

# Medición experimental y evaluación económica del consumo de combustible en equipos de transporte de caña

Jorge Eduardo Bravo, Alejandro Estrada B., Adolfo León Gómez P., Camilo H. Isaacs E., Pedro Wirley Castro F.\* y Litzman Bejarano R.\*\*

## Introducción

El objetivo general de los proyectos coordinados por Cenicaña en el sector azucarero en relación con el sistema de corte de caña, alce, transporte y entrega de la materia prima a la fábrica (CATE) es mejorar los estándares tecnológicos y la logística del sistema para disminuir los costos de producción y obtener mejoras económicas en el sector.

De acuerdo con lo anterior, se trabaja en el diseño y la construcción de un nuevo prototipo de tren de vagones de transporte de caña que involucre la reducción del peso de éstos con respecto a los vagones utilizados actualmente, con la hipótesis de que la reducción de peso de los vagones producirá un ahorro considerable de combustible del vehículo motor del tren (si se transportara la misma cantidad de caña) o una disminución de los costos logísticos de cosecha (si el ahorro en peso por menos acero es reemplazado por caña adicional transportada).

En este documento se presentan los resultados experimentales encontrados para la relación entre el peso transportado y el consumo de combustible para un tren cañero en un ingenio piloto. A partir de las relaciones entre el peso transportado y el consumo de combustible se tiene una proyección de ahorro de aproximadamente el 5% en el consumo de combustible, lo cual valida los resultados arrojados por el modelo teórico desarrollado por Ascuntar (2008).

## Aspectos metodológicos y desarrollo del experimento

A continuación se presenta la descripción general de las pruebas de consumo de combustible y la estructura de costos utilizada para la evaluación económica.

### Pruebas de consumo de combustible

Se realizaron dos pruebas con diferentes configuraciones de trenes de vagones de transporte utilizando vagones HD 12000 y un tractor CASE 9230, este último instrumentado con un medidor de flujo de combustible AIC-888 (con 1% de precisión de lectura, 800 pulsos por litro de flujo de combustible y repetibilidad del 0.2% de la lectura), un dinamómetro de tiro, un registrador digital dinámico de microdeformaciones y un equipo de posicionamiento global GPS. Con dicha instrumentación se recolectaron datos de consumo instantáneo de combustible, fuerza en el tiro, velocidad del tren y tiempo de los diferentes eventos en las pruebas.

- **Prueba No. 1:** Para cinco configuraciones de trenes de transporte (Cuadro 1) se recolectaron datos durante un circuito interno en el ingenio a fin de obtener información con cinco pesos remolcados diferentes. La longitud del circuito interno fue de 4308 metros y se realizaron dos ciclos de muestreo por cada configuración del tren. El tiempo de cada ciclo de muestreo fue de cuatro minutos aproximadamente.
- **Prueba No. 2:** En el Cuadro 2 se presentan las dos configuraciones de trenes de transporte evaluadas en esta prueba. Se tomaron datos para un ciclo completo de cosecha que se inició con la salida del tren vacío de las instalaciones del ingenio, el tránsito en carretera nacional pavimentada, el tránsito en carretera secundaria destapada y pavimentada, el cargue de caña larga con tiro directo con alzadora y el regreso del tren lleno hasta el ingenio. La longitud del ciclo completo de cosecha fue de 40 kilómetros y tardó 1 hora y 55 minutos.

Cuadro 1. Configuraciones de trenes de vagones de transporte de caña utilizados en la prueba No.1.

Tren	Vagones (No.)	Estado del tren	Peso remolcado (kg)
1	4	Cargado con caña larga	79,040
2	3	Cargado con caña larga	58,810
3	2	Cargado con caña larga	39,250
4	4	Vacío	35,570
5	3	Vacío	26,430

\* Ingeniero Mecánico, Investigador Temporal <jbravo@cenicana.org>; Ingeniero Agroindustrial, Ingeniero de Logística <aestrada@cenicana.org>; Ingeniero Mecánico, M.Sc., Asesor en Procesos Mecánicos <algomez@cenicana.org>; Ingeniero Agrónomo, Jefe Servicio de Cooperación Técnica y Transferencia de Tecnología <chisaacs@cenicana.org>; Ingeniero Mecánico, Investigador Temporal <pwcastro@cenicana.org>. Todos de Cenicaña.

\*\* Ingeniero Mecánico, Jefe de Cosecha del Ingenio Pichichí <lbejarano@ingeniopichichi.com>

Cuadro 2. Configuraciones de trenes de vagones de transporte de caña utilizados en prueba No.2.

Tren	Vagones (No.)	Estado del tren	Peso remolcado (kg)
1	4	Cargado con caña larga	73,600
2	4	Vacío	35,610

### Evaluación económica

Con precios del año 2009 se hizo la valoración del costo de operación del tractor utilizado en las pruebas de transporte de caña de acuerdo con la siguiente estructura de costos: suministros, reparaciones, combustible, lubricantes, llantas y operario. Se analizaron tres casos de operación: (1) Tren de vagones actual (referencia); (2) Reducción de 10% en el peso del tren de vagones; (3) Reducción de 10% en el peso del tren vagones y aumento de 10% en el peso de la caña transportada.

### Resultados

#### Consumo de combustible

- Prueba No. 1:** Los resultados de la medición instantánea del consumo de combustible muestran el efecto del peso remolcado en el consumo de combustible del tractor (Figura 1). En las cinco configuraciones de trenes se observó un patrón similar de la dinámica de consumo de combustible en el tiempo; además, se observó que a medida que aumentó el peso transportado también fue mayor el consumo instantáneo de combustible del tractor. El consumo de combustible en ralentí (tren vacío) para cada ciclo de muestreo sólo se tuvo en cuenta al inicio de la prueba.

En la Figura 2 se muestra el análisis del efecto de la velocidad de tránsito en el consumo de combustible según el peso

remolcado. Las ecuaciones lineales obtenidas permiten predecir el consumo de combustible para un peso remolcado determinado en eventos con velocidad y consumo de combustible constantes, de modo que se minimiza el efecto de la intervención del tractorista en la evaluación. Se confirmaron las observaciones acerca del efecto del peso remolcado en el consumo de combustible que se habían mostrado en la Figura 1; además, se determinó que a menor velocidad de tránsito fue menor el consumo de combustible del tractor. Vale anotar que al disminuir la velocidad de tránsito se reduce también el número de ciclos de transporte que puede realizar el equipo en un período determinado.

Los valores de consumo de combustible obtenidos mediante las ecuaciones lineales indicadas en la Figura 2 fueron ordenados a fin de estimar el ahorro de combustible que se puede lograr mediante la reducción del peso remolcado. Los resultados se muestran en la Figura 3 para dos velocidades de tránsito y reducciones del peso entre 5-20%.

Finalmente, con los datos experimentales de consumo de combustible y fuerza de tiro se obtuvo

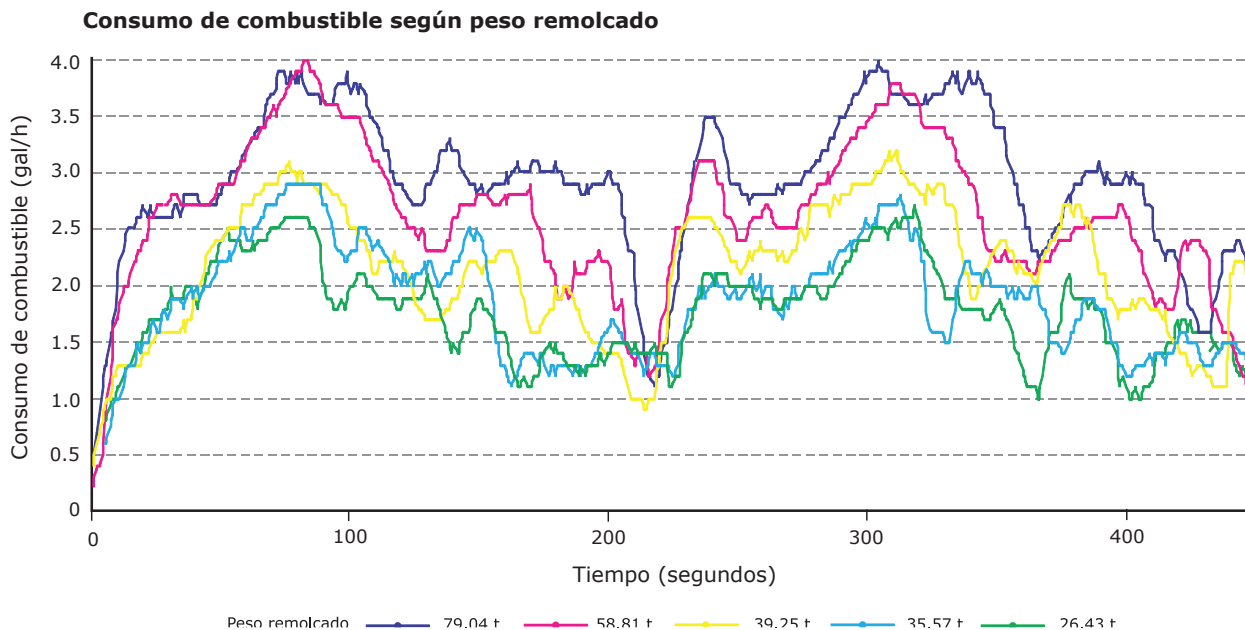


Figura 1. Medición experimental del consumo instantáneo de combustible según el peso remolcado. Prueba No. 1.

la energía invertida por el tractor para remolcar cada tren, según las configuraciones utilizadas en la prueba (Figura 4). Se observó que a medida que se aumentó el peso transportado la energía de tracción utilizada para realizar la operación fue mayor (tendencia exponencial creciente).

- **Prueba No. 2:** En la Figura 5 se muestra que el consumo instantáneo de combustible varió entre 0.5-4.0 galones por hora durante el ciclo de transporte por efecto del tipo de carretera, el peso transportado y las condiciones del alce. Se observó una diferencia importante en el consumo instantáneo de combustible del tractor entre el tren vacío y el tren cargado de caña, lo cual indica que al usar vagones más livianos se puede lograr un ahorro de combustible durante el tránsito de los vagones vacíos en una medida proporcional a la disminución de peso de dichos vagones.

Con base en la información recolectada en el ciclo completo de cosecha fue posible predecir el efecto de la velocidad de tránsito en el consumo de combustible para un mismo peso remolcado. Se observó que después de determinados valores de velocidad el consumo de combustible tendió a estabilizarse (Figura 6).

### Evaluación económica

La valoración de los costos de operación se presenta en el Cuadro 3, con la observación de que la carga total transportada es igual en los casos 1 y 3 y menor en el caso 2. Así, al comparar los casos 2 y 3 con respecto al caso 1 se observa que el costo total de transporte (\$/t) es 1.64% más bajo en el caso 2 (menor peso de vagones y menor consumo de combustible) y 8.6% más bajo en el caso 3 (menor peso de vagones, mayor peso de caña e igual consumo de combustible). Además, se observa que el costo total de transporte es 7.1% inferior en el caso 3 con respecto al caso 2, pues aunque el consumo de combustible es más alto en el caso 3 por el mayor peso transportado, dicho peso está representado por mayor cantidad de caña.

De este análisis se concluye que si se reduce en 10% el peso del tren de vagones (por menos acero en la fabricación) y este mismo porcentaje se suma en peso de caña transportada es posible disminuir en 9% el costo de la tonelada de caña transportada con respecto al escenario actual.

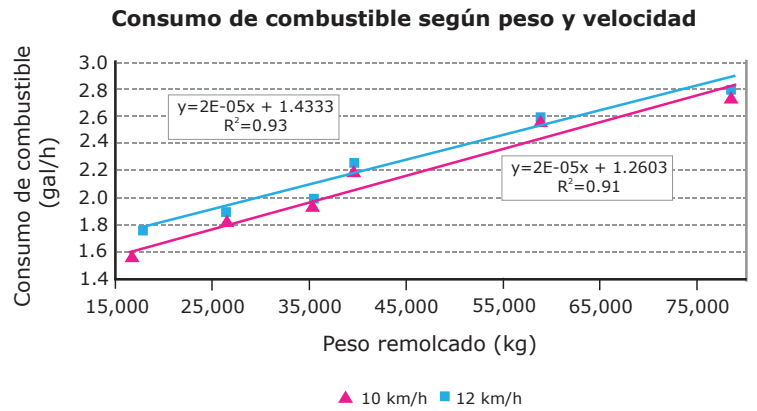


Figura 2. Consumo de combustible según el peso remolcado y la velocidad de tránsito en eventos sin aceleraciones. Prueba No.1.

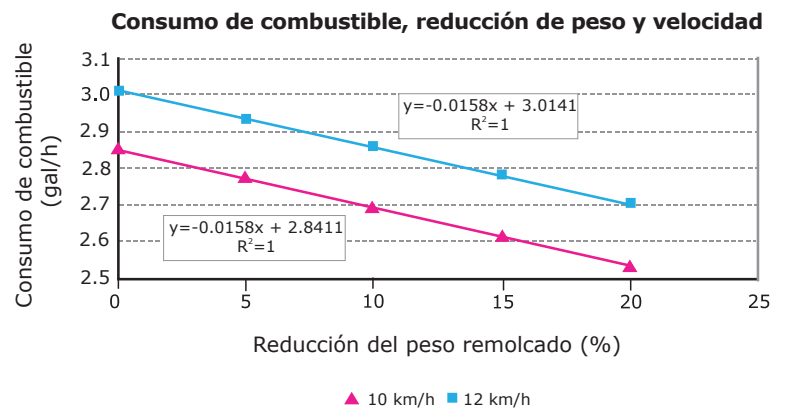


Figura 3. Consumo de combustible según el porcentaje de reducción en el peso remolcado y la velocidad de tránsito. Prueba No.1.

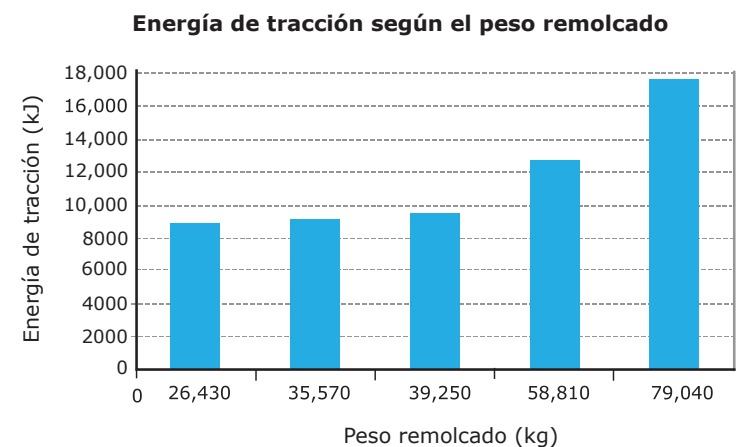
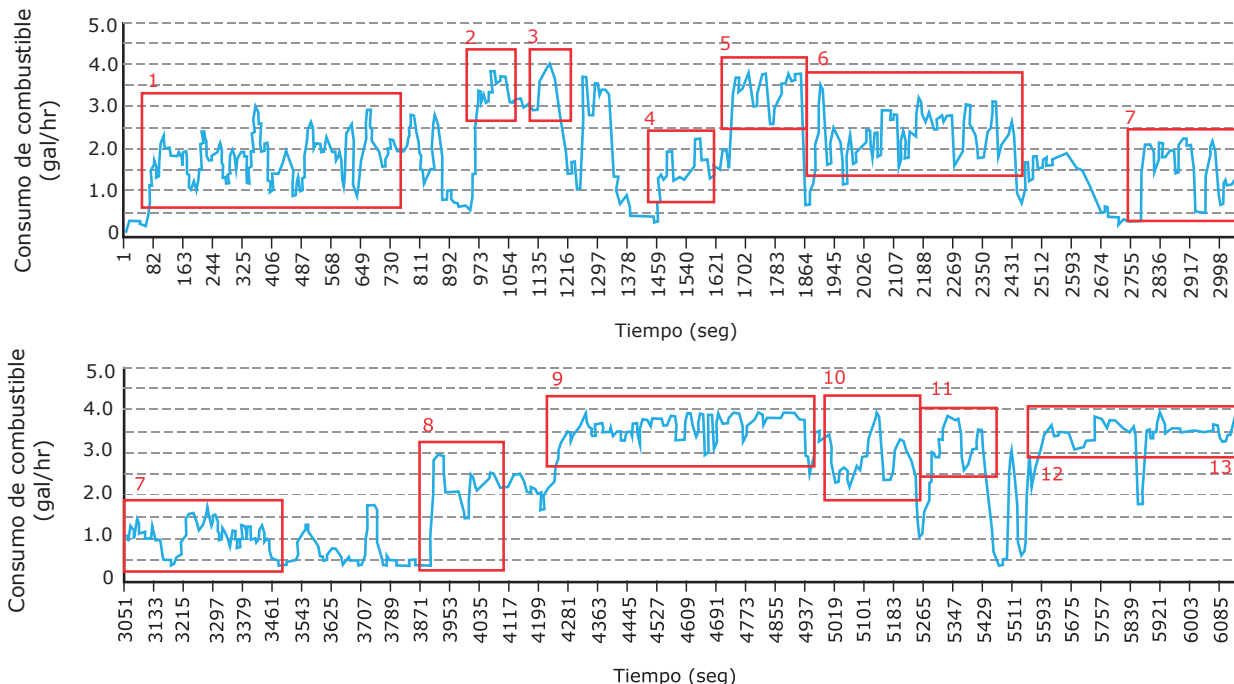


Figura 4. Energía de tracción utilizada según el peso remolcado (estimada con base en el consumo de combustible y la fuerza de tiro). Prueba No.1.

### Consumo instantáneo de combustible en un un ciclo de cosecha completo



#### Tramos de recorrido del equipo de transporte indicados en la figura:

- |  |   |
|--|---|
| 1. Salida del ingenio por carretera pavimentada en mal estado (vagones vacíos) | 7. Cargue de caña (tiro directo con dos vagones)      |
| 2. Carretera pavimentada (vagones vacíos)                                      | 8. Salida del frente de corte (cuatro vagones llenos) |
| 3. Puente Guacarí (vagones vacíos)   | 9. Carretera destapada (vagones llenos)               |
| 4. Carretera intermedia destapada (vagones vacíos)                             | 10. Carretera intermedia pavimentada (vagones llenos) |
| 5. Carretera intermedia pavimentada (vagones vacíos)                           | 11. Carretera intermedia destapada (vagones llenos)   |
| 6. Carretera destapada (vagones vacíos)  | 12. Puente Guacarí (vagones llenos)                   |
|  | 13. Carretera pavimentada (vagones llenos)            |

Figura 5. Consumo instantáneo de combustible en un ciclo de cosecha completo. Prueba No. 2.

### Consumo de combustible según variación de velocidad

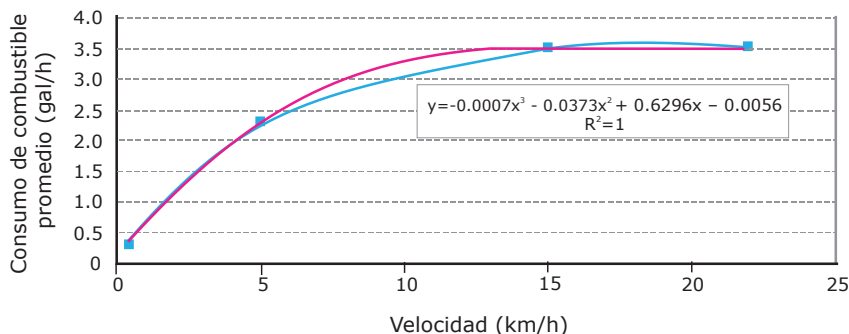


Figura 6. Efecto de la variación de la velocidad de tránsito sobre el consumo de combustible. Prueba No. 2.

Cuadro 3. Costos relativos (en porcentaje y tomando como referencia el Caso 1) de la operación de transporte de caña con un tren de cuatro vagones HD 1200 remolcados por un tractor Case 9230 (escenario actual).

Detalle de costos	Unidad	Caso 1 *	Caso 2 **	Caso 3 ***
<b>Datos básicos</b>				
Peso de cada vagón (tara)	t	8.9	8.01	8.01
Peso de la caña transportada por vagón	t	9.5	9.5	10.39
Peso total remolcado por tren (4 vagones + caña)	t	73.6	70.04	73.6
Consumo de combustible del tractor	gal/h	2.20	2.09	2.20
<b>Costo tractor Case 9230</b>				
Combustible (\$/h)	%	37	35	37
Operario (\$/h)	%	25	25	25
Mantenimiento (\$/h)	%	22	22	22
Costos fijos (\$/h)	%	16	16	16
Subtotal (\$/h)	%	100	98	100
Subtotal (\$/t)	%	100	98	91
<b>Costo vagón HD 12000</b>				
Mantenimiento (\$/h)	%	70	70	70
Costos fijos (\$/h)	%	30	30	30
Subtotal (\$/h)	%	100	100	100
Subtotal (\$/t)	%	100	100	91
<b>Costo de transporte</b>				
Total (tractor + 4 vagones, \$/t)	%	100	98	91

\* **Caso 1:** Escenario actual (utilizado como referencia para la valoración económica de los demás casos). Corresponde a un tren de transporte compuesto por cuatro vagones HD 12000 cargados con caña y remolcados por un tractor Case 9230.

\*\* **Caso 2:** Se diferencia del caso 1 porque se redujo el peso del tren de vagones en 10%.

\*\*\* **Caso 3:** Se diferencia del caso 1 porque se redujo el peso del tren de vagones en 10% y se aumentó el peso de la carga de caña en 10%.

## Conclusiones y recomendaciones

- Con las pruebas experimentales de medición del consumo de combustible se validó el modelo teórico propuesto por Ascuntar (2008) para el efecto. Se confirmó que una reducción de 10% en la tara del tren de vagones de transporte de caña representa una disminución de 5% en el consumo de combustible del tractor remolcador.
- La disminución de la tara de los equipos de transporte por sí misma o en combinación con el aumento de la capacidad de carga del tren (mayor cantidad de caña transportada) causó una reducción del costo de la operación de transporte de caña.
- La evaluación económica mostró que al reemplazar el 10% del peso (acero) de un tren de vagones por igual peso en caña se reduce en 9% el costo total de transporte de cada tonelada de caña larga transportada.
- El valor del consumo de combustible del tractor CASE 9230 estimado a partir de las mediciones experimentales fue de 2.2 galones por hora.
- Se recomienda continuar las pruebas experimentales para caracterizar las velocidades de tránsito asociadas con el mínimo consumo de combustible en el transporte de caña, de modo que se puedan establecer parámetros de la conducción del operador del tractor y estandarizar las velocidades y las aceleraciones para tal fin.

## Referencia bibliográfica

Ascuntar D.A. 2008. Conceptos y criterios técnicos del diseño dinámico de un vagón para el transporte de caña de azúcar. Universidad del Valle. Cali. 181 p.



## Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia - Cenicaña

Agroindustria unida en la investigación y el desarrollo

Cenicaña es una institución privada de carácter científico y tecnológico, sin ánimo de lucro, fundada en 1977 por iniciativa de la agroindustria azucarera localizada en el valle del río Cauca. Su misión es contribuir por medio de la investigación, evaluación y divulgación de tecnología y el suministro de servicios especializados al desarrollo de un sector eficiente y competitivo, de manera que éste juegue un papel importante en el mejoramiento socioeconómico y en la conservación de un ambiente productivo, agradable y sano en las zonas azucareras.

Las actividades de investigación y desarrollo son financiadas por los ingenios azucareros y los cultivadores de caña a través de donaciones directas definidas cada año como un porcentaje del valor de la producción de azúcar.

Las áreas de investigación se enmarcan en tres programas: Variedades, Agronomía y Procesos de Fábrica. Los servicios de apoyo son: Información y documentación, Economía y Estadística, Cooperación Técnica y Transferencia de Tecnología y Tecnología Informática. El Centro Experimental está ubicado a 3°13' latitud norte, a 1024 metros de altura sobre el nivel del mar. En este sitio la temperatura media anual es de 23.5 °C, la precipitación de 1160 mm y la humedad relativa de 77%.

La **Carta Trimestral** es una publicación periódica, editada por Cenicaña con el propósito de difundir información y conocimientos científicos y tecnológicos relacionados con el desarrollo de la agroindustria azucarera colombiana. Ofrece documentación resumida sobre los resultados generados por el centro de investigación y las experiencias de ingenios y cañicultores con las nuevas tecnologías, al tiempo que provee las referencias bibliográficas complementarias sobre cada tema. El primer volumen fue editado en 1978, y los cambios más significativos de diseño y concepto editorial se dieron en 1997 cuando la versión impresa comenzó a publicarse también en Internet.

Título: Medición experimental y evaluación económica del consumo de combustible en equipos de transporte de caña

Autores: Jorge Eduardo Bravo, Alejandro Estrada B., Adolfo León Gómez P., Camilo H. Isaacs E., Pedro Wirley Castro F. y Liztman Bejarano R.

Publicado en: Carta Trimestral. Cenicaña, 2010. v.32, nos. 1 y 2. p.55-59

© Centro de Investigación de la Caña de Azúcar de Colombia, 2010.

Centro Experimental: vía Cali-Florida, km 26  
Tel: (57) (2) 6876611 – Fax: (57) (2) 2607853w  
Oficina de enlace: Calle 58 norte no.3BN-110  
Apartado aéreo: 9138  
Cali, Valle del Cauca – Colombia

[www.cenicana.org](http://www.cenicana.org)  
[buzon@cenicana.org](mailto:buzon@cenicana.org)