

Poder calorífico superior de bagazo, médula y sus mezclas, provenientes de la caña de azúcar de Tucumán, R. Argentina

Oscar A. Diez*, Gerónimo J. Cárdenas* y Luis F. Mentz**

RESUMEN

En Tucumán, el principal combustible empleado para generar el vapor necesario para la fabricación de azúcar a partir de caña es el residuo fibroso (bagazo) resultante de la extracción del jugo. En algunas fábricas donde existe la posibilidad de desmedular bagazo para la entrega de fibra a la producción de papel, coexisten junto al bagazo, médula y mezclas de bagazo y médula en diferentes proporciones, como combustible disponible. La calidad del bagazo como combustible varía en función de factores ecológicos, agronómicos e industriales, y es determinante en la eficiencia del proceso de generación de vapor. El objetivo de este trabajo fue evaluar la calidad como combustible del bagazo que se utiliza industrialmente. Un total de 419 muestras de bagazo obtenidas en distintos ingenios de la provincia de Tucumán durante la zafra 2004, fueron procesadas y ensayadas en bomba calorimétrica para obtener el valor del poder calorífico superior (PCS) y la incidencia del contenido de cenizas sobre el valor final de PCS. A fin de identificar la influencia del contenido de cenizas en el retardo del encendido del combustible, se calcularon los valores de PCS al minuto de iniciado el encendido en la bomba calorimétrica. El espectro analítico se completa con determinaciones de PCS en bagazo de tres variedades de caña de amplia difusión comercial. Los resultados obtenidos indicaron que es aconsejable utilizar 17.375 kJ/kg como valor promedio de PCS en el bagazo de caña en base seca, que se industrializa en Tucumán. Para la médula como combustible, se puede utilizar 17.075 kJ/kg como tal valor. Estos valores son ajustables de acuerdo al contenido de cenizas. Si bien los valores promedio obtenidos muestran baja dispersión, resultó posible identificar la incidencia del ecosistema en el desarrollo de la caña de azúcar, el cual condiciona el contenido final de fibra y, consecuentemente, su poder calorífico.

Palabras clave: cenizas en bagazo, combustión de bagazo.

ABSTRACT

Calorific value of sugarcane bagasse, pith and their blends (Tucumán, Argentine Republic)

Bagasse, or the biomass remaining after sugarcane stalks are crushed to extract their juice, is the primary fuel source for steam generation to supply for all the needs of a typical sugar mill in Tucumán, Argentina. In factories equipped to separate bagasse from pith to supply fibre for paper producing plants, pith and its blends with bagasse at different proportions are also available as fuels. The value of bagasse as a fuel depends on a number of ecological, agronomic and industrial factors, and it affects steam generation efficiency. The aim of this report is to assess the value of bagasse as a fuel in sugar mills in Tucumán. A total of 419 bagasse samples, collected from different sugar mills in Tucumán, were processed and tested with a bomb calorimeter to measure their higher calorific value (PCS) and its correlation with ash contents. In order to identify the relationship between ash content in bagasse and its ignition delay, PCS was calculated one minute after ignition. Bagasse PCS from three widely used sugarcane varieties was also determined. Results showed that 17375 kJ/kg is eligible as a mean higher calorific value for bagasse from sugar mills in Tucumán, whereas pith mean higher calorific value can be set at 17.075 kJ/kg. These values should be adjusted according to ash content level. Although variability amongst mean PCS was low, it was possible to identify the relationship between ecosystem and sugarcane development, its final fibre content and, thereby, its calorific value.

Key words: bagasse ash, bagasse combustion.

* Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales, EEAOC. oadiez@eeaoc.org.ar

** Dpto. Mecánica. Fac. Reg. Tucumán de la UTN.

INTRODUCCIÓN

El residuo fibroso (bagazo) de la extracción del jugo en el proceso de fabricación de azúcar a partir de caña, es el principal combustible empleado para generar el vapor necesario en las operaciones de producción. De su calidad y de los equipos disponibles para su quema dependerá la eficiencia de generación de vapor, y por lo tanto, la economía térmica del proceso.

La cantidad de bagazo a obtener por unidad de caña de azúcar depende del contenido de fibra de la materia prima, función a su vez de la variedad, del estado fisiológico y del sistema de cosecha empleado. El contenido de humedad final, con gran influencia en la calidad del bagazo como combustible, dependerá de la eficiencia del sistema de extracción del jugo y del nivel de imbibición empleado (agregado de agua durante la extracción). De todas estas variables también depende la calidad del jugo residual que acompañará al bagazo, donde los contenidos de azúcar y de cenizas son, en general, las variables seguidas como índice de eficiencia del proceso global de extracción (Lamb y Bolger, 1977; Wienese, 2001; Magasiner, 2002; Carvajal, 2004).

En Tucumán existe una planta productora de papel que utiliza como materia prima la fibra del bagazo de caña. Desde su instalación se generó un acuerdo entre esa planta y algunos ingenios para la provisión de fibra, para lo que se instalaron plantas desmeduladoras a fin de evitar el transporte de médula, que por sus características resulta inapropiada para la producción de papel.

Así, en los ingenios que cuentan con plantas de desmedulado, es normal la coexistencia de dos tipos de combustibles diferenciales: por un lado el bagazo, producto de la molienda de caña y por otro, la médula remanente del proceso de separación de fibra para papel.

En un trabajo reciente (Agüero *et al.*, 2004), se muestran valores obtenidos de poder calorífico en muestras de bagazo provenientes de fábricas azucareras tucumanas. Sin embargo, los autores concluyen que sería necesario realizar nuevos ensayos para controlar el sistema de muestreo y las operaciones de preparación (seca) para las determinaciones en bomba calorimétrica. En el caso particular de estos investigadores, esto no pudo llevarse a cabo, ya que las muestras ensayadas llegaron previamente procesadas.

Debido a que el conocimiento del poder calorífico de este combustible constituye un dato esencial para el cálculo de eficiencia de generación, como así también para el diseño y modificación de generadores de vapor, se pretende cualificar y cuantificar su valor en muestras provenientes de diferentes ingenios y de las principales variedades de caña de azúcar cultivadas en nuestra provincia.

La energía que libera un combustible al quemarse se denomina poder calorífico, y su determinación puede

realizarse en combustibles sólidos secos mediante bombas calorimétricas, obteniéndose lo que se denomina poder calorífico superior (PCS). Este se define como el calor producido por un kilogramo de combustible a 0°C y 760 mm de presión de mercurio cuando la combustión es completa. Para estas condiciones, el agua contenida corresponderá a la resultante de la combustión del hidrógeno. Esta determinación puede realizarse con una bomba calorimétrica en condiciones de operación controladas, lo que permite lograr resultados reproducibles.

El PCS es el máximo valor de calor que puede obtenerse de un combustible. Sin embargo, como industrialmente no es posible reducir la temperatura de los productos de la combustión hasta su punto de rocío, hay que recurrir a lo que se conoce como poder calorífico inferior o neto (PCI), en el que se considera que tanto el agua producida en la combustión como la existente en el combustible, permanecen en estado de vapor. Esto hace que el PCI no pueda determinarse experimentalmente y que su valor deba calcularse a partir del PCS.

En el presente trabajo se tuvo como objetivo determinar valores de PCS en diferentes muestras de bagazo, médula y mezclas, recogidas en la zafra 2004, determinando tanto este parámetro como sus contenidos de cenizas, para conocer su variabilidad y tener información que permita a las fábricas azucareras tucumanas conocer mejor el combustible que emplean, con vistas a poder optimizar su aprovechamiento.

MATERIALES Y MÉTODOS

Se analizaron 219 muestras de bagazo, 40 muestras de médula y 160 muestras de mezcla de bagazo y médula, materiales empleados como combustibles alternativos en los ingenios azucareros de la provincia de Tucumán. Las muestras fueron tomadas a la entrada de los sistemas de alimentación de calderas, en ocho fábricas del medio. En el caso de las muestras de mezclas, las proporciones de los componentes dependían exclusivamente de la capacidad de desmedular y del sobrante de bagazo disponible al momento de efectuar la operación de mezclado en cada fábrica.

Las muestras se trasladaron a la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombes (EEAOC), perfectamente cerradas y posteriormente secadas en estufa con circulación forzada a 105°C hasta peso constante. Sobre el material seco se determinaron el porcentaje de ceniza y el poder calorífico superior.

Las determinaciones de porcentaje de cenizas y fibra se realizaron según las metodologías propuestas por la International Commission for Uniform Methods of Sugar Analysis (ICUMSA), para este tipo de material.

Para el caso de muestras de caña de diferentes variedades, muestras de 20 tallos de las variedades seleccionadas a ensayar (con y sin "trash") fueron desfibradas utilizan-

do un desfibrador de laboratorio que asegura un porcentaje de células abiertas superior a 95%.

A un kilogramo de la caña desfibrada se le extrajo el jugo por presión con prensa hidráulica a 230 kg/cm². Estas operaciones simulan las condiciones industriales típicas de nuestra industria y fueron utilizadas a fin de lograr un bagazo similar al que se podría obtener en una planta azucarera. El bagazo resultante constituyó la muestra a analizar.

Para evaluar las diferencias en los valores de poder calorífico en muestras exentas de material soluble, se sometió al bagazo obtenido a digestión húmeda siguiendo las condiciones propuestas por Norris en las determinaciones de pol % en bagazo (Meade, 1967).

Para la determinación de poder calorífico se utilizó una bomba calorimétrica marca Parr, dotada de un recipiente cilíndrico de acero inoxidable con tapa roscada, que constituye la bomba propiamente dicha. La bomba fue operada siguiendo las instrucciones de su catálogo.

Para asegurar una combustión completa se introdujo en la bomba oxígeno a 30 atmósferas de presión.

Una porción conocida del material de ensayo se comprimó en una prensa hasta formar una pastilla, incorporándole un trozo de alambre calibrado que opera como soporte y cuyos extremos se conectan al sistema de ignición.

Concluido el ensayo se procedió a pesar los restos de alambre que pudieran haber quedado sin quemarse. Por último, se calculó el PCS de la muestra en base seca (PCSbs).

La fórmula empleada para tal fin es la siguiente:

$$PCSbs = ((1362,59 * \Delta T - E_i) / M) / 0,2388459$$

Donde:

PCSbs: poder calorífico superior de la muestra en base seca expresado en (kJ/kg).

ΔT: salto de temperatura. Diferencia entre la temperatura al final del ensayo (Tf) y la temperatura inicial (Ti).

E_i: calor entregado por el alambre fusible.

$$E_i = 1400 * m$$

m: masa del alambre quemado.

M: masa de la muestra de combustible.

La constante del calorímetro se determinó con un combustible de poder calorífico conocido y resultó **K = 1362,59**.

Las evaluaciones estadísticas que permiten calcular, para cada variable, las medias y el coeficiente de variación, e identificar los valores máximos y mínimos, se realizaron con el software INFSTAT profesional V 2004.1.

Con esta herramienta estadística se realizaron las regresiones lineales y, con el propósito de inferir si las condiciones ambientales muestran algún efecto sobre los valores de poder calorífico encontrados, se realizó un análisis por conglomerados o "clusters", técnica de agrupamiento que se basa en las similitudes o distancias entre las observaciones o variables.

La aglomeración realiza una serie de uniones sucesivas, habiendo en el inicio tantos grupos como objetos. Los objetos similares se agrupan primero y esos grupos iniciales son luego unidos de acuerdo a sus similitudes. Como las diferencias van disminuyendo, al final todos los subgrupos formarán un solo grupo.

Los resultados de agrupamientos jerárquicos se muestran en un diagrama conocido como dendrograma. Las ramas del árbol representan los conglomerados que se unen en un nodo, cuya ubicación sobre el eje de distancias indica el nivel en el cual ocurre la fusión. El nodo en el que todos los objetos forman un solo conglomerado se llama nodo raíz. Como en cada nivel se evalúa la unión de dos conglomerados, a los dendrogramas también se les llama árboles binarios.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 1 se muestran los valores estadísticos descriptivos para los diferentes tipos de combustibles analizados. Para cada variable (poder calorífico superior y ceniza %), se tabulan: n = número de determinaciones; media = valor medio de las determinaciones; CV% = coeficiente de variación porcentual y Mín. y Máx., que corresponden a los valores mínimos y máximos de cada conjunto de mediciones. Los combustibles analizados fueron bagazo, médula y la mezcla de ambos.

Tabla 1. Valores estadísticos descriptivos para diferentes combustibles.

Combustible	Variable	n	Media	CV %	Mín.	Máx.
Bagazo	PCSbs	219	16831,77	3,30	14788,70	18633,06
	kJ/kg					
	ceniza %	215	3,38	38,55	1,13	7,34
Bagazo+médula	PCSbs	40	16742,05	2,02	16179,05	17732,44
	kJ/kg					
	ceniza %	40	3,71	28,25	2,41	5,10
Médula	PCSbs	160	16479,16	3,30	14941,81	17957,14
	kJ/kg					
	ceniza %	140	5,12	40,88	2,27	9,86

Los valores medios obtenidos no difieren significativamente en función del combustible analizado, lo que indicaría que para una composición vegetativa similar, se puede esperar diferencias en los valores de PCSbs atribuibles al cambio en concentración de azúcares y al material mineral que pudiera acompañar a la fibra celulósica.

Las regresiones entre PCSbs y ceniza encontradas para cada combustible ensayado y para el conjunto de muestras analizado como un solo tipo de material, se muestran en las Figuras 1, 2, 3 y 4 respectivamente.

Las regresiones encontradas indican que, en ausencia de cenizas, se pueden esperar valores de PCSbs de 17074,93 kJ/kg para el combustible médula y de 17374,53 kJ/kg para el combustible bagazo. Los valores obtenidos para mezclas de ambos combustibles no se encuentran en un rango intermedio, lo que estaría indicando un efecto sinérgico que seguramente depende de la proporción de los componentes en dicha mezcla.

Cuando se realiza el análisis global (incluyendo el total de las muestras ensayadas), se confirman valores

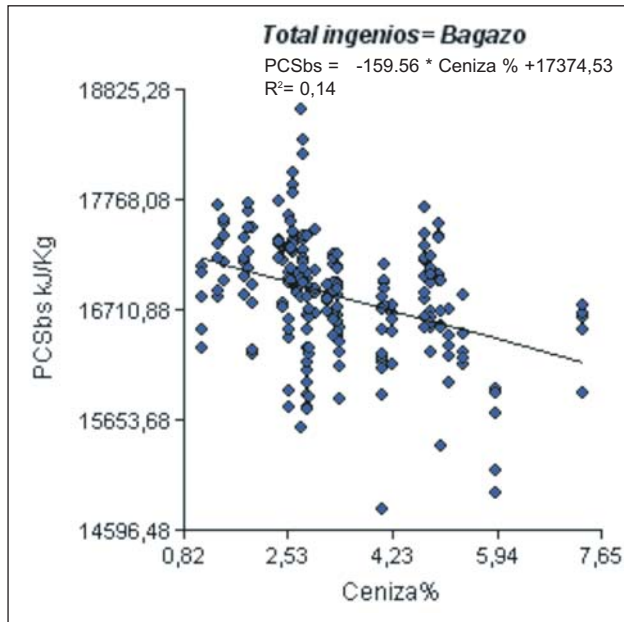


Figura 1. PCSbs vs. ceniza en bagazo.

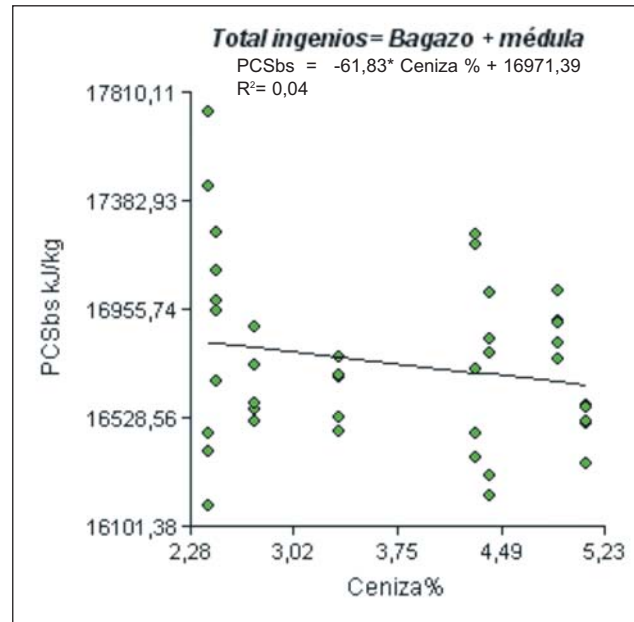


Figura 2. PCSbs vs. ceniza en mezcla bagazo + médula.

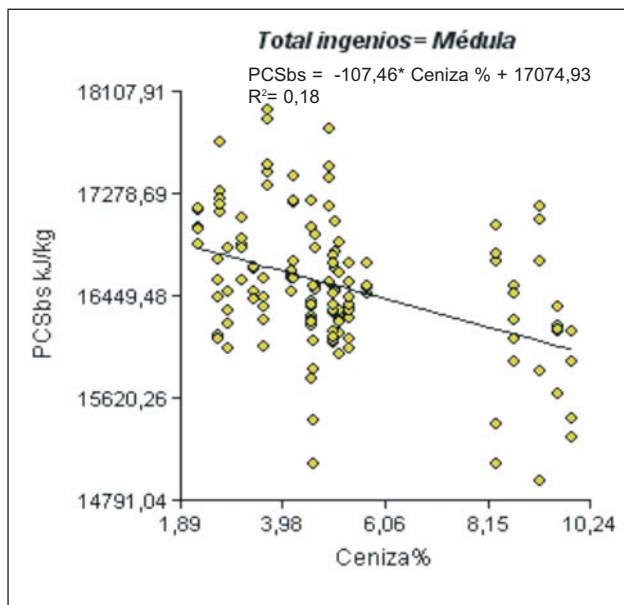


Figura 3. PCSbs vs. ceniza en médula.

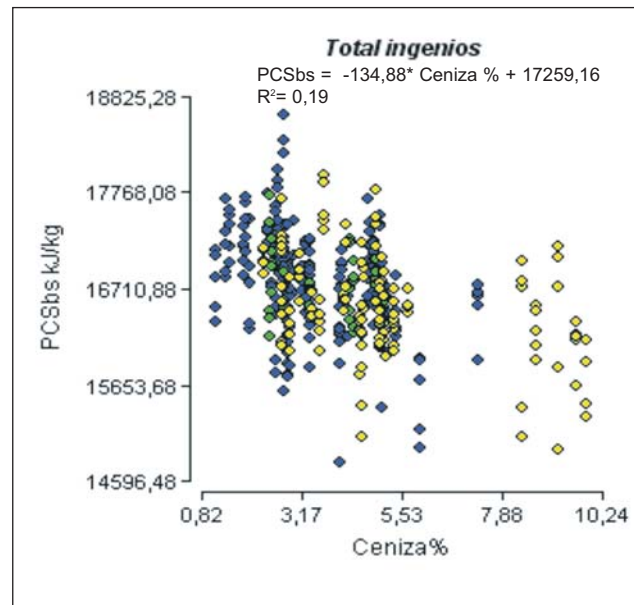


Figura 4. PCSbs vs. ceniza, considerando todas las muestras.

intermedios para el PCSbs en ausencia de cenizas.

Cuando el contenido de cenizas es creciente, se observa que, en el caso de médula y de bagazo, los cambios esperados tienen tendencias parecidas (pendientes similares), mientras que para las mezclas de los combustibles, el efecto sobre el PCSbs es bastante más atenuado.

Durante las operaciones de quemado en las calderas industriales, es común asociar el incremento de las cenizas con una pérdida en la velocidad de encendido. A fin de evaluar esta apreciación cualitativa, se calculó para todos los casos, el PCSbs con el incremento de la temperatura al primer minuto de iniciada la combustión en la bomba calorimétrica. El gráfico de regresión para los promedios considerados se muestra en la Figura 5.

La regresión encontrada con su correspondiente R^2 , indica que el incremento de cenizas en el bagazo no solamente incide en el poder calorífico, sino que además genera un retardo en la velocidad de quemado.

Los dendrogramas encontrados para muestras de bagazo y de médula se presentan en las Figuras 6 y 7.

Es posible observar cómo la cercanía geográfica de las plantas industriales (Figura 8) donde se analizaron muestras de bagazo, permite aglomerarlas indicando que, si bien el espectro de valores no es muy disperso, existe una incidencia en la estructura de la caña que deriva en su poder calorífico, en función del terreno y del microclima de desarrollo.

Lo mismo ocurre con las muestras de médula analizadas.

Para completar el espectro analítico, se procedió a realizar determinaciones de poder calorífico en tres de las variedades de caña de amplia difusión comercial.

En este caso se consideraron diferentes localidades y se realizaron determinaciones en tallos limpios (muestras denominadas ST) y en tallos acompañados del material extraño que adicionó el sistema de cosecha utilizado (muestras denominadas CT), según se considere a la materia prima con o sin "trash".

Finalmente, y con el objetivo de medir la influencia de los compuestos solubles que pudieran acompañar a la fibra de la caña, se determinó el poder calorífico en algunas de estas variantes, tomando las muestras después de que la fibra fuera sometida a un tratamiento de digestión húmeda, a fin de extraer el azúcar para su determinación cuantitativa (muestras denominadas ST o CT Dig.). Los resultados encontrados para las diferentes variedades de caña analizadas, se presentan en las Tablas 2, 3 y 4.

Los valores promedio (Figura 9) no muestran diferencias significativas, lo que confirma la fuerte dependencia del poder calorífico del tipo de material combustible; es decir, existe similitud entre las diferentes partes de la caña en lo que a su poder calorífico se refiere, cuando la determinación se realiza sobre el material seco.

Sin embargo, es posible ver una aglomeración en función de la localidad, lo que estaría indicando la incidencia del agroambiente donde se desarrolla el cultivo. En este caso y como ejemplo, en la Figura 10 se muestran los resultados obtenidos para la variedad TUC 77-42.

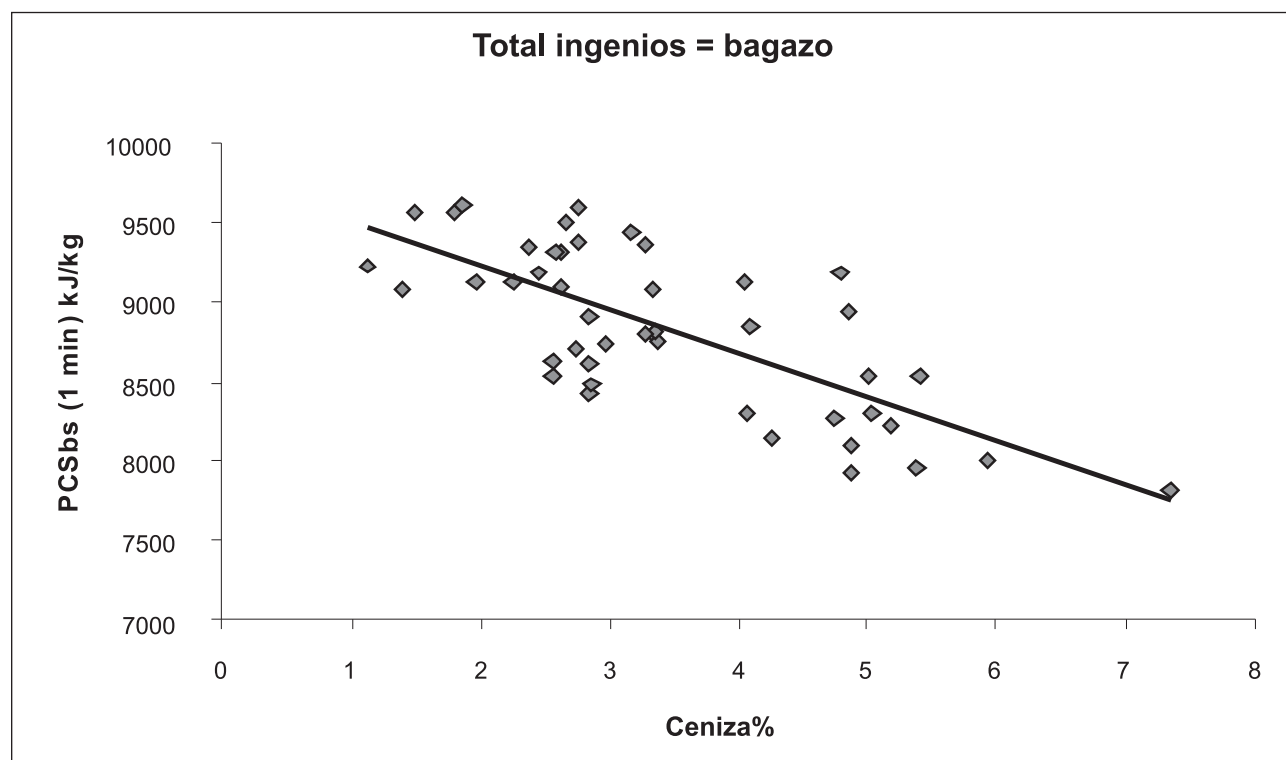


Figura 5. Poder calorífico superior al minuto de encendido (PCSbs 1 min).

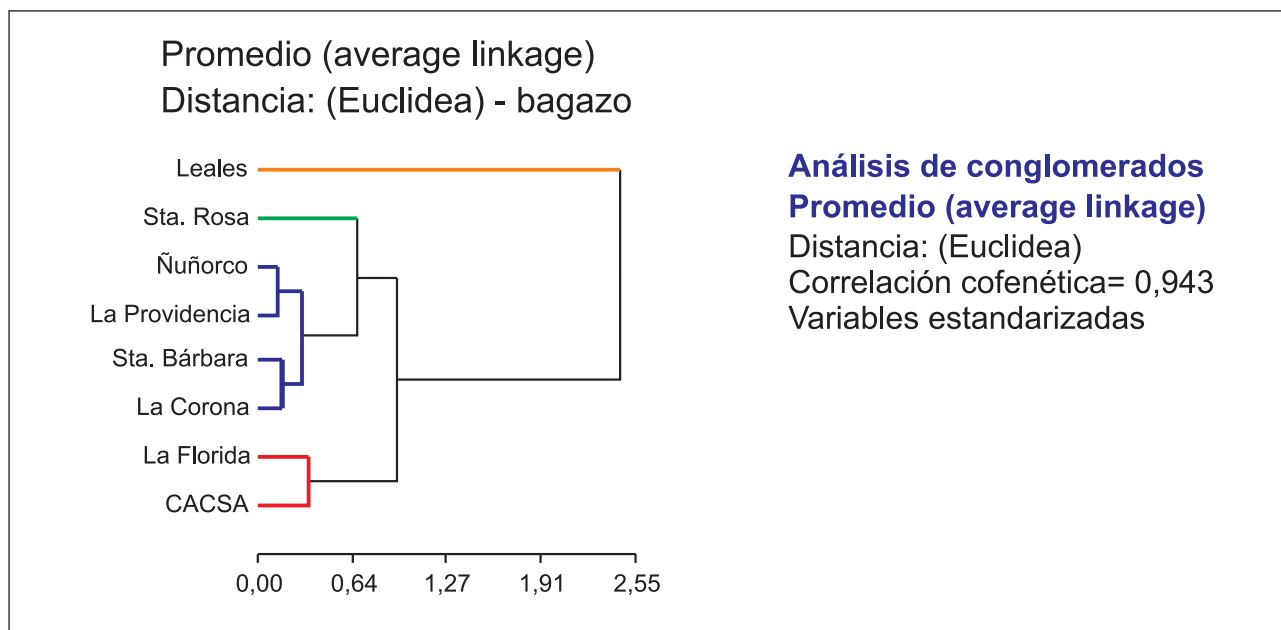


Figura 6. Resultados del análisis de conglomerados en muestras de bagazo.

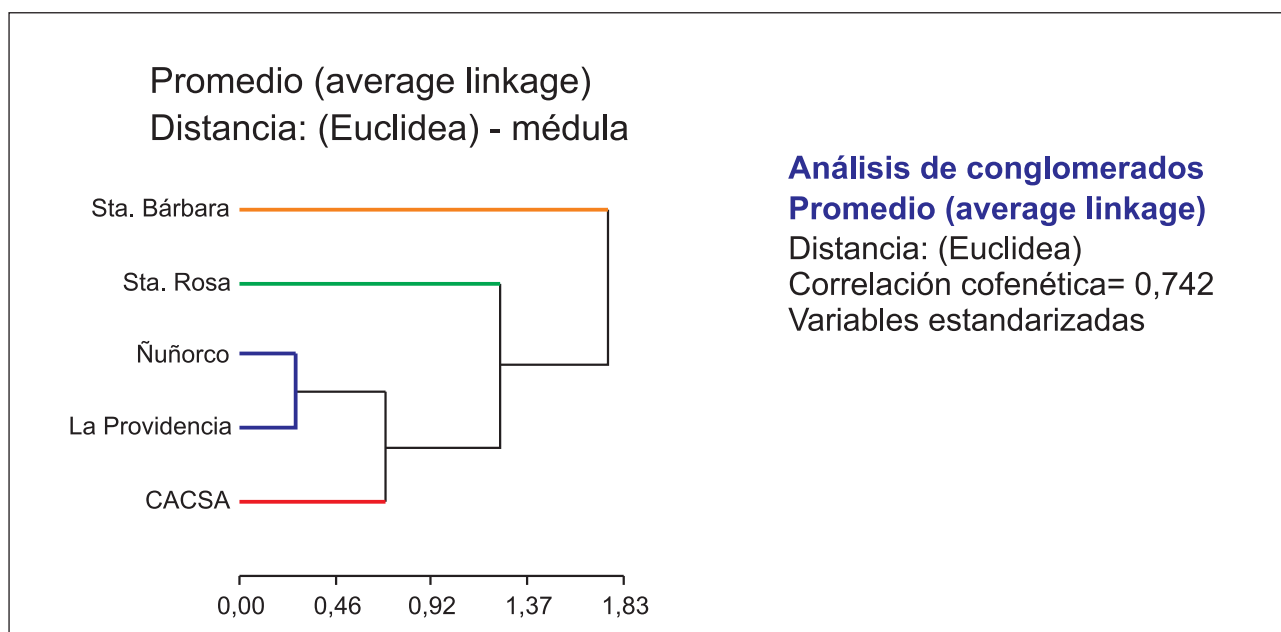


Figura 7. Resultados del análisis de conglomerados en muestras de médula.

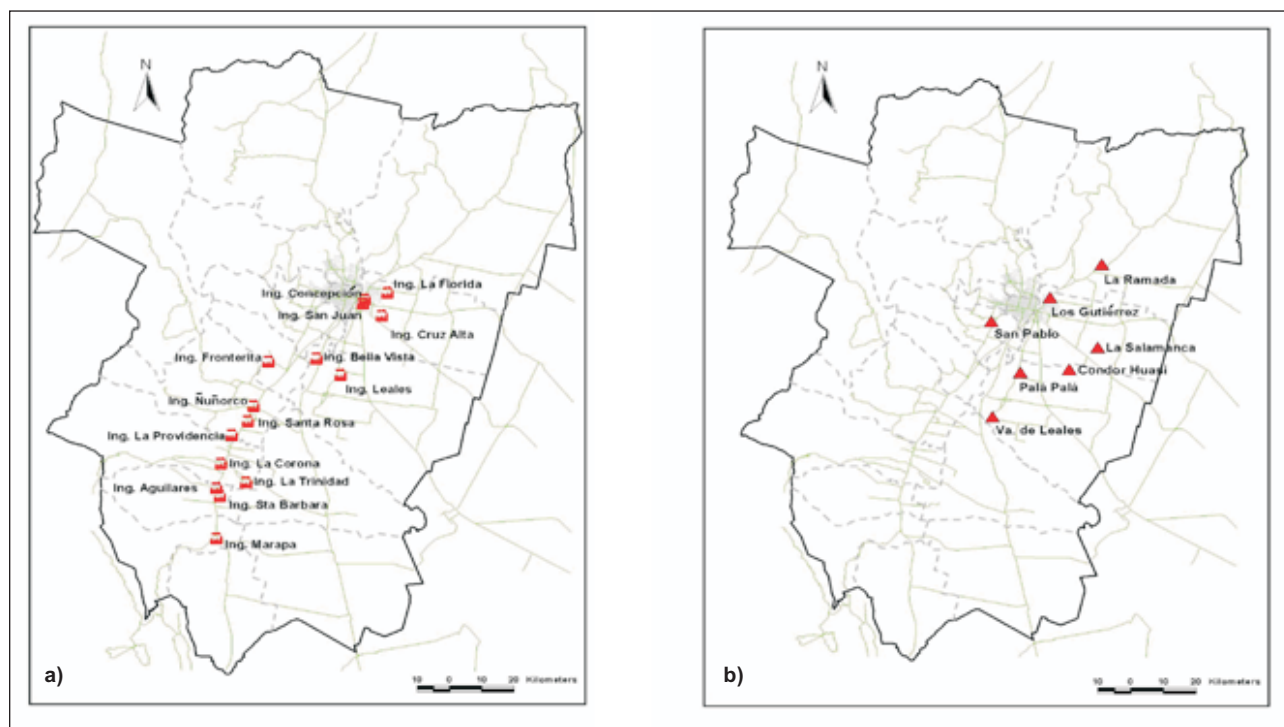


Figura 8. Ubicación geográfica de los ingenios azucareros a) y de las localidades de muestreo b).

Tabla 2. Poder calorífico superior y poder calorífico determinado al minuto de ensayo para muestras de la variedad CP 65-357.

Muestra	Variedad caña Procedencia	CP 65-357 PCsbs (kJ/kg)	PCsbs(kJ/kg) en 1 min.
3 ST	Los Ralos	17078,50	5911,85
5 ST	Los Ralos	17324,31	8438,75
3 ST	Lote 12-14	17547,63	8991,45
5 ST	Lote 12-14	17154,28	9974,26
Promedio		17276,16	8329,05
3 CT	Los Ralos	16919,82	6507,00
5 CT	Los Ralos	16763,74	9598,66
3 CT	Lote 12-14	16624,44	8368,53
5 CT	Lote 12-14	17061,88	9315,46
Promedio		16842,49	8447,41
3 ST Dig.	Los Ralos	16860,54	7196,4
3 ST Dig.	Lote 12-14	17548,51	8992,28
5 ST Dig.	Lote 12-14	17184,13	9956,42
Promedio		17108,9	8648,13
3 CT Dig	Los Ralos	16552,18	10537,59
3 CT Dig	Lote 12-14	16659,61	8807,23
5 CT Dig	Lote 12-14	16688,92	8309,42
Promedio		16752,39	9075,60

Tabla 3. Poder calorífico superior y poder calorífico determinado al minuto de ensayo para muestras de la variedad LCP 85-384.

Muestra	Variedad caña	LCP 85-384	PCsbs(kJ/kg) en 1 min.
	Procedencia	PCsbs (kcal/kg)	
1 ST	Mistol	17271,55	8489,11
1 ST	Santa Bárbara	16943,56	5731,77
2 ST	Aikonet	18291,88	12852,43
2 ST	Florida (Cruz Alta)	16997,91	9819,97
Promedio		17376,22	9223,31
1 CT	Mistol	16835,88	9485,74
1 CT	Santa Bárbara	16732,96	5266,78
2 CT	Aikonet	17308,19	9420,17
2 CT	Florida (Cruz Alta)	17405,16	5402,81
Promedio		17070,55	7393,89
1 ST Dig.	Mistol	17626,47	8281,16
1 ST Dig.	Santa Bárbara	16968,81	5263,56
2 ST Dig.	Aikonet	17140,63	9058,39
Promedio		17245,3	7534,36
1 CT Dig.	Mistol	16741,84	9165,57
1 CT Dig.	Santa Bárbara	16527,94	5775,61
2 CT Dig.	Aikonet	17022,31	9607,07
Promedio		16764,03	8182,77

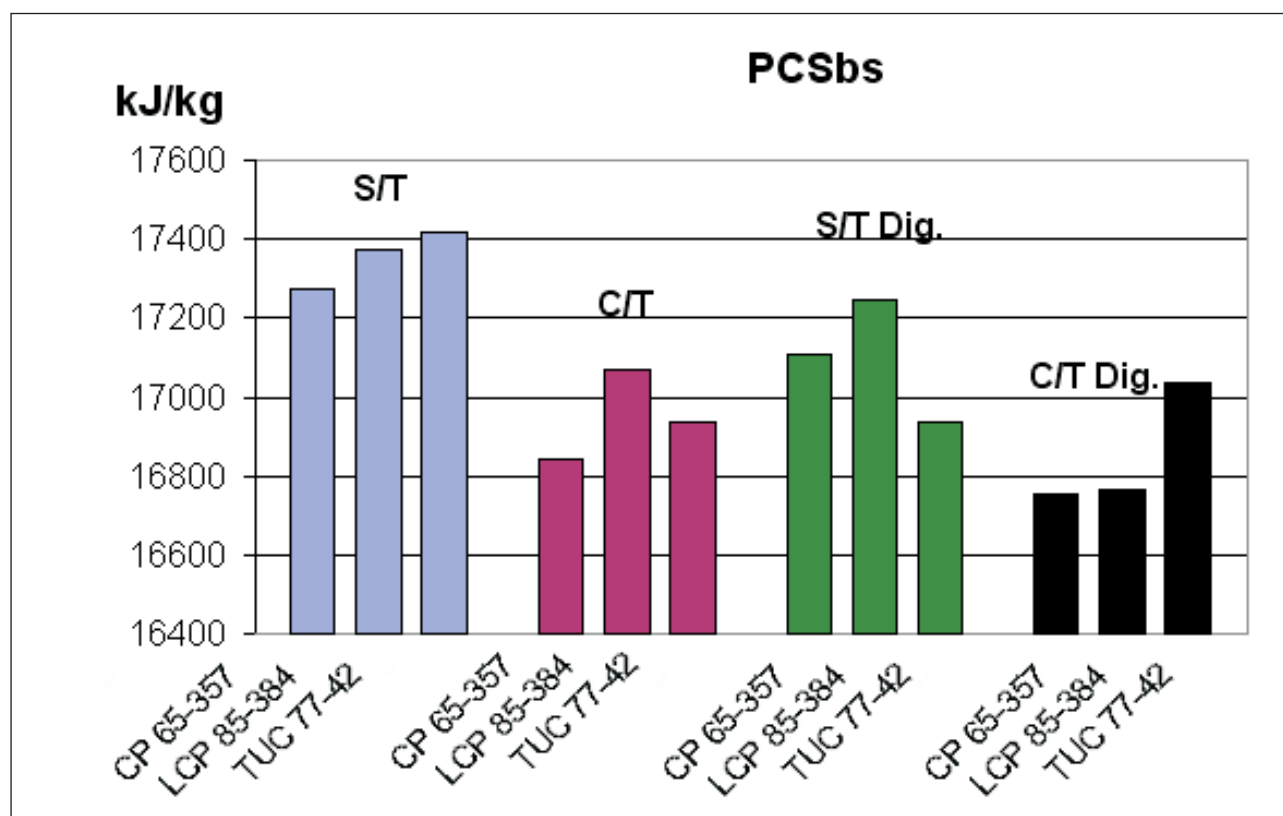


Figura 9. Valores promedio de poder calorífico superior para diferentes variedades.

Tabla 4. Poder calorífico superior y poder calorífico determinado al minuto de ensayo para muestras de la variedad TUC 77-42.

Muestra	Variedad caña	TUC 77-42	PCsbs(kJ/kg) en 1 min.
	Procedencia	PCsbs (kcal/kg)	
1 ST	La Ramada	17024,45	8389,30
3 ST	San Pablo	17188,20	9831,07
3 ST	Villa de Leales	17186,19	10957,65
4 ST	Cóndor Huasi	18730,45	5183,97
4 ST	La Salamanca	17498,52	6929,20
4 ST	Los Gutiérrez (Cruz Alta)	16989,36	9219,42
5 ST	Palá Palá	17298,64	7162,19
Promedio		17416,54	8238,99
1 CT	La Ramada	17179,91	7694,71
3 CT	San Pablo	16595,3	8243,60
3 CT	Villa de Leales	17139,38	6187,92
4 CT	Cóndor Huasi	16576,29	6531,49
4 CT	La Salamanca	17368,86	9704,54
4 CT	Los Gutiérrez (Cruz Alta)	17061,75	9217,24
5 CT	Palá Palá	16636,92	6354,98
Promedio		16936,9	7704,93
Muestra	Variedad caña	TUC 77-42	PCsbs(kJ/kg) en 1 min.
	Procedencia	PCsbs (kcal/kg)	
3 ST Dig.	Villa de Leales	17221,02	5709,29
4 ST Dig.	Cóndor Huasi	16183,24	4085,35
4 ST Dig.	La Salamanca	17600,55	7559,27
5 ST Dig.	Palá Palá	16750,42	7568,60
Promedio		16938,79	6230,63
3 CT Dig.	Villa de Leales	17774,77	12668,17
4 CT Dig.	Cóndor Huasi	17014,19	6630,05
4 CT Dig.	La Salamanca	16749,46	9510,19
5 CT Dig.	Palá Palá	16603,13	5994,16
Promedio		17035,38	8700,63

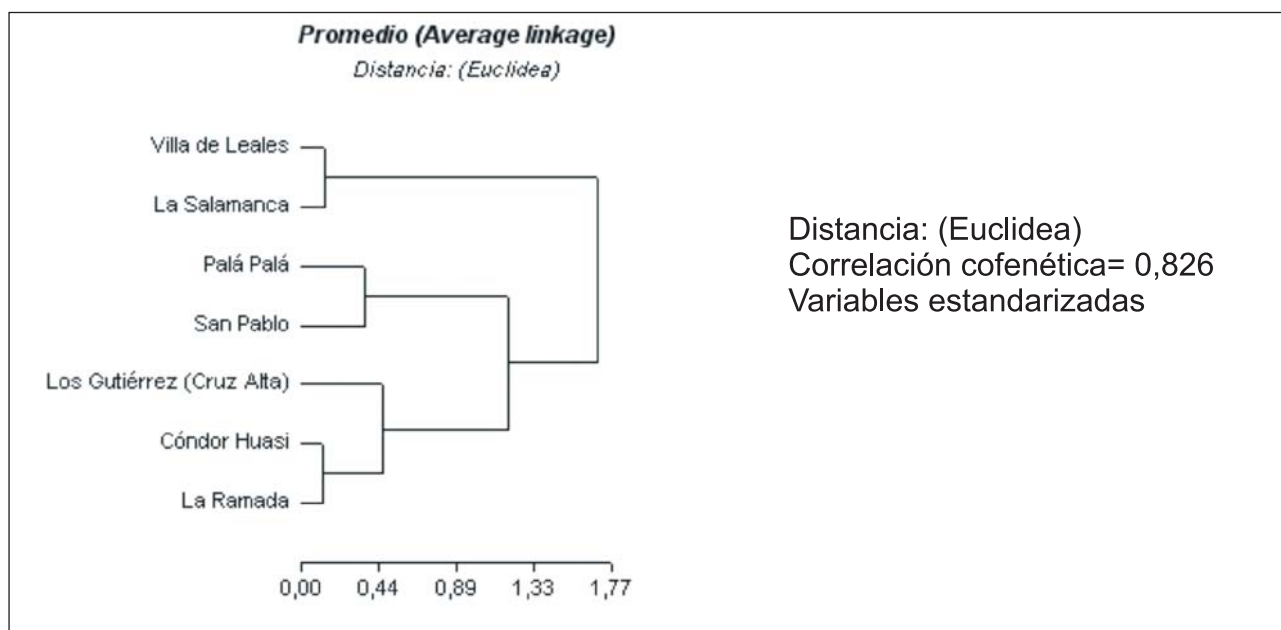


Figura 10. Resultados del análisis de conglomerados en muestras de bagazo de la variedad TUC 77-42 de diferentes localidades.

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos pueden expresarse las siguientes conclusiones:

- Es factible utilizar en la industria azucarera tucumana el valor de 17.375 kJ/kg como valor promedio del poder calorífico superior del bagazo de caña industrializada. Esto no incorporará errores considerables en cálculos de diseño o control.

- Si se requiere ajustar el valor de poder calorífico en función del contenido de cenizas en los cálculos, la siguiente ecuación cumple con este propósito:

$$\text{PCSbs (kJ/kg)} = -159,56 * \text{Ceniza \%} + 17374,53$$

- Para la médula como combustible, se puede utilizar 17.075 kJ/kg como valor promedio del poder calorífico superior, y para ajustar el valor de poder calorífico en función del contenido de cenizas, se puede emplear la siguiente ecuación:

$$\text{PCSbs (kJ/kg)} = -107,46 * \text{Ceniza \%} + 17074,93$$

- Si bien el análisis de los valores promedio muestra baja dispersión, es factible identificar la incidencia del

agroambiente donde se desarrolló la caña de azúcar en el resultado final de poder calorífico.

BIBLIOGRAFÍA CITADA

- Agüero, A. C.; J. R. Pisa; C. J. Agüero y A. T. Bugeau. 2004.** Poder calorífico del bagazo de caña de azúcar. Revista CET. FACET, UNT. Julio: 33-37.
- Carvajal, A. 2004.** Efecto de las cenizas en el poder calorífico superior del bagazo de la caña de azúcar. Carta Trimest. Cenicaña 26 (4): 10-12.
- Lamb, B. W. and R. W. Bolger. 1977.** Combustion of bagasse: literature review. Sugar Technol. Rev. 4 (2): 1-94.
- Magasiner, N. 2002.** Characterising fuels for biomass coal fired cogeneration. Int. Sugar J. 104 (1242): 251-267.
- Meade, G. P. 1967.** Spencer-Meade Manual del azúcar de caña. Montaner y Simón, Barcelona, España.
- Wienese, A. 2001.** Boilers, boilers fuel and boiler efficiency. Sugar Milling Research Institute, Durban, South Africa.