

# Adaptación de herramientas de gestión para la estimación y seguimiento del material particulado en una caldera bagacera

## Adaptation of management tools for estimating and monitoring of particulate matter in a bagasse boiler

María Isabel Gutiérrez-López<sup>a\*</sup>, Natalia Perea<sup>b</sup>, Judith Rodríguez<sup>b</sup>

Recibido: febrero 23 de 2014  
Recibido con revisión: junio 5 de 2014  
Aceptado: junio 20 de 2014

<sup>a\*</sup> Universidad Nacional de Colombia,  
Sede Palmira,  
Cra 32 B/Chapinero-Vía Candelaria,  
Palmira, Colombia  
Tel.: +(57) 286 88 88, ext. 35746  
migutierrezl@unal.edu.co

<sup>b</sup> Universidad Nacional de Colombia,  
Sede Palmira.

### RESUMEN

El material particulado, es el contaminante más significativo en la generación de vapor, en calderas bagaceras. Con el fin de realizar un seguimiento permanente de este contaminante, se adaptaron herramientas estadísticas del Modelo de Gestión Integral de la Energía para estimar las emisiones de material particulado de una caldera bagacera, asociándolo a variables como la humedad, la materia extraña y el clima. A partir del uso de factores de emisión se logró determinar las emisiones diarias de material particulado y, aplicando las herramientas del Modelo de Gestión Integral de la Energía se determinó la tendencia y comportamiento de las emisiones asociando las variables mencionadas. Los niveles de material particulado encontrados están dentro de los valores reportados en la bibliografía, y, se determinó que el 39,49% de los días presentan tasas de emisión por encima de la tendencia encontrada y el 23,6% de las emisiones diarias no están asociadas a la generación de vapor, significando un sobreconsumo de combustible. Además, las variables estudiadas presentaron una relación directa frente a la tendencia de material particulado, mostrando que el Modelo de Gestión Integral de la Energía es una herramienta viable para la toma de decisiones en el contexto económico y ambiental del proceso de generación de vapor.

### PALABRAS CLAVE

Caldera bagacera; material particulado; modelo de gestión integral de la energía; gestión energética.

### ABSTRACT

Particulate matter emissions are the most significant pollutant from steam generation process in bagasse boilers. In order to make a permanent monitoring of particulate matter, statistical tools from the Model Integral Energy Management were adapted to estimate particulate matter, emissions in a bagasse boiler, associating variables such as moisture, foreign matter and climate. Using emission factors it was determined day-to-day Particulate Matter emissions, and by Model Integral Energy Management tools the tendency and behavior of emission was determined combining with the mentioned variables. Particulate matter levels found are within the values reported in the literature, and it was determined that 39.49% of the days emission rates are above the tendency and the 23.6% of the daily emissions are not associated with the generation of steam, meaning fuel overconsumption. In addition, the variables studied showed a direct relation against the tendency of particulate matter, showing that Model Integral Energy Management is a viable tool for decision-making in the economic and environmental context of process steam generation.

### KEYWORDS

Bagasse boiler; particulate matter; integrated management system of energy; energetic management.

Energética 43, junio (2014), pp. 59-65

ISSN 0120-9833 (impreso)  
ISSN 2357 - 612X (en línea)  
www.revistas.unal.edu.co/energetica  
© Derechos Patrimoniales  
Universidad Nacional de Colombia



## 1. INTRODUCCIÓN

El material particulado (MP) es un conjunto de partículas sólidas y líquidas (a excepción del agua) generado por una gran variedad de fuentes naturales y antropogénicas, que presenta características diferentes de densidad y granulometría, agrupándose en tres categorías: material particulado total, [García, 2006; Rodríguez, 2010; Aldabe, 2011].

La presencia en la atmósfera de este contaminante ocasiona variedad de impactos a la vegetación, materiales y el hombre, entre ellos, la disminución visual en la atmósfera, causada por la absorción y dispersión de la luz, y en la salud, está asociado con el incremento del riesgo de muerte por causas cardiopulmonares en muestras de adultos [Arciniegas, 2012; Aguirre, 2010].

El proceso de combustión del bagazo, es una fuente antropogénica que genera como principal contaminante atmosférico el MP, proveniente principalmente de cenizas y del carbono de las partes fibrosas del bagazo que no se logra quemarse completamente. La mayor producción de MP está asociado a un aumento en la cantidad de combustible utilizado, al contenido de materia extraña (ME) y humedad en el bagazo [Orellana, et al., 2009; Vásquez, et al., 1999; Golato, 2008].

La ME en el bagazo corresponde al material mineral proveniente del suelo principalmente silicio, magnesio, calcio, sodio y potasio, y al material vegetal residual de cosecha como hojas, cogollos y cepas. Mientras, que la ME vegetal por su menor contenido de humedad mejora la eficiencia de la combustión, la ME mineral aumenta las cenizas, genera daños en los equipos de extracción de jugo previos al proceso fabril causando ineficiencias que generan un bagazo con alto contenido de humedad. Por otro lado, un alto contenido de humedad en el bagazo incide en el poder calorífico inferior (PCI) de este, que es el calor efectivo entregado por el combustible. Así, a mayor humedad, será menor el calor generado por el combustible y consecuentemente, su consumo será mayor. Estas variables pueden verse afectadas principalmente en las temporadas con un alto régimen de lluvias, ya que se presenta una mayor cantidad de suelo adherido en la caña durante la cosecha [Garcés & Martínez, 2007; Larrahondo, 1995].

Existen dispositivos de amortiguamiento para mitigar las emisiones de MP, ubicados a la salida de los gases, como filtros, ciclones, lavadores de gases, precipitadores electrostáticos, entre otros [Aroca & Peña, 2011]. Mientras que, para el control y monitoreo del MP se realiza un muestreo isocinético que por su alto costo y método complejo restringe la frecuencia de las mediciones para la generación de datos, lo que impide establecer medidas de control efectivas sobre este proceso.

Respondiendo a esta necesidad se presenta un método de estimación que permite dar una aproximación a las emisiones de MP, como lo ha propuesto la EPA con los Factores de Emisión donde se relaciona la actividad o proceso con un índice de emisividad. Sin embargo, aunque este método brinda gran cantidad de información para el seguimiento, no es suficiente para hacer gestión en pro de mitigar las emisiones de MP, este puede ser integrado a herramientas de gestión energética, lo cual permitiría no solo estimar emisiones de MP, sino también tomar decisiones inmediatas y preventivas para su mitigación. Por otro lado, se puede asociar el MP como indicador energético ya que su formación está relacionada con ineficiencias en el proceso, por lo que su monitoreo es pertinente para determinar efectividad de medidas de gestión para disminución de consumos energético y optimización del proceso.

El objetivo de este estudio es integrar a las actuales herramientas de gestión del MGIE con el indicador de emisiones de MP de la EPA y determinar el impacto de la humedad y material extraño, analizando su incidencia de acuerdo al comportamiento climático que se presenta en el Valle Geográfico del río Cauca, donde se presenta la concentración de la industria azucarera en Colombia.

## 2. METODOLOGIA

### 2.1. Descripción del área de estudio.

El estudio se llevó a cabo en una caldera de un ingenio azucarero ubicado en el Valle geográfico del Río Cauca. Esta es una caldera acuatubular marca Distral de 350 psi y una capacidad de 150.000 L vapor/h, la cual opera generalmente las 24 horas de los 7 días de la semana, exceptuando las paradas eventuales de mantenimiento y reparaciones, que se realiza anualmente en un tiempo no superior a 48 horas. El vapor generado abastece los procesos de producción de azúcar y un turbogenerador.

Los gases generados por la combustión del bagazo van al sistema de control de partículas de la caldera, que consta de un multiciclón. Posteriormente pasa a un decantador de ceniza por vía húmeda y luego los gases pasan a través del ducto de la chimenea con ayuda de un ventilador para llegar a otro sistema de filtración (lavador de gases), y finalmente los gases filtrados son expulsados a la atmósfera.

### 2.2. Estimación Material Particulado

Se estimaron las emisiones diarias de MP de la caldera para el año 2011, a partir del método indirecto del factor de emisión (FE) de 8,4 lb M vP/ton bagazo, el cual corresponde a la tasa de emisión de una caldera de combustión con ciclones como dispositivos de control de MP [US.EPA, 1995].

$$MP = A \times FE \times \left[ 1 - \left( \frac{ER}{100} \right) \right] \quad (1)$$

Donde:

E: Estimado de emisión para la fuente

A: Nivel de actividad  
 FE: Factor de emisión.  
 ER: Eficiencia del equipo de control.

Se aplicó método de los mínimos cuadrados relacionando las emisiones de MP estimadas en función de la producción de vapor generado en cada periodo de tiempo para determinar la ecuación lineal que correlaciona estas variables, y obtener una ecuación de tipo:

$$MP = mP + MP_0 \quad (2)$$

Donde:

*MP*: Emisiones de material particulado

*P*: Producción asociada en el período seleccionado.

*m*: Pendiente de la recta que significa la razón de cambio medio de las emisiones de MP respecto a la producción.

*MP<sub>0</sub>*: Intercepto de la línea en el eje y que significa las emisiones no asociadas a la producción.

### 2.3. Monitoreo de las emisiones de MP

Se utilizó el gráfico de tendencia o sumas acumulativas (CUSUM) para monitorear la tendencia de las emisiones, con respecto a la ecuación de la línea base estimada [UPME, 2008]. Para la construcción de este gráfico se realizó la diferencia entre las emisiones estimadas del periodo 2011 (MP), y la tendencia de las emisiones a partir de la expresión de la línea base (MP) y luego se realizó la suma acumulativa, para ser graficada en función del tiempo.

El gráfico se realiza en un sistema de coordenadas x, y, donde la x es el periodo o tiempo de monitoreo y en el eje y el valor de la suma acumulativa.

#### 2.3.1. Indicador de eficiencia Base 100 (IB100)

Se generó el indicador de gestión para monitorear el comportamiento de las emisiones con respecto al valor de emisión alcanzable (tendencia). Para lo cual, se adaptó el indicador de eficiencia Base 100 (IB100) del MGIE. Este indicador se calculó a partir de la relación de las emisiones calculadas de la ecuación de la línea base con respecto a las estimadas [UPME, 2008]:

$$IB100 = \frac{MP_{tendencia}}{MP_{estimado}} \times 100 \quad (3)$$

El valor obtenido representa las emisiones esperadas de MP respecto a las emisiones reales (estimadas) para el mismo valor de producción. Entonces para días en los cuales el indicador resulta ser menor a 100 se considera presentaron ineficiencias que contribuirán a aumentar las emisiones de MP, ya que los datos medidos sobrepasan la tendencia establecida. Mientras que valores mayores a 100, son días en los cuales se presentaron sucesos que mitigaron las emisiones de MP.

## 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 3.1 Estimación de material particulado

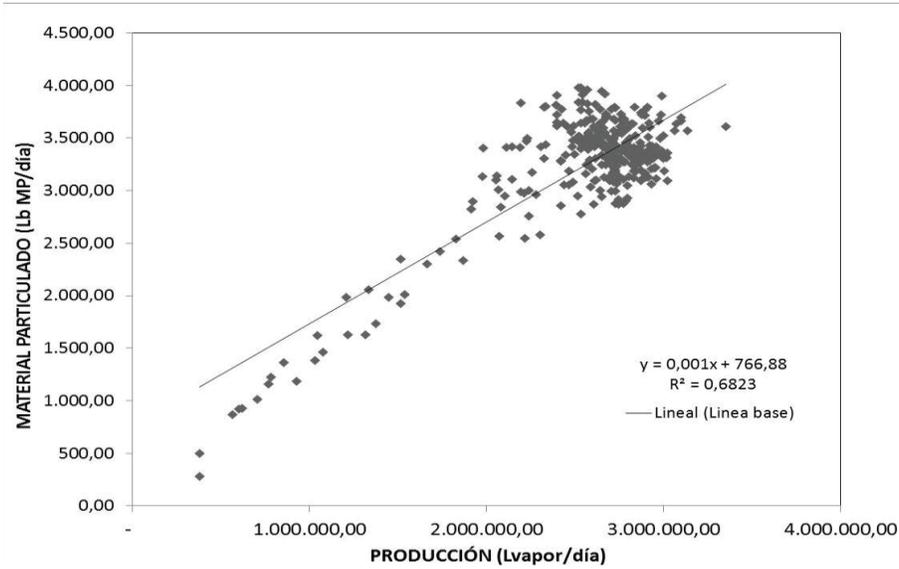
Aplicando el FE se pudo estimar el MP diariamente, para los registros presentados para el 2011. El promedio de MP obtenido fue 3249,40 lb MP/día con una desviación estándar de 559,87, y se alcanza un valor mínimo de emisiones de 282,85MP/día y un máximo en las tasas de emisión de 3979,59MP/di. Estudios reportados por [Orellana, et al., 2009], el cual encontró para una caldera de igual capacidad las emisiones son alrededor de 5554,41 lb MP/día.

La ecuación lineal de la figura 1, representa la función para estimar las emisiones de MP del proceso de generación de vapor para un determinado valor de producción del mismo. La función representa una explicación del 68,23% de los datos graficados, debido a que existe una variabilidad significativa entre las emisiones y la producción evaluada, es decir que para una producción de vapor determinada se presentan diferentes tasas de emisión de MP.

Se encontró que la emisión de MP que no proviene del nivel de producción de vapor es 766,65 lb MP/ton bagazo, que representa el 23,6% de las emisiones promedio en un día. En condiciones ideales el total de MP generado se relaciona con la capacidad de generación de vapor de la caldera [Vas, et al., 2010]. Este es producto de elementos inertes en el combustible, que no se combinan con el comburente (oxígeno) y pasan directamente a los residuos de la combustión [Calle & Ulloa, 2010]. En el bagazo los elementos inertes, según la composición química, son las cenizas que varía al cambiar de una región a otra, incluso entre la misma región, así como entre variedades de caña [Rosales et al., 2008]. Por lo tanto, las emisiones no asociadas a la producción son producto de un bajo rendimiento en la combustión a una quema ineficiente de bagazo.

Por lo tanto, será necesario un exceso de bagazo para obtener la energía que mantenga el nivel de producción de vapor que requiere el ingenio. La relación de sobrecosumo de bagazo con la cantidad de MP emitido, está dada que por cada kg de MP se dejan de aprovechar 4 kg de bagazo [EEAOC, 2004], es decir, se están desperdiciando 507,71 toneladas de bagazo al año, una cantidad significativa que podría significar una oportunidad económica y ambiental para la optimización del proceso.

**Figura 1.** Emisiones de Material Particulado vs Producción de Vapor



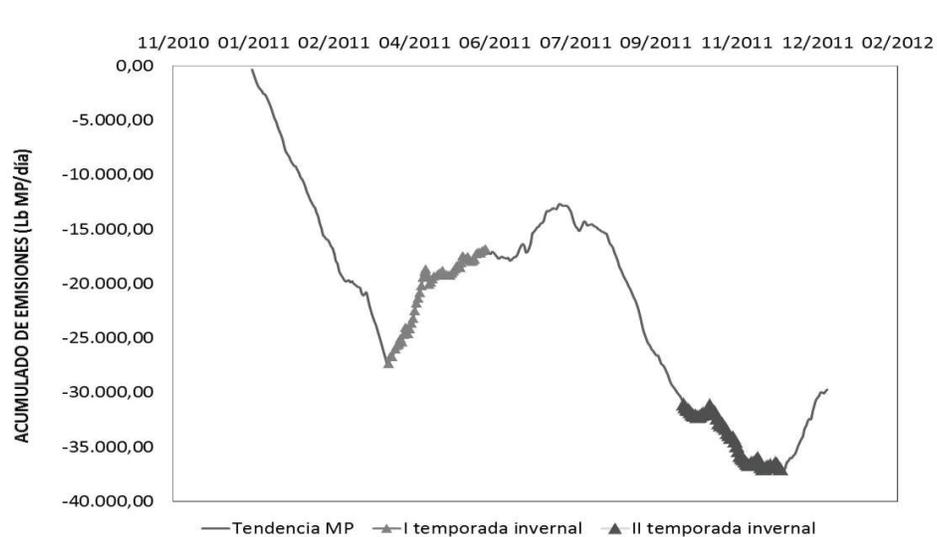
Fuente. Elaboración propia

**Tabla 1.** Información del gráfico 4.

Ecuación Lineal	$E = 0,001P + 766,65$
Índice de correlación	0,6823
Emisiones de material particulado no asociado a la producción (lb MP/día)	766,65

Fuente. Elaboración propia

**Figura 2.** Tendencia – CUSUM



Fuente. Elaboración propia

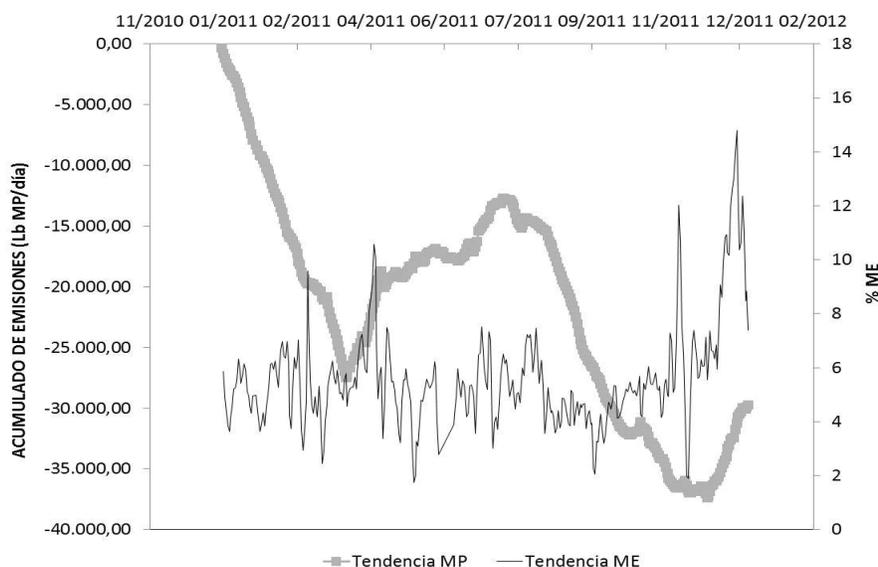
### 3.2. Monitoreo de las emisiones de MP

El análisis del comportamiento de MP en el tiempo, se obtiene por el método de sumas acumulativas (cusum) (Figura 2), asociándolo a las temporadas de invierno establecidas en la región por el Centro de Investigación de la Caña de Azúcar en Colombia (Cenicaña) [Cortés & Barrios, 2010].

Se encontró un comportamiento no uniforme en las emisiones de MP, presentando una variación considerable en la tasa de emisión a lo largo del año. Desde enero hasta los primeros días de marzo se observa una tendencia a la disminución de MP emitido, debido a las operaciones de mantenimiento que se realizan al inicio del año.

A partir de marzo hasta finales del mes de junio aumentaron las emisiones de MP; comportamiento esperado para la primera temporada de lluvia (abril-mayo), ya que bajo regímenes de lluvia los inquemados por el alto contenido de ME mineral en el bagazo. De julio a noviembre el MP tiende a disminuir, contrario a lo que se esperaría para la segunda temporada de lluvias (octubre-noviembre) del año. Por el contrario, los últimos días del año el incremento de las emisiones es considerable, esto asociado a que a finales de 2011 y principios de 2012, se registraron condiciones extremas de precipitación en el valle geográfico del río Cauca, producto del fenómeno de La Niña [Asocaña, 2013].

**Figura 3.** Comportamiento de la materia extraña



**Fuente.** Elaboración propia

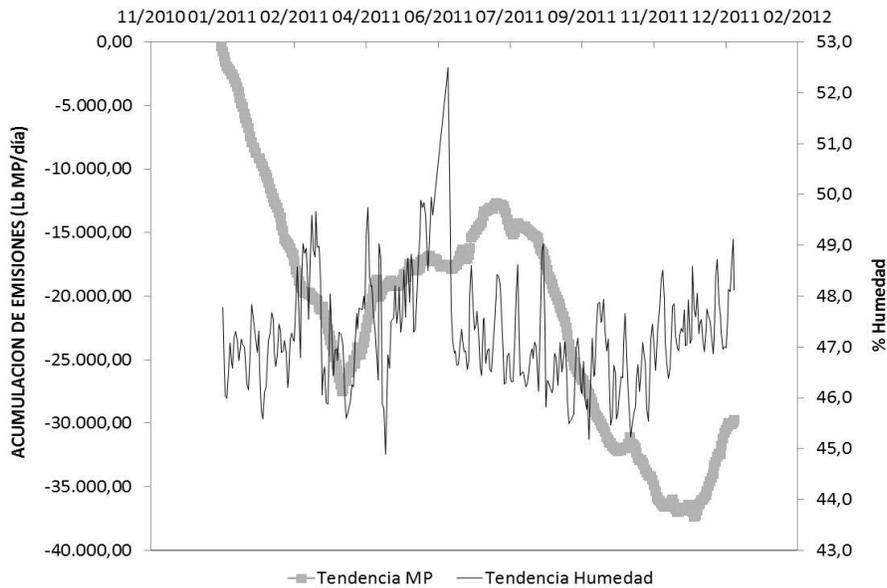
Se encontró una relación entre el contenido de ME del bagazo y la tendencia de emisiones de MP, en donde un incremento de MP esta precedido de un aumento en los contenidos de ME del bagazo. En las dos temporadas de invierno la ME tiende a aumentar significativamente, lo que es esperado ya que se presenta una mayor cantidad de suelo adherido en la caña durante la cosecha por el alto grado de humedad del terreno, como se explicó anteriormente. [Garcés & Martínez, 2007; Larrahondo, 1995; Aroca & Peña, 2011].

Aunque el aumento de ME no está solamente asociado a las dos temporadas de lluvias establecidas, si se observa una relación directa con las emisiones de MP, presentando los valores más altos de ME en las dos épocas de invierno, y los últimos días de año donde las condiciones de precipitación fueron extremas.

Se observa que los valores de ME se encuentran entre 2 y 14%, manteniéndose la tendencia a valores entre 5 y 7%, un valor que la industria considera manejable para el proceso de elaboración, pero

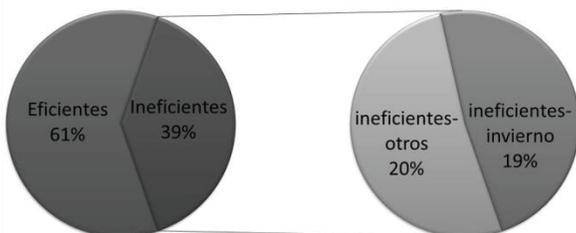
que impacta considerablemente las emisiones de MP, disparando las tasas de emisión en valores por encima de 10% como se observa en los dos últimos meses del año.

En la figura 4 se observa que la humedad se relaciona directamente con las emisiones de MP. Durante el mes de junio se presentan los valores más altos de humedad lo que se refleja en las máximas emisiones de MP alcanzadas en el año. De igual manera, hacia el final del año (noviembre- diciembre) el aumento de humedad se relaciona con el aumento de las emisiones, asociado a las condiciones extremas de precipitación ya mencionadas para estos últimos meses del año. Según [Trujillo, 2011], el incremento de las tasas de emisión es debido a la presencia de material incombusto ya que cuando el bagazo tiene una humedad muy alta, la temperatura de combustión no es suficientemente elevada como para completar las reacciones químicas del proceso.

**Figura 4.** Comportamiento de la humedad

Fuente. Elaboración propia

Asociando la humedad a las temporadas de lluvia se observa una relación entre estos dos parámetros, la humedad tiende a aumentar en regímenes de lluvia, aunque la relación directa de este parámetro se asocia con el proceso de molienda ya que depende de la cantidad de agua de imbibición empleada para retirar la sacarosa y de la eficiencia de los molinos del ingenio, especialmente el último, en el cual se realiza la extracción final de jugo al bagazo que posteriormente es enviado a la caldera. Se observa que los niveles de MP no bajan de 44%, un valor aceptable para la industria en el proceso de elaboración, pero que afecta altamente el proceso de generación, por las pérdidas de energía y aumento de las tasas de MP, estableciéndose que una reducción de la humedad hasta el 40% aumenta el PCI en un 19% y disminuye un 22% el bagazo quemado en el horno [Paz & Cárdenas, 1999], lo que se traduce en un descenso de las emisiones de MP para una producción igual de vapor. Por lo tanto los valores de humedad manejados en este estudio, no son viables energéticamente ni ambientalmente.

**Figura 5.** Porcentaje de datos eficientes e ineficientes.

Fuente. Elaboración propia

Se determinó que el 39,49% de los días se encontraron como ineficientes (emisiones por encima de la tendencia) un valor alto que sugiere un proceso con altos costos ambientales y económicos. De estos el 19,03% de los días pertenecen a las dos temporadas anuales de lluvia que se han establecido en el Valle del Cauca, validando la relación existente de la precipitación con el proceso de generación, a partir del modelo. Es importante mencionar que debido al cambio climático los regímenes de precipitación han variado considerablemente en especial por fenómenos climáticos como La Niña, que afecta temporal y espacialmente la ocurrencia de la precipitación por lo que las temporadas establecidas presentan un grado de incertidumbre. Sin embargo el modelo puede responder a esta variabilidad ya que se realiza dando respuesta a estos eventos como se observó en los últimos días del año en donde se presentaron precipitaciones extremas, atípicas en esta época.

#### 4. CONCLUSIONES

La estimación de emisiones de MP a partir de las herramientas de gestión se encuentra dentro de los valores de emisiones de MP reportados por otros autores. Un resultado aceptable para realizar un análisis aproximado de la tendencia de las emisiones asociadas a la producción de vapor, influenciada por la humedad y ME del bagazo. Se encontró una relación directa entre estos parámetros y el MP, las variables afectan significativamente la producción de este contaminante llevando a valores pico de emisión como respuesta a un incremento en los valores de humedad y ME.

El modelo tuvo una respuesta positiva siendo una alternativa viable económicamente y logísticamente para el seguimiento y monitoreo de esta variable ambiental tan sensible y regulada, en los ingenios azucareros, que representa impactos en el ambiente y en su proceso de elaboración. Se encontró que el 23,6% de las

emisiones no están asociadas a la producción de vapor, lo que indica una pérdida de 507, 71 ton de bagazoal año, pérdidas asociadas a la calidad del bagazo y condiciones operacionales.

El clima como un factor determinante en la industrialización de la caña de azúcar y la generación de MP en este proceso, presenta una relación directa en cuanto su incidencia en las tasas de emisión, aunque solo el 19,03% de las emisiones están asociadas a las épocas de invierno establecidas, el cusum muestra la relación por el aumento del MP en los últimos meses del año donde se presentaron altos índices de precipitación.

El MP se puede establecer como un indicador ambiental asociado a la eficiencia energética del proceso, que empleándolo como una herramienta de gestión de la energía contribuye a la reducción de costos por consumo de energía y costos asociados a la mitigación de impactos ambientales por emisiones, debido a reducción de las mismas por optimización del proceso.

## REFERENCIAS

- Aguirre, A. I. (2010). Estudio de series temporales y composición química del material particulado atmosférico en distintas áreas del país vasco.
- Aldabe Salinas, J. (2011). Caracterización Físico-química del Material Particulado en la Comunidad Foral de Navarra.
- Arciniegas, C. A. (2012). DIAGNÓSTICO Y CONTROL DE MATERIAL PARTICULADO: PARTÍCULA SSUSPENDIDAS TOTALES Y FRACCIÓN RESPIRABLE.
- Aroca Delhi, R., & Peña Estrella, J. (2011). Análisis de recubrimientos duros para molinos de caña de azúcar. Repositorio de la Escuela Superior Politécnica.
- Asocaña. (2013). Aspectos generales del sector azucarero 2012-2013.
- Calle, J., & Ulloa, S. (2010). Funcionamiento de una central térmica a vapor utilizando biomasa. Ecuador: Universidad Politécnica Salesiana.
- Cortés B, E. &, & Barrios P, C. (2010). Nuevo calendario de temporadas secas y lluviosas en el Valle del río Cauca.
- EEAOC. (2004). Eficiencia energética en el sector azucarero. Proyecto "Incremento de la eficiencia energética y productiva en la pyme argentina".
- Garcés, R. V., & Martínez, S. V. (2007). Estudio del poder calorífico del bagazo de caña de azúcar en la industria azucarera de la zona de Risaralda. Trabajo de grado para optar por el título de Tecnólogas químicas.
- García, H. M. (2006). Evaluación del riesgo por emisiones de partículas en fuentes estacionarias de combustión. Estudio de caso: Bogotá.
- Golato, M. A. (2008). Metodología del cálculo de la eficiencia térmica de generadores de vapor. Revista Industrial y Agrícola de Tucumán.
- Larrahondo, J. E. (1995). Calidad de la Caña de Azúcar.
- Orellana, J. L., Rivas, J. R., & Vélez, J. (2009). Aplicación de un modelo de dispersión de material particulado generado en calderas bagazeras. El Salvador: Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Universidad Centroamericana "Jose Simeon Canas".
- Paz, D., & Cardenas, G. J. (1999). SECADERO DE BAGAZO O ECONOMIZADOR: ANÁLISIS COMPARATIVO DE SU INFLUENCIA EN EL RENDIMIENTO ENERGÉTICO NETO DE UNA CALDERA BAGACERA. Industrial y Agrícola de Tucumán.
- Rodríguez, A. (2010). Modelación de la generación de material particulado en función de la composición del combustible.
- Rosales, A. M., Larrahondo, J., & Castillo, E. F. (2008). Determinación del poder calorífico y las cenizas en bagazo de caña de azúcar por espectroscopia de infrarrojo cercano.
- UPME. (2008). Herramientas para el análisis de caracterización de la eficiencia energética. Bogotá D. C: Unidad de Planeación Minero Energética.
- UPME. (2008). Sistema de Gestión Integral de la Energía. Guía para la implementación. Bogotá D. C: ISBN 978-958-8123-43-1.
- US.EPA. (1995). Compilation of Air Pollution Emission Factors, United States Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards. Research Triangle Park, NC: AP-42, 5th ed.
- Vas, C. M., Stamile, S. M., & O, D. S. (2010). Sistema para tratamiento de agua de ceniza de lavado de gases de caldera.
- Vásquez, H., Calero, L., & Calero, C. X. (1999). Control de Emisiones de Chimeneas: el caso del Ingenio Mayaguez.