



ALGUNAS CONSIDERACIONES SOBRE LA CALIDAD DEL AIRE EN INSTALACIONES AZUCARERAS

P. J. Villegas Aguilar¹; B. Bucki Wasserman²; F. Pérez Egusquiza³; T. Uz García³

¹Centro de Estudios de Energía y Tecnologías Ambientales (CEETA), Universidad Central de Las Villas, Santa Clara, 54830, CUBA. Teléfono: (+53) 42 281194 - Fax: (+53) 42 281608 - Email: pjva@fim.uclv.edu.cu

²Grupo de Estudios sobre Energía (GESE), Unidad Académica Confluencia. Universidad Tecnológica Nacional. Plaza Huincal, 8318, Neuquén, ARGENTINA. Teléfono: (+54) 299 4963292 - Fax: (+54) 299 4960510 - Email: buck@arnet.com.ar

³Delegación Provincial del Ministerio de la Industria Azucarera en Villa Clara, CUBA, Teléfono: (+53) 42 202310
Email: perfeccionamiento@delegacion.vc.minaz.cu

RESUMEN

La contaminación atmosférica implica un enorme costo social por la degradación de la calidad de vida de los seres humanos. Para mitigar estos efectos frecuentemente se parte de la experiencia de los países más avanzados, siendo necesario tener en cuenta las características particulares de cada lugar, las que determinan en que medida los contaminantes primarios se transforman en la atmósfera, para hallar las soluciones más eficaces. Desde 1996 el CEETA en colaboración con la Organización no-Gubernamental Generalitat de Catalunya, viene efectuando el monitoreo de diversos contaminantes en instalaciones industriales (monóxido y dióxido de carbono, óxidos de nitrógeno y de azufre, partículas en suspensión) usando distintas alternativas experimentales. En este trabajo se reportan los resultados de las mediciones en la chimenea y el monitoreo exhaustivo de calidad de aire en la zona aledaña a una fábrica de azúcar (calidad de aire ambiente), a una distancia aproximada de 250m de la fábrica. Sobre la base de estas medidas puede asegurarse que la mayor fuente de contaminación son las emisiones primarias procedentes particularmente de la combustión en sistemas generadores de vapor. A pesar de que no se han encontrado evidencias de "smog" la situación es de todas maneras preocupante.

Palabras claves: Medio ambiente, contaminación, dióxido de azufre, partículas en suspensión.

I. INTRODUCCIÓN

El desarrollo científico y la aplicación de los conocimientos que genera se encuentran relacionados con las expectativas que los dirigentes en las distintas áreas y la sociedad en su conjunto asignan a esta actividad para resolver problemas y, fundamentalmente, ampliar el horizonte de la calidad de vida y la capacidad del hombre. El advenimiento del nuevo milenio y como consecuencia de haber avanzado crecientemente sobre los recursos naturales, finalmente se comprueba que los mismos no solo no son inagotables sino que son bienes y servicios que el ecosistema nos provee en forma gratuita y cuyo valor económico es superior a todo lo que el hombre es capaz de generar a través de todas sus actividades, incluyendo los recursos naturales puestos en el mercado, se encuentra severamente afectado. Esta situación sin precedentes en la historia humana, nos pone frente al desafío de ampliar nuestra conciencia recuperando el concepto y la vivencia de que el ecosistema es una parte indisoluble de nuestra vida y su cuidado es esencial para nuestro futuro. ^(5,6)

Las actividades productivas generan diversos efectos sobre el ambiente. Estos pueden ser a su vez magnificados o atenuados por las condiciones naturales del ecosistema en que se desarrollan. En los casos en que la actividad industrial está concentrada espacialmente, el riesgo de superación de la capacidad autodepurativa del ambiente es aún mayor. A los contaminantes individuales que vierten cada industria, se suman los efectos sinérgicos producidos por las reacciones de las sustancias entre sí. ⁽³⁾ Aunque algunos autores han reportado trabajos sobre la cuantificación de algunos contaminantes en la atmósfera, debe tenerse en cuenta, algunas regulaciones locales que exigen de una estricta vigilancia de determinadas sustancias que por su naturaleza afectan sensiblemente la salud humana. ^(1,2)

El objetivo del presente trabajo es cuantificar algunas de las emisiones nocivas tomando como ejemplo un Centro Azucarero (CAI) con una refinería de azúcar anexa, este es el "Melanio Hernández" de la Provincia de Sancti Spiritus, identificándose las principales fuentes contaminantes que afectan la calidad de vida de los ciudadanos para emitir las recomendaciones correspondientes para resolver dicha situación.

II. PARTE EXPERIMENTAL

Para llevar a la práctica el objetivo propuesto se realizaron un grupo de acciones que permitieran no solo monitorear las emisiones del Central, sino también identificar las principales fuentes contaminantes. En este sentido se colocó una estación de monitoreo permanente de partículas sólidas en suspensión y dióxido de azufre, cuya foto se presenta en la Figura 1.

En la estación de monitoreo de la calidad del aire, el dióxido de azufre se determinaba por oxidación en solución de peróxido de hidrógeno al 1% y las partículas sólidas suspendidas en el aire se colectaron mediante un captador de alto volumen y los filtros con tamaño de poros micrométricos (calidad cualitativa) correspondientes a cada día se analizaron con un reflectómetro TVM 100, siguiendo normas y procedimientos establecidos. Esta medición que se basa en el ennegrecimiento de un filtro testigo sin exponer, tiene la ventaja de que fundamentalmente se retienen los humos negros producto de la combustión ineficiente de los generadores de vapor. Se analizaba el comportamiento diario de cada uno de estos parámetros y se registraban las concentraciones correspondientes en $\mu\text{g}/\text{m}^3$, referido al volumen de aire muestreado, el cuál se mantuvo entre 1.5 y 2 $\text{m}^3/\text{día}$.

Las mediciones se realizaron antes y durante todo el período de zafra azucarera en el Centro Azucarero "Melanio Hernández" en el cual se realizaron mediciones durante la combustión en los generadores de vapor con tres tipos de combustible (bagazo normal, caña integral y caña energética) en el generador de vapor de tipo PQS bajo análisis (se fundamenta en el principio de la combustión del bagazo de caña de azúcar en suspensión), así como en el generador de vapor de la refinería que quemaba diesel.

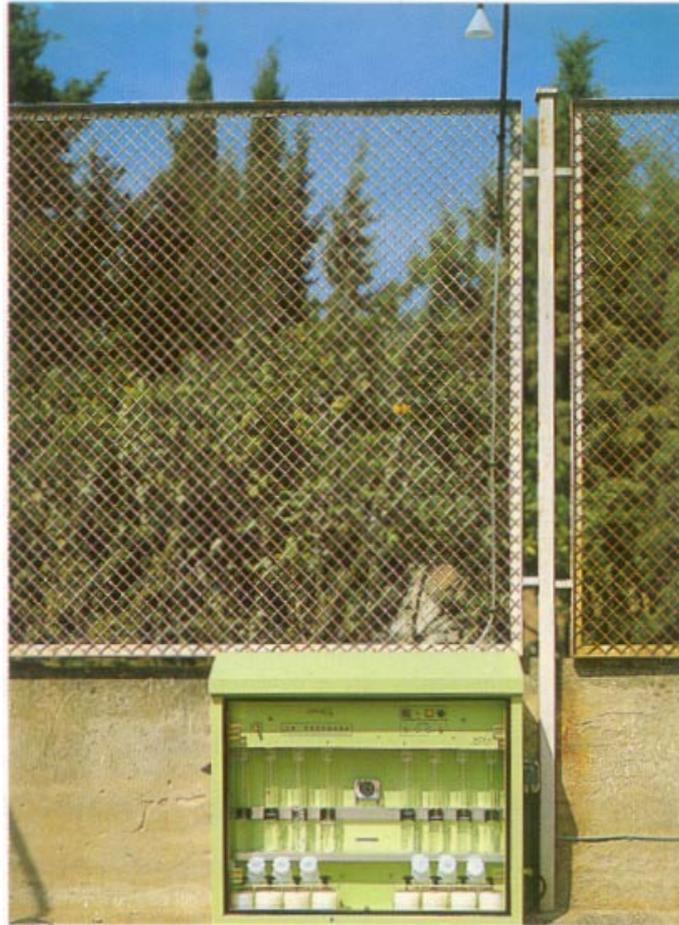


Figura 1. Estación de monitoreo de la calidad del aire.

Asimismo, se evaluaron las principales fuentes contaminantes, para asociar los resultados obtenidos con el efecto provocado por sus emisiones, fundamentalmente en calderas o generadores de vapor. Para realizar este análisis se emplearon los analizadores de gases de la combustión RBR - ECOM - SG PLUS y de partículas sólidas en suspensión BACHARACH.

El analizador de gases de la combustión RBR - ECOM - SG PLUS es un equipo electrónico que permite la evaluación simultánea de O_2 , CO_2 , CO ; NO_x , SO_2 , temperaturas ambiente, de los gases y eficiencia de la combustión. A continuación se muestra a modo de ejemplo, una foto del equipo instrumental utilizado en las mediciones (Figura 2).

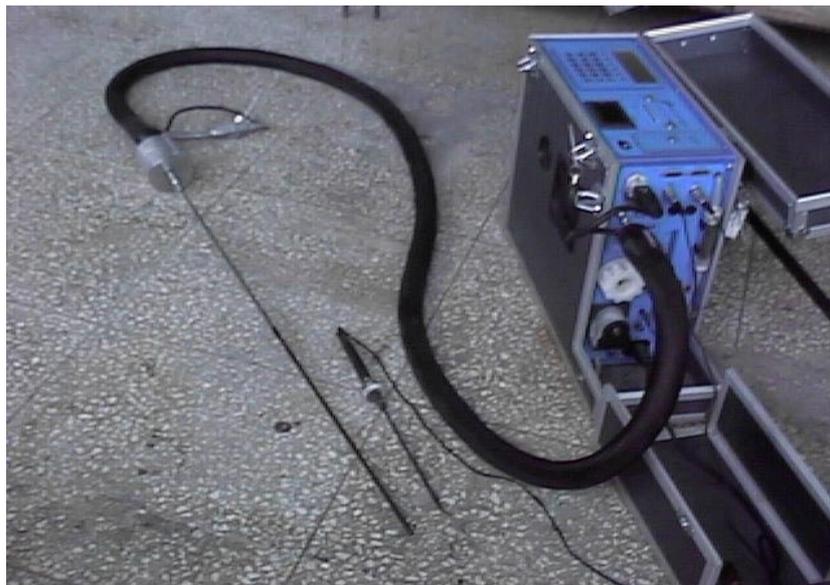


Figura 2. Analizador de gases de la combustión RBR - ECOM - SG PLUS.

El equipo utilizado para medir el Índice de Bacharach es el que aparece en la Figura 3, éste determina las pérdidas por in-combustión mecánica volátiles, consistente en una bomba que succiona los gases de la combustión a través de un papel de filtro dejando una huella de coloración, la cual se compara con un patrón de coloración el cual nos da un índice al cual corresponde un valor de dichas pérdidas.



Figura 3. Equipo utilizado para medir el índice de Bacharach.

II.1. Análisis inmediato

Por último se realizó la caracterización química de los tres tipos de biomasa estudiadas: bagazo normal, caña integral y caña energética para determinar si ésta ejercía alguna influencia sobre las emisiones durante su combustión, siguiendo las normas y procedimientos que se describen a continuación.

Humedad (ASTM D-3175-73)

Se calienta la muestra en estufa a 120°C hasta llegar a peso constante. Los resultados obtenidos se informan sobre la muestra original.

Volátiles (ASTM D-3175-77)

La muestra contenida en un crisol tapado, para simular atmósfera inerte, se calienta durante siete minutos a $850 \pm 10^\circ\text{C}$. Los resultados obtenidos se informan en base seca.

Cenizas (ASTM D-3174-73)

Se coloca la muestra en una mufla a temperatura ambiente y se calienta hasta llegar a una temperatura de 900°C en 4 horas, procurando una atmósfera oxidante durante toda la experiencia. El calentamiento se realiza gradualmente con el objeto de evitar pérdidas de muestra debido a una rápida expulsión de volátiles. Los resultados obtenidos se informan en base seca.

Carbono fijo

El mismo se obtiene por diferencia según:

$$\text{Carbono Fijo (\%)} = 100 - \text{Humedad (\%)} - \text{Volátiles (\%)} - \text{Cenizas (\%)} \quad (1)$$

Estos resultados se informan en base seca.

II. 2. Análisis elemental

Se llevó a cabo el análisis elemental de cada una de las muestras a fin de determinar el contenido porcentual de los elementos carbono, hidrógeno, nitrógeno, azufre y oxígeno de las mismas. Los resultados del análisis elemental se informan libres de humedad y cenizas.

II. 3. Poder calorífico

Cukierman y col. (1996) propusieron una correlación obtenida a partir de más de 700 valores de poder calorífico y de composición elemental de biomazas de la literatura, principalmente maderas; ésta evalúa el poder calorífico superior en función de los porcentajes de carbono, oxígeno e hidrógeno de las muestras con un coeficiente de variación del 2.4 %. La correlación es la siguiente: ⁽⁴⁾

$$\text{PCS (kJ/kg)} = 341.53\% \text{ C} + 1325.25\% \text{ H} + 68.83 - 15.33\% \text{ A} - 120.06 (\% \text{O} + \% \text{N}) \quad (2)$$

Donde A es el contenido de cenizas de la biomasa analizada.

III. RESULTADOS Y DISCUSION

En las Figuras 4 y 5 se presenta a modo de ejemplo, el comportamiento diario promedio de las concentraciones de partículas suspendidas y dióxido de azufre durante el período comprendido entre enero y mayo del año 2003 durante la operación de la fábrica de azúcar con cada tipo de combustible (Etapa 1: antes de la zafra; Etapa 2: operando con bagazo normal; Etapa 3: quema de caña integral; Etapa 4: quema de caña energética), cuyos valores estadísticos se reportan en la Tabla 1 que se presenta a continuación.

	Etapa 1		Etapa 2		Etapa 3		Etapa 4	
	$c_p(\mu\text{g}/\text{m}^3)$	$c(\text{SO}_2)(\mu\text{g}/\text{m}^3)$	$c_p(\mu\text{g}/\text{m}^3)$	$c_p(\mu\text{g}/\text{m}^3)$	$c(\text{SO}_2)(\mu\text{g}/\text{m}^3)$	$c(\text{SO}_2)(\mu\text{g}/\text{m}^3)$	$c_p(\mu\text{g}/\text{m}^3)$	$c(\text{SO}_2)(\mu\text{g}/\text{m}^3)$
\bar{X}	22.62	39.06	30.60	40.99	46.19	45.01	42.81	44.22
S^2	2.00	1.00	9.00	2.00	6.00	3.00	8.00	5.00
D.S.	4.96	3.38	30.6	1.48	2.39	0.56	2.77	0.23
I.C.	22.62±9.54	39.06±6.50	30.60±5.88	40.99±2.84	46.19±4.59	45.01±1.08	42.81±5.33	44.22±0.44

Tabla 1. Valores estadísticos de las determinaciones de concentración de partículas sólidas en suspensión (c_p) y dióxido de azufre c (SO_2). (\bar{X} : media; S^2 : varianza; D. S.: desviación standard; I.C.: intervalo de confianza).

Debe notarse en la Tabla 1, como los valores medios obtenidos están siempre por debajo del límite máximo permitido internacionalmente de $50\mu\text{g}/\text{m}^3$, lo que evidencia un aire relativamente poco contaminado, a pesar de que este valor se rebasó algunos días, lo cual se comprobó estaba determinado por condiciones climáticas desfavorables, como lo son bajísimas velocidades del viento y humedad relativa mínima, lo que redundaba en una acumulación de las emisiones en el lugar de medición, sin que estas sean propagadas por el viento o arrastradas por las lluvias, no siendo altamente preocupante la situación, ya que estos días fueron mínimos. Los intervalos de confianza, corroboran la afirmación de que los valores se mantienen muy cercanos a la media estadística durante prácticamente todo el período analizado. Asimismo, se observa que los valores máximos para ambos parámetros se obtienen para las etapas en que se procesó caña integral y caña energética, lo cual se vio estaba determinado por la elevada humedad del combustible (véase Tabla 2) debido al exhaustivo lavado durante la operación del central con estas biomásas para favorecer la máxima extracción de sacarosa en los molinos. Esta operación debe optimizarse para no afectar tan significativamente la calidad del combustible a quemar en las calderas.

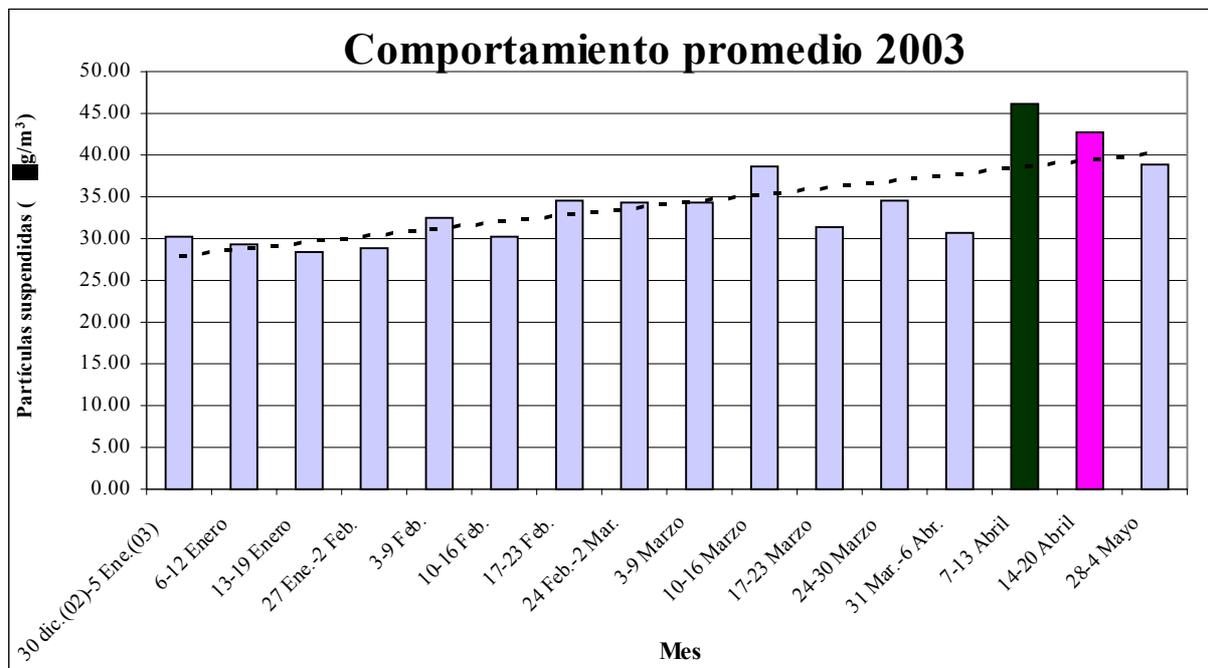


Figura 4. Concentración semanal promedio de partículas sólidas suspendidas en el Complejo Agroindustrial “Melanio Hernández” durante la zafra del año 2003.

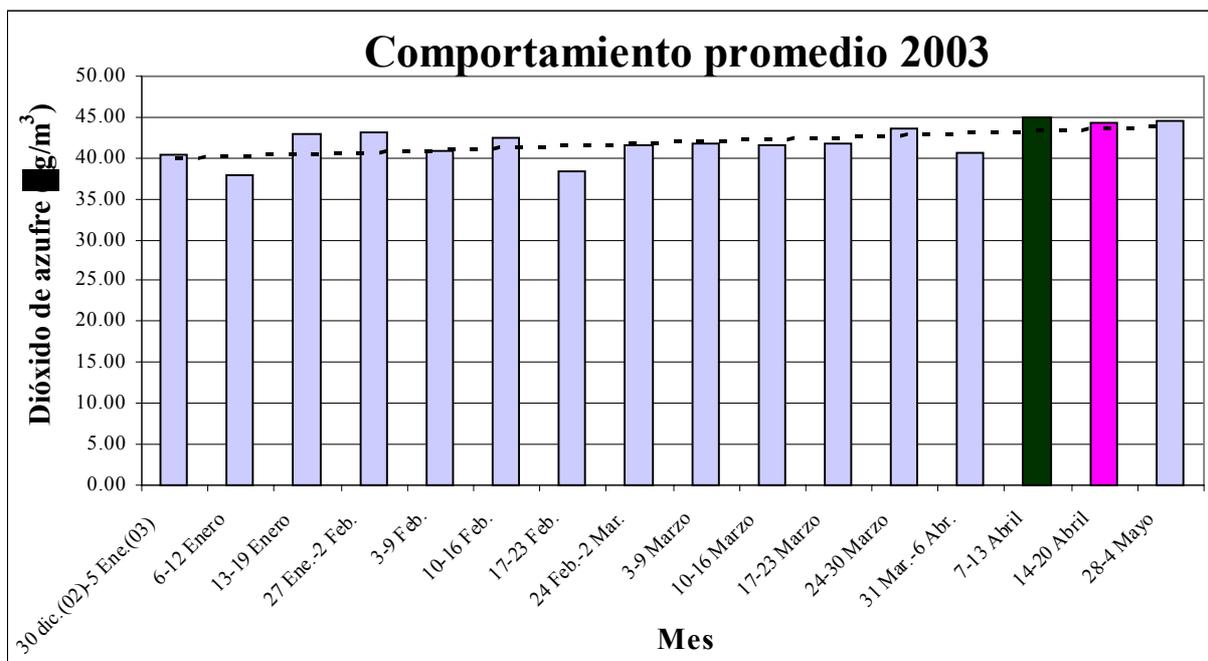


Figura 5. Concentración semanal promedio de dióxido de azufre en el Complejo Agroindustrial “Melanio Hernández” durante la zafra del año 2003.

Debe notarse en las Figuras 4 y 5 que en el caso de las partículas sólidas suspendidas se observa un incremento de alrededor del 25% entre las etapas 1, 3 y 4, esto ya explicado anteriormente estaba condicionado fundamentalmente por la elevada humedad del

combustible, ya que como se observa en la Tabla 2, los valores del poder calórico de los tres combustibles no difiere significativamente (se mantiene en alrededor de 18 MJ/kg), siendo ligeramente inferior en el caso de la caña energética. Este fenómeno, que se conoce comúnmente en la literatura como pérdidas por in-combustión mecánica, tienen su origen en el hecho de que, en una combustión real una pequeña parte de las sustancias combustibles -reactivo limitante- por ejemplo el carbono, no encuentra oxígeno y no se quema. Este combustible no quemado puede tomar dos caminos, irse por el tracto de gases, constituyendo parte de los residuos volátiles o quedarse en la parrilla del horno y en los ceniceros, para formar parte de los residuos que deberán ser extraídos mediante limpiezas. La magnitud de estas pérdidas depende muy directamente del tipo y calidad del combustible, de la aerodinámica del horno y de su temperatura, así como de la calidad del trabajo del generador de vapor.

En el caso de las emisiones de dióxido de azufre (Figura 5), no ocurre lo mismo ya que la variabilidad de los resultados no supera el 10%, lo cual está dentro de los intervalos permisibles para este parámetro, igualmente se obtienen valores máximos de dicha concentración durante la operación del CAI con cañas energética e integral, lo cual se determinó que estaba causado por la operación más intensa de la refinería anexa al CAI en estas etapas, en las que se procesó el jugo de los molinos directamente.

En la Figura 6 que se presenta a continuación, se ilustra las mediciones de los índices de Bacharach durante la operación del generador de vapor PQS del CAI con cañas energéticas e integral, se observa que como promedio los valores de éste índice alcanzó sus valores máximos que estaban en alrededor de 7 cuando se operaba con caña energética (ensayo 2 en el papel de filtro) y 6 con caña integral (ensayo 3 en el papel de filtro), lo cual corrobora los resultados anteriores. Las emisiones gaseosas por la chimenea, evaluadas con el analizador de gases de la combustión RBR - ECOM - SG PLUS, se comportaron de manera adecuada (O_2 entre 3 y 6% (v/v) y CO_2 entre un 14 y 17% (v/v)) y se correspondieron con la relación estequiométrica combustible-oxígeno para garantizar una buena combustión, con valores de eficiencia de la combustión superiores al 90%, no obstante en determinados momentos se reportaron concentraciones de CO alarmantes (2000-4000 ppm), lo cual se determinó era debido a la elevada humedad del combustible que ocasionaba disminuciones notables de la temperatura en la cámara de combustión y con ello un proceso más ineficiente.

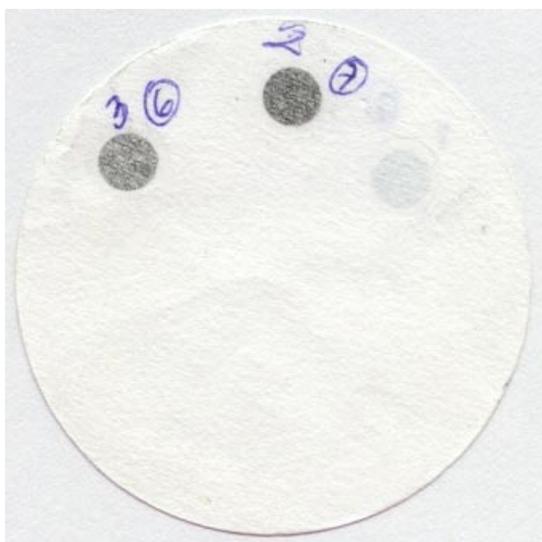


Figura 6. Ejemplo de mediciones de los índices de Bacharach durante la operación del generador de vapor PQS del CAI “Melanio Hernández” con cañas energéticas e integral.

En la Tabla 2 se reportan los resultados de las tres réplicas de los análisis inmediato, elemental y poder calórico (PCS) de las diferentes muestras de interés en este trabajo.

Muestra	% W	%Vv (lh)	%Cf (lh)	%A (lh)	%C (lhc)	%H (lhc)	%O* (lhc)	%N (lhc)	%S (lhc)	PCS (kJ/kg)
Bagazo de caña de azúcar normal										
Experimento 1	45.9	85.4	11.9	2.5	46,26	5,90	46,69	1,15	0.0	18589
Experimento 2	46.3	84.9	12.3	2.8	46,54	5,88	46,44	1,14	0.0	18644
Experimento 3	46.8	84.7	12.7	3.2	46,66	5,87	46,34	1,14	0.0	18667
Valores medios	46.3	85.0	12.3	2.8	46,48	5,88	46,49	1,14	0.0	18633
Bagazo de caña de azúcar integral										
Experimento 1	59.5	86.5	10.7	2.8	45,63	5,97	47,24	1,16	0.0	18468
Experimento 2	60.5	87.8	10.1	2.1	44,89	6,04	47,89	1,18	0.0	18324
Experimento 3	55.7	86.9	10.7	2.4	45,40	5,99	47,44	1,17	0.0	18423
Valores medios	58.6	87.1	10.5	2.4	45,29	6,00	47,54	1,17	0.0	18401

Tabla 2. Análisis inmediato, elemental y poder calórico de las muestras. (W: humedad, Vv: volátiles; Cf: Carbono fijo; A: Cenizas; lh: libre de humedad; lhc: libre de humedad y cenizas; * Determinado por diferencia.)

Muestra	% W	%Vv (lh)	%Cf (lh)	%A (lh)	%C (lhc)	%H (lhc)	%O* (lhc)	%N (lhc)	%S (lhc)	PCS (kJ/kg)
Bagazo de caña de azúcar energética										
Experimento 1	47.8	88.5	9.1	2.4	44,49	6,08	48,24	1,19	0.0	18247
Experimento 2	49.5	87.9	9.6	2.5	44,83	6,04	47,94	1,18	0.0	18313
Experimento 3	48.9	87.5	9.7	2.8	45,06	6,02	47,74	1,17	0.0	18357
Valores medios	48.7	88.0	9.5	2.5	44,78	6,05	47,99	1,18	0.0	18302

Tabla 2. Continuación...

IV. CONCLUSIONES

Luego de realizado este trabajo debe concluirse que el Complejo Agroindustrial (CAI) "Melanio Hernández" de la Provincia de Sancti Spiritus, Cuba presenta una aceptable calidad del aire, evidenciada por los valores de las determinaciones realizadas por el equipo de investigadores del CEETA, no encontrándose evidencia alguna de "smog", y estando las concentraciones determinadas en la estación, situada a unos 250 m del CAI, ligeramente por debajo de las permisibles durante prácticamente todo el período de operación de la Central, pero que dado los ingentes esfuerzos que realiza el país para garantizar niveles adecuados de salud para toda la población, debe mantenerse una estricta vigilancia sobre los parámetros medidos y tomar las medidas necesarias encaminadas a minimizar estas concentraciones.

Del análisis de los resultados de este trabajo se deriva un grupo de recomendaciones para mejorar la calidad del aire en las Instalaciones Azucareras Cubanas, esta van dirigidas a:

- Garantizar una adecuada humedad del combustible a quemar en las calderas, minimizando el consumo de agua en las operaciones de lavado durante la extracción de sacarosa en los molinos.
- Operar los generadores de vapor con las relaciones aire - combustible que garanticen una adecuada eficiencia de la combustión.

V. REFERENCIAS

1. Bogo, H.; Garay, F.; Santander Irarragorri, E.; Martín Negri, R.; Aramendía, P. F.; Gordillo, G.; San Román, E.; Fernández Prini, F. "Gases y partículas en la atmósfera de la Ciudad de Buenos Aires". *Memorias del Congreso "Ecotoxicología y desarrollo sustentable" (SETAC), organizado por la Sociedad Latinoamericana de Toxicología y Química Ambiental*, Buenos Aires, Argentina, octubre, **1998**.
2. Bastos-Netto, D.; Couto, H. S.; Carvalho Jr., J. A. "Notes on the Air Pollution Problem in Brazil". *Proceeding of the Fifth Asian Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization (APISCEU) (ISSN - 1607 - 6281)*, organizado por el Instituto de Ingeniería Termofísica de la Academia de Ciencias de Shanghai, China en Octubre de 1999. Edited by Huang Zhao Xiang and Liu Xin, International Academic Publishers, 208-214, **1999**.
3. Cai, P.; Tsue, M.; Ohayagi, S.; Wada, Y.; Kono, M. "An Experimental Investigation on Combustion and NOx Emission Characteristic of Methane Opposed Jets in High Temperature Environments". *Proceeding of the Fifth Asian Pacific International Symposium on Combustion and Energy Utilization (APISCEU) (ISSN - 1607 - 6281)*, organizado por el Instituto de Ingeniería Termofísica de la Academia de Ciencias de Shanghai, China en Octubre de 1999. Edited by Huang Zhao Xiang and Liu Xin, International Academic Publishers, 253-262, **1999**.
4. Cukierman A. L., Della Rocca P. A., Bonelli P. R.; Cassanello M. C. "On the Study of Thermochemical Biomass Conversion". *Trends in Chemical Engineering*, 3, 129-144, **1996**.
5. De Prieti, D.; Yahdjian, M. L. "Los problemas ambientales de la concentración industrial. Un caso de estudio en la Provincia de Buenos Aires". *Memorias del Congreso "Ecotoxicología y desarrollo sustentable" (SETAC), organizado por la Sociedad Latinoamericana de Toxicología y Química Ambiental*, Buenos Aires, Argentina, octubre, **1998**.
6. Herkovits, J.; Daniel, P.; Fridman, O.; Pérez Coll, C.; Parada, J.; "Proyecto: Ciencias ambientales y sociedad". *Memorias del Congreso "Ecotoxicología y desarrollo sustentable" (SETAC), organizado por la Sociedad Latinoamericana de Toxicología y Química Ambiental*, Buenos Aires, Argentina, octubre, **1998**.
7. Villegas Aguilar, P. J., Martínez Martínez, R., Ocaña Guevara, V. S., Bucki Wasserman, B. "Estudio comparativo de la contaminación ambiental en diferentes puntos de la Ciudad de Santa Clara, Cuba". *Revista Argentina Avances en Energías Renovables y Medio Ambiente (ISSN 0329-5184)*, 6, pp.01 - 06, **2002**.

ABSTRACT

The atmospheric contamination implies a very high social cost due to the degradation of the quality of habitant's life. It is common that the mitigation measures and control are based on the experience of the most advanced countries, been necessary to keep in mind the peculiar characteristics of each place, those that determine the measure that the primary pollutants become in the atmosphere, to find the most effective remedies. From 1996 the CEETA in collaboration with the Non-Government Organization Genaralitat of Catalunya, comes making the monitoring of diverse pollutants in diverse industries (carbon monoxide and dioxide, nitrogen and sulfur oxides and particles in suspension) using different experimental alternative. In this work, the results of the measurements in the chimney and the exhaustive monitoring of air quality in the area near to a sugar cane factory (ambient air quality) are reported, at an approximate distance of 250m of the factory. Based on these measures can make sure that the highest contamination source is particularly the reasonable primary emissions of the combustion in steam generators. Although there are not "smog" evidences the situation is anyway preoccupant.

Keywords: Environment, contamination, sulfur dioxide, particles in suspension.