

Carta Trimestral

AÑO 30 Nos. 3 y 4 CALI, COLOMBIA 2008

julio - diciembre

www.cenicana.org

TEMAS

Notas técnicas e informativas

Novedades editoriales 2

Segunda semana de la ciencia, la tecnología y la innovación 2

Avances de investigación

Avances en la selección de variedades de caña de azúcar para las zonas húmedas del valle del río Cauca 3

Características agronómicas de la caña de azúcar asociadas con las toneladas de caña por hectárea y la sacarosa 10

Consideraciones acerca del desempeño operacional de estaciones de clarificación y filtración 15

Determinaciones del poder calorífico y las cenizas en bagazo de caña de azúcar por espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR) 20

Selección de variedades en las zonas húmedas

Avances de la evaluación en plantilla de 57 clones Cenicaña Colombia (CC) de la serie 2004 en Estado III y 172 variedades del banco de germoplasma de Cenicaña en Estado II. *Página 3.*

Características agronómicas y productividad

Análisis estadístico que indica algunos criterios agronómicos de utilidad en la selección de variedades de caña de azúcar. Apoyo al programa de mejoramiento genético del cultivo en el sector azucarero colombiano. *Página 10.*



Clarificador de jugo.

Desempeño operacional de estaciones de clarificación y filtración

Consideraciones formuladas con base en las experiencias de distintos investigadores en diferentes países y las observaciones hechas en la industria colombiana durante el desarrollo de los proyectos de "Benchmarking en clarificación y filtración" y "Pérdidas indeterminadas" coordinados por el Programa de Procesos de Fábrica de Cenicaña. *Página 15.*

Determinaciones de poder calorífico y cenizas en bagazo mediante espectroscopia NIR *Página 20.*

Programa de Procesos de Fábrica: nuevos servicios de información

www.cenicana.org/investigacion/fabrica/index.php

Septiembre de 2009

VIII Congreso de Tecnicaña

La Asociación Colombiana de Técnicos de la Caña de Azúcar anuncia la celebración del VIII Congreso de Tecnicaña y la apertura de la convocatoria para la recepción de trabajos en las áreas temáticas del evento: campo y cosecha, procesos industriales, administración y gerencia.

El Congreso se realizará en Santiago de Cali, los días 16, 17 y 18 de septiembre de 2009. Habrá también actividades de precongreso, muestra comercial y programa turístico.

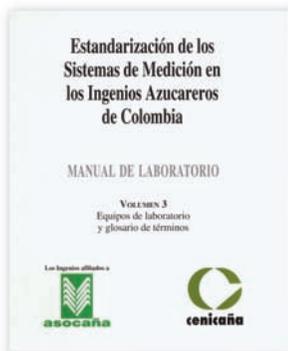
La fecha límite para la recepción de trabajos es el 15 de abril de 2009. Más información y normas para la presentación de trabajos en el sitio web <www.tecnicana.com> o en la sede de la Asociación en Cali. Calle 58 norte No.3BN-110. Teléfono: (57-2) 665 4123 ó 665 3252. Fax: (57-2) 664 5985. Dirección electrónica: <tecnicana@tecnicana.com>



cenicaña

Centro de Investigación
de la Caña de Azúcar de
Colombia

Novedades editoriales



Estandarización de los sistemas de medición en los ingenios azucareros de Colombia. Manual de laboratorio. Volumen 3: Equipos de laboratorio y glosario de términos.

Calero Salazar, L. (ed).

Complemento de los manuales de laboratorio editados por Cenicaña y los ingenios afiliados a Asocaña en el marco del proyecto de estandarización de los sistemas de medición en los procesos de fábrica. Este volumen de cien páginas, publicado en septiembre de 2008, contiene, además del glosario de términos, cinco capítulos acerca de los equipos de laboratorio, en los que se incluyen las técnicas ópticas, espectroscópicas, electroanalíticas y de separación, así como los aspectos concernientes al mantenimiento de equipos.



Desgaste de máquinas de preparación y molienda de caña de azúcar

Gómez Perlaza, A.L.; Coronado Marín, J.J.; Valdés Ortiz, J.A. (eds.)

Este documento reúne los resultados del "Proyecto cooperativo agroindustrial para reducir el desgaste en los equipos de preparación y molienda de caña" en relación con los siguientes aspectos: (1) Desgaste de máquinas de preparación de caña, (2) Desgaste de molinos de caña y (3) Desgaste de ejes y chumaceras de molinos de caña. La metodología incluyó el desarrollo de trabajos de grado, tesis de maestría, apoyo en las etapas experimentales de un trabajo doctoral y la participación de expertos internacionales en cada área. Participaron profesionales del Grupo de Investigación en Mejoramiento Industrial de la Escuela de Ingeniería Mecánica de la Universidad del Valle, el Grupo de Ingeniería Mecánica del Programa de Procesos de Fábrica de Cenicaña y el Ingenio Manuelita S.A., este último beneficiario del proyecto.

Serie Procesos Industriales

No.4, sept. de 2008

Publicación producida con la cofinanciación de Colciencias y el Ingenio Manuelita, código 1106-08-12279, contrato 284-2002.

Segunda semana de la ciencia, la tecnología y la innovación

Cenicaña se unió a la celebración de la segunda jornada nacional auspiciada por Colciencias para establecer espacios de participación e incentivar la interacción entre los ciudadanos, la comunidad científica y los entes gubernamentales, que tuvo lugar entre el 18 y el 24 de octubre de 2008 en distintas ciudades del país. Un total de cincuenta personas, entre maestros y alumnos de grado once de varios colegios del municipio de Florida (Valle del Cauca), visitaron la Estación Experimental de Cenicaña para conocer el modelo institucional y los aspectos generales de la investigación en el sector azucarero.



Estación meteorológica automatizada.

Carta Trimestral

ISSN 0121-0327

Año 30, Nos. 3 y 4 de 2008

Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia
Dirección postal: Calle 58 Nte. No. 3BN- 110 Cali, Colombia
Estación Experimental, vía Cali-Florida km 26
Tel: (57-2) 687 6611 • Fax: 260 7853 • buzon@cenicana.org

Comité Editorial

Adriana Arenas Calderón • Alvaro Amaya Estévez
Camilo Isaacs Echeverry • Edgar Fernando Castillo Monroy
Jorge Stember Torres Aguas • Jorge Ignacio Victoria Kafure
Nohra Pérez Castillo • Victoria Carrillo Camacho

Servicio de Cooperación Técnica y Transferencia de Tecnología

Coordinación editorial y edición de textos: Victoria Carrillo C.
Diagramación: Alcira Arias Villegas
Preprensa e impresión: Feriva S.A., Cali-Colombia

Catálogo en línea de la base datos bibliográfica

Consulte las referencias disponibles en
www.cenicana.org/biblioteca/catalogo_online.php

Solicite los documentos de interés a Adriana Arenas <biblioteca@cenicana.org> o visite la biblioteca en la Estación Experimental

Avances en la selección de variedades de caña de azúcar para las zonas húmedas del valle del río Cauca

Carlos Arturo Viveros V. *, Jorge I. Victoria K. *, Luis Orlando López Z. *,
Hernando Rangel J. *, Juan Carlos Ángel S. *, Amanda Villegas** y Luis E. Cuervo**

Introducción

El objetivo del proceso de selección en las zonas húmedas es obtener variedades que se adapten a las condiciones agroecológicas caracterizadas por exceso de humedad en el suelo, donde se espera que las nuevas variedades produzcan por lo menos 15% más toneladas de caña por hectárea y 5% más sacarosa (% caña) que la mejor variedad comercial utilizada como testigo.

El proceso incluye experimentos en tres estados de selección y en pruebas regionales para identificar las variedades promisorias que luego son evaluadas a escala semicomercial. Con los resultados de la evaluación semicomercial se promueve la adopción de las variedades más productivas y de mejor adaptación en las zonas húmedas.

A continuación se presentan los avances de la evaluación en plantilla de 57 clones Cenicaña Colombia (CC) de la serie 2004 en Estado III y 172 variedades del banco de germoplasma de Cenicaña en Estado II. Los clones en Estado III se evaluarán también en la soca, mientras que los seleccionados en Estado II serán sembrados para continuar su evaluación en el estado siguiente.

Consideraciones generales

De acuerdo con la cuarta aproximación de la zonificación agroecológica para el cultivo de la caña de azúcar en el valle del río Cauca (Cenicaña, 2008), en la región se encuentran aproximadamente 53 mil hectáreas clasificadas en 74 zonas agroecológicas que se caracterizan por presentar suelos diversos y condiciones de humedad media, alta y muy alta. Estas zonas representan cerca del 26% del área total sembrada por la agroindustria.

La diversidad edáfica en las zonas húmedas está representada por la existencia de suelos pertenecientes a 32 grupos homogéneos de suelos de los 33 grupos identificados por Quintero y colaboradores (2008); suelos ordenados a partir de estudios agrológicos detallados. Las condiciones de humedad media, alta y muy alta (grupos de humedad H3, H4 y H5) representan niveles de exceso de humedad en el suelo estimados mediante el balance hidrológico regional calculado para el cultivo de la caña y teniendo en cuenta la permeabilidad del suelo, su pendiente, la presencia de nivel freático y su profundidad y la presencia de signos de mal drenaje y su profundidad (Gómez *et al.*, 2007).

En términos generales, las zonas con humedad media (H3) se caracterizan por excesos entre 400 mm/año y 600 mm/año y suelos de permeabilidad media a alta, así como por excesos entre 200 mm/año y 400 mm/año y suelos de permeabilidad baja. Las zonas con humedad alta (H4) corresponden a áreas con excesos superiores a 600 mm/año y suelos de permeabilidad alta; también, áreas con excesos entre 400 mm/año y 600 mm/año y suelos arcillosos de permeabilidad baja y relieve plano. Finalmente, las zonas con humedad muy alta (H5) son aquellas donde se presentan excesos de humedad superiores a los 600 mm/año y suelos arcillosos con permeabilidad baja a media y relieve plano.

* Respectivamente: Ingeniero Agrónomo M.Sc., Fitomejorador <caviveros@cenicana.org>; Ingeniero Agrónomo Ph.D., Director Programa de Variedades <jvictoria@cenicana.org>; Ingeniero Agrónomo, Investigador Temporal en Fitomejoramiento <lolopez@cenicana.org>; Ingeniero Agrónomo Ph.D., Asesor en Fitomejoramiento; Ingeniero Agrónomo M.Sc., Fitopatólogo <jcangel@cenicana.org>. Todos de Cenicaña.

** Respectivamente: Ingeniera Agrónoma, Jefe de Agronomía del Ingenio Risaralda <avillegas@ingeniorisaralda.com>; Ingeniero Agrónomo, Jefe de Agronomía y Control Fitosanitario de Incauca <lecuervo@incauca.com>.



Resultados preliminares y conclusiones finales de los proyectos de investigación científica y tecnológica de Cenicaña

10 Características agronómicas de la caña de azúcar asociadas con las toneladas de caña por hectárea y la sacarosa (% caña)

15 Consideraciones acerca del desempeño operacional de las estaciones de clarificación y filtración

20 Determinaciones del poder calorífico y las cenizas en bagazo de caña de azúcar mediante espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR)

Experimentación en zonas húmedas

En la definición de las zonas agroecológicas (cuarta aproximación) las condiciones de humedad de cada sitio fueron estimadas con un balance hidrológico basado en una probabilidad de exceso de la precipitación de 75%, con lo cual se presume que solamente en 2.5 años de 10 es probable que ocurran eventos de precipitación menores al valor esperado.

No obstante, para obtener variedades con adaptación a las zonas húmedas se debe asegurar que durante la experimentación se mantengan las condiciones de humedad en el suelo para evitar que los clones en proceso de selección se vean sometidos a situaciones de déficit de humedad. Con este propósito, a partir de diciembre de 2007 se comenzaron a instalar pozos de observación del nivel freático (nivel del agua en el suelo) en los sitios de experimentación. De esta manera se vigila permanentemente la profundidad del nivel freático y se aplica riego cuando ella se encuentra más allá de los 50 cm.

La importancia del nivel freático en la diferenciación de variedades de caña de azúcar por su resistencia o susceptibilidad a las condiciones de humedad del suelo se comprobó en 2007 en la Estación Experimental de Cenicaña en un experimento en lisímetros (1.50 m x 1.20 m x 2.00 m) donde se mantuvo el nivel freático entre 30 cm y 50 cm de profundidad y se evaluaron ocho variedades.

Evaluación agronómica y seguimiento de la maduración

El seguimiento de la maduración se lleva a cabo con una frecuencia mensual, procurando tener por lo menos cinco lecturas de sacarosa (% caña).

En los experimentos que se reportan en este documento, la evaluación de los clones y las variedades en proceso de selección se realizó mediante su calificación agronómica a los 11 meses de edad, en una escala de 1 a 5 donde: 1 es una planta de buen aspecto, 12 tallos/m, erectos, sin floración, buen deshoje, altura igual a la variedad testigo o superior, diámetro de 28-30 mm y hojas sanas; y 5 es una planta de baja altura, <10 tallos/m, volcados, con floración, mal deshoje y diámetro <26 mm. En la evaluación participaron los jefes de los departamentos de agronomía de los ingenios Incauca, La Cabaña y Risaralda y sus colaboradores, junto con el personal de investigación de Cenicaña.

Resultados y discusión

A continuación se describen las condiciones generales de cada experimento y los resultados de las evaluaciones respectivas.

Clones de la serie 2004 en Estado III (plantilla)

Las evaluaciones de selección en Estado III se realizan en plantilla y primera soca. El 24 de marzo de 2007 se sembraron 57 clones CC de la serie 2004 en la suerte 22A de la hacienda Cachimbalito de Incauca, en un suelo Río de Janeiro (Chromic Endoaquerts) de familia textural muy fina, zona agroecológica 5H5. El diseño experimental corresponde a Lattice de 8 x 8 con tres repeticiones, en parcelas de seis surcos de 13 m de largo y distancia entre surcos de 1.50 m. Como testigo se emplea la variedad CC 85-92. La cosecha de la plantilla se llevó a cabo el 20 de mayo de 2008.

En la evaluación fitosanitaria ninguno de los clones mostró susceptibilidad a las enfermedades de roya y mosaico. En total se eliminaron 19 variedades susceptibles a carbón.

Las condiciones hidrológicas del experimento se presentan en la Figura 1, donde se observa que el período de rápido crecimiento de los clones coincidió con los meses de menores precipitaciones, lo cual seguramente favoreció la producción de caña de algunos materiales. Los valores más altos de precipitación se registraron en el mes 2 (mayo 2007:

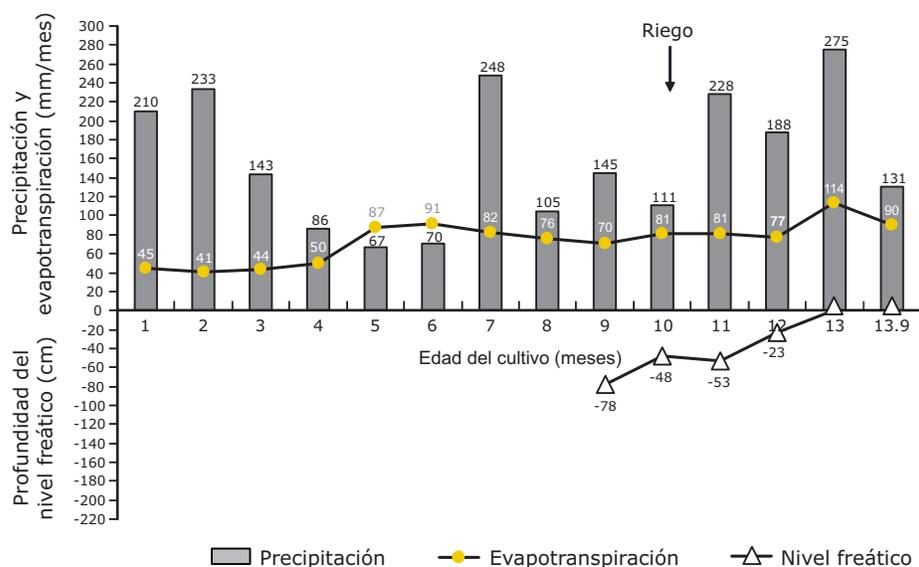


Figura 1. Condiciones hidrológicas del experimento con clones Cenicaña Colombia de la serie 2004 en Estado III (plantilla). Incauca, hacienda Cachimbalito, suerte 22A, zona agroecológica 5H5. Siembra: 24 de marzo de 2007; cosecha: 20 de mayo de 2008.

233 mm), el mes 7 (octubre 2007: 248 mm) y el mes 13 (abril 2008: 275 mm). En el mes 9 (diciembre 2007) se instalaron pozos de observación del nivel freático y en el mes 10 se aplicó un riego con el fin de elevar la profundidad del agua en el suelo hasta los 50 cm aproximadamente. En los meses siguientes y hasta el momento de la cosecha, por efecto de las precipitaciones el nivel freático se acercó progresivamente a la superficie del suelo.

La calificación agronómica de cada variedad fue el resultado del concepto dado por las personas involucradas en el desarrollo de variedades de Cenicaña y de los ingenios Incauca y La Cabaña, quienes realizaron la evaluación en campo. En algunos casos se presentaron opiniones heterogéneas, por lo cual se decidió evaluar por medio de la moda a fin de obtener un resultado más objetivo por variedad. Esta calificación sirvió de complemento para la preselección de las mejores variedades, junto con los resultados de sacarosa (% caña).

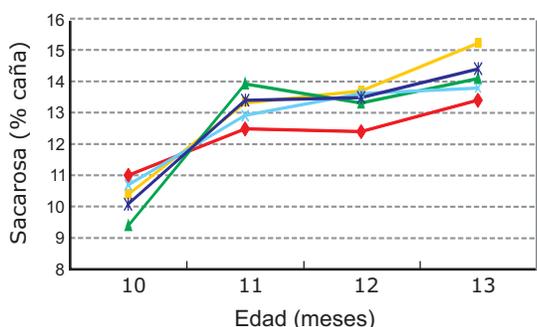
Entre los clones que presentaron los mejores valores de sacarosa a los 13 meses de edad se preseleccionaron CC 04-439, CC 04-463, CC 04-506, CC 04-536 y CC 04-584, con el criterio de que sus valores relativos fueran iguales o superiores a los del testigo CC 85-92 (Cuadro 1). Estas mismas variedades produjeron toneladas de sacarosa por hectárea (TSH) iguales o superiores en 5% con respecto a CC 85-92 y además tuvieron una buena calificación agronómica. El valor máximo de TSH lo presentó la variedad CC 04-506 con un 20% relativo al testigo absoluto.

Las variedades CC 04-439 y CC 04-584 mostraron curvas de maduración similares en sus respectivas repeticiones; por tanto, el promedio por variedad representa las observaciones. De igual forma las variedades anteriores presentaron valores de sacarosa (% caña) más elevados durante los meses 11, 12 y 13 con respecto al promedio del testigo CC 85-92 (Figura 2). Las variedades CC 04-463, CC 04-506 y CC 04-536 presentaron alta variación entre sus repeticiones sin un patrón común a todas ellas, lo cual indica que el promedio no representa la variedad y que los resultados de estas variedades deben ser evaluados cuidadosamente en la soca.

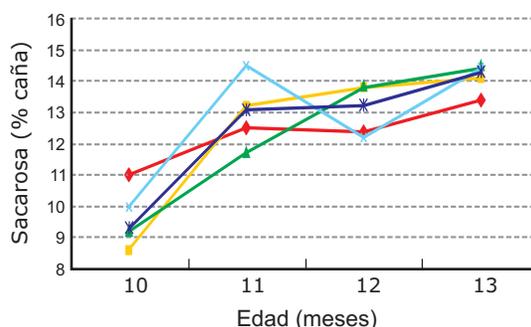
Cuadro 1. Sacarosa (% caña), toneladas de caña y sacarosa por hectárea (TCH y TSH) de los clones destacados de la serie 2004 en Estado III (plantilla), en términos del porcentaje relativo con respecto a los resultados del testigo CC 85-92. Hacienda Cachimbalito de Incauca, suerte 22A, zona agroecológica 5H5. Edad de cosecha: 13.9 meses.

| Variedad | Progenitores | | Porcentaje relativo al testigo | | | Calificación agronómica ² | Médula | Quebradiza |
|--------------------|--------------|------------|--------------------------------|---------|----------|--------------------------------------|--------|------------|
| | Padre | Madre | Sacarosa (% caña) ¹ | TCH | TSH | | | |
| CC 04-439 | CC 91-1568 | ? | 7 | 8 | 16 | 2 | No | No |
| CC 04-463 | CC 87-117 | CC 93-3645 | 7 | 6 | 14 | 3 | No | No |
| CC 04-506 | CC 87-251 | CC 84-59 | 3 | 17 | 20 | 3 | No | Si |
| CC 04-536 | CC 93-3801 | ? | 5 | 1 | 7 | 3 | No | No |
| CC 04-584 | CC 93-3801 | CP 38-34 | 8 | 5 | 13 | 2 | Si | Si |
| CC 85-92 (testigo) | Co 775 | ? | 0 | 0 | 0 | 2 | No | No |
| Datos testigo | | | 13.4 % | 111 TCH | 14.8 TSH | | | |

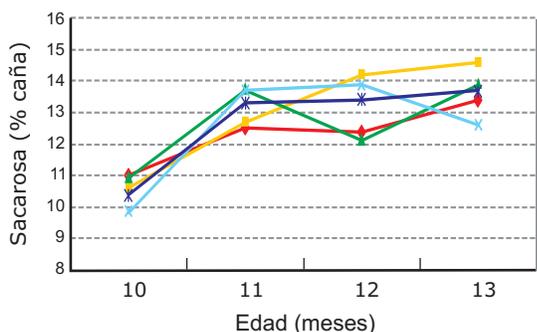
1. Sacarosa a los 13 meses de edad.
2. Moda de las calificaciones. Escala de 1 a 5 donde: 1 es una planta de buen aspecto, 12 tallos/m, erectos, sin floración, buen deshoje, altura igual a la variedad testigo o superior, diámetro 28-30 mm y hojas sanas; y 5 es una planta de baja altura, <10 tallos/m, volcados, con floración, mal deshoje y diámetro <26 mm.



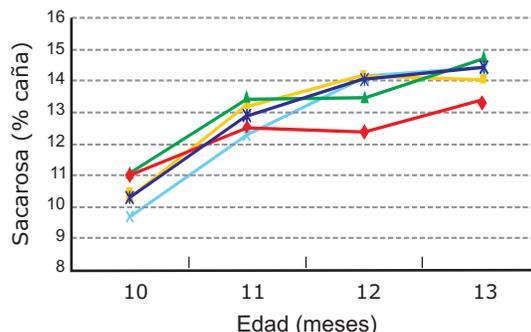
— CC 85-92 (Promedio) — CC 04-439 (R1) — CC 04-439 (R2)
— CC 04-439 (R3) — CC 04-439 (Promedio)



— CC 85-92 (Promedio) — CC 04-463 (R1) — CC 04-463 (R2)
— CC 04-463 (R3) — CC 04-463 (Promedio)

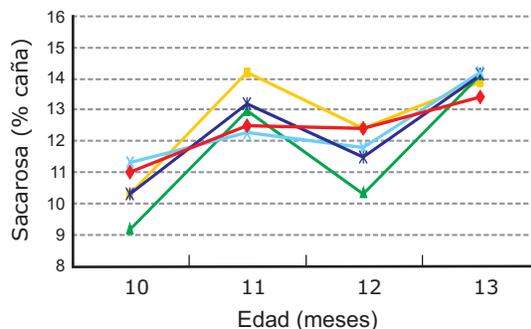


— CC 85-92 (Promedio) — CC 04-506 (R1) — CC 04-506 (R2)
— CC 04-506 (R3) — CC 04-506 (Promedio)



— CC 85-92 (Promedio) — CC 04-584 (R1) — CC 04-584 (R2)
— CC 04-584 (R3) — CC 04-584 (Promedio)

Figura 2. Curvas de maduración de las variedades destacadas en la plantilla del experimento con clones Cenicaña Colombia de la serie 2004 en Estado III. Incauca, hacienda Cachimbalito, suerte 22A, zona agroecológica 5H5. Siembra: 24 de marzo de 2007; cosecha: 20 de mayo de 2008.



— CC 85-92 (Promedio) — CC 04-536 (R1) — CC 04-536 (R2)
— CC 04-536 (R3) — CC 04-536 (Promedio)

Variedades del banco de germoplasma en Estado II (plantilla)

El experimento fue sembrado el 15 de marzo de 2007 en la suerte 42 de la hacienda Portobelo Perolino del Ingenio Risaralda, en un suelo Aranjuez (Entic Endoaquerts) de familia textural mezclada arcillosa sobre francosa, correspondiente a la zona agroecológica 25H5. La cosecha, programada para cuando el cultivo cumpliera los 15 meses de edad, se tuvo que adelantar debido a una quema accidental, de manera que tuvo lugar el 24 de abril de 2008 a los 13.3 meses de edad. Las variedades seleccionadas se sembrarán en Estado III.

En total se evaluaron 172 variedades del banco de germoplasma, así: 42 CC (serie 2000), 33 CC (2001), 7 CC (91), 37 CC (93), 15 CC (94), 10 CC (96), 4 CC (97), 10 CC (98), 11 CC (99), CCSP 89-43, CCSP 92-3191 y Q 137. Como testigo se empleó la variedad CC 85-92. Se utilizó un diseño experimental de bloques completos al azar con tres repeticiones, en parcelas de un surco de 5 m por variedad y distancia entre surcos de 1.65 m.

Las condiciones hidrológicas del experimento se presentan en la Figura 3. Las precipitaciones más altas ocurrieron en el mes 1 (abril 2007: 287 mm), el mes 2 (mayo 2007: 275 mm) y el mes 8 (noviembre 2007: 259 mm). No se aplicó riego alguno. A partir del mes 10 (enero 2008) se hicieron lecturas del nivel freático, que hasta el mes 12 se mantuvo a 200 cm de profundidad y que en el mes 13 subió a 52 cm, situación que afectó negativamente la cantidad de sacarosa de algunas variedades pero que permitió identificar variedades con probable tolerancia a condiciones húmedas que serán evaluadas con más detalle en el siguiente experimento en Estado III. Vale anotar que el lugar donde se desarrolló el experimento posee un conjunto de drenajes que pudo ayudar a mantener el nivel freático por debajo de los 200 cm de la superficie del suelo durante los primeros 12 meses del experimento.

El seguimiento de la maduración empezó a los 11 meses de edad y debido a la necesidad de adelantar la cosecha sólo se pudieron obtener dos datos adicionales a los 12 y 13.3 meses. Con los datos disponibles se elaboraron las curvas de maduración de las variedades, representadas por cuatro tendencias; cada variedad fue clasificada de acuerdo con la tendencia que más la representaba (Cuadro 2, Figura 4). En total fueron seleccionadas 47 variedades por la tendencia de maduración y la calificación agronómica a los 11 meses de edad (valor de la moda).

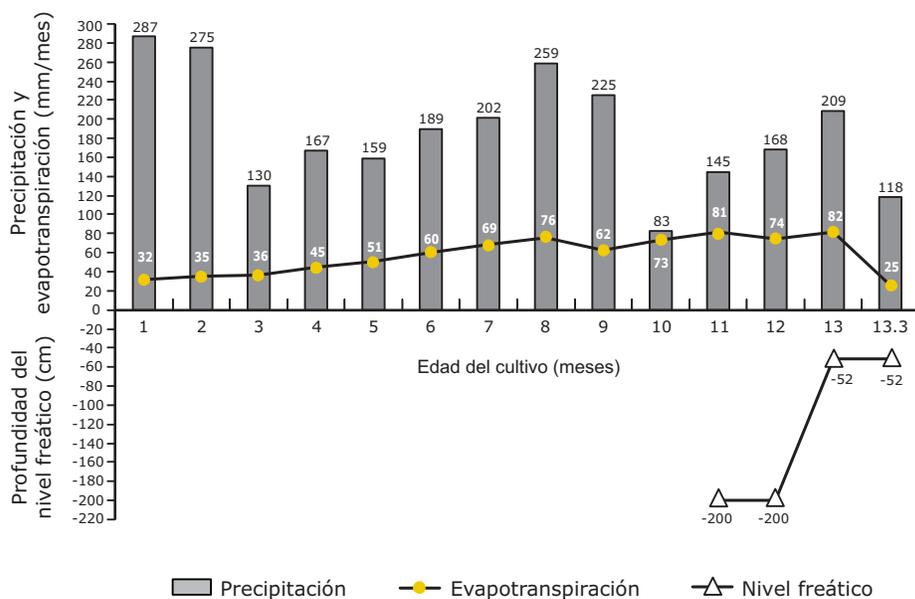


Figura 3. Condiciones hidrológicas del experimento con variedades del banco de germoplasma de Cenicaña en Estado II (plantilla). Ingenio Risaralda, hacienda Portobelo Perolino, suerte 42, zona agroecológica 25H5. Siembra: 15 de marzo de 2007; cosecha: 24 de abril de 2008.

Cuadro 2. Resultados de la evaluación de las variedades del banco de germoplasma de Cenciaña seleccionadas en Estado II. Hacienda Portobelo Perolindo del Ingenio Risaralda, suerte 42, zona agroecológica 25H5. Edad de cosecha: 13.3 meses.

| Variedad | Calificación agronómica ¹ | Sacarosa (% caña) | | | |
|--------------------|--------------------------------------|-------------------|----------|------------|--------------------------------------|
| | | 11 meses | 12 meses | 13.3 meses | Tendencia de maduración ² |
| CC 93-3826 | 1 | 13.9 | 16.2 | 14.0 | 1 |
| CC 01-1862 | 2 | 14.5 | 15.1 | 13.9 | 1 |
| CC 01-213 | 2 | 13.0 | 15.1 | 14.2 | 1 |
| CC 93-7510 | 2 | 13.4 | 15.4 | 14.9 | 1 |
| CC 01-1905 | 3 | 12.5 | 14.9 | 14.8 | 1 |
| CC 91-1555 | 3 | 14.4 | 15.8 | 14.1 | 1 |
| CC 92-3111 | 3 | 14.6 | 15.6 | 14.6 | 1 |
| CC 93-4183 | 3 | 13.4 | 15.1 | 15.4 | 1 |
| CC 01-1946 | 2 | 12.0 | 14.0 | 13.9 | 2 |
| CC 92-2311 | 2 | 13.5 | 13.7 | 14.6 | 2 |
| CC 93-4208 | 2 | 14.0 | 14.4 | 15.1 | 2 |
| CC 94-5215 | 2 | 12.6 | 15.2 | 14.7 | 2 |
| CC 94-5446 | 2 | 14.1 | 14.4 | 15.5 | 2 |
| CC 99-2282 | 2 | 12.3 | 14.5 | 14.0 | 2 |
| CC 99-2461 | 2 | 12.1 | 14.3 | 15.4 | 2 |
| CC 99-2538 | 2 | 11.8 | 12.9 | 13.9 | 2 |
| CC 00-3403 | 3 | 12.7 | 13.8 | 14.6 | 2 |
| CC 00-3614 | 3 | 14.4 | 15.2 | 14.6 | 2 |
| CC 00-4199 | 3 | 13.4 | 14.9 | 15.2 | 2 |
| CC 00-4207 | 3 | 12.0 | 12.7 | 14.4 | 2 |
| CC 00-4292 | 3 | 13.4 | 12.9 | 14.8 | 2 |
| CC 01-174 | 3 | 14.6 | 15.5 | 15.5 | 2 |
| CC 01-1817 | 3 | 14.2 | 15.6 | 15.5 | 2 |
| CC 01-1877 | 3 | 14.7 | 14.7 | 14.7 | 2 |
| CC 01-1884 | 3 | 12.9 | 13.6 | 14.3 | 2 |
| CC 01-1944 | 3 | 14.2 | 14.9 | 14.9 | 2 |
| CC 01-385 | 3 | 14.1 | 14.0 | 14.1 | 2 |
| CC 01-86 | 3 | 13.3 | 14.1 | 14.1 | 2 |
| CC 92-2965 | 3 | 13.5 | 14.2 | 14.7 | 2 |
| CC 93-3645 | 3 | 12.2 | 14.2 | 13.9 | 2 |
| CC 93-3801 | 3 | 13.2 | 14.6 | 14.6 | 2 |
| CC 93-3803 | 3 | 12.5 | 13.2 | 14.4 | 2 |
| CC 93-3817 | 3 | 13.8 | 14.9 | 15.1 | 2 |
| CC 93-3821 | 3 | 14.0 | 14.7 | 15.3 | 2 |
| CC 93-4076 | 3 | 14.4 | 15.4 | 16.1 | 2 |
| CC 93-4166 | 3 | 12.1 | 14.2 | 14.6 | 2 |
| CC 93-4181 | 3 | 13.2 | 14.2 | 14.6 | 2 |
| CC 93-4443 | 3 | 13.9 | 14.9 | 14.6 | 2 |
| CC 94-5267 | 3 | 13.4 | 14.9 | 14.7 | 2 |
| CC 96-6803 | 3 | 14.9 | 15.3 | 14.9 | 2 |
| CC 97-7104 | 3 | 14.7 | 14.8 | 14.7 | 2 |
| CC 97-7170 | 3 | 14.0 | 14.6 | 15.0 | 2 |
| CC 98-426 | 3 | 13.6 | 14.7 | 14.5 | 2 |
| CC 99-1929 | 3 | 15.0 | 15.5 | 14.5 | 2 |
| CCSP 92-3191 | 3 | 12.3 | 14.0 | 13.9 | 2 |
| CC 00-4517 | 3 | 14.3 | 14.1 | 14.3 | 3 |
| CC 00-3068 | 3 | 13.8 | 12.9 | 14.0 | 4 |
| CC 85-92 (testigo) | 2 | 12.9 | 14.3 | 13.4 | 2 |

1. Tendencia de maduración: ver tipo de tendencia en la Figura 4 de la página siguiente.

2. Escala de 1 a 5, donde: 1 es una planta de buen aspecto, 12 tallos/m, erectos, sin floración, buen deshoje, altura igual a la variedad testigo o superior, diámetro de 28-30 mm y hojas sanas; y 5 es una planta de baja altura, <10 tallos/m, volcados, con floración, mal deshoje y diámetro <26 mm.

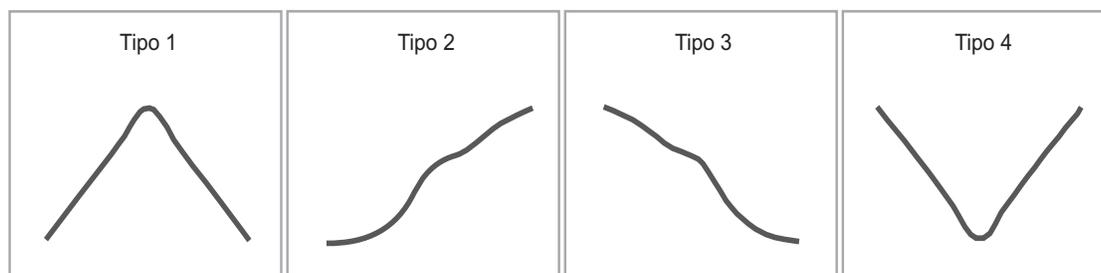


Figura 4. Tendencias representativas de las curvas de maduración de las variedades del banco de germoplasma de Cenicaña en Estado II (plantilla) de selección: datos de sacarosa a los 11, 12 y 13.3 meses de edad. Ingenio Risaralda, hacienda Portobelo Perolino, suerte 42, zona agroecológica 25H5. Siembra: 15 de marzo de 2007; cosecha: 24 de abril de 2008.

En general, las tendencias tipo 1 y tipo 3 no son deseables porque muestran que las variedades son afectadas por las condiciones de humedad relacionadas con niveles freáticos altos. La tendencia tipo 2 es ideal en tanto muestra tolerancia a las condiciones de humedad y, por tanto, un aumento de la sacarosa (% caña) directamente proporcional con la edad del cultivo. Finalmente, la tendencia tipo 4 es particular pues se presenta una reducción inicial de la sacarosa y luego un incremento, aunque aumentaron la precipitación (209 mm) y el nivel freático (52 cm).

Con tendencias de maduración tipo 2 se seleccionaron 37 variedades que presentaron porcentajes de sacarosa similares o mayores al testigo. La variedad CC 00-3068 fue la única seleccionada con tendencia tipo 4, mientras que la única con tendencia tipo 3 fue CC 00-4571 que presentó un comportamiento estable en los datos de sacarosa (% caña). Adicionalmente, ocho variedades con tendencia de maduración tipo 1 fueron seleccionadas por el porcentaje de sacarosa en caña y por las buenas características agronómicas en campo; su comportamiento corresponde al de variedades tempranas (Cuadro 2). El nivel del agua freática en el mes previo a la cosecha afectó negativamente la sacarosa (% caña) de algunas variedades y permitió identificar variedades con probable tolerancia a condiciones húmedas.

Conclusiones

- La incorporación del factor nivel freático facilitó la diferenciación de clones y variedades con mejor adaptación a las condiciones húmedas de suelo. El estudio de factores adicionales será de suma importancia en la diferenciación de variedades.
- En el Estado III, serie 2004, zona agroecológica 5H5, se destacaron en plantilla las variedades CC 04-439, CC 04-463, CC 04-506, CC 04-536 y CC 04-584.
- En el Estado II del experimento de evaluación del banco de germoplasma, zona agroecológica 25H5, se seleccionaron 47 materiales. La mayoría de ellos no fueron afectados por la alta precipitación, según las tendencias de maduración.
- Se espera que los materiales seleccionados ratifiquen su adaptación a las condiciones húmedas y pronto se tengan opciones con mejor productividad que los cultivados comercialmente.

Referencias bibliográficas

- Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (Cenicaña). 2008. Informe Anual 2007. Cenicaña. Cali. p.9-12.
- Gómez Enríquez, A.; Cruz Valderrama, R.; Torres, J.S.; Londoño, J.D.; Campo, A. 2007. Informe final. Macroproyecto de agricultura específica por sitio. Afinamiento y validación de los grupos de humedad. Contrato Colciencias-Cenicaña. Cód.: 2214-07-174-09. Cali, Cenicaña, 120p.
- Quintero Durán, R.; García Sánchez, A.; Cortés Lombana, A.; Muñoz Arboleda, F.; Torres, J.S.; Carbonell González, J.; Osorio, C.A. 2008. Grupos homogéneos de suelos del área dedicada al cultivo de la caña de azúcar en el valle del río Cauca (segunda aproximación). Cali, Cenicaña, 106 p. (Serie Técnica, No.37).

Características agronómicas de la caña de azúcar asociadas con las toneladas de caña por hectárea y la sacarosa (% caña)

Carlos Arturo Viveros V., Alberto E. Palma Z., Luis Orlando López Z. y Jorge I. Victoria K.*

Introducción

En la etapa inicial del proceso de selección clonal de variedades de caña de azúcar de Cenicaña (Estado I de selección) se evalúan aproximadamente cien mil plántulas en plantilla y primera soca con el criterio de elegir aquellas que sean iguales o superiores a las variedades testigo en cuanto a la producción de caña y sacarosa. En estos experimentos cada genotipo está representado por una planta, razón por la cual no se realizan determinaciones del tonelaje sino que se hace una selección indirecta con base en algunas características morfológicas y agronómicas asociadas con la productividad, como la altura de los tallos, el diámetro y la población o macollamiento.

De acuerdo con lo anterior, la eficacia de la selección indirecta puede aumentar en la medida que se precise mejor el conocimiento acerca de la naturaleza y la magnitud de las asociaciones existentes entre las características de interés y entre éstas y los indicadores de productividad.

Con el propósito de precisar dicho conocimiento se analizaron los datos de la plantilla y la primera soca de seis variedades de caña de azúcar cosechadas en nueve localidades del valle del río Cauca. Los objetivos del análisis fueron: (a) Estimar las correlaciones fenotípicas y las correlaciones genéticas de las variables altura de tallos, diámetro de tallos, población de tallos, clorofila, toneladas de caña por hectárea y sacarosa (% caña); (b) Descomponer la magnitud de las correlaciones fenotípicas y genéticas de la producción de caña por hectárea y sacarosa en función de las variables altura, diámetro, población y clorofila mediante análisis de sendero.

Materiales y métodos

Para el análisis se usaron los datos de evaluaciones agronómicas en plantilla y primera soca de experimentos sembrados con las variedades CC 84-75, CC 85-92, CC 93-3826, CC 93-3895, CC 93-4418 y CC 92-2198 en nueve localidades del valle del río Cauca (Cuadro 1) en donde se midieron a los 4, 6 y 8 meses del cultivo la altura de los tallos, el diámetro, la población o macollamiento y el contenido de clorofila (medidor SPAD 502); en la cosecha se determinaron las toneladas de caña producidas por hectárea (TCH) y la sacarosa (% caña) (López, *et al.*, 2008). Para estimar los coeficientes de las correlaciones fenotípicas y genéticas y para realizar los análisis de sendero se utilizó el software GENES versión 2.1 desarrollado por Cruz (2004).

Mientras la correlación fenotípica es el resultado de causas genéticas y ambientales, la correlación genética corresponde solamente a la porción genética que es la parte heredable de un carácter. Por su parte, el análisis de sendero consiste en desglosar el coeficiente de correlación en los efectos directos y los efectos indirectos de los caracteres involucrados sobre una variable básica, cuyas estimaciones son obtenidas por medio de ecuaciones de regresión; el estimador que mide las relaciones causa-efecto entre caracteres se denomina coeficiente de sendero (*path coefficient*), el cual mide la influencia directa de una variable sobre otra, independientemente de las demás. De acuerdo con Dewey y Lu (1959) citados por Vencovsky y Barriga (1992), el coeficiente de sendero es un coeficiente de regresión estandarizado.

Cuadro 1. Sitios experimentales donde se evaluaron seis variedades en plantilla y primera soca.

| Sitio | Ingenio | Hacienda, suerte | Ambiente o condición ¹ | |
|-------|-------------|------------------|-----------------------------------|---------------------|
| | | | Semiseco ² | Húmedo ³ |
| 1 | Providencia | Argelia, 358 | X | |
| 2 | Providencia | Cafetos, 6 | X | |
| 3 | Riopaila | Riopaila, 60-1 | | X |
| 4 | Manuelita | Cascajal, 45A | X | |
| 5 | Manuelita | Oriente, 24 | X | |
| 6 | Providencia | Marsella, 505A | X | |
| 7 | Providencia | Santa Lucía, 10 | X | |
| 8 | Sancarlos | El Cairo, 11 | X | |
| 9 | Carmelita | Rhin, 10 | | X |

1. Agrupación realizada en función del programa de selección de variedades de Cenicaña.
2. Déficit de humedad o excesos hasta de 400 mm/año + suelos con permeabilidad entre media y alta; excesos <200 mm/año + permeabilidad baja.
3. Exceso entre 400-600 mm/año + permeabilidad media a alta; exceso >600 mm/año + permeabilidad alta; exceso 200-600 mm/año + permeabilidad baja; exceso >600 mm/año + permeabilidad baja a media.

* Respectivamente: Ingeniero Agrónomo, M.Sc., Fitomejorador <cavivero@cenicana.org>; Matemático, M.Sc., Biometrista <aepalma@cenicana.org>; Ingeniero Agrónomo, Investigador Temporal en Fitomejoramiento <lolopez@cenicana.org>; Ingeniero Agrónomo, Ph.D., Director Programa de Variedades <jivictoria@cenicana.org>. Todos de Cenicaña.

Resultados y discusión

Se presentan a continuación las correlaciones fenotípicas y genéticas encontradas entre los distintos caracteres incluidos en el estudio, así como el análisis de sendero para TCH y sacarosa (% caña).

Correlaciones fenotípicas y genéticas

Al examinar cada uno de los caracteres de interés agronómico incluidos en el análisis se observaron niveles de correlaciones diferenciales entre ellos en cuanto a su sentido (positivo o negativo) y su magnitud, tanto para las correlaciones fenotípicas y genéticas como para las diferentes edades. Las correlaciones de las distintas variables asociadas con TCH resultaron mayores a la edad de ocho meses (Cuadros 2 y 3); por tal motivo, los resultados que se presentan a continuación corresponden al análisis de los datos obtenidos a esa edad. De acuerdo con las correlaciones genéticas, a los ocho meses de edad la variable TCH presentó una asociación altamente significativa y positiva con las variables altura, población y clorofila, mientras que la asociación con el diámetro fue altamente significativa pero negativa (Cuadro 3).

Las correlaciones genéticas resultaron ser mayores que las fenotípicas en magnitud y significancia; incluso, se llegó a detectar asociaciones significativas entre pares de variables que no fue posible hallar a través de las correlaciones fenotípicas. Lo anterior se explica por una influencia moderada de los factores ambientales y/o de los factores genéticos no aditivos. Resultados similares han sido registrados por muchos investigadores en otras especies alógamias y coinciden con las afirmaciones de Ceballos (2003), Cruz y Regazzi (1997) y Vencovsky y Barriga (1992) en el sentido de que las correlaciones fenotípicas tienen poco valor práctico, son riesgosas y pueden llevar a equivocaciones pues en ellas se incluye la asociación entre caracteres de naturaleza tanto genética como ambiental.

El análisis consistió en estimar las correlaciones fenotípicas y genéticas de las variables altura de tallos, diámetro, población o macollamiento, clorofila, toneladas de caña por hectárea y sacarosa (% caña), para luego medir la influencia directa de cada carácter agronómico sobre cada variable de productividad.

Las correlaciones genéticas fueron mayores que las fenotípicas en magnitud y significancia.

En las correlaciones genéticas, las TCH presentaron una asociación altamente significativa y positiva con las variables altura, población y clorofila a los ocho meses de edad. La asociación con el diámetro fue altamente significativa pero negativa.

Cuadro 2. Correlaciones fenotípicas y correlaciones genéticas entre variables agronómicas en caña plantilla de 6 meses de edad y toneladas de caña por hectárea (TCH) a la cosecha. Todos los ambientes.

| Correlaciones fenotípicas | | | | | Correlaciones genéticas | | | | |
|---------------------------|----------|-----------|-----------|----------|-------------------------|----------|-----------|-----------|----------|
| | Diámetro | Población | Clorofila | TCH | | Diámetro | Población | Clorofila | TCH |
| Altura | -0.24 ** | 0.10 ** | 0.37 ** | -0.03 | Altura | -0.29 * | 0.11 ** | 0.39 ** | -0.59 ** |
| Diámetro | | -0.81 ** | -0.27 ** | -0.17 ** | Diámetro | | -0.85 ** | -0.28 ** | -0.72 ** |
| Población | | | 0.20 ** | 0.03 | Población | | | 0.20 ** | 0.15 ** |
| Clorofila | | | | -0.02 | Clorofila | | | | -0.05 ** |

* Prueba de T significativa al 5%

** Prueba de T altamente significativa al 1%

Cuadro 3. Correlaciones fenotípicas y correlaciones genéticas entre variables agronómicas en caña plantilla de 8 meses de edad y toneladas de caña por hectárea (TCH) a la cosecha. Todos los ambientes.

| Correlaciones fenotípicas | | | | | Correlaciones genéticas | | | | |
|---------------------------|----------|-----------|-----------|----------|-------------------------|----------|-----------|-----------|----------|
| | Diámetro | Población | Clorofila | TCH | | Diámetro | Población | Clorofila | TCH |
| Altura | -0.44 ** | -0.06 ** | 0.33 ** | 0.30 ** | Altura | -0.48 ** | -0.05 ** | 0.35 ** | 0.56 ** |
| Diámetro | | -0.59 ** | -0.08 ** | -0.27 ** | Diámetro | | -0.61 ** | -0.08 ** | -0.95 ** |
| Población | | | 0.32 ** | 0.21 ** | Población | | | 0.33 ** | 0.89 ** |
| Clorofila | | | | 0.14 ** | Clorofila | | | | 0.43 ** |

* Prueba de T significativa al 5%

** Prueba de T altamente significativa al 1%

Análisis de sendero para TCH y sacarosa (% caña)

Se hicieron los análisis para todos los ambientes y para aquellos que se caracterizan por condiciones semisecas y por condiciones húmedas (Cuadro 1).

Análisis para todos los sitios. Como se muestra en el Cuadro 4, al desglosar las correlaciones genéticas de los caracteres altura, diámetro, población y clorofila en sus efectos directos (diagonal en negrillas) sobre las TCH y sus efectos indirectos (filas), se observó que la variable más importante fue la población –como lo confirma el efecto directo– y en segundo lugar, la altura, así las correlaciones genéticas fueran significativas para los distintos pares de variables. La clorofila, aunque presentó una correlación genética altamente significativa con las TCH, mostró un efecto directo muy bajo que se considera más bien un efecto indirecto de la población y la altura.

Con respecto a sacarosa, la única variable que mostró una correlación altamente significativa fue el diámetro del tallo (Cuadro 5). El análisis de sendero indicó que a medida que aumenta el diámetro se incrementa la sacarosa y, aunque no necesariamente las variedades gruesas tienen los mayores valores de sacarosa, se ratificó que los diámetros entre 25 mm y 30 mm (definidos para la selección de las variedades Cenicaña Colombia) son los deseables para obtener valores altos de sacarosa.

En un nuevo análisis de sendero sin incluir la clorofila se confirmaron los resultados anteriores (Cuadro 6). Los altos valores de correlación de la altura y la población con las TCH se debieron exclusivamente al sentido positivo de estas correlaciones. De acuerdo con lo anterior se recomendó a Cenicaña usar estas dos características como criterios de selección en el mejoramiento genético de caña de azúcar para obtener variedades de alta productividad de caña y prestar especial cuidado al diámetro como criterio de selección, pues aunque es negativo para TCH, está asociado positivamente con la sacarosa.

Análisis para ambientes semisecos (siete sitios) y ambientes húmedos (dos sitios). En el Cuadro 1 se indican los sitios agrupados según ambientes semisecos y ambientes húmedos. Los resultados del análisis de sendero para cada condición con respecto a las correlaciones de las variables altura, población y diámetro en relación con TCH y sacarosa se presentan en los Cuadros 7 y 8.

Cuadro 4. Efectos directos (en diagonal y negrilla) e indirectos (fuera de la diagonal) de cuatro caracteres agronómicos en las toneladas de caña por hectárea (TCH). Análisis de sendero con base en las correlaciones genéticas de seis variedades en plantilla, a los ocho meses de edad y en todos los ambientes.

| | Altura | Diámetro | Población | Clorofila | TCH |
|-----------|-------------|--------------|-------------|--------------|----------|
| Altura | 0.49 | 0.11 | -0.04 | -0.01 | 0.56 ** |
| Diámetro | -0.24 | -0.24 | -0.47 | 0.00 | -0.95 ** |
| Población | -0.03 | 0.15 | 0.78 | -0.01 | 0.89 ** |
| Clorofila | 0.17 | 0.02 | 0.26 | -0.02 | 0.43 ** |

Cuadro 5. Efectos directos (en diagonal y negrilla) y efectos indirectos (fuera de la diagonal) de cuatro caracteres agronómicos en la sacarosa (% caña). Análisis de sendero con base en las correlaciones genéticas de seis variedades en plantilla, a los ocho meses de edad y en todos los ambientes.

| | Altura | Diámetro | Población | Clorofila | Sacarosa (% caña) |
|-----------|-------------|-------------|-------------|--------------|-------------------|
| Altura | 1.38 | -0.95 | -0.09 | -0.37 | -0.03 |
| Diámetro | -0.66 | 2.00 | -1.04 | 0.90 | 0.39 ** |
| Población | -0.08 | -1.22 | 1.71 | -1.22 | 0.06 ** |
| Clorofila | 0.48 | -0.17 | 0.57 | -1.07 | -0.18 ** |

Cuadro 6. Efectos directos (en diagonal y negrilla) y efectos indirectos (fuera de la diagonal) de tres caracteres agronómicos en la sacarosa (% caña) y las TCH. Análisis de sendero con base en las correlaciones genéticas de seis variedades en primera soca, a los ocho meses de edad y en todos los ambientes.

| | Altura | Diámetro | Población | Sacarosa (% caña) | Altura | Diámetro | Población | TCH |
|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|----------|
| Altura | 0.42 | -1.05 | 0.41 | -0.22 ** | 0.56 | -0.20 | 0.28 | 0.64 ** |
| Diámetro | -0.28 | 1.58 | -0.92 | 0.38 ** | -0.37 | 0.30 | -0.64 | -0.71 ** |
| Población | 0.15 | -1.26 | 1.16 | 0.05 ** | 0.20 | -0.24 | 0.80 | 0.76 ** |

Cuadro 7. Efectos directos (en diagonal y negrilla) y efectos indirectos (fuera de la diagonal) de tres caracteres agronómicos en la sacarosa (% caña) y las TCH. Análisis de sendero con base en las correlaciones genéticas de seis variedades en primera soca, a los ocho meses de edad y en ambientes semisecos.

| | Altura | Diámetro | Población | Sacarosa (% caña) | Altura | Diámetro | Población | TCH |
|-----------|-------------|-------------|-------------|-------------------|-------------|--------------|-------------|----------|
| Altura | 0.42 | -1.30 | 0.50 | -0.37 ** | 0.21 | 0.03 | 0.30 | 0.55 ** |
| Diámetro | -0.31 | 1.75 | -1.00 | 0.44 ** | -0.16 | -0.04 | -0.59 | -0.80 ** |
| Población | 0.16 | -1.32 | 1.32 | 0.16 ** | 0.08 | 0.03 | 0.78 | 0.90 ** |

Cuadro 8. Efectos directos (en diagonal y negrilla) y efectos indirectos (fuera de la diagonal) de tres caracteres agronómicos en la sacarosa (% caña) y las TCH. Análisis de sendero con base en las correlaciones genéticas de seis variedades en plantilla, a los ocho meses de edad y en ambientes húmedos.

| | Altura | Diámetro | Población | Sacarosa (% caña) | Altura | Diámetro | Población | TCH |
|-----------|--------------|--------------|--------------|-------------------|-------------|-------------|-------------|----------|
| Altura | -6.39 | -0.25 | 6.62 | -0.02 | 2.05 | 0.05 | -0.27 | 0.83 ** |
| Diámetro | -0.45 | -3.59 | 4.59 | 0.55 ** | 0.14 | 0.66 | -0.88 | -0.07 |
| Población | 5.62 | 2.19 | -7.52 | 0.29 ** | -1.80 | -0.40 | 1.44 | -0.77 ** |

En la condición semiseca y en la primera soca, que es el corte donde se hace la selección, la población fue la característica más importante para incrementar las TCH, seguida por la altura, mientras que el diámetro presentó una asociación mediana con la sacarosa.

En la condición húmeda se analizaron los datos de la plantilla debido a que la soca se desarrolló en una situación climática que hizo que el suelo se asemejara a una condición semiseca. Así, en el análisis de los sitios húmedos y en plantilla se encontró que para obtener individuos de altas TCH se requiere seleccionar fundamentalmente por altura y que la población no se debe usar como criterio de selección pues la correlación de esta variable con TCH fue inversa (negativa); por tal motivo no se deben tener en cuenta clones con altas poblaciones de tallos. Con respecto a la sacarosa, el diámetro tuvo una correlación altamente significativa en los sitios húmedos pero fue un efecto indirecto de la población; es decir, clones de alta población tienen mayor sacarosa pero se debe tener cuidado en la selección por esta característica porque se pueden disminuir las toneladas de caña por hectárea.

Los resultados obtenidos para la condición húmeda son un primer intento de establecer criterios para la selección pues corresponden a información sólo de dos sitios experimentales; por tal motivo, deben ser confirmados mediante experimentos adicionales. No obstante, estos resultados tienen una doble importancia para el proceso de obtención de variedades para sitios húmedos; en primer lugar, se logró cuantificar el efecto directo de las variables implicadas en la producción de caña; en segundo lugar, se definió que para la obtención de variedades se requiere seleccionar individuos de mayor altura que la variedad testigo y con una población similar a la de ésta. Además, se confirmó que los diámetros de los tallos deben ser de valores intermedios, de tal manera que no afecten las TCH y permitan obtener altos valores de sacarosa (% caña).

En la condición semiseca y en la primera soca, la población fue la característica más importante para incrementar las TCH, seguida por la altura. El diámetro presentó una asociación mediana con la sacarosa.

En los sitios húmedos y en plantilla se encontró que para obtener individuos de altas TCH se requiere seleccionar fundamentalmente por altura y que la población no se debe usar como criterio de selección pues la correlación de esta variable con las TCH fue inversa (negativa). El diámetro tuvo una correlación altamente significativa con la sacarosa pero fue un efecto indirecto de la población; es decir, se debe tener cuidado en la selección por esta última característica porque se pueden disminuir las TCH.

La clorofila, aunque presentó una correlación altamente significativa con las TCH, no mostró un efecto directo en la producción de caña por hectárea en el análisis de sendero. Por tal razón se recomienda no tener en cuenta la clorofila como criterio de selección de variedades ni como elemento de análisis en los estimativos de producción.

Conclusiones y recomendaciones

1. La clorofila, aunque presentó una correlación altamente significativa con las TCH, no mostró un efecto directo en la producción de caña por hectárea en el análisis de sendero, lo cual demuestra que no es una variable causa. Por tal razón se recomienda no tener en cuenta la clorofila como criterio de selección de variedades ni como elemento de análisis en los estimativos de producción.
2. La población de tallos y la altura son criterios de selección adecuados para la obtención de clones de altas TCH en ambientes semisecos y en ambientes húmedos y se debe tener cuidado con los tallos gruesos porque el diámetro afecta significativamente la producción de caña por hectárea.
3. La sacarosa presenta una correlación altamente significativa con el diámetro del tallo. El análisis de sendero mostró que los diámetros entre 25 mm y 30 mm son adecuados para obtener valores altos de sacarosa.
4. Meditante el análisis de sendero se confirmó que en sitios de condición semiseca y en primera soca la característica más importante para seleccionar individuos con altas TCH es la población de tallos; u en segundo lugar, la altura de la planta.
5. En la obtención de variedades con altas TCH para sitios húmedos se requiere seleccionar individuos de mayor altura que la variedad testigo y con una población similar a la de ésta. Las poblaciones altas, aunque mejoran la sacarosa (% caña), reducen la producción de caña por hectárea.
6. De acuerdo con los resultados se recomienda a Cenicaña utilizar los criterios indicados en el proceso de selección de variedades, junto con los ya existentes, como parte de los cambios en la estrategia de mejoramiento varietal.

Referencias bibliográficas

- Ceballos, H. 2003. Genética cuantitativa y fitomejoramiento. Universidad Nacional de Colombia. Palmira. 524 p. (mimeografiado).
- Cruz, C.D. y Regazzi, A.J. 1997. Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético. Segunda edición. Editora UFV. Brasil. 390p.
- Cruz, C.D. 2004. Programa GENES. Versao Windows. Aplicativo computacional em genética e estatística. Editora UFV. Universidade Federal de Vicosa. Disponible en <www.ufv.br/dbg/genes/genes.htm>
- López, L.O.; Arce, C.A.; Victoria, J.I.; Isaacs, C.H. 2008. Validación de la zonificación agroecológica en función de la respuesta de las variedades de caña de azúcar. pp.4-71. En: Isaacs, C.H.; Victoria, J.I.; Arce, C.A.; López, L.O. Agricultura específica por sitio. Tercera fase. Informe técnico final. Contrato Colciencias-Cenicaña, cód. 2214-07-17409. Cenicaña, Cali, Colombia. 138 p.
- Vencovsky, R. y Barriga, P. 1992. Genética biométrica no fitomelhoramento. Sociedad Brasileira de Genética. 496 p.

Consideraciones acerca del desempeño operacional de las estaciones de clarificación y filtración

Nicolás Javier Gil Zapata*

Introducción

El proceso de clarificación del jugo de caña de azúcar tiene como objetivos primordiales remover la máxima cantidad de impurezas disueltas y suspendidas en el jugo e incrementar su pH, con el fin de minimizar la inversión de sacarosa en este proceso y en los posteriores. La efectividad de la clarificación determina la filtrabilidad del jugo en la estación de filtros –la cual influye en las pérdidas de sacarosa en cachaza–, al tiempo que interviene en la formación de incrustaciones en los evaporadores y en la composición de éstas. Las incrustaciones afectan el proceso y la frecuencia de limpieza de los equipos, así como la velocidad de cristalización de la sacarosa, especialmente por la presencia de gomas y pectinas que incrementan la viscosidad de las mieles, condición que influye en la cantidad de azúcar producido y en su calidad (morfología y color) (Doerthy *et al.*, 2002). Cualquier partícula en suspensión que permanezca en el jugo clarificado puede causar incrustaciones en el cristal de azúcar, de manera que el contenido de cenizas aumenta y la filtración en las refinerías se dificulta.

La filtración, por su parte, tiene dos funciones principales: la primera es la recuperación de la máxima cantidad de jugo filtrado arrastrado con los lodos para asegurar que el contenido de sacarosa en cachaza sea el más bajo posible; la segunda es la remoción del mayor porcentaje de material insoluble con la cachaza de forma que su presencia en el jugo filtrado sea mínima.

En el proyecto de “*Benchmarking* en clarificación y filtración” coordinado por el Programa de Procesos de Fábrica de Cenicaña se están documentando las prácticas seguidas por los ingenios colombianos en estas dos operaciones y las tecnologías adoptadas. A continuación se presentan algunas consideraciones acerca del desempeño operacional de las estaciones de clarificación y filtración formuladas con base en las experiencias de varios investigadores en distintos países y las observaciones hechas en la industria colombiana.

Estación de clarificación

Los factores que más influyen en la eficiencia de clarificación son la estabilidad en el flujo de jugo alcalizado que entra al clarificador, el pH del jugo y su temperatura, la correcta operación del tanque de evaporación instantánea (tanque flash) y el tipo de floculante, su dosis y calidad (Steindl, 1998).

Control de flujo

Los ingenios colombianos cuentan con un tanque de almacenamiento de jugo mezclado conocido como “tanque pulmón”, cuyo fin es amortiguar los cambios que se presentan en la cantidad de jugo que entra al clarificador causados tanto por los retornos que llegan al tanque de jugo mezclado como por oscilaciones leves en la tasa de molienda. La estrategia de control debe actuar sobre el flujo de jugo y no sobre su nivel en el tanque pulmón, pues esta última estrategia no funciona con variaciones en las corrientes de llegada a ese tanque (Meadows, 1996). Un control adecuado del flujo de jugo mezclado garantiza en buena parte el control adecuado del pH y la temperatura de este jugo.

Alcalización del jugo

El material particulado presente en el jugo diluido tiene carga negativa y su capa externa se encuentra formada por proteínas. La fuerza de repulsión electrostática entre estas partículas impide la floculación espontánea. La carga de estas partículas se mide a través del potencial Z, que es un indicativo de la estabilidad de dispersión de las partículas. En la etapa de alcalización, ya sea por medio de lechada de cal o sacarato de calcio, el potencial Z decrece hasta alcanzar su punto isoeléctrico, es decir, el punto en el cual para un determinado valor de pH la carga de las partículas es cero; ese punto corresponde al mejor valor para la floculación.

Existen tres formas de alcalización: total inicial, generalmente en jugo frío; total final en jugo en caliente; y fraccionada. En la industria colombiana, en donde prevalece la sulfitación del jugo, es recomendable hacer una adición fraccionada con el fin de evitar que el descenso que se produce en el pH a causa de la sulfitación sea de tal magnitud que el pH del jugo alcance valores por debajo de 5.0, lo cual incrementa la posibilidad de inversión de la sacarosa. La magnitud de la floculación inicial depende del grado de precipitación del fosfato de calcio, lo cual influye tanto en la turbiedad del jugo como en la velocidad de sedimentación de los lodos (Simpson, 1996).

* Ingeniero Químico, Ph.D. Ingeniero de Procesos Químicos, Cenicaña <njgil@cenicana.org>

En Australia, Doerthy *et al.* (2002) compararon la alcalización usando lechada de cal o sacarato de calcio en las formas de adición mencionadas. Encontraron que al encalar con sacarato de calcio la turbiedad en el jugo claro es hasta 50% menor que al encalar con lechada de cal. Las menores turbiedades con lechada de cal o sacarato de calcio se alcanzaron cuando se realizó encalado de manera fraccionada a 76 °C y 100 °C o cuando se encaló en caliente a 100 °C. Por otra parte, la velocidad inicial de sedimentación fue menor hasta un 15% y el volumen final de lodos fue mayor cuando se utilizó sacarato de calcio. Steindl (1998) recomienda preparar el sacarato de calcio usando una relación 1:1 entre la lechada de cal y la meladura con el fin de asegurar el más bajo volumen de lodos.

Las diferencias de comportamiento entre el sacarato y la lechada de cal son atribuidas a la solubilidad de la cal, mayor en sacarosa que en agua (Doerthy *et al.*, 2002); la alta concentración de calcio ocasiona la precipitación espontánea de finas partículas de fosfato de calcio. Estas partículas tienen mayor carga positiva por unidad de peso que aquellas que se forman cuando se usa lechada de cal, por lo tanto tienen mayor poder de neutralización, es decir, de eliminación de impurezas que conducen a una menor turbiedad del jugo (Doerthy *et al.*, 2002).

Control de temperatura del jugo y evaporación instantánea ('flasheo')

Es importante que la temperatura del jugo a la salida de los calentadores alcance valores entre 102 °C y 105 °C con el fin de asegurar la coagulación de las proteínas (Simpson, 1996). Las variaciones en la temperatura del jugo producirán gradientes de temperatura en el clarificador, los cuales causan que los lodos, en lugar de sedimentarse, presenten tendencia a subir (Steindl, R. 2008. Comunicación personal¹).

El jugo, antes de alimentar el clarificador, va a un tanque denominado *flash*; allí, dado que el jugo está a una temperatura mayor que la temperatura de ebullición, a la presión atmosférica se produce una evaporación instantánea. La turbulencia ocasionada por la evaporación instantánea remueve el aire que tiene el jugo. La presencia de bagacillo en el jugo clarificado está asociada con una inadecuada remoción de aire. La evaporación instantánea hace que la temperatura del jugo disminuya entre 2 °C y 3 °C por debajo de su valor inicial, temperatura apropiada para alimentar el clarificador. El área del tanque *flash*, la temperatura del jugo y su nivel en el tanque son los parámetros que se deben tener en cuenta para una adecuada operación de la estación de clarificación.

Floculantes

Las funciones de los floculantes son, entre otras, incrementar la velocidad de sedimentación, disminuir el volumen final de lodos mediante la producción de lodos más compactos y contribuir en la reducción de la turbiedad del jugo y en la filtrabilidad de los lodos (Simpson, 1996). Los dos criterios más importantes a la hora de escoger un floculante son su grado de hidrólisis y su peso molecular. El grado de hidrólisis corresponde al porcentaje de poliácridatos con respecto a las poliácridamidas presentes (Figura 1). Un grado de hidrólisis entre 27% y 30% asegura una adecuada velocidad de sedimentación y una baja turbiedad en el jugo claro (Figura 2).

En cuanto a la preparación del floculante, es importante observar que se debe realizar en agua libre de sólidos suspendidos, a temperatura entre 40 °C y 50 °C y pH alrededor de 8.0. Para asegurar su adecuada preparación es conveniente proporcionar aireación y permitir un tiempo de maduración de 4 horas.

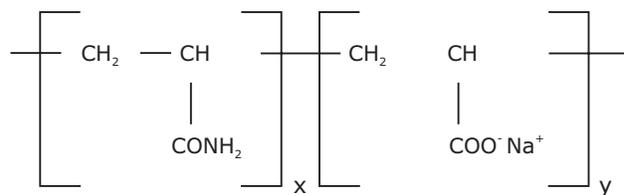


Figura 1. Composición química de una poliácridamida parcialmente hidrolizada.

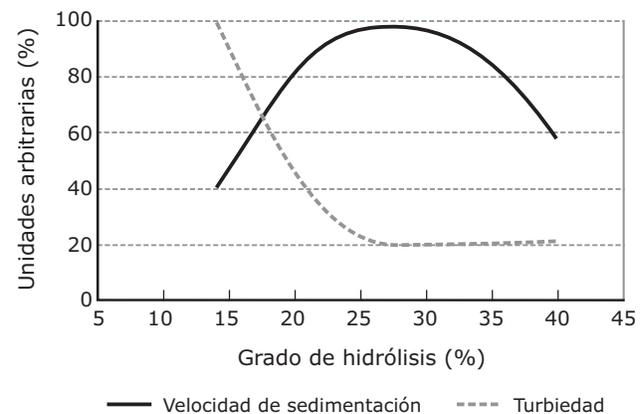


Figura 2. Influencia del grado de hidrólisis del floculante en la velocidad de sedimentación del jugo claro y en su turbiedad.

Fuente: Whayman, E. y Crees, O.L. 1974. Mechanistic studies of cane mud flocculation. v.3, p.1175-1182. En: Congress of the International Society of Sugar Cane Technologists, 15. Proceedings. Durban. South Africa. 13-29 June, 1974. ISSCT, Durban, South Africa.

1. Principal Research Fellow, Sugar Research and Innovation (SRI), Queensland University of Technology, (15-05-2008)

La vida útil del floculante varía en proporción directa con su concentración. Es aconsejable preparar el floculante con una concentración de 0.2% w/w a fin de asegurar una vida útil de al menos 16 horas.

Adicional a las variables mencionadas anteriormente, el diseño del clarificador influye de manera significativa en la turbiedad del jugo claro y en la densidad de los lodos. Es recomendable que el tiempo de residencia en el clarificador sea el más bajo posible. El clarificador ofrecido por el Sugar Research Institute, New Generation SRI Juice Clarifier, opera con tiempos no mayores de 25 minutos que contribuyen a prevenir la inversión de sacarosa y la destrucción de azúcares reductores, de manera que se evita la formación de color y/o ácidos orgánicos. Una caída de pH mayor a 0.4 unidades entre el jugo mezclado alcalizado y el jugo claro es un indicativo de la formación de ácidos orgánicos en el clarificador.

Estación de filtración

El desempeño de la estación de filtración está relacionado tanto con la calidad de la caña como con el trabajo del clarificador. En referencia al primer factor, Wright (2006) estableció que se requiere un área filtrante de 100 m² por tonelada de sólidos insolubles en el jugo diluido. En cuanto al segundo factor, en la medida en que los lodos sean más compactos la cantidad de jugo filtrado en los lodos será menor, lo cual facilitará el trabajo en la estación de filtros.

La resistencia específica de la torta que controla la velocidad de filtración y la eficiencia en la remoción de material insoluble son los conceptos en los cuales se basa la teoría de filtración (Lionnet, 1996). Partiendo de la base de que el área de filtros esté de acuerdo con el índice mencionado anteriormente y que los filtros estén operando adecuadamente, la resistencia especí-

fica puede decrecer mediante la preparación adecuada de los lodos. Esta preparación incluye la adición de bacillo (en una relación entre 0.3 a 0.4 con respecto al total de sólidos insolubles en el lodo), el control de pH (de manera tal que el pH del jugo filtrado varíe entre 7.5 y 8.0), la adición de floculante (sobre todo en el caso en el cual el manejo de los lodos se haga a través de bombas que destruyen los flóculos) y la adición de agua. La eficiencia en la remoción del material insoluble asegura que su presencia en el jugo filtrado sea baja, aliviando de esta forma el trabajo del clarificador y evitando la clarificación del jugo filtrado, práctica común en algunos ingenios colombianos.

La operación ineficiente de la estación de filtros es una de las causas de las llamadas pérdidas indeterminadas. Es importante que la temperatura, tanto de los lodos como del agua de dilución y lavado de los filtros, sea superior a 80 °C con el fin disminuir la actividad microbiana (Purchase, 2001). La caída de pureza entre el jugo claro y el jugo filtrado es una variable para establecer el grado de inversión de la sacarosa; vale anotar que esta diferencia de pureza está asociada con el tiempo de residencia de los lodos en el clarificador y también con las acciones realizadas en la estación de filtros. En la Figura 3 se presenta el promedio anual de este indicador en la industria azucarera de Sudáfrica entre los años 1990 y 2004. Los valores fluctúan desde 0.9 hasta 2.6 con un promedio de 1.5. Rein (2003) considera que esta diferencia debería ser idealmente menor que la unidad, pero en la práctica no mayor a dos unidades.

Durante los seguimientos realizados en el marco del proyecto de "Pérdidas indeterminadas" coordinado por el programa de Procesos de Fábrica de Cenicaña se ha identificado que la diferencia media de pureza entre jugo claro y jugo filtrado alcanza valores tan altos como 3.5 unidades en algunos ingenios colombianos.

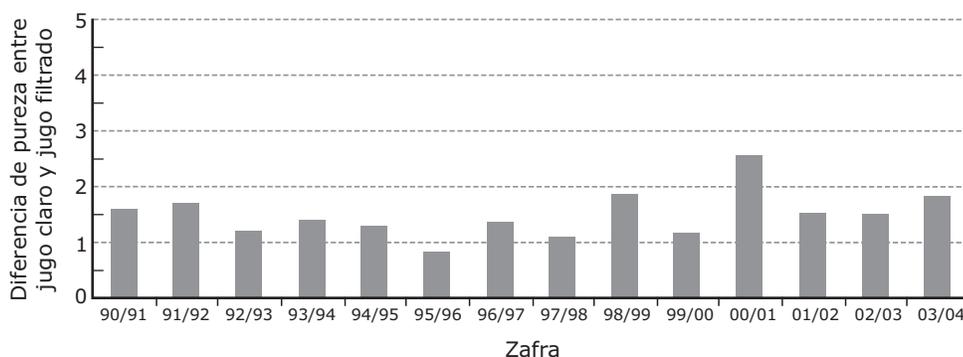


Figura 3. Valor promedio anual de la diferencia de pureza entre jugo claro y jugo filtrado en la industria azucarera sudafricana (1990-2004).

Fuente: Annual review of the milling season in Southern Africa en Proceedings of the South African Sugar Technologists' Association publicados entre 1990 y 2004.

El promedio mensual de esta diferencia de pureza en dos ingenios colombianos durante el período 2003 a 2008 se presenta en las Figuras 4 y 5. En el Ingenio No.1 el promedio fue de 3.0 unidades con un valor máximo de 4.6 unidades (Figura 4). En el Ingenio No.2 el promedio fue de 1.6 unidades y en 50 meses de los 70 evaluados la diferencia de pureza entre jugo clarificado y filtrado fue menor a dos unidades. El Ingenio No.2 emprendió en los últimos años un programa de seguimiento de la sacarosa que involucró balances de sacarosa por estación. Es importante determinar la pureza de los lodos que salen del clarificador con el fin de detectar la posible inversión de sacarosa.

Lionnet (1996) y Moor (2001) sugirieron la determinación de ácido láctico como indicativo de la actividad microbiana. Moor encontró incrementos considerables del ácido láctico desde valores de 300 mg por kg de materia seca en el jugo diluido hasta valores de 3000 mg por kg de materia seca en el jugo filtrado. Tomando en consideración que 1 ppm de ácido láctico representa una pérdida de aproximadamente 4 ppm de sacarosa (Lionnet, 1996), la cuantificación de la variación de ácido láctico en jugo claro y jugo filtrado es un camino para cuantificar la pérdida potencial de sacarosa en la etapa de filtración.

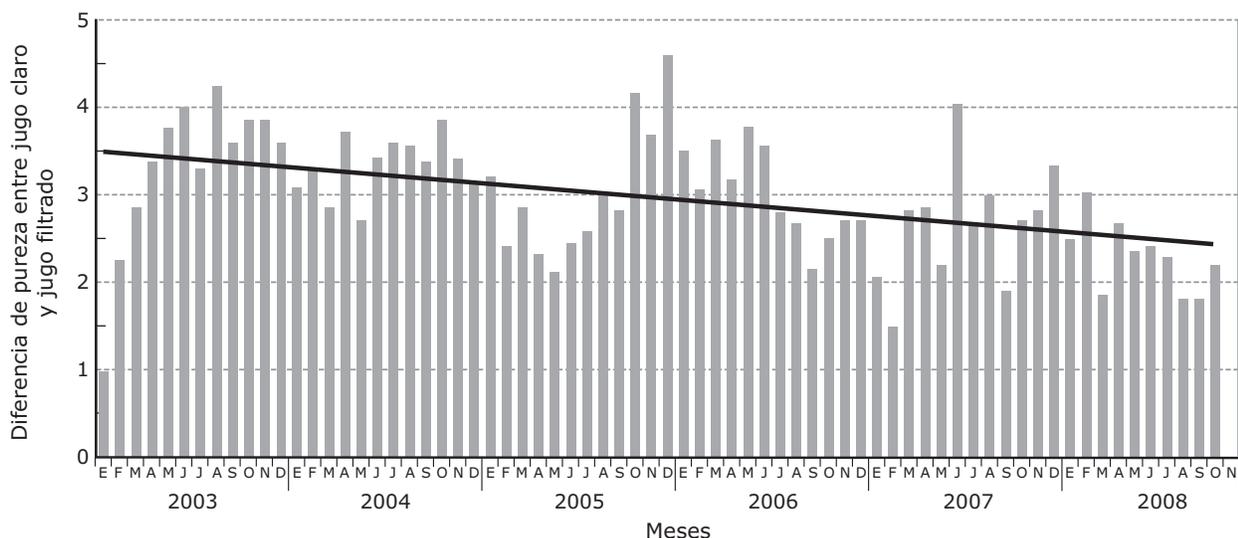


Figura 4. Valor promedio mensual de la diferencia de pureza entre jugo claro y jugo filtrado (2003-2008). Ingenio No.1, Colombia.

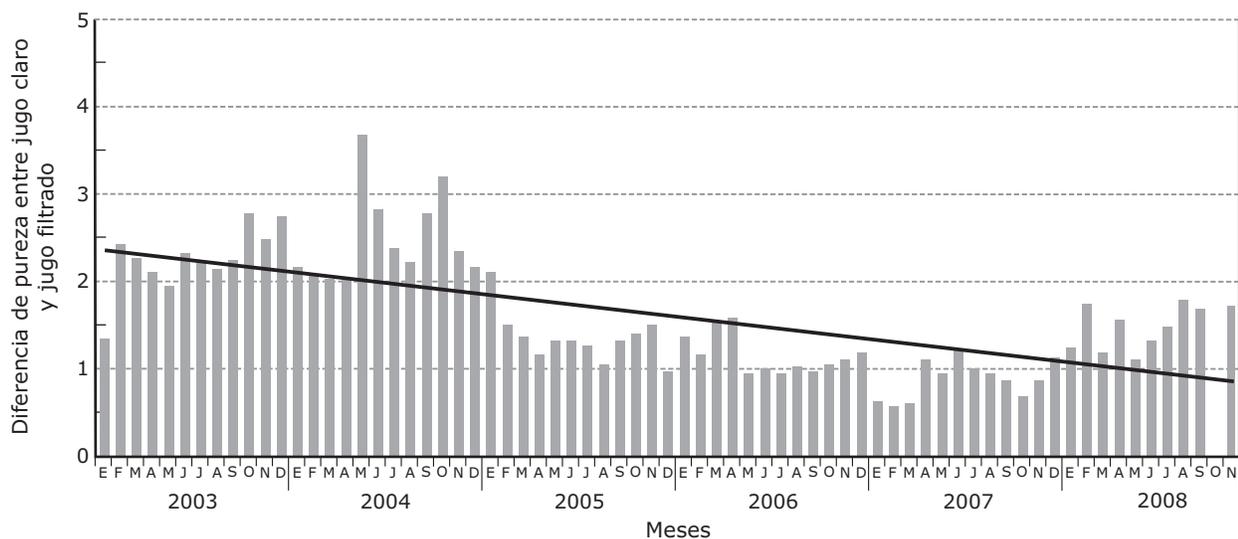


Figura 5. Valor promedio mensual de la diferencia de pureza entre jugo claro y jugo filtrado (2003-2008). Ingenio No.2, Colombia.

La presencia de ácido láctico no sólo es una evidencia de pérdida de sacarosa sino que además afecta la agotabilidad de la sacarosa –por su efecto melasi-génico– y el proceso metabólico de la levadura durante la fermentación. Perfiles de los contenidos microbiológicos de miel B, materia prima para la producción de etanol, realizados antes de un tratamiento térmico a 100 °C por espacio de 10 minutos y después de éste, mostraron una remoción del ciento por ciento de las bacterias ácido lácticas presentes en la miel (Cenicafña, 2008). Este resultado corrobora la importancia de mantener la temperatura de los materiales azucarados lo más alta posible para evitar la proliferación de estas bacterias.

Conclusiones y recomendaciones

- El proceso de clarificación está determinado por un conjunto de variables que interactúan sinérgicamente y que definen la calidad de los jugos que abandonan la estación. Una clasificación preliminar en orden de importancia podría señalar como de especial atención las variables siguientes: control del flujo de jugo, control del pH del jugo, control de temperatura y 'flasheo' del jugo, dosis de floculante, calidad y tiempo de maduración del mismo.
- La operación de filtración no sólo define la pérdida de sacarosa en la cachaza sino que también es causante de pérdidas de sacarosa por ataque de microorganismos. Estimando un flujo de jugo filtrado de 15% caña y un descenso en la pureza de este jugo de dos unidades con respecto al jugo clarificado, las pérdidas de sacarosa ocasionadas por este descenso en pureza equivalen a 0.2% sacarosa caña, el cual representa un 20% del promedio mensual de las denominadas pérdidas indeterminadas en la industria azucarera colombiana.
- La preparación adecuada de los lodos –que incluye la adición de bagacillo, control de pH, floculante y agua de lavado– garantizará la remoción de más del 90% de los sólidos insolubles con la cachaza y mejorará la calidad del jugo filtrado.

Referencias bibliográficas

- Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia (Cenicafña). 2008. Informe Anual 2007. Cenicafña. Cali. p.33.
- Doerthy, W.O.S.; Greenwood, J.; Pilaski, D.; Wright, P.G. 2002. The effect of liming: conditions in juice clarification. p.443-451. En: Australian Society of Sugar Cane Technologists, 24. Proceedings. Cairns. Australia. 29 April–2 May, 2002. ASSCT, Mackay, Australia.
- Lionnet, G.R.E. 1996. Mud filtration. p.280-282. En: South African Sugar Technologists' Association, 70. Proceedings. Durban and Mount Edgecombe. South Africa. 3-6 June, 1996. SASTA, Durban, South Africa.
- Meadows, D.M. 1996. Raw juice flow control, screening, heating and liming. p.272-276. En: South African Sugar Technologists' Association, 70. Proceedings. Durban and Mount Edgecombe. South Africa, 3-6 June, 1996. SASTA, Durban, South Africa.
- Moor, B.St.C. 2001. Handling of clarifier muds: loss management. p.390-391. En: Congress of the International Society of Sugar Cane Technologists, 24. Proceedings. Brisbane. Australia. 17-21 September, 2001. ISSCT, Mackay, Australia.
- Purchase, B.S. 2001. Losses caused by micro-organisms. p.379. En: Congress of the International Society of Sugar Cane Technologists, 24. Proceedings. Brisbane. Australia. 17-21 September, 2001. ISSCT, Mackay, Australia.
- Rein, P. 2003. Reducing losses in the filter station. Sugar Bulletin, 80 (4): 9-11.
- Simpson, R. 1996. The chemistry of clarification. p.267-271. En: South African Sugar Technologists' Association, 70. Proceedings. Durban and Mount Edgecombe. South Africa, 3-6 June, 1996. SASTA, Durban, South Africa.
- Steindl, R. 1998. Seminario "Clarificación y filtración" Convenio Asocaña-Sena-Cenicafña, Cali, 80 p.
- Wright, P.G. 2006. Modelling the effects of soil and other factors on mud filtration. p.507-517. En: Australian Society of Sugar Cane Technologist, 28. Proceedings. Mackay. Australia. 2-5 May, 2006. ASSCT, Mackay, Australia.

Determinaciones del poder calorífico y las cenizas en bagazo de caña de azúcar por espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR)

Ángela María Rosales S., Jesús E. Larrahondo y Edgar Fernando Castillo*

Introducción

El bagazo de caña de azúcar se ha convertido en una alternativa energética interesante a partir de la disminución real de combustibles fósiles en el mercado industrial. Este subproducto de la agroindustria azucarera es empleado como combustible en las calderas de los ingenios para generar el vapor que se utiliza en las turbinas y los turbogeneradores, los cuales finalmente suministran la energía eléctrica requerida por los distintos equipos industriales.

Existe una correlación estrecha entre las propiedades fisicoquímicas del bagazo de caña y su potencial como combustible. En evaluaciones realizadas por Cenicaña se observó una tendencia lineal entre el poder calorífico superior del bagazo y su contenido de cenizas, con buena correspondencia entre las variables ($R^2=0.91$) (Carvajal *et al.*, 2004). De acuerdo con lo anterior se puede afirmar que la autosuficiencia energética de una fábrica de azúcar depende en gran medida del poder calorífico del bagazo, material que según la experiencia colombiana debe cumplir los parámetros siguientes para ser apto como combustible: humedad, 48%-52%; cenizas, 2%-5%; fibra, 46%-49%; sacarosa, 2%-3% y grados brix, 3%-5%.

Con el propósito de facilitar las determinaciones del poder calorífico y las cenizas en el bagazo, se llevaron a cabo ensayos de calibración y validación de la técnica de espectroscopia de infrarrojo cercano (NIR) utilizando como métodos primarios o de referencia la bomba calorimétrica (poder calorífico) y la incineración (cenizas).

La espectroscopia NIR es un método analítico rápido, fácil de utilizar, no destructivo, fiable y versátil (Larrahondo *et al.*, 2001). En Cenicaña se utiliza para determinar sacarosa y brix en jugos de caña de azúcar; nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y silicio en tejido foliar de caña; y materia orgánica y boro en suelos.

La importancia de las determinaciones del poder calorífico y las cenizas en el bagazo está dada por las variaciones que presenta este material en su composición química al cambiar de una región a otra e incluso en la misma región, así como entre variedades de caña. Con base en ensayos realizados en distintos países, Spencer y Meade (Manohar *et al.*, 1977) repor-

tan valores de poder calorífico que oscilan entre 8200 BTU/lb y 8400 BTU/lb de bagazo seco y entre 4550 BTU/lb y 4660 BTU/lb de bagazo húmedo. Por su parte, Acosta (1995) confirma las diferencias con datos reportados en México (7668 BTU/lb), Cuba y Estados Unidos (8300-8400 BTU/lb, bagazo seco y libre de cenizas analizado con bomba calorimétrica) y Sudáfrica (8294-8487 BTU/lb).

En relación con los cambios en el poder calorífico inducidos por el tipo de cosecha, Atchinson (Manohar *et al.*, 1977) muestra una mayor adherencia de sólidos en la caña cosechada mecánicamente, lo cual aumenta su nivel de cenizas con respecto a la caña cosechada de forma manual y hace que el bagazo presente una disminución en su valor calorífico.

Metodología

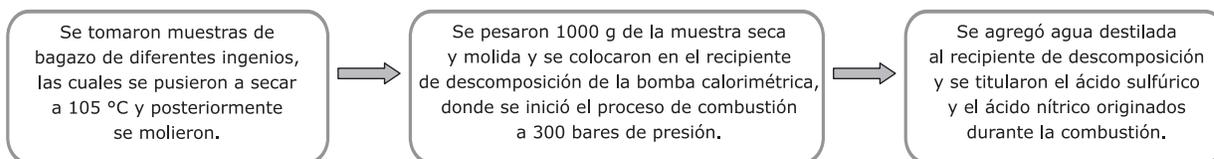
Para estimar la composición química y la cuantificación de un constituyente determinado se requieren múltiples calibraciones previas que exigen un conjunto amplio de muestras representativas de una misma población, la colección de sus espectros, el análisis de las muestras con un método primario o de referencia confiable, el desarrollo de ecuaciones de calibración que relacionen los datos espectrales con los resultados del método de referencia y la validación de dichas ecuaciones con otras muestras de la misma población general pero que no formen parte del set de calibración.

Así, para determinar el poder calorífico y las cenizas en bagazo de caña de azúcar mediante NIR (equipo Foss NIR Systems 6500) se analizaron muestras de bagazo de diferentes ingenios y provenientes de cañas cultivadas en suelos distintos y condiciones climáticas diferentes. Algunas muestras se trataron con adiciones de materia extraña mineral (suelo) y vegetal (tejido foliar). Como métodos de referencia se utilizaron la bomba calorimétrica (marca PARR, ref.1261) para la determinación del poder calorífico y la incineración para la determinación de las cenizas.

La metodología experimental se presenta en las Figuras 1 y 2. Para relacionar los datos espectrales y los datos de referencia se utilizó el software Vision® en sus funciones de análisis con el modelo de mínimos cuadrados parciales (PLS) y el modelo de regresión lineal múltiple (MLR).

* Respectivamente: Tecnóloga Química y estudiante de Química <amrosales@cenicana.org>; Químico, Ph.D., Químico Jefe <jelarrah@cenicana.org>; Ingeniero Químico, Ph.D., Director Programa de Procesos de Fábrica <efcastillo@cenicana.org>. Todos de Cenicaña.

Poder calorífico mediante bomba calorimétrica



Cenizas por incineración

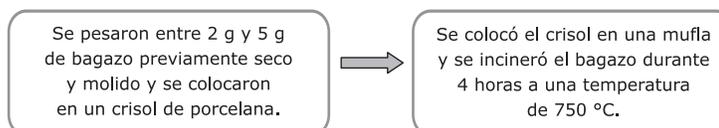


Figura 1. Esquema metodológico para la determinación del poder calorífico (bomba calorimétrica) y las cenizas (incineración) en bagazo de caña de azúcar. Método primario de referencia para calibración de NIR.

Poder calorífico y cenizas mediante espectroscopia NIR

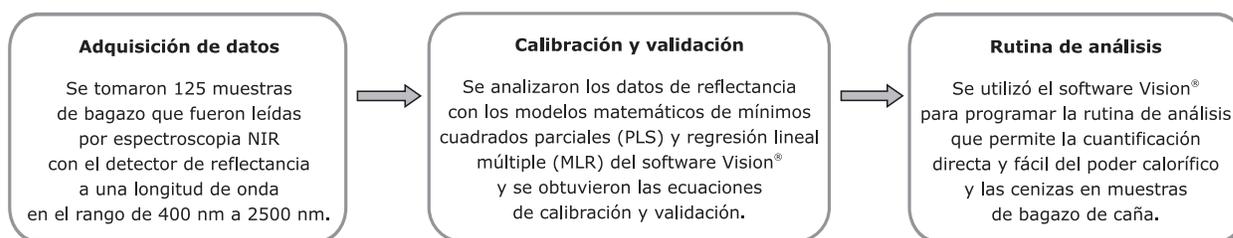


Figura 2. Esquema metodológico para la determinación del poder calorífico y las cenizas en bagazo de caña de azúcar mediante espectroscopia NIR.

La espectroscopia NIR es un método analítico rápido, fácil de utilizar, no destructivo, fiable y versátil, que se presenta como una alternativa confiable para la determinación del poder calorífico y las cenizas en bagazo de caña de azúcar.

En Cenicaña se utiliza el NIR para determinar sacarosa y brix en jugos de caña de azúcar; nitrógeno, fósforo, potasio, calcio, magnesio y silicio en tejido foliar de caña; y materia orgánica y boro en suelos.

Resultados

Los modelos de PLS y MLR mostraron muy buena correlación entre los valores determinados por NIR y los valores obtenidos mediante el método primario, por lo cual se utilizaron las dos curvas de calibración hechas por ambos métodos en la construcción de la rutina con NIR.

Para el análisis de regresión PLS se aplicó la segunda derivada en segmentos de 10 nm, en rangos de longitud de onda escogidos (434-550 nm, 1380-1462 nm, 1880-2000 nm). Con este tratamiento estadístico se alcanzó un coeficiente de determinación elevado ($R^2=0.82$) y un error estándar de calibración bajo (SEC=152.33), el cual se reflejó en la buena correlación entre los datos NIR y el método primario (Figura 3).

La curva de calibración obtenida por el MLR mostró también una buena correlación entre el método primario y el NIR. En la Figura 4 puede notarse que los puntos de la curva se encuentran muy poco dispersos en relación con la recta de regresión y alcanzan un coeficiente de determinación bueno ($R^2=0.87$), con un error estándar de calibración aceptable ($SEC=176.1144$).

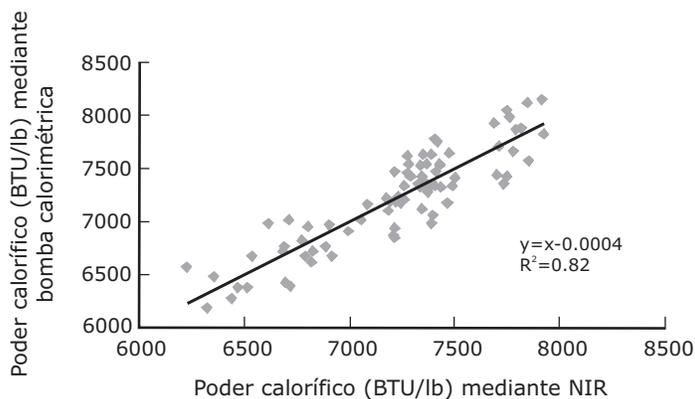


Figura 3. Curva de calibración para la determinación del poder calorífico en bagazo de caña mediante NIR. Modelo matemático de mínimos cuadrados parciales (PLS).

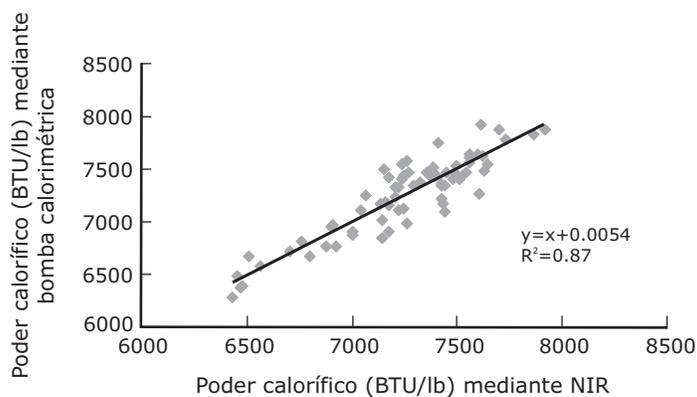


Figura 4. Curva de calibración para determinación del poder calorífico en bagazo de caña mediante NIR. Modelo matemático de regresión lineal múltiple (MLR).

En la cuantificación del porcentaje de cenizas en bagazo también se encontró una buena correlación entre el método primario y el NIR con ambos modelos de análisis (Figuras 5 y 6). En el modelo de MLR se aplicó la primera derivada y la curva de calibración permitió obtener una buena correlación estadística ($R^2=0.95$; $SEC=0.9753$). Los datos estadísticos de la calibración se presentan en el Cuadro 1.

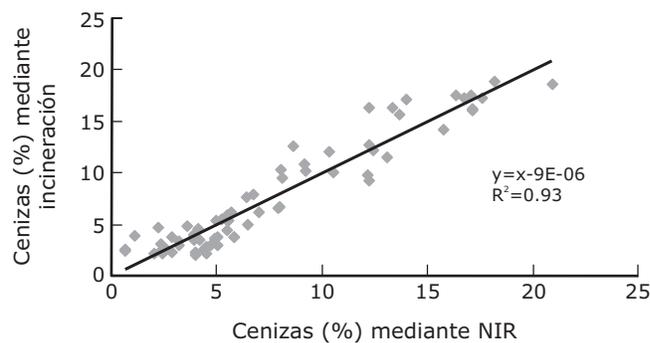


Figura 5. Curva de calibración para la determinación de cenizas en bagazo de caña mediante NIR. Modelo matemático de mínimos cuadrados parciales (PLS).

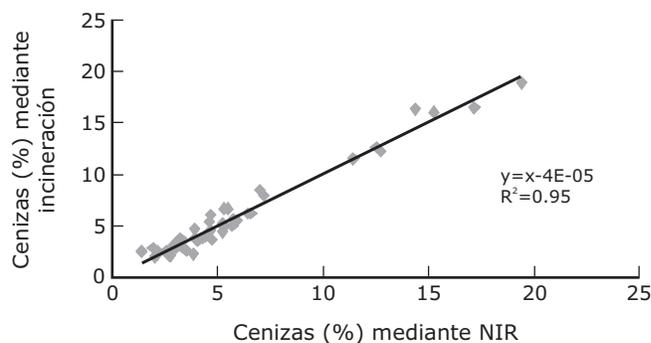


Figura 6. Curva de calibración para la determinación de cenizas en bagazo de caña mediante NIR. Modelo matemático de regresión lineal múltiple (MLR).

Cuadro 1. Datos estadísticos de la calibración para la determinación del poder calorífico y las cenizas en bagazo de caña de azúcar mediante espectroscopia NIR.

| Constituyente | Modelo matemático ¹ | Número de factores | Error de calibración (SEC) | Coefficiente de correlación (R^2) |
|------------------|--------------------------------|--------------------|----------------------------|---------------------------------------|
| Poder calorífico | PLS, 1ra. derivada | 2 | 152.33 | 0.82 |
| | MLR, 1ra. derivada | 8 | 176.11 | 0.87 |
| Cenizas | PLS, 1ra. derivada | 5 | 1.3969 | 0.93 |
| | MLR, 1ra. derivada | 8 | 0.9753 | 0.95 |

1. PLS: mínimos cuadrados parciales; MLR: regresión lineal múltiple.

Para la validación se utilizó la opción “predicción” del software Vision®, que permitió ajustar la pendiente y el intercepto. De esta manera se obtuvieron las curvas de validación para determinar el poder calorífico y las cenizas en bagazo, con el coeficiente de determinación y el error de predicción (SEP) respectivos. Las curvas se presentan en las Figuras 7 y 8; los datos estadísticos de la validación se muestran en el Cuadro 2.

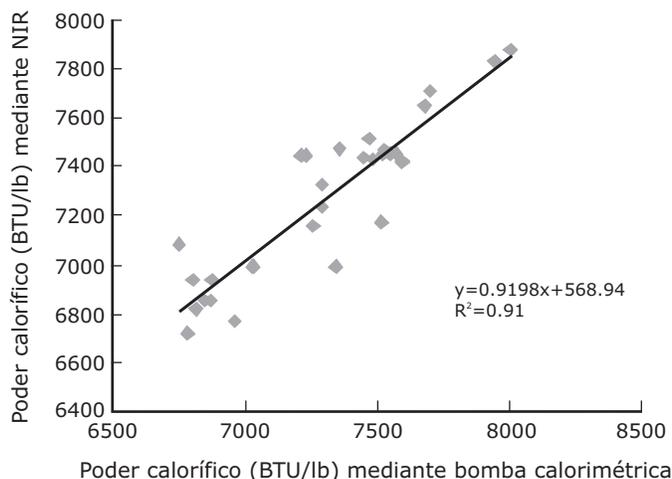


Figura 7. Curva de validación para la determinación del poder calorífico en bagazo de caña mediante NIR. Modelo matemático MLR.

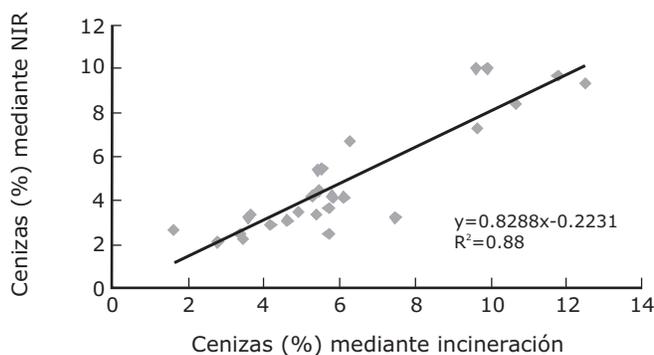


Figura 8. Curva de validación para la determinación de cenizas en bagazo de caña mediante NIR. Modelo matemático MLR.

Cuadro 2. Datos estadísticos de la validación para la determinación del poder calorífico y las cenizas en bagazo de caña de azúcar mediante espectroscopia NIR.

| Constituyente | Modelo matemático ¹ | Error de predicción (SEP) | Coefficiente de correlación (R ²) |
|------------------|--------------------------------|---------------------------|---|
| Poder calorífico | MLR, 2da. derivada | 177.54 | 0.91 |
| | PLS, 2da. derivada | 187.4 | 0.89 |
| Cenizas | PLS, 1ra. derivada | 1.67 | 0.88 |
| | PLS, 2da. derivada | 2.17 | 0.80 |

1. PLS: mínimos cuadrados parciales; MLR: regresión lineal múltiple.

Conclusiones

- La técnica NIR es una buena herramienta para el análisis del bagazo de caña de azúcar. Requiere un tratamiento mínimo de la muestra y es menos dispendiosa que los análisis tradicionales.
- Las curvas de calibración y validación que se elaboraron por espectroscopia NIR para la determinación del poder calorífico y cenizas en el bagazo mostraron una buena correlación con las determinaciones mediante la bomba calorimétrica y por incineración, por lo cual se presenta la tecnología NIR como una alternativa rápida y confiable para la determinación de estos constituyentes del bagazo de caña de azúcar.
- Las cenizas que se adhieren al bagazo son un indicador importante de los niveles de materia extraña mineral en la caña y resultan de fácil determinación mediante la espectroscopia NIR.
- Los valores de poder calorífico en las muestras de bagazo analizadas oscilaron entre 6500 BTU/lb y 7900 BTU/lb, cifras muy cercanas a las establecidas en ingenios de otros países. Los valores de cenizas variaron entre 2% y 5% de acuerdo con las condiciones climáticas y de cosecha de la caña.
- El valor calórico del bagazo de caña es relativamente bajo al ser comparado con otros combustibles fósiles como el carbón (10500-13000 BTU/lb). No obstante, constituye un potencial energético valioso, especialmente en países donde no se tiene una disponibilidad significativa de combustible y existen grandes productores de caña de azúcar.

Referencias bibliográficas

- Acosta Cueto, J. 1995. La eficiencia en la caldera quemando bagazo. *Internat. Sugar Journal*. v97, No.1158 (june):249-251, 288-290.
- Carvajal, A.; Gómez, A.; Briceño, C.O. 2004. Efecto de las cenizas en el poder calorífico superior del bagazo de la caña de azúcar. *Carta Trimestral*. v26, No.4 (octubre-diciembre): 10-12.
- Larrahondo, J.E.; Palau, F.J.; Ramírez, C. 2001. *Espectroscopia de Infrarrojo Cercano (NIR). Principios generales. Determinación de nitrógeno en tejido foliar de caña de azúcar: calibración y validación del equipo Bran&Luebbe, modelo InfraAlyzer 500.* Cenicafca, Cali, Colombia. 29p. (Serie Procesos Industriales No.1)
- Manohar Rao, P.J., 1977. Industrial utilization of sugar cane and its co-products. *Internat. Group Consultants*. New Delhi. pp. 37-38.



SEÑOR CAÑICULTOR

Si cambia de dirección postal, por favor, infórmenos. Sólo así podremos continuar enviándole esta publicación al lugar correcto.

Remita sus datos actualizados incluyendo: nombres y apellidos, cédula de ciudadanía, dirección postal y de correo electrónico, teléfono, fax.

Rte/ Servicio de Cooperación Técnica y Transferencia de Tecnología
Cenicaña
Calle 58 norte N° 3BN-110
Cali, Colombia

buzon@cenicana.org



Antes de traer

variedades al Valle del Cauca procedentes de otros lugares de Colombia o del exterior, comuníquese con Cenicaña.

El material vegetal debe permanecer en cuarentena para evitar posibles problemas sanitarios que pongan en peligro la productividad de la industria azucarera.

Establezca contacto en Cenicaña con Jorge Ignacio Victoria K. <jivictoria@cenicana.org>

Tarifa postal reducida
No. 2008 -129
Servicios Postales
Nacionales S.A.
Vence 31 dic. 2008

www.4-72.com.co

472
LA RED POSTAL DE COLOMBIA

► Línea de Atención al Cliente Nacional ◀
01 8000 111210

Sugerencias, quejas, reclamos y felicitaciones

abrimos un canal que mejora nuestra comunicación

www.cenicana.org • teléfono (57) (2) 687 66 11 • fax 260 78 53