

## Monitoreo de emisiones de material particulado de chimeneas de generadores de vapor de la industria azucarera en Tucumán, R. Argentina

Marcos A. Golato\*, Walter D. Morales\*, Horacio S. Méndez\*\*, Enrique A. Feijóo\* y Dora Paz\*

### RESUMEN

Durante las moliendas en los años 2008, 2009, 2010 y 2011, se realizaron mediciones de las concentraciones de material particulado total (MPT) en las emisiones de chimeneas de calderas de la industria azucarera, en Tucumán, R. Argentina. El objetivo de este trabajo fue monitorear la evolución de la concentración y emisión de MPT y observar la influencia de los sistemas de filtrado instalados en las chimeneas de las mencionadas unidades. Se ilustran los datos de las emisiones de MPT obtenidas en los años indicados, con valores promedio por caldera de 58,5 kg/h, 33,6 kg/h, 47,6 kg/h y 33,9 kg/h, respectivamente. Asimismo, este estudio muestra un seguimiento minucioso de un grupo de calderas bagaceras, para determinar la evolución de las emisiones en función de las variables de operación características de esas calderas. Los resultados demostraron la influencia del mantenimiento y de la correcta operación de los equipos de filtrado en la calidad de los gases que fluyen por las chimeneas. Se estudió la influencia de los índices característicos de diseño de los lavadores de gases en la concentración de partículas. Se observó que se ha logrado un menor impacto ambiental a lo largo del tiempo analizado.

**Palabras clave:** particulados, emisión, concentración, filtro húmedo, gases efluentes.

### ABSTRACT

#### Monitoring of effluent particulate matter emitted by sugarcane factory stacks in Tucumán

Total particulate matter (TPM) concentrations were measured in stack fumes from sugar factory steam generating boilers in Tucumán in 2008, 2009, 2010 and 2011. The objective of this work was to monitor the evolution of TPM concentrations and emissions and observe the efficiency of filtration systems used in sugarcane factory stacks. Average values of 58.5 kg/h, 33.6 kg/h, 47.6 kg/h and 33.9 kg/h were obtained in 2008, 2009, 2010 and 2011, respectively. Bagasse boilers were also meticulously surveyed to obtain data of the evolution of emissions in relation to specific operation variables of the boilers. Data concerning the quality of effluent gasses from the stacks demonstrated the influence of maintaining and correctly using filtration media. Decrease in particle concentration was studied in relation to design indices of gas washers, and it was observed that the technological advances introduced into sugar mill equipment design have led to a lesser environmental impact.

**Key words:** particle, emission, concentration, scrubber, effluent gases.

---

\* Sección Ingeniería y Proyectos Agroindustriales, EEAOC. [mediciones@eeaoc.org.ar](mailto:mediciones@eeaoc.org.ar).

\*\*Laboratorio de Mediciones Térmicas, Departamento de Mecánica, FACET-UNT.

## INTRODUCCIÓN

En la industria, así como en otras actividades humanas, ocurren procesos que irremediablemente generan sustancias y elementos que constituyen fuentes potenciales de contaminación del medio ambiente. En este sentido y con un criterio amplio, pueden considerarse, como ejemplo, los hornos y generadores de vapor que queman biomasa de distinto origen para el desarrollo de procesos productivos y, en particular, las calderas bagaceras, que a través de la combustión de un residuo celulósico, producen la energía necesaria para la industrialización de la caña de azúcar. Como producto de esa combustión se generan emisiones de particulados, cuya calidad y magnitud depende, entre otros factores, del tipo de combustión y de las condiciones de operación del sistema empleado.

Esto provoca que la composición del conjunto de partículas sólidas que se emiten a la atmósfera sea marcadamente variable para cada tipo de caldera y, aún peor, para un mismo generador bajo diferentes condiciones de funcionamiento.

Así, puede detectarse principalmente la presencia de cenizas volátiles, partículas de carbono (hollín), partículas de bagazo parcialmente quemado y material inorgánico (arena, arcilla, etc.), en una proporción muy aleatoria.

Sin embargo, las emisiones de gases contaminantes son menores cuando se queman residuos agroindustriales que cuando se hace uso de combustibles de origen fósil (Castells, 2005). Tanto los óxidos de nitrógeno ( $\text{NO}_x$ ), como consecuencia de una mayor temperatura de combustión, como los óxidos de azufre ( $\text{SO}_x$ ), debido a las pequeñas concentraciones de ese elemento en la composición elemental del bagazo, están presentes en los gases de combustión, en concentraciones menores que cuando se queman combustibles tales como el "fuel-oil" o el gas natural. Todo ello agravado por el hecho de tratarse de combustibles no renovables, con balance positivo de liberación de  $\text{CO}_2$  a la atmósfera, que consecuentemente provocan el incremento de la concentración de este gas de efecto invernadero en ella.

En general, durante la operación de las calderas y hornos que utilizan bagazo, residuos de la cosecha de caña u otro combustible de origen vegetal, el control de las emisiones se limita a la instalación de dispositivos separadores de partículas sólidas. Bajo este concepto, diversos autores señalaron la importancia de considerar las restricciones ecológicas asociadas al uso energético de la biomasa, haciendo uso de las diferentes alternativas tecnológicas que existen para la preservación de la calidad ambiental (Silva Lora, 2001).

Las dimensiones y la naturaleza física y química de las partículas que se desean eliminar de la corriente gaseosa constituyen el parámetro más importante para definir el tipo de dispositivo de separación que es posible utilizar con alta eficiencia.

La selección definitiva de la tecnología y el proyecto de un sistema de control de la emisión de material particulado para una aplicación dada es un asunto complejo y durante su selección es necesario considerar, entre otros, factores tales como: eficiencia, consumo de energía, nivel deseado de emisión final, peligrosidad, costos de inversión, operación, mantenimiento y espacio disponible.

Como información preliminar adicional, se debe conocer la carga y granulometría de los particulados, las características del gas (temperatura, presencia de compuestos ácidos o básicos) y los patrones de emisión vigentes. Esta última información es relevante para evitar la adopción de tecnologías innecesariamente complejas y costosas, cuando es posible resolver el control de las emisiones con sistemas más simples y económicos.

En Tucumán, en el año 2007, se promulgó la Ley N° 7.460, Dec. 1610, que establece como límite máximo permitido  $700 \text{ mg/Nm}^3$  (miligramos por metros cúbicos en condiciones normales) de partículas totales para generadores antiguos y  $400 \text{ mg/Nm}^3$  para generadores nuevos.

De las diferentes alternativas tecnológicas existentes con vistas a resolver este tipo de contaminación atmosférica, la que ha tenido mayor aceptación entre las fábricas azucareras de la región es el sistema de limpieza de gases por vía húmeda (Aso *et al.*, 2009).

El objetivo del presente artículo es mostrar el seguimiento llevado a cabo por el Laboratorio de Mediciones Industriales de la Estación Experimental Agroindustrial Obispo Colombres (EEAOC), en lo relacionado a las emisiones de material particulado efluente de chimeneas de los generadores de vapor emplazados en la provincia de Tucumán (R. Argentina) que emplearon bagazo como combustible, durante las moliendas 2008, 2009, 2010 y 2011.

## MATERIALES Y MÉTODOS

A partir de mediciones realizadas en 11 generadores de vapor antiguos con producciones de  $8 \text{ t}_{\text{vapor}}/\text{h}$  a  $60 \text{ t}_{\text{vapor}}/\text{h}$  y presiones de trabajo de  $16 \text{ kg/cm}^2$  a  $26 \text{ kg/cm}^2$ , utilizados por la industria azucarera de Tucumán, se determinaron las emisiones de material particulado total (MPT) (cuatro ensayos por caldera), durante las zafas 2008, 2009, 2010 y 2011. Dichas mediciones fueron acompañadas de un registro de las variables características de operación de los generadores y de los equipos de filtrado de los gases de chimenea.

Para la realización de los ensayos y mediciones en los generadores de vapor, se empleó instrumental perteneciente al Laboratorio de Mediciones Industriales de la EEAOC. En la Tabla 1 pueden verse sus datos técnicos (marca/modelo, resolución y escala).

En la Figura 1 se puede ver un lavador de gases del tipo húmedo, como los instalados en las calderas ensayadas en este estudio.

**Tabla 1. Datos técnicos de los instrumentos empleados en los ensayos con los generadores de vapor en Tucumán, durante las moliendas 2008, 2009, 2010 y 2011.**

Instrumento	Marca/ modelo	Resolución	Escala
Equipo de muestreo isocinético de material particulado	ES Company/ C-5000	0,01 mg/Nm <sup>3</sup>	0 mg/Nm <sup>3</sup> a 15.000 mg/Nm <sup>3</sup>
Termómetro digital múltiple de seis canales	IEA/ M91MB	1°C	-100°C a 650°C.
Termómetro digital múltiple de cuatro canales	IEA/ MDTA	1°C	-10°C a 1200°C
Termocupla tipo K con cabezal de conexión, cable compensado y vaina de protección	-	-	0°C a 1300°C
Termoresistencia tipo PT-100 con cabezal de conexión y cable compensado	-	-	-100°C a 650°C
Anemómetro digital con sonda de velocidad (tubo Pitot) y temperatura	Testo/ 452	Sonda temperatura: 0,1 °C Sonda velocidad: 0,1 m/s	Sonda temperatura: 0 °C a 200°C. Sonda velocidad: 0,4 m/s a 60 m/s
Manómetro digital de presión diferencial	Testo/ 505P	1 mmca	-200 a + 500 mmca
Analizador digital de gases de combustión	Testo/ 454	temp.: 0,1°C O <sub>2</sub> : 0,01% CO: 1 ppm CO <sub>2</sub> : 0,01%	temp.: -40°C a 1200°C O <sub>2</sub> : 0 a 25% CO: 0 ppm a 10000 ppm CO <sub>2</sub> : 0% a CO <sub>2 max</sub> %



**Figura 1. Lavador de gases de combustión operando en una fábrica azucarera tucumana.**

En los EE. UU., la Agencia de Protección del Medio Ambiente (EPA) ha establecido normas para las determinaciones de material particulado total (USEPA, 1970a, b, c, d, e) liberado a la atmósfera por chimeneas, desde fuentes estacionarias de emisión.

Los ensayos llevados a cabo por el Laboratorio de Mediciones Industriales de la EEAOC se efectuaron siguiendo las metodologías allí descritas, basadas fundamentalmente en la captación isocinética de las partículas sólidas que escapan con los gases de combustión a la atmósfera a través de la chimenea (Golato *et al.*, 2009 y Bajano, 2006).

Con la aplicación de la isocineticidad en el muestreo se busca que dichas partículas sean capturadas de la corriente gaseosa a la misma velocidad con que estos gases de combustión fluyen por la chimenea (Golato *et al.*, 2009).

Las normas de la USEPA especifican, además, una serie de mediciones y determinaciones necesarias para identificar el flujo de los gases en el interior de la chimenea. A partir de las variables obtenidas, se establecen los procedimientos de cálculo para determinar los valores de emisión del material particulado.

Un aspecto fundamental del ensayo descrito en el presente trabajo fue determinar el caudal másico de las partículas emitidas, mediante el cálculo de la concentración de MPT y de la medición del caudal volumétrico de los gases efluentes por chimenea.

La relación entre el caudal másico de emisión, la concentración de material particulado (MP) y el flujo de gas de chimenea se calculó mediante la siguiente relación.

$$G = k \cdot C'_s \cdot Q_s$$

Donde:

**G**: cantidad de partículas de MPT por unidad de tiempo, en kg/h.

**k**: constante de conversión de unidades, que vale  $6,0 \cdot 10^{-5}$  kg.min/mg.h.

**C<sub>s</sub>'**: cantidad de partículas de MPT contenidas en 1 m<sup>3</sup> de gases secos de chimenea en condiciones normales de temperatura y presión, en mg/Nm<sup>3</sup>.

**Q<sub>s</sub>**: flujo de gases secos efluentes por chimenea en condiciones normales de temperatura y presión, en Nm<sup>3</sup>/min.

La concentración de partículas (C<sub>s</sub>') se determinó haciendo pasar un volumen conocido de gases de chimenea (V<sub>mstd</sub>), a través de un filtro de fibra de vidrio de 1,0 μm, del cual se conocía su peso inicial. Con posterioridad al ensayo de muestreo, el filtro se pesó nuevamente y, por gravimetría, se determinó la masa de partículas sólidas retenidas (M<sub>filtro</sub>). Luego se realizó un lavado con acetona y un filtrado de la sonda de muestreo para recuperar la masa de partículas que pudieran haber quedado en ella (M<sub>limpieza</sub>). De este modo, se determinó la masa total de partículas recogidas M<sub>n</sub>, según:

$$M_n \text{ (mg)} = M_{\text{filtro}} + M_{\text{limpieza}}$$

Para la determinación del caudal de los gases en la chimenea (Q<sub>s</sub>), se utilizó una combinación de los métodos USEPA 1, 2, 3 y 4 (USEPA, 1970 a, b, c y d).

La característica más importante de esta técnica de muestreo es el concepto del grado de isocineticidad I [%]. Tomar una muestra de los gases de chimenea a una velocidad que sea exactamente igual a la velocidad de los gases en su interior representa, por definición, el 100% de isocineticidad. La Norma USEPA considera que el rango de valores aceptables de isocineticidad para la determinación del MPT es entre el 90% y el 110%.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la Tabla 2 pueden observarse las variables medidas y las determinadas por cálculo para los ensayos realizados durante la zafra 2009, indicándose además la desviación porcentual correspondiente.

Durante los ensayos realizados, se midió además el flujo de agua de alimentación a los sistemas de filtrado húmedo o "scrubbers".

En base a los datos indicados, se ilustran los resul-

Referencias Tabla 2:

**G<sub>v</sub>**: caudal de vapor [t/h].

**P<sub>v</sub>**: presión de vapor sobrecalentado [kg/cm<sup>2</sup>].

**t<sub>v</sub>**: temperatura del vapor sobrecalentado [°C].

**λ**: factor de dilución.

**CO<sub>2</sub>**: concentración de dióxido de carbono [%].

**O<sub>2</sub>**: concentración de oxígeno [%].

**CO**: concentración de monóxido de carbono [%].

**N<sub>2</sub>**: concentración de nitrógeno [%].

**t<sub>m</sub>**: temperatura media de los gases en el medidor de gas seco [°C].

**Δ<sub>pest</sub>**: presión estática en la boca de muestreo de la chimenea [mmH<sub>2</sub>O].

**t<sub>s</sub>**: temperatura media de los gases en la chimenea [°C].

**M<sub>n</sub>**: cantidad total de material particulado recogido [mg].

**θ**: tiempo de muestreo [min.].

**M<sub>s</sub>**: peso molecular del gas en base seca [kg/kmol].

**M<sub>s</sub>**: peso molecular del gas en base húmeda [kg/kmol].

**V<sub>mstd</sub>**: volumen de gas seco de la muestra, medido en condiciones estándar [m<sup>3</sup>].

**V<sub>wstd</sub>**: volumen del vapor de agua de la muestra en condiciones estándar [m<sup>3</sup>].

**B<sub>w</sub>**: contenido de humedad [%].

**V<sub>s</sub>**: velocidad de los gases en la chimenea [m/s].

**Q<sub>v</sub>**: caudal volumétrico, en base seca, en condiciones estándar [m<sup>3</sup>/min.].

**C<sub>s</sub>'**: concentración de partículas en el gas de la chimenea, en base seca [mg/Nm<sup>3</sup>].

**G**: caudal de material particulado emitido por la chimenea [kg/h].

**I**: porcentaje isocinético del muestreo [%].

**G<sub>agua scrub</sub>**: caudal de agua de alimentación del filtro húmedo [m<sup>3</sup>/h].

tados de las concentraciones de MPT y de las emisiones efluentes.

En la Figura 2, pueden observarse los valores promedio de las concentraciones de MPT efluentes de las chimeneas de las calderas de vapor analizadas durante las moliendas 2008, 2009, 2010 y 2011. En la figura se indica, además, el límite máximo permitido para el tipo de calderas ensayadas (700 mg/Nm<sup>3</sup>).

En la Figura 3, se observan los valores promedio de las correspondientes emisiones de MPT para las zafras analizadas.

En la Figura 4, se pueden apreciar los resultados del seguimiento del desempeño de las calderas de vapor en las moliendas consideradas. Podemos ver que para los casos analizados, las concentraciones de partículas al ambiente se encontraban por debajo del límite máximo permitido, observándose no obstante, distintas concentraciones para un mismo generador, operando a condiciones normales, y para diferentes zafras. Este hecho tiene que ver no tan solo con la dinámica de los procesos de combustión, sino también con la regulación y mantenimiento de los equipos de filtrado (Aso *et al.*, 2009).

Se debe alcanzar una relación óptima entre el agua de alimentación a los sistemas de filtrado y los gases efluentes que circulan a través de ellos.

Una mala operación de los "scrubbers", por ejemplo el de la caldera N° 8 (ensayo de la molienda 2008), conduce a valores de concentración de MPT cercanos al máximo permitido. En ese caso, se observó una insuficiencia en el suministro de agua en relación a la producción de la cal-

Tabla 2. Datos de operación y valores obtenidos de los generadores de vapor ensayados durante la molienda 2009 en Tucumán.

Calderas ensayadas en 2009											
Parámetros	C#1	C#2	C#3	C#4	C#5	C#6	C#7	C#8	C#9	C#10	C#11
	Valor prom. /CV %	Valor prom. /CV %	Valor prom. /CV %	Valor prom. /CV %	V. prom. /CV %	V. prom. /CV %	V. prom. /CV %	V. prom. /CV %	V. prom. /CV %	V. prom. /CV %	V. prom. /CV %
$G_v$ [t/h] *	39,0 ± 10,8	40,0 ± 4,8	19,6 ± 13,5	8,0 ± 18,8	27,8 ± 0,8	18,6 ± 22,4	51,4 ± 7,3	44,5 ± 10,5	27,0 ± 17,1	59,1 ± 6,4	56,1 ± 16,2
$P_v$ [kg/cm <sup>2</sup> ] *	21,5 ± 0,8	21,8 ± 3,7	20,1 ± 3,6	20,2 ± 5,2	19,5 ± 0,0	19,5 ± 0,0	20,4 ± 1,1	18,2 ± 5,8	16,0 ± 5,7	16,0 ± 2,0	26,0 ± 2,7
$t_v$ [°C] *	362,6 ± 0,0	362,6 ± 0,9	367,8 ± 1,2	369,3 ± 2,7	362,1 ± 0,3	367,5 ± 2,4	350,0 ± 0,0	310,0 ± 0,0	329,2 ± 3,2	340,6 ± 1,3	312,0 ± 0,0
$\lambda$ **	2,00 ± 0,2	1,96 ± 0,1	2,89 ± 0,2	1,88 ± 0,3	2,31 ± 0,0	2,00 ± 0,2	2,21 ± 0,2	2,26 ± 0,0	2,39 ± 0,0	2,06 ± 0,2	1,58 ± 0,3
$CO_2$ [%] **	9,65 ± 1,1	9,81 ± 0,9	8,82 ± 1,2	10,29 ± 0,6	9,01 ± 0,5	6,71 ± 1,3	8,73 ± 1,1	8,55 ± 0,9	8,09 ± 0,8	9,37 ± 1,3	12,22 ± 0,7
$O_2$ [%] *	10,50 ± 0,8	10,30 ± 0,7	11,40 ± 0,4	9,80 ± 0,5	11,20 ± 0,2	13,70 ± 1,0	11,50 ± 0,9	11,70 ± 1,4	12,20 ± 0,7	10,80 ± 1,1	7,70 ± 1,3
$CO$ [%] *	1,00 ± 1,8	0,50 ± 1,2	0,75 ± 1,0	0,50 ± 1,6	0,15 ± 1,5	0,05 ± 0,0	0,12 ± 0,0	0,01 ± 0,0	0,07 ± 0,1	0,09 ± 0,1	0,27 ± 0,2
$N_2$ [%] *	78,85 ± 0,1	79,37 ± 0,2	79,00 ± 0,2	79,41 ± 0,3	79,64 ± 0,1	79,54 ± 0,0	79,65 ± 0,0	79,74 ± 0,1	79,64 ± 0,1	79,74 ± 0,2	79,81 ± 0,0
$t_m$ [°C] *	26,8 ± 1,2	33,9 ± 0,8	29,6 ± 0,6	36,2 ± 0,7	21,8 ± 0,9	31,5 ± 1,6	23,0 ± 0,0	21,1 ± 0,9	20,6 ± 3,2	23,7 ± 2,5	29,1 ± 7,8
$D_{p_{est}}$ [mmH <sub>2</sub> O] *	-2,0 ± 0,8	-11,0 ± 1,0	-11,0 ± 1,1	-5,0 ± 0,5	-10,0 ± 0,4	-7,0 ± 0,4	-11,0 ± 0,6	-15,0 ± 0,3	-6,0 ± 0,2	-12,0 ± 0,1	-20,0 ± 0,6
$t_s$ [°C] *	76,2 ± 2,2	83,9 ± 1,4	77,7 ± 0,6	75,3 ± 13,0	123,0 ± 10,8	91,0 ± 9,1	112,0 ± 4,1	97,8 ± 4,6	71,8 ± 9,5	79,7 ± 3,9	83,2 ± 1,1
$M_n$ [mg] *	26,0 ± 3,1	21,0 ± 4,0	16,0 ± 3,8	9,7 ± 5,4	43,0 ± 3,6	25,0 ± 6,2	26,0 ± 4,8	40,5 ± 2,9	39,0 ± 2,5	33,9 ± 4,1	46,0 ± 1,6
$q$ [min] *	12,0 ± 0,0	12,0 ± 0,0	12,0 ± 0,0	12,0 ± 0,0	12,0 ± 0,0	12,0 ± 0,0	12,0 ± 0,0	12,0 ± 0,0	12,0 ± 0,0	8,0 ± 0,0	12,0 ± 0,0
$M_d$ [kg/kmol] **	29,9 ± 0,1	29,9 ± 0,0	29,9 ± 0,0	30,0 ± 0,0	29,8 ± 0,2	29,6 ± 0,1	29,8 ± 0,3	29,8 ± 0,2	29,8 ± 0,1	29,9 ± 0,0	30,3 ± 0,0
$M_s$ [kg/kmol] **	28,2 ± 0,1	28,2 ± 0,0	28,1 ± 0,0	28,2 ± 0,0	28,1 ± 0,2	28,5 ± 0,1	28,7 ± 0,3	28,1 ± 0,2	28,0 ± 0,1	28,2 ± 0,0	28,4 ± 0,0
$V_{mstd}$ [Nm <sup>3</sup> ] **	0,12 ± 0,0	0,12 ± 0,0	0,10 ± 0,0	0,12 ± 0,0	0,12 ± 0,0	0,13 ± 0,0	0,13 ± 0,0	0,12 ± 0,0	0,12 ± 0,0	0,08 ± 0,0	0,12 ± 0,0
$V_{wstd}$ [Nm <sup>3</sup> ] **	0,02 ± 0,0	0,02 ± 0,0	0,01 ± 0,0	0,02 ± 0,0	0,02 ± 0,0	0,01 ± 0,0	0,02 ± 0,0	0,02 ± 0,0	0,01 ± 0,0	0,01 ± 0,0	0,02 ± 0,0
$B_{vo}$ [%] *	12,4 ± 0,8	20,6 ± 1,5	9,3 ± 2,6	12,7 ± 3,4	11,4 ± 4,7	10,1 ± 2,8	10,9 ± 3,1	16,3 ± 0,5	10,8 ± 2,0	5,58 ± 4,2	17,3 ± 0,6
$V_s$ [m/s] *	18,4 ± 8,9	17,9 ± 10,4	18,4 ± 32,3	6,4 ± 37,4	17,3 ± 5,2	12,2 ± 18,2	13,2 ± 15,8	22,2 ± 11,6	11,5 ± 9,9	18,5 ± 9,7	17,5 ± 8,7
$Q_s$ [m <sup>3</sup> /min] *	1.680,3 ± 8,9	1.334,9 ± 10,5	1.097,3 ± 32,3	495,5 ± 35,9	1.539,2 ± 6,5	939,4 ± 17,0	2.152,2 ± 16,2	1.815,6 ± 11,7	1.102,4 ± 8,7	2.620,1 ± 9,2	3.131,7 ± 8,4
$C \cdot s$ [mg/Nm <sup>3</sup> ] **	212,8 ± 1,8	170,7 ± 2,6	154,9 ± 2,8	81,7 ± 6,2	344,7 ± 5,8	191,9 ± 4,1	200,9 ± 8,1	333,6 ± 7,4	315,4 ± 6,3	409,2 ± 4,3	387,8 ± 9,3
$G$ [kg/h] **	21,5 ± 8,9	13,7 ± 10,6	13,9 ± 30,7	2,4 ± 35,9	31,8 ± 6,4	13,5 ± 17,2	30,7 ± 16,2	36,3 ± 11,8	20,8 ± 8,9	52,1 ± 9,3	72,9 ± 9,0
$I$ [%] **	97,6 ± 2,5	113,8 ± 0,5	80,0 ± 1,0	105,8 ± 3,6	98,3 ± 7,8	110,3 ± 8,8	108,2 ± 5,1	106,3 ± 3,8	105,9 ± 2,0	97,0 ± 3,0	107,5 ± 2,5
$G_{agua scrub}$ [m <sup>3</sup> /h] *	58,0 ± 10,8	80,0 ± 8,6	56,2 ± 9,7	26,8 ± 6,3	36,4 ± 8,4	35,0 ± 11,1	78,3 ± 9,0	58,9 ± 4,9	36,5 ± 6,1	42,6 ± 8,5	71,5 ± 4,8

\*Variables medidas. \*\*Variables calculadas.



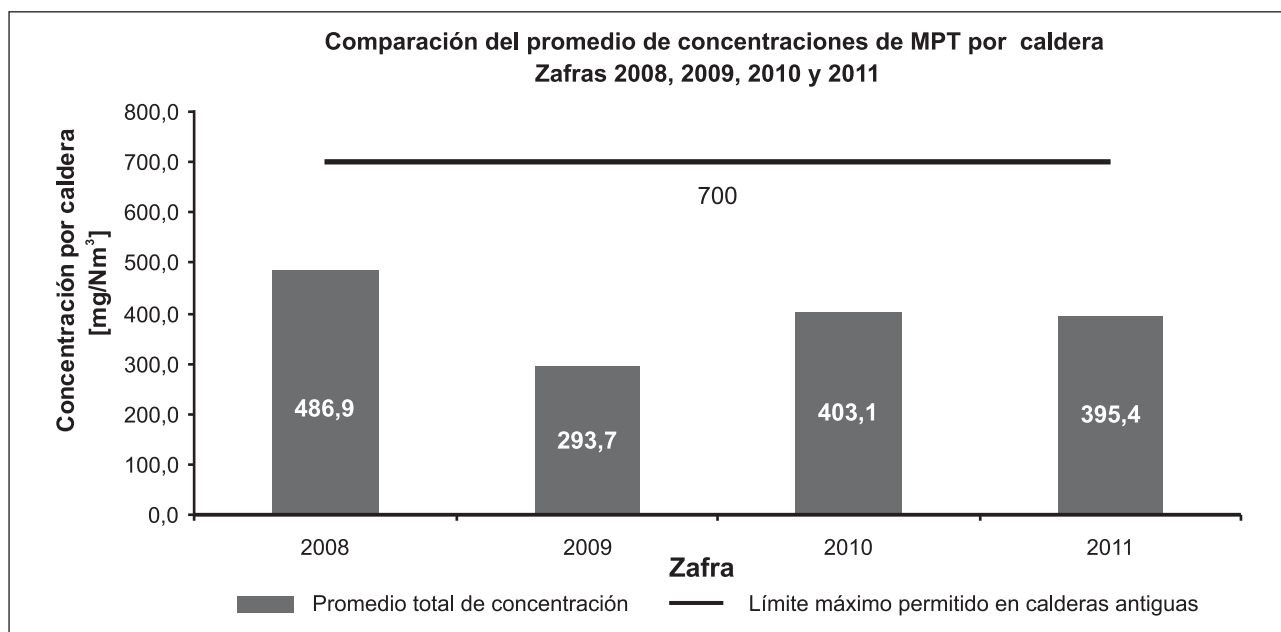


Figura 2. Comparación del promedio de concentraciones de material particulado total (MPT) por caldera durante las zafras 2008, 2009, 2010 y 2011 en Tucumán.

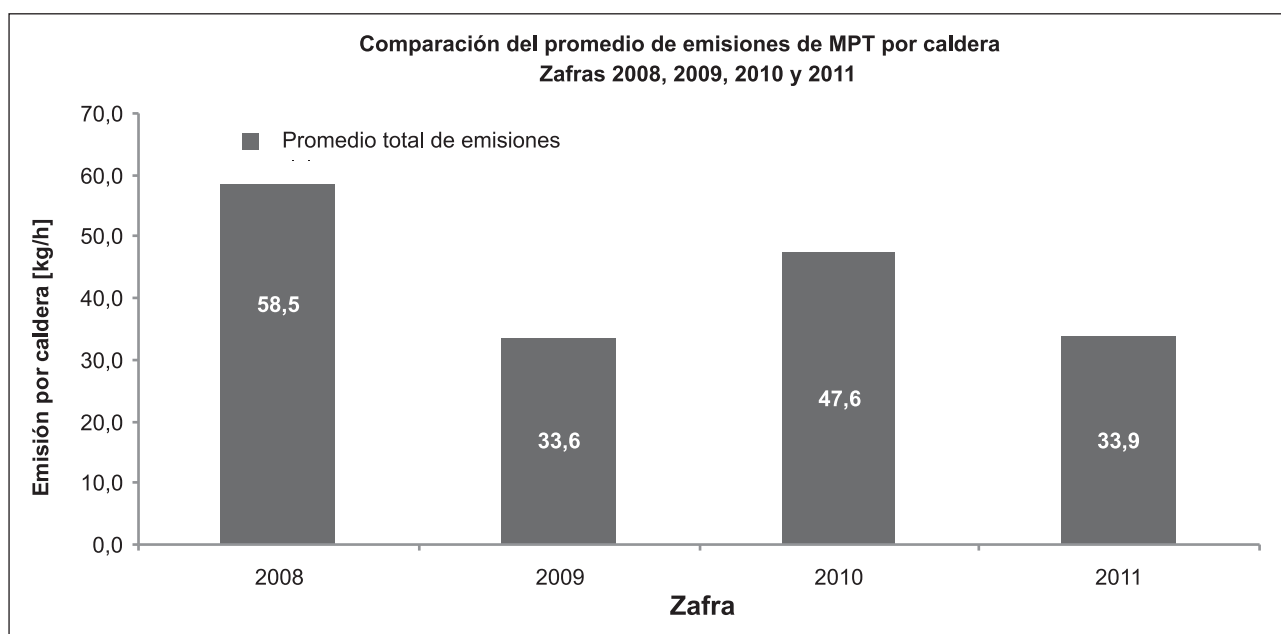


Figura 3. Comparación del promedio de emisiones de MPT por caldera durante las zafras 2008, 2009, 2010 y 2011 en Tucumán.

dera, que durante la zafra 2009 fue corregido, logrando disminuir la emisión de partículas.

Cabe destacar que los valores determinados de MPT reflejan una situación puntual de operación de las calderas de vapor al momento de los ensayos. La combustión, al ser un proceso dinámico, presenta continuamente variaciones en la concentración de partículas contenidas en los gases efluentes. No obstante, si la molienda se mantiene estable, al igual que la operación de la fábrica de azúcar, y por otro lado se toman los recaudos necesarios en cuanto al correcto funcionamiento y mantenimiento de los equipos

lavadores de gases ("scrubbers"), se pueden alcanzar valores representativos y aceptables de emisión de partículas (Aso *et al.*, 2009).

En la Figura 5 se observan los correspondientes valores promedio de emisión por caldera en kg/h, obtenidos en el seguimiento realizado.

#### Disminución de la concentración de MPT en función de los parámetros de diseño de un "scrubber"

De los ensayos realizados durante la zafra 2009, pudimos establecer una relación entre el caudal de agua

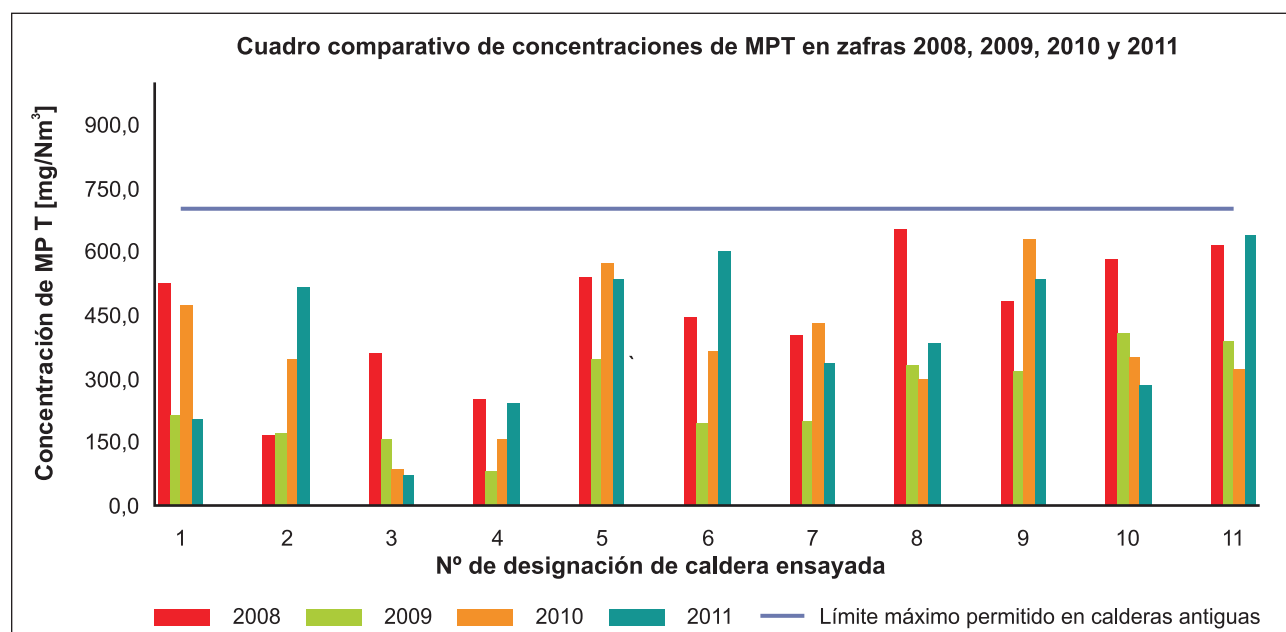


Figura 4. Comparación de las concentraciones de MPT por caldera en zafras 2008, 2009, 2010 y 2011 en Tucumán.

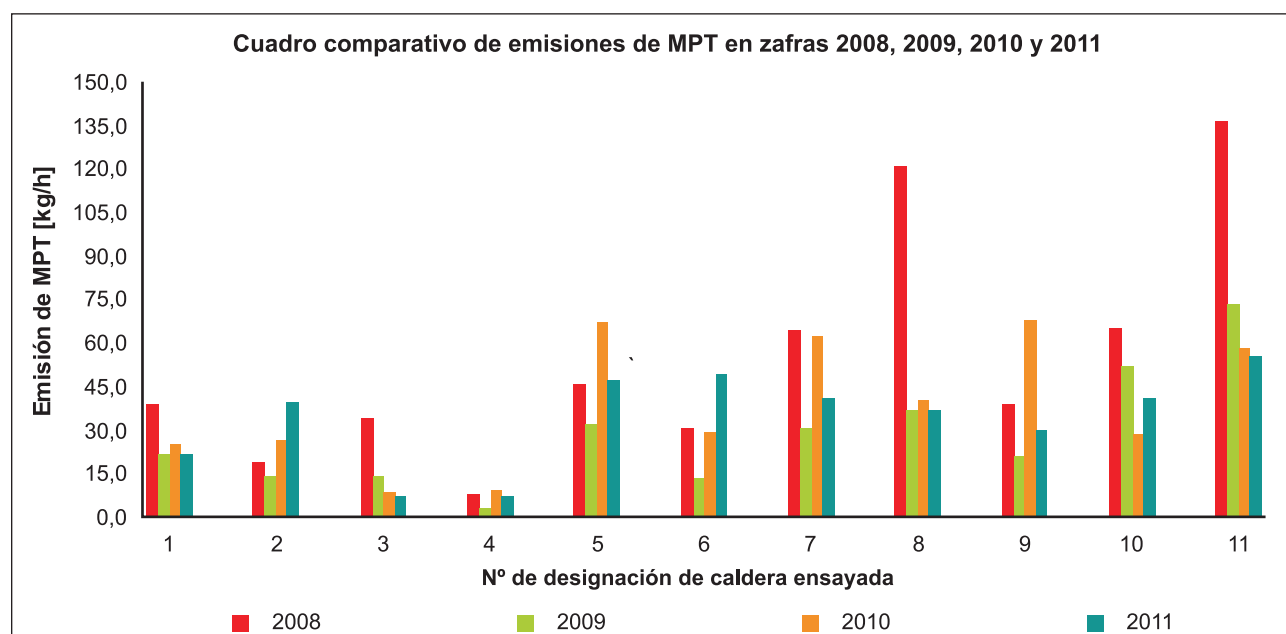


Figura 5. Comparación de las emisiones de PMT por caldera durante las zafras 2008, 2009, 2010 y 2011 en Tucumán.

empleado en el sistema de limpieza de gases por vía húmeda y el caudal de gases que fluyeron por chimenea ( $G_{ag.sc.}/Q_s$ ) en  $l/Nm^3$ , encontrando un valor medio aproximado de  $0,59 l/Nm^3$ . Fue posible trazar, a modo aproximado, una curva de la variación de la concentración de MPT en función de la mencionada relación. Este índice o coeficiente resulta uno de los parámetros más importantes en el diseño de "scrubbers". En la Figura 6 se observa cómo disminuye la concentración de MPT en los gases efluentes por

chimenea a medida que aumenta este índice.

Otro parámetro de diseño a tener en cuenta es la relación existente entre el caudal de agua utilizado en el "scrubber" y la producción nominal de vapor de la caldera ( $G_{ag.sc.}/G_v$ ), en  $m^3_{agua}/t_{vapor}$ . Para los casos ensayados el valor medio hallado fue de  $1,74 m^3_{agua}/t_{vapor}$ .

En la Figura 7 puede observarse la variación de dicho coeficiente para las calderas bagaceras analizadas en la zafra 2009.

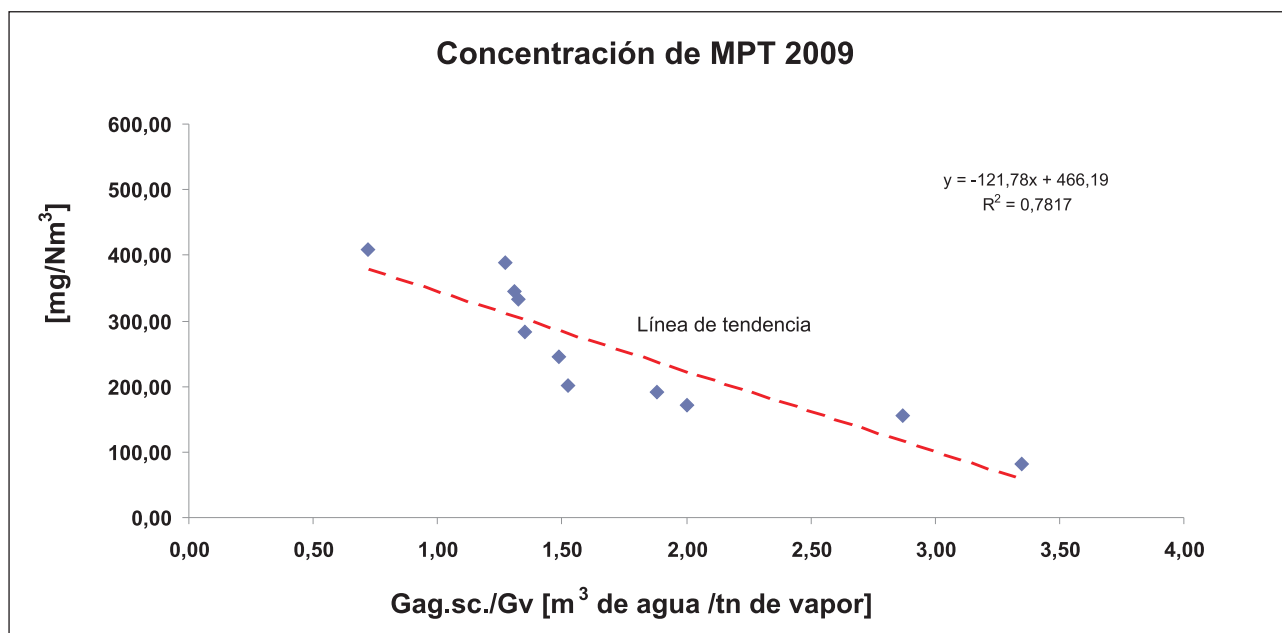


Figura 6. Disminución de la concentración de MPT en función de la relación Gag.sc./Q's [m³ de agua/t de vapor].

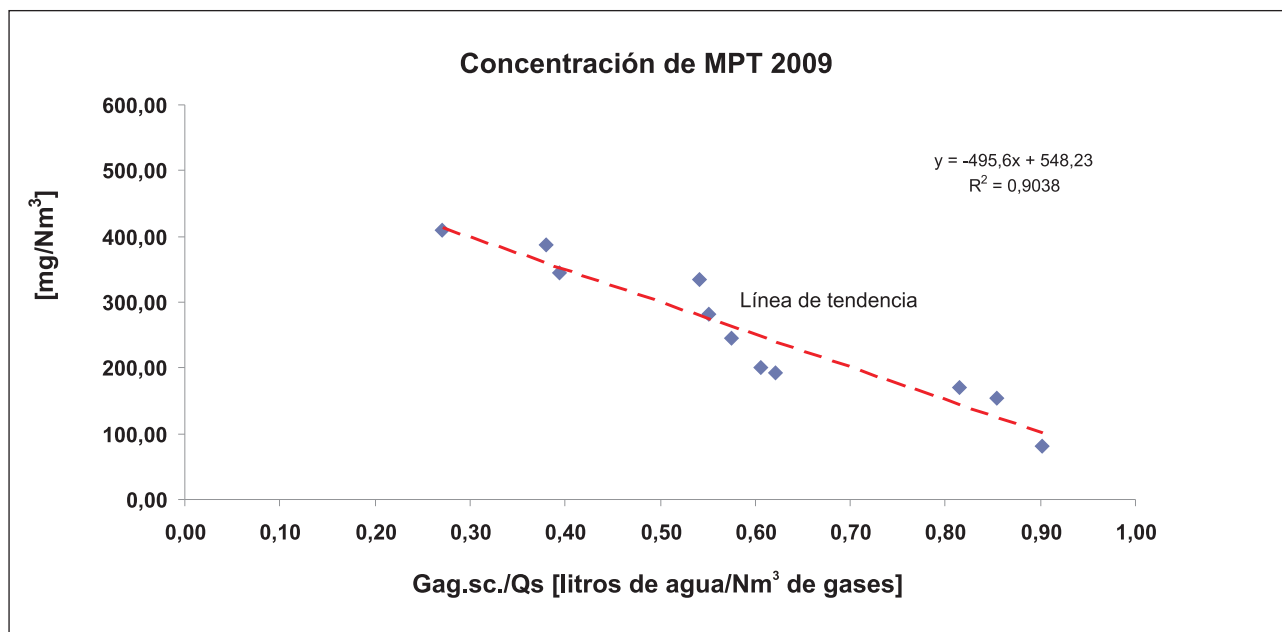


Figura 7. Disminución de la concentración de MPT en función de la relación Gag.sc./Gv [litros de agua/Nm³ de gases].

## CONCLUSIONES

Los datos obtenidos durante los ensayos realizados en las zafra 2008, 2009, 2010 y 2011 han demostrado la mejora de la calidad de los humos de escape provenientes de las chimeneas de las calderas de vapor de la industria azucarera de Tucumán, por medio de la instalación y operación eficiente de los sistemas de filtrado húmedo ("scrubbers"). Se observaron disminuciones en la emisión de particulados de 42,5%, 18,6% y 42,0% para las zafra 2009, 2010 y 2011, respectivamente, en comparación con la zafra 2008. Esto evidencia la toma de conciencia del sector industrial respecto al cuidado del medio ambiente.

Por otra parte, la medición del caudal de agua de alimentación a los sistemas lavadores de gases ha permitido observar, mediante los índices característicos de operación de los "scrubbers" (Figuras 6 y 7), la disminución de la concentración de MPT, conforme aumenta dicho índice. Esto depende fundamentalmente de las condiciones de operación del generador de vapor, como así también del diseño, operación y mantenimiento de los filtros de gases húmedos y de la disponibilidad de agua.

En una segunda etapa será necesario implementar un sistema de recuperación de agua y separación de sólidos, para evitar la permanente incorporación de agua al sistema de limpieza.



## **BIBLIOGRAFÍA CITADA**

**Aso, G.; M. A. Golato y W. D. Morales. 2009.** Lavador de gases de combustión en la industria azucarera: incidencia del mantenimiento en su eficiencia operativa. *Avance Agroind.* 30 (3): 35-38.

**Bajano, H. 2006.** Guía para los ensayos en chimeneas. 2. ed. Grupo Monitoreo Ambiental, Unidad de Actividad Química, Centro Atómico Constituyentes, CNEA, Buenos Aires, R. Argentina.

**Castells, X. E. 2005.** Tratamiento y valoración energética de residuos. 2. ed. Díaz de Santos, Barcelona, España.

**Golato, M. A.; G. Aso; D. Paz y G. J. Cárdenas. 2009.** Muestreo isocinético de emisiones de particulados en chimeneas de calderas operando con bagazo. *Avance Agroind.* 30 (1): 21-25.

**Silva Lora, E. 2001.** Control de la calidad del aire en la industria azucarera de caña. Bartens, Berlín, Alemania.

**United States Environment Protection Agency (USEPA). 1970a.** Method 1. Sampling and velocity traverses for stationary sources. [En línea]. Disponible

en [www.epa.gov/ttn/emc/promgate/m-1.pdf](http://www.epa.gov/ttn/emc/promgate/m-1.pdf) (consultado 25 abril 2006).

**United States Environment Protection Agency (USEPA). 1970b.** Method 2. Determination of stack gas velocity and volumetric flow rate (type S Pitot tube). [En línea]. Disponible en [www.epa.gov/ttn/emc/promgate/m-2.pdf](http://www.epa.gov/ttn/emc/promgate/m-2.pdf) (consultado 25 abril 2006).

**United States Environment Protection Agency (USEPA). 1970c.** Method 3. Gas analysis for the determination of dry molecular weight. [En línea]. Disponible en [www.epa.gov/ttn/emc/promgate/m-3.pdf](http://www.epa.gov/ttn/emc/promgate/m-3.pdf) (consultado 25 abril 2006).

**United States Environment Protection Agency (USEPA). 1970d.** Method 4. Determination of moisture content in stack gases. [En línea]. Disponible en [www.epa.gov/ttn/emc/promgate/m-4.pdf](http://www.epa.gov/ttn/emc/promgate/m-4.pdf) (consultado 25 abril 2006).

**United States Environment Protection Agency (USEPA). 1970e.** Method 5. Determination of particulate matter emissions from stationary sources. [En línea]. Disponible en [www.epa.gov/ttn/emc/promgate/m-05.pdf](http://www.epa.gov/ttn/emc/promgate/m-05.pdf) (consultado 24 abril 2006).