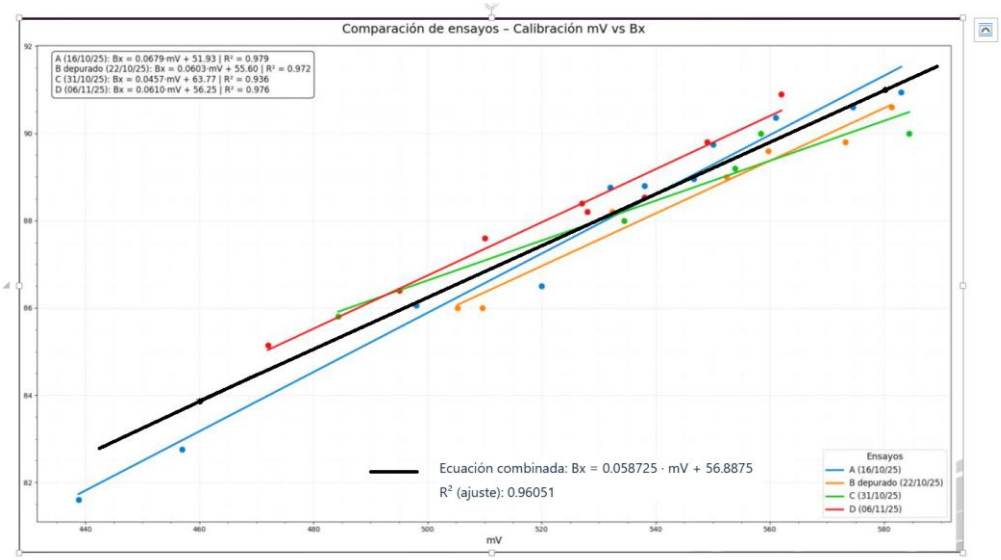


***Fig. 9**. Gráfico comparativo de Calibración de mV – Brix % de cuatro ensayos.*

Esto no significa que esta ecuación es válida para todos los casos de equipos instalados en la fábrica, ya que la posición del sensor, la geometría del Tacho, las condiciones de alimentación, el tipo de Masa Cocida, y algunas especiales para cada ingenio azucarero, pueden modificar las lecturas, por lo que será necesario una calibración previa, pero con ***no más de tres puntos.***

Conclusiones

- El medidor de Brix por microondas ***SUCRE-MW Mod. T-25*** demostró *alta confiabilidad y precisión.*
- La dispersión observada en los gráficos responde a la variabilidad del proceso manual, no a fallas del equipo.
- Se ha certificado una muy razonable desviación del valor de lectura del Brix % obtenido por este instrumento de manera indirecta, frente a los valores obtenidos en el Laboratorio de la EEAOC.
- El equipo es robusto y confiable trabajando continuadamente por un período prolongado sin fallas.
- Los datos obtenidos han permitido un análisis más profundo y por lo tanto explicar el funcionamiento en base al manejo de los Maestros de Tachos, operando equipos sin información del estado de ***Sobresaturación de la Templa***. Su trabajo es muy artesanal, guiándose solamente por la observación visual de la movilidad de la Templa en los visores ad-hoc, lo cual conduce a resultados dispares en cuanto a calidad de cristales y tiempo de aprovechamiento de los Tachos de Cocimiento.
- Se ha confirmado que la medición del Brix en Tachos de Cocimiento con el sensor de microondas, ***SUCRE-MW Mod. T-25***, es muy independiente de los sólidos solubles de la Masa Cocida, o sea casi exclusivamente dependiente del contenido de agua.
- ***En la Fig.10 y siguientes, se muestran los gráficos de varios días de producción, y la información que ofrecen es contundente***: ***La frecuencia, que durante el desarrollo de una Templa, conducida manualmente se superen los límites de Sobresaturación, superior o inferior, es muy alta***, lo cual explica, sin lugar a dudas, la formación adicional de falso grano y de conglomerados, tiempo perdido en tratar de

corregir las desviaciones, muy alta recirculación de mieles, mayor consumo de vapor, etc.

- La diferencia de desarrollo de las distintas Templas pone en evidencia la variada metodología de trabajo y las desviaciones sobre un proceso técnicamente posible y eficiente con ***las herramientas adecuadas, en este caso el sensor de Brix***.
- Hay una marcada incidencia de las condiciones operativas del Tacho, como su diseño, si tiene agitación mecánica, aislación, roturas en cañerías y válvulas que afectan el vacío, variaciones de presión de vapor, etc.

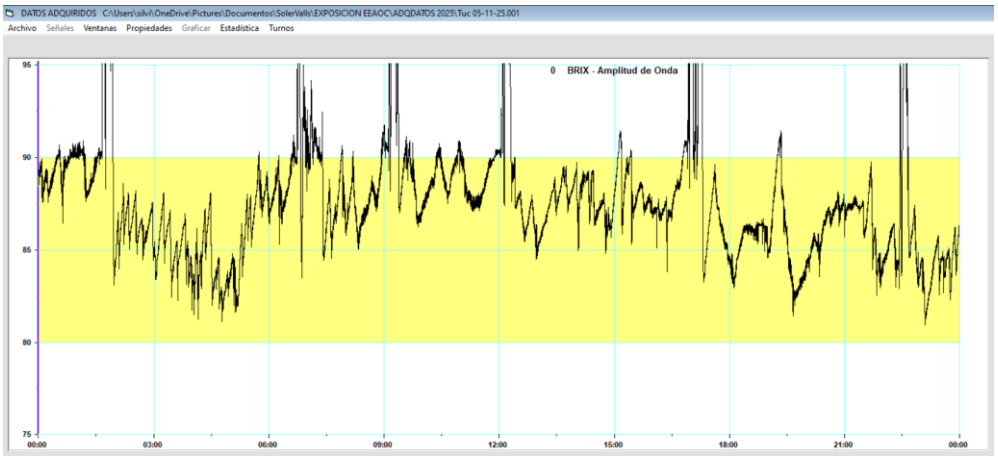


Fig. 10

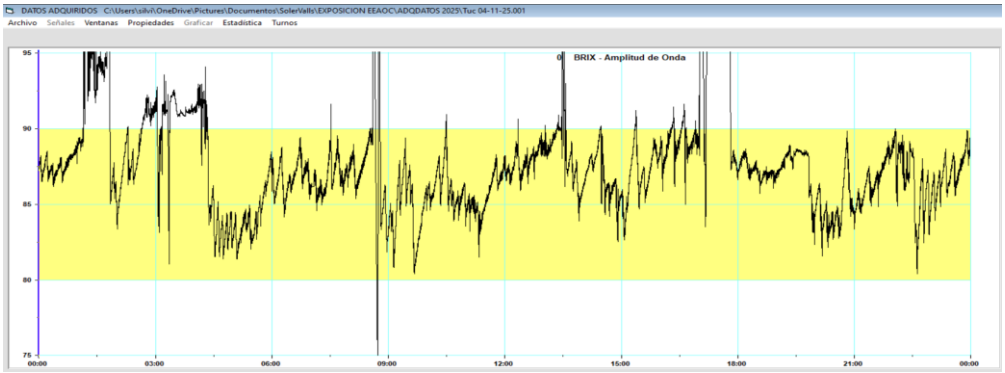


Fig. 11

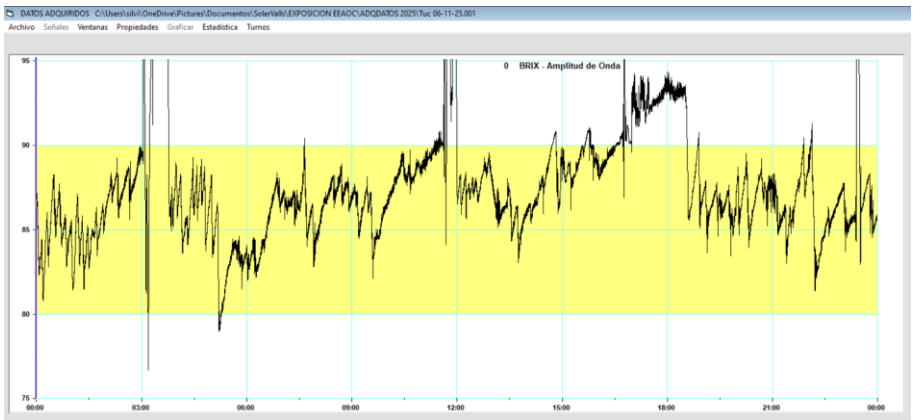


Fig. 12

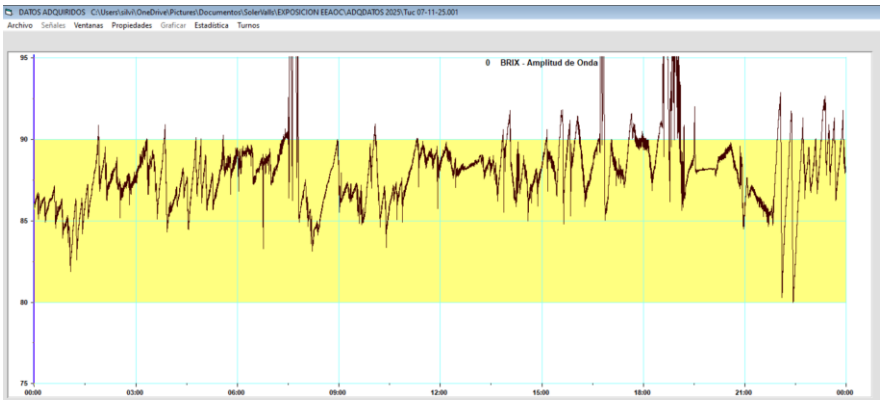


Fig. 13

Bibliografía

Cane Sugar Engineering. Peter Rein. Verlag Bartens. 2007.

Manual para ingenieros Azucareros, HUGOT E., (Segunda edición en Español 1984, Compañía Editorial continental S.A), pp 85-249.

Sugar Boiling Some Useful Strategies by John Ziegler. 2002.

On-line monitoring of supersaturation in sugar crystallization. By Lajos Rozsa, International Sugar Journal, Vol. 98; Nº 1176.1996.

Sugar Technologists Manual by Z. Bubnik, P. Kadlec, D. Urban, M. Bruhns (Verlag Dr. Albert Bartens KG Lückhoffstraße 16 14129 Berlin, Germany).

EFECTO DEL COLOR DE LA MELAZA SOBRE EL RENDIMIENTO EN EL PROCESO DE FERMENTACIÓN

Saska M.[a]; Zossi, S.[a]; Coronel M. [a]; Ruiz R. M.[a,*]

[a] Ex investigadores de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC). Av. William Cross 3150. Las Talitas. Tucumán. Argentina. CP: T4101XAC.
[*] marceloruiz@eeaoc.org.ar

Palabras clave: caña de azúcar; melaza; alcohol; *Saccharomyces cerevisiae*.

Introducción

El estudio de compuestos hidrosolubles no azúcares en los productos finales del procesamiento del azúcar es de importancia en la industria azucarera. Los colorantes producidos por la degradación de hexosas y los presentes en la caña de azúcar de manera natural pueden formar colorantes de alto peso molecular que estarán presentes en las mieles finales (melazas). Colorantes como las melanoidinas han sido reportadas como sustancias que afectan el proceso fermentativo al aumentar el color en la melaza y reducir el rendimiento en alcohol. Esos compuestos se forman durante la ebullición de las soluciones azucaradas, como resultado de la reacción de Maillard entre azúcares reductores y aminoácidos presentes.

S. Kale (2021) reportó que el incremento de los niveles de colorantes en la melaza provoca una disminución progresiva del rendimiento en etanol durante la fermentación alcohólica. Los datos muestran una caída casi lineal de la productividad de la levadura con el aumento del color de la melaza. En una publicación anterior, Godbole (2002) informó un efecto menor, del orden de una reducción del rendimiento del 20–25 % a valores de color superiores a 400. Otras referencias que documentan efectos negativos de la presencia de los colorantes sobre la productividad de la levadura pueden encontrarse en la literatura.

No se proporcionaron mayores detalles sobre el origen ni la aplicabilidad de los datos de Kale, pero de confirmarse, estos resultados tendrían implicancias significativas para la industria azucarera, para la cual el etanol se ha convertido en una importante fuente de ingreso.

Objetivo

El objetivo de esta investigación fue evaluar la influencia del color de la melaza en la eficiencia de la fermentación mediante la adición de melanoidinas sintéticas o por modificación térmica de la melaza, a diferentes niveles de color, en sistemas controlados de fermentación por lotes, a escala de laboratorio, simulando operaciones industriales.

Materiales y métodos

Aumento del color

Se usaron dos (2) métodos alternativos para aumentar el color en las melazas:

a) Adicionando a las muestras de melaza colorantes sintéticos (melanoidinas y productos de la reacción de Maillard - MP) formados en el seno de una mezcla, al calentar a ebullición una solución acuosa de glucosa y glicina en relación 2:1, durante 15 minutos.
b) Calentando las muestras de melazas para aumentar el color, semejante a lo que sucede en la industria, a distintos tiempos y a diferentes temperaturas.

Luego del tratamiento, el color de las muestras de melaza (indicado por la elipse en la Figura 1) se ubicó dentro del rango reportado por Kale (2021) y Godbole (2002) para melazas industriales de caña de azúcar.

En este rango de color, la productividad de la levadura (L de etanol/kg de levadura) en melazas de 400 colores (0,6 de productividad) debería ser aproximadamente 40% menor que la melaza de bajo color (1,0 de productividad).

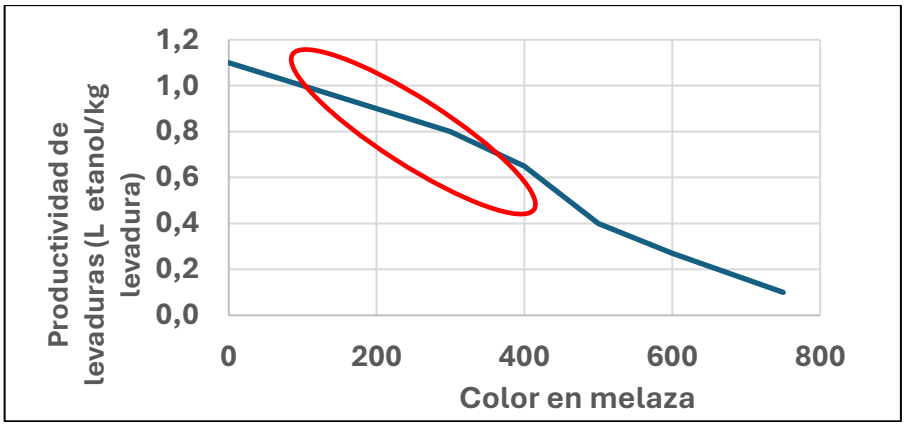


Figura 1: Efecto del color de la melaza sobre la productividad de la levadura (L etanol/kg levaduras – adaptado de Kale, 2021)

Determinación del color

El color se determinó por espectrofotometría, midiendo la absorbancia de una solución acuosa de melaza de 1g/L, sin ajuste de pH ni filtración, a 375 nm.

$$\text{Color } (C_{375}) = 1000 \times Abs_{(1g/L)}$$

Determinación de azúcares

El contenido de azúcares fermentables se determinó con un equipo de HPLC, equipado con una columna Waters Sugar-Pak 1 con detector de índice de refracción.

Procedimiento

Los ensayos en el laboratorio siguieron procedimientos ya publicados (Basso *et al*., 2008; Raghavendran *et al*., 2017; Lino *et al*., 2018), que permitieron seguir el proceso industrial de producción de etanol común en ingenios azucareros de Brasil, a escala reducida.

Se utilizaron tubos de centrífuga de polipropileno de 50 mL con fondo cónico, tapados, pero con una pequeña perforación en el centro de cada tapa para permitir la salida de gases. Los tubos se colocaron en un agitador orbital a temperatura constante de 30 °C y 200 rpm.

La producción de etanol se determinó pesando los tubos (± 0,001 g) al inicio y aproximadamente cada 30 minutos (ensayos año 2022), o bien a las 7 y 20 horas de iniciada la fermentación (ensayos año 2023).

El primer ciclo de fermentación se inició pesando levadura panadera seca granulada (www.calsa.com.ar) en cada tubo. En los ensayos cinéticos de 2022 se utilizaron 0,750 ± 0,001 g de levadura, mientras que en los ensayos con reciclado de levadura, en 2023, la cantidad de levadura fresca se redujo a 0,150 ± 0,001 g, asegurando que a las 7 horas la fermentación estuviera aún incompleta.

La levadura fresca se hidrató con 10 mL de agua desionizada durante 30 minutos en el agitador a 30 °C. La levadura hidratada se centrifugó (4 min, 80 % de la velocidad máxima) y el sobrenadante se descartó. Para simular la práctica industrial, se agregó 2,5 mL de ácido sulfúrico diluído a pH 2 a cada tubo, manteniéndose los tubos a 30 °C durante otros 30 minutos. Luego se agregaron 12,5 mL de melaza diluida (25 °Bx ± 0,1 °Bx), se pesaron los tubos y se colocaron nuevamente en el agitador para iniciar la fermentación. Los ensayos que incluyeron el reciclaje de levadura, al final de cada ciclo, tras pesar los tubos, se centrifugó la levadura y se recogió el sobrenadante para su análisis. El pellet de levadura se lavó resuspendiéndolo en 10 mL de agua desionizada con agitador Vortex y volviéndolo a centrifugar. Se añadieron 2,5 mL de ácido sulfúrico diluido y 12,5 mL de materia prima diluída y se inició un nuevo ciclo de fermentación.

Con una densidad de 1,1 g/mL, el peso de la materia prima en cada ensayo de fermentación se calculó en 13,8 g, o entre 1,9 y 2,4 de materia sólida.

Resultados

La pérdida total de peso ΔW (g) es una combinación del peso del CO_2 liberado, que a su vez es proporcional al etanol producido y de la pérdida de peso por evaporación. Esta última es difícil de cuantificar. Se asumió que la pérdida de peso por evaporación es únicamente una función del tiempo y no afecta la comparación del rendimiento fermentativo.

Para comparar los rendimientos fermentativos entre melazas, se calculó un rendimiento fermentativo aparente (AFY) como porcentaje del rendimiento teórico máximo, según la siguiente expresión:

AFY (% del teórico) = ΔW / (13,8 × Bx/100 × FS/100 × 0,489)

Donde:

- ΔW: pérdida neta de peso (en gramos) desde el inicio de la fermentación.
- 13,8: peso del sustrato (g)
- Bx: Brix del sustrato
- FS: contenido de azúcares fermentables en el sustrato expresado como g de azúcar/g de Brix (Tabla 1)
- factor 0,489: corresponde al rendimiento teórico máximo de CO_2 (g/g de azúcar fermentable).

En la Figura 2 se observa la cinética de fermentación de la melaza original (A) y de la misma melaza con el color incrementado mediante la adición de colorantes MP (B). Debido a la pérdida adicional de peso por evaporación, el AFY final fue más elevado (96–99 %) que los rendimientos que se obtendrían a partir del título de etanol en el vino fermentado. En condiciones similares, Lino *et al*. (2018) y Raghavendran *et al*. (2017) reportaron rendimientos entre 85 y 95 %. Se estima que las perdidas por evaporacion pudieron haber contribuido con aproximadamente un 10 % a la pérdida total de peso determinado.

Las melazas enriquecidas con MP presentaron colores significativamente más altos, aproximadamente un 40 % (Figura 2, gráfico izquierdo) y un 90 % (Figura 2, gráfico derecho) superiores a los de la melaza control A. A pesar de ello, ni la cinética de fermentación ni los rendimientos finales se vieron afectados.

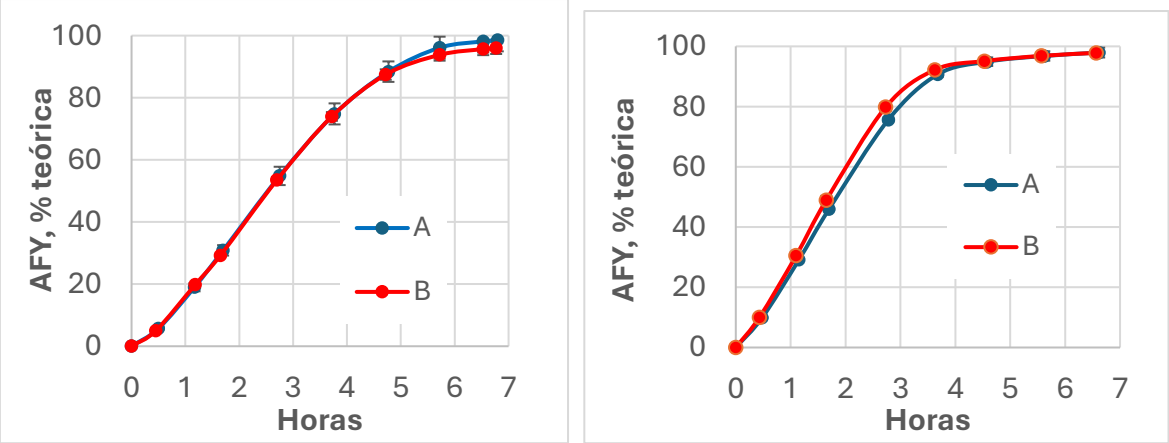


Figura 2: Cinética de fermentación de la melaza original (A) y de la misma melaza con el color incrementado mediante la adición de melanoidinas sintéticas (B). Color de la melaza A = 180. Color de la melaza B = 260 (izquierda) y 340 (derecha). Barras de error = ± 1 desviación estándar, basadas en ensayos triplicados.

Reciclo de levaduras

La composición de las melazas utilizadas como sustrato en los cuatro ensayos de 2023 se presentan en la Tabla 1. Las melazas originales provinieron de dos ingenios azucareros de Tucumán y fueron muestreadas en distintos momentos de la zafra. Ambos ingenios emplean clarificación del jugo y del jarabe por sulfatación.

Cada ensayo incluyó fermentaciones paralelas de tres melazas: la melaza original sin tratamiento térmico (A) y la misma melaza luego de ser calentada, con incremento de color (melazas B y C).

Tabla 1: Color y contenido de sacarosa (Sac), glucosa (Gluc), fructosa (Fruc) y azúcares fermentables (FS) totales (todos expresados como % Brix) de las melazas A, B y C en los cuatro ensayos de 2023.

Ensayos	Melazas	Color	Sac	Gluc	Fruc	FS
1	A	101	59,0	2,1	3,2	67,2
	B	123	57,9	2,1	3,2	66,1
	C	143	56,4	2,2	3,6	65,0
2	A	144	63,1	2,8	4,7	73,7
	B	214	59,4	3,0	4,9	70,4
	C	271	56,4	3,7	5,6	68,5
3	A	276	48,6	3,2	5,5	59,8
	B	349	47,4	2,9	5,5	58,2
	C	399	46,2	2,8	5,4	56,7
4	A	166	51,1	2,2	4,8	60,7
	B	237	49,3	1,8	4,5	58,1
	C	260	47,0	2,0	4,7	56,0

En el ensayo 1 se realizaron dos ciclos de fermentación; en los ensayos 2 y 3, tres ciclos; y en el ensayo 4, se completaron cuatro ciclos de fermentación. Cada fermentación se realizó por triplicado, totalizando 108 fermentaciones.

Efecto de los colorantes sobre el crecimiento de la levadura

En el primer ciclo, la biomasa de levadura aumentó desde un contenido inicial aproximado del 2 % hasta alrededor del 3,5 % al final del ciclo. Dado que toda la levadura fue reciclada, el contenido de biomasa se incrementó en cada ciclo sucesivo, alcanzando valores más habituales del orden del 8 –10 % en el tercer y cuarto ciclo.

La tasa de crecimiento de la biomasa de levadura (Figura 3, gráfico derecho), calculada a partir de la pendiente de las curvas de contenido de levadura, siguió el patrón esperado: valores iniciales bajos mientras la levadura fresca se adapta al medio, un máximo en el segundo ciclo y una disminución progresiva en el tercero y cuarto ciclos. Comparando la melaza de mayor color C con la melaza control A, la tasa de crecimiento de la levadura se redujo entre un 15 y un 25 %. La propagación de la levadura fue claramente más lenta en las melazas de alto color B y C en comparación con la melaza control A.

Los ensayos triplicados mostraron resultados prácticamente idénticos, con un error relativo promedio (100 × desviación estándar / media) del orden de 0,3 a 4 %, y barras de error prácticamente imperceptibles en los gráficos debido a la escala del eje de ordenadas. Esto documenta la validez estadística de las diferencias observadas entre los tratamientos.

Las melazas originales utilizadas como sustrato no fueron centrifugadas antes de los ensayos y, por lo tanto, contenían cierta cantidad de sólidos en suspensión. Sin embargo, con la excepción de los subproductos generados por el calentamiento (principalmente los colorantes), las melazas de los tres tratamientos (A, B y C) fueron idénticas; por lo tanto, cualquier sólido centrifugable incorporado con el sustrato y arrastrado junto con las células de levadura durante la centrifugación no afecta la comparación entre tratamientos.

A pesar de cierta variabilidad, los recuentos totales de células vivas y la viabilidad celular determinados en el vino fermentado al final de los ensayos 2, 3 y 4 fueron menores en las melazas de alto color en comparación con la melaza control A.

Los ensayos triplicados mostraron resultados prácticamente idénticos, con un error relativo promedio (100 × desviación estándar / media) del orden de 0,3 a 4 %, y barras de error prácticamente imperceptibles en los gráficos debido a la escala del eje de ordenadas. Esto documenta la validez estadística de las diferencias observadas entre los tratamientos.

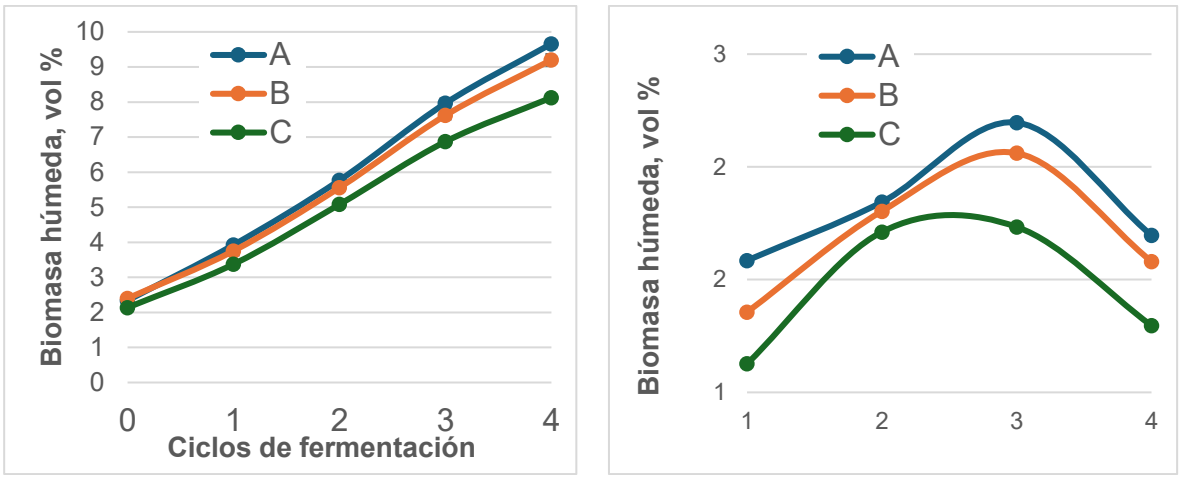


Figura 3: Izquierda: contenido de biomasa húmeda (% volumen) al final de cada ciclo de 20 horas. Barras de error = ± 1 desviación estándar. Derecha: tasa de crecimiento de biomasa.

Las melazas utilizadas como sustrato no fueron centrifugadas antes de los ensayos por lo que tenían sólidos en suspensión. Con excepción de los subproductos generados por el calentamiento (principalmente los colorantes), las melazas de los tres tratamientos (A, B y C) fueron idénticas; así cualquier sólido centrifugable incorporado con el sustrato y arrastrado junto con las células de levadura durante la centrifugación no afecta la comparación.

A pesar de cierta variabilidad, los recuentos totales de células vivas y la viabilidad celular determinados en el vino fermentado al final de los ensayos 2, 3 y 4 fueron menores en las melazas de alto color en comparación con la melaza control A (Figura 4).

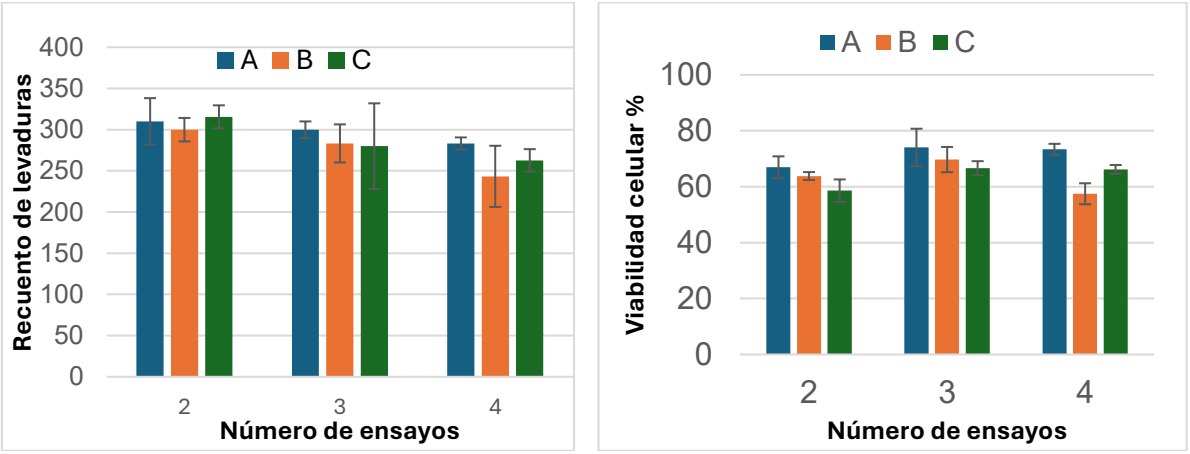


Figura 4. Izquierda: recuento de células vivas de levadura (/mL/10^6) al final de los ensayos 2, 3 y 4. Derecha: viabilidad celular (%).

Efecto de los colorantes sobre el rendimiento en etanol

La pérdida de peso se midió a las 7 y a las 20 horas de iniciada la fermentación. El AFY se calculó usando la pérdida de peso en los tubos. El AFY final varió entre 90 y 100 %, aparentemente incrementado por la presencia de sólidos en suspensión en la melaza de alimentación. Las variaciones dentro de los ensayos triplicados fueron insignificantes. Debido al bajo contenido inicial de levadura, ninguna fermentación se completó luego de 7 horas de incubación. A medida que el contenido celular aumentó con cada ciclo, el rendimiento también se incrementó, variando desde aproximadamente 30–50 % al final del ciclo 1, hasta cerca del 95 % al final del ciclo 4. El rendimiento en las melazas de color intermedio B no se vio afectado en promedio; sin embargo, para las melazas de mayor color C, el efecto fue apreciable,

particularmente en el ciclo 2. Esto puede atribuirse a un menor número de células de levadura en la melaza C en comparación con la melaza A y del bajo recuento celular general, estimado en el ciclo 2 en aproximadamente 3–4 % luego de 7 horas (Figuras 5 y 6).

A aumentar la biomasa total en los ciclos 3 y 4, el efecto del color sobre la propagación de la levadura resultó menos significativo en términos de rendimiento en etanol. En el ciclo 1, que para todos los tratamientos se inició con la misma cantidad de levadura fresca, el efecto del color de la melaza fue menos pronunciado. Existen algunas variaciones en los datos que no se ajustan completamente a este patrón general, por ejemplo en el ensayo 3, donde en el ciclo 1 el rendimiento fue levemente mayor tanto en B como en C en comparación con la melaza A. Sin embargo, en el ciclo 2 el rendimiento se redujo significativamente (C versus A) en todos los ensayos.

A un tiempo de retención de 20 horas, las fermentaciones estuvieron mayormente completadas, con rendimientos del orden del 90–100 %, y sin observarse efectos estadísticamente significativos del color sobre el rendimiento en etanol en ninguno de los ensayos.

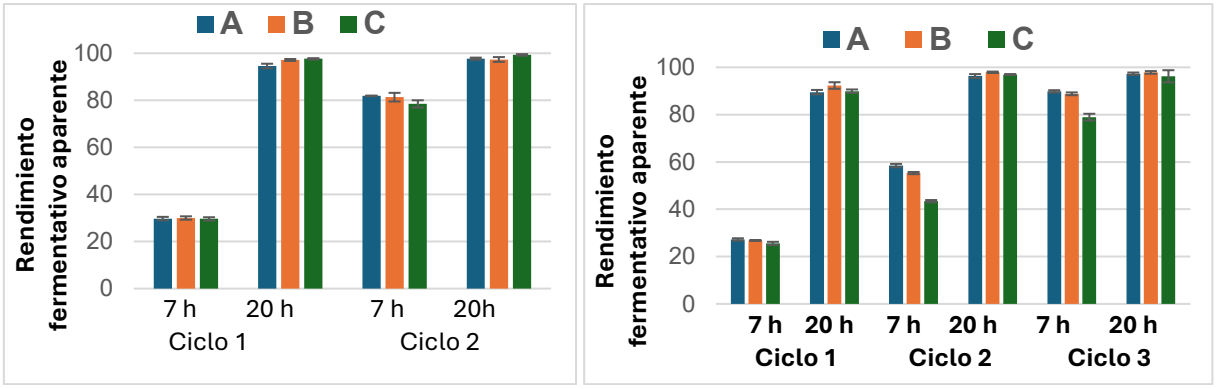


Figura 5: Rendimiento fermentativo aparente (% del máximo teórico) en los ensayos 1 (izquierda) y 2 (derecha), a las 7 y 20 horas de fermentación. Dos ciclos de fermentación en el ensayo 1 y tres ciclos en el ensayo 2. Barras de error = ± 1 desviación estándar en ensayos triplicados.

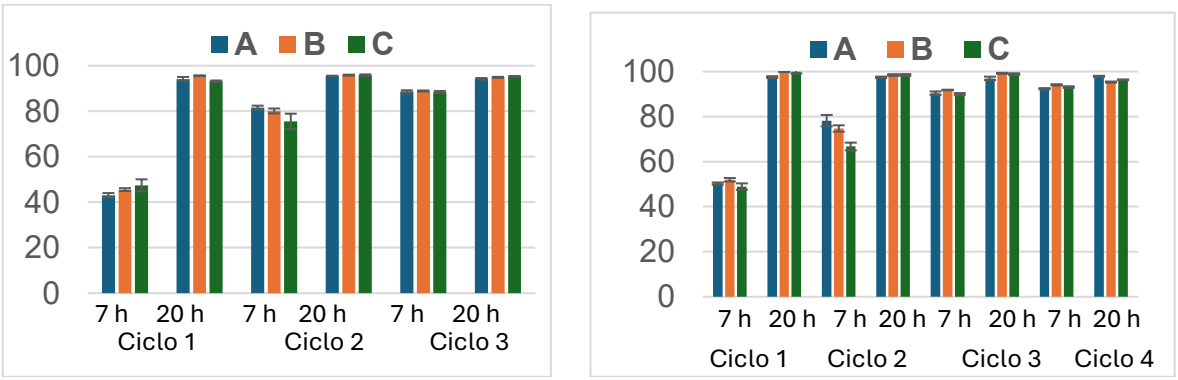


Figura 6: Rendimiento fermentativo aparente (% del máximo teórico) en los ensayos 3 (izquierda) y 4 (derecha), a las 7 y 20 horas de fermentación. Tres ciclos de fermentación en el ensayo 3 y cuatro ciclos en el ensayo 4. Barras de error = ± 1 desviación estándar en ensayos triplicados.

Control del pH durante la fermentación

No se utilizaron antimicrobianos y las fermentaciones se llevaron a cabo en un ambiente no aséptico. La presencia de infecciones que pudieran afectar los resultados se monitoreó con la medición del pH al final de cada ciclo. Los valores promedio correspondientes al ensayo 4 se presentan en la Tabla 4; en los restantes ensayos dieron resultados idénticos.

Se observó una disminución muy leve del pH del vino fermentado luego de cada ciclo, indicando la ausencia de infecciones significativas que pudieran afectar los resultados. El calentamiento de la melaza redujo levemente el pH, lo que refuerza el hecho de que el calentamiento de la melaza, además de incrementar el color, puede también aumentar los niveles de ácidos orgánicos volátiles, los cuales son potenciales inhibidores de la levadura. No obstante, las diferencias de pH entre las tres melazas A, B y C fueron muy pequeñas, lo que indica que la generación de ácidos orgánicos no fue excesiva.

Tabla 4: pH del vino fermentado luego de la separación de la levadura al final de cada ciclo (ensayo 4).

	Ciclos de Fermentación			
Melazas	1	2	3	4
A	5,23	5,22	5,15	5,08
B	5,15	5,14	5,07	5,02
C	5,06	5,09	5,02	5,00

Conclusión

El incremento del color de la melaza por adición de melanoidinas sintéticas no modificó ni la cinética de fermentación ni el rendimiento final en etanol.

En ensayos con reciclado de levadura (múltiples ciclos), el alto color de la melaza redujo el crecimiento de la levadura entre un 15 y un 25 %.

En los primeros dos o tres ciclos, a un tiempo de fermentación de 7 horas (recuento celular bajo y las fermentaciones incompletas) el rendimiento en etanol fue menor en melazas de mayor color, presumiblemente debido a un menor número de células de levadura activas.

A un tiempo de retención de 20 horas (fermentaciones prácticamente completadas), no se observó un efecto estadísticamente significativo de los colorantes sobre el rendimiento fermentativo.

Agradecimientos

Agradecemos al personal técnico de la EEAOC por su apoyo en los análisis de HPLC y determinaciones microbiológicas.

Bibliografía

Basso LC, de Amorim HV, de Oliveira AJ, Lopes ML. 2008. Selección de levaduras para la producción de etanol combustible en Brasil. FEMS Yeast Research 8: 1155–1163.

Godbole J. 2002. Etanol a partir de melaza de caña. Taller Hawaii Ethanol, 14 de noviembre de 2002, Honolulu, EE. UU.

Kale S. 2021. Comprensión del proceso de fermentación. Presentación en la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres, Tucumán, 18 de marzo de 2021.

Lino de Oliveira FS, Basso TO, Sommer MOA. 2018. Un medio sintético para simular melaza de caña de azúcar. Biotechnology and Biofuels 11: 221.

Raghavendran V, Basso TP, da Silva JB, Basso LC, Gombert AK. 2017. Un sistema simple a escala reducida para simular la producción industrial de etanol de primera generación en Brasil. Antonie Van Leeuwenhoek 110: 971–983.

Saska M, Ruiz RM, Zossi S. 2025. Efecto del calentamiento sobre el color y los azúcares fermentables en melaza final. Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists 32: 92–95.

Tauer A, Elss S, Frischmann M, Tellez P, Pischetsrieder M. 2004. Influencia de mezclas carbohidrato/aminoácido procesadas térmicamente sobre la fermentación por Saccharomyces cerevisiae. Journal of Agricultural and Food Chemistry 52: 2042–2046.

SISTEMA INTEGRAL DE INFORMACIÓN SUCROALCOHOLERA – IPAAT

Etchandy, J.M.(jetchandy@ipaat.gov.ar), Valoy C.S (sistemas@ipaat.gov.ar), Soria J.M. (jsoria@ipaat.gov.ar), Robles L.D. (lrobles@ipaat.gov.ar).
Instituto de Promoción del Azúcar y Alcohol de Tucumán -IPAAT-, www.ipaat.gov.ar, San Martín 623 piso 9, San Miguel de Tucumán, Tucumán. Argentina. sistemas@ipaat.gov.ar

Palabras clave: industria azucarera, bioetanol, biocombustibles, zafra, complejo sucroenergético.

Introducción

El Instituto de Promoción del Azúcar y Alcohol de Tucumán (IPAAT) es un ente autárquico creado en 2013, designado como autoridad de aplicación de la Ley N.º 9.312. Su administración está a cargo de un Directorio conformado en partes iguales por representantes del sector público, de los productores cañeros y de la industria azucarera, bajo la órbita del Ministerio de Economía y Producción de la provincia de Tucumán. La misión institucional consiste en velar por los intereses del sector sucroalcoholero, considerado la principal actividad económica, productiva y social de la provincia y de la región del Noroeste Argentino - NOA- que incluye a Tucumán, Salta y Jujuy.

Entre sus funciones principales se destacan: - Contribuir al desarrollo económico de la actividad sucroalcoholera y a una producción ambientalmente sustentable, - Propiciar el fortalecimiento de los pequeños productores cañeros, característicos de la estructura productiva y social de Tucumán, - Fomentar la exportación de excedentes de azúcar y la producción de alcohol. Manteniendo asegurado el consumo de azúcar en el mercado interno, - Promover el desarrollo de la producción de bioetanol, conforme a la normativa provincial y nacional vigentes en la materia.

El IPAAT es el único organismo en Argentina que recibe y procesa en tiempo real la información productiva de la industria sucroalcoholera de la región, que comprende Tucumán, Salta y Jujuy. Esta base de datos constituye un insumo estratégico para la toma de decisiones en los ámbitos provincial y nacional, y se orienta a promover el desarrollo económico del sector bajo criterios de sostenibilidad ambiental.

Para cumplir con sus funciones el Instituto brinda diversos servicios, y realiza actividades las que generan amplia información. Para dar un tratamiento ordenado y procesar dicha información, el Instituto diseñó y desarrolló un sistema de gestión integral web – APIZAFRA- que recibe, administra y procesa los datos informados por los 19 ingenios de la región NOA. Dicho sistema concentra datos productivos diarios y quincenales de zafra, los cuales son analizados y procesados con la generación de reportes técnicos que respaldan la planificación sectorial.

El presente trabajo tiene como propósito describir las características de este sistema de gestión integral, incluyendo los métodos de ingreso de información en tiempo real (molienda de caña bruta, rendimiento, producción de diversos tipos de azúcar, alcohol y bioetanol, exportaciones, melaza entre otros), los procesos de verificación y constatación, la generación de reportes parametrizables que son publicados en su sitio oficial diariamente, como así también los controles in situ que el Instituto realiza en cada planta de la provincia como ser, toma y análisis de muestras de melaza y controles en laboratorios de individuales. Estas actividades y servicios constituyen aportes informativos y estratégicos que el Instituto brinda tanto a la provincia como al país.

Objetivos

- Presentar el sistema de gestión integral desarrollado por el IPAAT para el procesamiento en tiempo real de datos productivos de la industria sucroalcoholera del NOA.

- Describir los procesos de ingreso, verificación y constatación de la información productiva sucroalcoholera implementados por el IPAAT, destacando su impacto en la toma de decisiones estratégicas.
- Detallar el aporte de los resultados brindados por el sistema de gestión integral del IPAAT al desarrollo productivo, económico y social la actividad sucroalcoholera en la región NOA.
- Destacar el rol del IPAAT como organismo articulador entre el Gobierno provincial, productores cañeros y la industria.

Materiales y métodos

El sistema integral de información del Instituto, denominado -APIZAFRA-, fue diseñado y desarrollado desde el año 2013 (año de creación del Instituto), para la carga de información productiva de los 14 ingenios de Tucumán.

Cada ingenio carga diariamente sus datos en la plataforma, los cuales son procesados automáticamente para generar los reportes de "Partes diarios". Estos informes permiten analizar en detalle el avance de la zafra día a día y constituyen una herramienta clave para la gestión productiva.

El sistema cuenta además con un módulo de declaraciones juradas de producción, mediante el cual los ingenios y destilerías de alcohol ingresan información más detallada que permite consolidar el balance productivo quincenal.

Desde 2024, tras gestiones y convenios impulsados por el **IPAAT** los cinco ingenios emplazados en las provincias de Salta y Jujuy tambien declaran su información productiva en el sistema de gestión web. Anteriormente esta información era remitida en un formato de planilla de cálculo en la que frecuentemente se generaban errores en las fórmulas y totalizadores.

La base de datos del Instituto cuenta con información de producción sucroalcoholera histórica de Tucumán desde el año 2013.

Procesos de ingreso de información

- *Ingreso de información en tiempo real*: molienda de caña bruta, rendimiento fabril, producción de azúcar (en sus distintas variedades), alcohol y bioetanol, exportaciones y subproductos como melaza.
- *Procesos de verificación y constatación*: validación de datos remitidos por los ingenios, constataciones periódicas en las plantas ubicadas en la provincia de Tucumán, toma de muestras y análisis de mieles y melaza. Además, se realizan controles de laboratorio individuales durante el período de zafra.
- *Generación de reportes técnicos*: informes diarios y quincenales de zafra, parametrizables comparativos, y reportes totalizados publicados diariamente en el sitio oficial del Instituto.

Reportes de producción diaria

Diariamente desde el módulo de partes diarios, son generados reportes con totalizadores parciales y finales de la zafra en curso de los 19 ingenios de la región y se publican en la página oficial, para consulta de la comunidad sucroalcoholera y el público en general. *(Ver Ilustración N°1- Información diaria productiva, Tucumán, Salta y Jujuy en la página web).*

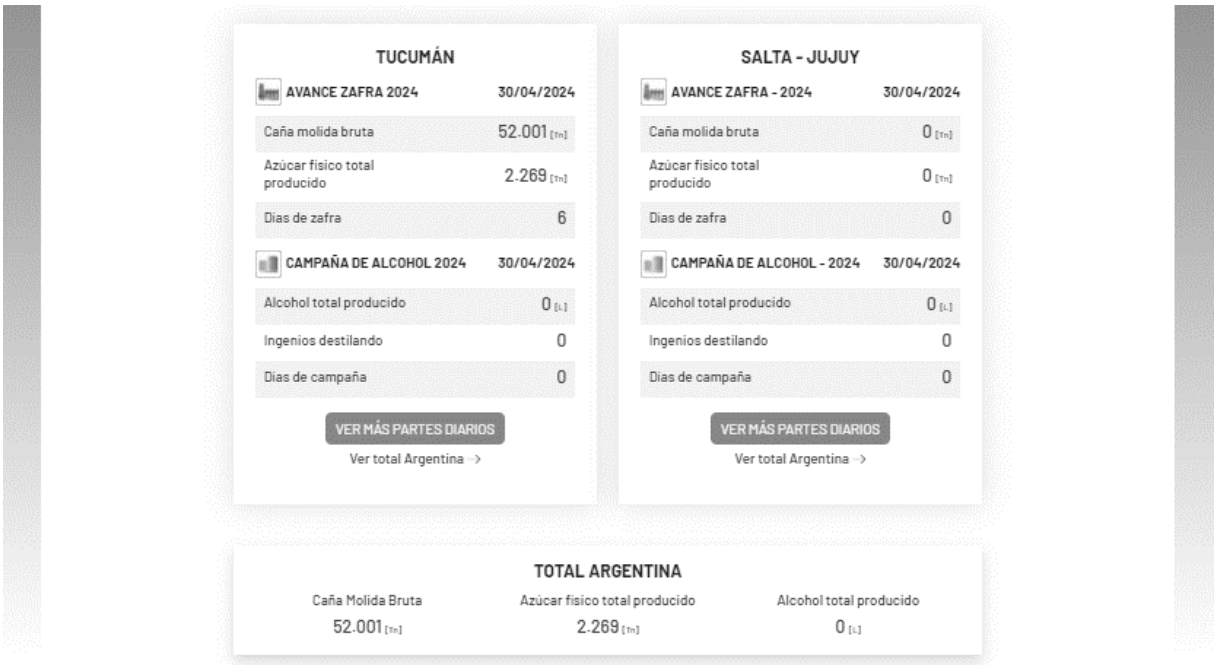


Ilustración 1 - Información diaria productiva, Tucumán, Salta y Jujuy en la página web.

Descripción de los parámetros

Los ingenios azucareros y las destilerías de alcohol informan diariamente los siguientes datos correspondientes a la jornada productiva previa y en las medidas indicadas:

1. Caña molida bruta (en toneladas).
2. Rendimiento de caña molida bruta (en porcentaje %).
3. Caña molida neta (en toneladas).
4. Rendimiento de caña molida neta (en porcentaje %).
5. Azúcar equivalente (en toneladas).
6. Azúcar crudo (en toneladas).
7. Azúcar blanco común tipo A (en toneladas).
8. Azúcar refinado (en toneladas).
9. Azúcar orgánico (en toneladas).
10. Otros azúcares (en toneladas).
11. Alcohol anhidro (en litros).
12. Alcohol hidratado total (en litros).
13. Melaza (en toneladas).
14. Observaciones (texto aclaratorio).

Reportes de cierre de quincena

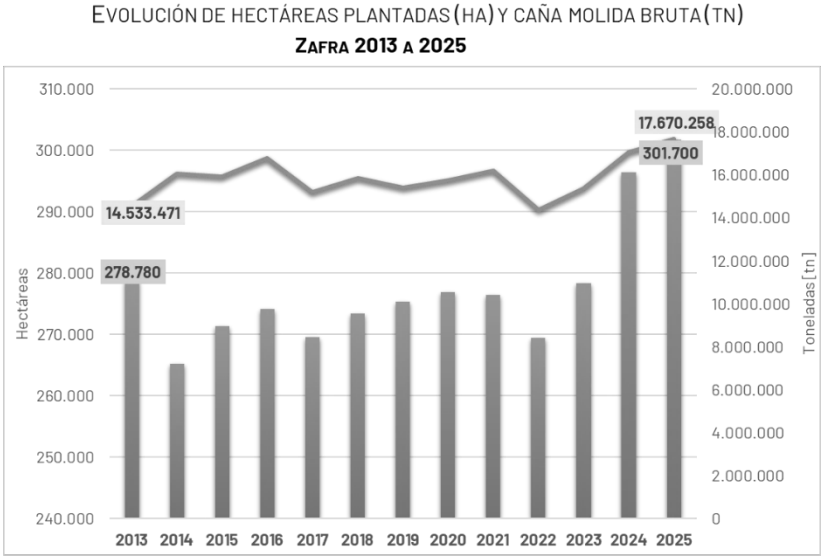
Cada fin de quincena los ingenios y destilerías de alcohol realizan su balance, y declaran en el sistema APIZAFRA los datos productivos mas detallados. Dentro de los parámetros que se pueden analizar se encuentran:

- Datos referidos a la molienda de caña, bruta, neta y sus rendimientos.
- Datos sobre la producción de los tipos de azúcares, blanco común tipo A, refinado, crudo, orgánico y otros tipos de azúcares.
- Azúcar exportado en el período.
- Producción y stock y movimientos de la melaza producida.
- Datos referidos a la producción de alcohol hidratado y anhidro (bioetanol)

Los datos declarados son analizados y constastados con los trabajos de inspecciones y análisis de mieles y melaza, de las muestras tomadas por los técnicos del Instituto en cada planta de la provincia de Tucumán. Además, se realizan controles in situ en los laboratorios de individuales de los ingenios, lo que permite validar y verificar los parámetros químicos de brix y pol en muestras de jugo de primera presión, con el objetivo de determinar el rendimiento de caña molida bruta y constatar los valores del rendimiento declarados.

Los reportes integrales que realizan los técnicos detallan comparaciones productivas de cada zafra con la anterior, pudiendo determinar la diferencia por encima o por debajo de la producción de cada parámetro analizado, el porcentaje de avance de cada campaña según las estimaciones productivas iniciales y con respecto a los años anteriores.

Una comparativa realizada durante la campaña 2025, para el cierre del balance determinó que en la provincia de Tucumán se registró un récord con respecto a las hectáreas plantadas y molienda de caña bruta. *(Ver Ilustración N°2 - Evolución de hectáreas plantadas (ha) y caña molida bruta (tn) Zafra 2013 a 2025).*



Para este trabajo se presentarán los reportes y conclusiones de la producción sucroalcoholera de la región NOA, campaña 2025 vs 2024.

Resultados

El Ministerio de Economía y Producción; la Secretaría de Estado de Producción y el Instituto de Promoción del Azúcar y Alcohol de Tucumán (IPAAT), gestionaron y trabajaron bajo los lineamientos del Gobierno Provincial, generando alianzas estratégicas entre todos los sectores de la industria sucroalcoholera.

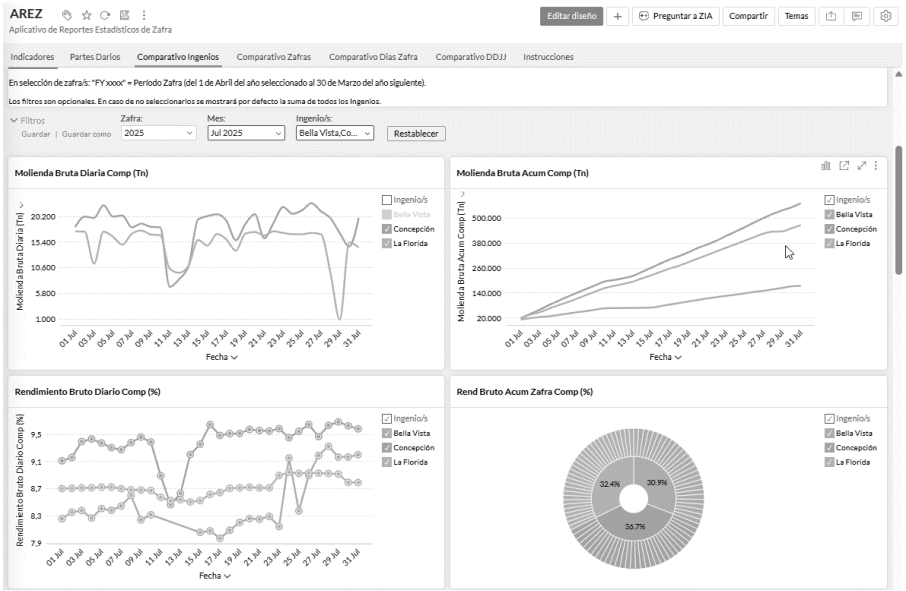
El Instituto ha creado espacios de asistencia y consulta, tanto gubernamentales como institucionales referidas a la industria sucroalcoholera, que contribuyó a estas alianzas entre todos los actores de este sector.

Antes del inicio de cada zafra se llevan a cabo reuniones periódicas de la mesa de trabajo conjunta entre el Gobierno de la Provincia, el IPAAT, representantes de la industria y entidades cañeras. De estos encuentros surgen la definición de los procedimientos y acciones concretas para abordar cada campaña de manera organizada, con el objetivo de cumplir los compromisos asumidos por el sector.

El uso de los reportes que genera el Instituto ordenados y precisos ayuda en la planificación de cada campaña, siendo herramientas indispensables para el análisis detallado de la información productiva, para poder realizar las estimaciones de diversos parámetros que encaminan las decisiones estratégicas que el sector en su conjunto debería implementar.

El Instituto desarrollo un aplicativo web de acceso público denominado AREZ – (Aplicativo de Reportes Estadísticos de Zafra), donde se plasman los resultados productivos

de cada zafra para el uso y consulta de la comunidad sucroalcoholera. *(Ver Ilustración N°3 – AREZ sistema de reportes web del IPAAT).*



Conclusiones

El IPAAT fortaleció su posición como actor clave en la articulación entre los representantes del sector sucroalcoholero, el Gobierno Provincial y diversas instituciones públicas y privadas. A lo largo del año 2025, consolidó alianzas estratégicas y promovió colaboraciones sectoriales que impulsaron el desarrollo integral de la cadena productiva, fomentando el diálogo, la innovación y la sostenibilidad.

Los aportes estratégicos proporcionados por el Instituto se fundamentan en la generación, procesamiento y difusión de información confiable y actualizada, la cual constituye un insumo importante para el fortalecimiento y competitividad del sector, y la formulación de políticas y planificación de la industria sucroalcoholera en el ámbito provincial y nacional.

MODELOS FT-NIRS PARA LA PREDICCIÓN DE VARIABLES DE CALIDAD EN CAÑA DESFIBRADA MEDIANTE SISTEMA BRUKER CPS

Sorol N.; Diez P.; Jiménez R.; Aballay C.; Rementería A.; Henriquez D.; Ruiz M.; Franck Colombres F. y Ostengo S.

Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC), William Cross 3150, CP 4101, Las Talitas, Tucumán, Argentina. nrsorol@eeaoc.org.ar

Palabras Clave: caña de azúcar; NIRS; calibración; calidad industrial; CPS.

INTRODUCCIÓN

La caracterización de la calidad de la caña de azúcar es fundamental en los programas de mejoramiento, constituyendo un pilar clave en la evaluación varietal y el control industrial. La espectroscopía de infrarrojo cercano (NIRS) ofrece una alternativa rápida, no destructiva y sin requerimiento de reactivos frente a los métodos de referencia convencionales, no obstante, es conveniente realizar una calibración previa.

A fines de 2024, la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC) adquirió un espectrómetro de infrarrojo cercano por transformada de Fourier que emplea el sistema de presentación de caña (FT-NIR Bruker CPS por sus siglas en inglés) mediante el subsidio Equipar Ciencia 2, destinado a fortalecer la capacidad analítica del Laboratorio de Investigaciones Azucareras (LIA). Este sistema permite analizar muestras de caña desfibrada de gran volumen (5 a 18 kg), mejorando significativamente la representatividad y reduciendo la variabilidad asociada al muestreo.

En este trabajo se presenta el desarrollo de modelos de calibración y validación para las principales variables de calidad industrial, obtenidos a partir de muestras procesadas en el marco del Subprograma de Mejoramiento Genético de Caña de Azúcar de la EEAOC. El estudio busca evaluar el desempeño del Bruker CPS como herramienta de apoyo para la selección genética y evaluación de nuevas variedades.

OBJETIVO

Desarrollar modelos de calibración NIRS para estimar variables clave de calidad de caña de azúcar a partir de una base de datos amplia y diversa, y validar su capacidad predictiva en comparación con métodos químicos de referencia.

MATERIALES Y MÉTODOS

Preparación de la muestra

Las determinaciones se realizaron en el LIA entre mayo y septiembre de 2025 sobre 453 muestras correspondientes a 15 variedades de caña de azúcar (comerciales y clones promisorios) cosechadas manualmente en diferentes zonas de la provincia. Cada muestra se conformó con 10 tallos limpios y despuntados. Los tallos fueron procesados en un desfibrador a martillo obteniéndose caña desfibrada con un porcentaje de células abiertas cercano al 95%. Posteriormente se prensaron en una prensa hidráulica de 60 toneladas que aplica una presión de 250 kg/cm^2 durante 1 minuto para obtener el jugo primario. Las variables de interés se determinaron siguiendo la metodología propuesta por Diez *et al.* (2000).

Determinaciones químicas de referencia

Se determinaron por análisis húmedo las variables utilizadas como referencia para el desarrollo de los modelos de calibración NIRS:

- Brix refractométrico en jugo (BxRef %), se midió con un refractómetro digital marca KEM RA-620 (Chen and Chou, 1993).
- Pol en jugo (%), se determinó utilizando subacetato de plomo como clarificante y midiendo en un polarímetro digital Anton Paar modelo MCP 500 Sucromat (Spencer-Meade, 1967a). El cálculo se realizó mediante la ecuación 1.
- Pol en caña (%), se calculó mediante la ecuación 2, empleando el valor de extracción de la prensa (ecuación 3), la pol del jugo y la pol del bagazo (ecuación 4) esta última obtenida mediante el método de Norris (Spencer-Meade, 1967b), que incluye la

determinación de fibra en bagazo mediante una técnica basada en el método de difusión en bolsa (Anon., 2014).

- Fibra en caña se determinó mediante la técnica basada en difusión en bolsa (Anon., 2014) y se calculó con la ecuación 5.
- Cenizas conductimétricas (CC %), utilizando un conductímetro Orion 145A+ (ICUMSA, 2019).
- Azúcares recuperables (AR %), se calcularon de manera teórica según Diez *et al.* (2000)

$$Pol\ en\ jugo\ (\%) = \frac{0{,}26 \times Lectura\ de\ pol}{(0{,}004209 \times BxRef + 0{,}9955)} \quad (1)$$

$$Pol\ en\ caña\ (\%) = \frac{(Extracción \times Pol\ en\ jugo + (100 - Extracción) \times Pol\ Bagazo)}{100} \quad (2)$$

$$Extracción\ (\%) = \frac{Peso\ jugo}{Peso\ total\ de\ caña} \times 100 \quad (3)$$

$$Pol\ en\ bagazo\ (\%) = (A - B - C) \times L \times 0{,}0026 \quad (4)$$

Donde:
A = peso de digestor + bagazo + agua + carbonato de sodio
B = peso del digestor
C = fibra % en bagazo
L = lectura de pol del líquido posterior a la digestión

$$Fibra\ en\ caña\ (\%) = \frac{(100 - Extracción) \times FibraBagazo}{100} \quad (5)$$

Obtención de espectros, desarrollo de calibraciones NIRS y validación externa

Se utilizó la base de datos completa de espectros NIRS. El conjunto se depuró previamente para eliminar espectros atípicos o sospechosos con el fin de asegurar la robustez de los modelos de calibración. Al día siguiente de la cosecha, se registraron los espectros de caña desfibrada empleando el sistema CPS conectado por fibra óptica a un espectrómetro Matrix FT-NIR (Bruker Optik GmbH, Ettlingen, Alemania), tal como se muestra en la Figura 1.

El CPS es un sistema automático de arranque y parada con cinta transportadora, que opera en un rango espectral de 4000 a 12000 cm^{-1} con una resolución de 32 cm^{-1}. Los datos espectrales y de laboratorio se procesaron con el software OPUS/LAB y OPUS/QUANT.

Las calibraciones se desarrollaron mediante regresión por mínimos cuadrados parciales (PLS, Partial Least Squares) a partir de la división aleatoria del conjunto total de muestras en dos grupos: calibración y validación externa (Test).

Para cada modelo, se optimizaron el número de términos o factores PLS (Rank), el segmento espectral y los pretratamientos matemáticos aplicados al espectro, que incluyen derivadas de Savitzky-Golay, corrección multiplicativa de la dispersión (MSC), y normalización estándar (SNV).

El desempeño de los modelos se evaluó utilizando el conjunto de validación externa, compuesto por muestras no incluidas en la calibración, mediante la comparación entre los valores predichos por NIR y los resultados analíticos de laboratorio. Los criterios de evaluación incluyeron el error cuadrático medio de la estimación (RMSEE), el error cuadrático medio de predicción (RMSEP), la razón de desempeño del modelo o desvío de predicción residual (RPD), los coeficientes de determinación de calibración y validación (R^2) y sesgo (Bias).

Se seleccionó como calibración óptima aquella que en la validación presentó el RMSEP más bajo, el RPD más alto, el Bias más cercano a cero, y el mayor valor de R^2.

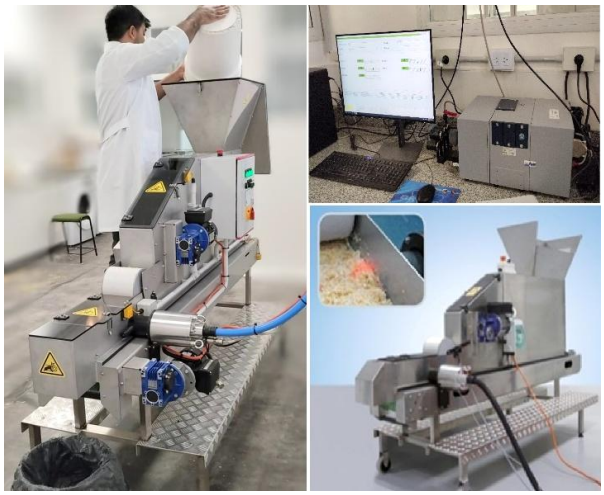


Figura 1. Sistema de presentación de caña, CPS (Cane Presentation System, CPS) y Matrix FT-NIR, Bruker

RESULTADOS

La estadística descriptiva de las variables analizadas se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Estadística descriptiva de las variables analizadas en el LIA en 453 muestras de caña de azúcar. Mínimo, Máximo, Media y Desvío estándar (SD).

Variable	Mínimo	Máximo	Media	SD
BxRef (%)	16.17	23.36	19.96	1.37
Pol%jugo	12.29	21.80	18.07	1.65
Pol%caña	10.59	18.16	15.33	1.31
Fibra%caña	8.13	16.42	11.52	1.32
CC%	0.18	1.41	0.80	0.18
AR%	5.97	15.65	12.50	1.54

El diseño experimental con un amplio panel de variedades, zonas y condiciones de cultivo muy contrastantes garantizó un rango amplio para todas las variables, lo cual confirma que es adecuado para desarrollar calibraciones robustas. Los parámetros de calibración obtenidos mediante regresión PLS se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros de calibración, realizadas mediante regresión PLS.

Variable	N	RMSEE	R^2	Rank	Región Espectral	Pretratamiento espectral
BxRef (%)	291	0.192	97.68	9	9411.4-7498.2; 6109.7-5446.3	SNV
Pol%jugo	298	0.301	96.13	10	9411.4-7498.2; 6109.7-5446.4	SNV
Pol%caña	304	0.304	93.61	8	9411.4-5446.3	SNV
Fibra%caña	301	0.518	82.12	9	9411.4-4597.7	SNV
CC%	300	0.089	69.82	9	9411.4-4597.7	1ºDerivada
AR%	302	0.408	91.28	10	9411.4-7498.2; 6109.7-5446.4	SNV

En general, los modelos mostraron un buen nivel de ajuste (el software expresa R^2 en porcentaje, por lo que valores cercanos a 90 corresponden a $R^2 \approx 0,90$), con coeficientes de determinación (R^2) entre 82 y 97% según la variable, excepto para CC. Los valores de RMSEE

fueron bajos y consistentes con la variabilidad de cada analito, lo que indica que los modelos lograron describir adecuadamente la relación entre las respuestas espectrales y las mediciones de laboratorio dentro del conjunto de calibración. No obstante, este indicador por sí solo no garantiza la validez del modelo, por lo que su interpretación debe complementarse con la validación externa. Los modelos requirieron un Rank de 8 a 10 factores PLS, un número acorde a la complejidad espectral de la matriz vegetal analizada.

En la mayoría de los casos, el pretratamiento matemático más efectivo fue SNV, mientras que la primera derivada resultó particularmente útil para la calibración de cenizas conductimétricas.

La validación externa confirmó la robustez de las calibraciones desarrolladas, tal como se muestra en la tabla 3.

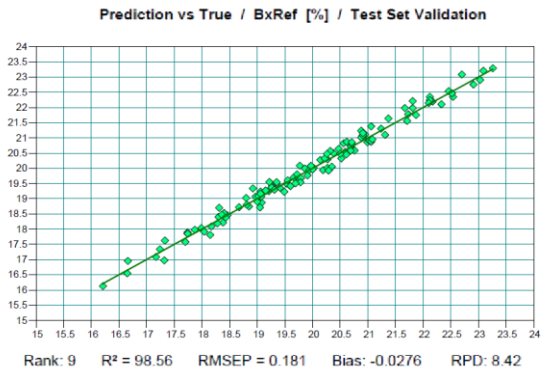
Tabla 3. Parámetros de validación externa.

Variable	N	RMSEP	R^2	RPD	Bias	Outliers
BxRef (%)	119	0.181	98.56	8.42	-0.03	43
Pol%jugo	108	0.299	97.42	6.31	-0.05	47
Pol%caña	113	0.344	94.36	4.67	-0.15	36
Fibra%caña	108	0.574	81.34	2.36	0.11	44
CC%	112	0.120	58.78	1.56	0.01	41
AR%	109	0.452	92.78	3.83	-0.11	42

Los modelos de Brix, Pol en jugo y Pol en caña alcanzaron los valores más altos de desempeño, con R^2 superiores a 94% y valores de RPD mayores a 4, lo que indica una capacidad predictiva excelente y plenamente adecuada para aplicaciones de rutina. Los de fibra y azúcares recuperables también mostraron buen desempeño, aunque con mayor dispersión, con RPD entre 2,3 y 3,8, valores aceptables para tareas de selección o clasificación. En el caso de cenizas conductimétricas, el modelo presentó la menor capacidad predictiva lo cual se atribuye principalmente a que la predicción por NIRS se basa en correlaciones indirectas, dado que los compuestos inorgánicos no presentan bandas de absorción en la región del infrarrojo cercano. La señal espectral proviene de modificaciones en componentes orgánicos asociados a la acumulación de minerales, por lo que la capacidad predictiva del modelo depende fuertemente de la variabilidad presente en la matriz. En este estudio, el rango reducido de cenizas limitó la fortaleza de dichas correlaciones, lo que explica el menor desempeño observado en la calibración.

En todas las variables, los sesgos obtenidos fueron cercanos a cero, lo que indica ausencia de errores sistemáticos, y la proporción de outliers se mantuvo dentro de valores razonables para una población diversa.

La figura 2 muestra, a modo de ejemplo, la relación entre los valores de Brix y Fibra obtenidos por laboratorio y los estimados por NIR (validación externa). La buena distribución de los puntos alrededor de la línea demuestra la consistencia de los modelos.



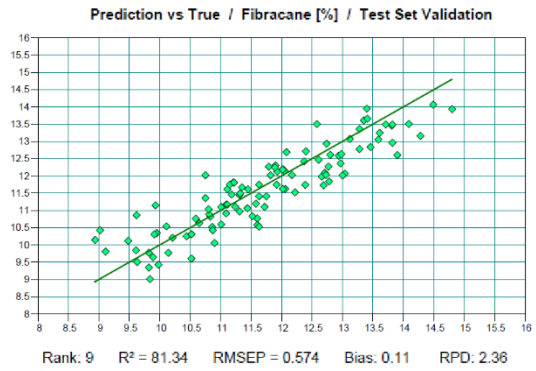


Figura 2. Gráficas de dispersión de valores predichos versus valores de laboratorio para Brix (BxRef%) y Fibra en caña (Fibracane%) para el conjunto de muestras de validación (Test).

CONCLUSIONES

Los resultados preliminares confirman que el sistema FT-NIR Bruker CPS constituye una herramienta robusta y confiable para la determinación rápida de variables de calidad en caña desfibrada, y la integración de un sistema de presentación de gran volumen de muestra contribuye a mejorar la representatividad y robustez de los modelos. El enfoque demostró ser adecuado para estimar, con distintos niveles de precisión, los principales componentes, mostrando especial fortaleza en aquellos parámetros cuya variabilidad natural y respuesta espectral favorecen la calibración. Incluso en variables de menor respuesta directa al NIRS, como las cenizas conductimétricas, fue posible obtener modelos funcionales basados en relaciones indirectas con señales orgánicas asociadas. En conjunto, estos resultados evidencian que la metodología aplicada constituye una herramienta eficiente para el análisis rápido, no destructivo y de alta frecuencia en programas de mejoramiento genético y control de calidad industrial.

REFERENCIAS

Anon. 2014. The standard laboratory manual for Australian sugar mills: Volume 2. Sugar Research Australia, Brisbane.

Chen J.C.P. and C. C. Chou. 1993. Cane Sugar Handbook, 12th ed., Wiley &Sons, p. 121.

Diez, O.; S. Zossi, E. Chavanne y Cárdenas, G. 2000. Calidad industrial de las variedades de caña de azúcar de maduración temprana LCP 85-384 y LCP 85-376 en Tucumán. Análisis de sus principales constituyentes físico–químicos. Rev. Ind. y Agric. Tucumán 77 (2): 39-48.

International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis (ICUMSA). 2019. Method GS 1/3/4/7/8-13: The determination of conductivity ash in raw sugar, brown sugar, juice, syrup and molasses – official. Bartens, Berlin, Germany.

Spencer - Meade. 1967a. Manual del Azúcar de Caña, Editorial: Montaner y Simón, p. 457.

Spencer - Meade. 1967b. Manual del Azúcar de Caña, Editorial: Montaner y Simón, p. 670-672.

ANÁLISIS TERMOGRAVIMÉTRICO DEL BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR DE TUCUMÁN PARA LA ESTIMACION DE RANGOS DEGRADACION DE HEMICELULOSA, CELULOSA Y LIGNINA

Zamora Rueda G. del H.; Gutierrez C.; Armella, G; Golato M. A; Franck Colombres, F. y Ruiz, M.

Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres, Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales, Laboratorio de Ensayos y Mediciones Industriales, Av. William Cross 3150-Las Talitas- Tucumán- Argentina gzamora@eeaoc.org.ar

Palabras clave: termogravimetría, polisacáridos lignocelulósicos, biomasa

INTRODUCCIÓN

El bagazo de caña de azúcar es un subproducto fibroso resultante del proceso de molienda, que está compuesto principalmente por polisacáridos lignocelulósicos como la celulosa, hemicelulosa y lignina. Se utiliza principalmente en las industrias azucareras como combustible para calderas de vapor. Su caracterización físico, química, elemental y energética y térmica es esencial para optimizar su uso mediante tecnologías de combustión y pirólisis (Zamora Rueda *et al.,* 2023; Zamora Rueda *et al.,* 2023, 2024).

El análisis termogravimétrico (TGA) permite estudiar la variación de masa frente a la temperatura y al tiempo, bajo atmósferas inertes, identificando etapas de descomposición y rangos específicos de degradación de cada componente estructural (Silva *et al.,* 2023). La atmósfera inerte (N_2) es especialmente útil para procesos de pirólisis, ya que evita reacciones oxidativas y permite evaluar la estabilidad térmica real de la biomasa. Estudios previos indican que la hemicelulosa se degrada entre 150–300 °C, la celulosa entre 300–410 °C y la lignina en un rango más amplio (400–800°C) (Quinteros Vaca, 2020; Elkhalifa *et al.,* 2025).

OBJETIVO

Analizar el comportamiento de degradación térmica del bagazo de caña de azúcar de Tucumán, mediante termogravimetría, evaluando las curvas de degradación a diferentes rampas de calentamiento en atmósfera inerte, con el fin de estimar los rangos de temperaturas de celulosa, hemicelulosa y lignina.

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestras: se analizaron 15 muestras de bagazo de caña de azúcar provenientes de la zafra 2025 de diferentes ingenios de Tucumán. Las muestras fueron recolectadas durante el período de molienda y posteriormente homogeneizadas mediante submuestreo para obtener muestras representativas. Se procedió al secado en una estufa, marca ORL, a 105°C hasta peso contante y se trituraron en un molino, marca Fristech, con una malla de 1mm.

Análisis termogravimétrico: se procesaron 2 gramos de las muestras de bagazo secas y molidas en un equipo automatizado, marca LECO, en atmósfera inerte (N_2). Se utilizaron rampas de calentamiento de 5, 10 y 20 °C/min, en un rango de temperatura de 25°C a 950°C. El análisis termogravimétrico se realizó utilizando la metodología ASTMD 7582-12. Para el procesamiento de los datos se utilizó el software estadístico Infostat, en el cual se realizó la curva de degradación termogravimétrica expresada en porcentaje (TG [%]) en función de la temperatura [°C].

Estimación de parámetros estructurales de bagazo: para la estimación de la hemicelulosa, celulosa y lignina se identificaron los picos principales resultantes de la primera derivada, procesados en Infostat (versión 2020) y se estimaron los rangos de temperaturas asociadas a cada fracción. Se graficó la curva de la función derivada de las pérdidas de masa porcentual en el tiempo (DTG [%/min]) en función de la temperatura [°C].

RESULTADOS

Curva de degradación del bagazo de caña de azúcar: en la Figura 1 se muestran las curvas promedio de degradación obtenidas para las muestras de bagazo, analizadas en atmósfera de nitrógeno. En dicha figura se representa el porcentaje de masa remanente (TG [%]) en función de la temperatura [°C], para las diferentes rampas de calentamiento evaluadas. Bajo estas condiciones se identificaron tres regiones de degradación bien definidas. La primera corresponde a la etapa de deshidratación, entre 50° a 110°C. La segunda, asociada a la desvolatilización de los componentes estructurales, se subdivide en dos intervalos: hemicelulosa (180°C a 300°C) y celulosa (300 a 400°C). Finalmente, se observa una tercera etapa más amplia, a temperaturas superiores a 450°C, atribuida a la lignina y a los procesos de carbonización. Estas etapas coinciden con lo mencionado por Silva *et al.* (2023). Desde el punto de vista de la rampa de calentamiento, se observó un desplazamiento del punto de inflexión hacia temperaturas más altas al aumentar la velocidad de calentamiento. Para R=5°C/min se registró un valor de temperatura de 280°C, mientras que para R=10°C/min y R=20°C/min los valores fueron 310°C y 380°C, respectivamente.

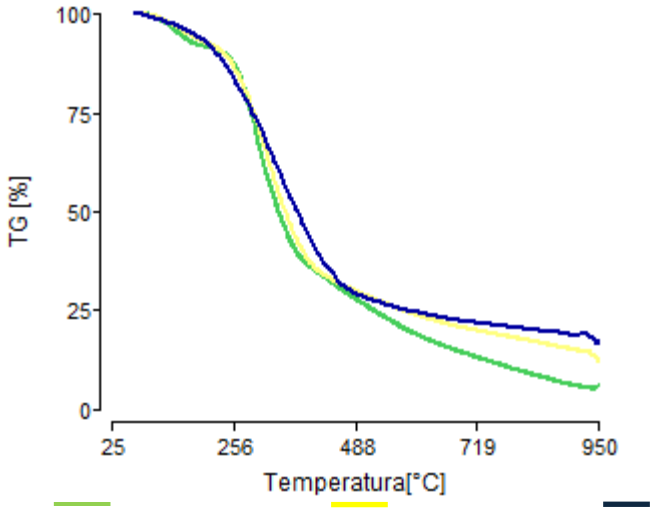


Figura 1: Curva de descomposición de bagazo, a diferentes rampas de calentamiento, en atmósfera de nitrógeno.

Estimación de parámetros estructurales de bagazo: la Figura 2 muestra las curvas promedio de la DTG [%/min] vs temperatura [°C] para las muestras de bagazo analizadas, en atmósfera de nitrógeno y para diferentes rampas de calentamiento (5,10 y 20°C/min). Se observó que a medida que aumenta la velocidad de calentamiento, los picos son mayores y más pronunciados, acompañado por el desplazamiento de los máximos a mayores temperaturas. Esto pone de manifiesto que para una rampa de calentamiento más lenta se puede apreciar con mejor resolución cada etapa de degradación térmica, permitiendo así identificar de manera más precisa los parámetros estructurales del bagazo.

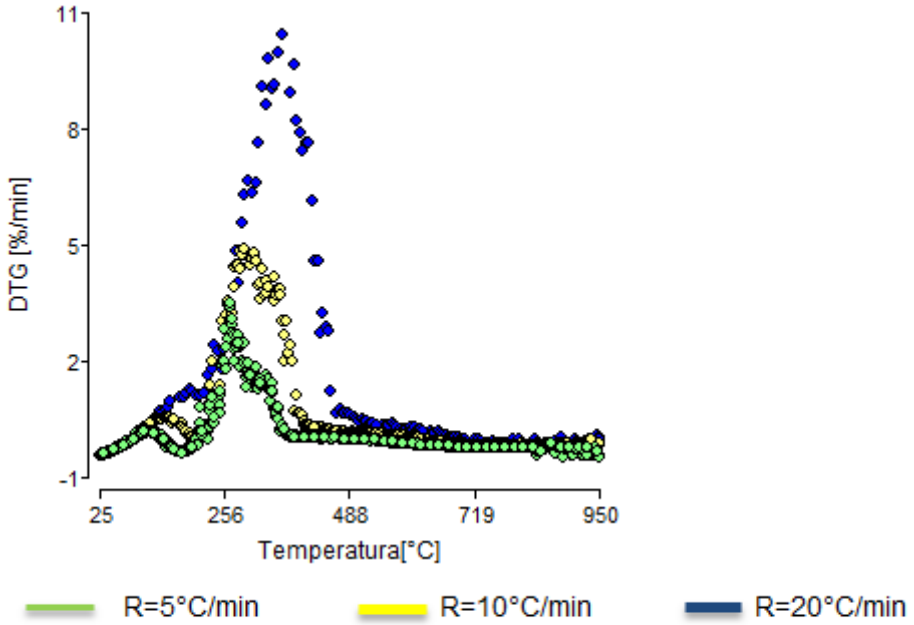


Figura 2: Curva DTG [%/min] vs Temperatura [°C] de las muestras de bagazo, a diferentes rampas de calentamiento, en atmósfera de nitrógeno.

Asimismo, en la Tabla 1, se muestran los resultados de la estimación de los rangos de temperatura de la hemicelulosa, celulosa y lignina. Estos valores coinciden con Quinteros Vaca (2020) y Elkhalifa *et al. (*2025).

Tabla 1: Resultados de las estimaciones de los rangos de temperatura en [°C] de la hemicelulosa, celulosa y lignina para las muestras de bagazo en atmósfera de nitrógeno a diferentes rampas de calentamiento.

Parámetros estructurales	**Rango de temperatura [°C]**		
	5°C/min	**10°C/min**	**20°C/min**
Hemicelulosa	200-270	210-280	230-300
Celulosa	310-370	330-390	350-410
Lignina	400-600	410-620	420-650

CONCLUSIONES

El análisis termogravimétrico de muestras de bagazo de caña de azúcar de Tucumán en atmósfera de nitrógeno permitió identificar las diferentes etapas de degradación características de la biomasa lignocelulósica y estimar los rangos de temperatura asociados a hemicelulosa (200–300 °C), celulosa (310–410 °C) y lignina (400–650 °C). Las diferentes rampas de calentamiento utilizadas para este análisis evidenciaron un desplazamiento de los picos hacia mayores temperaturas a medida que aumentaba la velocidad de calentamiento, siendo las rampas más lentas las más adecuadas para definir con mayor exactitud cada fracción estructural. Los resultados obtenidos fueron consistentes con la bibliografía y confirman la utilidad del TGA para caracterizar el comportamiento térmico del bagazo. Asimismo, se observó que la velocidad de calentamiento influye significativamente en la posición de los picos de degradación térmica, generando desplazamientos hacia temperaturas mayores a medida que aumenta la rampa de calentamiento.

Como líneas futuras, se propone profundizar el análisis mediante el estudio en otras atmósferas y la determinación de los contenidos porcentuales de las fracciones estructurales. Además, se proyecta estudiar la cinética para determinar los parámetros de reacción para cada fracción estructural y así favorecer el diseño y optimización de los procesos termoquímicos de conversión del bagazo.

CITAS BIBLIOGRAFICAS

Elkhalifa S.; P. Parthasarathy; H. R. Mackey; T. Al-Ansari; O. Elhassan; S. Mansour and G. McKay. 2025. Biochar development from thermal TGA studies of individual food waste vegetables and their blended systems. Biomass Conversion and Biorefinery 15: 29965–29982.

Quinteros Vaca, O.N. 2020. Caracterización del bagazo de caña de azúcar de variedades del ingenio azucarero Tababuela para bioenergía. Tesis de grado Ingeniero en Energías Renovables. Universidad Técnica Del Norte Facultad de Ingeniería en Ciencias Agropecuarias y Ambientales Carrera de Ingeniería en Energías Renovables. Ibarra- Ecuador.

Silva J.; S. Teixeira and J. Teixeira. 2023. A Review of Biomass Thermal Analysis, Kinetics and Product Distribution for Combustion Modeling: From the Micro to Macro Perspective Energies 16: 6705

Zamora Rueda G. H.; Mistretta M. G.; Gutiérrez C. E.; Golato M. A.; Paz D. y Ruiz M. 2023. Caracterización energética de bagazo de caña de azúcar en Tucumán, Argentina. Rev. Industrial y Agrícola de Tucumán 100(1): 47-53.

Zamora Rueda G. H.; Golato M. A.; Machado W.D. y Paz D.2024. Caracterización y clasificación del bagazo y RAC de caña de azúcar, según índices de comportamiento a partir de su composición química elemental. Rev. Industrial y Agrícola de Tucumán 101(1): 63-70.

CLASIFICACIÓN TERMOQUÍMICA DE BIOMASAS AGRÍCOLAS DE TUCUMAN PARA SU APROVECHAMIENTO ENERGÉTICO

Zamora Rueda G. del H.; Gutiérrez C.; Armella, G; Díaz, G.; Bravo, V.; Golato M. A; Feijóo, E. A. y Ruiz, Marcelo

Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres, Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales, Laboratorio de Ensayos y Mediciones Industriales, Av. William Cross 3150-Las Talitas- Tucumán- Argentina

gzamora@eeaoc.org.ar;

Palabras clave: diagrama de Van Krevelen, diagrama ternario, conversión termoquímica, biocombustible

INTRODUCCIÓN

La caracterización de las biomasas lignocelulósicas mediante análisis inmediato y elemental resulta fundamental para predecir su comportamiento en procesos termoquímicos, tales como la combustión, la pirólisis y la gasificación, y para seleccionar combustibles con mejores características energéticas (Basu, 2013). En los ingenios azucareros de Tucumán, el bagazo de caña de azúcar constituye el combustible tradicional; sin embargo, su disponibilidad no siempre resulta suficiente para cubrir la demanda energética del proceso industrial. En consecuencia, algunos ingenios recurren al uso de combustibles de origen fósil para complementar dicha demanda, lo que incrementa los costos operativos y aumenta las emisiones de gases de efecto invernadero. En este contexto, adquiere relevancia la diversificación de la matriz energética mediante la evaluación de otros residuos agrícolas y/o cultivos energéticos disponibles en la región. Con este objetivo, la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC) viene desarrollando estudios orientados al aprovechamiento energético de residuos agrícolas locales en la industria azucarera y sucroalcoholera (Zamora Rueda et al., 2016; 2024; 2025).

El diagrama de Van Krevelen, que representa las relaciones molares hidrógeno/carbono (H/C) y oxígeno/carbono (O/C), junto con los diagramas ternarios basados en los resultados del análisis inmediato y elemental, constituyen herramientas ampliamente utilizadas para el análisis comparativo de biomasas. Estos enfoques permiten relacionar la composición del material con su reactividad, comportamiento durante la desvolatilización y potencial energético. De este modo, es posible clasificar las biomasas y determinar los procesos de conversión térmica más adecuados, contribuyendo a una selección más eficiente de tecnologías para su aprovechamiento energético.

OBJETIVO

Estudiar biomasas de la provincia de Tucumán: bagazo, residuos agrícolas de cosecha de caña, sorgo fibroso, carinata y biomasa de limoneros, mediante diagramas de clasificación termoquímicos, a fin de evaluar tecnologías adecuadas para su aprovechamiento térmico en los ingenios de Tucumán.

MATERIALES Y MÉTODOS

Muestras: Se analizaron cinco tipos de biomasa: bagazo de caña de azúcar proveniente de diferentes ingenios tucumanos; residuos agrícolas de cosecha de la caña (RAC) de la variedad LCP85-384 de diferentes lotes; sorgo fibroso y carinata de cultivos propios de la EEAOC y biomasa de limoneros (ramas primarias, secundarias, tronco y pie) de diferentes campos, para el zafra 2025. Se analizaron 20 muestras por cada una de las

biomasas en estudio este año, las mismas fueron procesadas y caracterizadas en el Laboratorio de Ensayos Energéticos de Biomasa (LEEB), pertenecientes a la Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales de la EEAOC. Se secaron las muestras en una estufa, marca ORL, a 105 ºC hasta peso constante y se picaron en un molino marca FRISTCHER, modelo Pulverisette 19, con malla de tamizado de 1mm.

Análisis inmediato: se determinaron los contenidos de cenizas (CZ), sólidos volátiles (SV) y carbono fijo (CF) en el equipo termogravimétrico, marca LECO, modelo TGA701, en atmósferas controladas, bajo norma ASTM D5142-02 (modificada). Los resultados se expresaron en porcentaje en base seca (b.s).

Análisis elemental: se realizaron las determinaciones de los contenidos de hidrógeno, carbono, nitrógeno y oxígeno, en equipo analizador elemental módulo macro CHN y módulo micro O, modelo 628, marca LECO, con atmósfera controlada, siguiendo la norma ASTMD5373-02/3176-15. Los resultados se expresaron en porcentaje en b.s.

Construcción de los diagramas: para la construcción del diagrama de Van Krevelen, se determinaron las relaciones molares (H/C) y(O/C) para cada una de las biomasas analizadas en base seca, siguiendo la metodología propuesta por Van Krevelen (1950). El diagrama ternario es una herramienta complementaria al diagrama de Van Krevelen, donde cada vértice está representado las proporciones en porcentaje de cada uno de los componentes puros, es decir, 100% de concentración. Los puntos dentro del triángulo representan una mezcla ternaria de estos tres elementos. El lado opuesto a un vértice del triángulo representa muestras sin presencia de ese componente (Basu, 2013). Para la construcción del diagrama ternario se utilizaron los valores obtenidos de análisis inmediato (CZ-SV-CF) y elemental (C-H-O), expresadas en porcentaje en base seca (% b.s.).

RESULTADOS

Diagramas de Van Krevelen: en la Figura 1 se muestran los valores promedios de las relaciones H/C vs O/C para las biomasas de estudio. Las mismas resultaron en un rango de 1,79 a 2,02 para H/C y entre 0,84 y 0,91 para O/C, ubicándose dentro del rango típico de biomasa lignocelulósica (Van Krevelen, 1950). Se muestra un menor valor de O/C (0,84) para la muestra de biomas de limoneros, lo que refleja una mejor calidad energética. La carinata y sorgo fibroso, se encuentran dentro de la zona de pirólisis, mientras que las muestras de bagazo y RAC son más reactivas y se las clasifica dentro de la zona de combustión. El mayor valor de H/C (2,02) lo presentó el sorgo fibroso, indicando potencial para producir gases ricos en hidrógeno. La consistencia de estos hallazgos destacada el hecho que las biomasa secas presentan un alto contenido de H/C y O/C (Méndez-Durazno *et al., 2025*).

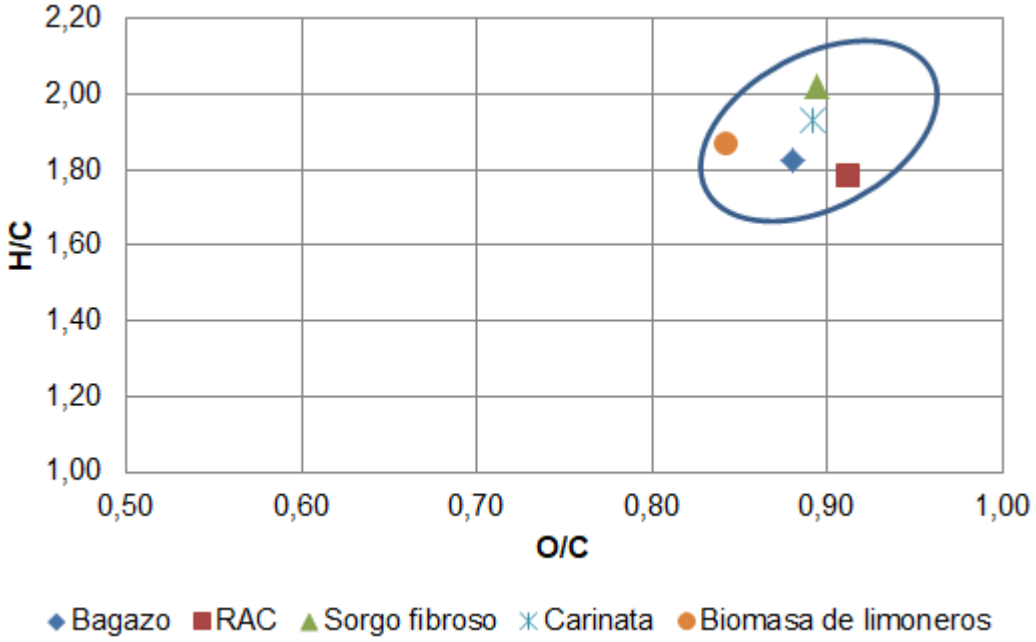


Figura 1: Diagrama de Van Krevelen de las biomasas estudiadas.

Diagrama ternario por análisis inmediato: en la Figura 2 se presenta el diagrama ternario de los valores promedios de CZ-SV-CF para las biomasas en estudio. Las muestras de carinata y biomasa de limoneros poseen un bajo contenido de CZ (2,77% y 2,13% b.s.) y valores altos de SV (> 81% b.s.), ubicándose en el diagrama con baja tendencia al ensuciamiento y alta reactividad. Para las muestras de bagazo y RAC mostraron valores elevados de SV b.s. (78% -71%), siendo estas muestras reactivas y de fácil ignición. Sin embargo, el RAC, al tener un valor alto de CZ (12,70% b.s.), tiene tendencia a la formación de escorias, que influye significativamente en la eficiencia del combustible. El sorgo fibroso con mayor CF (18,17% b.s.) indica mejor aptitud para pirólisis lenta y gasificación. Estos resultados coinciden con lo expuesto con Méndez-Durazno *et al.,* (2025), en el cual indican que se seleccionan biomasas con contenido bajo en cenizas y alto en sólidos volátiles, para procesos de conversión termoquímica, debido a su mayor reactividad y facilidad de desvolatilización. Además, estos autores concluyen que las biomasas lignocelulósicas son materias primas adecuadas para el proceso de conversión de pirólisis, gasificación y combustión, reforzando nuestros resultados.

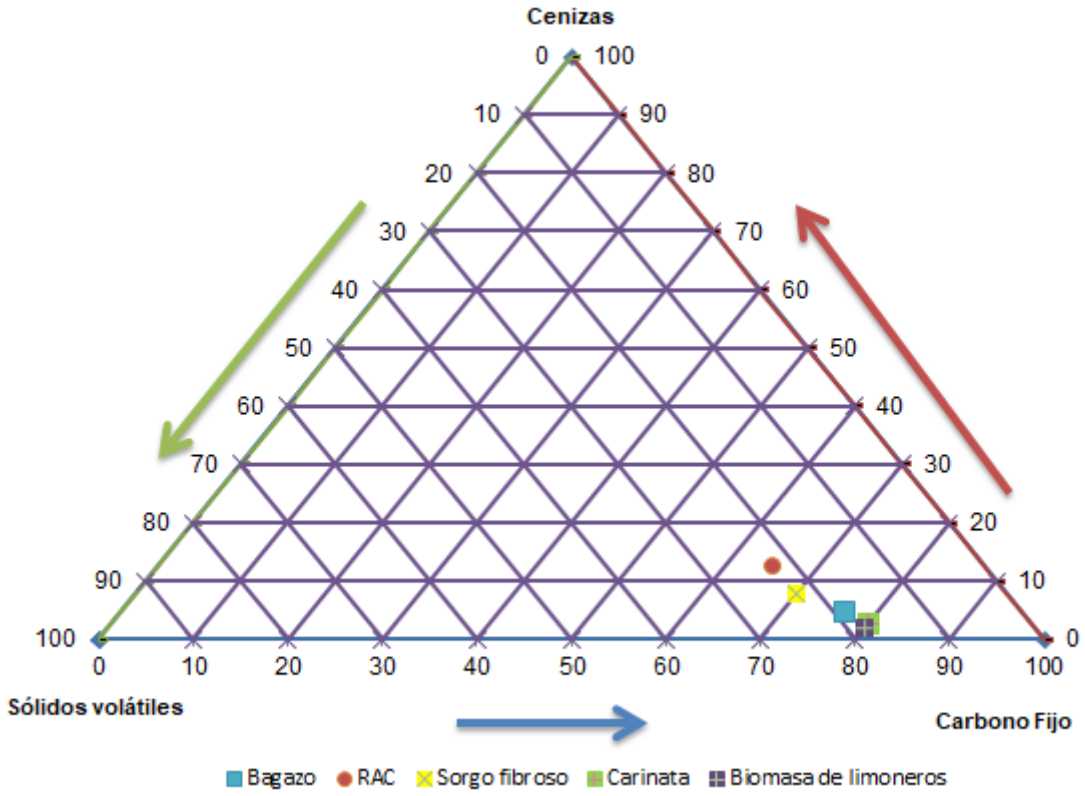


Figura 2: Diagrama ternario de CZ-SV-CF para las biomasa de estudio

Diagrama ternario por análisis elemental: en la Figura 3 se expone el diagrama ternario de los valores promedios del análisis de composición elemental, que permite analizar la afinidad de sus procesos de conversión termoquímica. Las biomasas lignocelulósicas se ubican casi superpuestas para combustibles que tienen alto contenido de oxígeno y carbono (Basu, 2013). Las muestras de bagazo y RAC que presentan mayor contenido de O (> 50,50 % b.s.), son más aptas para combustión. Mientras que las muestras de carinata y sorgo fibroso, que presentan un elevado contenido de C (> 42,50% b.s.), son más adecuadas para pirólisis. Por otro lado, las muestras de biomasa de limonero, que presentan menor contenido de O (46,83% b.s.), son propicias para los procesos de gasificación.

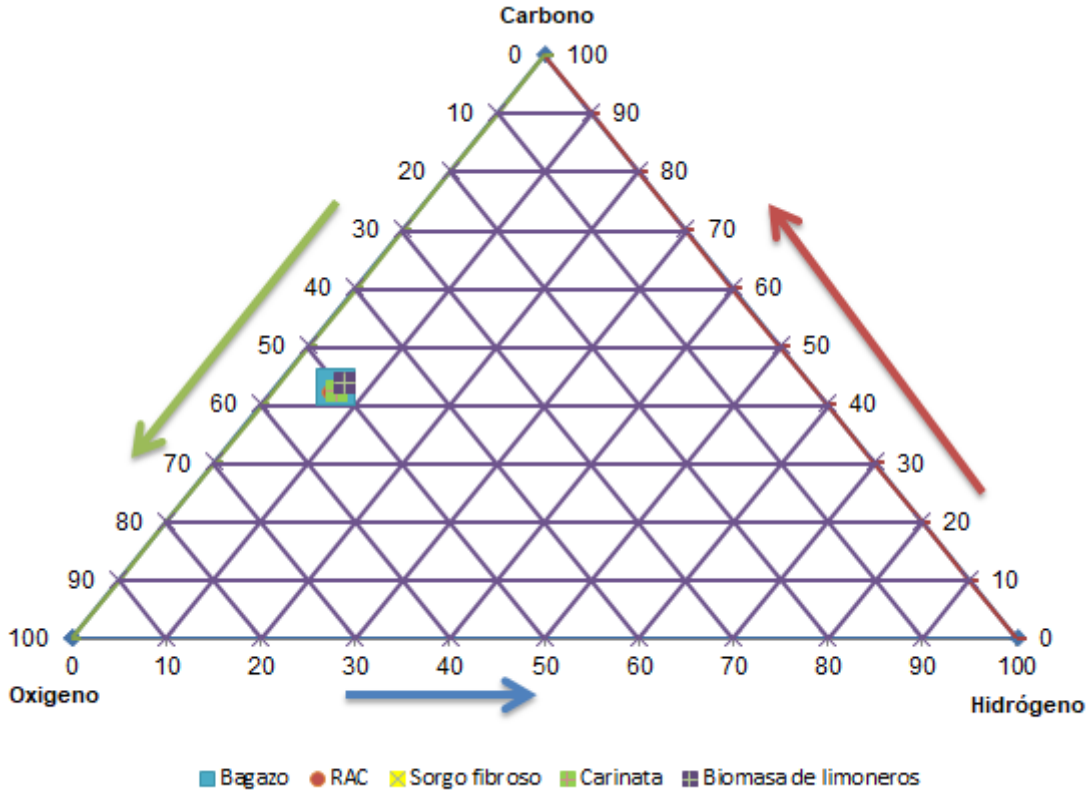


Figura 3: Diagrama ternario C-H-O de biomasa en estudio

CONCLUSIONES

Las biomasas evaluadas presentan perfiles de combustible compatibles con diferentes procesos de conversión termoquímica. La carinata y el sorgo fibroso se destacan como alternativas promisorias para procesos de pirólisis, mientras que el bagazo de caña de azúcar y los residuos agrícolas de cosecha (RAC) resultan más adecuados para su aprovechamiento mediante combustión. Por su parte, la biomasa proveniente de limoneros se perfila como un recurso de alto potencial para aplicaciones de gasificación. En conjunto, estos resultados evidencian que la región dispone de recursos biomásicos suficientes para complementar y, en el mediano a largo plazo, sustituir parcialmente el uso de combustibles fósiles adicionales actualmente empleados en ingenios azucareros y destilerías.

A partir de los resultados obtenidos, se recomienda avanzar con ensayos experimentales de pirólisis utilizando muestras de carinata y sorgo fibroso, así como con ensayos de gasificación empleando biomasa de limoneros, a fin de evaluar su desempeño bajo condiciones operativas controladas. Asimismo, como línea de investigación futura, se propone la realización de análisis termogravimétricos y de sus correspondientes curvas derivadas (DTG), que permitan profundizar en la caracterización cinética de las biomasas y optimizar su aplicación en procesos termoquímicos.

CITAS BIBLIOGRAFICAS

Basu, P. 2018. Biomass, Gasification and Pyrolysis: Practical Design and Theory. Academic Press of Elsevier. Oxford, UK, pp. 64-68.

Méndez-Durazno, C.; V. Ramírez; N. M. Robles Carrillo; M. F. Flores Enríquez; C. M. Velalcázar Rhea and R. A. Narváez. 2025. Comprehensive characterization of Ecuadorian lignocellulosic biomass in terms of their candidacy for bioenergy purposes. Clean Energy 9 (3): 128–145.

Van Krevelen, D. W. 1950. Graphical-statistical method for the study of structure and reaction processes of coal. Fuel (29): 269-84.

Zamora Rueda G.del H.; Mistretta M.G.; Gutierrez C.E.; Peralta F.; Golato M.A.; Ruiz M.; Paz D. y Cárdenas G. 2016. Características energéticas del residuo agrícola de cosecha de caña de azúcar (RAC) de Tucumán y su análisis como combustible adicional de calderas bagaceras". Rev. AVANCE 37(3): 14-18.

Zamora Rueda G. H.; Mistretta M. G.; Gutiérrez C. E.; Golato M. A.; Paz D. y Ruiz M. 2023. Caracterización energética de bagazo de caña de azúcar en Tucumán, Argentina. Rev. Industrial y Agrícola de Tucumán 100(1): 47-53.

Zamora Rueda G. H.; Golato M. A.; Machado W.D. y Paz D.2024. Caracterización energética de bagazo de caña de azúcar en Tucumán, Argentina. Rev. Industrial y Agrícola de Tucumán 100(1): 63-70

RENTABILIDAD DEL PELLETIZADO DE BAGAZO DE CAÑA DE AZÚCAR EN INGENIOS DEL NOROESTE ARGENTINO: ANÁLISIS ECONÓMICO Y OPORTUNIDADES

Martínez Pulido, G.; Martínez Batista, F.; Salazar, R.A.; Rearte, M.

Instituto Nacional de Tecnología Industrial (www.inti.gob.ar), Real Audiencia de Charcas 21, San Miguel de Tucumán. Tucumán, Argentina. e-mail: mrearte@inti.gob.ar

Introducción

En el Noroeste Argentino (NOA), la industria azucarera constituye un pilar económico fundamental, generando volúmenes considerables de bagazo de caña de azúcar. Históricamente, el mismo ha sido utilizado como combustible in situ para la generación de vapor y energía en los propios ingenios. Sin embargo, el manejo del excedente no aprovechado plantea desafíos logísticos y ambientales críticos, debido a que su conservación y almacenamiento no son eficientes, reduciendo las posibilidades de su aprovechamiento, en especial fuera de la temporada de zafra o al inicio de la próxima zafra.

En este contexto, el proceso de pelletizado surge como una solución tecnológica para la valorización energética, permitiendo densificar y estandarizar el bagazo en un biocombustible sólido (BCS) de mayor valor comercial y prestaciones diferenciales. Este proceso no solo mejora la estabilidad logística, sino que se posiciona como una estrategia clave de economía circular para diversificar el modelo económico de los ingenios, tradicionalmente dependientes del azúcar y el bioetanol (IPAAT, 2024). Para sumar a este esquema el INTI ha realizado pruebas de conformado de pellets de bagazo y probado en equipos industriales de combustión el desempeño de estos BCS logrando buenos resultados validando los lineamientos normativos (Martínez Pulido *et al*, 2017).

A pesar de las ventajas teóricas, la viabilidad económica del pelletizado está condicionada por variables críticas como la humedad inicial del material, la escala de producción y los costos operativos locales. El presente trabajo evalúa la viabilidad económica de la potencial implementación del proceso de pelletizado de bagazo en ingenios del NOA. Se analiza el diagrama de flujo, los requerimientos de capital (CAPEX) y operativos (OPEX), con el fin de determinar el margen anual y el periodo de recuperación de la inversión. Bajo los supuestos de este modelo, se busca demostrar que la optimización de este recurso renovable no solo incrementa el valor agregado, sino que arroja indicadores financieros de alta rentabilidad.

Materiales y métodos

Materia prima

El bagazo de caña de azúcar sale del proceso con humedad típica post-extracción de 45%. Asimismo, la operación de pelletizado requiere de etapas de adecuación previa a la compresión: reducción de tamaño (1-6 mm) y secado hasta humedad de 15 %.

Descripción de las etapas principales del caso base

El proceso de producción de pellets a partir de biomasa ha sido mostrado por diferentes investigadores (Martínez Pulido *et al*, 2022; Liaño Abasca *et al*, 2023;). Considerando las tecnologías expuestas en esos trabajos fueron definidas las etapas necesarias que son descriptas a continuación (figura 1).

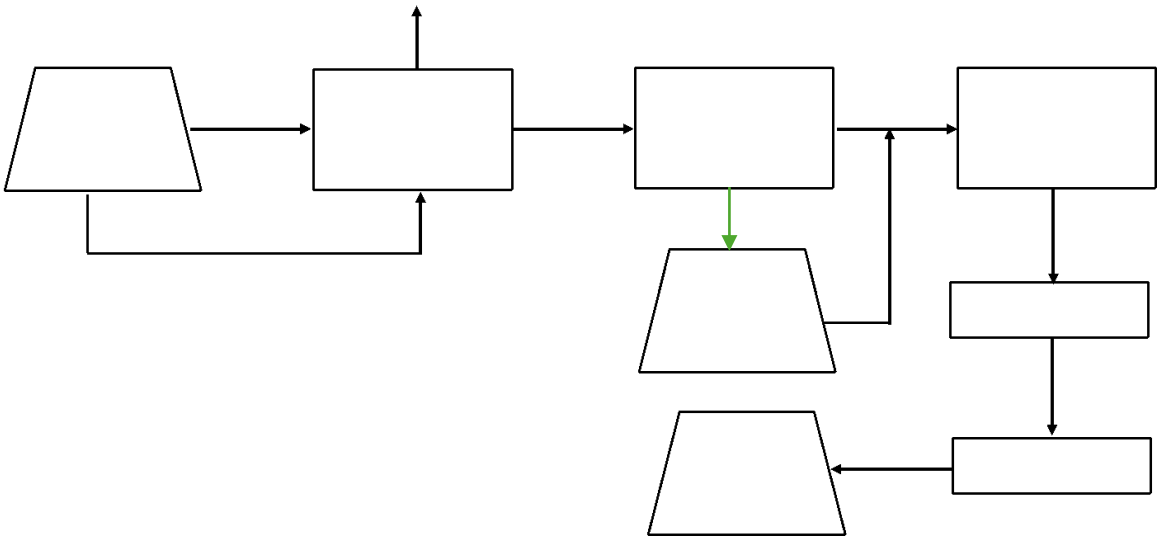


Fig. 1 - Etapas principales del proceso de pelletizado para el caso considerado.

- Secado: se seleccionó un secador rotatorio, alimentado con un flujo de 1545,5 kg/h de bagazo húmedo (45%) y aire a una temperatura de 200 ºC. En este equipo el bagazo se seca hasta una humedad de 15%.
- Molienda: para esta etapa el equipo que se propuso fue un molino de martillos con motor eléctrico de 55 kW. Se consideró que el proceso fue realizado para un flujo de bagazo de caña de 1000 kg/h, a una temperatura ambiente de 30 °C y con una humedad de 15%. Lo que se busca en este proceso es homogeneizar la granulometría del bagazo de modo de alcanzar un tamaño de partículas de 1 – 6 mm.
- Pelletizado: se escogió una máquina pelletizadora de matriz anular, de 520 mm de diámetro, motor eléctrico de 90 kW, que opera bajo el principio de densificado por termocompresión.
- Enfriamiento: se propuso un equipo enfriador a través de la inducción de aire para enfriar el pellet y lograr mayor dureza en el pellet. El pellet sale de la matriz a 90-100°C aproximadamente y debe enfriarse hasta temperatura ambiente.
- Tamizado: se seleccionó una zaranda vibratoria para eliminar las partículas que no fueron adheridas al pellet (finos).
- Acopio: el pellet listo y conformado se acopia en un silo dado que su segmento de mercado es pellet industrial por lo que su despacho y comercialización es a granel.

En esta etapa, cabe aclarar que el acopio de pellet de bagazo ofrece una optimización de espacio utilizado respecto al bagazo sin compactar, debido a la densidad aparente de material según su formato. El bagazo húmedo (45%) posee una densidad aparente entre 80-120 Kg/m^3 mientras que el pellet (H=10%) supera los 650 Kg/m^3, esto es, 5-8 veces menos volumen ocupado aproximadamente.

Evaluación de la rentabilidad económica

Para realizar esta evaluación se tuvieron en cuenta los precios de los equipos de los procesos principales, ajustados para el presente año, incluyendo equipos periféricos (cintas transportadoras, ciclones, sensorización y monitoreo, etc) para poder luego calcular los principales indicadores económicos. El costo de los equipos y la inversión en obra civil considerados se presentan en la tabla 1.

Obra civil y utilidades

Para este caso de estudio se tuvieron en cuenta los siguientes ítems:

- Bases de equipos, sala de máquinas, estructura y cerramiento, fundaciones para secador/filtración, playas de acopio y circulación interna.
- Eléctrico e IyC: tableros, variadores, MCC, cableado, instrumentación de proceso, PLC/SCADA.
- Utilidades: vapor para acondicionamiento, aire comprimido, agua de proceso, sistema de aspiración, red contra incendios y control de polvo (ATEX/NFPA aplicable).

Tabla 1: Costos de los equipos e inversión en obra civil. Fuente: elaboración propia.

ítem	Descripción	Costo (USD)
	Equipos	
1	Molino	$ 85.000,00
2	Secadero	$ 300.000,00
3	Pelletizadora	$ 211.000,00
4	Enfriador	$ 40.600,00
5	Tamizadora	$ 5.000,00
6	Periféricos	$ 50.000,00
		$ 691.600,00
7	Obra Civil	$ 400.000,00
	Total	**$ 1.091.600,00**

Metodología económico-financiera

El análisis económico considerado en este estudio tuvo en cuenta:

- Gastos de capital (CAPEX): equipos de proceso + auxiliares + obra civil + eléctrico/IyC + contingencia.
- Gastos operativos (OPEX): energía eléctrica, energía térmica para secado, mano de obra, mantenimiento, otros (consumibles, laboratorio, seguros).
- Inversión Inicial: I_0
- Egresos: OPEX
- Ingresos: venta de pellets [USD/t]
- Flujo de Caja para el periodo t (F_t): Ingresos - Egresos
- Valor Actual Neto es: $VAN = \sum_{t=1}^{n} \frac{F_t}{(r)^t} - I_0$ n=10; r= tasa de descuento (29%)
- Tasa Interna de Retorno (TIR): Tasa de descuento (r) para la cual el VAN es cero

Supuestos (estimativos):

- Capacidad de producción de pellet [t/h]: 1
- Requerimiento de bagazo húmedo [t/h]: 1,85
- Tiempo de funcionamiento [hs]: día: 20; anual: 6.000
- Precio pellet [USD/t]: 110
- Costo Energía [USD/kWh]: 0,113

- Combustible para el proceso de secado: Por cada kg de bagazo secado (45 - 15% de humedad) 0,312 kg de bagazo (45% de humedad).
- Costo de RRHH [USD/año]: 99.310,00 (4 personas por turno, dos turnos; 12.413 USD/año c/operario).
- Mantenimiento: 6% del CAPEX/año; OPEX: 3% de ventas.

El análisis económico se completó con el cálculo de los indicadores VAN, TIR y punto crítico.

Resultados

A continuación, se presentan los resultados obtenidos al considerar la producción de 6.000 t/año de pellets de bagazo de caña de azúcar.

- Ingresos anuales [USD]: 900.000,00
- Flujo neto anual [USD]: 607.385,00
- VAN [USD]: ≈ 117.924,00
- TIR [%]= 33
- Recuperación de la inversión: tercer año
- Precio de venta de pellet de bagazo [USD/t]: 110
- Precio de venta [USD/t] (Punto Crítico): 104

El precio de venta se definió en primera medida analizando los costos fijos y variables del proyecto. En segunda medida analizando el precio de los biocombustibles que presentan una competencia directa, chip y pellets de madera, los cuales se presentan a modo informativo en la tabla 2.

Tabla 2. Precios Biocombustibles.

Precio Biocombustibles [USD/t]			
	Pellet Pino	**Chip**	**Pellet Bagazo**
NOA	170	55	110
Centro	190		
Bs. As.	230		
Sur	310		
Mercado europeo			

Análisis de sensibilidad - Variación del precio de venta

El análisis de sensibilidad a la variación del precio de venta arrojó como punto crítico el valor de 104 USD/t. Por debajo de este valor el proyecto deja de ser rentable.

Tabla 3. Análisis de Sensibilidad.

Escenarios				
Precio de Venta [USD/t]	**104***	**110**	**130**	**150**
VAN [USD]	$ 6.946,00	$ 117.924,00	$ 487.851,00	$ 857.777,00
TIR [%]	29	33	44	56

* punto crítico.

Conclusiones

Los resultados evidenciaron que el pelletizado de bagazo en ingenios del NOA posee una rentabilidad TIR de 33%. Para llevar a cabo el proceso de pelletizado, es necesario acondicionar el bagazo en humedad y granulometría. El pellet obtenido es un biocombustible estabilizado, capaz de permanecer acopiado más tiempo y reducir el volumen ocupado entre 5-8 veces.

Es importante tener en cuenta que la viabilidad de implementación del proyecto posee una gran sensibilidad con el precio de venta del pellet, por lo que representa una variable de gran impacto al evaluar su ejecución. Si bien en Argentina al tratarse de un mercado no regulado, el mismo es muy variable y heterogéneo, en el mundo las tendencias de crecimiento en el ámbito de la bioenergía y particularmente en el mercado del pellet son muy marcadas, como se puede observar en la figura 2, donde el pellet de origen no leñoso sumaría más de un 50% de la demanda mundial para el año 2030.

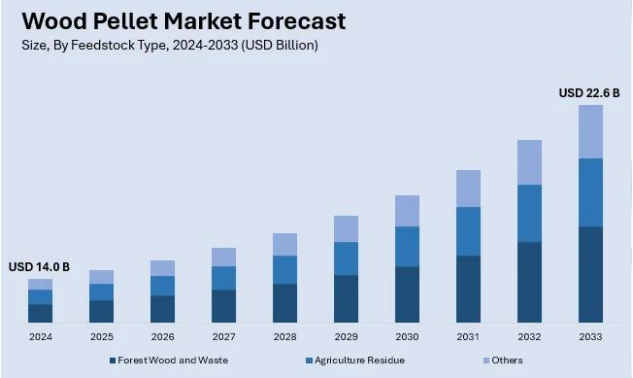


Fig. 2 - Tendencia del mercado del pellet a partir de diferentes biomasas (imarc).

Deben tenerse además en cuenta los beneficios ambientales de su implementación: reducción de emisiones de GEI (54-59%) al evitar/minimizar el uso de combustibles de origen fósil para transporte (optimización de la logística) y generación de energía; como también mejora de la calidad del aire al no contener azufre (lluvia ácida), y producir niveles significativamente menores de hollín y cenizas en comparación con el carbón o la leña tradicional. Otro beneficio de este tipo de proyecto es de tipo social: la generación de empleo de mano de obra local.

Recomendaciones

Para cada caso particular se recomienda:

- Evaluar disponibilidad real de bagazo excedente y su calidad en el ingenio objetivo.
- La operación de secado domina OPEX y emisiones. Usar gases de caldera de bagazo, biomasa residual o biogás del ingenio mitiga costo y la huella ambiental asociada. Debe ser analizada la sensibilidad de los costos energéticos del secado.
- Tener en cuenta parámetros fundamentales de calidad del pellet: controlar finos (<1–2%), durabilidad mecánica (>95%), densidad aparente (600–700 kg/m³), humedad (8–12%).
- Emisiones y seguridad: filtración (ciclón + mangas) y manejo ATEX/NFPA para polvo combustible.
- Mercado: evaluar contratos locales con industrias térmicas y cementeras; considerar la logística a granel para reducir el costo por tonelada. Explorar mercados locales e internacionales para pellets.
- Integración con el ingenio para optimizar el proceso: sinergias en vapor/energía, uso de bagazo excedente y personal existente en zafra.

- Considerar el procesamiento de otras biomasas disponibles, especialmente en el periodo de interzafra.
- Implementar herramientas de calidad y certificación: En el mundo una estrategia para establecer lenguajes técnicos homogéneos y poder garantizar la confiabilidad de estos nuevos biocombustibles es implementar sellos o marcos de calidad estandarizada como por ejemplo el sello ENplus en Europa o el sello INTI de calidad bajo el estándar ISO 17225-6 en Argentina para pellet no leñosos donde el margen de mejora en el precio de mercado en el consumidor final oscila entre el 10 y 15%.

Bibliografía

IPAAT (2024). La economía circular. El Proceso de Economía Circular de la Caña de Azúcar (disponible en https://www.ipaat.gov.ar/nota/425/la-economia-circular-el-proceso-de-economia-circular-de-la-cana-de-azucar)

Liaño Abasca, N., Padrón Delgado, A. C., Pérez Colas, M. & González Suárez, E. (2023). Alternativas tecnológicas para la pelletización del bagazo de caña como forma de encadenamiento productivo. Universidad y Sociedad, 15(4), 111-119.

G. M. Pulido, Y. S. Perdiguero, F. Peralta, M. Risso; M. Rearte; Julian Clusellas. (2022) “Desarrollo industrial de un biocombustible sólido a partir de residuos de la industria olivícola”. Encuentro Iberoamericano de Biomasa y Bioenergía.

G. M. Pulido, S. Abdelhamid, M.G. Risso, M. Rearte, (2017) “Pelletizado de residuo agrícola de cosecha de la caña de azúcar en Argentina”, Energías Renovables y no convencionales, TecnoINTI 2017.

TECNOLOGÍA DE LIMPIEZA TOTAL (TCP) DE PHIBRO PARA LA OPTIMIZACION DEL SECTOR SUCROALCOHOLERO

Souza C.- Key Account Manager - Phibro Ethanol
CORES GROUP S.A.S.
Carlos Souza@pahc.com

El Programa TCP (Tecnología de Limpieza Total) de Phibro ofrece una solución integral para optimizar plantas sucroalcoholeras mediante la prevención de incrustaciones, la mejora de la eficiencia del CIP, y el incremento del rendimiento de fermentación, destilación y evaporación. Estas mejoras permiten aumentar la producción, reducir costos operativos y minimizar tiempos de inactividad.

1. Problemática del sector

Las plantas sucroalcoholeras enfrentan graves problemas operativos relacionados con incrustaciones y contaminación, que provocan:

- Pérdidas de rendimiento y energía
- Contaminación microbiológica
- Mayor frecuencia de limpiezas mecánicas
- Paradas no programadas por obstrucciones y roturas de cañerías

2. Enfoque innovador de Phibro

A diferencia del CIP tradicional, el enfoque TCP se basa en prevención y acción detergente avanzada, permitiendo:

- Reducir la formación y adherencia de depósitos
- Facilitar su remoción durante el CIP
- Minimizar o eliminar el enjuague final
- Disminuir la duración y frecuencia de los ciclos CIP

3. Beneficios clave del programa

- Ahorro significativo de costos operativos
- Incremento de la eficiencia global de planta
- Tecnología avanzada para prevención de incrustaciones
- Soluciones químicas formuladas para diferentes etapas y equipos
- Programas totalmente personalizados para cada cliente

4. Mejoras demostradas en procesos críticos

Fermentación

- Reducción del ácido láctico
- Menor carga microbiana
- Mejor relación etanol/glicerol
- Eliminación de fuentes de infección

Destilación

- Aumento del tiempo entre CIP (hasta 148 días comprobados)
- Reducción del ensuciamiento de columnas
- Ahorros documentados en consumo de vapor

Evaporación

- Reducción de frecuencias CIP: 70%, 82% y 88% en los años 1, 2 y 3
- Prácticamente cero tubos obstruidos (de 80% a 1%)
- Mayor eficiencia en eliminación de agua
- Incrementos de producción de hasta +16.000 gal/día en casos reales

5. Evidencia visual y ensayos técnicos

La presentación incluye comparativos gráficos y fotográficos que demuestran:

- Limpiezas superiores con Phibro Clean vs. soda sola

- Disolución de incrustaciones del 87,7% con Phibro AC, frente al 46,4% del ácido fórmico

6. Portafolio de soluciones TCP

Phibro ofrece productos diseñados para cada tipo de depósito:

- Phibro SI: inhibidor de incrustaciones inorgánicas
- Phibro DC: control orgánico
- Phibro Clean: detergente cáustico
- Phibro AC: ácido + detergente para depósitos severos

7. Conclusión

El Programa TCP permite a las plantas maximizar su producción de etanol mediante mayor eficiencia, menor ensuciamiento, limpiezas más rápidas, menor consumo energético y menos paradas operativas. Se trata de una estrategia integral basada en química avanzada, prevención y optimización continua, ya validada con resultados reales en campo.

IMPLEMENTACIÓN INDUSTRIAL DE SULFITACIÓN MEDIANTE APLICACIÓN DIRECTA DE SO_2 LICUADO (SULFITO LÍQUIDO AZUCARERO) EN JUGO DE CAÑA DE AZÚCAR

MANUFACTURAS QUÍMICAS JUAN MESSINA S.A.
Área Técnica – División Aplicaciones Industriales
Mendoza – Argentina administracion@juanmessina.com.ar acantisani@juanmessina.com.ar

Palabras clave: sulfitación; dióxido de azufre; jugo de caña; clarificación; innovación tecnológica.

Introducción

La sulfitación constituye una etapa fundamental en el proceso de clarificación del jugo de caña de azúcar, donde el dióxido de azufre (SO_2) actúa como agente reductor y acondicionador químico que favorece la remoción de impurezas y contribuye a la obtención de un producto final de calidad adecuada.

Tradicionalmente, el SO_2 utilizado en este proceso se genera dentro del propio ingenio mediante la combustión de azufre en hornos específicos. Este método implica que el ingenio azucarero opere, en la práctica, una pequeña unidad de generación de dióxido de azufre dentro de su propio proceso productivo.

Sin embargo, la generación de SO_2 por combustión presenta limitaciones operativas conocidas, entre ellas rendimientos no estequiométricos, variaciones en la calidad del gas generado, discontinuidades asociadas a la operación del horno, requerimientos de mantenimiento, además de puntos débiles en seguridad y control ambiental.

En este contexto surge la alternativa de utilizar dióxido de azufre licuado suministrado externamente, aplicado directamente al proceso de sulfitación bajo la denominación comercial Sulfito Líquido Azucarero, lo que permite transformar la sulfitación en un proceso industrial más controlado, estable y eficiente.

Objetivo

Presentar la implementación industrial de un sistema de sulfitación basado en la aplicación directa de dióxido de azufre licuado, denominado Sulfito Líquido Azucarero, que reemplaza el proceso tradicional de generación de SO_2 mediante combustión de azufre en hornos rotativos.

Esta innovación tecnológica tiene como propósito mejorar el desempeño del proceso de sulfitación en términos de:

Eficiencia
Mediante una dosificación controlada y estable del agente sulfitante.

Economía
A partir de la eliminación de costos asociados a la generación interna de SO_2, incluyendo mantenimiento de hornos, operación manual y discontinua, consumo energético, logística interna y pérdidas derivadas de fallas del proceso.

Ecología
Reduciendo impactos ambientales asociados a la combustión de azufre y a la gestión de residuos derivados del proceso.

Seguridad
Mediante la implementación de sistemas de control, enclavamientos y barreras de seguridad que permiten una operación controlada y trazable.

Calidad del producto

Garantizando una sulfitación uniforme y estable que contribuye a mejorar la consistencia en la calidad del azúcar producido.

Materiales y métodos

Materiales y métodos

El sistema de sulfitación se basa en la aplicación directa de dióxido de azufre licuado (SO_2) provisto como **Sulfito Líquido Azucarero**, mediante un conjunto de instalaciones especialmente diseñadas para su uso en ingenios azucareros.

El sistema comprende:

Tanque de almacenamiento de Sulfito Líquido

Instalado en comodato dentro del ingenio, diseñado para almacenamiento seguro del producto.

Línea dedicada de transferencia

Diseñada específicamente para el manejo de Sulfito Líquido y equipada con los dispositivos de seguridad correspondientes.

Sistema de inyección controlada

Basado en la incorporación del Sulfito Líquido en el proceso de recirculación del jugo. La ubicación y diseño del inyector constituyen un elemento crítico del sistema y forman parte del know-how operativo desarrollado por nuestra compañía para asegurar una adecuada dispersión y rápida absorción del gas en el medio líquido.

Válvulas actuadas y sistemas de enclavamiento de seguridad

Integrados mediante sensores, presostatos y sistemas de cierre automático ante condiciones fuera de operación.

Sistema de regulación instantánea

Que permite ajustar la dosificación de Sulfito Líquido en tiempo real de acuerdo con los requerimientos del proceso, logrando una sulfitación estable y medible mediante equipos adecuados.

Resultados y experiencia operativa

La implementación del sistema ha sido validada mediante un proceso progresivo de desarrollo tecnológico que incluyó etapas de ensayos de laboratorio, pruebas piloto e implementación industrial.

Las actividades de investigación y desarrollo vinculadas a este sistema se iniciaron aproximadamente nueve años atrás, permitiendo optimizar aspectos clave relacionados con el diseño del sistema de inyección, condiciones de aplicación y control del proceso.

Actualmente se cuenta con:

- **dos ingenios en operación continua**,
- **dos ingenios adicionales** que han superado etapas de prueba y se incorporan en la nueva zafra.

La experiencia acumulada incluye **más de cuatro años de operación industrial continua** en el ingenio con mayor tiempo de implementación.

Entre los resultados observados se destacan:

- estabilidad en la concentración de sulfito líquido dosificado,
- eliminación de variaciones asociadas a la combustión incompleta e irregular de azufre,
- reducción de paradas vinculadas a fallas en hornos,
- mejor desempeño del proceso de clarificación (floculación),
- menor residual de sulfitos en el azúcar,
- mejora en la uniformidad de la calidad del producto final (brillo, turbidez, color, entre otros parámetros),
- Ambiente de trabajo seguro sin emanaciones de gases del horno.

Conclusiones

La aplicación directa de **Sulfito Líquido Azucarero (SO_2 licuado)** permite reemplazar integralmente el sistema tradicional de generación de dióxido de azufre mediante combustión de azufre en hornos rotativos.

La implementación de esta tecnología transforma el proceso de sulfitación en una operación **estable, regulable y trazable**, eliminando múltiples costos indirectos asociados al mantenimiento y operación de los sistemas de combustión.

La experiencia industrial observada muestra mejoras en estabilidad operativa, el ambiente de trabajo, la calidad del producto y condiciones de seguridad del proceso.

Con esta solución, la industria azucarera puede avanzar hacia un modelo más eficiente y sostenible, asegurando la calidad del producto y el cumplimiento normativo con menores costos operativos.

Referencias

Chen, J.C.P.; Chou, C.C. (1993). Cane Sugar Handbook: A Manual for Cane Sugar Manufacturers and Their Chemists. John Wiley & Sons, New York.

Rein, P. (2017). Cane Sugar Engineering. Bartens, Berlin.

Hugot, E. (1986). Handbook of Cane Sugar Engineering. Elsevier Science Publishers, Amsterdam.

Honig, P. (1953). Principles of Sugar Technology. Elsevier Publishing Company, Amsterdam.

Clarke, M.A.; Edye, L.A.; Eggleston, G. (1997). Sucrose decomposition in sugar processing. Sugar Industry, 122, 89–102.

UNLEASH THE POWER OF DIGITAL TOOLS: PROCESS DEVELOPMENT AND SCALE-UP FOR CHROMATOGRAPHY UNITS ASSISTED BY PERFORM 4.0

Hector OSUNA[1], Eric VALERY[1], Phelipe CZELUSNIAK[2], and Cyril LEENHARDT[2]

[1] *APPLEXION SAS, 5 chemin du Pilon, 01700 Saint-Maurice de Beynost, France*;
[2] *PROCESS SOLUTIONS AMERICAS LLC (d/b/a APPLEXION), 560 Peoples Plaza, Newark, 19702, USA* phelipe.czelusniak@applexion.com

Key words Chromatography, continuous process, modeling, simulation, digital tools

INTRODUCTION

The implementation of an industrial process to produce a molecule of interest from a mixture is the daily challenge faced by companies specializing in separation and purification. These teams are confronted with a complex issue that encompasses six aspects:

1. Scientific: Having the latest state of knowledge about the mixture (the molecule(s) of interest, other species considered as impurities or potentially as by-products to be valued or, in the worst case, to be destroyed) and, notably, the available analytical methods and their limitations.
2. Qualitative: Achieving the final quality of the molecule(s) to be isolated.
3. Economic: Ensuring price and profitability adapted to the project's economic model.
4. Technical: Knowing the latest state of existing knowledge to fractionate, separate, isolate, purify known (and unknown!) species and achieve the desired quality of the molecules of interest.
5. Intellectual property and regulatory affairs: The body of knowledge that can either be applied without infringing intellectual property rules or must be applied to comply with regulations.
6. Technological: Being able to implement the necessary resources and means to successfully develop the process with the least amount of raw material possible, while ensuring reliability at every scale up to the finalized industrial process.

On the technological aspect, the use of digital methods is a widespread practice in the 21st-century industry, even essential: in fields where it would be simply unthinkable not to rely on an algorithm, software, or any digital tool to carry out a project from its inception (the discovery of a molecule's use value) to the production of a first commercial batch.

Among separation techniques, chromatography is an essential analytical and industrial technique in many fields. It allows the separation, identification, and purification of components in a complex mixture, which is crucial to ensure the quality and safety of products. The use of a digital tool to aid in the development of a chromatographic purification process contributed to the rise of continuous preparative chromatography in various domains, such as pharmaceutical, biopharmaceutical and bioindustry fields, having different specificities inherent to each field since the 1990s. A few tests on a laboratory-scale column requiring only minor amount of raw material allows the estimation of the performance of an industrial system and the sizing and operation of devices for different scales (clinical trials, demonstration scale, industrial system).

The sizing and operation of continuous chromatography on a multi-column system is not trivial and involves non-linear phenomena as well as complex pseudo-stationary behaviour. The use of simulation was and remains an asset to assess overall performances.

Among the various chromatographic techniques, preparative liquid chromatography on a column is used for large-scale purification of molecules in the agri-food industry. Chromatography allows the production of diverse molecules such as saccharides, organic acids, amino acids, proteins, and enzymes. The purification of these molecules is essential for several reasons. It ensures the safety, quality, and consistency of food products, thereby contributing to consumer protection and compliance with regulatory requirements.

Given this long-term history, modeling and simulation of chromatographic processes have been applied to these applications (food ingredients, functional ingredients, fermentation) that APPLEXION has been addressing for over 50 years.

MODELING AND SIMULATION

Initially, chromatographic modelling of mixtures allowed the reproduction of the behaviour of analyzed species from a few litres of mixture to be treated. The partial differential equation (PDE) describing the column behaviour using a lumped kinetic model with linear driving force can be described as (Ströhlein *et al.* 2006):

$$\varepsilon \frac{\partial c_i}{\partial t} + (1-\varepsilon)\frac{\partial \underline{c_i}}{\partial t} + u\frac{\partial c_i}{\partial z} = D_{ax}\frac{\partial^2 y}{\partial z^2}$$

where the concentration of solute *i* in the liquid is denoted as c_i, t is time and z the space coordinate, ε denotes the total column porosity, u the superficial flow velocity, and D_{ax} the effective axial dispersion coefficient. The mass transfer to the solid phase is given by

$$\frac{\partial \underline{c_i}}{\partial t} = k_m\left(\underline{c_i}^* - \underline{c_i}\right)$$

where k_m is the lumped mass transfer coefficient, $\underline{c_i}$ the solid phase concentration of species *i* and $\underline{c_i}^*$ is the solid phase concentration of species *i* being in equilibrium with c_i. The relationship between c_i and $\underline{c_i}^*$ can be expressed by a linear expression:

$\underline{c_i}^* = \underline{K_i} c_i$ (linear model)

where $\underline{K_i}$ is the Henry coefficient, or can be given by a modified Langmuir isotherm:

$\underline{c_i}^* = \lambda_i c_i + \frac{\underline{N}\tilde{k}_i c_i}{1+\sum_i^n \tilde{k}_i c_i}$ (non-linear model)

where λ_i is a linear term of species *i*, $\underline{N}$ is the total capacity of active sites and $\tilde{k}_i$ is the constant of adsorption/desorption equilibrium of species i.

Parameters of these equations require experimental data to be fitted. The experimental effort does not exceed the bench scale and allows the simulation of the envisaged configurations for the industrial scale without conducting any tests on a multicolumn device.

Multicolumn chromatography

A basic configuration of a continuous multicolumn chromatography system is a Simulated Moving Bed (SMB), comprising four zones (I, II, III, IV) delimited by Eluent-Extract, Extract-Feed, Feed-Raffinate and Raffinate-Eluent lines, respectively (Gál *et al.* 2006) (Figure 1). Each zone can comprise one or several chromatographic columns packed with a polymeric resin.

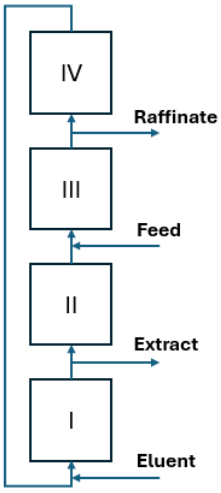


Figure 1. Schematic representation of a Simulated Moving Bed configuration.

An adequate choice of process settings for such SMB system determines if all zones are correctly adjusted to assure the separation of two main fractions, less retained (raffinate) and more retained (extract). Process settings comprise velocities in each zone and characteristic volumes of fluid flowing through each zone, named Bed Volumes (BV). A Bed Volume is a certain volume of fluid related to the volume of resin in a column. BV1, BV2, BV3 and BV4 are the corresponding bed volumes flowing through zones I, II, III and IV respectively. BVfeed is the volume of raw material to be treated related to the volume of one column and equivalent to BV3-BV2. It can be deduced (cf. Gál *et al.* 2006, David *et al.* 2007) that operating zone can be represented in a BV2-BVfeed plan as in Figure 2.

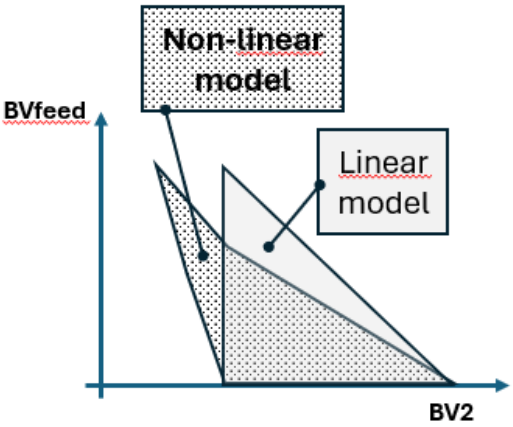


Figure 2. Operating zone on BV2-BVFeed axes. BV1 and BV4 are supposed to be correctly adjusted.

Based on simulations with fitted model, the range of process settings (operating zone) to reach objectives can be predicted and the evaluation of technical and economic feasibility of the process is achievable with low raw material consumption.

Once the project's interest is confirmed, experimental validation can be initiated at a pilot stage, which includes a finer characterization of the relationship between process parameters, its

performance (productivity, eluent consumption), and the achieved specifications (purity, impurities levels, recoveries). The volume of raw material required is in the order of a few hundred litres, well below the targeted industrial capacity (several thousand m^3 per year). This characterization allows for refining the preliminary techno-economic evaluation and provides a compelling industrial sizing.

Nevertheless, refining the operation zone requires several experiments to cover the range of process settings. A “good” operating point with robustness to cope with variability (feed stream composition, eluent quality, temperature, resin evolution) can be identified. Operating parameters are ensured over time (several years) by control-command organs (PLC, etc.) on the elements of the industrial unit (pumps, valves, sensors, etc.).

Perform 4.0

Recently, APPLEXION developed Perform 4.0, extending the uses of this digital asset to propose the best guidance on pilot and industrial unit.

Perform 4.0 is a software that introduces a new approach and some key innovations: at any uploaded system performances, the software analyses the data with the eye of an expert, compares the real life to the theory and then recalibrates itself to provide a vision of the next move.

Perform 4.0 relies on three key tools:

- The eye of the expert is inside the platform: based on Applexion know how, it is a family of three model of artificial intelligence that has been trained with more than a million profiles. This provides an intimate vision of the product distribution inside the system (Figure).
- A fast and reliable simulation that is calibrated with the real-life results providing within seconds the path to the best setting point, depending on the purity and yield constraints but also the production strategy. The best setting point is not the same if targets are the lowest water consumption or the maximum dry substance extract or the maximum achievable concentration at raffinate.
- A user interface that can be used by people with different backgrounds: new users will get their next settings within a few clicks and experts will have all the information to assess the production distributions, the quality of modeling and fine tune their path to the best settings. At the pilot scale, Perform 4.0 allows capitalizing on tests, exploiting them more easily, and having a configurable learning process (on all or part of the tests) that is simple to use (Figure 4).

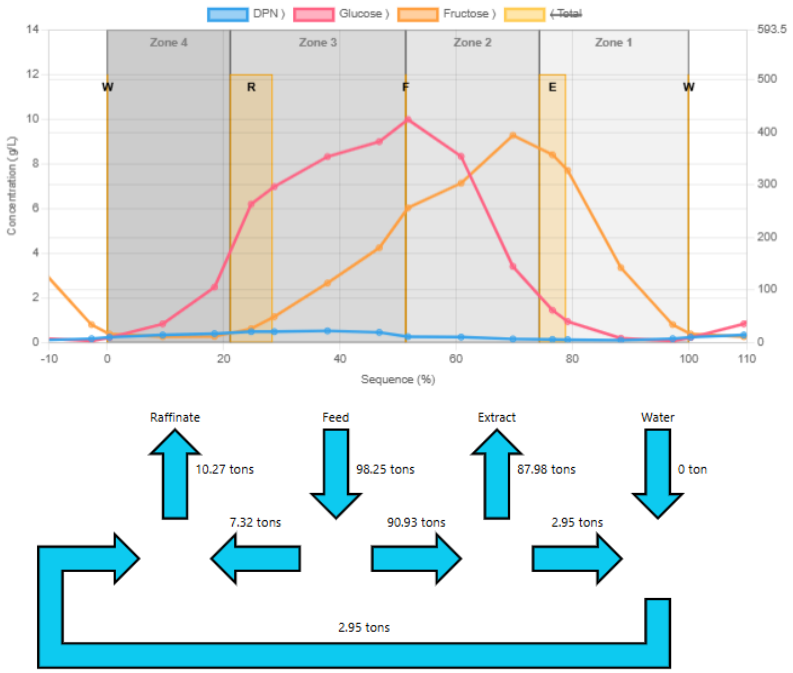


Figure 3. Based on the experimental profile, the mass balance in zones for fructose is evaluated, Perform 4.0 will provide this distribution for all the components of the feed.

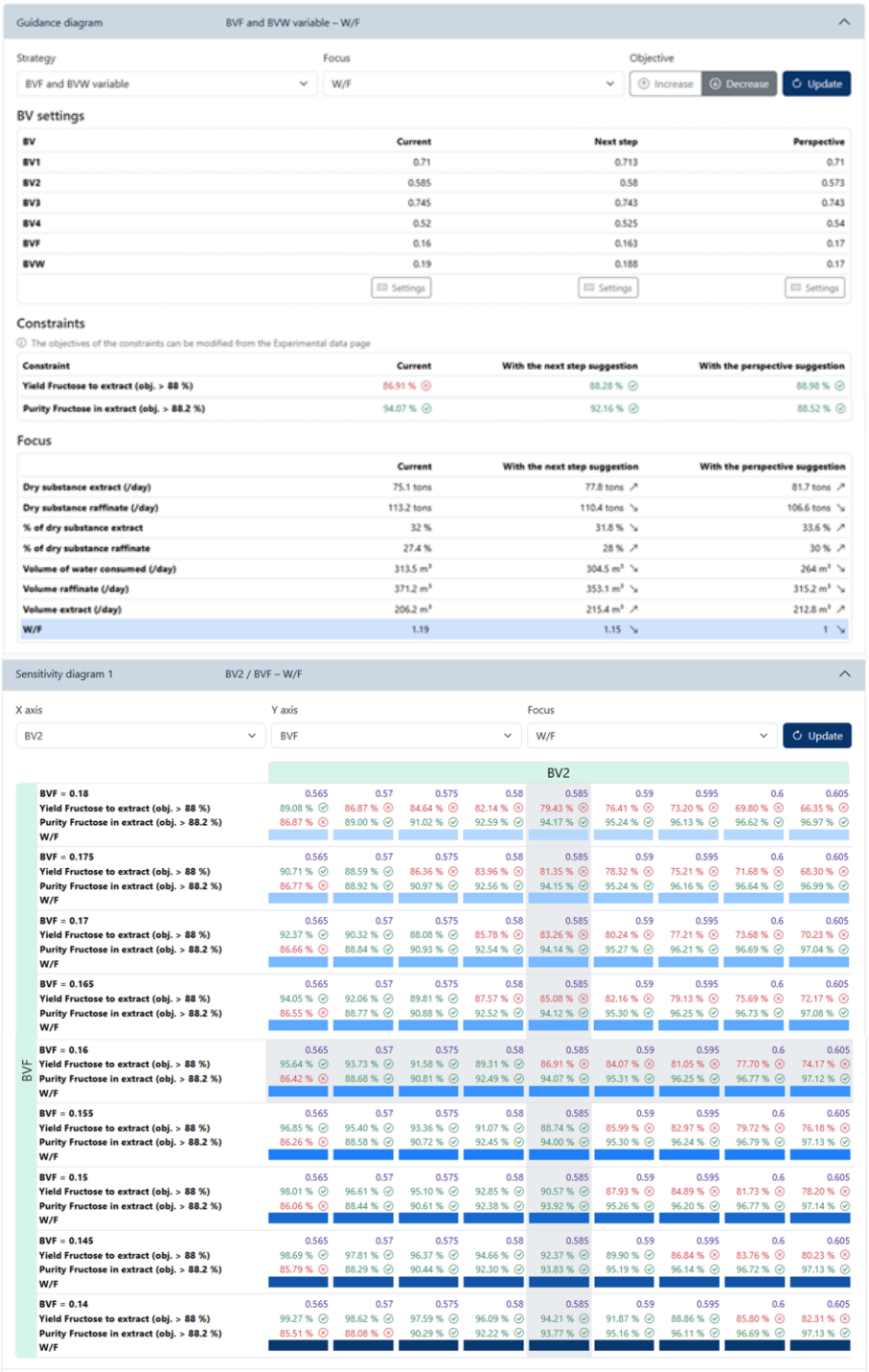


Figure 4. Guidance proposal (top) and sensitivity diagrams (bottom).

This allows the characterization of the experimental operating zone with values (mapping) and proposing different set points according to needs. For example, high productivity is not always accompanied by low eluent consumption and vice versa. The operating point of a system is no longer unique, but a set of distinct points positioned in a reliable operating space: Perform 4.0 can predict an operating zone where, while respecting purification objectives, the performances are also predicted and allow the user to make their choice.

This mapping can be transferred to the system at the industrial scale. Commissioning enables the adjustment of pilot mapping to the specificity of the industrial system.

Perform 4.0 implemented on an existing industrial unit will help to improve performances after maintenance acts and also on a daily manner with continuous optimization of the unit by applying minor changes with no risk with at the end a significant gain of production.

CASE STUDY OF AN INDUSTRIAL SYSTEM

An existing industrial chromatographic system in a Sequential Simulated Moving Bed configuration dedicated to the production of a high-purity saccharide (greater than 97%) showed a decrease in yield compared to the value achieved during commissioning (72% instead of 94%).

Development study

APPLEXION calibrated a mechanistic model and implemented Perform 4.0 using 500 mL of used resin and a 4 L sample of the mixture to be treated, containing the target Product (a monosaccharide) and three main impurities (Imp6, Imp2, Imp4, mono and di-saccharides). A pulse injection allowed the determination of the parameters of the model (Figure 5).

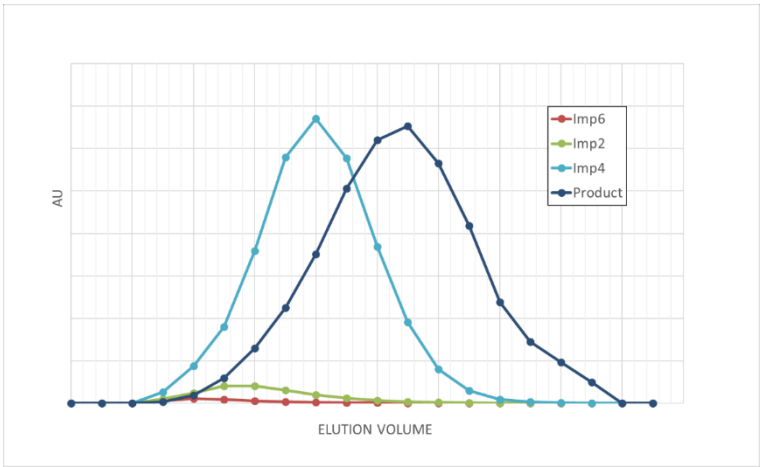


Figure 5. Chromatogram obtained from a pulse injection.

Using Perform 4.0, three settings R1-R3 increased the yield from 72% to 78%, thus reducing OPEX by 15% per ton of product while maintaining the desired purity. It was also determined that the yield could not be improved further.

Resin analysis

APPLEXION then analyzed the state of the resin and identified an ionic form that did not correspond to the ionic form recommended during commissioning. A resin regeneration recipe was tested in the laboratory on a 200 mL scale and reproduced on an industrial scale. The same R3 setting obtained during the first use of Perform 4.0 was applied: the yield increased again from 78 to 80.8% (R3').

Using regenerated resin

Using Perform 4.0 again, three additional settings R4-R6 restored the yield to 94% achieved with the industrial sizing from commissioning. The capacity of the industrial unit was thus increased by 22% with the same elution water consumption. The dry matter concentration of the fraction of interest increased by 4%, thus saving energy in the downstream evaporation process.

Impurity reduction

A final improvement by modifying BV4 aimed at reducing the impurity content in the fraction of interest. Perform 4.0 was readjusted to consider the impurity in question. An additional setting reduced the impurity Imp6 from 1.2% to 0.4% (R7).

All settings adjustments (normalized regarding initial setting R1) are shown in Table 1.

Table 1. Evolution of performances with adjusted parameters (relative values).

Parameter	Before regeneration resin			After regeneration				
	R1	R2	R3	R3'	R4	R5	R6	R7
Yield	72%	76%	78.60 %	83.50 %	88%	94.20 %	94.20 %	94.20 %
Purity	97.90 %	96.80 %	97.60 %	97.60 %	97.60 %	97.50 %	97.80 %	97.80 %
BV1	1%				-1%			
BV2		-0.81%	-0.33%			-0.16%		
Bvfeed			-14%		29%		14%	
BV4								0.40%

CONCLUSIONS

The implementation of Perform 4.0 by APPLEXION has proven to be highly effective at both the pilot and industrial scales. Perform 4.0 allowed precise and adaptable optimization of chromatographic systems, as demonstrated by the case study on a Sequential Simulated Moving Bed industrial system. Through fine adjustments and thorough analysis of resin conditions, Perform 4.0 significantly improved the system's yield from 72 to 94%, while reducing operating costs and increasing the capacity of the industrial unit. Additionally, the reduction of impurities and the increase in dry matter concentration highlight the extensive benefits achievable with continuous and tailored use of Perform 4.0.

This technology is a major asset for industries seeking to optimize their purification processes while maintaining high-quality standards.

REFERENCES

David L, Yun J, Nicoud R-M. 2017. Comparing multi-column chromatographic processes for purifying monosaccharides part I: A simplified approach. Adsorption 23: 577–591.

Gál G, et al. 2006. Simulated moving bed (SMB) separation of pharmaceutical enantiomers and crystallization. Hungarian Journal of Industrial Chemistry 34: 1-14.

Ströhlein G, Aumann L, Mazzotti M, Morbidelli M. 2006. A continuous, counter-current multi-column chromatographic process incorporating modifier gradients for ternary separations. Journal of Chromatography A 1126: 338–346.

ASSESSING THE CARBON FOOTPRINT OF INDUSTRIAL EQUIPMENT: A CASE STUDY IN CANE SUGAR PROCESSING

Marlene Beyerle[1], Antoine Charbonneau[2], Phelipe Czelusniak[2], and Cyril Leenhardt[2]

[1]*Applexion SAS, 5 chemin du Pilon, 01700 Saint-Maurice de Beynost, France;*

[2]*Process Solutions Americas LLC (d/b/a Applexion), 560 Peoples Plaza, Newark, 19702, USA*;

phelipe.czelusniak@applexion.com

Key words Ion exchange, activated carbon, decolorization, carbon emission, sugar refinery

INTRODUCTION

The growing urgency for climate action demands rigorous scrutiny of industrial processes and their environmental impact. Here, we delve into the principles of calculating the carbon footprint for industrial equipment, emphasizing its crucial role in identifying and mitigating greenhouse gas (GHG) emissions. To demonstrate the practical application of these principles, we present a comparative case study in the context of cane sugar syrup decolorization. We critically evaluate two established technologies: Ion Exchange (IEX) and Granulated Active Carbon (GAC) adsorption. The final result was compelling: the comprehensive carbon footprint calculation of each technology shows that Ion Exchange carbon footprint is drastically lower than Granulated Activated Carbon's. The data presented in this paper shows clearly that the gap is large due to the nature of GAC itself. We outline potential improvements for both technologies and leave no doubt that the usage of so-called "biofuel" in the kilns for GAC reactivation will not bring any substantial gain.

DEFINITIONS AND CONCEPTS

The calculation of the carbon footprint is a new science that will become of greater importance in global industries. We give a brief introduction to describe what are the main terminologies and concepts to be understood prior to detailing emission calculations.

What is the carbon footprint?

The carbon footprint corresponds to the total amount of greenhouse gasses (GHG) emited by an activity or a product throughout its life cycle (Figure 1). It is usually expressed in tonnes of carbon dioxide equivalent (CO_2e or CO_2-eq).



Figure 1. Main greenhouse gasses contributing to global warming (picture source: Evocon).

Why CO_2 equivalent?

It is important to note that not all greenhouse gases have the same impact on global warming. A carbon dioxide equivalent or CO_2 equivalent, abbreviated as $_{CO2eq}$ or CO_2e is a metric used to compare the emissions from different greenhouse gases on the basis of their global warming potential (GWP), over a given period of time, typically 100 years (Table 1) GWP is also sometimes referred to as "carbon intensity". Using a common unit simplifies calculations and case-to-case comparisons by converting amounts of other gases to the equivalent amount of carbon dioxide (CO_2) with the same global warming potential.

For example, the GWP for methane is 28 and for nitrous oxide 265. This means that emissions of 1 tonne of methane and nitrous oxide are respectively equivalent to emissions of 28 and 265 tonnes of carbon dioxide.

Table 1. Global warming potential per type of greenhouse gas over 100 years.

GHG	GWP_{100y}
CO_2	1
CH_4	28
N_2O	265
CHF_3	12,400
SF_6	23,500

Methodology choice

Several tools and methods are commonly used to make these emissions calculations. Among the most important, are:

- The carbon footprint: it allows quantifying an organization's GHG emissions, considering its direct and indirect activities.
- Life cycle assessment (LCA): it allows assessing the environmental impact of a product or service, considering all stages of its life cycle, from raw material extraction to end-of-life.

Scopes 1, 2, and 3

The GHG protocol, an international standard, classifies GHG emissions into three scopes (Figure 2):

- Scope 1: Direct emissions. These are direct emissions generated by the company's own activities, such as those from burning fossil fuels for heating or transportation. Example at the refinery: carbon emissions linked to steam production (boiler), or kilns (GAC reactivation) belong to Scope 1.
- Scope 2: Indirect emissions related to energy. These are emissions generated by the consumption of electricity, heat, or steam produced by external sources. Example at the refinery: carbon emissions linked to electricity consumption belong to Scope 2.
- Scope 3: Other indirect emissions. These are emissions generated by upstream and downstream activities of the company, such as emissions related to the production and supply of raw materials, waste management, the transportation of finished products, or employees travelling. Example at the refinery: carbon emissions linked to the usage of chemicals in the process belong to Scope 3.

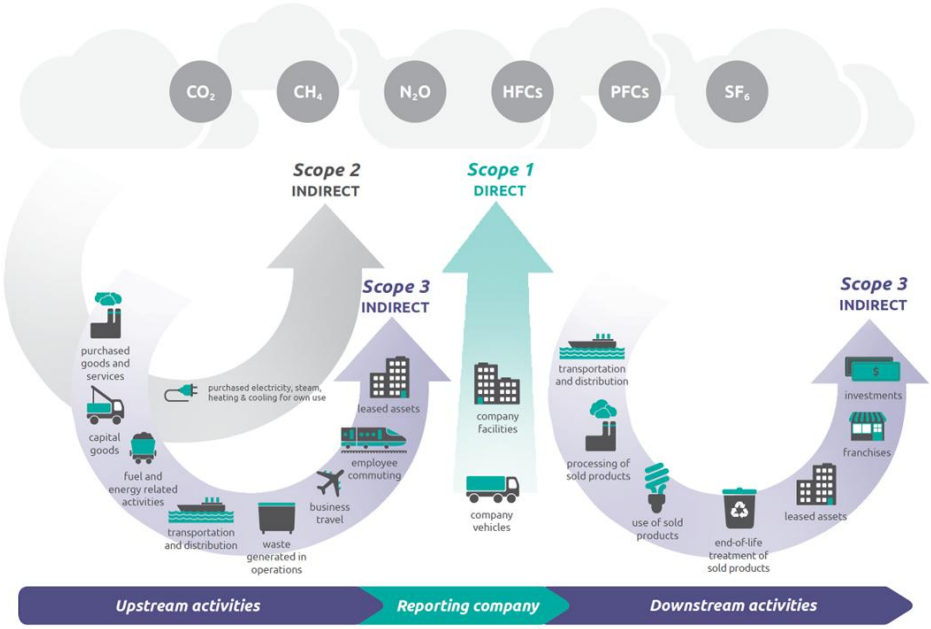


Figure 2. Scopes summary (picture source: GHG Protocol).

How to calculate the carbon footprint in the industry?

Calculating the carbon footprint in the industry is a complex process that requires the following steps:

- Define the study scope: it is essential to clearly define the activities and products to be considered in the calculation.
- Collect data: it is necessary to collect accurate data on energy consumption, and all other sources of emissions.
- Perform the calculation: the carbon footprint calculation can be conducted using specific tools, such as the ADEME's Carbon footprint methodology (*Bilan Carbone*®), or internationally recognized methodologies from GHG Protocol or ISO 14064 norm.
- Analyze the results: it is important to analyze the calculation results to identify the main sources of emissions and implement reduction actions.

In general, the most important part of the exercise is to first make a clear list of all the relevant emission sources and for each of them base the calculation on data that can be well quantified (Figure 3). Then, each of these areas of emissions are to be multiplied by their emission factors. The emission factor represents the amount of CO_2 equivalent generated per unit of that source of emission.

Finding the proper emission factor is an arduous task since there is no homogeneity in the data worldwide (or even from one state to another). The emission factor for electricity is a notable example on that point: 1 kWh generated in France from a nuclear plant will have a tremendously lower emission factor than the same amount of energy generated in the USA from a powerplant using natural gas or worst, coal.

Moreover, this type of information can sometimes be seen as strategic or confidential, and not easily accessible. It is, however, to be noted that more databases are being built and fed regularly with such data, allowing companies to pursue this type of calculation with more confidence. Some are free to access and partially or totally government funded (ADEME, GHG protocol…), and some others require a subscription (Ecoinvent…).

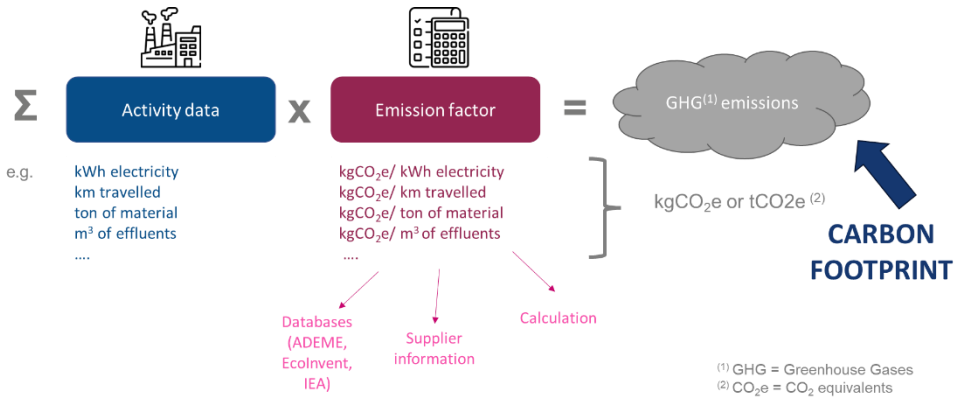


Figure 3. Carbon footprint calculation summary.

Emissions scopes: "Where you stand depends on where you sit"

Considering the elements described above, it is important to note that the different actors of the industry will not integrate all the GHG in the same scopes when calculating their own carbon footprint. Indeed, it is interesting to note that when comparing an equipment manufacturer's scopes with the end-user's scopes (refinery) some emission areas will match while others will not.

Figure 4 shows an example for several GHG emissions sources and how they are split between different scopes.

	Emission sources	APPLEXION (manufacturer)	END USER (refinery)
Emissions related to equipment manufacturing	Column manufacturing	Scope 3 (upstream)	Scope 3 (upstream)
	Resin manufacturing	Scope 3 (upstream)	Scope 3 (upstream)
	Transport	Scope 3 (upstream & downstream)	Scope 3 (upstream)
Emissions related to process operation	Electricity consumption (e.g. to run the pumps)	Scope 3 (downstream)	Scope 2
	Gas consumption (e.g. to produce stream for the heat exchangers and evaporators)	Scope 3 (downstream)	Scope 1
	Chemicals manufacturing and transport (e.g. needed for resin regeneration)	Scope 3 (downstream)	Scope 3 (upstream)

Figure 4. Scope repartition for several emitting areas, manufacturer versus end user emission scopes' split.

ION EXCHANGE AND GRANULATED ACTIVE CARBON IN THE SUGAR REFINERY: CARBON FOOTPRINT CALCULATIONS

Our target was to determine the carbon footprint linked to the sugar decolorization step within a refinery. Calculations were made for each of the main two technologies used in that process worldwide: Ion Exchange and Granulated Active Carbon. The carbon footprints calculated for each technology are compared to provide sugar industry personnel with better tools to produce their goods in a more sustainable way.

Methodology

The exercise focused on calculating the emissions linked specifically to the operation of these two decolorization technologies.

Industrial base case studied

For this exercise, a case considered as common in the sugar industry was studied: the syrup decolorization process unit. The main parameters of the industrial case study are described in Table 2.

Table 2. Decolorization process unit - Case study parameters.

Item	Unit	Value
Capacity	m^3/h	97
Capacity	tonnes DS per day	2,000
Color Inlet	ICUMSA (ICU)	1,200
Decolorization rate	%	85
Color outlet	ICUMSA (ICU)	180
Syrup Brix	%	65

Process configuration hypothesis

For the case study parameters in Table 2, a standard design was considered for both the Ion Exchange and granulated activated carbon cases. The Ion Exchange design was established based on Applexion's large experience with sugar refineries using that application (70+ references worldwide over the past 50 years). For the GAC section, the design was based on data retrieved from an existing plant. Applexion would be glad to work with GAC solution process companies to fine-tune the numbers displayed if needed. Tables 3 and 4 summarize the design configurations that were considered.

Table 3. Summary of the main design parameters - GAC hypothesis.

Item	Unit	Value
System configuration		GAC
Number of trains in parallel		4
Number of columns in series/train		2
Number of columns in reactivation/train		0.5
Number of columns in total		10
Service flow	BV/hour	0.25
Bed Volume per column	m^3	60
Columns Design		
Columns diameter	m	3.6
GAC Bed H/column	m	5.9
Vertical H/column	m	8.5
Total H/column	m	12.5
Column design pressure	bar	3.0
Construction		Carbon steel or stainless steel
Active material installed		
GAC initial filling	m^3	600
GAC type for initial filling		Coal based
GAC type for make-up		Coal based
Process parameters and active material consumption		
Production bed volumes	BV/run	70
One column reactivated every	h	35
Wet GAC to reactivation	L/h	1714
Dry GAC to reactivation	kg/h	720
Total GAC consumption*	kg/h	36
Reactivation kiln		CMI NESA

* Note: The reactivation of GAC in kilns generates losses. GAC make-up needs to be added constantly to compensate this attrition phenomena. Indeed, for the performances to be maintained, the total volume of active carbon installed inside the columns needs to be kept constant.

Table 4. Summary of the main design parameters - Ion Exchange hypothesis.

Item	Unit	Value
System configuration		Ion Exchange
Number of trains in parallel		1

Number of columns in series/train		2
Number of columns in regeneration/train		1
Number of columns in total		3
Service flow	BV/h	4
Bed Volume per column	m^3	30
Columns Design		
Columns diameter	m	4.0
IEX Bed H/column	m	2.5
Total H/column	m	6.0
Columns Design pressure	bar	8.0
Construction		Carbon steel
Internal protection		Hard rubber
Active material installed		
IEX initial filling	m^3	90
IEX type for initial filling		Styrenic
Process parameters and active material consumption		
IEX BV/run	BV	25
One column regenerated every	hours	6
Resin consumption*	L/hour	12
Nanofiltration (brine recovery)		
Number of pressure loops		7
Membranes per loop		5
Total amount of membranes		35
Evaporator (brine concentration)		Plate
Number of effects		1

* Note: In contrast to GAC, Ion Exchange resin is not continuously consumed through thermal reactivation. Resin change is conveniently happening only once at the end of resin lifetime. Resin change can be staggered between columns to prevent operation stoppages during this change. The consumption numbers in the table above reflect the total volume of resin amortized over that lifetime.

Utilities and Operating cost data

For each of the decolorization technologies, the operating costs linked to operations are summarized in Tables 5 and 6. For the Ion Exchange solution two cases were studied:

- One considering Nano-Filtration unit for the treatment and recovery of Brine effluents (“NF only”)
- One considering the most advanced brine recovery technology (“Advanced BRS”), that combines Nano-Filtration together with evaporation technology.

Operating cost values are expressed per day and per tonne of DS (dry substance) of sugar for comparison.

Table 5. Summary of operating costs for the industrial case study - GAC hypothesis.

Item	Unit	Per day	Per tDS*
Process water to sweet-off	m^3	123	0.062
Transport water to drain	m^3	41	0.021
Water for dust scrubbing	m^3	69	0.035
Electricity	kWh	Data not available**	
GAC make-up	kg dry GAC	864	0.4
Kiln steam 3,5 bar	T steam	17	0.009
Kiln natural gas for reactivation	MWh	54.0	0.027
Kiln natural gas for post-combustion	MWh	59.5	0.030
Cooling water after kiln	m^3/h	Data not available**	

*Tonne of dry substance

** Note: Data was missing for two items; their related consumption and emissions were not considered, to the favor of the GAC hypothesis.

Table 6. Summary of operating costs for the industrial case study - Ion Exchange hypothesis.

Item	Unit	Case 1 - Advanced BRS		Case 2 – NF only	
		Per day	Per t DS	Per day	Per t DS**
NaCl 100%	kg	1.48	0.70	4.6	2.30
NaOH 100%	kg	148	0.07	460	0.23
Process water for regeneration	m^3	406	0.20	476	0.24
Process water for NF CIP	m^3	22	0.01	20	0.01
Cold water	m^3/h	4	0.002	14	0.01
Electricity	kWh	3.059	1.53	2.743	1.37
Resin replacement	liters	271	0.14	271	0.14
NF membrane replacement	m^2	1.46	0.001	1.25	0.001
NF basic cleaner	liters	6	0.003	6	0.003
NF acid cleaner	liters	8	0.004	8	0.004
CIP effluents	m^3	21	0.01	100	0.05
Steam	tonne	122	0*	0	0.00
Cooling water	m^3/h	301	0.20	0	0.00

*Note: crystallization vapors reused (Applexion patented process), no net steam consumption for the Advanced BRS system

**Tonne of dry substance

Transforming consumption data to a Carbon Footprint

As above, extensive and challenging work is needed in obtaining the proper emission factor for each of the items listed that are causing a direct or indirect emission. Tables 7 and 8

summarize the emission factor for each of the items listed; data were extracted from Vilén (2021) and Vilén *et al.* (2022).

Table 7. Emission factors per area of emission gathered in the literature – GAC hypothesis.

Item	Designation	Value	Unit
Process water to sweet-off	Water	0.13	$kgCO_2e/m^3$
Transport water to drain	Water	0.13	$kgCO_2e/m^3$
Water for dust scrubbing	Water	0.13	$kgCO_2e/m^3$
Electricity	Electricity G20 average	0.44	$kgCO_2e/kWh$
GAC make-up	GAC (coal based)	10,000 *	$kgCO_2e/t$
Kiln steam 3,5 bar	Steam (Natural Gas)	190.0	$kgCO_2e/t$
Kiln natural gas for reactivation	Natural Gas	0.24	$kgCO_2e/kWh$
Kiln natural gas for post-combustion	Natural Gas	0.24	$kgCO_2e/kWh$
Cooling water after kiln	No data available		
Effluents	No data available		

*Note: The average emission factor found in the literature for GAC is around 13,000 $kgCO_2e/m^3$. Some studies even show an impact as high as 18,000 $kgCO_2e/m^3$ (Vilén *et al.* 2022; Vilén 2021). Out of transparency, and to the advantage of the GAC technology emission calculation, it was considered here to be only 10,000 $kgCO_2e/m^3$.

Table 8. Emission factors per area of emission gathered in the literature - Ion Exchange hypothesis.

Item	Designation	Value	Unit
NaCl 100%	NaCl	200.0	NaCl 100%
NaOH 100%	NaOH	1,174	NaOH 100%
Process water for regeneration	Water	0.13	Process water for regeneration
Process water for NF CIP	Water	0.13	Process water for NF CIP
Cold water	No data available		Cold water
Electricity	Electricity G20 average	0.44	Electricity
Resin replacement	IEX resin	4,500*	Resin replacement
NF membrane replacement	Organic membrane	5.86	NF membrane replacement
NF basic cleaner	NF basic cleaner	0.70	$kgCO_2e/L$

NF acid cleaner	NF acid cleaner	0.70	$kgCO_2e/L$
CIP effluents	Salty effluents	0.26	$kgCO_2e/m^3$
Steam	Steam (Natural Gas)	190.0	$kgCO_2e/t$
Cooling water	No data available		

*Note: The average emission factor found in the literature for Ion Exchange resin is around 3,200 $kgCO_2e/m^3$. Some recent data shows that anionic resin (used in decolorization process) has a stronger emission impact at around 4,200 $kgCO_2e/m^3$. Out of transparency, and to the disadvantage of the IEX technology emission calculation, is considered here 4,500 $kgCO_2e/m^3$.

Additional notes about the carbon footprint calculation

As previously discussed, the exercise highlighted differences in emissions linked to the operations of the two technologies. Emissions linked to the manufacturing of the equipment themselves were not considered. It must be noted that the amount of active carbon (bed volume) required for a refinery is always considerably higher than the amount of Ion Exchange resin for the same process, usually a magnitude of at least four times. As a result, equipment is considerably larger in the case of GAC process and so are the emissions linked to the manufacture of such equipment (because of steel consumption mainly). These numbers would definitely increase further the gap in terms of emissions between the two technologies. However, due to a lack of data, we did not make assumptions, again to the advantage of the GAC process.

To run the calculation over the full life cycle for each of the process studied, we would have needed to integrate emissions linked to the disposal of the active materials (GAC and IEX). Due to a lack of data on the matter, we preferred not to make any assumptions.

Results

Once each of the areas of emission has been measured and each of its respective emission factors have been found, the total carbon footprint can then be calculated. Figure 5 shows the total calculated emissions for each of the three decolorization cases studied. The result was clear with a carbon footprint for the GAC solution at least three times higher than the Ion Exchange solution. In case 3 (Advanced Brine Recovery system) it integrates the re-use of low-pressure vapors from the crystallization pans (Applexion patented process) and allows reducing further the carbon footprint of the Ion Exchange solution by improving the recycling of regeneration effluents.

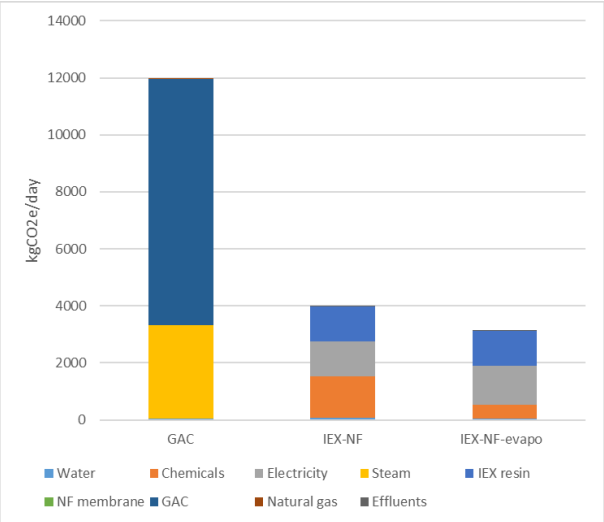


Figure 5. Total carbon footprint ($kgCO_2eq/day$) calculated per technology and split between areas of emission.

Further analysis of the calculations

As discussed in the Introduction, the last step of the exercise consists in analyzing the results of that carbon footprint in order to identify possible sources of improvement. Figures 6, 7 and 8 show how the total carbon emissions are distributed for each of the three industrial cases studied.

Ion exchange improvements

The main part of the emissions comes from the chemicals that can be reduced thanks to the advanced brine recovery system, allowing to push further the recovery of regeneration effluents. Some improvements could also be made on the electricity, and the nature of the local electricity source will have a profound impact on that. Indeed, we considered an average G20 emission factor for this calculation, but a modern nuclear sourced electricity would have reduced that area of emission by a factor of up to 12.

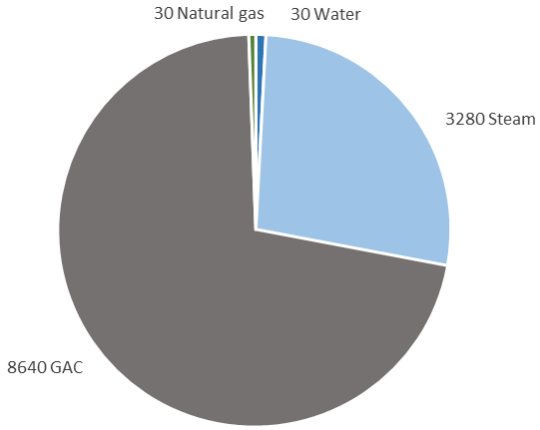


Figure 6. Total carbon emissions ($kgCO_2eq/day$) split per area of emission – GAC hypothesis.

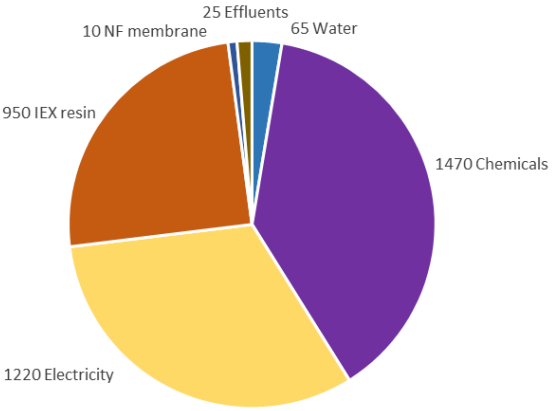


Figure 7. Total carbon emissions ($kgCO_2eq/day$) split per area of emission – Ion Exchange hypothesis (Nanofiltration only).

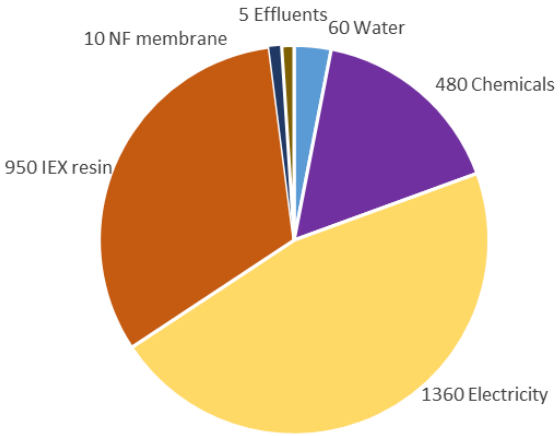


Figure 8. Total carbon emissions ($kgCO_2eq/day$) split per area of emission – Ion Exchange hypothesis (Advanced Brine recovery system combining Nanofiltration and evaporator).

Granulated activated carbon improvements

Looking first at the emissions linked to steam, a more efficient boiler could bring some amelioration. The usage of "biofuel" won't unfortunately improve that area of emission. Indeed, the total emission factor of such a product has still to be proven. Recent studies have suggested a worst carbon intensity because of all the combined indirect impacts linked to Land Use Changes or "LUC" (Lark *et al*. 2022).

The main source of emissions comes from the carbon consumption itself. Other types of carbons could be used, such as wood-based carbon or coconut-based carbon (Vilén *et al.* 2022; Vilén 2021). Compared to coal-based carbon, these two alternatives show emission factors that are respectively 35 and 54% less important. The economic feasibility of using such alternatives is yet to be proven and even in the best of these cases (coconut carbon), the total emissions of the activated carbon solution would still be 2 times higher than the ones calculated for the Ion Exchange hypothesis.

CONCLUSIONS

Our study shows that, despite the favorable assumptions made on the Granulated Activated Carbon case for several criteria, Ion Exchange technology still has a significantly lower carbon footprint for the decolorization of sugar syrup. This, among several parameters, is due to two main factors. First, IEX technology does not require the use of a reactivation process, which is energy-intensive and directly produces large amounts of greenhouse gas on site (Scope 1 emissions). Secondly and most importantly, the difference comes from the core of GAC technology which is the carbon usage itself: the manufacturing of this active material is an extremely high source of indirect emissions (Scope 3).

As the impact of global warming is increasing, sugar manufacturers should (like any other industry personnel) carefully consider the carbon footprint of the different technologies available when making a decision about which path to take. Ion Exchange technology is a more sustainable option that can help reduce the environmental impact of the sugar industry. The Applexion company is taking this topic very seriously through the implementation of a decarbonation committee directly reporting to the board. Technical offers provided to industrial personnel for the purchase of equipment will, upon demand, systematically contain carbon emission footprint calculation

REFERENCES

Lark TJ, Hendricks NP, Smith A. 2022. Environmental outcomes of the US renewable fuel standard. Proceedings of the National Academy of Sciences Environmental Sciences 119: e2101084119.

Vilén A. 2021. Environmental impact of activated carbon production from various raw materials, Master's thesis, Aalto University.

Vilén A, Laurell P, Vahala R. 2022. Comparative life cycle assessment of activated carbon production from various raw materials. Journal of Environmental Management 15: 116356.

AN IMPROVED PROCESS IN CANE SUGAR PRODUCTION WITH A SOFTENING ION-EXCHANGE STEP FOR MAJOR GAINS

Olivier Pauwels[1], Antoine Charbonneau[2], Phelipe Czelusniak[2], and Cyril Leenhardt[2]

[1]Applexion SAS, 5 chemin du Pilon, 01700 Saint-Maurice de Beynost, France
[2]Process Solutions Americas LLC (d/b/a Applexion), 560 Peoples Plaza, Newark, 19702, USA
phelipe.czelusniak@applexion.com

Key words Softening, ion exchange, sugarcane soft juice, hardness reduction, chemical-free process, scaling, fouling

INTRODUCTION

Sugar mills around the world process millions of tons of cane every day to produce raw sugar. Sugarcane is processed through several steps, involving mechanical and chemical treatments. Sugarcane naturally contains divalent ions such as calcium and magnesium, the amounts varying according to geographical location, soil composition, climatic conditions, cane variety, cultural practices and agricultural management.

During the clarification of sugarcane juice, milk of lime or calcium saccharate are added, which increase the hardness of the sugarcane juice. Hardness is a simplified concentration measure (expressed in g/L) cumulating CaO and MgO concentration in solution, affecting scaling efficiency. Clarified juice can have a composition with a CaO content in the range of a few hundred up to a thousand ppm of hardness. These calcium salts, as well as other compounds including silicates and oxalates, contribute to the formation of scale in the pipes and bodies of process equipment, and especially in the evaporator tubes and bodies. This mineral layer grows constantly and interferes with the system's ability to efficiently exchange heat. Therefore, more steam (higher temperature, higher pressure) will be required to maintain plant performance, significantly increasing its operating costs and the carbon footprint. In addition, frequent regular maintenance shutdowns, including mechanical cleanings, will be necessary when steam consumption can no longer compensate for performance losses.

ION-EXCHANGE CONCEPT AND PROCESS DESIGN

CaO and MgO salts can be efficiently removed with ion-exchange resins following the chemical reactions (R = resin body):

$2\ (RSO_3\text{-}Na) + Ca^{2+} \rightarrow (RSO_3)_2\text{-}Ca + 2\ Na^+$

$2\ (RSO_3\text{-}Na) + Mg^{2+} \rightarrow (RSO_3)_2\text{-}Mg + 2\ Na^+$

$2\ (RSO_3\text{-}K) + Ca^{2+} \rightarrow (RSO_3)_2\text{-}Ca + 2\ K^+$

$2\ (RSO_3\text{-}K) + Mg^{2+} \rightarrow (RSO_3)_2\text{-}Mg + 2\ K^+$

Strong acid cation resins are prepared with active sites exhibiting mono-cationic species (mainly Na^+, K^+) allowing for cationic exchange. During the production sequence, divalent cations are captured by the resins, due to their higher affinity for the resin (electrical load) and monovalent cations are released in the cane juice flow.

Regeneration starts when all active sites are saturated within the resin beads. Regeneration is permitted thanks to the availability of high quantities of monovalent ions, naturally present in the cane juice, that have passed through the resin bed and have been concentrated on the evaporators. Those ions are concentrated in the molasses after the softening step, thus called “soft” molasses. Part of that molasses, after dilution, can be recycled back to the softening unit, as to regenerate the resins at the end of each softening cycle.

As a result of the regeneration cycle, molasses will show an ionic shift, with monovalent cations being captured on the freshly regenerated resin and divalent cations being eluted out of the columns and transferred to the regenerating molasses. Those are then called “hard” molasses.

The process design is shown in Figure 1.

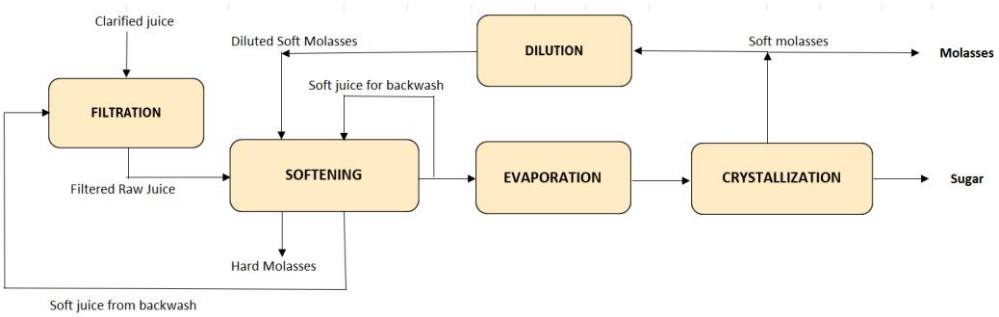


Figure 1. Cane sugar process diagram with the integration of Applexion CSF unit. The CSF unit is installed after the cane juice clarification. B or C molasses can be used for resin regeneration depending on the on-site availability.

MATERIALS AND METHODS

Location

The trials were performed for 4 weeks directly at three sugar factory sites:

- Tereos - Cruz Alta Site (Olímpia, SP, Brazil)
- Tereos - Severínia Site (Severínia, SP, Brazil)
- Industrial site (Central America)

Raw material

The feed to be treated was clarified juice obtained in the site sugar mill after the juice clarification step.

CSF Applexion Ion exchange skid for industrial piloting

The juice softening skid was configured with two filtration units and one ion-exchange column. The clarified juice was filtered firstly on two Reverflux filters mounted in serial. The column was filled with 80 L of Applexion grade XA (strong acid cation resin). 50% of column height was kept free of resin, for backwash further operation. The softening operating conditions are given in Table 1.

Table 1. Softening operating conditions.

Loading mode	Downflow
Bed volume (=1BV) (L)	80
Flow rate (BV/h)	10
Production time	2.2 - 6 hr
Regeneration	Upflow
Regeneration time	4 hr
Temperature (°C)	85-95 °C

Juice characterization

To evaluate the softening efficiency before every cycle of production a sample of clarified juice and a few samples of soft juice were collected to analyze the total hardness (CaO + MgO), Brix, pH, conductivity, ash, turbidity and suspended solids.

Analytical methods

- pH: Analyzed with pH-meter (daily recalibration)
- Conductivity: Analyzed with a conductometer (weekly recalibration)
- Brix: Analyzed with a refractometer
- Dry Solids: Measured by drying the solution in an oven overnight at 110°C. Dry solids are expressed as g of dry solids per 100g of liquid sample (%DS)
- Suspended Solids: Measured by filtering 100 g of sample in an 8 µm membrane following by 1 h drying at 110 °C. Suspended solids are expressed as mg of solids per 1 kg of liquid sample (mg/kg)
- Ashes: Analyzed with a conductometer weekly recalibrated (%DS)
- Divalent cations: Measured with EDTA test titration

Regeneration

A 10% brine solution was used for resin regeneration in the pilot trials.

RESULTS AND DISCUSSION

Filtration efficiency

Samples of juice were collected from the feed, after the first filter, after the second filter and after the column to analyze the turbidity and suspended solids content.

The use of two-stage Reverflux filters, with mesh sizes of 200 µm and 100 µm, is an effective strategy for removing turbidity and suspended solids from sugarcane juice before the softening process. The first stage, with the 200-µm filter, removes larger particles such as fibers and visible impurities, significantly reducing the solid load. In the second stage, the 100-µm filter performs a more refined filtration, removing smaller particles and further improving the juice quality before it undergoes softening. This two-stage process ensures greater efficiency in juice purification, preventing blockages in subsequent steps, resin clogging and enhancing the performance of later stages, such as clarification and softening.

The average of the results is presented in Table 2 and indicates that the filtration was efficient, removing 23% of the turbidity and 54% of the suspended solids.

Table 2. Clarified juice turbidity and suspended solid analysis; average results obtained at the Tereos Cruz Alta site.

Sample	Turbidity (NTU)	Suspended solids (mg/kg)	Turbidity reduction (%)	Suspended solids reduction (%)
Clarified juice	112.6	96.9	-	-
After pre-filtration (200 µm)	111.8	83.5	14%	1%
After filtration (100 µm)	109.0	75.3	10%	3%
Soft juice	86.3	44.1	41%	21%
Total reduction (%)	-	-	23%	54%

Suspended solids

To better understand the composition of suspended solids and its interactions with the filter and the column, samples of juice were collected from the feed, after the first filter, after the second filter and after the column. These samples were analyzed for their composition of solids content, from both mineral and organic origin. Results are shown in Table 3.

Table 3. Juice turbidity and suspended solid analysis.

Sample	Turbidity (NTU)	% DS	Susp. solids (g/kg)*	Mineral (g/kg)	Mineral (%)	Organic (g/kg)	Organic (%)
Clarified juice	166	27.0	9.30	0.524	5.6%	8.77	94.4
After pre-filtration	150	21.9	5.64	0.328	5.8%	5.31	94.2
After filtration	147	21.2	4.98	0.317	6.4%	4.67	93.6
Soft juice	122	17.0	3.26	0.285	8.7%	2.98	91.3

*The data suggest that most of the suspended solids present in the juice are of organic origin and probably small sugarcane bagasse fragments (bagacillo).

Pressure drop

The ion-exchange skid is fitted with several pressure transmitters allowing them to measure pressure at different points of the system. For the pressure drop evaluation, the pressure measurements were taken directly on skid. A positive evolution of the pressure drop within the resin bed during a production run can be hardly avoided. However, the target was to record a low pressure drop until the theoretical ionic capacity was reached. That observation should be consistent over several runs, and shows that the filtration system is working correctly, and that the ion-exchange system is not limited by significant high-pressure increase. Very low variation, less than 0.1 bar, was observed from the beginning of the softening step until resin saturation.

Softening

The juice hardness was measured at the outlet of the column during the trial. Target for the softening to be successful was to see low appearance of hardness level, meaning a high softening performance, until the ionic targeted capacity be reached.

Any appearance of hardness observed after the theoretical capacity would be considered as normal as the resin would be in an overloading saturated configuration. In industrial conditions, the resin would already be in a regeneration step.

The results of the Softening performance from cane mill#1 Site are shown in Figure 1 and for cane mill#2 site in Figure 2. In both, BV stands for Bed Volume, which corresponds to the volume of installed resin in the column. By using this volume unit, performances obtained with different ion exchange systems can be compared more easily.

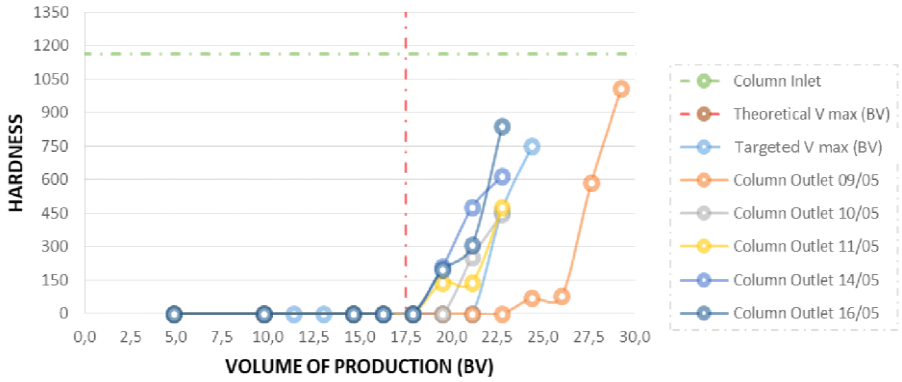


Figure 1. Evolution of the softening performance in cane mill site #1, expressed in ppm.

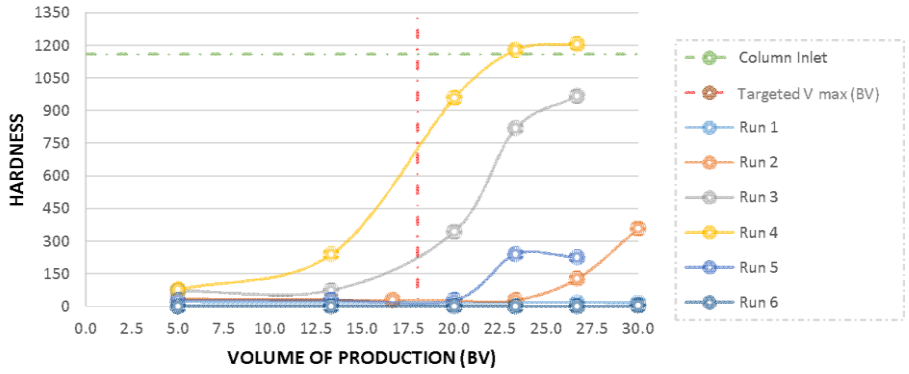


Figure 2. Evolution of the softening performance in cane mill site #2, expressed in ppm.

Juice characterization

The results of characterization of the clarified juice and soft juice are presented in Tables 4 (before) and 5 (after).

Table 4. Clarified juice characteristics (averaged) before ion exchange.

Parameter	Brazil mill site#1	Brazil mill site#2	Central America site#1	Central America site#1

			period#1	period#2
Hardness (mg/L) (CaO + MgO)	1204	1134	1155	1240
Brix (Bx)	13.83	14.58	12.3	12.2
Conductivity (mS/cm)	4.979	4.425		
pH	6.47	6.57	8.1	7.9
Ash (%)	0.78	0.62	0.62	0.59
Turbidity (NTU)	176	14	37	33
Suspended solids (mg/kg)	144	94		

Table 5. Soft juice characteristics (averaged) after ion exchange.

Parameter	Brazil mill site#1	Brazil mill site#2	Central America site#1 period#1	Central America site#1 period#2
Hardness (mg/L) (CaO + MgO)	< 50	20-140	80-100	250-350
	>94% Brine	>90% Brine	92% Brine	>80% Brine
Brix (Bx)	13.6	14.6	12.2	11.9
Conductivity (mS/cm)	5.18	4.68		
pH	6.6	6.8	8.3	7.8
Ash (%)	0.72	0.65	0.61	0.58
Turbidity (NTU)	153	88	20	24
Suspended solids (mg/kg)	49	48		

By comparing the parameters of soft juice versus clarified juice, it was easy to verify that pH, conductivity and ash show a small variation in the values, according to what was expected with the exchange of Ca^{2+} and Mg^{2+} ions by Na^{+} / K^{+} ions.

The softening process has significantly reduced the juice hardness (CaO + MgO). Although it may be suggested that the replacement of divalent ions by monovalent ions such as Na^{+} and K^{+} may negatively affect sucrose crystallization due to their melassigenic nature, this substitution has probably led to a reduction in juice viscosity. Divalent cations like Ca^{2+} and Mg^{2+} tend to promote cross-linking among colloidal and non-sugar components, increasing the viscosity and hindering mass transfer during crystallization. In contrast, Na^{+} and K^{+} ions exhibit weaker interactions with these colloidal structures, thereby decreasing viscosity and facilitating sucrose diffusion, nucleation, and crystal growth. Consequently, while an increase in melassigenic ions could potentially reduce crystallization efficiency, the simultaneous improvement in rheological properties may enhance overall sucrose recovery, suggesting a more nuanced role of ionic composition in the crystallization process.

The very low hardness values in the soft juice indicated that brine regeneration was extremely efficient, allowing it to remove the hardness of the sugarcane juice at a minimum elimination rate of 90%.

The improvement of juice quality has also been observed due to the decrease of suspended solids and colloidal material, resulting in lower turbidity.

Those promising results deserve additional work, where long-term benefits could be demonstrated with a more robust statistical analysis. Crystal quality improvement might be

partially offset by the impact of Na^+/K^+ enrichment on crystallization performance, which can only be addressed and evaluated on a larger scale piloting unit and over a longer test period.

Major gains

Implementing the technology that makes it possible to produce sugar from juice with very low hardness levels and shows a significant number of benefits:

- From an industrial perspective, the primary benefit we can analyze is the reduction in the frequency of evaporator cleaning stops. Depending on the configuration of the industrial equipment, numerous stops of evaporating may be necessary to clean the evaporators. Many multi-effects forced circulation evaporators require cleaning at least on a weekly basis. In the worst-case scenarios, these stops may be required daily.
- It is acknowledged that high-temperature calcium salts are the primary contributors to mineralization and subsequent fouling in piping and evaporators. The combination of organic and mineral fouling can be highly detrimental. However, with low-hardness juice, this fouling process is significantly reduced, enabling a substantial decrease in the frequency and duration of cleaning stops. This reduction results in considerable savings not only in the consumption of chemical cleaning agents but also in externally subcontracted services.
- The CSF process significantly reduces the risk and exposure of equipment, but more importantly exposure of workers. Fewer mechanical cleanings at very high pressure are required, dismantling of evaporator tubes is less frequent, and heavy and expensive components replacement are not required.
- With the evaporators working at full capacity, the heat transfer rate is kept almost constant, saving massive amount of steam and energy, increasing overall sugar mill operation stability, and thus improving crystal sugar recovery rate. These translate into higher productivity and lower costs. A first estimate shows that CSF process implementation could lead up to 10% in energy cost savings.
- In addition to reducing direct cleaning costs, the evaporating capacity increases, translating into a productivity increase. Considering a 6-to-8-month campaign, according to local conditions and typical hardness, productivity increase can be estimated in the range of 3 to 5%.

Combining all benefits associated with CSF technology, it is estimated that the return on investment for such an improved process could be in the range of 2 years to less than 5 years.

CONCLUSIONS

The pressure drop evolution showed very good results, indicating that the filtration design and backwash protocol is effective in protecting the resin and keeping the flow stable during many consecutive cycles, up to several months.

The trials that were performed in Latin America demonstrated the stability and the efficiency of Applexion CSF technology on sugarcane juice softening with a hardness reduction rate above 80%.

Although additional tests should validate impact on crystallization performance (melassigenic effect versus quality of sugar crystals), thanks to all combined benefits, return on investment of Applexion CSF technology can be in the range of 2 years to less than 5 years.

This work shows how ion-exchange can revolutionize cane juice softening, and unveils a game changer for the cane industry, showcasing successful trials, and quantifying the economic benefits of this highly sustainable and cost-effective solution.

REFERENCES

Chen JCP, Chou CC. 1993. *Cane sugar handbook: a manual for cane sugar manufacturers and their chemists, 12th ed.* John Wiley & Sons, New York.

De Castro B, Marcini MJ, Giulietti M, Nernardo A. 2019. Sucrose crystallization: modeling and evaluation of production responses to typical process fluctuations. *Brazilian Journal of Chemical Engineering* 36: 1237-1253.

ICUMSA. 2015. *ICUMSA Methods Book*. ICUMSA, England.

Imbachi-Ordonez S. 2025. Impact of scale composition in evaporator cleaning efficiency. *Sugar Journal* January 2025: 15-24.

Kwok RJ. 1996. Ultrafiltration/softening of clarified juice - the door to direct refining and molasses desugarisation in the cane sugar industry. *Proceedings of the South African Sugar Technologist's Association* 70:166-170.

Schlumbach K, Pautov A, Flöter E. 2017. Crystallization and analysis of beet and cane sugar blends. *Journal of Food Engineering* 196: 159-169.

White ET. 2000. A review of the crystallization of sugar. In: Gupta BS, Ibrahim S (eds) *Mixing and Crystallization.* Springer, Dordrecht.

POSTERS ÁREA AGRÍCOLA

SOCIEDAD ARGENTINA DE TÉCNICOS DE LA CAÑA DE AZÚCAR

SATCA desde 1982

CUANTIFICACIÓN, CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA Y EFICIENCIA DE RECOLECCIÓN DE RAC DE CAÑA DE AZÚCAR EN TUCUMÁN

Casen, S.D.; Zamora Rueda, G. del H. y Feijóo, E. A.

Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres, W. Cross 3150. Las Talitas, Tucumán, Argentina. email: scasen@eeaoc.org.ar

Palabras clave: cosecha en verde, caracterización energética, cogeneración, biocombustible

INTRODUCCIÓN

La crisis energética mundial promueve la búsqueda de nuevos combustibles, especialmente de fuentes renovables, que reemplacen al petróleo. En este contexto resulta interesante la factibilidad del aprovechamiento de los residuos de la cosecha de la caña de azúcar para la quema directa en generadores de vapor o para otras tecnologías tales como la gasificación de biomasa, generando gas combustible de mediano poder calorífico.

La práctica de la cosecha de la caña de azúcar en verde y el posterior manejo de los residuos agrícolas de la cosecha (RAC), son una alternativa para reducir el impacto ambiental generado por la quema de la misma, logrando sistemas más sustentables de producción e incorporando a la generación de energía eléctrica una nueva fuente de combustible renovable. La presencia de RAC en superficie contribuye a conservar la humedad del suelo, disminuir la erosión provocada por el agua y el viento, y aportar materia orgánica que, con el tiempo, mejora su fertilidad física, química y biológica. Asimismo, actúa como barrera natural contra malezas y algunas plagas, lo que permite reducir las labores de manejo del cultivo. (Casen *et al.,* 2023).

Cuando las condiciones agroecológicas dificultan la permanencia del RAC en superficie, como ocurre en áreas con exceso de humedad, es posible enfardarlos y retirarlos para otros usos.

Actualmente, el aprovechamiento industrial con fines energéticos del RAC representa una alternativa tecnológica viable para la **cogeneración de energía** en los ingenios azucareros de la provincia. En este sentido, constituye un combustible sustentable alternativo, por cual su caracterización energética es fundamental.

OBJETIVOS

El objetivo de este trabajo fue evaluar la eficiencia operativa de máquinas de recolección y cuantificar el potencial del RAC durante la zafra 2024 en la provincia de Tucumán. Además, caracterizar energéticamente estos residuos, luego de la cosecha en verde del cañaveral.

MATERIALES Y MÉTODOS

Cuantificación de RAC en Tucumán

Las características edáficas y climáticas condicionan el manejo del RAC y determinan el porcentaje máximo de recolección del mismo, sin afectar el cañaveral y el ambiente. En función de estas condiciones, la provincia de Tucumán se dividió en tres zonas agroecológicas bien definidas, para las cuales se establecieron criterios diferenciales de recolección de RAC:

Pedemonte: se caracteriza por suelos y condiciones climáticas con exceso de humedad, lo que limita el aprovechamiento agronómico del RAC. En esta zona se recomienda dejar al menos el 70% del residuo como cobertura, a fin de evitar la erosión hídrica.

Llanura Chaco-Pampeana: la principal limitante es la baja disponibilidad de precipitaciones. En esta región se recomienda conservar al menos el 70% del RAC sobre el suelo, evitando la pérdida de humedad y favoreciendo la conservación edáfica.

Llanura Deprimida se caracteriza por la presencia de napas freáticas próximas a la superficie del suelo (exceso de humedad). En esta zona es aconsejable **recolectar el 70%** del RAC con el fin de no agravar las condiciones de drenaje y no afectar el desarrollo del cultivo.

La cantidad de RAC seco factible de ser recolectado en el área cañera de Tucumán durante la zafra 2024 se estimó considerando los porcentajes de recolección recomendados para cada región agroecológica. Para ello, se utilizó la superficie cañera cosechable correspondiente a cada región y el rendimiento cultural promedio de la provincia (58 toneladas/hectárea), suministrado por la Sección Sensores Remotos y Sistemas de Información Geográfica de la EEAOC (Fandos *et. al ,*2025). La estimación de biomasa residual se realizó empleando un coeficiente promedio de 151 kg RAC/t caña, determinado para las condiciones locales (Romero *et al*, 2008).

Caracterización energética del RAC

Se analizaron 20 muestras recolectadas del campo a los 15 días posteriores a la cosecha de la caña. Las muestras fueron secadas en estufa ORL, con circulación forzada a 105°C hasta peso constante. Posteriormente, se trituraron en un molino tipo fresa, marca Fritcher, hasta alcanzar una granulometría aproximada de 1mm.

La determinación de los contenidos de cenizas (CZ), sólidos volátiles (SV) y carbono fijo (CF), se realizó mediante un analizador termogravimétrico (TGA), marca LECO, modelo TGA701, de acuerdo con la norma ASTM D 5142-02 (ASTM, 2002), con modificaciones .

El poder calorífico superior, se determinó utilizando una bomba calorimétrica semiautomática, modelo Parr6000, siguiendo la metodología establecida en la norma ASTM D 2015-96 (ASTM, 1996).

Adicionalmente, se evaluó el contenido de cloro (Cl) conforme a la norma ASTM E 776-87 modificada (ASTM, 1987) y el contenido de azufre (S) se determinó según la norma ASTM D 3177-02 modificada (ASTM, 2002).

Recolección de RAC con enfardadoras

El estudio se llevó a cabo en un cañaveral bajo manejo convencional, implantado con la variedad TUC 95-10 y una distancia entre surcos de 1,6 m. Esta variedad es la segunda más utilizada en la provincia de Tucumán y ocupa aproximadamente el 17,1 % de la superficie cultivada con caña de azúcar (Henríquez *et al.,* 2023). Para la recolección del RAC se utilizó una enfardadora Massey Ferguson 2250 (Figura 1). Durante el ensayo, se registraron el peso individual de los fardos, sus dimensiones y la cantidad promedio obtenida por hectárea. La eficiencia de recolección de la máquina se evaluó mediante la determinación del RAC disponible previo al enfardado y su comparación con el material efectivamente recolectado después de la operación.



Figura 1. Megaenfardadora de RAC Massey Ferguson, modelo2250

En este estudio, previo al paso de la enfardadora, se usaron rastrillos hileradores modificados (Figura 2). Este equipo posibilita aumentar la cantidad de RAC disponible en la franja de recolección, ya que concentra los residuos de las trochas y los deposita sobre el surco, para que posteriormente sean recogidos por la maquina enfardadora. (Casen, *et al,* 2023).



Figura 2. Rastrillo hilerador para el acondicionamiento del residuo de la cosecha previo al paso de enfardadoras.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Conforme al análisis realizado, el área cañera de Tucumán habría dispuesto durante la zafra 2024,1.414.162 toneladas de RAC seco recolectable considerando los porcentajes de recolección recomendados para cada zona agroecológica (Tabla 1). Esta estimación surge de la aplicación de criterios de manejo diferenciados según las condiciones edáficas y climáticas de cada región, sin considerar prácticas de quema.

Los resultados promedios de la caracterización energética muestran que el RAC presentó un contenido de humedad (W) de 24,6 % , contenido de cenizas de 14,77 % en base seca (b.s.), sólidos volátiles 69,63 % (b.s.) y 15,60 % de carbono fijo (b.s.). Los contenidos de Cl y S fueron de 0,34% y 0,18% en base seca, respectivamente. El poder calorífico superior (PCS) promedio fue de 16.138 kJ/kg (b.s.), mientras que el poder calorífico inferior (PCI) promedio cercano a 10.525 kJ/kg en base húmeda. Estos valores resultan consistentes con

los presentados para zafras anteriores (Zamora Rueda *et al.,* 2016 y Zamora Rueda *et al.,* 2024).

El valor energético del residuo agrícola de caña (RAC) permite estimar que 1 tonelada de RAC es aproximadamente equivalente a 1 tonelada de petróleo en términos de energía útil para su aprovechamiento bioenergético (Zamora Rueda *et al.,* 2024).

Tabla 1. Estimación del RAC seco factible de recolectar (sin considerar la quema) en cada zona agroecológica del área cañera tucumana durante la zafra 2024.

Zafra 2024	Superficie total (ha)	RAC seco total (t)	Recolección (%)	RAC seco factible a recolección(t)
Pedemonte	67.728	512.914	30	176.770
Llanura Chaco Pampeana	41.226	312.209	30	107.599
Llanura Deprimida	185.516	1.404.940	70	1.129.793
Total Tucumán	**294.470**	**2.230.063**		**1.414.162**

En la Tabla 2 se presentan los valores promedio obtenidos durante el ensayo de recolección y enfardado de RAC. Esta tabla resume las principales variables medidas y permite visualizar el rendimiento y la eficiencia alcanzados por el equipo en las condiciones evaluadas.

El lote evaluado presentó un rendimiento promedio de 72 t/ha de tallos molibles, con una disponibilidad potencial de 9 t/ha de residuos agrícolas de cosecha en base seca. En los ensayos de enfardado se logró recolectar, en promedio, el 70 % del RAC disponible en el campo, lo que refleja una eficiencia adecuada del proceso de recolección mecanizada.

La mega enfardadora Massey Ferguson 2250 se identificó como la más adecuada entre las opciones presentes en el mercado, considerando el sistema de plantación de caña de azúcar predominante en Tucumán. El rendimiento operativo de las enfardadoras (en términos de eficiencia de recolección) depende de factores como el nivel productivo del cañaveral, las características topográficas del terreno, la variedad cultivada, el tiempo transcurrido desde la cosecha, el contenido de humedad de los residuos y, en gran medida, de la correcta regulación del cabezal recolector y del acondicionamiento previo del material.

Tabla 2. Desempeño agronómico de la megaenfardadora Massey Ferguson 2250.

Modelo	Promedio Fardos/ha	Dimensiones del Fardo (AxAxL en cm)	% RAC remanente	% RAC recolectado
Massey Ferguson 2250	25	80x90x250	33.6	66.4

El peso promedio de los fardos confeccionados durante el ensayo fue de 313 kg/fardo. Considerando este peso y la eficiencia de recolección obtenida en las condiciones del estudio,

se logró una producción promedio cercana a 5 toneladas de RAC enfardados por hectárea. Estos valores reflejan el desempeño de la maquinaria y constituyen un indicador relevante para estimar el potencial de aprovechamiento del RAC en sistemas de recolección mecanizada.

CONCLUSIONES

La adopción de la cosecha en verde en los cañaverales de Tucumán genera volúmenes significativos de residuos agrícolas de cosecha (RAC), que para la zafra 2024, el área cañera de Tucumán dispuso de un volumen estimado de 1.414.162 t de RAC seco factible de recolección, lo que evidencia un alto potencial para su aprovechamiento. Los ensayos de campo demostraron que la recolección mecanizada del RAC es operativamente viable, alcanzándose eficiencias del orden del 66–70 % del residuo disponible y una producción promedio cercana a 5 t/ha de RAC enfardado. La megaenfardadora Massey Ferguson 2250 presentó un desempeño adecuado para las condiciones productivas predominantes en la provincia. El potencial recolectable de RAC presenta variaciones interanuales asociadas a la productividad del cultivo, el ciclo de crecimiento, la variedad implantada y la regulación y desempeño de las cosechadoras durante la zafra. En este contexto, la caracterización energética de los residuos obtenidos resulta clave para evaluar su aptitud como biocombustible sólido. El RAC de caña de azúcar presenta un poder calorífico alto, comparable al de otros biocombustibles sólidos y un elevado contenido de sólidos volátiles, lo que favorece su combustión, aunque su mayor contenido de cenizas respecto al bagazo exige un manejo adecuado. Su aprovechamiento a escala industrial permitiría sustituir parcialmente el consumo de gas natural en ingenios azucareros, favorecer la cogeneración de energía y contribuir a la diversificación de la matriz energética provincial.

AGRADECIMIENTOS

Se reconoce especialmente la colaboración del Ing. Agr. Adolfo Torres Bugeau, quien puso a disposición las maquinarias indispensables para la realización de esta experiencia.

REFERENCIAS

Casen, S.; Romero, E.; Leggio, F.; Torres Bugeau; A.; Perez, D. y Paredes, V. 2015. Manejo de los residuos agrícolas de la cosecha de caña de azúcar: disponibilidad potencial y alternativas de enfardado. Avance agroindustrial 36 (4):20-26.

Fandos C., J. Scandaliaris, P. Scandaliaris, F. Soria y J. Carreras Baldrés. 2025. Área cosechable y producción de caña de azúcar para la zafra 2025 en Tucumán. Reporte Agroindustrial. EEAOC. Boletín (282).

Henríquez, D.; Medina, P.; Aybar Guchea, M.; Figueroa, M.; Costilla, D.; Díaz, J.; Diaz Romero; C. y Ostengo, S. 2023. Relevamiento de la distribución varietal y del uso de otras tecnologías en el cultivo de caña de azúcar en la provincia de Tucumán: campaña 2022/2023. Reporte Agroindustrial. EEAOC. Boletín (82). ISSN 2346-9102.

Romero, E. R; Scandaliaris ,J; Digonzelli,P; Alonso, L;. Leggio Neme,F; Giardina, J; Casen, S; Tonatto, J y Fernández de Ullivarri,J. 2008. Effect of yielding and variety on sugarcane potential trash. Revista Industrial y Agrícola de Tucumán (RIAT) 85 (1). ISSN 0370-5404.

Zamora Rueda, G.; Mistretta, G.; Gutierrez, C.; Peralta, F.; Golato, M.; Ruiz, M.; Paz, D. y Cárdenas, G. 2016. Características energéticas del residuo agrícola de cosecha de caña de azúcar (RAC) de Tucumán y su análisis como combustible adicional de calderas bagaceras. AVANCE 37(3): 14-18.

Zamora Rueda, M. A. Golato, D. Machado y D. Paz. 2024. Caracterización y clasificación del bagazo y RAC de caña de azúcar, según índices de comportamiento a partir de su composición química elemental. RIAT 101 (1): 63-70.

IMPORTANCIA DEL AISLAMIENTO DE BACTERIAS PROMOTORAS DEL CRECIMIENTO AUTÓCTONAS ENDÓFITAS DE CAÑA DE AZÚCAR (SACCHARUM OFFICINARUM) EN TUCUMÁN

Nuñez MA; Hidalgo L; Sánchez Maroglio E; Ludueña L; Tortora ML; Tonatto J
Subprograma Agronomía de Caña de Azúcar, Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC). Av. William Cross 3150. Las Talitas, Tucumán, Argentina. (4101). mnunez@eeaoc.org.ar

PALABRAS CLAVE: PGPB, biofertilizantes, sustentabilidad

Introducción

La caña de azúcar constituye uno de los cultivos agroindustriales más relevantes del noroeste argentino, siendo la provincia de Tucumán la principal región productora del país. En este contexto, la intensificación agrícola sostenida y la dependencia de insumos químicos han generado la necesidad de desarrollar estrategias alternativas y sustentables que permitan mantener o mejorar la productividad del cultivo, reduciendo al mismo tiempo el impacto ambiental (Tortora *et al.,* 2021). En este marco, el uso de biofertilizantes comerciales se ha consolidado desde hace varios años como una herramienta eficiente en el manejo del cultivo de caña de azúcar en Argentina, destacándose productos como formulados a base de *Azospirillum brasilense* o formulados basados en un consorcio bacteriano integrado principalmente por *Azospirillum* spp. y *Pseudomonas* spp., los cuales han demostrado efectos positivos sobre el crecimiento vegetal, la eficiencia en el uso de nutrientes y la sustentabilidad del sistema productivo. Las bacterias promotoras del crecimiento vegetal (PGPB, por sus siglas en inglés) representan una herramienta biotecnológica clave en este sentido. En particular, las bacterias endófitas, capaces de colonizar tejidos internos de la planta como raíces, tallos y hojas, establecen interacciones estables con su hospedante, lo que les permite expresar mecanismos de promoción del crecimiento de manera más eficiente que los microorganismos rizosféricos (Bonilla Butitrago *et al.,* 2021). No obstante, el mercado actual se encuentra principalmente orientado a microorganismos rizosféricos, siendo limitada la disponibilidad de biofertilizantes formulados a partir de bacterias endófitas, pese a sus ventajas funcionales.

En caña de azúcar se ha reportado de manera consistente la presencia de diversos géneros de bacterias endófitas con funciones PGPB tales como *Azospirillum*, *Gluconacetobacter*, *Herbaspirillum*, *Methylobacterium*, *Pseudomonas* y *Bacillus*; siendo los géneros más estudiados para la formulación de biofertilizantes para caña de azúcar *Azospirillum* y *Pseudomonas*.

El género *Gluconacetobacter* se caracteriza por su capacidad de fijar nitrógeno atmosférico en condiciones microaerófilas, producir fitohormonas como el ácido indolacético (AIA) y colonizar los tejidos vasculares del tallo. Asimismo, se trata de un endófito obligado de la caña de azúcar, estrechamente adaptado a este hospedante, cuyo crecimiento y supervivencia dependen de ambientes con alto contenido de azúcares, característica que explica su exitosa colonización de los tejidos internos ricos en sacarosa (Ríos y Dibut, 2007). El género *Herbaspirillum* agrupa bacterias endófitas diazotróficas asociadas principalmente a gramíneas. Estas bacterias presentan capacidad de fijación biológica de nitrógeno y producción de fitohormonas, como auxinas, que contribuyen al crecimiento vegetal. Asimismo, participa activamente en la mitigación del estrés abiótico mediante diversos mecanismos, entre los que se destacan la producción de compuestos osmoprotectores como prolina, trehalosa y glicina, la modulación del balance hormonal de la planta particularmente a través de la actividad ACC desaminasa, que reduce los niveles de etileno inducidos por estrés y la mejora de la arquitectura radicular, lo que favorece una mayor absorción de agua y nutrientes bajo condiciones adversas como sequía o salinidad. Es capaz de colonizar tanto raíces como tejidos aéreos, y su asociación

endofítica le confiere un elevado potencial como inoculante en cultivos extensivos (Baldani *et al.,* 2014). Por su parte, el género *Methylobacterium* incluye bacterias metilotróficas facultativas, es decir, microorganismos capaces de utilizar compuestos de un solo carbono (C1), como el metanol, como fuente de carbono y energía. Esta versatilidad metabólica les confiere una ventaja adaptativa para colonizar ambientes variables como la superficie y el interior de los tejidos vegetales. En las plantas, el metanol es liberado durante los procesos de crecimiento y expansión celular, particularmente a nivel foliar, como resultado de la desmetilación de pectinas de la pared celular, esta disponibilidad constante de metanol explica la frecuente colonización de *Methylobacterium* en hojas (filósfera). Asimismo, estas bacterias producen fitohormonas, principalmente citocininas y auxinas, y compuestos antioxidantes, entre los que se destacan los carotenoides, pigmentos que cumplen un rol clave en la protección frente al estrés abiótico (Kutschera, 2007).

El aislamiento y caracterización de PGPB endófitas autóctonas, adaptadas a las condiciones edafoclimáticas y a las variedades locales de caña de azúcar de Tucumán, resulta fundamental para el desarrollo de bioinsumos eficaces y consistentes. El objetivo del presente trabajo es analizar la información generada a partir de distintas campañas de bioprospección a fin de aislar bacterias endófitas autóctonas de los géneros *Gluconacetobacter, Methylobacterium* y *Herbasprillum* asociadas a caña de azúcar en la provincia de Tucumán, realizadas en diferentes años, regiones agroecológicas y variedades comerciales. A partir de la recopilación de datos de cepas con actividad promotora del crecimiento vegetal, se busca evaluar su diversidad, distribución y potencial funcional, con el fin de generar una colección de bacterias y una base de conocimiento que sustente el desarrollo de bioinsumos adaptados a las condiciones productivas locales. Las diferentes bioprospecciones se enfocaron en PGPB de carácter endófito, considerando que en el mercado actual de biofertilizantes existe una limitada disponibilidad de formulados basados en bacterias endofíticas, a pesar de su gran potencial.

Materiales y métodos

Sitios de muestreo y material vegetal

Se realizaron muestreos en cañaverales representativos de la provincia de Tucumán, correspondientes a distintas localidades y variedades de caña de azúcar. Se colectaron tallos, raíces y hojas de plantas de caña de azúcar de las siguientes regiones, durante el año 2024/2025

1) Río Seco, Monteros: variedad LCP 85-384.
2) El Chañar, Burruyacú: variedad TUC 02-22.
3) Ramada de Arriba, Burruyacú: variedad TUC 95-10.
4) Cruz Alta: variedad TUC 03-12.

Las muestras vegetales fueron obtenidas de diferentes puntos de cada cañaveral considerando la variabilidad microbiana asociada al cultivo.

Procesamiento de muestras y aislamientos bacterianos

Las raíces fueron desinfectadas en forma superficial con etanol al 70 % v/v y solución de hipoclorito de sodio al 2% v/v, seguido de lavados con agua destilada estéril. Posteriormente, los tejidos fueron macerados en buffer fosfato de potasio estéril pH 7, y se realizaron diluciones seriadas.

Los tallos se procesaron separando la porción superior e inferior. Se eliminó la corteza y se utilizó la porción de tejido interno, el cual fue macerado en buffer fosfato bajo condiciones estériles. Las hojas se procesaron mediante lavado con agua destilada, luego se cortaron en fragmentos pequeños y se maceraron en la forma descripta anteriormente.

Las diluciones obtenidas se sembraron en diferentes medios de cultivos selectivos y diferenciales: (líquidos, semisólidos y sólidos).

Para el aislamiento de bacterias del género *Gluconacetobacter* se utilizó el medio de cultivo LGI-P semisólido (g/l): glucosa: 10,0 g, extracto de levadura: 0,5 g, KH_2PO_4: 0,2 g, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$: 0,2 g, NaCl: 0,1 g, $CaCl_2 \cdot 2H_2O$: 0,02 g, $FeCl_3$: 0,01 g, agar: 1,7 g. pH: 5,5. El crecimiento típico se evidenció por la formación de una película sub-superficial de color amarillo.
Para el aislamiento de bacterias del género *Herbaspirillum* se utilizó el medio de cultivo JNFB semisólido, libre de nitrógeno: (g/l): acido málico: 5,0 g, K_2HPO_4: 0,2 g, KH_2PO_4: 1,8 g, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$: 0,2 g, NaCl: 0,1 g, $CaCl_2 \cdot 2H_2O$: 0,02 g, $FeCl_3$: 0,01 g, azul de bromotimol: 2 ml, agar: 1,7 g. pH: 5,5. El crecimiento característico se observó como un anillo sub-superficial en condiciones microaerófilas.
Para el aislamiento de bacterias metilotróficas del género *Methylobacterium* se utilizó un medio mínimo con metanol (MMM), cuya composición fue la siguiente (g/l): $(NH_4)_2SO_4$: 1,0 g; KCl: 0,48 g; K_2HPO_4: 1,0 g, $MgSO_4 \cdot 7H_2O$: 0,2 g; $CaCl_2 \cdot 2H_2O$: 0,02 g; $FeSO_4 \cdot 7H_2O$: 0,01 g; $MnSO_4$: 0,02 g; metanol: 5,0 ml. pH: 6,8.
Los frascos de medio líquido se incubaron a 30 °C y 150 rpm en agitador orbital y los aislamientos se seleccionaron en función de la coloración rosada característica y, en algunos casos, la producción de pigmentos carotenoides.
Para aislar bacterias diazotróficas no específicas se utilizó el medio Jensen líquido, libre de nitrógeno, su composición (g/l) es: sacarosa: 40,0 g; $CaCO_3$: 2,0 g; $MgSO_4$: 0.5 g; K_2HPO_4: 1,0 g; NaCl: 0,5 g; $FeSO_4$: 0.1; $NaMoO_4$: 0.025 g. Para el aislamiento y mantenimiento de cepas se utilizó el medio Yeast Extract Mannitol (YEM) sólido, compuesto por (g/l): manitol: 10,0 g; extracto de levadura: 0,5 g; K_2HPO_4: 0,5 g; $MgSO_4 \cdot 7H_2O$: 0,2 g; NaCl: 0,1 g; agar: 15,0 g; rojo Congo: 15 ml; ABT 15 ml.

Resultados

1) Localidad : Río Seco, Monteros

Variedad: LCP 85-384

A partir de muestras de raíces y tallos de caña de azúcar se obtuvieron aislamientos bacterianos con características similares a los géneros *Methylobacterium* y *Gluconacetobacter*.
A partir de raíces se aislaron dos posibles cepas de *Methylobacterium*, diferenciadas por su capacidad de producción de carotenoides: una cepa formó colonias de color rosado, mientras que la otra presentó colonias blancas. En tallos, específicamente en la porción inferior, se obtuvieron dos posibles aislamientos del género *Gluconacetobacter*, caracterizados por el crecimiento típico en medio LGI-P semisólido y la posterior formación de colonias pigmentadas en medios sólidos selectivos.

2) Localidad : El Chañar, Burruyacú

Variedad: TUC 02-22

En este sitio de muestreo, los aislamientos bacterianos se obtuvieron a partir de raíces. Se recuperó un único aislamiento con características similares al género *Methylobacterium*, el cual presentó producción de carotenoides y formación de colonias rosadas en medio sólido.
No se registraron aislamientos bacterianos a partir de muestras de tallos bajo las condiciones de cultivo evaluadas.

3) Localidad : Ramada de Arriba, Burruyacú

Variedad: TUC 95-10

El muestreo incluyó hojas, raíces y tallos, lo que permitió recuperar una mayor diversidad de bacterias endofíticas.
En hojas se obtuvieron dos posibles aislamientos del género *Methylobacterium*, uno productor de carotenoides (colonias rosadas) y otro no productor (colonias blancas).
En raíces se aisló una posible cepa del género *Gluconacetobacter* y una cepa de *Methylobacterium* no productora de carotenoides. Adicionalmente, se recuperaron tres

aislamientos bacterianos de géneros no identificados, con crecimiento en medio YEM, compatibles con bacterias fijadoras de nitrógeno, diferenciadas por su morfología colonial. No se obtuvieron aislamientos a partir de tallos.

4) Localidad : Colombres, Cruz Alta
Variedad: TUC 03-12
En el último sitio de muestreo se obtuvieron aislamientos principalmente asociados a tejidos internos y hojas de caña de azúcar. A partir de muestras vegetales de tallos se recuperaron dos posibles aislamientos del género *Herbaspirillum* y un aislamiento adicional de *Herbaspirillum* proveniente de hojas, lo que refuerza la asociación de este género con tejidos aéreos del cultivo.
Asimismo, a partir de hojas se aislaron tres posibles cepas productoras de carotenoides del género *Methylobacterium*, caracterizadas por su crecimiento en medio MMM, consistente con bacterias metilotróficas asociadas a la filósfera.

Discusión
Los resultados obtenidos confirman la presencia de una comunidad diversa de bacterias endófitas asociadas a la caña de azúcar cultivada en Tucumán, con una marcada variabilidad en función del órgano vegetal, la variedad y el sitio de muestreo. La detección de géneros ampliamente reconocidos como PGPB, tales como *Gluconacetobacter*, *Herbaspirillum* y *Methylobacterium*, resulta particularmente relevante debido a su capacidad de fijación biológica de nitrógeno, producción de fitohormonas y participación en mecanismos de tolerancia al estrés abiótico (Junior *et al.,* 2000).
El aislamiento de *Herbaspirillum* exclusivamente de la variedad TUC 03-12 sugiere una asociación diferencial entre el genotipo vegetal y este género bacteriano, lo que refuerza la importancia de las interacciones específicas planta–microorganismo en la conformación de la microbiota endofítica. Este comportamiento podría estar vinculado a diferencias varietales en la composición de exudados, anatomía vascular o contenido de azúcares del tallo, factores que influyen en la colonización y persistencia de bacterias endófitas. En contraste, en la variedad TUC 02-22 no se aislaron bacterias de los géneros evaluados en tejidos del tallo, lo que indicaría una menor compatibilidad o un ambiente endofítico menos favorable para estos microorganismos, al menos bajo las condiciones de muestreo y aislamiento empleadas.
Estas diferencias entre variedades refuerzan la necesidad de considerar el efecto combinado del genotipo de la planta y las condiciones edafoclimáticas locales en estudios de bioprospección microbiana, y destacan la relevancia de seleccionar cepas nativas adaptadas a variedades específicas de caña de azúcar para el desarrollo de inoculantes con mayor eficiencia y estabilidad en campo. Lo que sugiere que la magnitud del efecto de los biofertilizantes podría variar según la variedad de caña de azúcar, en función de su capacidad para albergar y sostener comunidades endófitas con actividad promotora del crecimiento, aspecto que deberá ser evaluado mediante ensayos específicos a campo o en condiciones controladas.

Conclusiones
La bioprospección realizada en cañaverales de Tucumán permitió aislar bacterias endófitas autóctonas con características compatibles con PGPB, principalmente de los géneros *Gluconacetobacter*, *Methylobacterium* y *Herbaspirillum*.
Estos resultados destacan la importancia de continuar con la caracterización fisiológica y molecular de los aislamientos obtenidos, con miras al desarrollo de bioinsumos a base de endófitos específicos para la caña de azúcar de la región. El aprovechamiento de PGPB autóctonas representa una estrategia prometedora para avanzar hacia sistemas productivos más sustentables y eficientes en la agroindustria azucarera tucumana.

Referencias bibliográficas

Baldani, J. I; Reis, V. M; Videira, S. S; Boddey, L. H & Baldani, V. L. D. (2014). The art of isolating nitrogen-fixing bacteria from non-leguminous plants using N-free semi-solid media: a practical guide for microbiologists. *Plant and soil*, *384*(1), 413-431.

Bonilla Buitrago, R. R; González de Bashan, L. E; Pedraza, R. O; Estrada Bonilla, G. A; Pardo Díaz, S; Mazo Molina, D. C & Ramírez Gómez, M. M. (2021). Bacterias promotoras de crecimiento vegetal en sistemas de agricultura sostenible.

Kutschera, U. (2007). Plant-associated methylobacteria as co-evolved phytosymbionts: a hypothesis. *Plant signaling & behavior*, *2*(2), 74-78.

Biotrop. *Ficha técnica BIOFREE: biofertilizante con Azospirillum brasilense y Pseudomonas fluorescens.* (SENASA 92.264).

Junior, F. R; Silva, L. G; Reis, V. M & Döbereiner, J. (2000). Ocorrência de bactérias diazotróficas em diferentes genótipos de cana-de-açúcar. *Pesq Agrop Brasileira*, *35*, 985-994.

Ríos, Y & Dibut, B. (2007). Gluconacetobacter diazotrophicus: un microorganismo promisorio en la elaboración de biopreparados. *Cultivos tropicales*, *28*(4), 19-24.

Tortora, M. L; Nuñez, M. Á; Alderete, M; Ludueña, L. y Romero, E. R. (2021). *Biofertilizantes para caña de azúcar: Una alternativa imprescindible.* Revista Avance Agroindustrial, 43(3)

EVOLUCIÓN FITOSANITARIA DE SEMILLEROS BÁSICOS Y REGISTRADOS EN LA PROVINCIA DE TUCUMÁN PERÍODO 2020 - 2024

Fajre, S.; Medina, M.; Pérez Alabarce, F.; y Giardina J.

Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres, Av. William Cross 3150, Las Talitas, Tucumán, Argentina. sfajre@eeaoc.org.ar

Palabras clave: caña semilla; vitroplantas; sanidad; raquitismo de la caña soca; monitoreo.

Introducción

Las enfermedades de la caña de azúcar con mayor impacto económico se transmiten mediante el uso de material de propagación infectado. La producción de caña semilla de alta calidad, junto con el conocimiento del estado sanitario del cultivo, constituye un factor clave para diseñar estrategias de manejo de enfermedades (Joya *et. al*. 2025).

El raquitismo de la caña soca o RSD, por sus siglas en inglés, es considerada una de las enfermedades más importantes a nivel mundial en regiones cañeras debido a su capacidad para reducir el rendimiento hasta en un 50%, dependiendo de la variedad cultivada, las condiciones ambientales y la interacción con otros patógenos (Glyn 2005). La escaldadura de la hoja es una enfermedad sitémica también con gran relevancia fitosanitaria por su impacto negativo en el rendimiento de los cañaverales asociado a la disminución del área foliar funcional, el debilitamiento general de la planta y, en casos severos, la muerte de tallos o de la cepa completa.

En Tucumán, todas las variedades de caña de azúcar cultivadas son susceptibles al RSD, lo que refuerza la necesidad de utilizar caña semilla saneada que cumpla con ciertos estándares de calidad. En este contexto la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC) implementó el Proyecto Vitroplantas a partir del año 2001 con el propósito de generar caña semilla de alta calidad, caracterizada por su pureza genética, sanidad y vigor. Este Proyecto nos permite disponer de material libre de patógenos para luego ser multiplicada mediante un esquema ordenado de semilleros, con el objetivo de asegurar una adecuada provisión y, en consecuencia, contribuir a una mejora sostenida en la productividad de los cañaverales.

La sanidad de la caña semilla es uno de los pilares del Proyecto Vitroplantas. La combinación de técnicas de cultivo de meristemas y micropropagación *in vitro*, permiten la obtención de plantines libres de patógenos sistémicos, elevado vigor y con características genéticas estables. Esta metodología garantiza la producción de material vegetal con elevados estándares de calidad. Luego de completado el proceso de aclimatación y rustificación en el invernáculo, dicho material es multiplicado en campo mediante un esquema de semilleros: Básico, Registrados y Certificados. Este esquema permite escalar la producción de caña semilla y mantener las características de calidad requeridos para su utilización en plantaciones comerciales.

La primera etapa de multiplicación en campo se lleva a cabo en el semillero Básico, el cual se implanta con plantines micropropagados obtenidos en laboratorio y posteriormente aclimatados en invernáculo. Este semillero tiene como función principal abastecer de caña semilla de alta calidad a los semilleros Registrados (segunda etapa del esquema de multiplicación en campo), implantados por ingenios, cooperativas y productores. A partir del material producido estos lotes se establecen los semilleros Certificados, que constituyen la tercera etapa de multiplicación y que son los que finalmente proveen semilla para nuevas plantaciones y/o renovaciones comerciales.

El monitoreo sanitario periódico de todas las etapas del esquema resulta esencial para garantizar la calidad sanitaria del material de propagación. La sanidad vegetal es, además, un criterio determinante para decidir la continuidad o eliminación de un lote dentro del sistema de provisión de semilla.

El objetivo de este artículo es analizar la evolución fitosanitaria de los semilleros Básicos y Registrados de caña de azúcar en Tucumán, durante el período 2020–2024.

Materiales y métodos

Todos los años, previo a su multiplicación, los semilleros Básicos y Registrados son muestreados por técnicos profesionales del subprograma Agronomía de la caña de azúcar pertenecientes al Proyecto Vitroplantas con el objetivo de determinar la incidencia de raquitismo de la caña soca (RSD) y escaldadura de la hoja (LS). Este muestreo se realiza con alta intensidad y bajo estrictas medidas de control, a fin de obtener resultados confiables (Digonzelli *et al*., 2010).

La edad óptima del cultivo para la detección de los patógenos causantes de estas enfermedades se alcanza a partir de los siete meses de crecimiento; en Tucumán, esto ocurre entre los meses de abril y mayo.

En los semilleros **Básicos**, el muestreo consiste en la extracción de dos tallos al azar por surco o por línea. Se define como *línea* al conjunto de plantines originados a partir de un mismo meristema apical de la planta donante. En aquellos surcos que contienen más de una línea, se toma una muestra representativa de cada una de ellas. Cuando una misma línea se extiende a lo largo de más de un surco, se saca una muestra por cada surco o fracción de surco correspondiente (Digonzelli *et al*., 2010).

Para los semilleros Registrados, el procedimiento consiste en sacar 20 tallos al azar por hectárea, por variedad y por edad del cultivo, asegurándose de que no se tomen tallos de la misma cepa. A fin de garantizar la representatividad del muestreo, se recomienda recorrer el lote siguiendo un patrón diagonal o en zigzag, abarcando la mayor superficie posible. Es fundamental realizar la desinfección de las herramientas de corte con las que se muestrea. Se recomienda el empleo de soluciones de amonio cuaternario al 3‰ o de hipoclorito de sodio (lavandina) al 10 %, con un tiempo mínimo de contacto de 15 minutos en la primera desinfección.

Las muestras recolectadas son analizadas en la Sección Fitopatología de la EEAOC, donde se aplican técnicas serológicas, específicamente el ensayo inmunoenzimático de impresión de tejidos (*Tissue Blot Immunoassay*, TBIA), que permite detectar la presencia y estimar el grado de incidencia de RSD y escaldadura de la hoja. Las muestras ingresan al laboratorio codificadas como “muestras ciegas”, sin identificación visible de su origen. Una vez finalizado el análisis, se procede a la decodificación para el cálculo del porcentaje de incidencia de cada enfermedad, definido como la relación entre el número de tallos infectados y el total de tallos analizados. Este cálculo se realiza individualmente para cada variedad y lote semillero, y en el caso de los semilleros Básicos, de manera específica para cada surco y/o línea.

El Proyecto Vitroplantas define umbrales máximos de tolerancia para la incidencia de estas enfermedades sistémicas en las distintas etapas de multiplicación en campo. En los semilleros Básicos, la incidencia admisible para ambas enfermedades es inferior al 1%. En los semilleros Registrados, el límite máximo de incidencia permitido tanto para RSD como para la escaldadura no supera el 2,5%.

Resultados

Durante el período analizado se han tomado 1485 muestras entre semilleros Básicos y semilleros Registrados distribuidos en toda el área cañera de la provincia.

En todas las situaciones analizadas, la incidencia se calculó de forma ponderada según el número de surcos, lo que permite expresar la dimensión real de las enfermedades presentes en los semilleros.

En la tabla 1 podemos observar las incidencias en los semilleros Básicos durante el período 2020 – 2024 de las 2 enfermedades analizadas.

Tabla 1. Estado sanitario de los semilleros Básicos durante el período 2020 – 2024, Tucumán, Argentina

AÑO	Porcentaje de incidencia Básico 11-15		Porcentaje de incidencia Básico EEAOC	
	RSD (%)	LS (%)	RSD (%)	LS (%)
2020	0,05	0,06	0,00	0,00
2021	0,00	0,00	0,00	0,00
2022	0,01	0,00	0,02	0,08
2023	0,01	0,01	0,04	0,19
2024	cosechado 2023	cosechado 2023	0,00	0,00

Los resultados evidenciaron incidencias inferiores al 0,20% tanto para RSD como para escaldadura de la hoja y por debajo del 1% que es el nivel fijado de tolerancia por la EEAOC en el estándar de calidad para esta etapa de multiplicación en campo. Además están por debajo de los umbrales obtenidos en el período 2014-2018 donde los umbrales máximos fueron de 0,23% en RSD y 0,44% en escaldadura (Digonzelli *et al.* 2019). A nivel internacional, fueron inferiores a los niveles tolerados en Colombia y Guatemala (≤ 1 %), aunque superiores al 0 % aceptado en caña semilla básica en Cuba y Costa Rica (Victoria y Calderón, 1995; Soto *et al.*, 1997; Alfaro Portuguez *et al*., 2007). Es importante destacar que los surcos positivos a una o ambas enfermedades, aun teniendo niveles inferiores a los aceptados, son surcos que se excluyen de la provisión de caña semilla y son decepados para eliminarlos del semillero Básico.

Para los semilleros Registrados, los datos obtenidos durante 2020 – 2024, reflejaron un excelente estado sanitario general. Con respecto al RSD aunque las incidencias no superaron el 1% en ninguno de los años, se destaca que los valores correspondientes a los años 2023 y 2024 fueron los valores más bajos de la serie con niveles de incidencia de 0,27% y 0,16% respectivamente (Figura 1).

De manera similar a lo observado para RSD, los niveles de incidencia de escaldadura, correspondientes al período analizado se mantuvieron de manera constante por debajo del 1%, con una mejora notable en 2023 y 2024 que refleja una tendencia sanitaria positiva en esta etapa de producción de caña semilla (Figura 1).

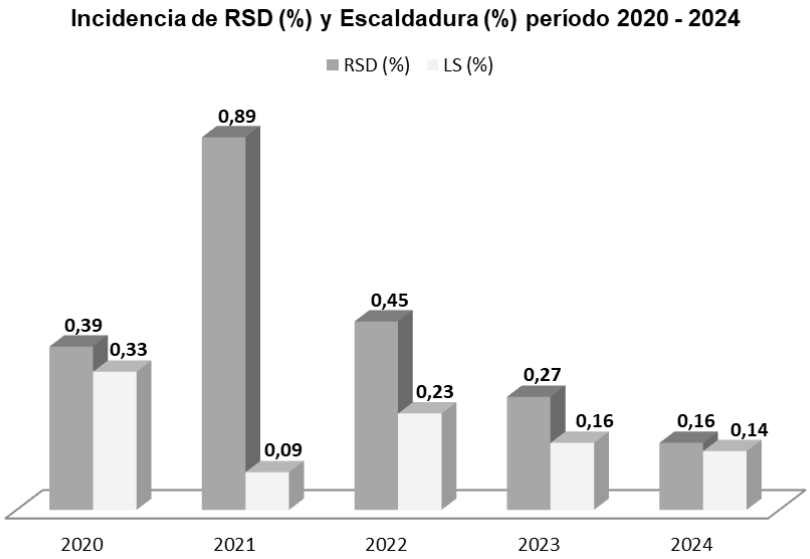


Figura 1. Porcentaje de incidencia de RSD y LS en los semilleros Registrados durante 2020-2024. Promedio general ponderado por número de surcos.Tucumán, Argentina.

Es importante destacar que en todos los años evaluados, los niveles de incidencia de ambas enfermedades se mantuvieron debajo del umbral de tolerancia definido en el Proyecto Vitroplantas para esta etapa de semilleros (≤ 2,5 %).

Los valores máximos de incidencia de RSD y escaldadura de la hoja en semilleros registrados, citados por Digonzelli *et al*. (2014) para el período 2008–2013, fueron de 0,65 % y 1,41 %, respectivamente. Para el período 2014–2018, dichos valores disminuyeron a 0,13 % para RSD y 0,08 % para escaldadura de la hoja (Digonzelli *et al*., 2019). Durante el período evaluado en el presente artículo se observa una mejora en la sanidad de los semilleros en comparación con el primer período citado, y un leve incremento respecto del segundo; aun así, los valores se mantienen por debajo del umbral de tolerancia.

En comparación con otros países productores de caña, los valores de incidencia también se ubicaron por debajo de los umbrales de tolerancia establecidos por otros países productores de caña de azúcar: hasta 3 % de RSD y 1 % de escaldadura de la hoja en Cuba, hasta 2 % para ambas enfermedades en Colombia, y hasta 5 % de RSD y 0 % de escaldadura de la hoja en Guatemala y Costa Rica (Alfaro Portuguez *et al*., 2007).

Conclusiones

Los niveles de incidencia de RSD y escaldadura de la hoja de los semilleros Básicos y Registrados durante el período 2020 - 2024 fueron menores al 1%, ubicándose consistentemente por debajo de los umbrales de tolerancia establecidos para cada una de las etapas de multiplicación a campo.

En los semilleros Básicos, las incidencias de ambas enfermedades fueron inferiores al 0,20 %, valores menores al umbral de tolerancia definido por la EEAOC e inclusive inferiores a los máximos registrados en períodos anteriores para esta etapa de multiplicación.

En los semilleros Registrados el estado sanitario durante el período 2020 – 2024 fue excelente dando valores de incidencia tanto de RSD como de escaldadura de la hoja menores a los límites de tolerancia definidos para esta etapa, sobre todo en los años 2023 y 2024 que presentaron los valores más bajos de la serie, lo que refleja una tendencia sanitaria favorable. Si bien se registró un leve incremento respecto del período 2014–2018, los niveles observados se mantuvieron dentro de los rangos aceptables y mostraron una mejora en relación con el período 2008–2013.

Los resultados confirman la eficacia de las técnicas de cultivo de meristemas y micorpropagación *in vitro* para la obtención de material sano que en conjunto con un excelente manejo agronómico y monitoreo sanitario permanente garantizan los estándares de calidad y, en consecuencia, una mejora sostenida de la productividad y longevidad de los cañaverales comerciales.

Bibliografía

Alfaro Portuguez R., Chavarría Soto E., Chavez Solera M. 2007. Recomendaciones Técnicas para el Establecimiento y Manejo de Semilleros Básicos de Caña de Azúcar en Costa Rica.

Digonzelli, P.; Giardina, J.; Duarte, D.; Fajre, S.; Medina, M.; Barceló, M. y Pérez Alabarse, F. 2019. Producción de caña semilla de alta calidad en semilleros Básicos y Registrados de la provincia de Tucumán: un análisis de cinco años (2014-2018). Rev. Agron. Noroeste arg. Vol 39.

Digonzelli P., Giardina J. 2014. Proyecto Vitroplantas: un análisis de 10 años de producción de caña semilla de alta calidad. Dossier Revista Avance Agroindustrial. 35 (2): 1-11.

Digonzelli, P.; Giardina, J.; Funes, C.; Gianmaria, S.; Chavanne, E. y Ramallo J. 2010. Evolución del estado sanitario de los semilleros Básicos y Registrados provenientes de caña semilla micropropagada en la provincia de Tucumán: 55 – 61. Publicación Especial N° 40: Proyecto Vitroplantas: producción de caña semilla de alta calidad. SSN 0328-7300.Glyn, L. 2005. Pests and diaseases of sugarcane. Sugar Cane Int. 23 (1): 3-14.

Joya C. M.; Bertani R.; Perera F.; Fajre S.; Giardina J.; Noguera A. 2025. Proyecto Vitroplantas de la EEAOC: la importancia del diagnóstico fitosaniario y su impacto en el estado sanitario de los lotes comerciales en Tucumán, Argentina. Trabajo Presentado en el XXXII ISSCT Centennial Congress, 24 al 28 de agosto de 2025, Cali, Colombia.

ANÁLISIS RETROSPECTIVO DE PROGENITORES EN EL PROGRAMA DE MEJORAMIENTO GENÉTICO DE CAÑA DE AZÚCAR DE LA ESTACIÓN EXPERIMENTAL AGROINDUSTRIAL OBISPO COLOMBRES DE 1998 A 2020

Díaz Romero Carolina; Figueroa M. Fernanda; Díaz Jorge V.; Henriquez Diego D.; Costilla Diego D.; Ghio A. Cecilia; Racedo Josefina y Ostengo Santiago
Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC), Las Talitas, Tucumán, R. Argentina, T4101XAC. Email: cdiazromero@eeaoc.org.ar

Palabras clave: cruzamientos, progenies, índice de selección, tasa de selección

INTRODUCCIÓN

Anualmente, el Programa de Mejoramiento Genético de Caña de Azúcar de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (PMGCA-EEAOC) en Tucumán, Argentina, realiza un promedio de 450 cruzamientos biparentales para generar poblaciones genéticamente diversas. Estos nuevos genotipos son evaluados y seleccionados a través de cinco etapas sucesivas que abarcan un período de 12 años, con el objetivo final de obtener variedades comerciales de alto rendimiento (Ostengo *et al*., 2021). La selección de los progenitores involucrados en los cruzamientos constituye un aspecto clave, ya que sus características fenotípicas y genéticas, junto con su capacidad de transmitirlas a la descendencia, determinan la calidad de las poblaciones resultantes y, en consecuencia, el éxito en el desarrollo de nuevas variedades.

Santchurn *et al*. (2023) propusieron el uso de índices para categorizar progenitores y cruzamientos en función de las tasas de selección de las progenies a lo largo de las diferentes etapas del proceso de selección. Este enfoque permite identificar progenitores y cruzamientos con alta calidad genética que generarán un mayor número de genotipos con probabilidad de ser elegidos para avanzar a la siguiente fase del proceso de mejoramiento.

Una herramienta útil para la selección de progenitores es la integración de información molecular mediante el cálculo de sus valores genéticos estimados (GEBV, siglas en inglés de Genetic Breeding Values) a partir de datos genómicos. El uso de progenitores con altos GEBV para los caracteres de interés incrementará el valor genético de las progenies (Racedo *et al*., 2023).

El objetivo de este trabajo fue realizar un análisis retrospectivo de los progenitores utilizados entre 1998 y 2020 (23 campañas) en el PMGCA-EEAOC, en función de su nivel de exploración y del número de individuos seleccionados de su progenie en las etapas tempranas de selección.

MATERIALES Y MÉTODOS

Los índices propuestos por Santchurn *et al.* (2023) se utilizaron para categorizar progenitores y cruzamientos biparentales, abarcando 23 series implantadas entre 1998 y 2020. La evaluación de genotipos se realizó en la primera etapa clonal (Etapa 2) del esquema del PMGCA-EEAOC, que consiste en parcelas no replicadas de un surco de 3 m, plantado en campos experimentales ubicados en Cevil Pozo (departamento Cruz Alta) y Santa Ana (departamento Río Chico), en Tucumán, Argentina.

La categorización se basó en dos criterios principales: el número de individuos evaluados por progenitor o cruzamiento, y las tasas de selección obtenidas en esta etapa del programa.

Los cruzamientos y sus progenitores correspondientes fueron clasificados de acuerdo con el número de clones plantados por cruzamiento y progenitor, según los criterios especificados en la Tabla 1; a esta clasificación se la designó como Grado de Progenie (GP). Las categorías fueron definidas a partir de registros históricos de clones por cruzamiento plantados en la Etapa 2.

Tabla 1. Grado de Progenie (GP).

Grado de Progenie		Clones por cruza
1	Bajo	< 10
2	Regular	10 - 29
3	Medio	30 - 49
4	Bueno	50 - 69
5	Muy bueno	> 70

Los Índices de Selección (IS) fueron calculados para cada progenitor (femenino y masculino) y para cada cruzamiento, considerando la relación entre la tasa de selección (TS) de cada uno y la tasa de selección de la población en cada año. En base al IS se categorizaron los progenitores y los cruzamientos de acuerdo a la Tabla 2.

Tabla 2. Categorías de Progenitores y cruzamientos basados en el Índice de Selección (IS).

IS = TS Progenitor o Cruzamiento / TS Población	Categoría de Progenitor o Cruza (CP-CC)	
0 - 0,99	1	Regular
1 - 1,49	2	Media
1,5 - 1,99	3	Buena
2 - 2,49	4	Muy buena
≥ 2,5	5	Excelente

RESULTADOS

El análisis de los progenitores utilizados en las 23 campañas estudiadas permitió caracterizar a 316 individuos parentales.

Determinación del Grado de Progenie de progenitores y cruzamientos

El Grado de Progenie (GP) de cada progenitor y cruzamiento se determinó considerando el número de clones evaluados correspondientes a cada uno en la Etapa 2.

La Tabla 3 presenta el número de progenitores y cruzamientos clasificados en cada categoría de GP, de 1 (bajo) a 5 (muy bueno), y detalla el porcentaje que estas cantidades representan en cada categoría con respecto al total. Se consideró que un GP igual o superior a 3, es decir, más de 30 clones evaluados por progenitor o cruzamiento en la etapa mencionada, era apropiado para indicar un nivel aceptable de exploración. De esta manera, el desempeño de 228 progenitores (72% de los progenitores analizados) pudo ser evaluado a través de su progenie. Mientras tanto, 611 cruzamientos (41% del total) tuvieron suficientes clones para explorar su comportamiento.

Tabla 3. Número y porcentaje de progenitores y cruzamientos estudiados para cada categoría de GP.

Grado de Progenie		N° de Progenitores	% de Progenitores	N° de Cruzamientos	% de Cruzamientos
1	Bajo	33	10%	811	56%
2	Regular	55	17%	38	3%
3	Medio	32	10%	241	17%
4	Bueno	25	8%	100	7%
5	Muy bueno	171	54%	270	18%
Total		316	100%	1460	100%

Categorización de progenitores

Los Índices de Selección (IS) fueron calculados para los 228 progenitores con un GP mayor o igual a 3, y luego se les asignó la categoría correspondiente. El número total de progenitores asignados a cada categoría se muestra en la Tabla 4. Las categorías iguales o superiores a 2 corresponden a IS mayores que 1, lo que indica que la tasa de selección (TS) del progenitor o del cruzamiento superó la TS de la población evaluada. El número total de progenitores asignados a estas categorías fue de 123, lo que representa el 53,9% de los progenitores estudiados.

Tabla 4. Número de progenitores asignados por Categoría de Progenitores (CP).

Categoría de Progenitor (CP)		Número de Progenitores	%
1	Regular	105	46
2	Media	77	54
3	Buena	26	
4	Muy buena	9	
5	Excelente	11	
	Total	228	100

Categorización de cruzamientos

Se evaluaron 1460 cruzamientos biparentales a lo largo de las 23 campañas, generando un total de 70.135 clones plantados en la Etapa 2. De estos cruzamientos, 611 presentaron un GP de 3 o superior. En la Tabla 5, los cruzamientos se categorizan según su Índice de Selección (IS), mostrando el 42,2% un IS de 2 o más. Esto indica que la Tasa de Selección (TS) del cruzamiento superó la TS promedio de la población analizada. Por lo tanto, se destaca que un porcentaje significativo de los cruzamientos estudiados presentó características deseables, lo que permitió la selección de un alto número de individuos para continuar el proceso de selección en la siguiente etapa.

Tabla 5. Número de cruzas asignadas por Categoría de Cruzamientos (CC)

Categoría de Cruzamiento (CC)		N° de Cruzamientos	%
1	Regular	353	58
2	Media	155	42
3	Buena	55	
4	Muy buena	27	
5	Excelente	21	
	Total	611	100

CONCLUSIONES

La selección de progenitores en un programa de mejoramiento es una etapa altamente compleja que involucra numerosas variables, por lo que se requieren metodologías eficientes para detectar de manera precisa y, si es posible, rápida los que poseen un alto valor genético.

La categorización de progenitores y cruzamientos utilizando niveles de exploración y tasas de selección en etapas tempranas, y luego asociándola con información genética (GEBVs), constituye una herramienta útil. Los valores genéticos asignados a los progenitores, junto con estudios de asociación, permitirán implementar la selección genómica, identificando progenitores destacados para continuar explorándolos, y descartar aquellos con bajo desempeño. De manera similar, facilitará la diferenciación de cruzamientos sobresalientes de aquellos clasificados como de bajo rendimiento.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

Ostengo, S.; G. Serino; M. F. Perera *et al*. 2021. Sugarcane breeding, germplasm development and supporting genetic research in Argentina. Sugar Tech 24: 166-180.

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.

Santchurn, D.; M. G. H. Badaloo and S. Travailleur. 2023. A method for improving the efficiency of the proven-cross and proven-parent system in Mauritius. Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists 31: 611-620.

ESTRATEGIAS DE FERTILIZACIÓN NITROGENADA CON NANOFERTILIZANTES EN CAÑA DE AZÚCAR

Leggio Neme, MF; Alonso, LG; Fernández González, P y Tonatto, MJ.
Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC) - Av. Williams Cross 3150, Las Talitas (4101), Tucumán; Argentina. fleggio@eeaoc.org.ar

Palabras clave: urea, nanopartículas, fertilización complementaria

INTRODUCCIÓN

La caña de azúcar es un cultivo de gran importancia económica y social en la provincia de Tucumán, donde constituye la base de la actividad agroindustrial azucarera. La sustentabilidad de este sistema productivo depende, en gran medida, de la correcta aplicación de prácticas de manejo que permitan mantener y/o mejorar el rendimiento de los cañaverales con un uso más eficiente de los insumos a lo largo de las campañas (Romero *et al.*, 2009).

La fertilización nitrogenada es una de las herramientas más importantes para la obtención de altos rendimientos en caña de azúcar. El nitrógeno (N) forma parte de numerosos compuestos orgánicos esenciales para el crecimiento y desarrollo del cultivo, por lo que su deficiencia afecta significativamente la producción. Sin embargo, la eficiencia en el uso de N aplicado suele ser baja, debido a pérdidas por volatilización, desnitrificación, lixiviación y a la variabilidad ambiental entre campañas, lo que plantea la necesidad de optimizar las estrategias de fertilización nitrogenada en la región cañera tucumana (Cantarella *et al.,* 2008; Mariano *et al.,* 2012).

En los últimos años se han evaluado distintas alternativas a la fertilización tradicional con urea con el objetivo de mejorar la eficiencia en el uso de N, reducir las pérdidas y optimizar los costos y la operatividad de las aplicaciones. Entre estas alternativas se incluyen formulaciones basadas en nanotecnología. Las mismas son conocidas como nanofertilizantes, que han sido propuestas como herramientas complementarias dentro de estrategias del manejo de N orientadas a mejorar la eficiencia de uso del nutriente más que a sustituir las fuentes convencionales (Nongbet *et al.,* 2022; Yadav, 2023). En este marco, los nanofertilizantes corresponden a formulaciones diseñadas para mejorar la disponibilidad y absorción de nutrientes por parte de la planta, lo que potencialmente permitiría aumentar la eficiencia de la fertilización nitrogenada sin incrementar las dosis aplicadas.

El objetivo del presente trabajo fue evaluar la respuesta en producción de la caña de azúcar a distintas estrategias de fertilización nitrogenada, incluyendo un nanofertilizante nitrogenado foliar, en ensayos a campo realizados durante tres campañas consecutivas en la provincia de Tucumán.

MATERIALES Y MÉTODOS

En las campañas 2021, 2022 y 2023 se realizaron 3 ensayos (1 por campaña). En 2021 el ensayo se ubicó en la Banda del Río Salí sobre un cañaveral en quinta soca. En las campañas 2022 y 2023 se evaluaron los ensayos en Los Quemados, Leales sobre cañaverales en segunda y tercera soca, respectivamente. La variedad evaluada fue LCP 85-384.

En todos los casos se utilizó un diseño en bloques completos al azar (BCA) con cuatro repeticiones en 2021 y tres en 2022 y 2023. Cada unidad experimental estuvo constituida por una parcela de seis surcos de caña de azúcar, distanciados a 1,60 m y de 25 m de longitud.

Se evaluaron los siguientes tratamientos:

T1 Testigo, sin aplicación de fertilizante nitrogenado.

T2 Nanofertilizante (aplicación foliar)10 l/ha.
T3 Urea 125 kg/ha (57,5 kgN/ha) + nanofertilizante (5 l/ha + 5 l/ha).
T4 Urea 250 kg/ha (115 kgN/ha)

El nanofertilizante evaluado correspondió a un fertilizante foliar nitrogenado formulado bajo principios de nanotecnología que, **según información del fabricante**, aporta aproximadamente **14,5% de nitrógeno**, además de nutrientes secundarios. La fertilización se realizó entre noviembre y diciembre, período considerado adecuado para la fertilización nitrogenada del cultivo de caña de azúcar en la provincia de Tucumán. Se utilizó urea granulada (46-0-0) para T3 y T4, aplicada con equipo fertilizador–cultivador para abonos sólidos de dos surcos, colocando el fertilizante a ambos lados del surco y realizándose su incorporación al suelo.

El nanofertilizante (T2 y T3) se aplicó 15 a 20 días posteriores a fertilización con urea, luego de 20–30 mm de lluvia, con el objetivo de asegurar una condición adecuada del follaje como receptor del producto. Se utilizó una mochila manual, con un caudal de aplicación de 100 litros por hectárea. T2 se fraccionó en dos aplicaciones de 5 l/ha cada una realizadas 15–20 días después de la fertilización con urea y 15 días después de la primera aplicación.

El nanofertilizante evaluado correspondió a un fertilizante foliar nitrogenado formulado bajo principios de nanotecnología, que aporta 14,5% de N y nutrientes secundarios, y se aplicó con una pulverizadora manual con un volumen de aplicación de 100 l/ha.

El manejo cultural del cañaveral se realizó de forma convencional asegurando condiciones adecuadas para el normal desarrollo del cultivo.

Al final del ciclo de cultivo se estimó rendimiento cultural de caña (t caña/ha). Estos datos se analizaron mediante un análisis combinado de las tres campañas, utilizando un modelo lineal mixto. Los tratamientos de fertilización se consideraron como efecto fijo, mientras que los años y los bloques anidados dentro de cada año se consideraron como efectos aleatorios, con el fin de contemplar la variabilidad interanual y espacial del ensayo. Las comparaciones entre medias se realizaron mediante la prueba de Tukey con un nivel de significancia del 5%. El análisis estadístico se realizó utilizando el software R.

RESULTADOS

El análisis combinado de las tres campañas indicó un efecto significativo de los tratamientos de fertilización sobre el rendimiento de caña de azúcar (Figura 1). T1 presentó el menor rendimiento promedio, mientras T2 mostró incrementos respecto T1, aunque sin diferencias estadísticamente significativas. T3 y T4 presentaron respuestas superiores diferenciándose de T1. T4 superó a T1 y T2 pero no se diferenció de T3.

Desde una perspectiva agronómica, los resultados confirman que la disponibilidad de nitrógeno es un factor central para la expresión del rendimiento del cultivo en los ambientes evaluados, y que las estrategias de fertilización deben asegurar una provisión adecuada del nutriente a lo largo del ciclo. La respuesta observada con T2 resultó insuficiente para cubrir los requerimientos estructurales de una especie caracterizada por una elevada acumulación de biomasa.

T3 sugiere un rol complementario de los nanofertilizantes dentro del manejo nitrogenado. Este efecto podría estar asociado a diferencias en la dinámica de disponibilidad del nitrógeno, dado que el nitrógeno aplicado en forma foliar presenta una disponibilidad más rápida, mientras que el proveniente de la urea requiere un proceso previo de transformación en el suelo, lo que podría favorecer una mejor sincronía entre la oferta del nutriente y la demanda del cultivo. Este comportamiento es consistente con antecedentes que indican que los nanofertilizantes no sustituyen la fertilización nitrogenada convencional, pero pueden contribuir a mejorar la eficiencia de uso del nitrógeno cuando se integran como complemento de fuentes edáficas (Nongbet *et al.,* 2022; Yadav, 2023).

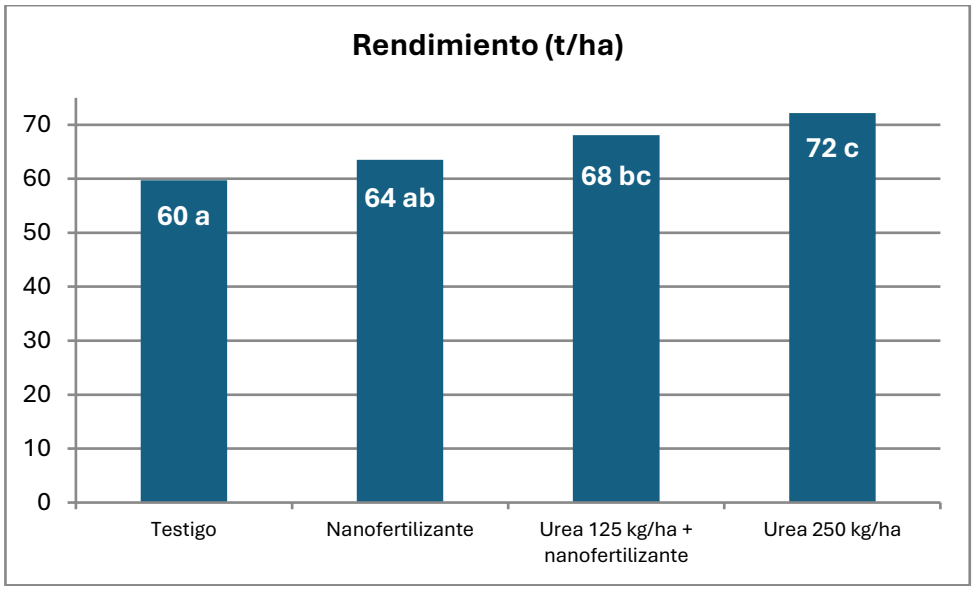


Figura 1. Rendimiento promedio de caña de azúcar (t/ha) para distintos tratamientos de fertilización. Medias ajustadas del análisis combinado de tres campañas. *Letras distintas indican diferencias significativas según la prueba de Tukey (α = 0,05).*

CONCLUSIONES

La caña de azúcar respondió a la estrategia de fertilización. El uso del nanofertilizante mostró un comportamiento consistente cuando se integró a esquemas de fertilización nitrogenada. La combinación de una dosis intermedia de urea con el nanofertilizante permitió aproximar los rendimientos a aquellos obtenidos con altas dosis de urea

BIBLIOGRAFÍA CITADA

Cantarella H, Ocheuze Trivelin PC, Michelucci Contin TL, et al.2008. Ammonia volatilization from urease inhibitor-treated urea applied to sugarcane trash blankets. ScientiaAgricola 65: 397–401.

Mariano E, Trivelin PCO, Vieira MX, Leite JM, Otto R, Franco HCJ. 2012. Ammonia losses estimated by an open collector from urea applied to sugarcane straw. Revista Brasileira de Ciência do Solo 36: 411–419.

Nongbet, A., Mishra, A. K., Mohanta, Y. K., Mahanta, S., Ray, M. K., Khan, M., Baek, K.-H. & Chakrabartty, I. (2022). Nanofertilizers: A smart and sustainable attribute to modern agriculture. Plants, 11(19), 2587. https://doi.org/10.3390/plants11192587

Romero, E.; P. Digonzelli y J. Scandaliaris. 2009. Manual del Cañero. Las Talitas, Argentina. Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres.

Yadav, A., Yadav, K. & Abd-Elsalam, K. A. (2023). Nanofertilizers: Types, Delivery and Advantages in Agricultural Sustainability. Agrochemicals, 2(2), 296–336. https://doi.org/10.3390/agrochemicals2020019

BIOINDICADORES DEL SUELO BAJO SISTEMAS CONTRASTANTES DE MANEJO DEL RESIDUO POSCOSECHA DE CAÑA DE AZÚCAR

Ludueña Lucrecia Carolina, Fernández de Ullivarri Juan, Hidalgo Leandro, Nuñez María, Sánchez Maroglio Emmiliano, Tonatto Javier y Tortora María Laura.
Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC). W. Cross 3150. Las Talitas – Tucumán, Argentina.
lluduena@eeaoc.org.ar

Palabras claves: Bacterias fijadoras, bacterias mesófilas, quema de residuos agrícolas.

Introducción

La producción de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) en el Noroeste Argentino, particularmente en Tucumán, es clave para la obtención de azúcar y bioenergía. La provincia lidera el sector con 298.930 ha cosechadas en 2025 (Fandos *et al.,* 2025). La cosecha en verde ha cobrado relevancia como práctica agrícola más sostenible, generando entre 7 y 18 t/ha de residuo agrícola de cosecha (RAC) en Tucumán (Digonzelli *et al.,* 2016). Dado que la quema del residuo y del cañaveral está prohibida en Argentina, actualmente se evalúan alternativas de manejo, como la conservación en superficie (RC), incorporación o retiro del campo. En contextos de limitada disponibilidad hídrica, se ha demostrado que RC mejora la productividad al favorecer la fertilidad, la retención de humedad y reducir la erosión (Fernández de Ullivarri *et al*., 2017). Nuestro grupo de trabajo ha demostrado múltiples beneficios asociados al sistema RC, entre ellos el reciclado de nutrientes y el incremento de la abundancia y actividad de microorganismos benéficos del suelo. (Digonzelli *et al.,* 2011b; Tortora *et al.,* 2013). Dado que la microflora del suelo es fundamental para su fertilidad y funcionamiento, resulta esencial comprender cómo RQ y RC modifican este equilibrio. Teniendo en cuenta estas consideraciones, el objetivo del presente trabajo fue evaluar el efecto de la conservación del RAC como cobertura y de la quema del mismo sobre poblaciones microbianas y actividades enzimáticas críticas del suelo.

Materiales y Métodos

El ensayo se realizó en el departamento Simoca, Tucumán. Se utilizó la variedad LCP 85-384, la más cultivada en la región (Henríquez *et al*., 2023). La cosecha se realizó en verde mediante cosechadora integral. Los tratamientos evaluados fueron: a) mantenimiento del RAC como cobertura sobre el suelo (RC), b) eliminación del RAC mediante quema controlada poscosecha (RQ).

El ensayo corresponde a un experimento de largo plazo, en el cual las parcelas se mantuvieron bajo los mismos sistemas de manejo durante más de diez años. El presente trabajo se centra en el muestreo realizado durante el último ciclo productivo (2023–2024). El diseño experimental fue completamente aleatorizado con tres repeticiones. La cosecha se realizó el 2 de agosto de 2023 y la quema del RAC el 13 de septiembre de 2023. Tanto antes como después de la quema se tomaron muestras de suelo de 0–10 cm, las cuales se conservaron a 4 °C hasta su análisis.

Los parámetros biológicos del suelo evaluados y las metodologías empleadas se presentan de manera sintética en la Tabla 1.

Tabla 1. Parámetros biológicos del suelo evaluados

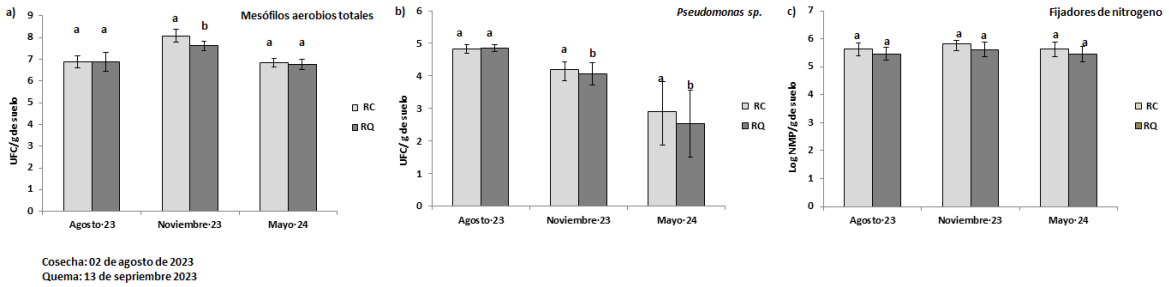
Parámetro evaluado	**Metodología**	**Indicador biológico / funcional**
Microorganismos aeróbicos mesófilos totales	Recuento en placa en medio LB	Indicador general de la actividad microbiana total y del nivel de descomposición de la materia orgánica del suelo.
Pseudomonas spp.	Recuento en placa en agar Cetrimida	Grupo funcional asociado al control biológico, la promoción del crecimiento vegetal y la degradación de compuestos orgánicos.
Bacterias fijadoras de nitrógeno	Técnica del Número Más Probable (NMP) en medio semisólido NFb (Döbereiner *et al.,* 1995)	Indicador del potencial de fijación biológica de nitrógeno y del funcionamiento del ciclo del N en el suelo.
Actividad enzimática total (FDA)	Fluoresceína diacetato (Adam & Duncan, 2000)	Indicador integrado de la actividad metabólica microbiana total y de la calidad biológica del suelo.
Actividad β-glucosidasa (βGA)	Método de Dick (1966)	Indicador del ciclo del carbono, asociado a la degradación de polisacáridos y al reciclado de la materia orgánica.
Actividad nitrato reductasa (NR)	Método de Kandeler (1996)	Indicador funcional del metabolismo microbiano del nitrógeno, vinculado a procesos de transformación del nitrato.

Análisis estadístico

Los datos obtenidos fueron analizados estadísticamente mediante el análisis de la varianza (ANOVA) y la Prueba de las Mínimas Diferencias Significativas (LSD) con el software estadístico InfoStat (Di Rienzo *et al.,* 2014) para Windows.

Resultados

El manejo del RAC influyó de manera diferencial sobre las poblaciones microbianas del suelo según el grupo evaluado y la fecha de muestreo. En el caso de los microorganismos aeróbicos mesófilos totales, el sistema RC presentó valores superiores respecto de RQ, observándose diferencias significativas en noviembre de 2023 , mientras que en agosto de 2023 y mayo de 2024 ambos tratamientos mostraron valores estadísticamente similares (figura 1a). La cobertura del RAC podría favorecer la actividad microbiana al moderar la temperatura y conservar la humedad del suelo, generando un microambiente más estable, particularmente durante períodos con condiciones térmicas más favorables.



Cosecha: 02 de agosto de 2023
Quema: 13 de septiembre 2023

Figura 1. Efecto de los diferentes sistemas de manejo del residuo agrícola de la cosecha (RAC) sobre las poblaciones de bacterias mesófilas totales, *Pseudomonas* spp. y bacterias fijadoras de nitrógeno en muestras de suelo.

El género *Pseudomonas,* esencial para el control biológico y la promoción del crecimiento vegetal, fue mayor en RC en comparación con RQ, observándose diferencias significativas en noviembre y mayo (figura 1b), lo que podría atribuirse a las mejores condiciones generadas por la materia orgánica proveniente del RAC. Estas bacterias también pueden degradar compuestos fenólicos liberados por el RAC, mitigando sus efectos negativos sobre la caña de azúcar (Picard y Bosco, 2008). En el caso de las bacterias fijadoras de nitrógeno, no se observaron diferencias significativas entre los sistemas RC y RQ en ninguna de las fechas evaluadas (figura 1c).

Los sistemas de manejo del residuo agrícola de la cosecha (RAC) influyeron significativamente sobre las actividades enzimáticas del suelo. Tanto la actividad enzimática total (FDA) como la β-glucosidasa (AβG) presentaron valores significativamente superiores en el sistema RC en comparación con RQ en todas las fechas de muestreo (figura 2a y b). Estos resultados reflejan una mayor actividad metabólica microbiana y una mayor dinámica del carbono asociadas a la conservación del residuo, que aporta sustratos orgánicos y mejora las condiciones del suelo. Asimismo, ambas actividades mostraron una variación estacional, con valores más elevados en los meses de mayores temperaturas, evidenciando la influencia de los factores ambientales sobre la actividad biológica del suelo.

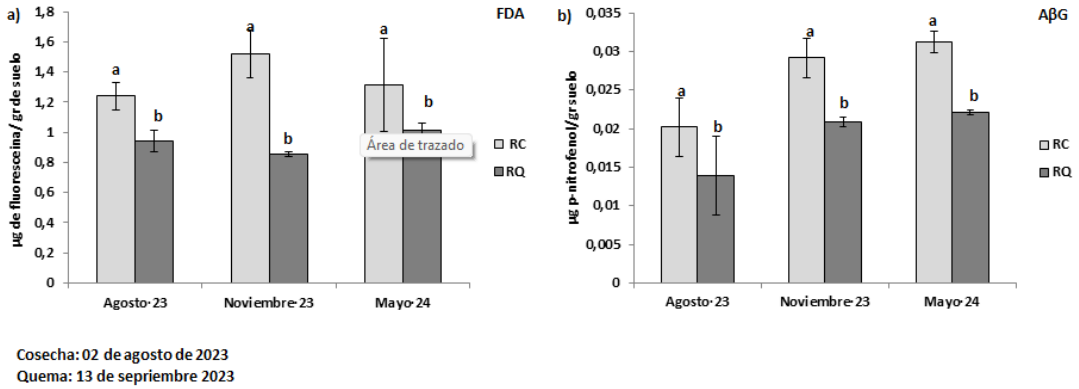


Figura 2. Efecto de los diferentes sistemas de manejo del residuo agrícola de la cosecha (RAC) sobre la cuantificación de la actividad enzimática total (FDA) (a) y de la actividad β-glucosidasa (βGA) (b).

Con el objetivo de profundizar la interpretación de los resultados obtenidos en las actividades enzimáticas vinculadas a la actividad microbiana, se incorporó en el segundo muestreo la determinación de la actividad nitrato reductasa (NR) como un indicador funcional asociado al ciclo del nitrógeno. La actividad nitrato reductasa (NR) fue significativamente mayor en el sistema RC en las dos fechas evaluadas (figura 3), lo que indica un mayor funcionamiento de los procesos microbianos vinculados al metabolismo del nitrógeno bajo conservación del residuo. En contraste, el manejo con quema del RAC tiende a reducir la biomasa microbiana y la actividad enzimática del suelo en el largo plazo, afectando el funcionamiento biológico del sistema.

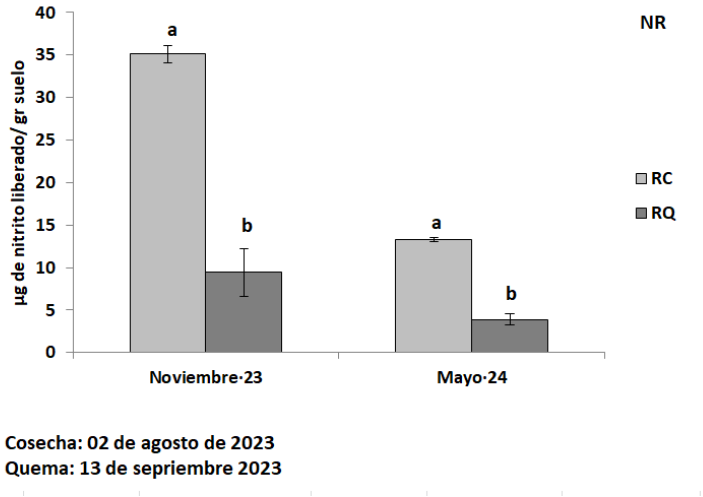


Figura 3. Efecto de los diferentes sistemas de manejo del residuo agrícola de la cosecha (RAC) sobre la cuantificación de la actividad nitrato reductasa (NR)

Conclusiones

La conservación del residuo agrícola de la cosecha (RC) mejora la actividad microbiana y enzimática del suelo respecto de la quema (RQ), lo que puede asociarse a su capacidad de mantener condiciones edáficas más estables y atenuar el impacto de las variaciones ambientales sobre la biota edáfica. En contraste, la quema tiende a deteriorar la biología del suelo en el tiempo, mientras que la cobertura aporta beneficios sostenidos. Los bioindicadores evaluados, especialmente las actividades enzimáticas, resultan herramientas sensibles para evaluar el impacto del manejo del residuo y respaldan la adopción de prácticas más sostenibles.

Referencias bibliográficas

Adam G, Duncan H. (2000). Desarrollo de un método sensible y rápido para la medición de la actividad microbiana total mediante fluoresceína diacetato (FDA) en una amplia gama de suelos. Soil Biology and Biochemistry 33: 943–951.

Bessey O, Lowry OH, Brock MJ. (1946). Actividad fosfatasa evaluada según el método de Bessey et al. The Journal of Biological Chemistry 164(1): 321–323.

Dick WA. (1966). La actividad β-glucosidasa (βGA) fue analizada siguiendo la técnica propuesta por Dick. Soil Science Society of America Proceedings 30(5): 599–602.

Digonzelli PA, Fernández de Ullivarri J, Tortora ML, Medina M, Leggio Neme MF. (2016). Evaluación de la descomposición del residuo de la cosecha en verde de la caña de azúcar (RAC) en Tucumán, Argentina. En: Proceedings del 10° Congreso de la Asociación de Técnicos Azucareros de Latinoamérica y el Caribe (ATALAC), Veracruz, México.

Digonzelli PA, Romero ER, Alonso LGP, Fernández de Ullivarri J, Rojas Quinteros H, Scandaliaris J, Fajre S. (2011b). Evaluación de un sistema sustentable de producción de caña de azúcar en Tucumán, Argentina. Parte I: dinámica de descomposición del residuo de cosecha de la caña de azúcar. Revista Industrial y Agrícola de Tucumán 88(1): 1–12.

Di Rienzo J.A., Casanoves F., Balzarini M.G., Gonzalez L., Tablada M., Robledo C.W. InfoStat versión 2014. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Argentina. En: http://www.infostat.com.ar

Döbereiner J, Baldani VLD, Baldani JI. (1995). Cómo aislar e identificar bacterias diazotróficas de plantas no leguminosas. EMBRAPA-SPI, Brasília-DF, 85 pp.

Fandos C, Scandaliaris J, Scandaliaris P, Carreras Baldres JI, Soria F. (2025). Estimación del área cosechable y de la producción de caña de azúcar para la zafra 2024 en Tucumán. Reporte Agroindustrial 344: 6–13.

Fernández de Ullivarri J, Leggio Neme MF, Tortora ML, Romero ER, Digonzelli PA. (2017). Dinámica de la población de tallos, componentes del rendimiento cultural y producción de caña en diferentes sistemas de manejo del cañaveral en Tucumán, Argentina. Revista de la Agronomía del Noroeste Argentino 37(1): 9–17.

Henríquez D, Medina P, Aybar Guchea M, Figueroa M, Costilla D, Díaz J, Díaz Romero C, Ostengo S. (2023). Relevamiento de la distribución varietal y del uso de otras tecnologías en el cultivo de caña de azúcar en la provincia de Tucumán: campaña 2022/2023. Reporte Agroindustrial 282: 3–12.

Kandeler E. (1996). Nitrificación y desnitrificación. En: Schinner F, Öhlinger R, Kandeler E, Margesin R (Eds.). Métodos en Biología de Suelos. Springer Verlag, Berlin Heidelberg, pp. 146–149.

Picard C, Bosco M. (2008). Diversidad genotípica y fenotípica en poblaciones de Pseudomonas spp. probióticas de plantas que colonizan raíces. Naturwissenschaften 95: 1–16.
Tortora ML, Grellet Naval N, Vera L, Fernández de Ullivarri J, Digonzelli PA, Romero ER. (2013). Efecto del residuo agrícola de la cosecha en verde de la caña de azúcar en el desarrollo de microorganismos de importancia agrícola y ambiental. Revista Industrial y Agrícola de Tucumán 90(1): 61–68.

MUTAGÉNESIS IN VITRO COMO ESTRATEGIA PARA INCREMENTAR LA VARIABILIDAD GENÉTICA EN CAÑA DE AZÚCAR

Di Pauli V.; Fontana P.D.; Lewi D.M.; Felipe A.; Canseco M.A.; Zalazar N.O.; Erazzú L.E.

Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA), EEA Famaillá, Tucumán, Argentina. dipauli.valentina@inta.gob.ar

Palabras Clave: *Saccharum* spp., EMS (etil metanosulfonato), cultivo de tejidos

Introducción

El desarrollo de nuevos cultivares de caña de azúcar en Argentina se ve condicionado por diversos factores biológicos y genéticos, entre ellos la limitada diversidad del germoplasma subtropical, el alto grado de ploidía, la complejidad del genoma, la duración prolongada de los ciclos de selección y la necesidad de inducir la floración en cámaras especializadas para posibilitar el cruzamiento sexual. En conjunto, estas características enlentecen la obtención de materiales superiores mediante el mejoramiento tradicional.

En este contexto, la mutagénesis *in vitro* se ha utilizado ampliamente como una herramienta para generar variabilidad genética y obtener caracteres de interés en cultivos donde el cruzamiento sexual resulta complejo. El mejoramiento por mutaciones inducidas constituye una alternativa simple, eficaz y de bajo costo para la incorporación de nuevos alelos en una población. En Argentina, el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) ha incorporado este enfoque en caña de azúcar como una estrategia para superar algunas de las limitaciones del mejoramiento convencional.

En este trabajo se planteó como objetivo establecer un protocolo de mutagénesis *in vitro* mediante el uso del mutágeno químico EMS en un cultivar elite de caña de azúcar del INTA y explorar la variabilidad genética generada.

Materiales y métodos

Tratamientos mutagénicos

Se utilizó como material experimental callos embriogénicos de seis semanas de desarrollo del cultivar comercial de caña de azúcar INTA CP 98-828. Los callos fueron tratados con EMS a concentraciones de 8, 16, 32 y 48 mM, mediante incubación durante 3 h en un agitador rotatorio a temperatura ambiente. Se incluyó un tratamiento control sin aplicación de EMS. Luego del tratamiento, los callos fueron cultivados durante 8 semanas en oscuridad y posteriormente transferidos a condiciones de fotoperiodo de 16 h de luz. La capacidad de regeneración se evaluó a las 16 semanas, expresada como el número de plántulas obtenidas por unidad experimental. Asimismo, se registró la frecuencia de plantas anormales, determinada como el número de variantes deficientes en clorofila respecto del total de plantas regeneradas. Luego de la aclimatación *ex vitro* en invernáculo se determinó la proporción de plantas sobrevivientes. Las dosis letales (LD25 y LD50) para la capacidad de regeneración se estimaron mediante un modelo de regresión lineal ($y(x) = \alpha + \beta x$), donde $y(x)$ representa el número de plantas regeneradas, x la dosis de EMS y α y β los parámetros de la regresión.

Exploración de la variabilidad genética inducida

Se considera que las dosis de mutágenos químicos que inducen una letalidad del 25 al 50% (LD25–LD50) en una generación M1 (plantas derivadas directamente del material tratado con el mutágeno) resultan las más adecuadas para inducir mutaciones, dado que se asocian con las mayores tasas de mutación (Leitão, 2012). Sobre la base de este criterio y de los resultados obtenidos para dosis letales, se evaluaron a campo las plantas provenientes de

los tratamientos con EMS comprendidos entre LD25 y LD50, con el objetivo de explorar la variabilidad genética generada. Se incluyó el tratamiento control (T0) para evaluar la variación somaclonal y un tratamiento con plantas *wild type* (WT).

El ensayo se llevó a cabo con 50 plantas por tratamiento, dispuestas en un diseño completamente aleatorizado, con una distancia de 80 cm entre plantas y 160 cm entre surcos, con bordura de INTA CP 98-828. Se registraron el número de tallos, la longitud y el diámetro de los tallos, y se determinaron en el laboratorio el peso de tallo, el porcentaje de pol% en caña (concentración de sacarosa), los sólidos solubles totales (°Brix) y el contenido de azúcar (%). Las evaluaciones se realizaron en dos años consecutivos, caña planta y soca 1. Para cada carácter y tratamiento se estimó el grado de determinación genética (DGD) (Mariotti, 1991; Mariotti y Collavino, 2014), también denominado heredabilidad en sentido amplio, que expresa la proporción de la variación fenotípica total atribuible a factores genéticos.

Análisis estadístico

El análisis de los datos de los tratamientos mutagénicos se realizó mediante modelos lineales generalizados. La capacidad de regeneración se analizó utilizando una distribución de error binomial negativa con una función de enlace *log*. La proporción de plantas sobrevivientes se analizó utilizando una distribución de error binomial con una función de enlace *logit*. La sobredispersión se evaluó para cada modelo utilizando residuos de Pearson y la prueba DGC se utilizó para comparaciones múltiples.

Para analizar los caracteres agronómicos y de calidad se realizaron análisis de la varianza (ANAVA), seguidos por la prueba DGC para la comparación de medias. La normalidad se verificó mediante la prueba de Shapiro-Wilk.

Para el análisis de los datos se utilizó el software InfoStat, con una interfaz al paquete estadístico R, versión 3.4.2 (The R-Foundation for Statistical Computing, 2018). Un valor de $P \leq 0,05$ se consideró estadísticamente significativo.

Resultados

Capacidad de regeneración y determinación de dosis letales

Se detectaron diferencias significativas ($P < 0,001$) entre los tratamientos con EMS en relación con la capacidad de regeneración. A partir de concentraciones superiores a 8 mM de EMS se observó una reducción significativa en la producción de plantas. El tratamiento control sin EMS y el tratamiento con 8 mM presentaron un crecimiento normal de los callos y permitieron obtener aproximadamente 200 plántulas por placa (13 plántulas por explanto) (Tabla 1). Con la aplicación de 16 mM de EMS regeneraron, en promedio, 155 plántulas por placa (10 plántulas por explanto), mientras que a 32 mM se obtuvieron 103 plántulas por placa (7 plántulas por explanto). En la dosis más elevada (48 mM de EMS), sólo se obtuvieron algunas plantas a partir de pequeños callos embriogénicos, con un promedio de 2 plántulas por explanto. La frecuencia de plantas albinas o variantes deficientes en clorofila fue baja (< 0,04) (Tabla 1). Todos los tratamientos, con excepción de la dosis de 48 mM de EMS, se aclimataron exitosamente a condiciones de invernáculo, con porcentajes de supervivencia superiores al 80% (Tabla 1).

Tabla 1 Capacidad de regeneración, frecuencia de plantas anormales y proporción de plantas sobrevivientes para cada tratamiento mutagénico

Dosis de EMS	Capacidad de regeneración (número de plántulas/placa)	Frecuencia de plantas anormales	Proporción de plantas aclimatadas(%)
0 mM	204,55 ± 10,49 a	0,00	88,46 a
8 mM	203,92 ± 9,63 a	0,00	82,00 a
16 mM	155,08 ± 7,82 b	0,01 (albina)	84,93 a
32 mM	102,87 ± 4,88 c	0,01 (estriada, albina)	83,53 a
48 mM	38,33 ± 2,86 d	0,04 (albina)	0,00

Medias con la misma letra no presentan diferencias significativas según DGC (P > 0,05).

La LD50 para la capacidad de regeneración se estimó en 31,68 mM de EMS, mientras que la LD25 fue de 17,71 mM. En función de estos resultados, los posibles mutantes derivados de los tratamientos con 16 y 32 mM de EMS (T16 y T32) fueron evaluados fenotípicamente a campo, junto con los tratamientos T0 y WT, tanto en caña planta como en soca 1.

En las tablas 2 y 3 se muestran los resultados obtenidos de las evaluaciones fenotípicas en campo. El número de tallos en los tratamientos T0, T16 y T32 fue superior al observado en el WT tanto en caña planta como en soca 1. Este carácter resultó el más variable, con más del 60% de la variación fenotípica atribuible a causas genéticas (DGD = 60–83%). La longitud de tallo presentó valores más elevados en las poblaciones T16 y T32, mientras que en T0 no se observaron diferencias significativas respecto de WT en ninguno de los años evaluados. El DGD para la longitud de tallo fue cercano al 50% en ambos tratamientos con EMS. En el caso del diámetro de tallo, los valores medios de T0, T16 y T32 fueron inferiores a los de WT en caña planta; sin embargo, este carácter aumentó en el segundo año, sin presentar diferencias significativas con el WT en la primera soca. El DGD para el diámetro de tallo fue inferior al 30% en el primer año y se incrementó a valores entre 60 y 75% en el año siguiente. En caña planta no se detectaron diferencias en el peso de tallo entre tratamientos, aunque en la soca T16 y T32 mostraron un incremento en sus valores medios, posiblemente asociado a la estabilización del diámetro en el segundo año. Para este carácter, el DGD presentó valores intermedios.

En cuanto a las variables de calidad industrial, se observó en caña planta un leve aumento en los valores medios de pol% en caña, °Brix y contenido de azúcar en las poblaciones T16 y T32 respecto de WT; no obstante, en soca 1 no se registraron diferencias significativas entre tratamientos. El DGD fue elevado en el primer año y disminuyó en el segundo.

Sobre la base de los caracteres agronómicos evaluados, se seleccionaron 23 plantas mutantes, las cuales fueron avanzadas a generaciones posteriores dentro del Programa de Mejoramiento de Caña de Azúcar del INTA.

Tabla 2 Evaluación de los caracteres agronómicos y de calidad de los tratamientos mutagénicos (T16, T32), el tratamiento de variación somaclonal (T0) y el wild type (WT) en caña planta

Carácter	Tratamiento	Media	Error estándar	DGD*
Número de tallos	WT	7,78 **b**	0,25	-
	T0	10,70 **a**	0,32	0,66
	T16	10,40 **a**	0,30	0,60
	T32	10,68 **a**	0,45	0,83
Longitud de tallo (cm)	WT	218,26 **b**	2,27	-
	T0	215,34 **b**	2,99	0,40
	T16	227,26 **a**	2,91	0,44
	T32	231,86 **a**	3,01	0,49
Diámetro de tallo (mm)	WT	21,56 **a**	0,21	-
	T0	20,47 **b**	0,22	0,00
	T16	20,53 **b**	0,27	0,31
	T32	20,24 **b**	0,26	0,24
Peso de tallo (kg)	WT	0,80 **a**	0,02	-
	T0	0,77 **a**	0,03	0,46
	T16	0,79 **a**	0,03	0,66
	T32	0,83 **a**	0,03	0,54
Brix (%)	WT	19,77 **b**	0,09	-
	T0	19,61 **b**	0,20	0,78
	T16	20,07 **a**	0,11	0,37
	T32	20,40 **a**	0,12	0,45
Pol % caña	WT	14,35 **b**	0,08	-
	T0	14,15 **b**	0,20	0,82
	T16	14,64 **a**	0,12	0,56
	T32	14,86 **a**	0,12	0,55
Contenido de azúcar (%)	WT	10,55 **b**	0,08	-
	T0	10,37 **b**	0,17	0,80
	T16	10,79 **a**	0,11	0,55
	T32	10,95 **a**	0,11	0,52

Medias con la misma letra no presentan diferencias significativas según DGC (P > 0,05). * DGD: grado de determinación genética

Tabla 3 Evaluación de los caracteres agronómicos y de calidad de los tratamientos mutagénicos (T16, T32), el tratamiento de variación somaclonal (T0) y el wild type (WT) en soca 1

Carácter	Tratamiento	Media	Error estándar	DGD*
Número de tallos	WT	11,68 **b**	0,44	-
	T0	13,55 **a**	0,58	0,70
	T16	13,41 **a**	0,68	0,72
	T32	13,81 **a**	0,81	0,80
Longitud de tallo (cm)	WT	277,81 **b**	2,28	-
	T0	278,41 **b**	2,97	0,58
	T16	287,12 **a**	3,35	0,65
	T32	287,13 **a**	3,69	0,63
Diámetro de tallo (mm)	WT	22,45 **a**	0,18	-
	T0	21,89 **a**	0,24	0,59
	T16	21,97 **a**	0,32	0,75
	T32	21,65 **a**	0,36	0,74
Peso de tallo (kg)	WT	0,91 **b**	0,01	-
	T0	0,90 **b**	0,03	0,49
	T16	0,99 **a**	0,04	0,72
	T32	0,98 **a**	0,03	0,57
Brix (%)	WT	20,57 **b**	0,12	-
	T0	20,71 **b**	0,12	0,01
	T16	21,03 **a**	0,13	0,21
	T32	21,11 **a**	0,17	0,56
Pol % caña	WT	15,21 **a**	0,08	-
	T0	15,32 **a**	0,10	0,43
	T16	15,53 **a**	0,08	0,10
	T32	15,46 **a**	0,15	0,72
Contenido de azúcar (%)	WT	11,55 **a**	0,08	-
	T0	11,69 **a**	0,09	0,35

	T16	11,83 **a**	0,08	0,05
	T32	11,73 **a**	0,13	0,65

Medias con la misma letra no presentan diferencias significativas según DGC (P > 0,05). * DGD: grado de determinación genética

Conclusiones

Algunos caracteres mantuvieron las modificaciones de un año a otro, particularmente en los tratamientos con EMS T16 y T32, mientras que otros se estabilizaron y tendieron a valores similares al genotipo *wild type* en el segundo año de evaluación, lo cual podría estar asociado a cambios epigenéticos derivados de la variación somaclonal, que posteriormente se estabilizan. Caracteres como el número de tallos, la longitud de tallo y el peso de tallo presentaron un incremento en los valores medios poblacionales en los tratamientos con EMS en comparación con el genotipo *wild type*. En conjunto, estos resultados confirman que la mutagénesis inducida *in vitro* puede generar modificaciones simultáneas en múltiples caracteres. Además, los valores obtenidos para el grado de determinación genética (DGD) resultan de gran utilidad para estimar el potencial de mejoramiento de una población base.

Los resultados indican que los tratamientos mutagénicos con EMS indujeron una mayor variabilidad genética en comparación con la variación somaclonal por sí sola. Los cambios fenotípicos observados en las plantas tratadas con EMS fueron más consistentes y estables a lo largo de evaluaciones sucesivas a campo, lo que sugiere que la mutagénesis *in vitro* inducida por EMS constituye una estrategia eficaz para la generación de variabilidad heredable en programas de mejoramiento de caña de azúcar.

Apoyo financiero: Este trabajo fue financiado por el Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) - Proyectos PD-L01-I071 y PD-L01-I086.

Referencias bibliográficas

Leitão J.M. 2012. Chemical mutagenesis. In: Plant Mutation Breeding and Biotechnology. Plant Breeding and Genetics Section. Shu QY, Forster BP, Nakagawa H (Eds). International Atomic Energy Agency, Vienna, pp 135–158.

Mariotti J.A. 1991. Variabilidad y selección de poblaciones generadas *in vitro*. In: Cultivo de Tejidos en la Agricultura, Fundamentos y Aplicaciones. Roca WM, Mroginski LA (Eds). Centro Internacional de Agricultura Tropical (CIAT), Cali, pp 361–373.

Mariotti J.A.; Collavino N.G. 2014. Los caracteres cuantitativos en la mejora genética de los cultivos. Orientación Gráfica Editora, Buenos Aires.

DESEMPEÑO PRODUCTIVO Y ADAPTABILIDAD AMBIENTAL DEL CULTIVAR TUC 03-12 ANALIZADO MEDIANTE DOS ENFOQUES ESTADÍSTICOS

Ghio C; Díaz J; Henriquez D; Costilla D; Ostengo S.

Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC), Las Talitas, Tucumán, R. Argentina, T4101XAC. ceghio@eeaoc.org.ar

Palabras clave: Adaptación, cultivares, interacción genotipo × ambiente

Introducción

Los ensayos multiambientales son una herramienta clave en los programas de mejoramiento de caña de azúcar a nivel mundial, ya que permiten la identificación de genotipos superiores en diferentes ambientes y edades de cultivo. El Programa de Mejoramiento Genético de Caña de Azúcar de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (PMGCA-EEAOC) se enfoca en el desarrollo de variedades con amplia adaptación a diversos ambientes de la región cañera de Tucumán, Argentina. El estudio de la interacción genotipo-ambiente (G×E) se puede llevar a cabo mediante diferentes enfoques biométricos: métodos paramétricos y no paramétricos. El modelo de análisis de regresión por sitio (SREG) (Crossa y Cornelius, 1997) es ampliamente utilizado en caña de azúcar para interpretar, a través de un gráfico *biplot*, el rendimiento y la estabilidad de un cultivar (Chavanne *et al*., 2007). El método no paramétrico de "Consistencia Relativa de Rendimiento" (Ketata *et al*., 1989) también se emplea para estudios de G×E en caña de azúcar (Ostengo *et al*., 2011).

Objetivos

El presente trabajo tiene como objetivo analizar, mediante estos dos enfoques estadísticos, el desempeño productivo y la estabilidad de TUC 03-12, cultivar desarrollado y liberado por el PMGCA-EEAOC y que actualmente constituye la segunda variedad más plantada en el área cañera de Tucumán, Argentina (Henríquez *et al*., 2023).

Materiales y Métodos

TUC 03-12 fue utilizado como testigo en los ensayos multiambientales (*METs*-EEAOC) del PMGCA-EEAOC, plantado en cinco localidades contrastantes (Tabla 1) dentro del área cañera de Tucumán: Los Pérez (Departamento Cruz Alta), Río Seco (Departamento Monteros), Los Quemados (Departamento Leales), Campo de Herrera (Departamento Famaillá) y Simoca (Departamento Simoca).El diseño experimental de cada ensayo fue de bloques completamente aleatorizados con tres repeticiones. Las unidades experimentales consistieron en 3 surcos de 10 metros de largo cada uno.

Localidad	Heladas	Precipitación	Región agroecológica	Textura del suelo	Napa / Salinidad
Los Pérez	Frecuentes	Media	Llanura Chaco-Pampeana	Franco Limosa	No / No

Campo de Herrera	Infrecuentes	Alta	Pedemonte	Franco Arenosa	Sí / No
Río Seco	Infrecuentes	Alta	Pedemonte	Franca	No / No
Los Quemados	Muy frecuentes	Baja	Llanura deprimida salina	Franco Arenosa	Sí / Sí
Simoca	Muy frecuentes	Media	Llanura deprimida no salina	Franco Arenosa	Sí / No

Tabla 1. Detalles y características de los ambientes de las cinco localidades.

Los datos de rendimiento de caña (TCH: t caña/ha) se analizaron en dos edades de cultivo, caña planta y soca 1, utilizando dos metodologías de análisis: el modelo de regresión de sitios (SREG, prueba paramétrica multivariada) y la prueba no paramétrica "Consistencia Relativa de Rendimiento". El primero se basa en el análisis de Componentes Principales de las matrices de residuales de un modelo en el que los datos se ajustan únicamente por los efectos ambientales, y cuyos resultados se visualizan mediante gráficos *biplots*. Los genotipos distantes del origen sobre el eje del Componente Principal 1 (CP1) presentan altos rendimientos promedio, mientras que un genotipo estable es aquel cuya proyección en el eje del Componente Principal 2 (CP2, que representa la Interacción Genotipo-Ambiente, o G×E) es pequeña (Yan *et al*., 2000). El *software* utilizado para analizar estos datos fue Infostat (Di Renzo *et al*., 2018).

El análisis de Consistencia Relativa de Rendimiento consiste en el uso simultáneo de la media y la desviación estándar de los rangos genotípicos a través de diferentes localidades y la representación gráfica de estos dos parámetros. Esta metodología permite asignar cada genotipo a una de las siguientes cuatro clases: (i) consistentemente superior; (ii) inconsistentemente superior; (iii) inconsistentemente inferior; y (iv) consistentemente inferior.

Resultados

En caña planta, la suma de los CP1 y CP2 explica el 75,8% de la variabilidad asociada con los efectos G y G×E (Figura 1). El cultivar TUC 03-12 muestra un desempeño sobresaliente en relación con sus competidores (valores de CP1 positivos), pero sus altos valores de CP2 se asocian a una baja estabilidad ambiental. Este comportamiento también se observa en el análisis no paramétrico (Figura 2), donde TUC 03-12 fue clasificado como "inconsistentemente superior", presentando un bajo valor de *ranking* medio y una desviación estándar superior al promedio para todos los clones.

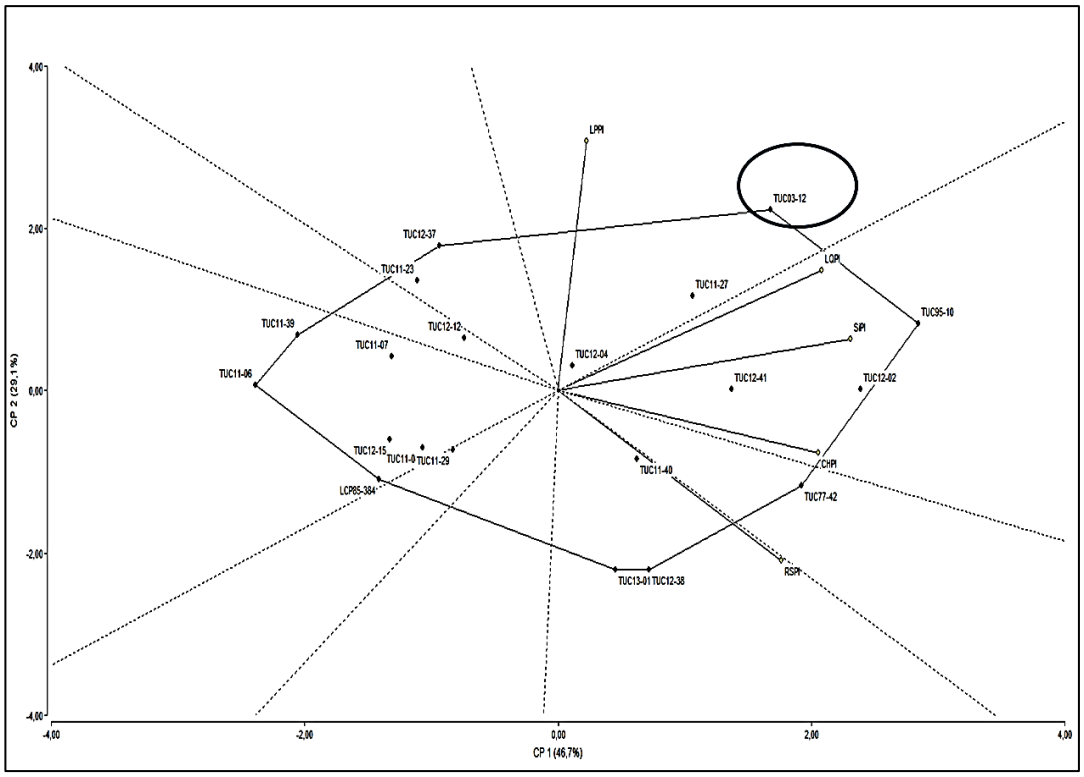


Figura 1. Gráfico SREG para el rendimiento de caña en cinco localidades de los METs-EEAOC. Edad de cultivo: caña planta.

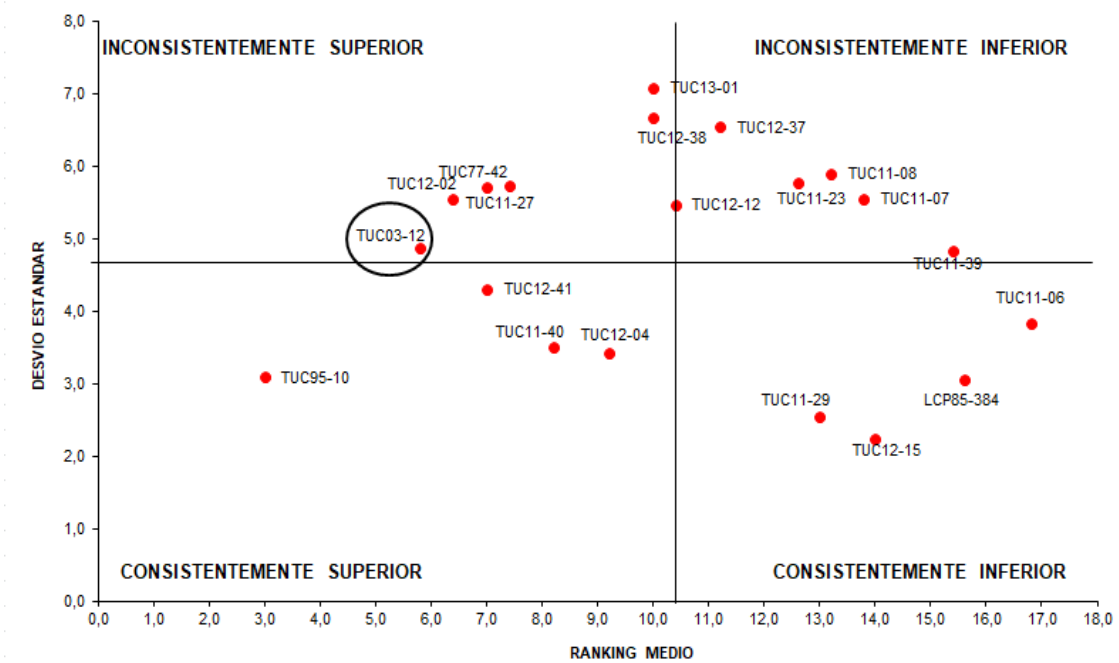


Figura 2. Valores medios de ranking y desviación estándar para el método de Consistencia Relativa de Rendimiento de caña a través de cinco localidades. Edad de cultivo: caña planta.

En la edad de soca 1, ambos componentes explican el 66,9% de la variabilidad asociada con los efectos G y G×E (Figura 3). En este ciclo, TUC 03-12 muestra un desempeño sobresaliente y estable en todos los ambientes ensayados (valores de CP1 positivos y valores de CP2 cercanos a cero). Este comportamiento se confirma con el método no paramétrico, donde TUC 03-12 se clasifica como un cultivar "consistentemente superior" (cuadrante inferior

izquierdo) (Figura 4); este cultivar se ubicó entre las primeras posiciones de producción de rendimiento de caña en todos los ambientes evaluados.

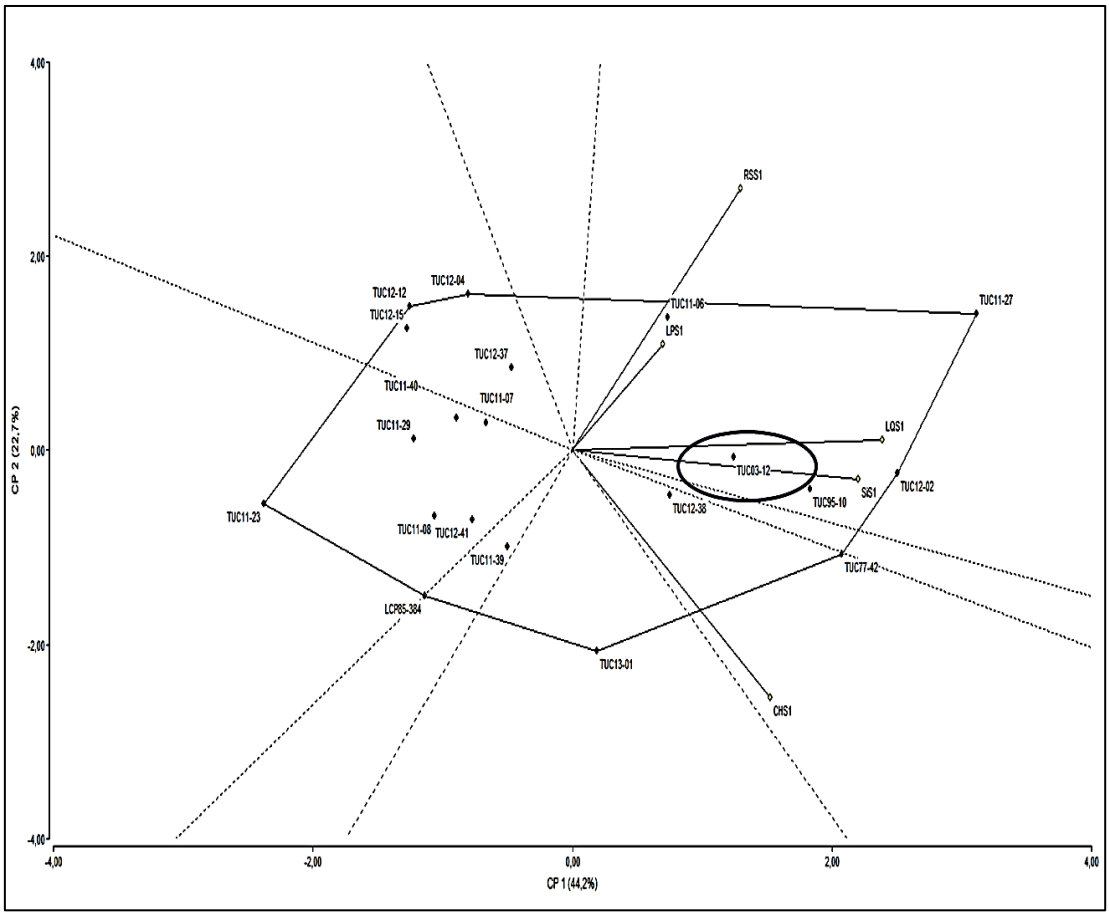


Figura 3. Gráfico SREG para el rendimiento de caña en cinco localidades de los METs-EEAOC. Edad de cultivo: soca 1.

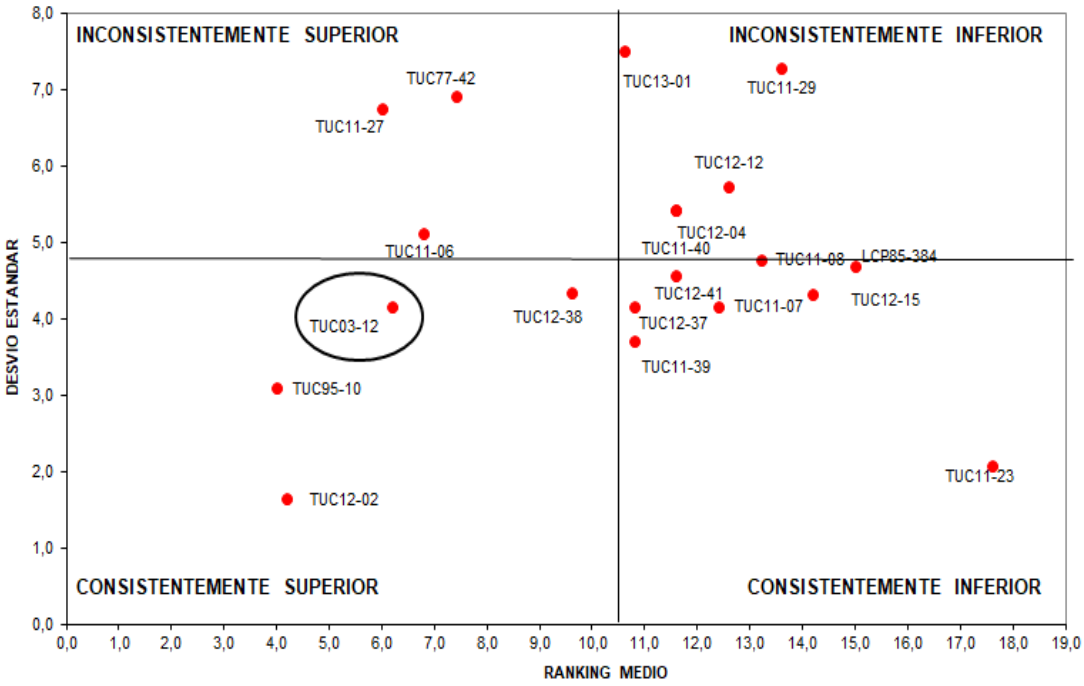


Figura 4. Valores medios de ranking y desviación estándar para el método de Consistencia Relativa de Rendimiento de caña a través de cinco localidades. Edad de cultivo: soca 1.

Conclusiones

El cultivar TUC 03-12 demostró un excelente desempeño en rendimiento y una buena adaptación a los ambientes cañeros de Tucumán, Argentina.

Tanto el análisis paramétrico (SREG) como el no paramétrico (Consistencia Relativa de Rendimiento) mostraron resultados similares, ya que ambas metodologías evidenciaron una mayor estabilidad de este cultivar en la edad de cultivo de soca 1 en comparación con caña planta, lo que demuestra su utilidad para inferir el desempeño y la adaptabilidad de la variedad.

Los análisis también permitieron detectar que el clon TUC 12-02 exhibió un desempeño similar a TUC 03-12, especialmente en soca 1, con una buena adaptación a los ambientes evaluados. No obstante, este clon requiere evaluaciones adicionales para confirmar su estabilidad e idoneidad para el cultivo comercial

Agradecimientos

Agradecemos a las Ings. Agr. María Fernanda Figueroa y. Carolina Díaz Romero por su contribución en este trabajo.

Bibliografía citada

Crossa, J. y P. Cornelius. 1997. Sites regression and shifted multiplicative model clustering cultivar trial sites under heterogeneity of error variances. Crop Sci. 37:406-415.

Chavanne, E. R.; S. Ostengo; M. B. García y M. I. Cuenya. 2007. Evaluación del comportamiento productivo de cultivares de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) a través de diferentes ambientes en Tucumán aplicando la técnica estadística GGE biplot. Rev. Ind. Agríc. Tucumán 84(2):19-24.

Di Rienzo, J. A.; F. Casanoves; M. G. Balzarini; L. González; M. Tablada y C. W. Robledo. 2018. InfoStat versión 2018. Grupo InfoStat, FCA, Universidad Nacional de Córdoba, Córdoba, Argentina.

Henríquez, D.; P. Medina; M. Aybar Guchea; M. F. Figueroa; D. Costilla; J. Díaz; C. Díaz Romero y S. Ostengo. 2023. Relevamiento de la distribución varietal y del uso de otras tecnologías en el cultivo de caña de azúcar en la provincia de Tucumán. Campaña 2022/2023. Reporte Agroindustrial EEAOC 282(3). ISSN 2346-9102.

Ketata, H. Y.; S. K. Yau y M. Nachit. 1989. Relative consistency performance across environments. Int. Symp. Physiol. Breed. Winter Cereals for Stressed Mediterranean Environments, Montpellier, pp. 391-400.

Ostengo, S.; M. García; C. Díaz Romero; N. Delgado; J. Díaz y M. Cuenya. 2011. Evaluación de la estabilidad de un cultivar de caña de azúcar (*Saccharum* spp.) en diferentes ambientes agroecológicos a través de una técnica no paramétrica en Tucumán, Argentina. Rev. Ind. Agríc. Tucumán 88(2):21-26.

Yan, W.; L. A. Hunt; Q. Sheng y Z. Szlavnics. 2000. Cultivar evaluation and megaenvironment investigation based on GGE Biplot. Crop Sci. 40:597-605.

IMPACTO DEL CARBÓN DE LA CAÑA DE AZÚCAR EN EL PROCESO DE SELECCIÓN DEL PROGRAMA DE MEJORAMIENTO GENÉTICO DE LA EEAOC DURANTE LOS ÚLTIMOS 10 AÑOS

Henriquez, D.D.; Figueroa, M.F.;.Díaz, J.V.; Ghio, A. C.; Costilla, D.D.; Díaz Romero, A.C.; Medina, L.P. y Ostengo, S.
Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC), Las Talitas, Tucumán, R. Argentina, T4101XAC. dhenriquez@eeaoc.org.ar

Palabras clave: *Sporisorium scitamineum*, fitotecnia, interacción genotipo-ambiente, resistencia, alta prevalencia

Introducción

La caña de azúcar es el cultivo más importante en Tucumán, República Argentina, con una superficie cosechable estimada en 294.470 ha (Fandos *et al.*, 2024). El Programa de Mejoramiento Genético de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (PMGCA-EEAOC) tiene como objetivo central generar variedades TUC con alto potencial de rendimiento, calidad industrial, madurez temprana y buen comportamiento sanitario frente a enfermedades prevalentes.

Durante la primavera de 2020, la provincia atravesó un período de sequía y altas temperaturas asociado al fenómeno “La Niña”, lo que favoreció el desarrollo del “carbón de la caña de azúcar” (*Sporisorium scitamineum* Syd.) (Bertani *et al.*, 2023a). A partir de la campaña 2020/2021, la prevalencia de la enfermedad aumentó significativamente, alcanzando valores del 85,2%, 94,5%, 92,2% y 87,0% entre las campañas 2020/2021 a 2023/2024, respectivamente (Bertani *et al.*, 2023a,b; 2024a).

Esta situación guardó relación con el cambio en el comportamiento de LCP 85-384 frente al carbón, una variedad previamente clasificada como resistente y que en la campaña 2019/2020 ocupaba el 67,74% del área cultivada (Aybar Guchea *et al.*, 2020). La hegemonía varietal de LCP 85-384 podría haber favorecido la selección de razas más agresivas del patógeno, incrementando la presión de inóculo en la región.

El objetivo de este trabajo fue analizar el impacto del carbón en distintas etapas del proceso de selección del PMGCA-EEAOC durante los últimos diez años.

Materiales y métodos

Se evaluó el impacto del carbón en clones correspondientes a cinco series de cruzamientos biparentales, generadas entre 2011 y 2015. Las evaluaciones a campo se realizaron en tres etapas del proceso de selección (II a IV) (Figura 1).



Figura 1. Etapas de selección a campo del Programa de Mejoramiento Genético de Caña de Azúcar de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (PMGCA-

EEAOC). ECVI: Ensayos Comparativos de Variedades Internos; ECVR: Ensayos Comparativos de Variedades Regionales.

En la etapa II, los clones se plantaron en un único ambiente experimental, en parcelas conformadas por un surco de 3 m, sin repeticiones. Al final de esta etapa, los clones que fueron seleccionados avanzaron a la etapa III, donde se plantaron en parcelas de tres surcos de 3 m, con dos repeticiones en un solo ambiente. En ambas etapas, los clones se evaluaron en las edades de caña planta y primera soca.

Luego, los clones que avanzaron a la etapa IV fueron evaluados durante cuatro cortes (caña planta a tercera soca), en parcelas de tres surcos de 8 m, con tres repeticiones y en dos ambientes contrastantes.

La selección de clones se basó en sus características agronómicas y su resistencia a enfermedades, incluido el carbón. La resistencia a enfermedades se evaluó mediante infección natural. Se consideró susceptible el clon que presentó en su parcela al menos dos látigos en etapa II o tres en etapa III. En la etapa IV se aplicó la escala de la International Society of Sugar Cane Technologists (ISSCT) (Tabla 1). El umbral de descarte definido por el PMGCA-EEAOC se estableció en el valor 4 de la escala de evaluación, lo que corresponde a la detección, dentro de una parcela, de cuatro cepas de caña de azúcar con al menos un látigo cada una.

Las etapas clonales tempranas se evaluaron entre 2014 y 2019. Los ensayos comparativos de variedades se desarrollaron entre 2019 y 2024.

Tabla 1. Escala para la evaluación de la resistencia de genotipos de caña de azúcar al carbón, basada en la escala de la International Society of Sugar Cane Technologists (ISSCT).

ESCALA	COMPORTAMIENTO DEL CLON
1 - 2	Resistente
3 - 4	Moderadamente resistente
5 - 6	Moderadamente susceptible
7 - 9	Susceptible

Resultados

A partir de las cinco series de cruzamientos biparentales en estudio, un total de 17.944 clones fueron evaluados durante las etapas II y III. De ellos, 47 clones (0,26%) fueron descartados por susceptibilidad al carbón, en un contexto de baja presión de inóculo (Bertani *et al.,* 2023a) (Figura 2).

De los clones selectos, 200 fueron evaluados en ensayos comparativos de rendimiento (etapa IV) entre 2019 y 2024. En esta etapa, 35 clones (17,50%) fueron descartados por su susceptibilidad bajo la alta presión de la enfermedad (Bertani *et al.*, 2024b) (Figura 2).

Estos resultados muestran que el incremento en la prevalencia del carbón observado en Tucumán en las últimas cuatro campañas, a partir de la pérdida de resistencia de la principal variedad cultivada (LCP 85-384), condujo a un descarte significativo de clones en etapas avanzadas del proceso de selección, los cuales no habían manifestado síntomas en etapas tempranas.

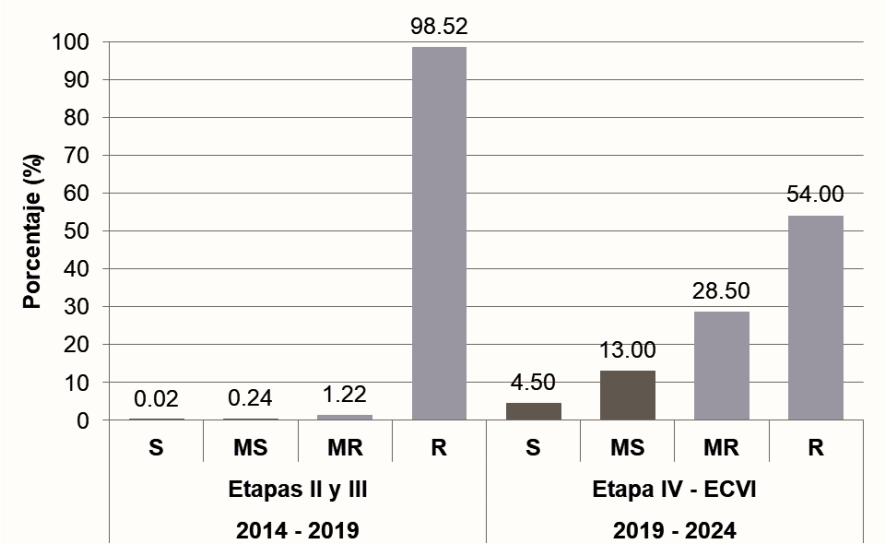


Figura 2. Porcentaje de distribución de clones de caña de azúcar según su resistencia al carbón en dos períodos de evaluación: primeras etapas clonales (II y III), y Ensayos Comparativos de Variedades Internos (ECVI, etapa IV). Las categorías fueron: susceptible (S), moderadamente susceptible (MS), moderadamente resistente (MR), y resistente (R).

Conclusiones

El aumento de la prevalencia del carbón en Tucumán ha impactado significativamente en el proceso de selección del PMGCA-EEAOC, generando un importante descarte de clones en etapas avanzadas. Este hallazgo impulsa la necesidad de contar con técnicas de inoculación artificial que permitan una detección más precisa y temprana de clones susceptibles. Esta estrategia permitirá optimizar el desarrollo de variedades resistentes, con alto rendimiento y calidad industrial, asegurando una mayor estabilidad productiva del cultivo en la región.

Citas bibliográficas

Aybar Guchea, M.; S. Ostengo; M. A. Espinosa; L. P. Medina; J. V. Díaz; E. R. Chavanne; D. D. Costilla y M. I. Cuenya. 2020. Relevamiento de la distribución de variedades y de otras tecnologías aplicadas en el cultivo de caña de azúcar en la provincia de Tucumán: campaña 2019/2020 (Parte I). Reporte Agroindustrial EEAOC 195.

Bertani, R. P.; C. Funes; J. A. Lobo and S. Chaves. 2023a. 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.

Bertani, R. P.; C. Funes; J. A. Lobo; C. M. Joya; M. A. Monachesi y V. González. 2023b. Principales enfermedades que afectaron al cultivo de la caña de azúcar en Tucumán durante la campaña 2022/2023. Reporte Agroindustrial EEAOC 280.

Bertani, R. P.; J. A. Lobo; L. G. Huvierne; M. A. Monachesi; C. M. Joya y V. González. 2024a. Los desafíos sanitarios de la caña de azúcar en Tucumán durante la campaña 2023/2024. Reporte Agroindustrial EEAOC 314.

Bertani, R. P.; J. A. Lobo; L. G. Huvierne; M. A. Monachesi; C. M. Joya and V. González. 2024b. Phytosanitary status of sugarcane in Tucumán, Argentina, over the past five years, in the context of climatic change. In: Abstract Book, XIII Pathology and XI Entomology Workshop 2024, pp. 8.

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.

PRINCIPALES ENFERMEDADES QUE AFECTARON AL CULTIVO DE LA CAÑA DE AZÚCAR EN TUCUMÁN DURANTE LA CAMPAÑA 2024/2025

Lobo, J. A.[1]; Huvierne, L. G.[1]; Monachesi, M. A.[2] y Joya, C.M.[2]

[1]Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC). Av. William Cross 3150, C.P. T4101XAC, Las Talitas, Tucumán, R. Argentina. jalobo@eeaoc.org.ar
[2]Instituto de Tecnología Agroindustrial del Noroeste Argentino (ITANOA), Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC) - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET), Las Talitas, Tucumán, República Argentina, T4101XAC

Palabras clave: monitoreo, estado sanitario, comportamiento varietal.

Introducción

Comprender el comportamiento varietal y la dinámica epidemiológica en las distintas zonas productoras de la provincia es fundamental para el diseño de estrategias de manejo integrado. Con este objetivo, la Sección Fitopatología de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC) lleva a cabo relevamientos fitosanitarios durante cada campaña agrícola, generando información que facilita al productor la toma de decisiones para preservar el estatus sanitario del cultivo.

El escenario fitosanitario en Tucumán es dinámico y está influenciado por factores como la aparición de nuevas variantes de patógenos y los impactos del cambio climático. Enfermedades como el carbón de la caña de azúcar (*Sporisorium scitamineum*), que mostró un resurgimiento notable en 2020/2021 (Bertani *et al*., 2021), conviven con patologías de aparición estacional como la roya marrón (*Puccinia melanocephala*), cuya manifestación puede variar entre campañas. Asimismo, el monitoreo constante permite evaluar la incidencia de patologías como la estría roja (*Acidovorax avenae* subsp. *avenae*) y otras enfermedades de importancia secundaria como Pokkah boeng (complejo *Fusarium fujikuroi*) y mancha en ojo (*Bipolaris sacchari*).

Finalmente, el raquitismo de la caña soca (RSD), causado por la bacteria *Leifsonia xyli* subsp. *xyli*, es una de las enfermedades sistémicas de mayor impacto económico en el cultivo de caña de azúcar (Joya *et al*., 2015). Dado que su diseminación ocurre principalmente a través del uso de "caña semilla" infectada y herramientas de corte contaminadas, el diagnóstico preciso constituye una herramienta fundamental que el Laboratorio de la Sección Fitopatología pone a disposición del sector productivo.

En este trabajo, se presenta el estado sanitario de la caña de azúcar en Tucumán durante la campaña 2024/2025, a partir del monitoreo de lotes comerciales y los resultados del servicio de diagnóstico de RSD que la Sección Fitopatología brinda a los productores.

Materiales y métodos

Prospección de enfermedades en los cañaverales de Tucumán

Entre septiembre de 2024 y abril de 2025, se llevó a cabo el relevamiento fitosanitario en los cañaverales de Tucumán. Este estudio incluyó la evaluación de las variedades: LCP 85-384, TUC 97-8, TUCCP 77-42, TUC 00-19, TUC 03-12, TUC 06-7, TUC 02-22 y TUC 00-65. Se consideraron diferentes edades del cultivo, desde caña planta hasta soca 6. Las evaluaciones se realizaron en los departamentos: Burruyacú, Chicligasta, Cruz Alta, Famaillá, Graneros, Juan Bautista Alberdi, La Cocha, Leales, Lules, Río Chico, Simoca y Tafí Viejo.

Evaluación de la prevalencia e incidencia del carbón de la caña de azúcar

Entre octubre de 2024 y enero de 2025, se realizó un relevamiento en 135 lotes comerciales con el objetivo de determinar la prevalencia (porcentaje de lotes afectados) y la incidencia (porcentaje de tallos enfermos) del carbón de la caña de azúcar. Se implementó una metodología estandarizada, delimitando cuatro sitios de muestreo por hectárea,

compuestos por cuatro surcos de 5 metros lineales cada uno. En estos puntos se procedió al conteo de tallos totales y tallos enfermos.

Evaluación de la severidad de roya marrón

Se evaluaron 103 lotes distribuidos en distintos departamentos de la provincia. La severidad se estimó a partir de 20 puntos de muestreo aleatorios por lote, utilizando la escala diagramática de 1 a 9 propuesta por Amorin *et al*. (1987), la cual se correlaciona con el porcentaje de área foliar afectada. En dicha escala, el valor 4 se considera un umbral de referencia: valores inferiores indican un comportamiento resistente, mientras que valores superiores, susceptibilidad.

Prospección de estría roja de la caña de azúcar

Entre diciembre de 2024 y abril de 2025 se llevó a cabo la prospección de estría roja en el área cañera de Tucumán. A diferencia de campañas anteriores, este año se extendió el período de monitoreo, debido a que en ciclos previos se había registrado una aparición temprana de la enfermedad. Se evaluaron 82 lotes distribuidos en los departamentos de Burruyacú, Cruz Alta, Graneros, Juan Bautista Alberdi, Leales, Lules, Río Chico, Simoca y Tafí Viejo. En cada lote, se establecieron diez puntos muéstrales aleatorios de 5 m lineales cada uno y se registró el número de tallos con síntomas de la enfermedad. Adicionalmente, se seleccionaron cinco puntos muéstrales aleatorios de 1 m lineal cada uno, en los que se contabilizo la población total de tallos.

Enfermedades secundarias detectadas durante la campaña

Por segunda campaña consecutiva, los cañaverales de Tucumán se vieron afectados por la presencia de Pokkah boeng (PB) y mancha en ojo (MO). La evaluación de estas enfermedades se realizó utilizando incidencia para PB y severidad para MO, esta última determinada a través de una escala visual de 0 a 9, donde cada valor representa un porcentaje de tejido foliar afectado.

Análisis de la incidencia de RSD en lotes comerciales

Un factor clave para una buena plantación es el uso de “caña semilla” de alta calidad, por lo cual resulta fundamental conocer el estado sanitario de los lotes destinados a semilleros. La Sección Fitopatología recomienda no utilizar como “caña semilla” aquellos lotes cuyas muestras presenten un nivel de infección de RSD mayor al 5% (Joya *et al.,* 2024). Entre marzo y junio del 2025 en el Laboratorio de Diagnóstico de la Sección Fitopatología, se recibieron 627 muestras de tallos provenientes de lotes comerciales, con el objetivo de detectar la bacteria *Leifsonia xyli* subsp. *xyli*, agente causal del RSD. El diagnóstico se realizó empleando la técnica serológica TBIA (Tissue Blot Immunoassay), utilizando el tercio basal de aproximadamente 20 tallos por muestra. Para cada una de ellas se calculó el porcentaje de incidencia (nº de tallos enfermos/nº total de tallos x 100) y luego se agruparon por rangos de incidencia de la enfermedad.

Resultados

El carbón de la caña de azúcar presentó una marcada disminución durante la campaña 2024/2025

La prevalencia de carbón observada en los cañaverales de Tucumán durante esta campaña fue del 28,1%, lo que representa una disminución significativa respecto a campañas

anteriores. Este menor nivel de la enfermedad puede atribuirse a las condiciones climáticas predominantes. El desarrollo del carbón de la caña de azúcar requiere temperaturas cálidas (25°C a 30°C) y períodos de sequía (Bertani *et al*., 2021). Si bien la campaña 2024/2025 se caracterizó por presentar temperaturas medias cercanas a los 24°C, las precipitaciones registradas entre octubre y noviembre fueron superiores a los promedios históricos (Forciniti, 2025), lo que limitó la manifestación de la enfermedad, manteniéndola en niveles bajos. LCP 85-384 continúa siendo la variedad más susceptible, con una prevalencia del 66,7% (Figura 1) y valores máximos de incidencia de carbón superiores al 30% en los departamentos de Graneros (33%) y Burruyacú (31%) (Figura 2). En contraste, los cultivares TUC desarrollados por el Subprograma de Mejoramiento Genético de Caña de Azúcar (SMGCA-EEAOC), no mostraron síntomas de la enfermedad o, en su defecto, solo presentaron trazas en algunos lotes (Figura 1).

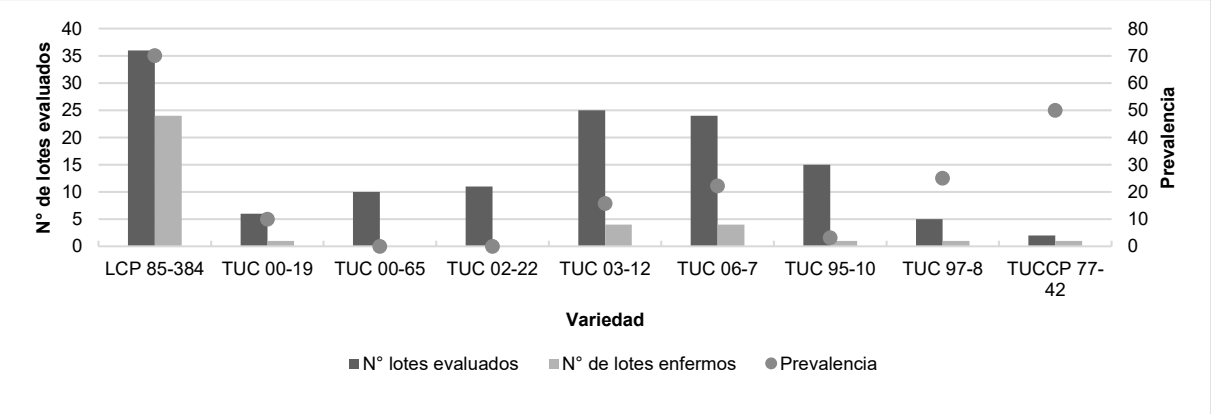


Figura 1. Número de lotes evaluados, número de lotes enfermos y prevalencia de carbón en diferentes variedades de caña de azúcar en Tucumán. Campaña 2024/2025.

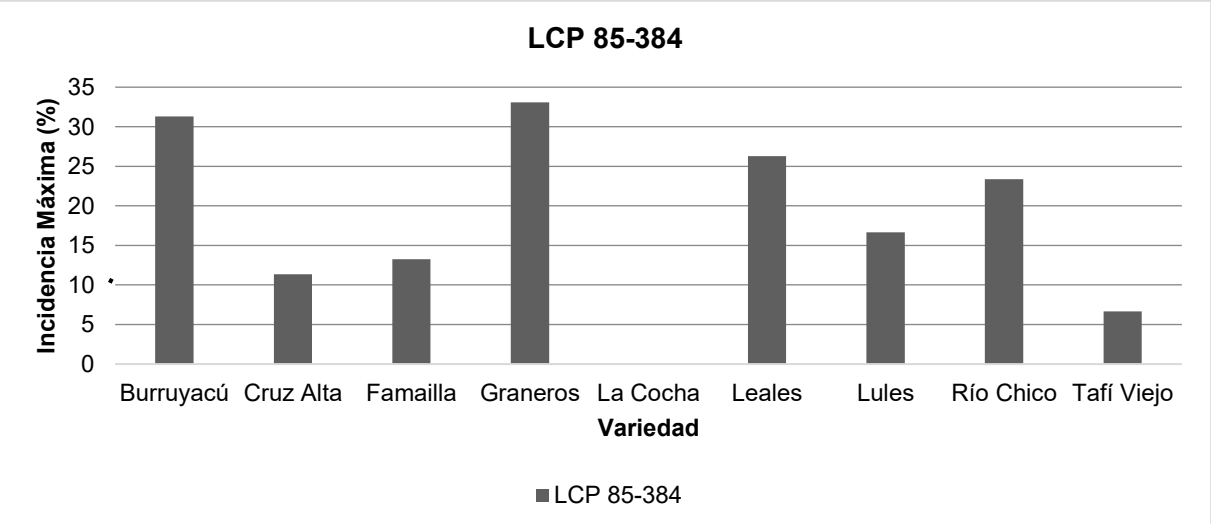


Figura 2. Valores máximos puntuales de incidencia de carbón en la variedad LCP 85-384 en diferen tes departamentos de Tucumán, campaña 2024/2025. (·) La línea horizontal indica un valor de incidencia del 10 %.

LCP 85-384 continúa siendo la variedad más afectada por roya marrón

En septiembre de 2024 se detectó, de forma anticipada, la presencia de roya marrón en un lote ubicado en el departamento de Lules, correspondiente a la variedad TUC 06-7 en edad de soca 1, con un valor de severidad de 9. Ante esta situación, se comenzó con el monitoreo

fitosanitario en los cañaverales de la provincia, observándose una presencia generalizada de la enfermedad a partir de diciembre, determinándose una prevalencia provincial de roya marrón del 56,3%. LCP 85-384 presentó los mayores promedios de severidad, superando el valor de 4 en seis departamentos. Las variedades TUC 06-7 y TUC 95-10 también mostraron una susceptibilidad considerable, registrando valores de severidad iguales o superiores a 4 en tres y cuatro departamentos, respectivamente (Figura 3). Es importante señalar que, el valor máximo de severidad observado es en la variedad TUC 06-7, en el departamento de Burruyacú, donde corresponde a un único lote evaluado. El resto de las variedades TUC evaluadas presentaron ausencia o niveles muy bajos de roya marrón.

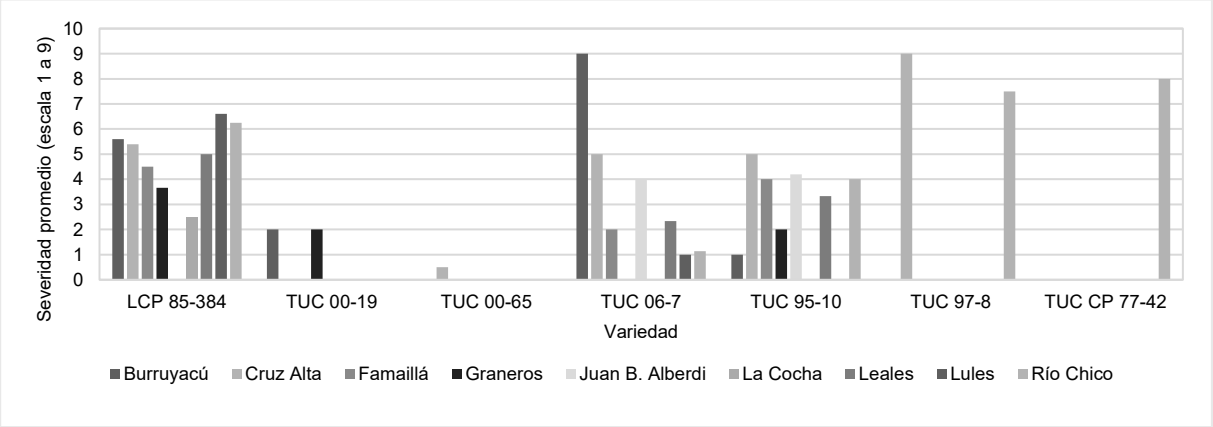


Figura 3. Valores máximos promedios de severidad de roya marrón, en diferentes variedades de caña de azúcar por departamento de la provincia de Tucumán, campaña 2024/2025. (-) La línea horizontal indica un valor de severidad de 4, valor donde se produce un cambio de reacción de resistente a susceptible.

La estría roja registró una baja prevalencia en las zonas productoras de Tucumán

La prevalencia de estría roja en Tucumán fue baja (2,4%), con síntomas detectados únicamente en dos lotes durante el mes de diciembre. En uno de ellos, ubicado en El Chañar (Burruyacú), la variedad TUC 06-7 presentó una incidencia promedio de ER del 14,1% y de polvillo menor al 1%. En otro lote situado en Simoca, la variedad TUC 00-19 exhibió incidencias promedio de ER y P del 1,3% y 0,1%, respectivamente. Cabe señalar que en campañas anteriores, ambas variedades se destacaron por ser las más afectadas por esta enfermedad. En evaluaciones realizadas en los lotes inicialmente afectados y en otras áreas con antecedentes de la enfermedad, no se observaron síntomas durante los meses siguientes. Las condiciones climáticas de la campaña, con lluvias abundantes en primavera y un mes de enero con precipitaciones irregulares (Forciniti, 2025), probablemente interrumpieron el ciclo del patógeno al no mantenerse una humedad foliar sostenida. Estos resultados destacan el rol del clima en la aparición de la estría roja y la importancia de un monitoreo preventivo, especialmente en variedades susceptibles.

El monitoreo detectó la presencia de mancha en ojo y Pokkah boeng

En cuanto a MO, los niveles más altos de severidad se registraron entre febrero y marzo. La variedad TUC 06-7 fue la más afectada, con valores de severidad que oscilaron entre 5 y 8. Respecto a PB, en diciembre se detectó un valor de incidencia del 24,0% en un lote puntual ubicado en la localidad de Donato Álvarez, departamento de Juan Bautista Alberdi, en la variedad TUC 06-7, en edad de planta. Las variedades LCP 85-384 y TUC 03-12 solo mostraron trazas de ambas enfermedades, mientras que el resto de las variedades TUC presentaron un buen comportamiento sanitario frente a ellas.

Diagnóstico de RSD en muestras de lotes comerciales

En el 76,1% de las muestras evaluadas no se detectó la bacteria causal del RSD. Por otro lado, el 85,5% de las muestras resultó apta para ser utilizada como “caña semilla” en las nuevas plantaciones (incidencia ≤ 5%) (Tabla 1), resaltando la eficiencia del esquema de producción y multiplicación de semilla de alta calidad.

Tabla 1. Incidencia del raquitismo de la caña soca (RSD) en muestras de lotes comerciales procesa das en el laboratorio de la Sección Fitopatología-EEAOC durante el período marzo-junio 2025.

Rangos de incidencia de RSD (%)	N° muestras	Porcentaje de muestras (%)
0	477	76,1
> 0 ≤ 5	59	9,4
> 5 ≤ 10	30	4,8
> 10	61	9,7
Total	627	-

Conclusiones

La disminución de la prevalencia del carbón durante la campaña 2024/2025 no debe interpretarse como una reducción de su riesgo epidemiológico. Esto se debe a que el patógeno sigue presente y con potencial de desarrollo, especialmente en la variedad LCP 85-384, bajo condiciones ambientales favorables. En contraste, los cultivares TUC continúan ofreciendo una respuesta sanitaria favorable, reafirmando su valor como una herramienta clave en el manejo integrado de la enfermedad.

En las dos últimas campañas la roya marrón se manifestó de forma anticipada, lo que subraya la necesidad de adelantar las evaluaciones fitosanitarias. En 2024/2025, LCP 85-384 mantuvo su alta susceptibilidad, registrando los valores más elevados de severidad y prevalencia. Le siguieron en importancia las variedades TUC 06-7 y TUC 95-10.

La estría roja presentó baja prevalencia en Tucumán. Se detectaron síntomas en dos lotes ubicados en distintas localidades, correspondientes a las variedades TUC 06-7 y TUC 00-19, lo que evidencia una predisposición de estos cultivares a expresar sintomatología. No se observó reaparición de la enfermedad en visitas posteriores ni en otras zonas con antecedentes. La falta de humedad foliar sostenida, consecuencia de la variabilidad climática durante la campaña, podría haber interrumpido el ciclo del patógeno.

En cuanto al estado sanitario de los lotes semilleros, más del 85% de las muestras analizadas en el laboratorio de la Sección Fitopatología resultaron aptas para su empleo como “caña semilla” por presentar incidencia de RSD inferior al 5%.

Citas bibligráficas

Amorim, L.; Bergamin Filho, A.; Sanguino, A.; Cardoso, C.O.N.; Moraes, V.A. y C. Fernandes R. (1987). Metodologia de avaliação da ferrugem da cana-de-açúcar (Puccinia melanocephala). Boletim Técnico Copersucar, 39, 13-16.

Bertani, R.P., Gutierrez, H., Funes, C., Joya, C.M., Chaves, S., Lobo, J.A., Monachesi, M.A., González, V., & Cuenya, M.I. (2023). Evaluación de la incidencia del carbón de la caña de azúcar en variedades comerciales cultivadas en Tucumán durante el año 2020. Revista Industrial Y Agrícola De Tucumán, 99 (2), pp. 49–54

Bertani, R.P., Funes, C., Gutierrez, H., Chaves, S., Joya, C.M., & González, V. (2021). Ficha técnica: Carbón de la caña de azúcar. Revista Avance Agroindustrial, 42 (2), pp. 22-23.

Forciniti, J. (2025). Informe sobre las precipitaciones en Tucumán: octubre 2024 – enero 2025. En J. Forciniti, M.L. Soulé Gómez, Á. M. Leal & J.M. Medina (Eds.), Lluvia atípicas y su efecto en los cultivos. Revista Avance, 45(4), Sección Panorama. Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC).

Joya, C.M.; Bertani, R.P.; Henriquez, D.D.; Funes, C. & González, V. (2015). Ficha técnica: raquitismo de la caña soca. Revista Avance Agroindustrial, 36 (1), pp 22.

Joya, C.M.; Bertani, R.P.; Fajre, S.; González, V.; Giardina, J.A. and Noguera, A.S. (2024). EEAOC Vitroplants Project: the importance of phytosanitary diagnosis and its impact on the health status of commercial sugarcane fields in Tucumán, Argentina. Abstract Book XIII Pathology and XI Entomology Workshop 2024 (p. 15). International Society of Sugar Cane Technologists (ISSCT).

EVALUACIÓN DEL DAÑO DE Diatraea saccharalis (LEPIDOPTERA: CRAMBIDAE) EN VARIEDADES TUC DE RECIENTE LIBERACIÓN EN LA PROVINCIA DE TUCUMÁN

Mocoroa M.O[1].; Mamaní S[1].; Hernández D[1].; García Degano F[1].; Rodriguez D[1].; Peña Malavera A[2].; Ostengo S.[3] y Gastaminza G[1].

[1] Sección Zoología Agrícola. Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres.
[2] Sección Biotecnología. ITANOA (EEAOC-CONICET)
[3] Sección Mejoramiento Genético. EEAOC
Av. William Cross 3150, C.C. Nº 9 (T4101XAC), Las Talitas, Tucumán, Argentina.
omocoroa@eeaoc.org.ar

Palabras clave: barrenador del tallo, perforación, galería, comportamiento varietal, área agroecológica

INTRODUCCIÓN

El área cañera en la provincia de Tucumán se distribuye en tres regiones agroecológicas definidas: Pedemonte, Llanura Deprimida y Llanura Chacopampeana. Cada una de ellas presenta características climáticas, edáficas y de relieve particulares, siendo el recurso hídrico un factor importante en la producción de caña de azúcar. El mismo disminuye desde el oeste (Pedemonte) al este (Sanzano *et al.,* 2015).

Otro factor limitante que puede disminuir la producción de azúcar es la plaga principal del cultivo*, Diatraea saccharalis*, la cual ataca durante todo el ciclo de la caña de azúcar. El daño es ocasionado por la larva que incluye destrucción de yemas, ataque en plantas jóvenes resultando en el llamado “corazón muerto”, perforación en tallos permitiendo el ingreso y propagación de microorganismos que disminuyen el contenido de sacarosa y formación de galerías al alimentarse incidiendo en el rendimiento cultural y fabril (Vargas *et al.,* 2015). Para cuantificar el daño, usualmente se utiliza el porcentaje de entrenudos perforados (% de intensidad de infestación, I.I. %) (White *et al.,* 2008). En los cañaverales de Tucumán se determinó que la pérdida de azúcar ocasionada por este insecto es de 620 a 650 gr de azúcar/tonelada (T) de caña molida por cada punto porcentual de I.I. (Salvatore *et al.,* 2010). Sin embargo, la presión de infestación de esta especie está altamente influenciada por factores abióticos principalmente la temperatura y la humedad (Carbognin *et al.,* 2023).

El uso de cultivares tolerantes es clave para optimizar los programas de manejo integrado de plagas. El conocimiento sobre el comportamiento de nuevas variedades es crucial para el sistema de producción provincial cuando se introducen estas variedades. Considerando que el programa caña de azúcar con el subprograma mejoramiento genético de la EEAOC desarrolla y promueve nuevas variedades comerciales, resulta fundamental evaluar el comportamiento de ellas frente al ataque de *D. saccharalis* en condiciones de campo.

El objetivo fue evaluar el daño causado por *Diatraea saccharalis* en variedades TUC de reciente liberación en la provincia de Tucumán.

MATERIALES Y MÉTODOS:

I. Variedades comerciales: se seleccionaron las siguientes variedades, dos de ellas desarrolladas en la EEAOC, TUC 02-22 y TUC 06-7 (liberadas en el año 2019) y la LCP 85-384 se consideró como testigo por ser la variedad más plantada en la provincia (Henriquez *et al.,* 2023).

II. Lotes comerciales: para cada área agroecológica se seleccionó un lote comercial como sitio representativo. Cada lote presentaba las tres variedades de la misma edad y fue manejado bajo similares condiciones agronómicas.

- Pedemonte: Rio Chico (Los Sarmientos). Edad: soca 2
- Llanura Deprimida: Leales (Los Quemados). Edad: caña planta
- Llanura Chacopampeana: Cruz Alta (Cañete). Edad: soca 3

III. Diseño del ensayo: Para la evaluación de las variables, en cada punto de muestreo se tomaron 10 muestras por cada variedad; cada muestra estuvo compuesta por 10 tallos cada una, obteniendo así un total de 100 tallos evaluados por cada variedad.

Las muestras fueron colectadas al azar, entre 40 y 60 m hacia el interior del cañaveral dejando una separación mínima de 20 surcos entre puntos de muestreo, con el fin de asegurar una adecuada representatividad del lote. Una vez colectadas las muestras, éstas fueron despojadas del material vegetal excedente (hojas verdes, secas y despunte en su quiebre natural) y etiquetadas para su evaluación.

IV. Parámetros evaluados:

Para evaluar el daño ocasionado por *D. saccharalis* se calcularon estos parámetros a través de las siguientes fórmulas:

a) Porcentaje de Intensidad de infestación (I.I.%)

$$I.I.\% = \frac{entrenudos\ dañados}{entrenudos\ totales} * 100$$

b) Porcentaje de Intensidad de infestación en yemas (I.I.Y.%)

$$I.I.Y.\% = \frac{entrenudos\ con\ yemas\ dañadas}{entrenudos\ con\ yemas\ totales} * 100$$

c) Longitud de la galería: expresada en cm.

V. Análisis estadístico

Los datos obtenidos fueron analizados con el programa estadístico Navure versión 3.2.0 (Navure Team, 2023). Para el análisis de las variables se ajustó un modelo lineal generalizado bajo distribución binomial con efecto fijo de región- variedad. La comparación de medias se realizó mediante la prueba de LSD Fisher con un nivel de significancia de $p<0,05$.

Resultados

1. Porcentaje de intensidad de infestación

Los resultados indicaron que el departamento de Rio Chico correspondiente al área agroecológica de Pedemonte presentó un mayor I.I.% superando un valor de 18% en la variedad TUC 02-22. A su vez, el I.I.% de esta variedad fue significativamente mayor a la TUC 06-7 (11%) aunque sin diferenciación significativa con el testigo (16%). En el caso de Cruz Alta perteneciente a la llanura Chacopampeana, el valor de I.I.% de TUC 02-22 (8%) fue significativamente mayor al de las variedades TUC 06-7 (3,4%) y LCP 85-384 (2,5%). En contraste, el departamento Leales (Llanura Deprimida) presentó los valores más bajos de I.I.%, en la cual la variedad TUC 02-22 (4%) fue significativamente mayor a TUC 06-7 (1,9%) sin diferenciación significativa con el testigo (3,7%) (Figura 1). Al comparar la misma variedad entre los sitios representativos de las regiones, se observó que las variedades TUC se comportaron significativamente diferentes en los tres sitios, mientras que LCP 85-384 sólo se diferenció estadísticamente en Rio Chico perteneciente al Pedemonte.

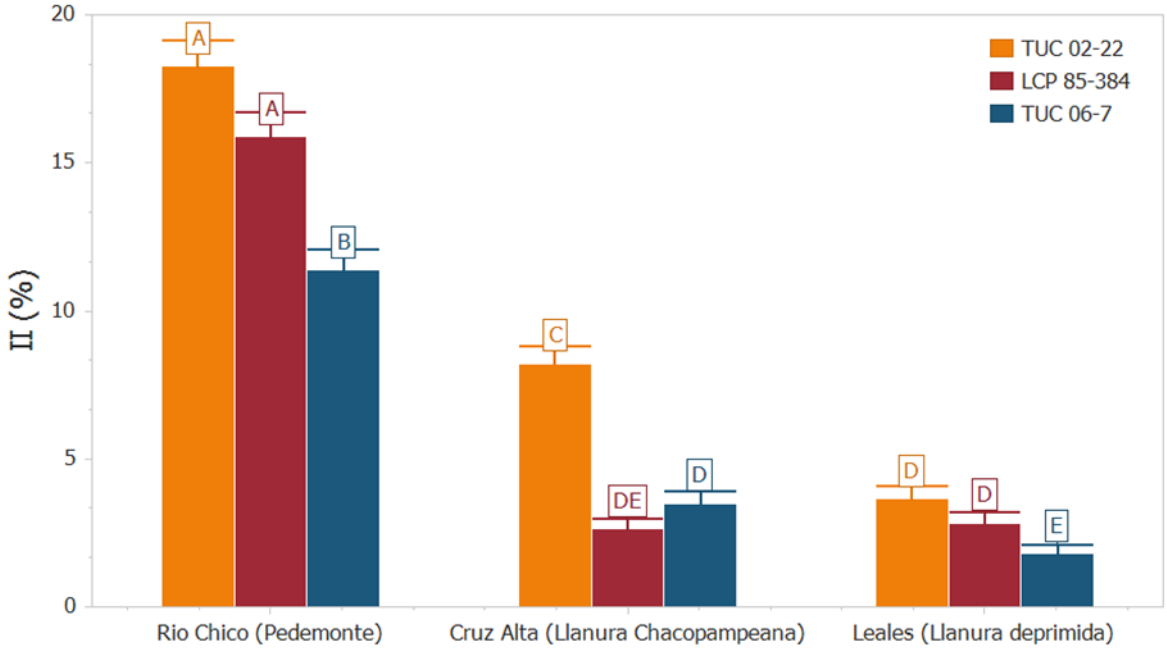


Figura 1: Porcentajes de intensidad de infestación por *Diatraea saccharalis* en las diferentes variedades comerciales por área agroecológica. *Letras distintas indican diferencias significativas entre variedades en una misma área agroecológica y entre una misma variedad en diferentes áreas agroecológicas (p<0,05).

2. Porcentaje de intensidad de infestación en yemas

Los resultados de porcentaje de infestación en yemas ocasionado por *D. saccharalis* mostraron el mismo patrón que los de I.I.%. El departamento Rio Chico en el área de Pedemonte resultó con el mayor I.I.Y.%, siendo las variedades TUC 02-22 (4,2%) y LCP 85-384 (3,2%) significativamente mayores a TUC 06-7 (0,9 %). En cambio, Cruz Alta en la llanura Chacopampeana, el mayor valor de I.I.Y.% fue observado en TUC 02-22 (2,1%) siendo significativamente diferente a las otras variedades comerciales. TUC 06-7 y LCP 85-384 no mostraron diferencias significativas entre ellas. Con respecto a Leales (llanura Deprimida) el I.I.Y.%. de la variedad TUC 02-22 (0,7%) fue significativamente mayor a la TUC 06-7 (0,1%) quien mostró el valor más bajo de I.I.Y.% aunque sin diferenciación significativa con la LCP 85-384. Al analizar el comportamiento varietal entre las áreas agroecológicas se observó que la variedad TUC 02-22 se diferenció significativamente en las tres regiones, mientras que TUC 06-7 y LCP 85-384 sólo mostraron diferencias significativas en el área de Pedemonte.

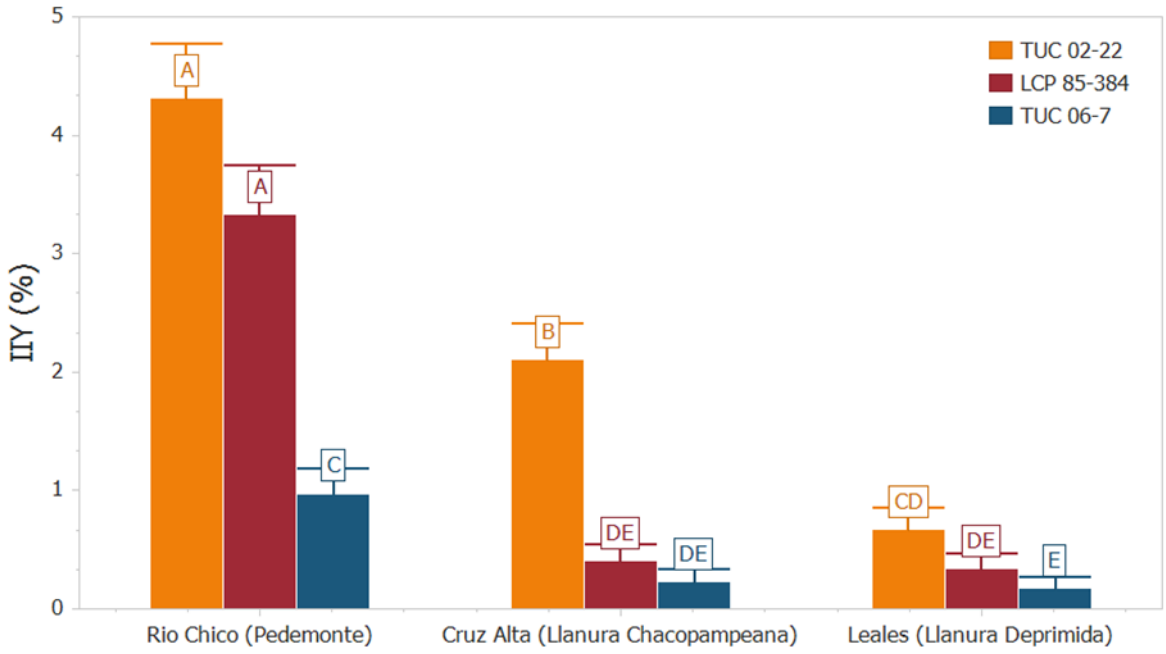


Figura 2: Porcentaje de intensidad de infestación en yemas por *Diatraea saccharalis* en las diferentes variedades comerciales por área agroecológica. *Letras distintas indican diferencias significativas entre variedades de una misma área agroecológica y entre una misma variedad en diferentes áreas agroecológicas (p<0,05).

3. Longitud de la galería realizada por *D. saccharalis*

Al igual que en los parámetros anteriores, el departamento Rio Chico, en el Pedemonte fue el área agroecológica con mayores longitudes de galerías, siendo la variedad TUC 02-22 (16,8cm) donde se registró los valores más elevados, el cuál mostró diferencias significativas a las otras variedades. TUC 06-7 (6,9 cm) presentó el valor significativamente más bajo. En Cruz Alta (llanura Chacopampeana), las variedades TUC 02-22 (7,5cm) y TUC 06-7 (6,7cm) fueron significativamente mayores al testigo (2,5cm). En Leales (llanura Deprimida), las variedades TUC 02-22 (6,1cm) y LCP 85-384 (5,9cm) fueron significativamente mayores a TUC 06-7 (2,3 cm).

La variedad TUC 02-22 fue la que presentó mayor longitud de galería en los sitios representativos analizados, siendo significativamente mayor en el lote perteneciente al Pedemonte. LCP 85-384 se comportó significativamente diferente en los tres sitios representativos y TUC 06-7 fue significativamente menor en Leales correspondiente a la llanura Deprimida comparado con los otros sitios (Figura 3).

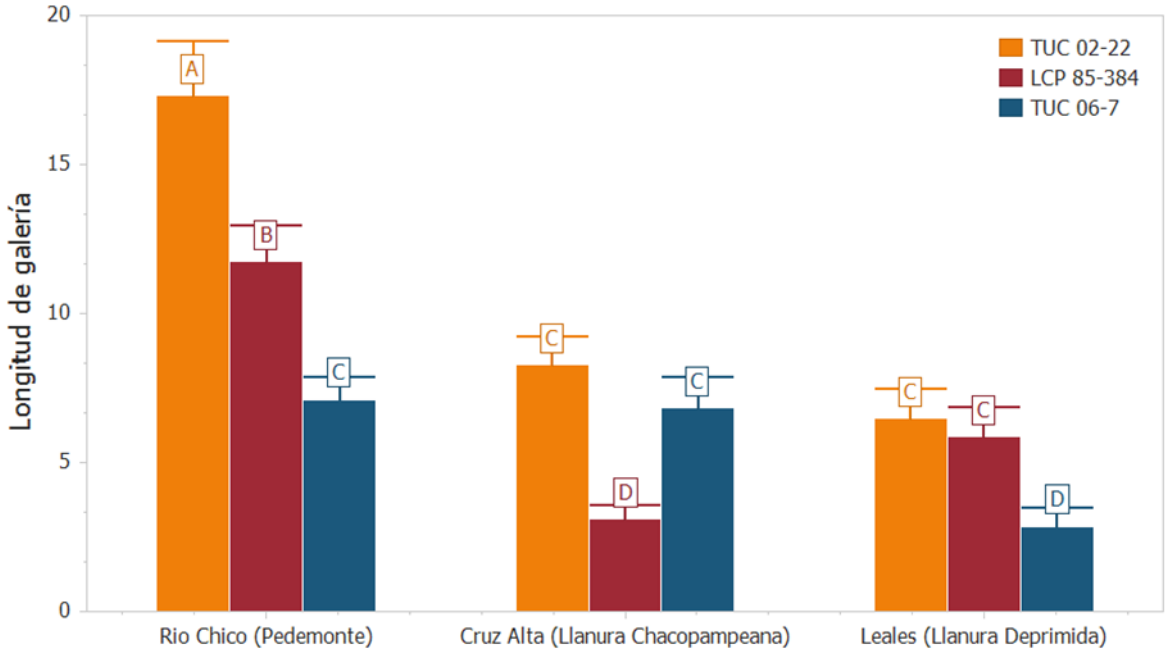


Figura 3: Promedio de longitud de galerías ocasionadas por *Diatraea saccharalis* en las diferentes variedades comerciales por área agroecológica. *Letras distintas indican diferencias significativas entre variedades de una misma área agroecológica y entre una misma variedad en diferentes áreas agroecológicas (p<0,05).

Conclusiones

Este estudio constituye el primer análisis integral del comportamiento de variedades TUC recientemente liberadas frente al ataque de *Diatraea saccharalis* en sitios representativos de las principales áreas agroecológicas de Tucumán. Los resultados evidenciaron que en el departamento Rio Chico perteneciente al Pedemonte presentó las mayores intensidades de infestación, daño en yemas y longitudes de galerías, resaltando la influencia de las condiciones ambientales, particularmente la disponibilidad hídrica, en la presión del barrenador del tallo. Dentro de este contexto, la variedad TUC 02-22 se identificó como la más susceptible en dicho sitio representativo, mientras que TUC 06-7 fue la variedad menos afectada por la plaga.

La variabilidad observada entre los sitios representativos de las regiones agroecológicas y entre variedades refuerza la importancia de considerar el ambiente como un factor determinante en la expresión de tolerancia y en la dinámica del daño de *D. saccharalis*. Estos resultados aportan información relevante para la toma de decisiones en programas de manejo integrado, así como para orientar estrategias de recomendación varietal ajustadas a las condiciones agroecológicas de la provincia.

Bibliografía

Carbognin É.; Benedito A.; Ferreira C. and Fernandes O. 2023. Unraveling the effect of temperature and humidity on the life cycle of *Diatraea saccharalis* (Lepidoptera: Crambidae) and the impact on pest outbreaks. Environmental Entomology, 52(6), 1139–1151.

Navure Team. 2023. Navure (3.2.0): A data-science-statistic oriented application for making evidence-based decisions. URL http://www.navure.

Henriquez, D. D.; Medina, P.; Aybar Guchea, M.; Figueroa, M. F.; Costilla, D. D.; Diaz, J. V.; Diaz Romero, C.; Ostengo, S. 2023. Relevamiento de la distribución varietal y del uso de otras tecnologías en el cultivo de caña de azúcar en la provincia de Tucumán. Reporte agroindustrial N° 282. https://www.eeaoc.gob.ar/?publicacion=relevamiento-de-la-distribucion-varietal-y-del-uso-de-otras-tecnologias-en-el-cultivo-de-cana-de-azucar-en-la-provincia-de-tucuman-campana-2022-2023.

Salvatore, A.R.; García M.B.; Romero E.; Willink E. 2010. Sugar losses caused by the sugarcane borer (*Diatraea saccharalis*) in Tucumán. Argentina. Proceeding International Society Sugarcane Technologist 27: 2010.
Sanzano, A.; Aranda, N.; Arroyo, E.; Sosa, F.; Romero, J.; Sotomayor, C.; Correa, R.; Hernández, C.; Morandini, M.; Rojas Quinteros, H. 2015. Capítulo A2. Características de los suelos cañeros de Tucumán. En: Guía técnica del cañero. Digonzelli, P. A., Romero, E. R.; y Scandaliaris J. (eds.). EEAOC.
Vargas G.; Gómez L. and Michaud J. Sugarcane stem borers of the Colombian Cauca River Valley: pest status, biology and control. 2015. Fla Entomol. 98:728–735.
White, W.H.; Viator R. P.; Dufrene E. O.; Dalley C. D.; Richard E. P.; Tew T. L. 2008. Reevaluation of sugarcane borer (Lepidoptera: Crambidae) bioeconomics in Louisiana. Crop Protection 27: 1256-1261).

CONTROL DE VITROPATÓGENOS EN EL ESQUEMA DE PRODUCCIÓN IN VITRO DE CAÑA DE AZÚCAR EN LA EEAOC

Díaz ME; Peña Malavera AN; Perera MF; Noguera AS

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. Las Talitas, Tucumán, R. Argentina, T4101XAC. mediazmicales@eeaoc.org.ar

Introducción

En 2001, la EEAOC creó el Proyecto Vitroplantas, cuyo propósito es el de proveer caña de azúcar de alta calidad a los productores de la región. Para ello, se vale de herramientas biotecnológicas tales como cultivo de tejidos, termoterapia y diagnóstico molecular, mediante los cuales obtiene material sano, vigoroso y con pureza genética (Pérez Ponce, 1998). Las técnicas de cultivo de tejidos vegetales permiten el establecimiento, la manipulación y el desarrollo de células, tejidos u órganos en condiciones asépticas, mientras que la micropropagación se refiere a la multiplicación a gran escala de plantas, mediante la proliferación o inducción de yemas en medios de cultivo in vitro en condiciones asépticas. El Programa de Mejoramiento de la EEAOC proporciona las variedades que son micropropagadas por el laboratorio de la Sección Biotecnología. Desde 2016, la producción en laboratorio de las vitroplantas de caña de azúcar está certificada con la norma internacional de calidad ISO 9001:2015. El material resultante está libre de las principales enfermedades de la caña de azúcar en Tucumán (Argentina): escaldadura de la hoja (Xanthomonas albilineans); raquitismo de la soca (Leifsonia xyli subsp. xyli); estría roja (Acidovorax avenae subsp. avenae); mosaico de la caña de azúcar (SCMV y SrMV); y virus del amarillamiento de la hoja (YLS). La pureza genética asegura que las plántulas tienen el mismo perfil genético que el material donante (Díaz et al., 2019). La contaminación microbiana es una de las principales limitaciones en los sistemas de micropropagación. Provoca dificultades en la iniciación del cultivo, reducción de las tasas de multiplicación, dificultad en el enraizamiento, necrosis de tejidos y mortalidad del cultivo. Los contaminantes más comunes son hongos y bacterias.

Los hongos pueden controlarse fácilmente con protocolos adecuados de limpieza y desinfección. Sin embargo, estos protocolos son ine□cientes para la eliminación de bacterias, ya que, al ser endógenas, pueden permanecer latentes y aparecer después de varios subcultivos. Cuando las contaminaciones bacterianas causan daños signi□cativos o la muerte del material vegetal, se denominan vitropatógenos (Herman, 1987). En el ambiente natural, no son necesariamente patógenas ni perjudiciales para las plantas; incluso pueden ser beneficiosas para las plantas hospedantes, al favorecer su crecimiento o fortalecer sus defensas contra enfermedades. Para el control de la contaminación bacteriana in vitro pueden usarse antibióticos. En 2024, el 36% de la producción se perdió debido a diferentes motivos, donde la presencia de vitropatógenos fue responsable del mayor porcentaje (Figura 1). Este grave problema se produjo por la falta de disponibilidad comercial de cefotaxima, que fue reemplazado por gentamicina.

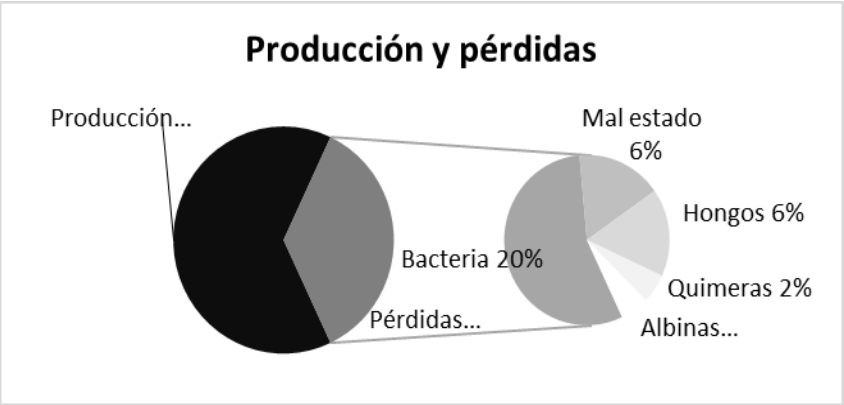


Figura1. Pérdidas de producción de vitroplantas en 2024

Objetivos

(i) evaluar la eficacia de dos antibióticos para controlar el crecimiento bacteriano
(ii) identificar los géneros presentes en el cultivo in vitro de caña de azúcar
(iii) diseñar una estrategia adecuada para el control de los vitropatógenos en el sistema de micropropagación de la caña de azúcar.

Materiales y métodos

Material vegetal y condiciones de crecimiento Se utilizaron vitroplantas de dos variedades, TUC 95-10 (subcultivo 5) y TUC 03-12 (subcultivo 6), que fueron crecidas en medio Murashige and Skoog, al que se adicionó 3% sacarosa, 6-benzylaminopurina (BAP) y ácido naftaleacético (ANA).

Los tres tratamientos evaluados fueron: cefotaxima (170 mg/L); gentamicina (30 mg/L), y control (sin antibiótico), con 15 repeticiones por tratamiento (TUC 95-10 en tres bloques y TUC 03-12 en dos bloques). El material fue incubado durante cuatro semanas a 24-28°C con un fotoperíodo de 16 h luz. Se registraron las tasas de multiplicación y alteraciones fenotípicas. Antes del ensayo, todas las plantas fueron cultivadas desde sus etapas iniciales con gentamicina, debido a la falta de disponibilidad de cefotaxima. Aislamiento, crecimiento bacteriano e identificación Se realizó una dilución 1:1000 del medio de cultivo de cada tratamiento, se sembraron 100 µL en placas Petri y se incubaron a 37°C durante dos días. Posteriormente, se contaron las unidades formadoras de colonias. La región 16S ADNr de las colonias se amplificó mediante PCR y los fragmentos amplificados se purificaron y secuenciaron (Figura 2).

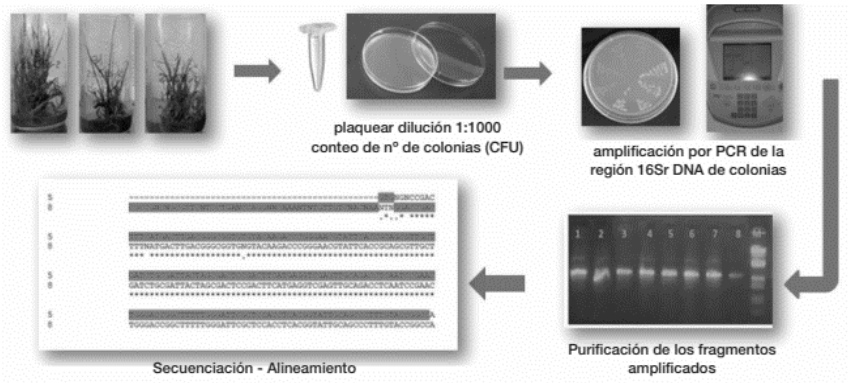


Figura 2. Esquema de aislamiento e identificacion de contamintes bacterianos

Resultados

La tasa de multiplicación fue mayor con cefotaxima, mientras que el tratamiento con gentamicina disminuyó significativamente esa tasa comparada incluso con respecto al control, es decir sin antibiótico (Figura 3).

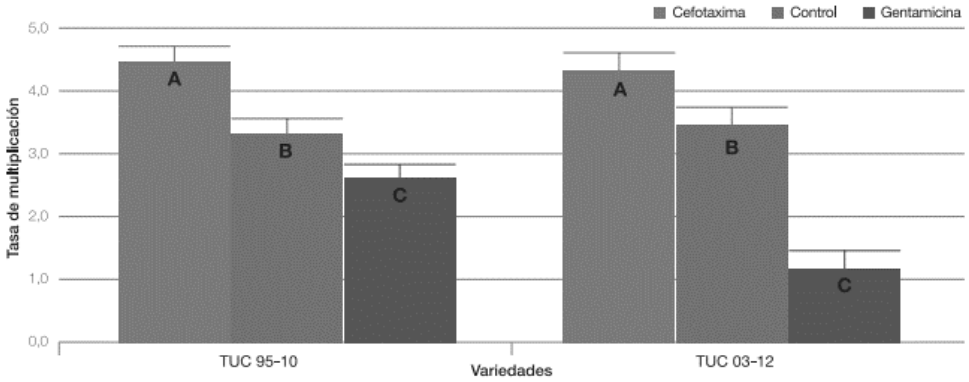


Figura 3. Tasa de multiplicación de las dos variedades en los tres tratamientos ensayados

Las alteraciones fenotípicas fueron similares para ambas variedades 14,8% para TUC 95-10 y 11% para TUC 03-12. TUC 95-10 desarrolló más quimeras cuando fue tratada con cefotaxima, y la aparición de plantas albinas se observó tanto en el tratamiento con gentamicina, como en el tratamiento control. En TUC 03-12, el tratamiento con gentamicina mostró mayores niveles de quimeras y plantas albinas que en los tratamientos con cefotaxima y control (Figura 4). Sin embargo, el valor p≤0,5 indica que tales alteraciones morfológicas fueron independientes de los tratamientos. En ambas variedades, el uso de cefotaxima disminuyó la contaminación bacteriana (Figura 5). TUC 03-12 tuvo mayor crecimiento de bacterias en todos los trata mientos, lo que podría explicar su menor tasa de multiplicación bajo la aplicación de gentamicina. Cuando los fragmentos de la región 16S DNAr fueron amplificados, purificados y secuenciados, se identificaron bacterias pertenecientes a los géneros *Bacillus* y *Microbacterium*. Ambos géneros están ampliamente distribuídos y reconocidos como endofíticos, además *Microbacterium* spp. es reconocida como fijadora de N2 en plantas micropropagadas de caña de azúcar.

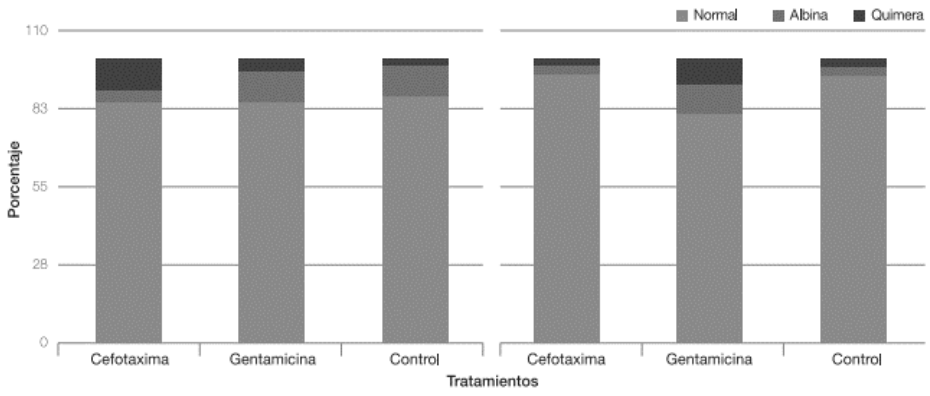


Figura 4. Alteraciones fenotípicas. Izquierda: TUC 95-10 (P-valor=0,31); Derecha TUC 03-12 (p-valor: 0,46)

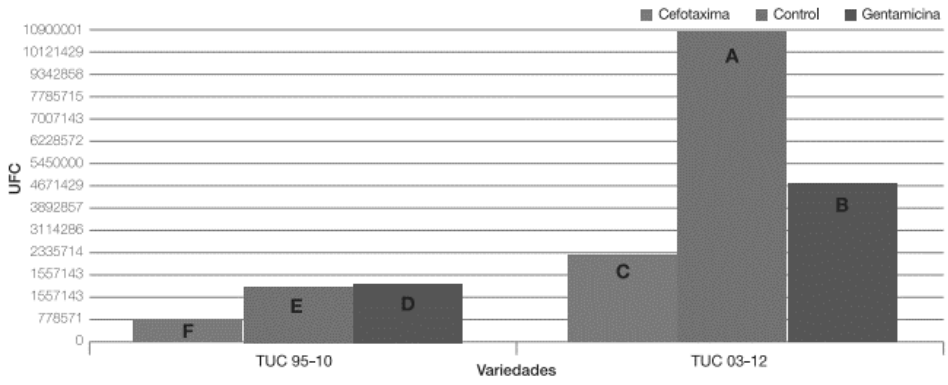


Figura 5. Unidades formadoras de colonias en TUC 95-10 y TUC 03-12 para los diferentes tratamientos

Conclusiones

El uso de cefotaxima fue más efectivo en el control de contaminación bacteriana en las dos variedades de caña de azúcar cultivadas in vitro, sin afectar la tasa de multiplicación. El uso rutinario de gentamicina no solo falló en el control de la contaminación bacteriana, sino que incrementó la aparición de alteraciones morfológicas.

Bibliografia citada

Díaz, M. E.; N. V. Paz; M. P. Insaurralde Rocco; M. F. Perera; A. P. Castagnaro and A. S. Noguera. 2019. The sugarcane Vitroplantas project of the Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC, Tucumán, Argentina): production of healthy plantlets in the laboratory. Proceedings of the International Society of Sugar Cane Technologists 30: 621-625.

Herman, E. B. 1987. Towards control of micropropagation contamination. Agricell Report 9: 33-3

Pérez Ponce, J. N. 1998. Propagación y mejora genética de plantas por biotecnología. Instituto de biotecnología de las plantas: Santa Clara.

EFECTO COMBINADO DEL RESIDUO AGRÍCOLA DE COSECHA Y VICIA VILLOSA SOBRE GRUPOS FUNCIONALES DE MALEZAS EN CAÑA DE AZÚCAR

Cabrera, D.C[1]; Laguna, F. [1]; Soria, M.S. [1]; De Faveri, B. [1]; Rodríguez, S.I. [1]; Cuello, D.C.[1]; Dip, A. [2]; Digonzelli, P.A.[1]

[1] Facultad de Agronomía, Zootecnia y Veterinaria, UNT
[2]Instituto de Ecología Regional - (UNT - Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas)
carinacabrera@outlook.com.ar

Palabras clave: Monocotiledóneas; Dicotiledóneas; Malezas anuales; Vicia; Malezas perennes.

Introducción

Tucumán es la principal provincia productora de caña de azúcar, azúcar y bioetanol de la Argentina, con una superficie cultivada cercana a las 298.930 ha (IPAAT, 2025). En este sistema productivo, el manejo de malezas representa uno de los principales desafíos agronómicos y demanda una proporción significativa de insumos y tecnologías, principalmente durante las etapas iniciales del cultivo, previas al cierre del cañaveral (Sujaritha *et al.,* 2017).

En este contexto, el manejo racional de las malezas no puede abordarse únicamente desde una perspectiva de control, sino que requiere comprender su biología, su dinámica de

emergencia y sus adaptaciones ecológicas. El análisis de la comunidad de malezas resulta, por lo tanto, fundamental para diseñar estrategias a largo plazo y evitar la consolidación de problemáticas crónicas en los agroecosistemas agrícolas (Cabrera & de la Vega, 2018). La fitosociología, como herramienta de análisis estructural y florístico de las comunidades vegetales, permite caracterizar el conjunto de especies a partir de atributos cualitativos y cuantitativos, aportando una visión integral del sistema (Concenco *et al.,* 2013). Bajo este enfoque, adquiere especial relevancia el estudio del efecto de las prácticas agrícolas sobre los grupos funcionales de malezas, definidos como conjuntos de especies que comparten características estructurales o funcionales, tales como el ciclo de vida, el metabolismo fotosintético o el morfotipo (de la Fuente *et al.,* 2019).

Desde esta perspectiva ecológica, el sistema cañero de Tucumán ha incorporado en las últimas décadas prácticas orientadas a mejorar la sustentabilidad del sistema productivo. En este marco, la prohibición de la quema de la caña, vigente desde 2004, ha promovido la permanencia del residuo agrícola de cosecha (RAC) como cobertura sobre el suelo, práctica que ha demostrado aportar múltiples beneficios agronómicos y ambientales, entre ellos la reducción de la emergencia y competencia de ciertas malezas (Digonzelli *et al.,* 2011a, b). Sobre esta base, el mantenimiento del RAC y la incorporación de cultivos de servicio invernales, como *Vicia villosa*, implantados en el período comprendido entre la cosecha de una soca y el cierre del cultivo siguiente (Martínez Calsina *et al.*, 2024), emergen como herramientas complementarias dentro de un enfoque de manejo integrado. No obstante, si bien existe abundante información sobre los beneficios individuales de estas prácticas, aún es limitado el conocimiento acerca de su efecto combinado sobre la estructura y composición funcional de las comunidades de malezas en el cultivo de caña de azúcar, particularmente en relación con su capacidad para modificar la dominancia de distintos grupos funcionales.

En este marco, el objetivo del presente trabajo fue caracterizar, cuantificar y comparar, desde un enfoque fitosociológico, el comportamiento de distintos grupos funcionales de malezas en el cultivo de caña de azúcar bajo sistemas de manejo con y sin residuo agrícola de cosecha (RAC), así como en un manejo que combina la presencia de RAC con la implantación de *V. villosa* como cultivo de servicio.

Materiales y Métodos

El ensayo se llevó a cabo en la localidad de Bella Vista, departamento Leales. Durante la campaña 2023 /2024, en el cultivar LCP 85-384, en edad de soca 1. El diseño experimental fue en bloques completos al azar con cuatro repeticiones. El tamaño de las unidades experimentales fue de 20 surcos de 45 m de largo. Los tratamientos fueron los siguientes:

a) Sin cobertura de residuo agrícola de cosecha (RAC) (suelo desnudo).
b) Sin RAC, con siembra de *V. Villosa* en el espacio entre surcos (SRCV).
c) con RAC + Siembra de *V. villosa* (CRCV);
d) Solamente RAC (CRSV).

Las evaluaciones se realizaron quincenalmente desde emergencia hasta cierre del cañaveral. Las mismas implicaron recorrer cada parcela en forma de W, lanzando 30 veces un aro de 1 m2, en cada una de ellas. El material vegetal que se encontraba dentro del aro, fue cortado al ras del suelo, embolsado, etiquetado y llevado al laboratorio, donde se identificó y cuantificó por especie. Las muestras se secaron en estufa a 70 °C hasta alcanzar peso constante, a fin de determinar la biomasa seca. Para los grupos funcionales: Monocotilédoneas y Dicotilédoneas; Anuales y Perennes; de emergencia Primavero estival y Otoño-invernal, se cuantificaron el número de individuos (N) y la biomasa seca (g) y se calcularon los parámetros fitosociológicos: frecuencia (F) que evalúa la distribución de las especies en el campo, y densidad (D) que es la cantidad de plantas de cada especie por unidad de área. Para cada especie, las variables se analizaron en función del tratamiento mediante modelos lineales generalizados con enlace log. Para la variable de N° individuos se empleó la distribución Binomial Negativa, mientras que para biomasa y frecuencia se utilizó la distribución Tweedie con función de enlace logarítmica. Las comparaciones de medias se

realizaron mediante el test de Tukey ($p<0.05$). El software estadístico utilizado fue R Core Team (2024).

Resultados

Monocotiledóneas y Dicotiledóneas

Para la variable N° de individuos, tanto para las monocotiledóneas como para las dicotiledóneas, se registraron los mayores valores en los tratamientos sin cobertura de residuo agrícola de cosecha (SRSV y SRCV), los cuales no difirieron entre sí. En contraste, las alternativas con cobertura de RAC (CRSV y CRCV) presentaron una reducción significativa en la emergencia de ambos grupos funcionales, evidenciando el rol dominante de la cobertura superficial del suelo en la regulación de la emergencia, independientemente de la inclusión del cultivo de servicio (Figura 1a).

En relación con la biomasa que involucra crecimiento y desarrollo, ambos grupos funcionales presentaron valores elevados y estadísticamente similares en los tratamientos SRSV, SRCV y CRSV. En contraste, la alternativa que combinó RAC con *V. villosa* (CRCV) mostró la mayor supresión de biomasa para monocotiledóneas y dicotiledóneas, diferenciándose del suelo desnudo. Este patrón sugiere que, si bien la cobertura con RAC reduce la emergencia, la incorporación del cultivo de servicio resulta necesaria para limitar el crecimiento y desarrollo posterior de las malezas establecidas (Figura 1b).

El parámetro frecuencia no mostró diferencias significativas entre tratamientos para ninguno de los dos grupos funcionales, lo que indica que las prácticas de manejo evaluadas no modificaron sustancialmente la distribución espacial de las malezas dentro del lote (Figura 2a). En cambio, para la densidad, las dicotiledóneas evidenciaron una disminución significativa bajo la alternativa CRCV respecto de SRSV, mientras que las monocotiledóneas no presentaron diferencias estadísticas entre tratamientos (Figura 2b), lo que sugiere una mayor sensibilidad de las dicotiledóneas a las modificaciones del ambiente edáfico y lumínico generadas por la cobertura y el cultivo de servicio.

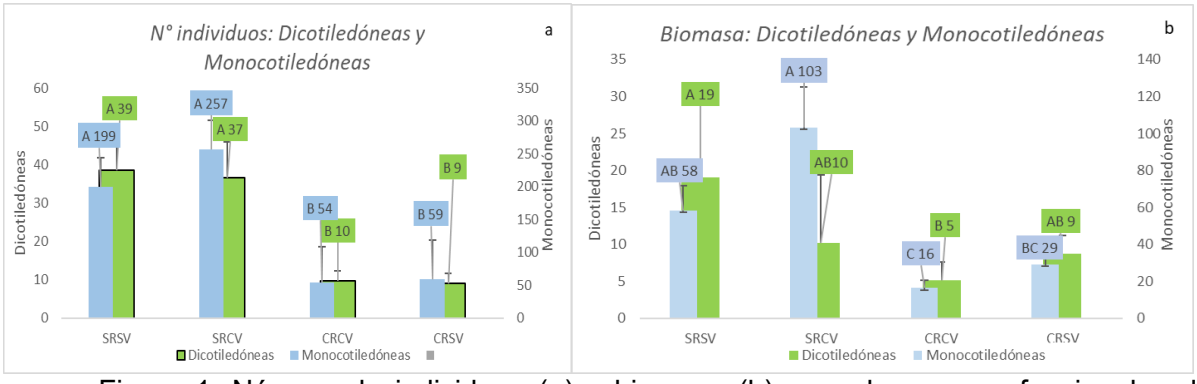


Figura 1: Número de individuos (a) y biomasa (b), para los grupos funcionales de monocotiledóneas y dicotiledóneas, para diferentes alternativas de manejo- Letras diferentes, indican diferencias significativas según test Tukey (p= 0,05

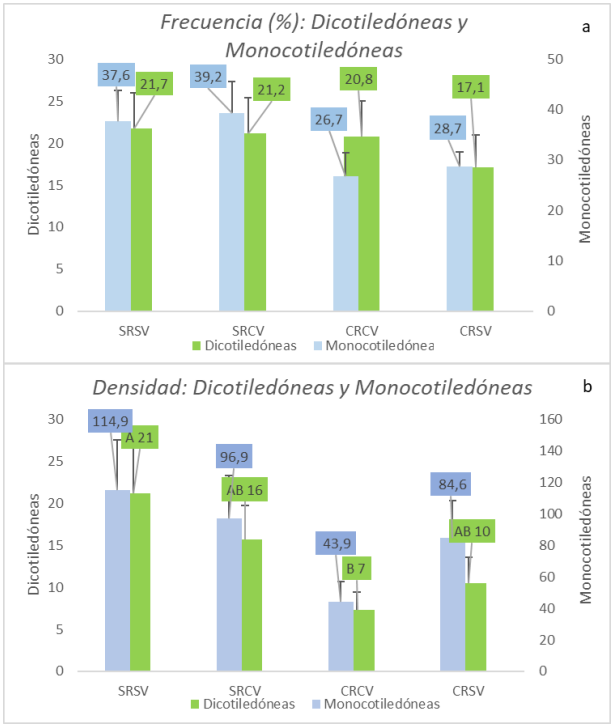


Figura 2: Frecuencia en porcentaje (a) y Densidad (b), para los grupos funcionales de monocotiledóneas y dicotiledóneas, para diferentes alternativas de manejo- Letras diferentes, indican diferencias significativas según test Tukey (p= 0,05)

Anuales y Perennes de emergencia primavera estival y otoño-invernal

En el análisis del número de individuos, las malezas anuales de emergencia otoño-invernal (AN-OT-INV) mostraron una marcada reducción bajo las alternativas con cobertura de RAC (CRSV y CRCV), diferenciándose significativamente de los tratamientos sin cobertura. En las anuales de emergencia primavero-estival (AN-PRIM-EST), la supresión fue menos pronunciada y solo se detectaron diferencias significativas para la alternativa CRSV, sin diferenciarse de CRCV. Las malezas perennes de emergencia primavero-estival presentaron un comportamiento similar al observado en las AN-OT-INV, evidenciando una alta sensibilidad a la presencia de cobertura superficial (Figura 3a). Este patrón puede vincularse a la coexistencia, dentro del grupo de perennes evaluadas, de especies con reproducción sexual y asexual, siendo estas últimas capaces de iniciar su emergencia en períodos tempranos del ciclo, coincidentes con las especies otoño-invernales. Asimismo, la elevada capacidad de propagación y crecimiento característica de las perennes de origen asexual se refleja en su desempeño posterior, particularmente en términos de biomasa

Para la biomasa aérea, las AN-OT-INV registraron una reducción significativa únicamente bajo la alternativa CRCV en comparación con SRSV y SRCV, mientras que CRSV presentó valores intermedios y estadísticamente similares a CRCV. Las AN-PRIM-EST no presentaron diferencias significativas para ningún tratamiento. En el caso de las perennes primavero-estivales, se observó nuevamente un patrón coincidente con el de las AN-OT-INV, con una disminución significativa de la biomasa bajo la alternativa CRCV en comparación con SRSV y SRCV. Este comportamiento refuerza la utilidad de la biomasa como un parámetro más sensible que el número de individuos para detectar respuestas de este grupo funcional frente a las prácticas de manejo evaluadas (Figura 3b).

El parámetro frecuencia no presentó diferencias significativas entre tratamientos para ninguno de los grupos funcionales analizados. No obstante, se observó una tendencia consistente en el orden de supresión, siendo SRSV y SRCV las alternativas de mayor frecuencia y CRSV y CRCV las de menor frecuencia relativa (Figura 4a).

Para la densidad, las AN-OT-INV mostraron una reducción significativa bajo la alternativa CRCV respecto de SRSV, mientras que en las AN-PRIM-EST tanto CRCV como CRSV difirieron del suelo desnudo. Las malezas perennes no registraron diferencias significativas entre tratamientos, lo que sugiere una mayor estabilidad estructural del grupo; no obstante, mantuvieron el mismo patrón general de respuesta observado para biomasa.

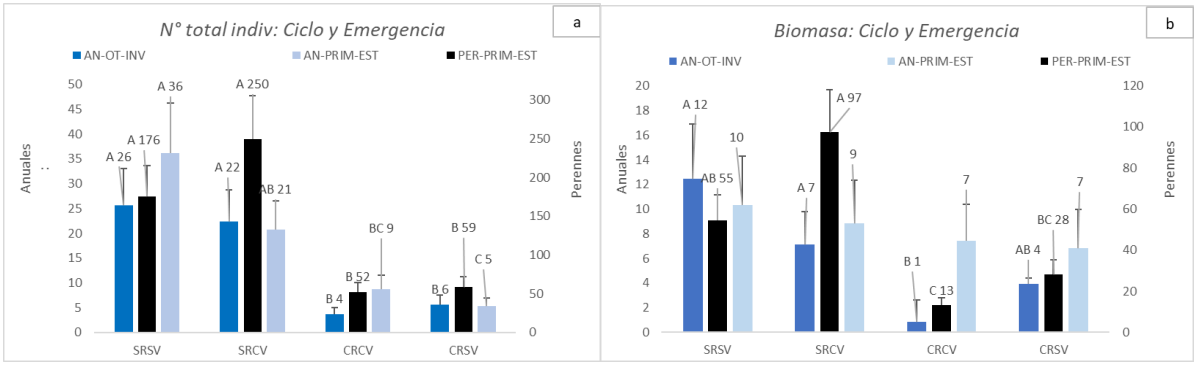


Figura 3: Número de individuos (a) y biomasa (b), para las anuales-otoño-invernales, anuales-primavero-estivales y perennes-primavero-estivales, para diferentes alternativas de manejo- Letras diferentes, indican diferencias significativas según test Tukey (p= 0,05)

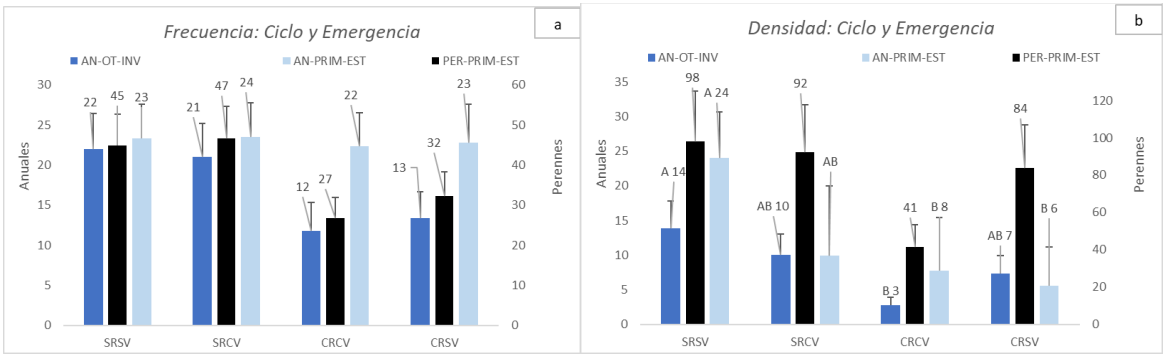


Figura 4: Frecuencia en porcentaje (a) y Densidad (b), para las anuales-otoño-invernales, anuales-primavero-estivales y perennes-primavero-estivales, para diferentes alternativas de manejo- Letras diferentes, indican diferencias significativas según test Tukey (p= 0,05)

Conclusiones

Los resultados muestran que las prácticas de manejo basadas en la cobertura del suelo (CRCV y CRSV) modifican la estructura funcional de la comunidad de malezas en caña de azúcar, con respuestas diferenciadas según grupo funcional y variable analizada. Si bien el residuo agrícola de cosecha (RAC) reduce la emergencia, su efecto es limitado sobre el crecimiento posterior de las malezas establecidas.

La combinación de RAC con Vicia villosa (CRCV) se destacó como la alternativa más efectiva para la supresión del crecimiento, evidenciada principalmente a través de la reducción de biomasa. La inclusión del cultivo de servicio aportó un efecto aditivo que reforzó la limitación del crecimiento y la capacidad competitiva de las malezas luego de la emergencia.

El análisis funcional indicó una mayor sensibilidad de las dicotiledóneas, con reducciones más consistentes en densidad y biomasa bajo CRCV. Las monocotiledóneas, especialmente las perennes, mostraron mayor estabilidad estructural y persistencia, aunque también redujeron su biomasa bajo esta alternativa, consolidándose como el grupo funcional dominante del sistema.

En conjunto, los resultados confirman que la incorporación de Vicia villosa genera un plus agronómico claro en sistemas con cobertura, aunque el manejo cultural, aun con este efecto aditivo, no resulta suficiente para regular malezas perennes a largo plazo. En este sentido, se vuelve necesario avanzar hacia estrategias químicas que actúen de manera sinérgica con este sistema, potenciando su eficacia y mejorando el control de los grupos funcionales que definen la dinámica del cultivo.

Agradecimientos

A José Minetti y Cía, y a los Ing. Sebastián Ascárate y Carlos Abregú por el apoyo operativo y la colaboración en las tareas de campo.

Al sr., No docente de la Cátedra de Caña azúcar, Anibal Chaila, por su colaboración continua en el procesamiento de material en laboratorio.

Financiamiento

Trabajo financiado por el proyecto PIUNT A712.

Bibliografía

Cabrera, DC; de la Vega, M.H. 2018. Sistemas cultivo-Maleza en el Noroeste Argentino. En de la Vega, M. H.; Cabrera, D. C.; Courel, G. Biología, dinámica y manejo químico de malezas en cultivos de granos: zona NOA-1ª ed ilustrada. 119 p. Libro digital, PDF

Concenco G. et al. Levantamentos Fitossociológicos: Ferramentas para a Ciência das Plantas Daninhas. Planta Daninha. 2013;31,469-82.

de la Fuente, E. B., Olea, I., & Suárez, S. A. (2019). *Aproximaciones metodológicas para relevar malezas*. Malezas (ASACIM**)**, (2), 16–29.

Digonzelli, P.; Romero, E.; Alonso, L.; Fernández de Ullivarri, J.; Rojas Quinteros, H.; Scandaliaris, J. and Fajre, S. 2011a. Assesing a sustainable sugar cane production system in Tucumán, Argentina. Part one: Sugar cane harvest residue (trash) decomposition dynamics. Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán 88 (1): 1-12.

Digonzelli, P.; Tonatto, M. J.; Romero, E. R.; Sanzano, G. A.; Fernández de Ullivarri, J.; Giardina, J. A. and Scandaliaris, J. (2011b). Assessing a sustainable sugar cane production system in Tucumán, Argentina. Part II: soil water and thermal regime, stalks population dynamics and sugarcane production. Rev. Ind. y Agríc. de Tucumán 88(2): 1-10. ISSN 0370-5404.

IPAAT (Instituto de promoción de azúcar y alcohol de Tucumán). EEAOC presenta la estimación de superficie cosechable y producción de caña de azúcar 2025 en Tucumán. Disponible en: https://www.ipaat.gov.ar/nota/596/eeaoc-presenta-la-estimacion-de-superficie-cosechable-y-produccion-de-cana-de-azucar-2025-en-tucuman.

Martínez Calsina, L; Sáez, J.V; Fontana, P.D; Felipe, A; Zerrizuela, S.C; Gallac, M; Pérez Gómez, S; Vallejo, J.; Acreche, M.M.; Erazzú, L.E, 2024. Beneficios de Vicia villosa en el intercultivo con caña de azúcar: análisis del arreglo espacial y rendimiento. XXIII Reunión Nacional de Técnicos de la caña de azúcar.

Sujaritha M., Annadurai S., Satheeshkumar J., Sharan S.K., Mahesh L. (2017). Weed detecting robot in sug arcane fields using fuzzy real time classifier. Com puters and electronics in agriculture 134: 160-171.

LECHERON VARIEGADO, EUPHORBIA GRAMINEA JACQ (EUPHORBIACEAE), NUEVA MALEZA ASOCIADA AL CULTIVO DE CAÑA DE AZUCAR, JUJUY, ARGENTINA.

Catcoff, M.T.[2]; Ruíz Monachesi, M.R.[3] Cabrera, D.C.[1];

[1]FAZ UNT, [2]FCA UNJu, [3]INECOA-UNJu-CONICET
carinacabrera@outlook.com.ar

Palabras clave: Maleza; Lecherón Variegado; Euphorbiaceae; Caña de Azúcar; Jujuy.

Introducción

El cultivo de caña de azúcar constituye una de las principales actividades agroindustriales del noroeste argentino, especialmente en Tucumán, Salta y Jujuy, donde se concentra más del 90% de la producción nacional (Bandieri & Fernández, 2017). Sin embargo, su sostenibilidad y productividad se ven constantemente amenazados por diversos factores bióticos, entre los cuales las malezas ocupan un lugar destacado. Estas especies reducen el rendimiento del cultivo al competir por recursos esenciales como agua, luz y nutrientes, además de dificultar las labores agrícolas y aumentar los costos de producción (Holm *et al.,* 1997; Lorenzi, 2008).

El manejo racional de las malezas se sustenta en la correcta identificación de las especies y en la comprensión de su biología, dinámica de emergencia y adaptaciones ecológicas, dado que estos atributos determinan su respuesta a las distintas estrategias de control. La falta de este conocimiento puede derivar en decisiones de manejo inadecuadas, con consecuencias negativas sobre la productividad y la sostenibilidad de los sistemas agrícolas. En este marco, la integración de la biología y la fitosociología de las malezas con las herramientas de manejo disponibles resulta clave para diseñar estrategias eficientes y evitar la consolidación de problemáticas crónicas en los agroecosistemas (Cabrera & de la Vega, 2019). En este contexto, se ha registrado recientemente la presencia de *Euphorbia graminea* en lote de caña de azúcar de la provincia de Jujuy y principalmente en los departamentos San Pedro, Santa Clara y El Carmen (comunicación personal, Catcoff, 2025). Se trata de una hierba anual, de tallos erectos o rastreros y ramificados, con hojas generalmente opuestas, variegadas y pequeñas inflorescencias terminales y/o axilares. Su capacidad de adaptación, resistencia a herbicidas hormonales (Ferreira *et al*., 2016) y rápida propagación la convierten en una nueva maleza de importancia agronómica, cuyo impacto sobre el cultivo aún está en proceso de evaluación (Aigbokhan & Ekutu, 2012; Zuloaga, Morrone & Belgrano, 2008;). Resulta fundamental estudiar esta especie debido a su potencial y capacidad de dispersión hacia otras zonas cañeras del noroeste argentino. Cabe señalar que no se excluye la posibilidad de que la especie se encuentre también en otras áreas cañeras de la provincia de Jujuy, aspecto que deberá ser considerado.

Por ello el objetivo de este trabajo fue realizar un estudio bibliográfico de la biología y botánica de la especie y un análisis fitosociológico para conocer la relevancia de *E. graminea* en la composición de malezas de los cañaverales de los departamentos San Pedro, Santa Clara y El Carmen de la provincia de Jujuy.

Materiales y Métodos

Botánica y Biología de la especie

Se realizó una búsqueda bibliográfica, que incluyó bases de datos científicas, catálogos florísticos y literatura especializada en malezas con el fin de ampliar nuestros conocimientos sobre sus caracteres botánicos, biología y ecología y complementar la información obtenida con los muestreos y disponer de un marco de referencia para interpretar su comportamiento en el agroecosistema cañero (Aigbokham *et al*., 2012; González, 2021; Scafidi *et al.,* 2016; Vincent, 2013; Yang *et al*., 2005).

Monitoreo: distribución e importancia de *E. graminea*.

El área de estudio abarcó 2000 hectáreas en los departamentos San Pedro, Santa Clara y El Carmen, provincia de Jujuy, en campos de productores cañeros independientes. Los relevamientos se realizaron durante las fases fenológicas de brotación, macollaje, hasta cierre del cañaveral (Arévalo *et al*., 1977).

Los muestreos se efectuaron en la campaña 2024/25 y se realizaron en 4 condiciones diferentes: Sin RAC Soca 1 (SRS1), Sin RAC Soca 5 (SRS5), Con RAC Soca 1 (CRS1) y Con RAC Soca 5 (CRS5). Para el muestreo se empleó un aro de 0,5 m², lanzado al azar en patrón zigzagueante. La vegetación dentro de cada aro se identificó y cuantificó por especie, se cortó al ras y se guardó en bolsas etiquetadas para su posterior tratamiento en laboratorio, que incluyó secado en estufa durante 72 h a 70 °C para la determinación de peso seco (Cabrera *et al.,* 2019).

Los datos obtenidos fueron analizados empleando diferentes softwares estadísticos: Infostat (Di Rienzo *et al.,* 2012), Past (Hammer *et al*., 2001) y Excel. Se calcularon diferentes parámetros de biodiversidad: frecuencia, abundancia, dominancia e índice de valor de importancia (IVI) con el fin de caracterizar el comportamiento de *E. graminea* en el conjunto de malezas del agroecosistema cañero de Jujuy (Cabrera *et al.,* 2019).

Resultados

Se encontraron y extrajeron para su correcta identificación ejemplares de *E. graminea* en los departamentos San Pedro, Santa Bárbara y El Carmen, asociada a cañaverales de diferente edad, manejo y composición varietal (Figura 1). Cabe señalar que la elección de estos sitios respondió a la mayor frecuencia observada de la especie en dichos departamentos; sin embargo, este enfoque no excluye la posibilidad de que *E. graminea* se encuentre también en otras áreas cañeras de la provincia.

Caracteres Botánicos y Biología de la especie

E. graminea Jacq. (EPHGR; Nombres comunes: “lechilla”, “lecherón variegado”, “grassleaf spurge”), es una especie herbácea de la familia *Euphorbiaceae*, ampliamente distribuida en regiones tropicales y subtropicales de América.

Sinónimos taxonómicos: *Adenopetalum gramineum* (Jacq.) Klotzsch & Garcke, *Eumecanthus gramineus* (Jacq.) Millsp., y *Agaloma graminea* (Jacq.) D.B. Ward, además de variedades como *E. graminea var. Lancifolia* y *E. graminea var. Virgata* (Scadifi *et al*., 2016).

Es una planta anual, ocasionalmente perenne, que puede alcanzar entre 30 y 80 cm de altura, con tallos delgados, ascendentes y rastreros (Figura 2b), ramificados dicotómicamente, con pubescencia variable y látex en su interior (Figura 2e). En ejemplares jóvenes los tallos suelen presentar tonalidades verdosas o violáceas, lo que facilita su

identificación en campo (Zuloaga *et al*., 2008). Las hojas son generalmente opuestas, aunque algunas basales pueden disponerse de manera alterna. Presentan láminas ovadas, elípticas o lanceoladas de 2 a 7 cm de longitud, con ápice agudo u obtuso y margen entero o levemente aserrado. En la superficie adaxial se observa con frecuencia una coloración blanquecina característica (Figura 2a). La inflorescencia está constituida por ciatios, típicos del género *Euphorbia*, dispuestos en pleocasios terminales y, en menor medida, axilares. El involucro es campanulado u obcónico, de 1 a 1,8 mm de longitud, con 4 a 5 nectarios amarillentos (Yang *et al*., 2005). Su fruto tipo ciatio corresponde a una cápsula trilocular pequeña de 3 a 4 mm de diámetro, glabra (Figura 2d), que contiene semillas ovoides de superficie lisa o finamente reticulada de 1 a 2 mm de diámetro en coloración blanca o amarillenta, la dehiscencia es de tipo explosiva. La reproducción es fundamentalmente sexual, mediante semillas abundantes que se dispersan por gravedad y por agua, aunque también se ha documentado reproducción por esquejes (Cortez Flores *et al*., 2019).

Análisis fitosociológico

E. graminea se registró en socas 1 y 5 y tanto con residuos agrícolas de cosecha (RAC) como sin ellos. Su IVI la ubicó consistentemente entre los cinco principales, compartiendo abundancias relevantes con especies de difícil control como *Cynodon dactylon* y *Sorghum halepense* (Figura 3 y 4). Su presencia en situaciones de plena exposición solar y en ambientes sombreados (Figura 2f; 2g; 2h) evidencia una notable capacidad de adaptación a gradientes lumínicos, lo que amplía su potencial de dispersión y persistencia en el agroecosistema.

Conclusiones

Los resultados obtenidos confirman que *E. graminea* se comporta como una **maleza emergente del agroecosistema cañero de Jujuy**, con presencia en distintos departamentos productivos y capacidad de establecimiento en caña planta y en socas de diferente edad. Las observaciones de campo y la caracterización morfológica evidencian una **alta plasticidad ecológica**, expresada en su adaptación tanto a ambientes con plena radiación como bajo el sombreado del cañaveral, y en su capacidad de colonizar entrelíneas y costillas del surco. Estas características funcionales, sumadas a su hábito de crecimiento y ramificación, explican su rápida incorporación a la comunidad de malezas y su persistencia frente a distintos contextos de manejo.

El análisis fitosociológico refuerza este diagnóstico: *E. graminea* presentó **valores elevados y consistentes de IVI**, ubicándose entre las especies más relevantes tanto en sistemas con y sin RAC, en socas jóvenes y avanzadas. Su comportamiento bajo cobertura, particularmente en socas de mayor edad, indica que el RAC no resulta suficiente para limitar su participación en la comunidad y que la especie tiende a consolidarse como componente estructural del sistema, acompañando a malezas históricamente dominantes como *C. dactylon*. En este contexto, los resultados advierten sobre la necesidad de **incorporar tempranamente a *E. graminea* en los programas de monitoreo y manejo integrado de malezas**, a fin de prevenir su expansión y evitar que se transforme en una problemática de mayor complejidad agronómica y económica para el sistema cañero regional.

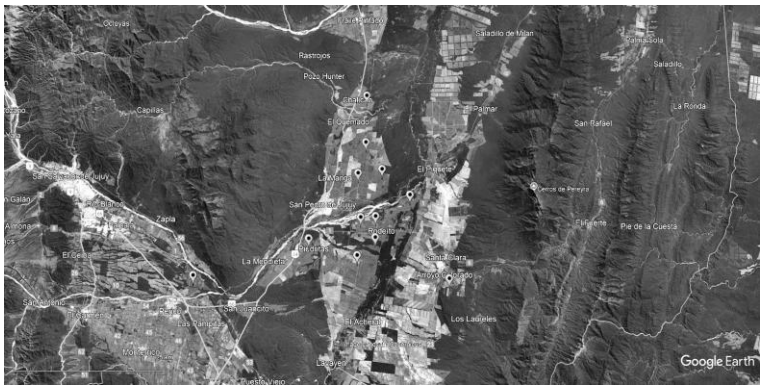


Figura 1: Distribución geográfica de *E. gramínea*, en la pcia. De Jujuy ( ).

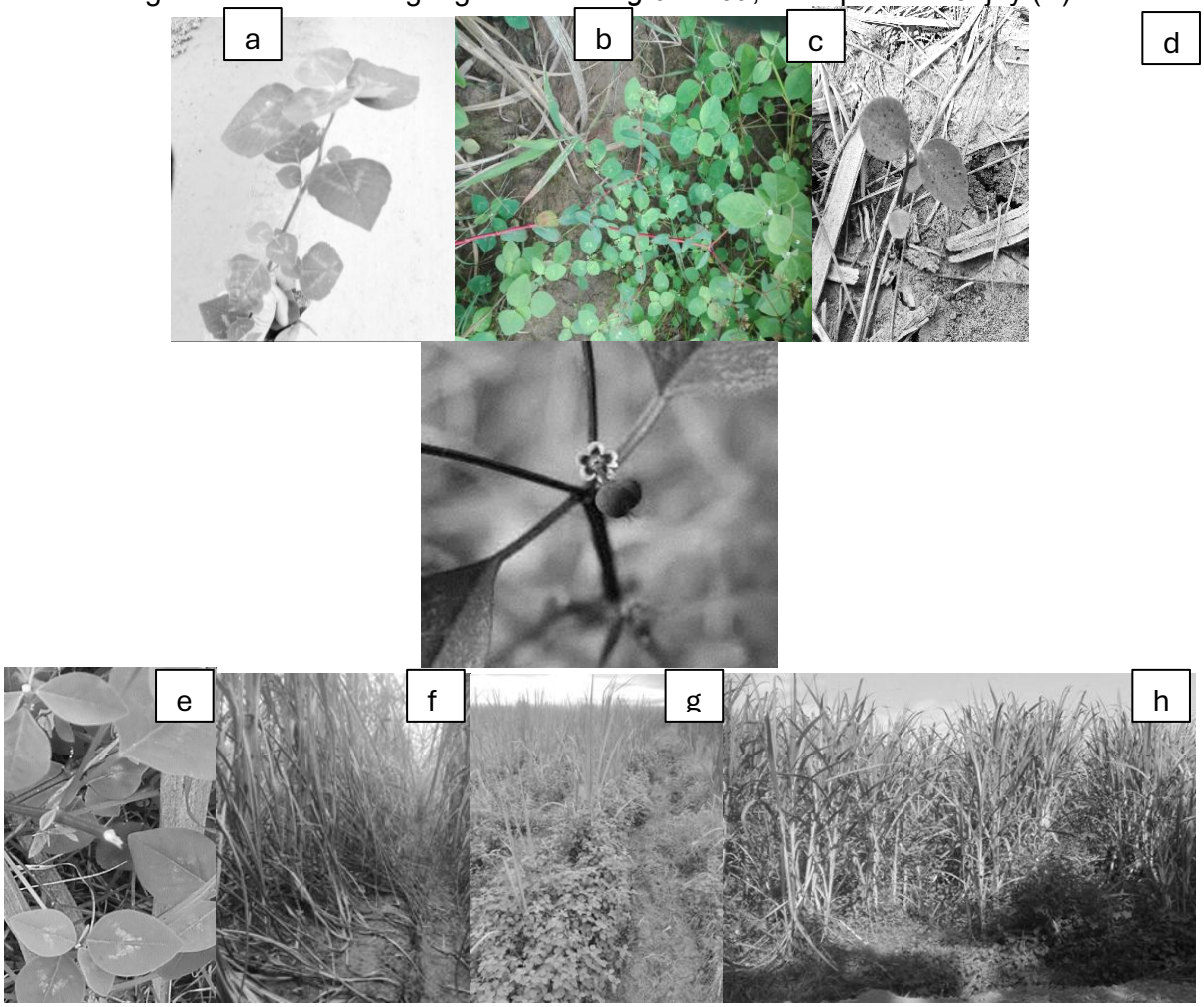


Figura 2: *E. gramínea*: Ejemplar adulto (a); Hábito rastrero (b); Plántula (c); fruto (d); Tallo con látex (e); Presencia bajo sombra de cañaveral (f); Colonización en caña planta (g); Colonización en caña soca (h).

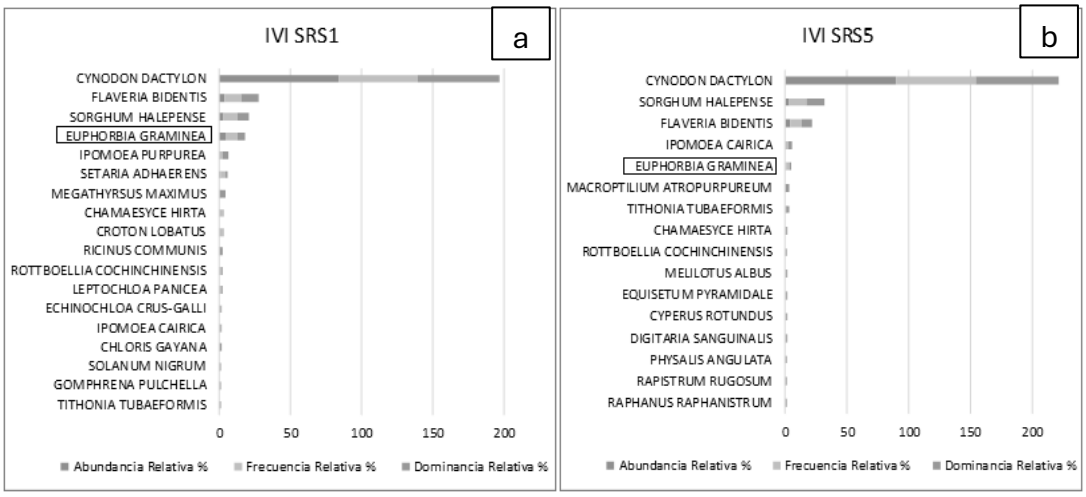


Figura 3: IVI en manejo sin RAC para Soca 1 (a) y soca 5 (b)

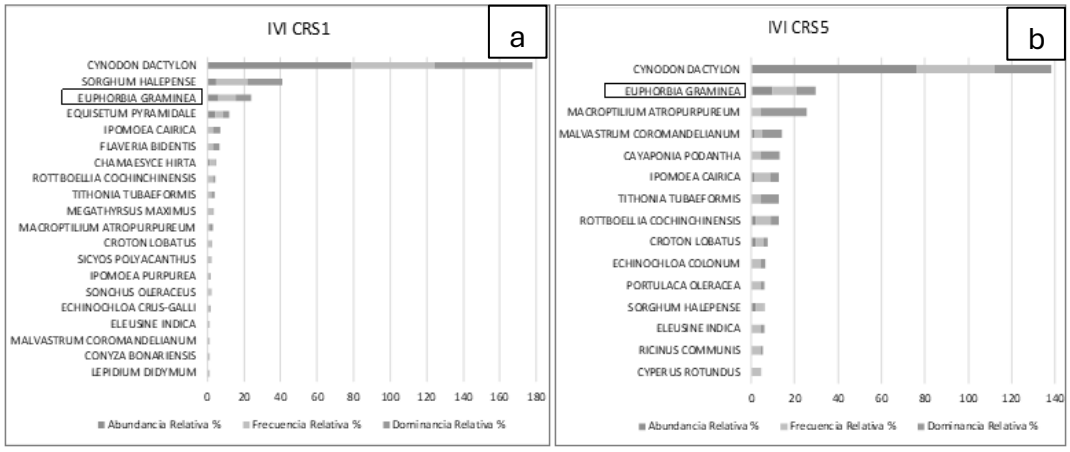


Figura 4: IVI en manejo con RAC para Soca 1 (a) y soca 5 (b)

Bibliografía

Aigbokhan, E. I., & Ekutu, O. (2012). Aspects of the biology and ecology of *Euphorbia graminea* Jacq (*Euphorbiaceae*) a potentially invasive herbaceous plant in Nigeria. Nigerian Journal of Botany, 25(1), 35-53.

Bandieri, S.; Fernández, S. 2017. La historia argentina en perspectiva local y regional. Nuevas miradas para viejos problemas, Tomo 1. Editorial Teseo.

Cabrera, D. C.; Juárez Ansonnaud, R., & Varela, A. E. 2020. Análisis de la comunidad de malezas en dos edades de corte del cultivo de caña de azúcar (*Sacharum officinarum L.*). Revista agronómica del noroeste argentino, 40(1), 31-38.

Cabrera, D. C.; Chaila, S.; Sobrero, M. T.; & Varela, A. E. 2019. Phytosociological survey of sugarcane crop weeds in different agroecological areas in Tucumán Province, Argentina. Planta Daninha, 37.

Cabrera, DC; de la Vega, M.H. 2018. Sistemas cultivo-Maleza en el Noroeste Argentino. En de la Vega, M. H.; Cabrera, D. C.; Courel, G. Biología, dinámica y manejo químico de malezas en cultivos de granos: zona NOA-1ª ed ilustrada. 119 p. Libro digital, PDF

Cortes-Flores, J; Cornejo-Tenorio, G.; Urrea-Galeano, L. A.; Andresen, E.; Gonzalez-Rodriguez, A., & Ibarra-Manriquez, G. 2019. Phylogeny, fruit traits, and ecological correlates of fruiting phenology in a Neotropical dry forest. Oecologia, 189(1), 159-169.

Di Rienzo, J. A.; Casanoves, F.; Balzarini, M. G.; González, L.; Tablada, M.; & Robledo, C. W. 2012. Infostat: Software estadístico. Córdoba: Universidad Nacional de Córdoba.

Ferreira, D. T. da R. G.; Mota da Silva, V.; Claudino da Silva, I.; Dias Santos, J. M.; Alves de Almeida, F. F., Cantalice de Souza, R. & Marques Ferreira, V. 2016. Control of three Euphorbia species through herbicides applied during pre-emergence on sugarcane straw. Revista Brasileira de Herbicidas, 15(4), 307–315.

González, O. A. F. 2021. *Euphorbia graminea* Jacq.(*Euphorbiaceae*), una nueva especie adventicia citada por primera vez para la flora paraguaya *Euphorbia graminea* Jacq.(*Euphorbiaceae*), a new adventituous species cited for the first time in Paraguayan flora.

Hammer, Ø.; Harper, D. A. T.; & Ryan, P. D. 2001. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. Palaeontologia Electronica, 4(1), 9.

Holm, L.; Doll, J.; Holm, E.; Pancho, J.; & Herberger, J. 1997. World Weeds: Natural Histories and Distribution. New York: John Wiley & Sons.

Lorenzi, H. 2008. Plantas daninhas do Brasil: terrestres, aquáticas, parasitas e tóxicas (4ª ed.). Nova Odessa: Instituto Plantarum.

Scafidi, F.; Raimondo, F. M.; Domina, G. 2016. First record of *Euphorbia graminea* (*Euphorbiaceae*) in Italy. Fl Medit, 26, 25-30.

Vincent, M. A. 2013. *Euphorbia graminea* Jacq (*Euphorbiaceae*), new to the Bahamas. Phytoneuron, 2013, 1-3.

Yang, S.; Chen, C.; Lo, K.; Hsieh, G. 2005. *Euphorbia graminea* Jacq (*Euphorbiaceae*), a newly naturalized plant in Taiwan. TAIWANIA-TAIPEI-, 50(2), 131.

Zuloaga, F. O.; Morrone, O.; & Belgrano, M. J. 2008. Catálogo de las plantas vasculares del Cono Sur. St. Louis: Missouri Botanical Garden Pres

ANÁLISIS DE CICATRICES DE QUEMA DE CAÑAVERALES BAJO LÍNEAS DE ALTA TENSIÓN EN LA PROVINCIA DE TUCUMÁN

Carreras Baldrés J. I.; Fandos C.; Soria F. J.; Scandaliaris P.;Fernández de Ullivarri, J.
Estación Experimental Agroindustrial "Obispo Colombres"
Avenida William Cross 3150, C.C. Nº 9 (T4101XAC), Las Talitas, província de Tucumán, Argentina
E-mail: jcarrreas83@eeaoc.org.ar

Palabras clave: TIG, fuego, análisis multitemporal

Introducción

La práctica de la quema de caña de azúcar, históricamente arraigada tanto en la producción mundial como en la de Tucumán, ha sido objeto de importantes críticas debido a su impacto negativo tanto socioambiental como productivo. A nivel global, la tendencia apunta hacia su erradicación, impulsada por el interés en la valorización de los residuos para fines energéticos o agronómicos, lo cual fomenta la cosecha de caña en verde.

El marco legal argentino prohíbe esta práctica mediante la Ley Nacional 26.562 (2009), y en Tucumán, el decreto reglamentario 1955-9 (2013) de la ley provincial 6.253 prohíbe la quema y la recepción de caña quemada en los ingenios. No obstante, y a pesar de estas normativas, la quema de cañaverales persiste como un problema ambiental significativo, materializándose en grandes superficies afectadas por acciones antrópicas, ya sean accidentales o voluntarias.

La incidencia de las quemas está fuertemente determinada por dos factores climáticos clave: las precipitaciones (en otoño e invierno) y la ocurrencia de heladas (en invierno). La combinación de otoños secos y ocurrencia de heladas aumenta la combustibilidad de la vegetación y genera las quemas más importantes. Por el contrario, los años con alta humedad y sin heladas reducen notablemente la magnitud de las quemas.

Entre las consecuencias negativas directas de este fenómeno, destaca la quema de caña debajo de las líneas de alta tensión. Este evento constituye una problemática grave, ya que a menudo resulta en la interrupción del suministro eléctrico.

En este contexto, la evaluación espacio-temporal de las quemas resulta crucial para una gestión efectiva de los lotes y la prevención del fuego. Para ello, se emplean la Teledetección y los Sistemas de Información Geográfica (SIG), herramientas que permiten la rápida detección, cuantificación y seguimiento de los cambios en la cobertura terrestre.

La Estación Experimental Agroindustrial "Obispo Colombres" (EEAOC) genera anualmente la cartografía de la superficie cañera afectada por procesos de quema, aplicando metodologías de Teledetección y SIG. Los resultados son capas temáticas georreferenciadas que sirven de insumo clave para la integración en análisis geoespaciales especializados (Carreras Baldrés *et al*., 2021).

El objetivo general de este trabajo fue identificar, cuantificar y mapear la frecuencia de afectación por quema en los lotes cañeros ubicados bajo las líneas de alta tensión de una empresa de transporte de energía en Tucumán.

Materiales y métodos

El área de estudio seleccionada se corresponde específicamente con las trazas de las líneas de servicio de una empresa de transporte de energía que atraviesan las tierras destinadas a la producción de caña de azúcar en la provincia de Tucumán.

Se llevó a cabo un estudio multitemporal para analizar el fenómeno de la quema a lo largo del ciclo de estudio, utilizando imágenes satelitales ópticas. Las coberturas temáticas de cicatrices de quema para cada año, desde 2014 hasta 2023, fueron generadas a partir del procesamiento de imágenes Landsat y Sentinel, obtenidas de los sitios web catalogos.conae.gov.ar/landsat8/ y scihub.copernicus.eu/dhus/#/home, respectivamente.

El procedimiento implicó la superposición de las capas de cicatrices de quema anuales, lo que resultó en la generación de una capa de datos espaciales con la información

de los años acumulados de quema. Para analizar la frecuencia de quema, esta capa fue categorizada en cuatro grupos distintivos: lotes con quema en un solo año, lotes con dos años de quema, lotes con tres años de quema y lotes con cuatro o más años de quema acumulada.

Para delimitar las zonas de interés bajo la infraestructura eléctrica, se aplicó un recorte espacial a la capa resumen mediante la implementación de un buffer de 10 metros para cada lado de las líneas centrales de alta tensión que atraviesan el área cañera. Este procedimiento geoespacial permitió la ubicación geográfica de los lotes quemados, cuantificando la recurrencia de la afectación por quema en relación directa con las líneas de alta tensión.

Para el procesamiento, análisis y visualización de los datos se utilizaron los softwares especializados: ERDAS Imagine, versión 8.4 y Quantum GIS, versión 3.28.12 Firenze.

Resultados

El análisis cuantitativo de los resultados indicó que los lotes con dos años de quema durante el período concentraron la mayor superficie afectada, alcanzando un total de 160 hectáreas. Le siguió de cerca la superficie correspondiente a los lotes quemados en un solo año de los analizados, con 154 hectáreas. Los lotes con tres años de quema acumulada representaron una superficie de 80 hectáreas. Finalmente, los lotes que experimentaron quemas en cuatro o más oportunidades durante el ciclo analizado representaron la menor superficie, totalizando unas 20 hectáreas.

En lo referente a la distribución espacial del fenómeno de las quemas, se constató que estas se desarrollan en casi la totalidad del trazado de la línea de alta tensión que se superpone al área cañera de Tucumán. No obstante, se identificaron algunos enclaves que registraron menor afectación o nula quema durante el período analizado. Estos sectores de baja recurrencia se concentran principalmente en las porciones más al sur y más al norte de la línea, específicamente en los departamentos de Burruyacú y en la zona sur de los departamentos Leales y Simoca. En estas zonas predominan los lotes afectados únicamente durante uno o dos años, sin presencia de lotes con una afectación acumulada mayor.

Por el contrario, se identificaron zonas con la mayor concentración de lotes quemados de 3, 4 y más años en los lotes ubicados en las cercanías del centro de distribución de El Bracho, situado en el sur del departamento Cruz Alta. También otros enclaves de importancia con alta afectación hacia el oeste, concentrados principalmente en el departamento Famaillá (Figura 1).

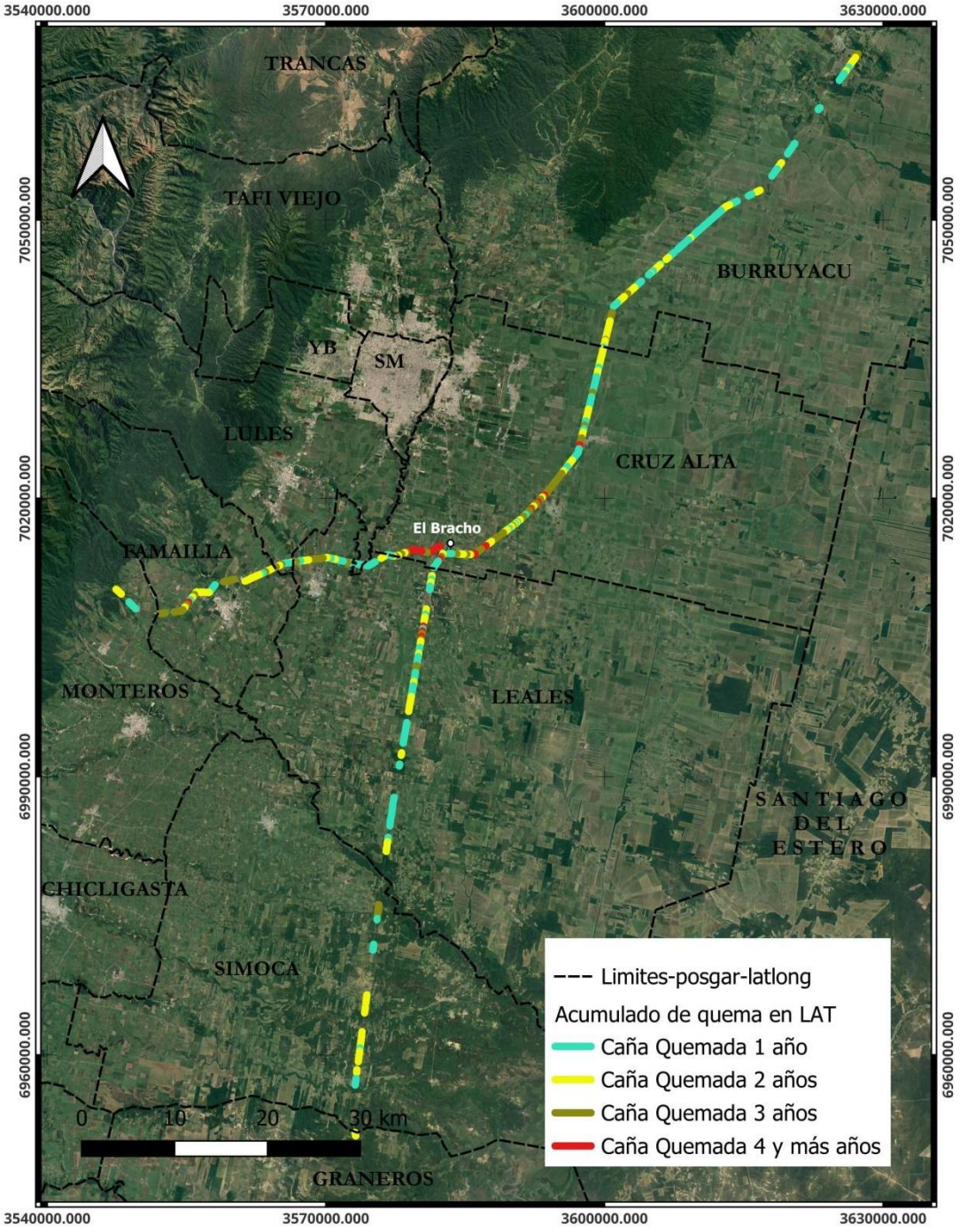


Figura 1: Distribución espacial de lotes con afectación por quema debajo de líneas de alta tensión (LAT) por año acumulado en el periodo 2014 a 2023.

Si se considera la afectación en relación con las torres de alta tensión, el análisis puntualiza que los tramos comprendidos entre las torres 1-6, 6-11, 11-15, 90-96, 601-595, 585-580 y 1480-1485 son aquellos que se encuentran sobre cultivos de caña de azúcar que fueron quemados en cuatro o más ocasiones a lo largo del período de 10 años analizados. Estos tramos conforman, por lo tanto, los sectores más críticamente afectados de las líneas de alta tensión estudiadas. Figura 2.

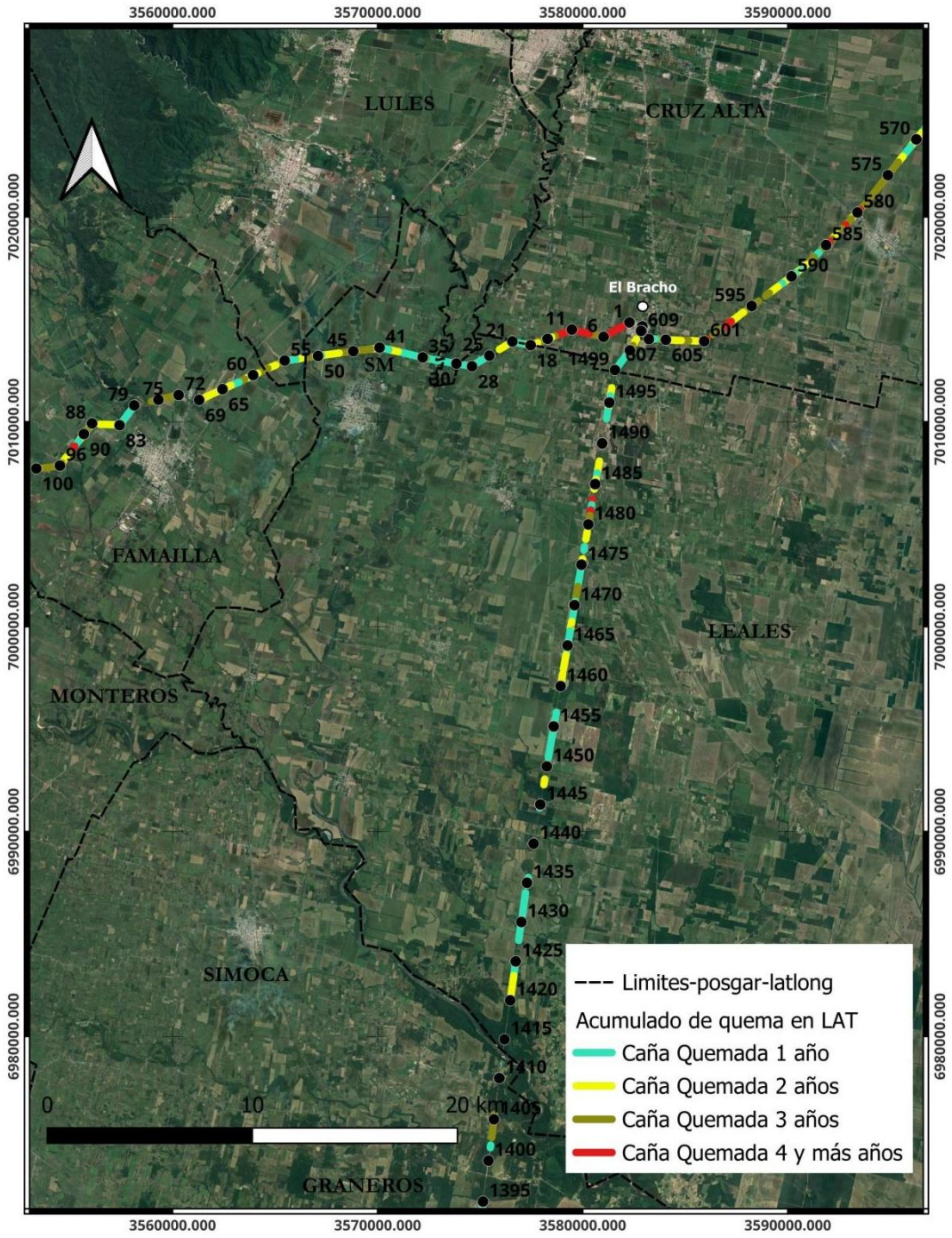


Figura 2: Detalle de la distribución espacial de torres de alta tensión con la mayor afectación por quema.

Conclusiones

El estudio espacio-temporal de las cicatrices de quema bajo las líneas de alta tensión de una empresa de transporte de energía en Tucumán cubriendo el periodo 2014-2023 arrojó resultados concluyentes sobre la recurrencia y ubicación del fenómeno.

Durante los 10 años de análisis, la mayor superficie afectada correspondió a los lotes con 2 años de quema, que concentraron 160 hectáreas. Le siguieron los lotes de 1 año (154 ha), mientras que los lotes de 3 años y aquellos de 4 años y más representaron 80 ha y 20 ha, respectivamente.

En términos de distribución geográfica, las quemas se desarrollan prácticamente a lo largo de casi la totalidad del trazado de la línea de alta tensión que cruza el área cañera. La

mayor concentración de lotes quemados con una alta recurrencia (3, 4 y más años) se observaron en la zona cercana al centro de distribución de El Bracho, en el sur del departamento Cruz Alta.

Finalmente, se identificaron los tramos específicos de la infraestructura que denotan la mayor vulnerabilidad, al haber sido quemados cuatro o más veces en el periodo analizado. Estos puntos críticos, localizados entre las torres 1-6, 6-11, 11-15, 90-96, 601-595, 585-580 y 1480-1485, son cruciales para la planificación e implementación de medidas preventivas y de vigilancia focalizada por parte de la empresa transportadora de energía.

Colaboración

Para la ejecución de este trabajo de investigación, fue fundamental contar con la colaboración de la empresa Compañía de Transporte de Energía Eléctrica en Alta Tensión Transener S.A. a la cual se le solicitó información espacial detallada para la precisa ubicación de las líneas de alta tensión y las torres correspondientes a su red de trabajos.

Bibliografía citada

Carreras Baldrés; J. I.; Fandos, C.;Soria, F.; Scandaliaris, P y Fernández de Ullivarri, J. 2021. Análisis de cicatrices de quema de cañaverales en la provincia de Tucumán, Argentina, durante el período 2013 a 2020. Actas XIX Simposio Internacional de SELPER. Santiago de Chile, Chile. Noviembre 2021.

Decreto N° 1.955/9 (MDP). Reglamento de Infracciones a la Ley N° 6.253, Provincia de Tucumán (2013).

Ley N.° 6.253. Normas generales y metodología de aplicación para la defensa, conservación y mejoramiento del Ambiente, Provincia de Tucumán (1991).

Ley N.° 26.562. Ley de presupuestos mínimos de protección ambiental para el control de actividades de quema, República Argentina (2009).

RELACIÓN ENTRE LA INTENSIDAD DE INFESTACIÓN DE DIATRAEA SACCHARALIS Y LA EDAD DE CAÑA PLANTA EN CAÑAVERALES UTILIZANDO SIG

Scandaliaris, P; Fandos C.; Pérez María L. del P.; Carreras Baldrés J. I.; Rodríguez D. y Hernández D.
Estación Experimental Agroindustrial "Obispo Colombres"
Avenida William Cross 3150, C.C. Nº 9 (T4101XAC), Las Talitas, provincia de Tucumán, Argentina
pablos@eeaoc.org.ar

Palabras clave: TIG, agricultura de precisión, barrenador, caña de azúcar

Introducción

Durante su ciclo productivo, la caña de azúcar es afectada por numerosas plagas que merman su productividad. Entre ellas, destaca el gusano barrenador del tallo de la caña de azúcar *(Diatraea saccharalis).* Esta oruga se encuentra particularmente presente en la región cañera tucumana (Willink, 1982) y está considerada como la plaga más importante debido a los daños internos que provoca en el tallo.

Los perjuicios causados por *Diatraea saccharalis* pueden clasificarse según el área de la producción que afecten. En primer lugar, con respecto al rendimiento cultural, esta plaga causa pérdidas significativas manifestadas en la muerte del brote guía y el quiebre de los tallos, lo que reduce la cantidad de materia prima cosechable. En segundo lugar, en cuanto al rendimiento fabril, el barrenador afecta la calidad del jugo debido al deterioro producido por sus perforaciones internas (Salvatore *et al*., 2008).

Dada la importancia de la plaga resulta esencial conocer los factores externos que pueden influir en el proceso. Es en este contexto donde cobran relevancia los Sistemas de Información Geográfica (SIG), que permiten integrar y analizar de manera eficiente la información geoespacial, revelando interrelaciones y patrones complejos entre diferentes fenómenos que, de otra forma, serían difíciles de identificar.

La Estación Experimental Agroindustrial "Obispo Colombres" (EEAOC), a través de la sección Zoología agrícola, realiza muestreos pre-zafra en lotes comerciales de caña de azúcar, distribuidos uniformemente sobre el área cañera tucumana, con el fin de poder supervisar el comportamiento de la plaga. Tomando como base dicha información (Scandaliaris *et al.*, 2024a), encontraron una predominancia de valores elevados de infestación de *Diatraea saccharalis* en los sectores este y sur de la provincia. Un estudio posterior (Scandaliaris *et al.,* 2024b) analizó la información previamente obtenida y, al relacionarla con capas temáticas de cultivos de maíz, constató que los sectores con alta infestación de la plaga presentaban coincidencia geográfica con la presencia de dicho cultivo.

El sucesivo cultivo de caña de azúcar dificulta la identificación de las renovaciones en los cañaverales mediante imágenes satelitales. Sin embargo cuando los cultivos de caña son rotados con otros cultivos, principalmente soja, o intercalados con períodos de barbecho, se facilita la identificación de las renovaciones y edades de los cañaverales utilizando teledetección y SIG (Fandos *et al*., 2022).

Para dar continuidad al análisis de los factores que influyen en el proceso de infestación, el objetivo de este trabajo fue establecer la relación entre la Intensidad de Infestación (II) de *Diatraea saccharalis* y el cultivo de caña de azúcar en la fase de caña planta.

Materiales y métodos

El análisis se centró en los departamentos Burruyacu, Cruz Alta y Leales, en las zafras 2021 y 2022, seleccionados por registrar una alta II y contar con mayor información disponible sobre la edad de caña planta. Se focalizó el análisis en las clases con mayor II: clase naranja (7,5-10% II) y clase roja (>10% II). Se seleccionaron 19 puntos de II para el ciclo 2021 y 16 para el 2022. Figuras 1 y 2.

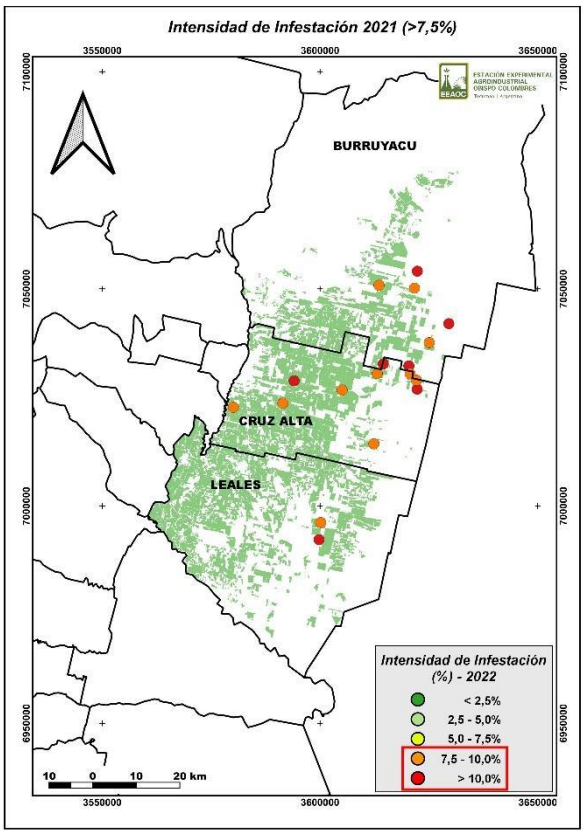


Figura 1. Área de estudio. 2021.

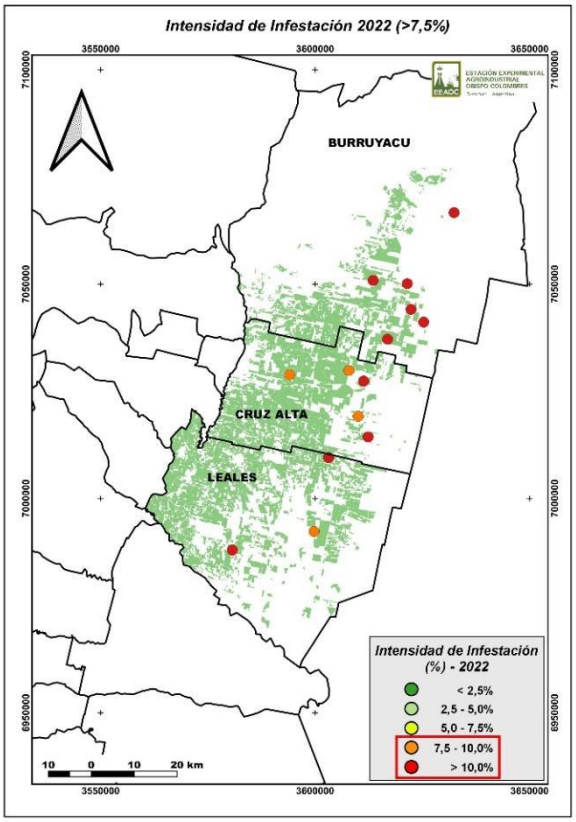


Figura 2. Área de estudio. 2022.

Para la obtención de las coberturas temáticas correspondientes a la caña planta en las dos zafras analizadas, se aplicó la metodología utilizada por Fandos *et al*. (2022). Esta metodología consistió en tomar como base las capas temáticas de cultivos de soja y de caña de azúcar correspondientes a zafras consecutivas, generadas a partir de imágenes satelitales ópticas (Landsat y Sentinel), obtenidas de los sitios web https://catalogos.conae.gov.ar/landsat8/ y https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home, respectivamente.

Específicamente, para la zafra 2021, se utilizaron las capas de soja 2019/2020 y caña de azúcar 2021; mientras que, para la zafra 2022, se emplearon las capas de soja 2020/2021 y caña de azúcar 2022.

Mediante la superposición de las capas de soja y caña, se logró discriminar y obtener la capa temática de caña planta proveniente de soja para cada ciclo analizado.

También se contó con información de caña planta obtenida a partir de relevamientos a campo.

Finalmente se realizó la superposición de la capa vectorial de puntos que contenía los valores de II sobre la capa temática correspondiente al cultivo de caña planta para las dos campañas analizadas.

Se utilizaron los software Erdas Imagine 8.4 y Quamtun GIS 3.16.9.

Resultados

Las Figuras 3 y 4 muestran la superposición de puntos de II sobre lotes de caña en edad de caña planta. Para la campaña 2021 (Figura 3), sobre 19 puntos de control con II igual o superior a 7,5% analizados, 3 se encontraban sobre caña planta, lo que implica un 15,8%. En el caso de la zafra 2022 (Figura 4), 5 de los 16 puntos de control analizados se encontraban en lotes con caña planta (31,3%).

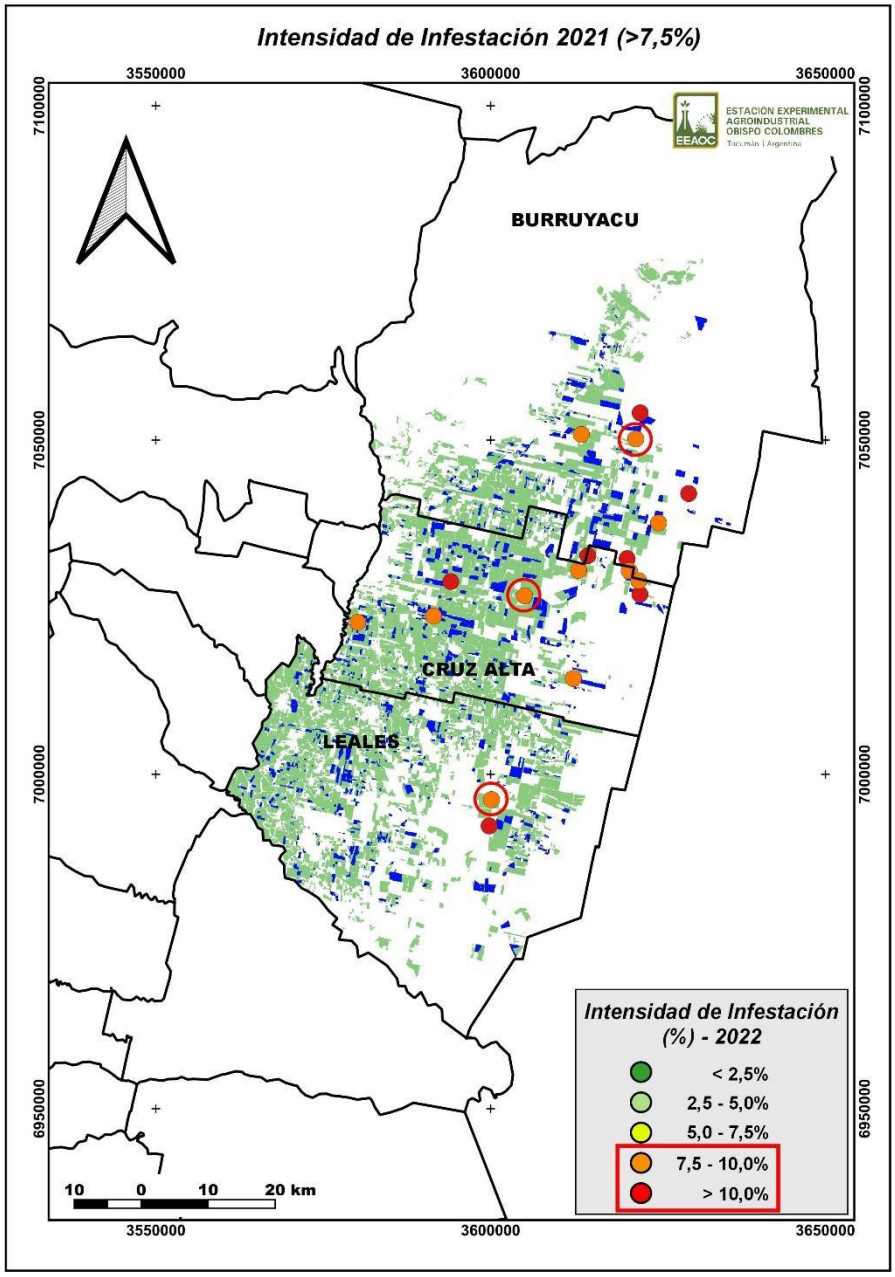


Figura 3. Superposición de puntos de II sobre lotes de caña en edad de caña planta. 2021.

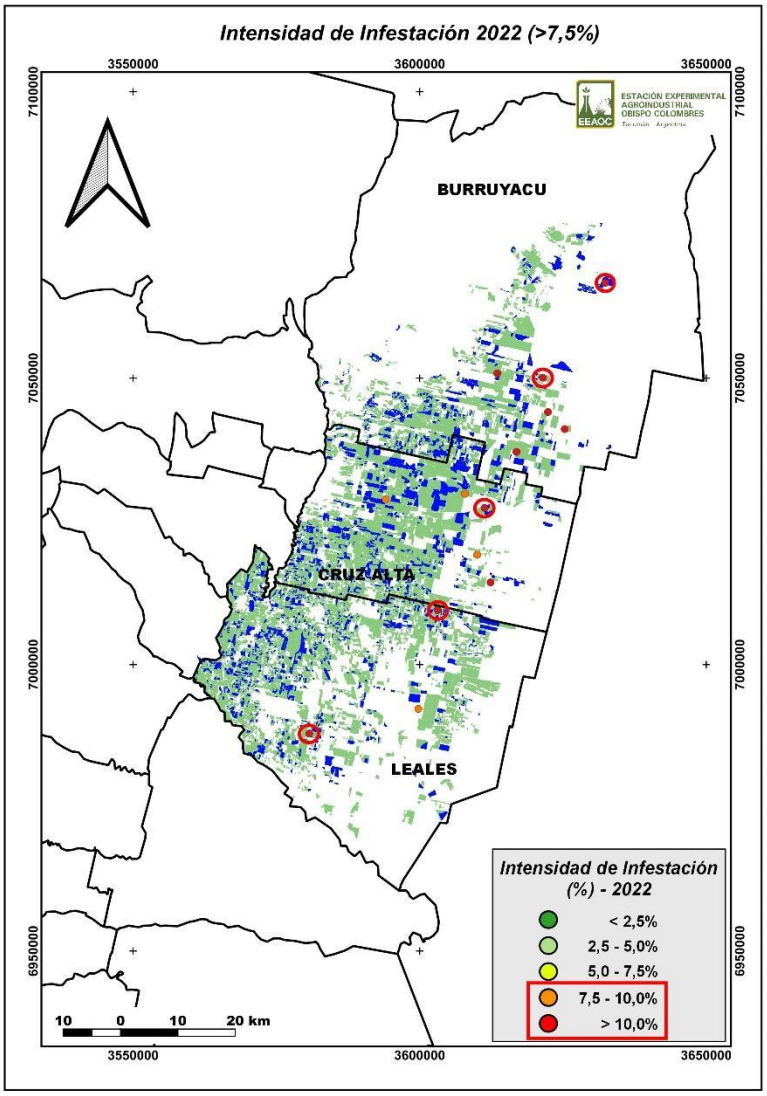


Figura 4. Superposición de puntos de II sobre lotes de caña en edad de caña planta. 2022.

Conclusiones

El análisis de la superposición de los puntos de alta II con los lotes de caña planta reveló que una proporción de los focos de infestación más severos se concentró en esta fase inicial del cultivo.

Se encontró que entre el 15,8% y el 31,3% de los puntos de control con II superior a 7,5% se ubicaban sobre estos lotes. Es notable que la proporción de puntos de alta infestación en caña planta se incrementó de un 15,8% en 2021 (3 de 19 puntos) a un 31,3% en 2022 (5 de 16 puntos).

La continuidad de los muestreos y la red establecida desde 2016 establecen una base sólida para el análisis espacio-temporal del comportamiento de la plaga en estudio.

La visualización mediante mapas temáticos, generados a través del procesamiento de imágenes satelitales y herramientas SIG, permitió identificar tendencias que no serían tan evidentes al analizar listados de datos numéricos.

Se espera que la incorporación de información de campañas subsiguientes a este estudio, junto con una mayor disponibilidad de datos de campo, permita robustecer las tendencias identificadas y profundizar el análisis espacio-temporal de la plaga.

Bibliografía citada

- Fandos C.; P. Scandaliaris; J. I. Carreras Baldrés y F. S. Soria. 2022. Zafra 2023: diferenciación de edades en cañaverales tucumanos con cultivo antecesor soja. Reporte Agroindustrial EEAOC 271. Disponible en

https://www.eeaoc.gob.ar/?publicacion=zafra-2022-diferenciacion-de-edades-en-canaverales-tucumanos-con-cultivo-antecesor-soja (consultado 19 agosto 2025).
-Salvatore A. R.; G. Lopez; E. Willink; M. Ahmed y L. Varela. 2008. Ataque del "gusano perforador de la caña de azúcar" *Diatraea saccharalis* en Tucumán: análisis prezafra de las campañas 2003 a 2007. Avance agroindustrial 29 (1): 12-13.
-Scandaliaris P; C. Fandos; M. L. del P. Pérez; J. I. Carreras Baldrés. 2024a. Análisis espacial y temporal de la incidencia de *Diatraea saccharalis* en el área cañera de la provincia de Tucumán Argentina, mediante SIG, en el período 2016-2022. Actas XXIII Reunión Nacional de Técnicos de la caña de azúcar (SATCA). Tucumán, Argentina.
- Scandaliaris P.; C. Fandos; Pérez María L. del P, Soria F. y Carreras Baldrés J. I. 2024b. Analysis of the evolution of D*iatraea saccharalis* (period 2016-2022) and its relationship with corn using GIS. Proceedings ISSCT XIII Pathology and XI Entomology Workshop. Salta, Argentina. Noviembre 2024.
- Willink E.; Costilla M. y Osores V. 1982. Hacia el control integrado de Diatraea saccharalis. Avance agroindustrial 2 (8): 9-13.


SATCA
desde 1982
SOCIEDAD ARGENTINA
DE TÉCNICOS DE LA
CAÑA DE AZÚCAR