

**Análisis de dispersión de contaminantes
atmosféricos mayoritarios generados en una
planta energética biomásica mediante la
aplicación del software AERSCREEN**

Allan Augusto Alvarado Alvarado

Escuela Agrícola Panamericana, Zamorano
Honduras
Noviembre, 2018

ZAMORANO
CARRERA DE AMBIENTE Y DESARROLLO

Análisis de dispersión de contaminantes atmosféricos mayoritarios generados en una planta energética biomásica mediante la aplicación del software AERSCREEN

Proyecto especial de graduación presentado como requisito parcial para optar
al título de Ingeniero en Ambiente y Desarrollo en el
Grado Académico de Licenciatura

Presentado por

Allan Augusto Alvarado Alvarado

Zamorano, Honduras

Noviembre, 2018

Análisis de dispersión de contaminantes atmosféricos mayoritarios generados en una planta energética biomásica mediante la aplicación del software AERSCREEN

Allan Augusto Alvarado Alvarado

Resumen. El sector energético es responsable de dos tercios de las emisiones de gases de efecto invernadero (GEI). La transformación del sector liderada por las energías renovables representa oportunidades de reducción estos contaminantes. Los sistemas de combustión de biomasa generan un ahorro de GEI > 80%, pero a la vez emiten compuestos como el material particulado (PM) (mayoritario), dióxido de azufre (SO₂), óxidos nitrosos (NO_x) y monóxido de carbono (CO). El estudio consistió en la modelación matemática de la dispersión del PM₁₀ proveniente de dos calderas operadas con biomasa para la generación de energía en un ingenio azucarero. Se cuantificaron las emisiones de contaminantes mayoritarios, verificando el cumplimiento normativo. Seguidamente, se modeló la dispersión del PM₁₀ con el software AERSCREEN bajo dos escenarios meteorológicos, usando datos promedio diarios y promedio mensuales, obteniendo la concentración máxima en 24 horas. Se encontró que usar datos diarios constituye un escenario más representativo del transporte del contaminante. Asimismo, se verificó que la topografía del sitio influye de forma directa en el comportamiento de la pluma y su concentración. Se comparó el uso de SCREEN3 y AERSCREEN, obteniéndose que la no consideración de las variables que rigen la dispersión conlleva a la interpretación de datos asociados al cumplimiento de la normativa. Finalmente, se evaluaron las medidas de mitigación, encontrando que el PM₁₀ ha disminuido, sin embargo, el precipitador electrostático presenta una mayor eficiencia en comparación al “scrubber”, favoreciendo el cumplimiento de la normativa.

Palabras clave: Combustión de biomasa, mitigación, modelo matemático, pluma, PM₁₀.

Abstract. The energy sector is responsible for two thirds of greenhouse gas (GHG). The transformation of the sector led by renewable energies represents opportunities of reduction. Biomass combustion systems generate a GHG saving > 80%, but they emit compounds such as particulate matter (PM) (majority), sulfur dioxide (SO₂), nitrous oxides (NO_x) and carbon monoxide (CO). The study consisted of the mathematical modeling of PM₁₀ dispersion from two boilers operated with biomass for the generation of energy in a sugar mill. The emissions of major pollutants were quantified, verifying the normative. Next, the PM₁₀ dispersion was modeled with the AERSCREEN software under two meteorological scenarios, using average daily and monthly average data, obtaining the maximum concentration in 24 hours. The use of daily data constitutes a more representative scenario to the transport of the pollutant. Likewise, the topography of the site directly influences the behavior of the plume and its concentration. The use of SCREEN3 and AERSCREEN was compared, obtaining that the non-consideration of the variables that govern dispersion entails the interpretation of data and compliance of regulations. Finally, mitigation measures were evaluated, finding that the PM₁₀ has decreased, however, the electrostatic precipitator presents a higher efficiency compared to the “scrubber”, favoring compliance with the regulations.

Key words: Biomass combustion, mathematical model, mitigation, plume, PM₁₀.

CONTENIDO

Portadilla	i
Página de firmas.....	ii
Resumen.....	iii
Contenido.....	iv
Índice de Cuadros, Figuras y Anexos	v
1. INTRODUCCIÓN	1
2. METODOLOGÍA	4
3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	11
4. CONCLUSIONES.....	25
5. RECOMENDACIONES.....	26
6. LITERATURA CITADA	27
7. ANEXOS	30

ÍNDICE DE CUADROS, FIGURAS Y ANEXOS

Cuadros	Página
1. Nombre y tipo de modelación en AerscreenEZ® para ambas calderas.	8
2. Parámetros constantes para simulación con AerscreenEZ®.	9
3. Caudal de gases, concentración de PM ₁₀ y cálculo de tasa de emisión.	13
4. Temperatura máxima y mínima, velocidad de viento mínima.	15
5. Resumen del modelo de dispersión diario para ambas calderas.	16
6. Resumen de modelación de dispersión mensual para ambas calderas.	18
Figuras	Página
1. Pasos para modelar la dispersión en AerscreenEZ®.	10
2. Proporción de contaminantes mayoritarios en caldera HPB.	11
3. Proporción de contaminantes mayoritarios en caldera ISGEC.	12
4. Valores de emisión PM ₁₀ y valor límite para la caldera HPB.	14
5. Valores de emisión PM ₁₀ y valor límite para la caldera ISGEC.	15
6. Efecto topográfico en la dispersión de PM ₁₀ para la caldera HPB.	18
7. Efecto topográfico en la dispersión de PM ₁₀ para la caldera ISGEC.	19
8. Comparación AerscreenEZ®, SCREEN3 y valor normativo.	20
9. Concentración de PM ₁₀ y distancia desde chimenea HPB.	21
10. Valor de emisión de PM ₁₀ obtenido en monitoreo puntual.	22
11. Comparación uso de “scrubber” y en escenario de no uso.	23
Anexos	Página
1. Temperatura mensual mínima, máxima y promedio para el área de estudio.	30
2. Velocidad de viento mensual mínima, máxima y promedio.	30
3. Variables a introducir en el software AerscreenEZ® y sus unidades.	31
4. Estadísticos descriptivo y test de normalidad para emisiones de PM ₁₀	32
5. Comparación de parámetros para caldera HPB con y sin “scrubber”.	32
6. Input AerscreenEZ®, caldera ISGEC para simulación promedio diario.	32
7. Input AerscreenEZ®, caldera HPB para simulación promedio mensual.	33
8. Input AerscreenEZ®, caldera ISGEC para simulación promedio diario.	33
9. Input AerscreenEZ®, caldera HPB para simulación promedio mensual.	34
10. Rosa de viento para la zona de estudio.	34
11. Funcionamiento de un “scrubber” o depurador húmedo.	35
12. Funcionamiento de un precipitador electrostático.	35

1. INTRODUCCIÓN

Un contaminante es cualquier sustancia que se introduce a un sistema, ya sea por fuentes naturales o antropogénicas. Los contaminantes atmosféricos representan la fracción de elementos o compuestos con la capacidad de ser aerotransportados. Del mismo modo los contaminantes pueden ser partículas sólidas, líquidas, gaseosas o interacciones de las anteriores. De manera general, se suelen dividir en tres grupos: (1) contaminantes emitidos directamente desde fuentes identificables, (2) contaminantes producidos por la interacción de contaminantes primarios y (3) contaminantes que reaccionan con los constituyentes de la atmósfera, con o sin foto activación (Lee, Huffman y Chang, 1999).

El sector energético es responsable de dos tercios del total de emisiones de gases de efecto invernadero (GEI), por ende, ha habido una transformación del sector energético liderada por las energías renovables (Internacional Energy Agency, 2016; Intergovernmental Panel on Climate Change, 2011). Entre ellas se encuentran las plantas industriales que utilizan la biomasa para la producción de energía. A diferencia de las plantas convencionales, las plantas de biomasa pueden ser operadas de manera sostenible. Para asegurar que la sostenibilidad del aprovechamiento de la biomasa, el ciclo de producción y extracción debe ser continuo para poder neutralizar las emisiones de GEI en el proceso de combustión (Sardiñas, Morales y Orozco, 2017).

Al igual que las plantas de energía operadas con combustibles fósiles, los sistemas de combustión de biomasa pueden emitir contaminantes atmosféricos. Entre ellos se encuentran materiales particulados (PM) por sus siglas en inglés, dióxidos de azufre (SO_2), monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NO_x). Debe mencionarse que la cantidad de estos contaminantes del aire y su mezcla se debe a factores de construcción y diseño de la caldera. De igual forma se debe a las características de los procesos, el tipo de material que se está utilizando como combustible y si la planta misma cuenta con equipos de control de contaminantes (Cerdá, 2009).

El PM es un conjunto de partículas sólidas y líquidas producto de quema incompleta de combustibles, transformación de metales y combustión de residuos. Su composición incluye materiales carbonosos, compuestos orgánicos volátiles (COV), hidrocarburos aromáticos policíclicos (PAH), compuestos de azufre y nitrógeno. Este contaminante tiende a permanecer suspendido en el aire y no sedimenta en períodos cortos, lo que se explica en términos de su tamaño y densidad. Por ello, su clasificación es con base en el diámetro aerodinámico, siendo las partículas de 2.5 y 10 μm las más estudiadas. Este contaminante puede causar pérdida de visibilidad, acidificación de cuerpos de agua, desbalances de nutrientes en el suelo y contribución a efectos de la lluvia ácida. En términos de salud pública, el PM está relacionado con enfermedades respiratorias (Suárez, 2012).

De acuerdo a Prieto (2007) el tipo de proceso de combustión incide directamente en la calidad de las emisiones de las plantas de biomasa. Generalmente se usan dos tipos de calderas en estas plantas, el primero es conocido como caldera con alimentación esparcida. En este mecanismo, la biomasa entra al horno y es quemada en suspensión, donde grandes piezas de biomasa son separadas por una parrilla estacionaria o en movimiento y luego es quemada. El segundo tipo de caldera es de lecho fluidizado, en donde las partículas sólidas son suspendidas en un fluido. Ésta un tipo de combustión más completa, con temperaturas más bajas en comparación con las calderas convencionales y no se llega a la temperatura necesaria para la formación de óxidos nitrosos. Un estudio realizado acerca de emisiones directas de combustión de madera, mostró que el proceso de combustión de biomasa de lecho fluidizado produce menos NO_x , CO y PM que la de tipo convencional (National Renewable Energy Laboratory, 2003).

El transporte y dispersión de los contaminantes se encuentra condicionado a la fuente de emisión, características del contaminante, condiciones meteorológicas y efectos topográficos. La dispersión es el proceso mediante el cual los contaminantes se mueven a través del aire y la pluma se extiende sobre un área, reduciendo la concentración de éstos. Un factor relevante es la estabilidad de la atmósfera, indicado por el gradiente de temperatura. En una atmósfera estable, las masas de aire se enfrían a medida que se elevan. Esto se produce cuando el gradiente vertical ambiental es igual al gradiente adiabático seco. De lo contrario, se produce una inversión térmica y consecuentemente el fenómeno conocido como fumigación, que aumenta la concentración a nivel de suelo. Para evitar este fenómeno, las buenas prácticas de ingeniería (GEP) recomiendan chimeneas altas que liberen los contaminantes a mayor altura favoreciendo una mayor altura de mezclado (Allen, 2001).

Una pluma se dispersa horizontal y verticalmente, siendo afectada por la velocidad del viento y su dirección predominante del viento (que gobierna la orientación de la pluma) y la temperatura. A mayor velocidad de viento, se reduce la concentración del contaminante a nivel de suelo provocando mayor dilución y mezcla. El incremento de los gradientes de velocidad de viento y de las emisiones de la chimenea, así como de la temperatura ambiental y de la pluma, derivará en una mayor elevación y altura de mezclado. El efecto topográfico (forma irregular de superficie) incide en el movimiento de las masas de aire, y consecuentemente en la dispersión. Además, los efectos aerodinámicos de obstáculos pueden dificultar la dispersión, haciendo que el contaminante se acumule en zonas específicas. Si existen elevaciones asociadas a la topografía del terreno (montañas o edificaciones), el impacto del contaminante es mayor, debido a que la línea central de la pluma tendrá un contacto directo con éstas (Chang, 2008).

Se denomina inversión térmica (o de temperatura) fenómeno que se produce cuando la temperatura asciende conforme a la altitud. Ambientalmente, esto es clave debido a que limita la dispersión vertical de la pluma, que, al encontrarse atrapada bajo la capa de inversión, hace que los contaminantes puedan transportarse hasta alcanzar el nivel del suelo. El fenómeno mencionado se denomina fumigación, y produce concentraciones altas a nivel de suelo. Como se había mencionado anteriormente, estas condiciones se producen en una atmósfera inestable (Chang, 2008).

De acuerdo a Manzur, Benzal y Gonzáles (2012), los modelos de calidad del aire son usados para pronosticar la dispersión de emisiones liberadas por fuentes puntuales para verificar el cumplimiento de normativas de calidad del aire. De ellos, los modelos gaussianos son los más usados, que se definen como una representación matemática usada para estimar la concentración de un contaminante no reactivo de una fuente puntual. De manera matemática, la concentración del gas puede ser descrita como una distribución de campana de Gauss, que comprende básicamente dos parámetros: el primero es μ (valor medio) o valor de centralización; el segundo es σ (desviación estándar) o parámetro de dispersión. Respecto a sus supuestos, asume un estado estacionario donde la velocidad del viento y velocidad de emisión permanecen constantes y no se produce reacción química (Patiño, 2007; Echeverría, 2004).

Una investigación realizada en la ciudad de La Calera, Valparaíso, zona central de Chile, utilizó el software SCREEN3 bajo diferentes escenarios de dispersión para determinar cómo las variables afectaban la dispersión de los contaminantes. Entre los hallazgos del estudio, se encontró que cuando se aumentaba la temperatura y velocidad de salida de la pluma, la concentración del contaminante disminuía debido a que la densidad de la pluma era menor. De igual forma, cuando la tasa de emisión de contaminantes era menor, la dispersión de los mismos era igualmente menores (Fernández, 2012).

Actualmente la EPA recomienda el uso del modelo de dispersión AERSCREEN, el cual consiste en varios componentes. Uno de ellos es MAKEMET, que genera una matriz de condiciones meteorológicas; AERMAP, que analiza los efectos del terreno y AERMOD, que simula la concentración de la pluma. A diferencia del SCREEN, este modelo incorpora los efectos del terreno en el análisis proyección y toma en cuenta variables meteorológicas. El modelo arroja como resultado concentraciones máximas en una hora y promediadas a 3-hr, 24-hr y media anual con su respectiva distancia (Bhat y Kumar, 2011; EPA, 2016).

De acuerdo al Tribunal Superior de Cuentas (2011), en términos de legislación ambiental, Honduras cuenta con un reglamento para el control de emisiones generadas por fuentes fijas, y recomienda el uso de modelos de dispersión de la EPA. Tomando como referencia que el sector energético es el responsable de la mayor cantidad de emisiones de GEI, se considera relevante el estudio de la dispersión de las emisiones provenientes de una planta energética de biomasa de una empresa azucarera. Considerando la aplicabilidad y alcance del modelo AERSCREEN, el estudio se limitará únicamente a dicha compañía azucarera y 10 km alrededor. Los resultados obtenidos no pueden ser extrapolados a otras compañías u otras áreas, ya que son específicos al diseño y condiciones de operación de las calderas, así como las condiciones meteorológicas y topográficas del lugar. Para ello se planteó:

- Analizar las emisiones producidas y concentraciones de elementos mayoritarios para las chimeneas de las calderas ISGEC y HPB.
- Modelar la dispersión y destino de la pluma del contaminante (PM_{10}) generada por el proceso de combustión en las calderas ISEG y HPB utilizando el software AerscreenEZ®.
- Evaluar la eficacia de las medidas de mitigación implementadas por la compañía azucarera en ambas calderas.

2. METODOLOGÍA

Descripción del área de estudio.

El estudio se realizó en los límites de una compañía azucarera que se encuentra ubicada en Honduras. Dicho lugar se encuentra a una elevación de 647 msnm, cuenta con una precipitación de 1,100 mm y una temperatura anual promedio de 24.41°C. La velocidad de viento promedio es de 3.41m/s con una dirección prevaleciente de 70°. El rubro económico de la empresa se compone de la producción, procesamiento y comercialización de caña de azúcar y sus derivados. De igual forma cuenta con una planta energética biomásica.

La planta energética de dicha empresa azucarera consta de dos calderas biomásicas, HPB e ISGEC, cuyo combustible es una mezcla de 80% bagazo añadido a un 20% de otras biomasas (madera en rollo, chip, aserrín). La caldera HPB cuenta con una parrilla tipo pinhole y la ISGEC con una parrilla tipo viajera. El vapor producido por las calderas es de 75 ton/hora y 60 ton/hora respectivamente. Ambas calderas generan el vapor necesario para los procesos unitarios de procesamiento industrial y para la producción de energía en un generador con una potencia instalada de 30 MW. Cada caldera cuenta con una medida de mitigación diferente, un “scrubber” en la caldera HPB y un precipitador electrostático en la caldera ISGEC. La energía es distribuida en dichos procesos industriales y, además, se entrega un porcentaje a la red nacional, generando ingresos económicos.

Descripción del enfoque, alcance y diseño del estudio.

El estudio se compone de un enfoque cuantitativo porque se basa en el análisis de datos obtenidos en monitoreos puntuales que luego se utilizan como entrada en el software AerscreenEZ®. El alcance es descriptivo y correlacional, ya que se describe el comportamiento de las emisiones puntuales y su modelación, además se busca la asociación de ciertas variables. El diseño del estudio es no experimental ya que no se está llevando a cabo un experimento con variables controladas; solo son observadas y medidas. Es además de tipo transversal, ya que se obtuvieron datos de monitoreo en un período específico y consecutivo.

Cuantificación de emisiones y concentración de elementos mayoritarios.

La compañía azucarera subcontrata a una empresa consultora de servicios ambientales para el monitoreo puntual de emisiones y modelación de dispersión. Dicha empresa consultora cuenta el permiso extendido por la Dirección de General de Evaluación y Control Ambiental (DECA), que pertenece a la Secretaría de Energía, Recursos Naturales, Ambiente y Minas (Mi Ambiente+). Además, cuenta una certificación extendida por la EPA para el monitoreo de aire en chimeneas.

Con los datos obtenidos en los monitoreos efectuados por dicha empresa subcontratada, se realizó en primera instancia un análisis descriptivo para los contaminantes mayoritarios (CO, CO₂, NO_x y SO₂) en el período 2016-2018 para cada caldera. Estos debieron convertirse a una misma unidad para efectos de uniformizar y comprender la distribución y el comportamiento de los mismos en el período mencionado. Para cada caldera se realizaron dos tipos de gráficos, el primero visualizando el CO₂ y el resto de contaminantes; el segundo sin tomar en cuenta el CO₂.

Seguidamente se obtuvieron los parámetros de caudal, temperatura y velocidad de los gases y concentración de PM₁₀ para cada una de las calderas biomásicas, HPB e ISGEC para el cálculo de la tasa de emisión. La tasa de emisión de material particulado es de suma relevancia, ya que es el dato que se introduce en el software AerscreenEZ® para modelar la dispersión (no la concentración de PM₁₀). Dicha tasa representa la masa de PM₁₀ emitida por unidad de tiempo y fue calculada tomando como base el caudal de emisión de cada chimenea, la concentración de PM (partículas totales) y el factor de conversión a PM₁₀. Esta conversión se llevó a cabo para cada monitoreo por año, según la caldera con la ecuación 1:

$$\frac{\text{Nm}^3}{\text{min}} \times \frac{\text{mg}}{\text{Nm}^3} \times \frac{1 \text{ g}}{1,000 \text{ mg}} \times \frac{1 \text{ min}}{60 \text{ s}} \times 0.72 = \frac{\text{g PM}_{10}}{\text{s}} \quad [1]$$

Donde:

Nm³ = metro cúbico normalizado.

mg = representa la concentración del PM por metro cúbico normalizado

0.72 = representa el factor de conversión de PM a PM₁₀.

Posteriormente se llevó a cabo un análisis estadístico descriptivo (media, desviación estándar), y se compararon las mediciones puntuales para material particulado (PM₁₀) de cada caldera (HPB e ISGEC) con la normativa vigente en Honduras. Los valores límites de emisión en chimenea de calderas alimentadas con biomasa los dictamina el Reglamento para el Control de Emisiones Generadas por Fuentes Fijas. Se elaboraron de igual manera gráficos donde se visualizase la medición de este parámetro por año y la línea de normativa.

Dispersión y destino de la pluma del contaminante.

Se usó un modelo de dispersión gaussiano de contaminantes propuesto y recomendado por la EPA conocido como AERSCREEN. La versión comercial del software es AerscreenEZ®, cuya licencia educacional fue otorgada por la empresa italiana “Enviroware”. Para el uso de este software se requirió de la introducción de variables, mismas que el modelo usa a través de algoritmos para obtener las estimaciones y concentraciones de las emisiones. En primera instancia se seleccionó la opción del tipo de emisión, que, dada la naturaleza de la investigación, para ambas calderas HPB e ISGEC es de tipo “Point” debido a que es una fuente estacionaria y “uncapped vertical stack” o chimenea vertical destapada en ambos casos (EPA, 2016).

Variables de la fuente y diseño de las chimeneas.

Estas variables se obtuvieron de la información proporcionada por la azucarera en informes y monitoreos realizados por la empresa consultora subcontratada. En cuanto a las variables de diseño como altura y diámetro interior de la chimenea, se obtuvieron directamente de la empresa azucarera. Las variables que se introdujeron al software en este paso fueron:

1. Tasa de emisión (g/s) (calculada en el objetivo N° 1)
2. Altura de la chimenea (m)
3. Diámetro interior de la chimenea (m)
4. Temperatura de chimenea (K)
5. Velocidad del gas de la chimenea (m/s)

Variables climáticas y su obtención.

MAKETMET es el componente del software AerscreenEZ® que analiza las variables meteorológicas. Dichas variables introducidas fueron:

1. Temperatura máxima y mínima del aire ambiente (K)
2. Velocidad del viento mínima (m/s)
3. Altura del anemómetro (m)

Las variables mencionadas anteriormente se obtuvieron del sitio “NASA Prediction Of Worldwide Energy Resources”, donde se introdujeron las coordenadas de la localidad del estudio en formato Latitud/Longitud. La obtención de estas variables se dividió en dos secciones: datos diarios y datos promedio mensuales. Para la obtención de datos diarios para las tres variables descritas, se escogió en el sitio web la opción “Daily” y luego las opciones “Maximum Temperature at 2 Meters”, “Minimum Temperature at 2 Meters” y “Minimum Wind Speed at 10 Meters”.

Seguidamente, para obtener datos mensuales en las tres variables mencionadas, se cambió la opción “Daily” a “Climatology”. Para la variable velocidad de viento, se escogió la opción “Wind Speed at 10 Meters” y adicionalmente también se obtuvo la dirección “Wind Direction at 10 Meters” para la elaboración de una rosa de viento. Para la variable temperatura se seleccionó la opción “Earth Skin Temperature”. Cabe destacar que los datos proveídos por este sitio, son un promedio interanual desde el año 1983 hasta la fecha, por lo que se consideran de alta veracidad (NASA Langley Research Center, 2018).

Variables de superficie del terreno.

Seguidamente en el modelo se introdujeron las variables concernientes a condiciones de superficie. El software AerscreenEZ® dispone de varias opciones a seleccionar de acuerdo a las condiciones del terreno en estudio. Para mayor precisión se escogió la opción de “Introducir parámetros de superficie”, que básicamente fueron cinco parámetros:

1. Albedo
2. Radio de Bowen
3. Rugosidad de terreno
4. Coordenadas geográficas UTM NAD 83
5. Modelo Digital de Elevación (DEM)

Los datos de albedo se tomaron como promedio del albedo mensual, y se obtuvieron del sitio web “NASA Prediction of Worldwide Energy Sources” en donde se introdujeron las coordenadas geográficas expresadas en latitud/longitud de la localidad del estudio. Se seleccionó la opción “Climatology” y luego el set de datos “Solar Irradiance and Related Parameters” y finalmente la opción “Surface Albedo”. La tabla de resultados mostró datos de albedo para cada mes del año, promediado en el período (enero 1984 - diciembre 2013). Al final se obtuvo un promedio de albedo (adimensional) de 0.15 (NASA Langley Research Center, 2018).

Los parámetros restantes se obtuvieron a través de revisión de literatura. En el caso del parámetro de Radio de Bowen, el coeficiente se obtuvo de una tabla que muestra diferentes tipos de paisaje y Radio de Bowen correspondiente. De esta tabla, se escogió la opción “Crops” con un radio de Bowen de 0.3 (adimensional), ya que corresponde al área de estudio en donde predomina el cultivo de la caña de azúcar (Oke, Mills, Christen y Voogt, 2017).

El parámetro de rugosidad del terreno se obtuvo de una tabla del “European Wind Atlas” que muestra diferentes clases de rugosidad del terreno de acuerdo características y uso de la tierra. En el caso específico de esta investigación, se escogió la clase número uno que corresponde a “farmland with very few trees” o tierra de cultivo con muy pocos árboles, a lo que corresponde una rugosidad de terreno de 0.03 m (Troen y Lundtang Petersen, 1989).

Para la obtención del Modelo Digital de Elevación (DEM), se procedió a delimitar el área de estudio dibujando un polígono en Google Earth® a 10 km a la redonda de la fuente de emisión. Ese polígono se guardó en formato “.kml” en ese programa. Luego se cargó ese archivo usando el software Global Mapper®, donde se asignó el Sistema de Coordenadas Universal Transversal de Mercator (UTM) para la Zona 16 N correspondiente a Honduras. Seguidamente se conectó a un módulo “Conectar a Datos Online” con la opción ASTER GDEM (Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer Global Digital Elevation Model). De esa forma se descargó el DEM y se guardó este archivo en la extensión “.dem” requerida para la lectura en el programa AerscreenEZ® y también se transformaron los datos al Sistema de Coordenadas UTM NAD83 (North America Datum of 1983) por medio del programa ArcGIS® en el Laboratorio de Sistemas de Información Geográfica del Departamento de Ambiente y Desarrollo de la Universidad Zamorano.

Tabulación de datos y operación del software AerscreenEZ®.

El programa AerscreenEZ® es un software en el cual las variables son introducidas en secuencia. Las variables se introdujeron en el orden fuente-meteorología-receptores-terreno. Se realizaron varias modelaciones de dispersión con el fin de llevar a cabo una comparación entre el valor obtenido en el monitoreo puntual y los valores modelados de dispersión con la utilización del software SCREEN3, de la empresa subcontratada.

Se realizaron dos tipos de modelación de dispersión para las calderas HPB e ISGEC, una de tipo diario y otra mensual (con datos meteorológicos promedio diario y mensual) para tener una visión más amplia acerca de cómo varía la dispersión del PM₁₀ de acuerdo a las condiciones meteorológicas durante el año.

La modelación de tipo diaria toma en cuenta la velocidad mínima del viento de ese día en que se realizó el monitoreo puntual, así como la temperatura ambiente máxima y mínima. En el caso de la modelación de dispersión de tipo mensual, se introdujo la velocidad de viento mínima promedio para el mes de monitoreo puntual e igualmente el promedio de la temperatura máxima y mínima del mes. Una representación acerca del arreglo de las simulaciones usando AerscreenEZ® puede observarse en el Cuadro 1:

Cuadro 1. Nombre y tipo de modelación en AerscreenEZ® para ambas calderas.

Caldera	Año de monitoreo puntual	Modelación de dispersión diaria	Modelación de dispersión mensual
HPB	2016	D_HP_B_2016	M_HP_B_2016
	2017	D_HP_B_2017	M_HP_B_2017
	2018	D_HP_B_2018	M_HP_B_2018
ISGEC	2016	D_ISGEC_2016	M_ISGEC_2016
	2017	D_ISGEC_2017	M_ISGEC_2017
	2018	D_ISGEC_2018	M_ISGEC_2018

Para iniciar la simulación de dispersión de PM₁₀ en AerscreenEZ®, en primera instancia se configuraron variables generales que aplicaron a todos los escenarios descritos. En la interfaz del programa, en la sección “Configuraciones Generales” se seleccionó en la sección “Uso del terreno” la categoría “Rural”, debido a la ubicación de la compañía azucarera. De igual forma se marcó la opción “Terreno Complejo” porque el software permite analizar información geográfica para obtener mayor precisión en los escenarios de simulación. Esto es posible gracias a la elaboración de un Modelo Digital de Elevación (DEM) para el área, que luego se introduce en dicho software.

Asimismo, otras opciones que el software permite simular, tales como la opción de “Fumigación” y “Flujo Descendente” no fueron seleccionadas debido a que estas variables se aplican cuando las chimeneas se encuentren ubicadas sobre un edificio rectangular o cuando hay edificios cerca de las mismas, lo que no coincide con las condiciones del estudio. Finalmente, la opción de “Química de NO₂” tampoco fue modelada ya que el estudio se limita a la dispersión de PM₁₀, además que los óxidos nitrosos no están regulados para calderas de biomasa en Honduras ni tampoco otros compuestos como los óxidos de azufre (SO_x).

Se elaboró el Cuadro 2. como un resumen para todas las variables cuyo valor fue en todos los escenarios de modelación, ya que son datos fijos propios de la zona de estudio o del diseño de las chimeneas. La mayor parte de estos datos constantes son de índole meteorológica, geográfica y otros por defecto del software AerscreenEZ®.

Cuadro 2. Parámetros constantes para simulación con AerscreenEZ®.

Parámetro	Valor constante para modelar
Variables de Diseño de Chimenea (m)	
Altura chimenea HPB	21.00
Diámetro chimenea HPB	2.30
Altura chimenea ISGEC	50.00
Diámetro chimenea ISGEC	3.10
Meteorología	
Altura del anemómetro (m)	10.00
Albedo	0.15
Radio de Bowen	0.30
Rugosidad de terreno (m)	0.03
Receptores	
Distancia mínima al aire ambiental	Predeterminado (1.00 m)
Alcance de simulación	10,000 m
Información Geográfica	
Altura de la base de la fuente emisión	647.00 msnm
Sistema de Coordenadas:	UTM NAD83
Zona UTM:	16N
Coordenada este:	Valor reservado
Coordenada norte:	Valor reservado

Se elaboraron tablas de entrada para la modelación según el tipo de caldera y escenario de tiempo (diario y mensual) que pueden visualizarse con detalle para cada escenario de modelación de dispersión en la sección de anexos. Los pasos a seguir para modelar la dispersión de PM₁₀ por caldera pueden visualizarse mediante la Figura 1.

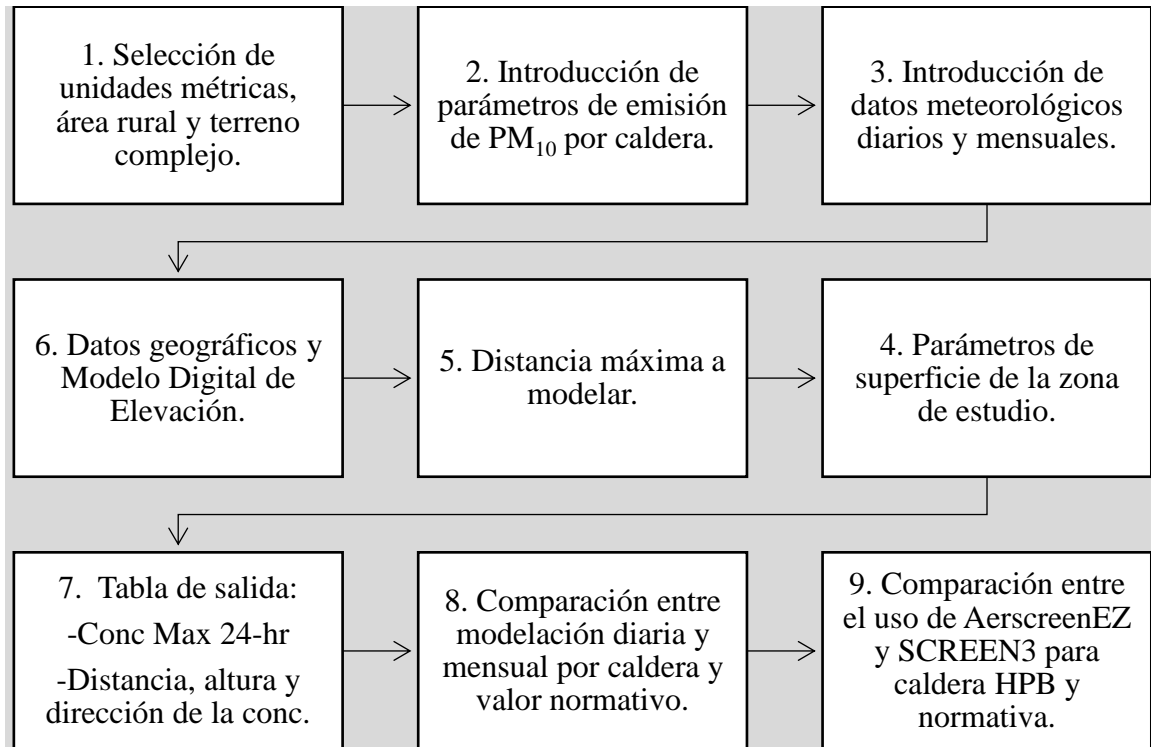


Figura 1. Pasos para modelar la dispersión en AerscreenEZ®.

Evaluar la eficacia de medidas de mitigación.

Se realizó un análisis estadístico descriptivo (media, desviación estándar) y se elaboró un gráfico de cajas para las emisiones de las calderas ISGEC y HPB con el fin de corroborar si hubo reducción de la concentración de PM_{10} a lo largo del período muestreado, tomando como referencia las medidas de mejoramiento que la empresa azucarera implementó en el precipitador electrostático (Caldera ISGEC) y el “scrubber” (Caldera HPB). Se contrastaron los resultados con el funcionamiento mecánico y eficiencia teórica de remoción de PM para ambos equipos mencionados tomando como referencia los manuales de la EPA.

Adicionalmente, en el caso de la caldera HPB se utilizaron los datos de un monitoreo puntual de emisiones donde se contó con dos escenarios, uno con el uso de “scrubber” y el otro sin el uso del mismo. Para ambos escenarios, se elaboró un gráfico de barras para los parámetros de concentración de PM_{10} , temperatura y humedad de los gases.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Cuantificación de emisiones y concentración de elementos mayoritarios.

Los datos de monitoreo puntual de PM_{10} fueron proporcionados por la compañía azucarera a través de informes extendidos por la empresa consultora de servicios ambientales subcontratada para esta actividad. El informe de análisis incluye los registros de la concentración de gases (N_2 , O_2 , CO_2) y contaminantes mayoritarios (CO , NO_x , SO_2) para cada caldera. En la Figura 2 y Figura 3 se puede visualizar la proporción de esos gases y contaminantes según la caldera expresados en porcentaje de fracción molar.

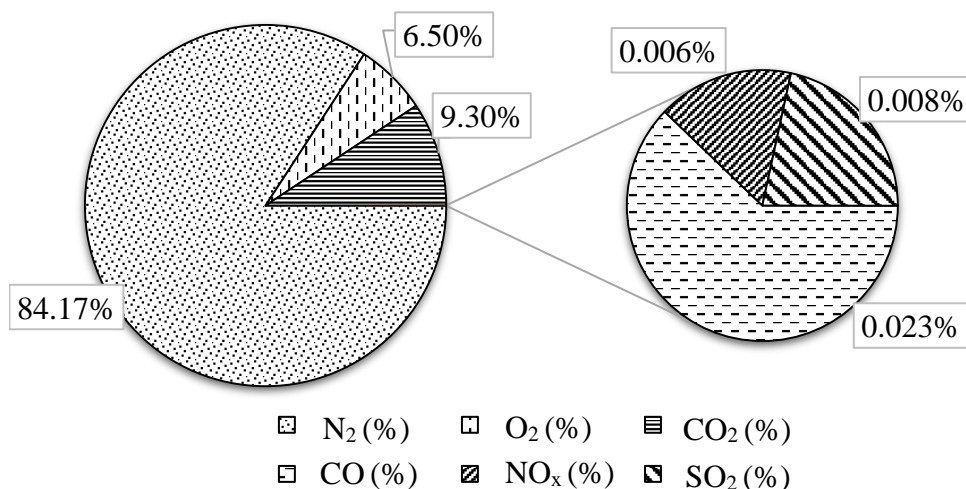


Figura 2. Proporción de contaminantes mayoritarios en chimenea de caldera HPB.

Al visualizar todos los gases en una escala porcentual de fracción molar, los contaminantes mayoritarios CO , NO_x , SO_2 no se visualizan con precisión, por lo que se requiere de otra escala como la mostrada en las Figuras 2 y 3. Esto se debe a que su concentración es baja en comparación con el CO_2 y O_2 , que representan el mayor porcentaje de los gases de chimenea. Estos últimos valores de los gases muestran diferencias entre ambas calderas. La caldera ISGEC presenta los mayores porcentajes para ambos gases en comparación con la HPB.

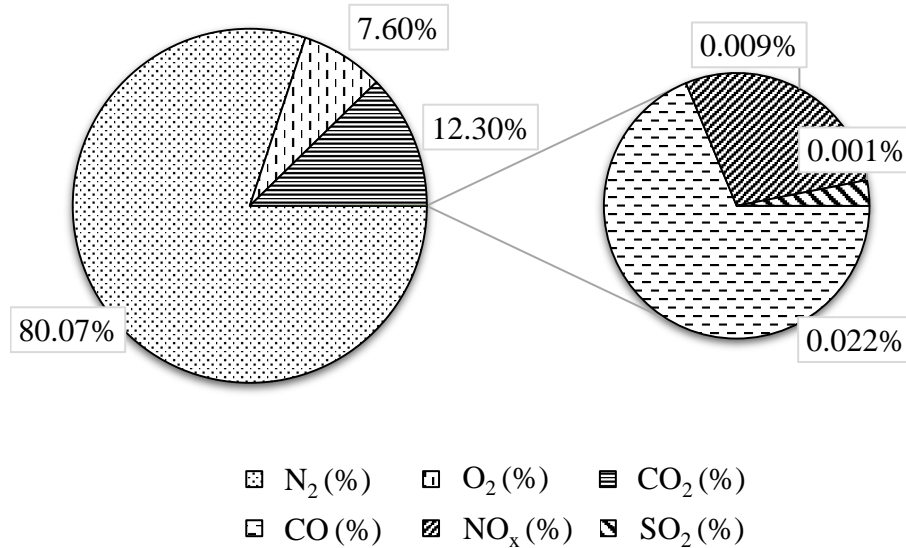


Figura 3. Proporción de contaminantes mayoritarios en chimenea de caldera ISGEC.

No obstante, debe notarse que las concentraciones de los gases sufrieron cambios en ambas calderas a partir del año 2016 al período 2017-2018, en donde la concentración de ambos gases permanece constante al mantener condiciones de operación homogéneas (misma tasa de alimentación de biomasa y combustión constante de 24 horas al día). A nivel ambiental, la caldera ISGEC libera más emisiones de CO₂ a la atmósfera. Sin embargo, este gas no es considerado como contaminante producto de combustión biomásica en la legislación hondureña.

La concentración de NO_x fue mayor en la caldera ISGEC que la HPB, a diferencia del SO₂ que mantuvo una mayor concentración en la caldera HPB. Debe hacerse mención que los NO_x se forman cuando existe exceso de aire y altas temperaturas en la combustión (Testo, 2010). Esto concuerda con los informes de monitoreo de la empresa subcontratada donde detalla que la caldera ISGEC mantiene un exceso de aire de 56% en comparación con la caldera HPB de 41%.

De igual manera el porcentaje de O₂ en chimenea es mayor para la caldera ISGEC. Respecto al CO, también existen diferencias entre ambas calderas, siendo la caldera HPB la que presenta las mayores concentraciones de este contaminante y por lo tanto mayores emisiones. Esto demuestra que la tecnología utilizada en el proceso de combustión de la caldera ISGEC es más eficiente, lo cual se refleja en una mayor concentración de O₂ en exceso y combustión más completa (menos CO). Adicionalmente, debe mencionarse que ninguno de los contaminantes (CO, NO_x, SO₂) se encuentra regulado por la normativa para la combustión en calderas biomásicas. Sin embargo, se señala que la caldera HPB emite mayor cantidad de SO₂ y CO y la caldera ISGEC mayor cantidad de NO_x.

La baja concentración de SO₂ y NO_x en ambas calderas concuerda con el informe de análisis elemental del bagazo, en el cual el contenido de nitrógeno es de 0.18% y de azufre 0.05%, en contraste con el contenido de carbono de 42.24%. Estos porcentajes fueron calculados tomando como base la masa de la muestra. De igual forma los resultados concuerdan con lo mencionado por la EPA (1996), según este informe, las emisiones de SO₂ y NO_x son menores que los combustibles fósiles debido a los bajos niveles de azufre y nitrógeno en el bagazo.

Con los datos de caudal de gases y concentración de PM₁₀ se calculó la tasa de emisión de PM₁₀, misma que puede visualizarse en el Cuadro 3.

Cuadro 3. Caudal de gases, concentración de PM₁₀ y cálculo de tasa de emisión.

Año de monitoreo	Caldera HPB			Caldera ISGEC		
	Caudal (Nm ³ /min)	PM ₁₀ (mg/Nm ³)	Tasa de emisión (g/s)	Caudal (Nm ³ /min)	PM ₁₀ (mg/Nm ³)	Tasa de emisión (g/s)
2011	-	473.22	-	-	-	-
2012	-	833.93	-	-	-	-
2013	-	775.81	-	-	-	-
2014	1816.00	939.69	20.48	-	-	-
2015	2449.00	550.46	16.18	4153.00	131.02	6.53
2016	2350.00	195.50	5.51	2791.00	22.92	0.77
2017	2201.00	237.82	6.28	2506.00	14.92	0.45
2018	2094.00	225.37	5.66	3348.00	19.98	0.80
\bar{x}	2182.00	528.975	10.82	3199.50	47.21	2.14

Fuente: Compañía subcontratada (2018)

El caudal de salida de gases de ambas calderas se encuentra asociado al diseño de las mismas, el mecanismo de combustión y las condiciones de operación. Este parámetro asocia el volumen de gas por unidad de tiempo. Por otra parte, la tasa de emisión, representa la masa de partículas con un tamaño <10 μm emitidas por unidad de tiempo (s), y se calcula a partir del caudal de gases y la concentración de PM₁₀ registrada en los monitoreos.

Al disminuir la concentración del PM₁₀ como resultado de la implementación de boquillas adicionales al “scrubber” para mitigar este impacto, entonces también se verifica una reducción en el valor de la tasa de emisión a partir del año 2016. La tasa de emisión de la caldera ISGEC se estabilizó luego del año 2015 ya que en ese año se estaban realizando pruebas de funcionamiento. En el cuadro, el color gris oscuro contrasta con el claro haciendo referencia a esa reducción y estabilización del parámetro de tasa de emisión en ambas calderas. Como se había mencionado anteriormente, este es el parámetro a ingresar en AerscreenEZ® para modelar la dispersión del contaminante. En términos generales, la tasa de emisión promedio de la caldera HPB supera en casi cinco veces la emitida por la ISGEC.

Es importante aclarar que, para efectos de cumplimiento de normativa de calidad de aire, el parámetro que se considera es la concentración de PM_{10} y no la tasa de emisión. Para ello, los datos de monitoreo son valores en base seca normalizados a una atmósfera de presión, cero grados Celsius y 6% dilución de oxígeno (así lo requiere el reglamento hondureño para el control de emisiones de fuentes fijas). Las Figuras 4 y 5 muestran las emisiones de PM_{10} y el cumplimiento de la normativa para cada caldera según el límite correspondiente por año.

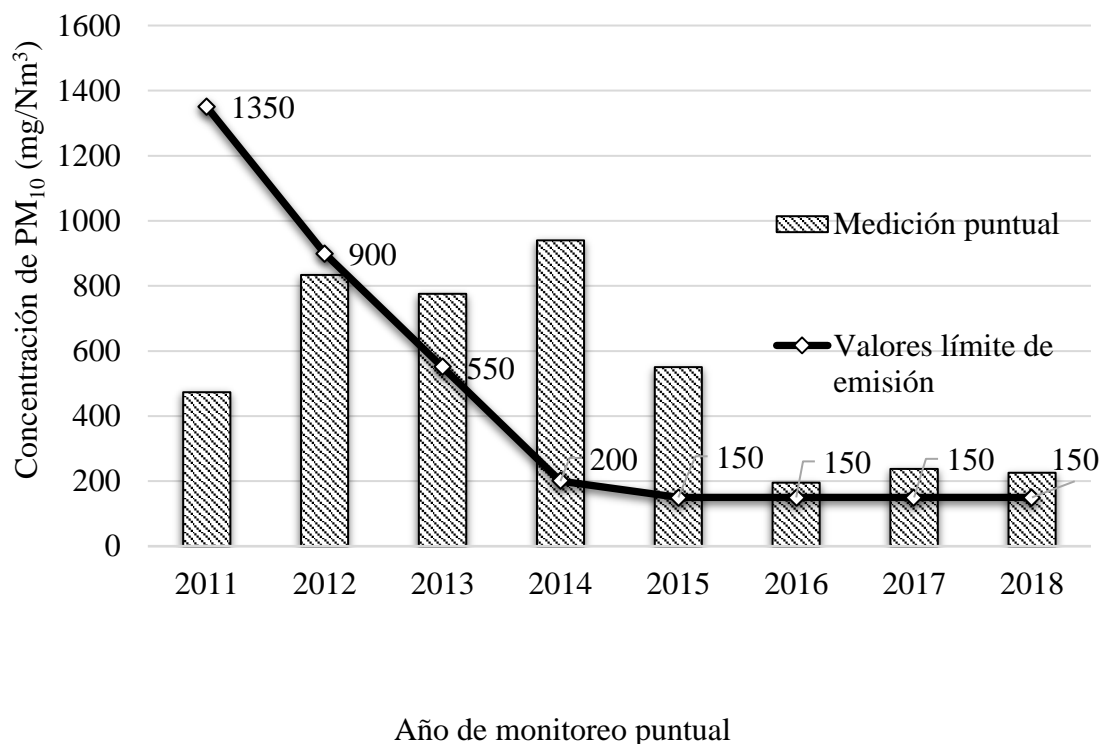


Figura 4. Valores de emisión PM_{10} y valor límite en Honduras para la caldera HPB.

Únicamente durante el período 2011-2012 se verificó el cumplimiento de los límites descritos en la normativa para monitoreos puntuales. A partir de ese año, la normativa reduce los valores límites, debido a que la legislación provee un tiempo de adopción de dicha normativa, por ende, cada año que transcurre el valor límite disminuye. En el período del 2013 al 2018 los valores de emisión se encuentran por encima del valor permitido. Es notorio que antes de la mejora implementada en el “scrubber” en el 2015 los valores de emisión son variables, pero luego esa variabilidad se reduce de $714 \pm 196.12 \text{ mg/Nm}^3$ a $219.53 \pm 21.75 \text{ mg/Nm}^3$, por ello se dice que la concentración se estabiliza al volverse más homogénea.

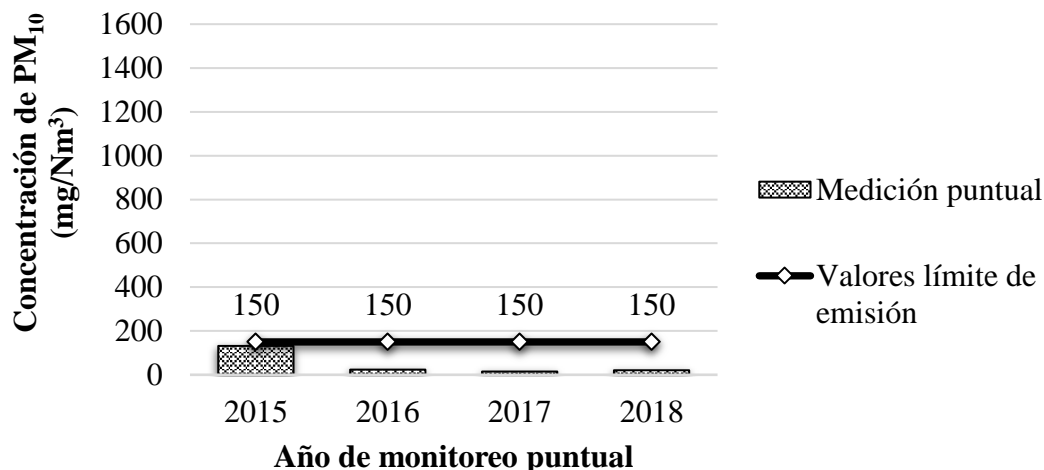


Figura 5. Valores de emisión PM₁₀ y valor límite en Honduras para la caldera ISGEC.

Los resultados obtenidos a partir de los monitoreos realizados durante el periodo 2015-2018 denotan el cumplimiento de la normativa. El aumento de la concentración en el 2015 se explica con la realización de pruebas de funcionamiento en ese año. La concentración se estabiliza de 131.02 mg/Nm³ en el 2015 a 19.27 ± 4.40 mg/ Nm³ en los años subsiguientes. Esto responde a que la caldera ISGEC, a diferencia de la caldera HPB, cuenta con un precipitador electrostático como medida de reducción de material particulado (ISGEC HEAVY ENGINEERING LTD, 2016).

Transporte y destino de la pluma de contaminante.

Antes de iniciar la modelación de dispersión de PM₁₀, se realizó un análisis descriptivo de los datos meteorológicos para la zona, específicamente de las variables temperatura máxima, mínima y velocidad de viento mínima promedio diario y promedio mensual. El período de operación de las calderas biomásicas es constante durante todo el año (24 horas al día). Sin embargo, los días en que se efectuaron los monitoreos de emisiones, y el mes al que pertenecen esos días son específicos y se detallan en el Cuadro 4.

Cuadro 4. Temperatura máxima y mínima, velocidad de viento mínima.

Datos promedio diario					Datos promedio mensual				
Día de monitoreo	T° min (°C)	T° max (°C)	T° \bar{x} (°C)	Vel. min (m/s)	Mes de monitoreo	T° min (°C)	T° max (°C)	T° \bar{x} (°C)	Vel. min (m/s)
6/4/2016	18.71	32.67	25.69	2.60	abril	18.90	28.00	23.45	1.74
10/1/2017	14.12	24.89	19.51	3.48	enero	15.27	32.75	24.01	2.29
12/4/2018	19.24	31.66	25.45	2.12	abril	18.9	28.00	23.45	1.74
Desviación estándar	2.82	4.23	3.50	0.69	Desviación estándar	2.10	2.74	0.32	0.32

Fuente: NASA Langley Research Center (2018).

Al realizarse dos escenarios de dispersión, se debe tomar en consideración que existe mayor variación en los datos de temperatura promedios diarios que los promedios mensuales. De igual forma ocurre con la velocidad del viento mínima. Esto se explica debido a que los datos meteorológicos diarios son puntuales y específicos para ese día en que se realizó el monitoreo en chimeneas. Al contrario, los datos mensuales, son un promedio del mes de monitoreo. La velocidad mínima de viento es relevante ya que es la requerida por el software AerscreenEZ®, y éste a su vez modela la dispersión para determinar el peor escenario de concentración. Se aclara que al momento de introducir los datos de temperatura a AerscreenEZ®, estos fueron convertidos a grados Kelvin (K).

Es importante aclarar las definiciones entre los diferentes tipos de concentraciones que se obtuvieron en los resultados de las simulaciones con AerscreenEZ®. La concentración máxima en un período de una hora a nivel de suelo es valor promediado durante ese período de tiempo. Dicha concentración máxima se encuentra a una distancia específica de la fuente de emisión, a una altura desde el nivel del suelo que como se había explicado depende de múltiples variables como altura de chimenea, efecto topográfico, diferenciales de temperatura de emisión y ambiental. Finalmente, la concentración máxima se encuentra a una dirección (en grados) desde la fuente de emisión que depende de la dirección predominante desde la cual sopla de viento, que de acuerdo al análisis de rosa de viento es de 70° desde el noreste.

El software AerscreenEZ® también genera concentraciones a escala de 3 horas, 8 horas, 24 horas y promedio anual. Sin embargo, para efectos normativos, la concentración verificada es la concentración máxima de 24 horas. El Cuadro 5 muestra los resultados obtenidos al modelar usando datos promedio diario.

Cuadro 5. Resumen del modelo de dispersión diario para ambas calderas.

Monitoreo puntual				Modelación con base en el día de monitoreo con AerscreenEZ®			
Caldera	Fecha	Vel Min (m/s)	Tasa de emisión (g/s)	Conc. Max 24-hr (µg/m ³)	Distancia (m)	Dirección (°)	Altura (m)
HPB	6/4/2016	2.60	5.51	51.64	224	200	11.00
	10/1/2017	3.48	6.28	57.61	227	200	11.16
	12/4/2018	2.12	5.66	260.60	777	270	40.44
ISGEC	6/4/2016	2.60	0.77	2.09	1825	180	103.83
	10/1/2017	3.48	0.45	1.32	1810	180	100.09
	12/4/2018	2.12	0.80	11.06	1600	190	89.07

Los resultados obtenidos en el modelo dispersión diario tomaron en cuenta la velocidad mínima del viento para ese día, obteniendo lo que la EPA denomina el peor escenario o concentración máxima a la altura del receptor. Por lo tanto, la concentración máxima detallada en la tabla, representa la concentración máxima promediada en 24 horas partiendo del valor máximo de una hora de monitoreo. En algunos modelos como SCREEN3 se promedia manualmente el resultado promediado a 24 horas partiendo de una hora de monitoreo usando coeficientes recomendados por la EPA. En el caso de AERSCREEN, la tabla de salida muestra los cálculos automáticamente (Maine Department of Environmental Protection, 2018).

La primera variable que explica la variación en los resultados de las concentraciones es el cambio en la tasa de emisión, a mayor tasa de emisión de contaminante habrá mayor concentración cuando éste se disperse. Debe recordarse que la tasa de emisión aumenta proporcionalmente al caudal de gases y la concentración de PM_{10} . Sin embargo, existen más variables que afectan la concentración, como es la velocidad de viento. Esto se ve reflejado en el resultado obtenido para el día 12 de abril del 2018 en la caldera ISGEC, en donde la alta concentración se debe a que tiene la tasa de emisión más alta y la velocidad de viento más baja. Esto concuerda con lo expresado por Fernández (2012) en un estudio realizado en la zona central de Chile donde se encontró la misma relación.

De manera general, el primer escenario al modelar la dispersión de PM_{10} utilizando datos promedio diarios, arrojó como resultado que las mayores concentraciones se producen el día 12 de abril del 2018 para ambas calderas. Esto puede ser explicado debido a que en ese día la velocidad del viento era la más baja (2.12 m/s), y en el caso de la caldera ISGEC el caudal de gases era el mayor del período 2016-2018 (3,348 Nm^3/min). Esto concuerda con Chang (2008), quien explica que la velocidad del viento disminuye, la concentración de los contaminantes aumenta a nivel del suelo, ya que hay menor dilución y mezcla. El resto de variables que explican ese resultado son la temperatura y la velocidad de emisión de los gases (50 °C y 11.6 m/s en HPB), ya que a menor temperatura y menor velocidad de emisión se obtienen mayores concentraciones.

De acuerdo lo expresado por Allen (2001), a medida que la altura de una chimenea aumenta, existe más volumen de aire para el mezclado con el contaminante, por lo tanto, la concentración se reduce por dilución y el impacto se produce a mayor distancia. Por ende, en el presente estudio, se comprueba que, el hecho de que la altura de la chimenea de la caldera ISGEC sea de 50 m hizo que la concentración se redujera y se produjera a mayor distancia de la fuente de emisión, en contraste con la caldera HPB, cuya chimenea tiene una altura de 25 m (la mitad de la ISGEC) generando mayores concentraciones a menor distancia. También se obtuvieron los resultados al modelar usando datos promedio mensual, como se muestra en el Cuadro 6.

Cuadro 6. Resumen de modelación de dispersión mensual para ambas calderas.

Caldera	Monitoreo puntual			Modelación con base en mes de monitoreo con AerscreenEZ®			
	Año	Vel. Min (m/s)	Tasa de emisión (g/s)	Conc. Max 24-hr ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Distancia (m)	Dirección (°)	Altura (m)
HPB	2016	1.74	5.51	246.20	913	250	49.74
	2017	2.29	6.28	213.50	825	270	44.82
	2018	1.74	5.66	301.70	823	270	44.65
ISGEC	2016	1.74	0.77	18.86	1605	190	89.18
	2017	2.29	0.45	7.51	1590	190	87.42
	2018	1.74	0.80	17.06	1785	320	95.89

Los resultados de la modelación usando datos promedio mensuales concuerdan con los obtenidos en la modelación diaria, de manera que la concentración de PM_{10} aumenta a medida que la velocidad del viento disminuye, e igualmente la caldera ISGEC produce menores concentraciones promedio a mayor distancia y altura que la caldera HPB. Comparando de forma global ambos escenarios de modelación (usando datos promedio diarios y mensuales) para las mismas calderas, se concluye que, cuando se realiza una modelación usando datos meteorológicos promedio diario, se obtienen menores concentraciones que usando datos promedio mensuales. Esto debido a que la velocidad del viento promedio mensual es menor que el promedio diario, lo que aumentó la concentración de PM_{10} . Sin embargo, el escenario más realista para predecir impactos es cuando se utilizan datos meteorológicos promedio diarios.

Del mismo modo fue relevante analizar el efecto topográfico en los resultados de la modelación de dispersión en contraste con un escenario usando terreno plano. Esto se realizó para el período 2016-2018 en ambas calderas usando datos promedio diarios y se visualiza en la Figura 6 y Figura 7.

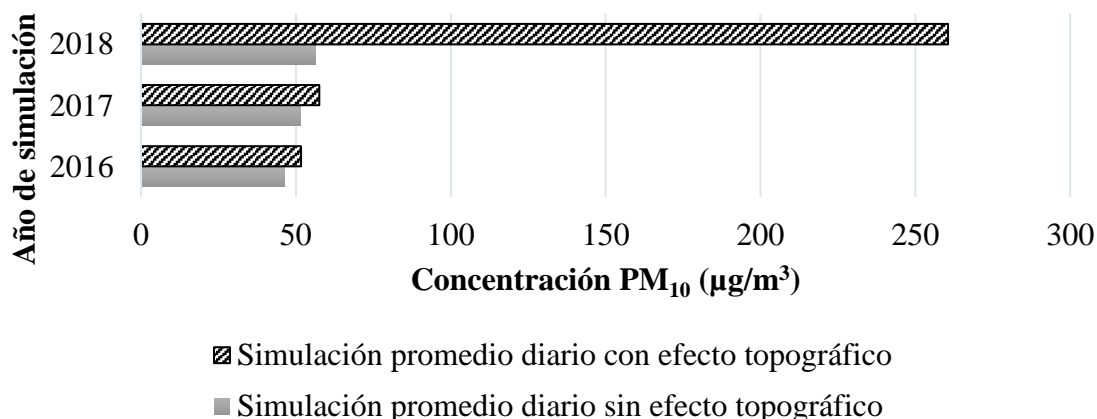


Figura 6. Efecto topográfico en la dispersión de PM_{10} para la caldera HPB.

Al modelar la dispersión considerando las características topográficas se obtienen mayores concentraciones en comparación a los valores obtenidos al asumir un terreno simple (plano). Esto concuerda con Chang (2008), quien describe que cuando existen elevaciones, éstas pueden obstaculizar la dispersión haciendo que el contaminante se acumula en zonas altas, por su cruce con la trayectoria de la línea central de la pluma.

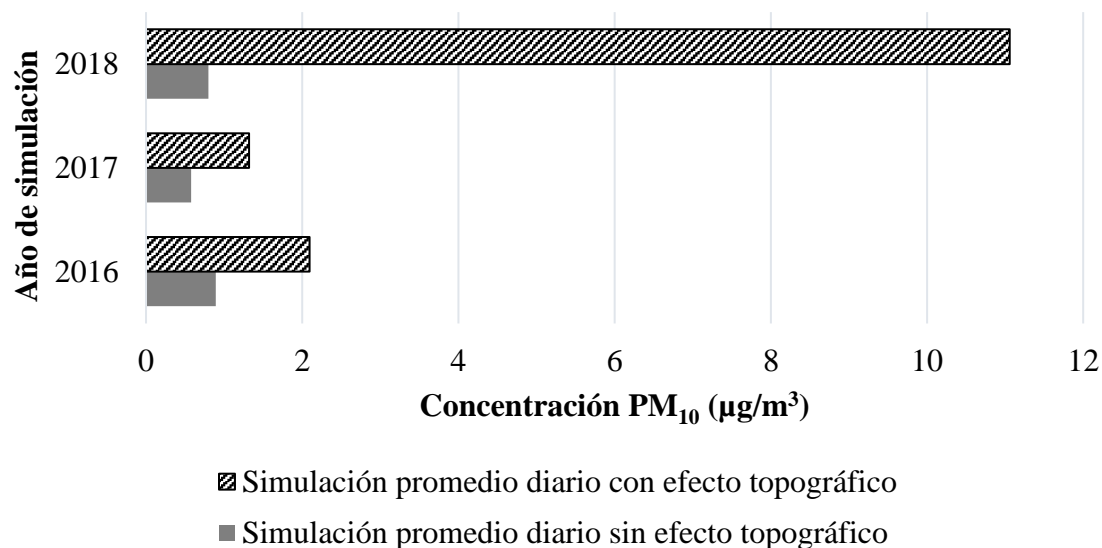


Figura 7. Efecto topográfico en la dispersión de PM₁₀ para la caldera ISGEC.

Los resultados también concuerdan con el estudio de Carbonell y Rivero (2005) quienes concluyeron que al tomar en consideración la topografía se obtienen concentraciones más altas que las modeladas en terreno plano. Además de las variables de la fuente de emisión y meteorológicas que explican el cambio de concentración en el 2018, se suma que, a partir de ese año, la azucarera prácticamente duplicó su potencia instalada, lo que implicó un incremento en la combustión de biomasa y por lo tanto mayor tasa de emisión de PM₁₀.

La modelación promedio diario y promedio mensual fue comparada con los resultados obtenidos por la empresa consultora con SCREEN3 en la Figura 8. La unidad común para los tres escenarios es la concentración de PM₁₀ expresado como concentración de 24 horas, según la normativa nacional.

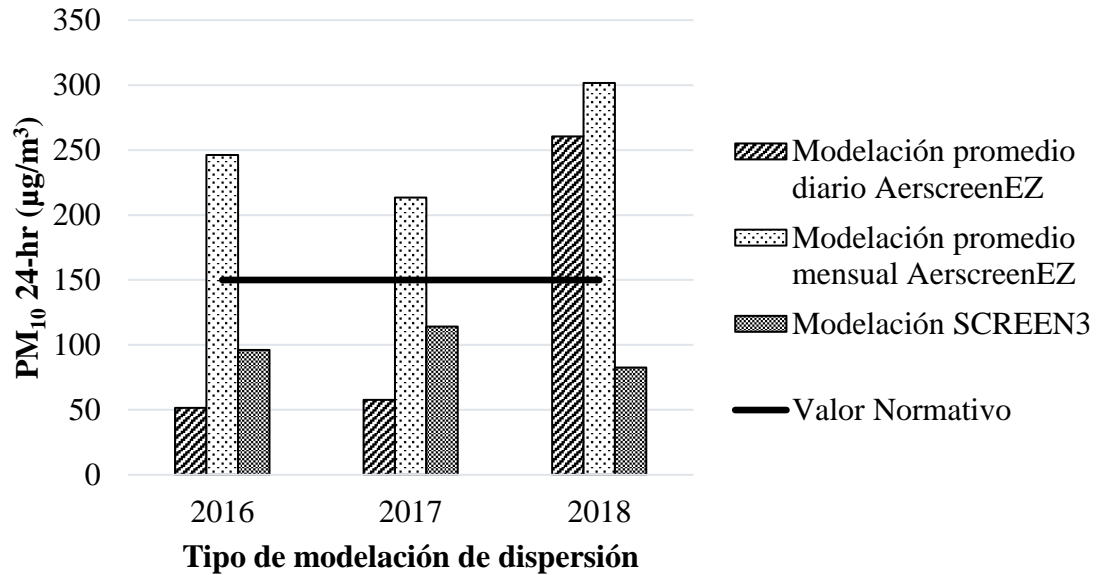


Figura 8. Comparación AerscreenEZ®, SCREEN3 y valor normativo para la caldera HPB.

Como se ve en la Figura 8, modelar la dispersión de PM_{10} con AerscreenEZ® usando datos promedio diarios resulta en menor concentración que al usar datos mensuales. Como se explicó anteriormente, al usar datos promedio mensuales con velocidades de viento más bajas las concentraciones aumentan. Al usar AerscreenEZ®, solamente la simulación promedio diaria en el período 2016-2017 cumple con el valor límite de dispersión. Mientras que los resultados de dispersión utilizando datos promedio mensual sobrepasan la normativa nacional en los tres años. Esto contrasta totalmente con los resultados obtenidos por la empresa consultora usando SCREEN3, en donde los valores de dispersión cumplen con la normativa.

Para una simulación realista es recomendable usar datos promedio diarios, y considerar la topografía, ya que se acerca más a las condiciones reales del transporte y dispersión del contaminante. Por lo tanto, la simulación usando AerscreenEZ® es mucho más realista y veraz que usar SCREEN3, ya que se toman en cuenta diversas variables meteorológicas con datos reales y puntuales, efectos topográficos de la zona, parámetros de la superficie y no se usan datos predeterminados. Para el desarrollo de diagnósticos ambientales, esto significa que el uso de un determinado software o la introducción de todas las variables que rigen la dispersión de los contaminantes conlleva al cumplimiento o no cumplimiento de la normativa ambiental de calidad de aire, y la incompleta interpretación de los impactos asociados a ésta.

Dentro de los límites del presente estudio, el uso de SCREEN3 como modelo de dispersión podría suponer un riesgo para la empresa azucarera al ser un modelo conservador cuando el impacto ambiental por PM_{10} pudiere ser mayor que el estimado por dicho programa. Sin embargo, esto no es suficiente evidencia para afirmar que SCREEN3 no genera datos reales.

Entre más variables se consideren al simular la dispersión de un contaminante, como en AerscreenEZ®, genera incluso oportunidades de mejora para el proceso de combustión de las calderas. Esto concuerda con el reglamento para emisión de fuentes fijas, que al sobrepasar el valor de dispersión deberían implementarse mejoras. La Figura 9 representa la disminución de la concentración de PM₁₀ para ambas calderas a medida que la distancia aumenta.

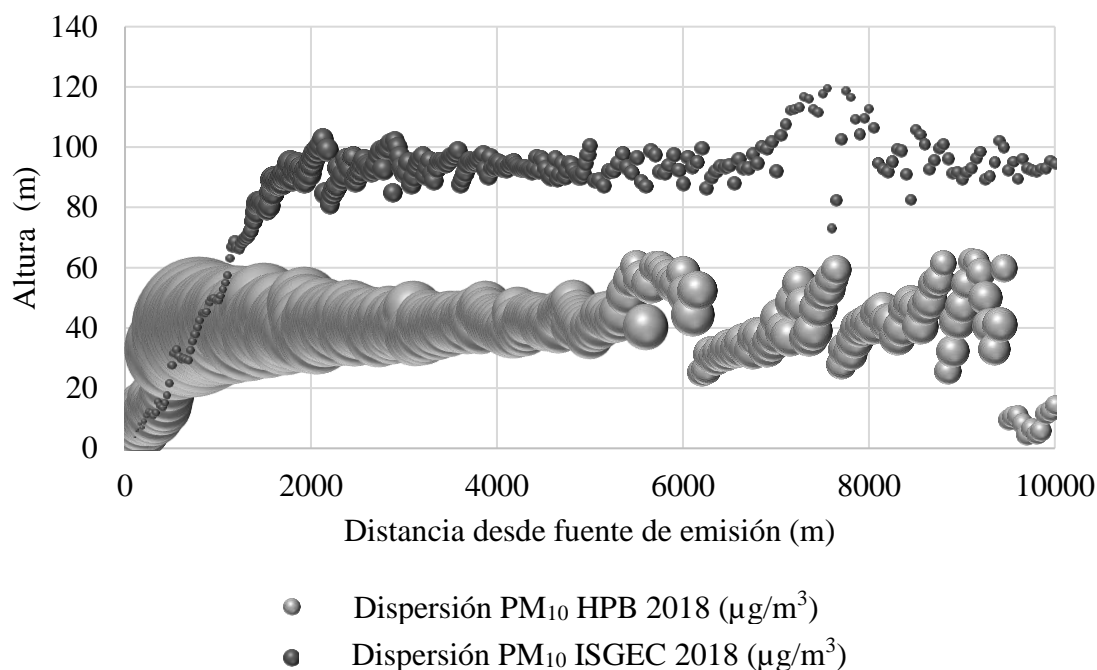


Figura 9. Concentración de PM₁₀ y distancia desde chimenea HPB.

En las plumas de dispersión de PM₁₀ de ambas calderas, el tamaño de los círculos denota mayor concentración, y las mayores se presentan antes de los primeros 2,000 m desde la fuente de emisión. Desde ese punto, el terreno se torna inclinado y se eleva hasta alcanzar los 730 msnm, es decir un diferencial de altura de 83m respecto a la base de la fuente de emisión (647 msnm). En un terreno plano, la pluma va disminuyendo su concentración a medida que aumenta la distancia, por lo tanto, en este caso concuerda que la concentración tiende a acumularse en las zonas altas ya que la línea central de la pluma choca con el terreno y esa acumulación produce las máximas concentraciones.

Por ello, la concentración máxima no siempre se produce en los primeros metros de distancia desde la chimenea y no necesariamente impacta a un receptor. A partir de esa distancia mencionada, la concentración disminuye gradualmente por el efecto de dilución y mezcla con el aire ambiental cuando la pluma absorbe este aire. Ambientalmente, esto es relevante ya que los receptores que se encuentre a esa distancia reciben la concentración máxima y puede haber impactos a la salud dependiendo del valor de la concentración y el cumplimiento de la normativa.

Evaluación de la eficacia de las medidas de mitigación.

Para poder evaluar la eficacia de las medidas de mitigación, se elaboró en primera instancia, un gráfico de cajas los datos de monitoreo puntual de PM₁₀ de las calderas, ISGEC y HPB utilizando el software Microsoft Excel. La distribución de los datos de emisión de PM₁₀ puede apreciarse en la Figura 11.

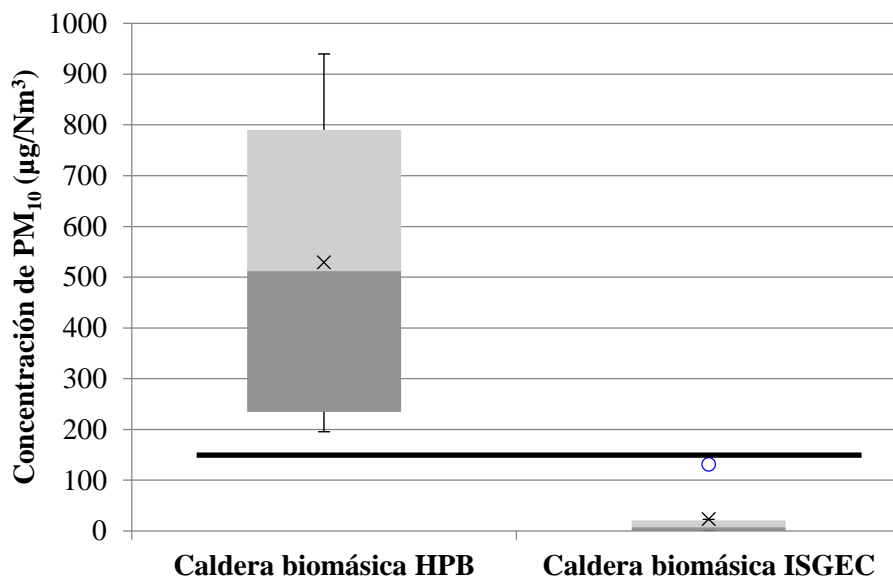


Figura 10. Valor de emisión de PM₁₀ obtenido en monitoreo puntual.

El gráfico de cajas elaborado para el período 2011-2018 (ocho monitoreos) para la caldera HPB y 2015-2018 (cuatro monitoreos) para la caldera ISGEC, muestra que el rango de emisión de PM₁₀ de la caldera HPB es superior al de la ISGEC. La media de emisión de PM₁₀ de la caldera HPB es de 528.97 ± 296.24 mg/Nm³ y para la caldera ISGEC es de 23.61 ± 44.49 mg/Nm³. La desviación estándar de la caldera ISGEC se debe al dato extremo de PM₁₀ del 2015, donde aún se estaban haciendo pruebas de funcionamiento de equipo. La diferencia entre las medias de emisión de PM₁₀ se explica en términos de las medidas de mitigación (“scrubber” y precipitador electrostático) respectivamente instalado para la regulación de la calidad de las emisiones. Como se había visualizado en las Figuras 2 y 3, los datos de emisión de ambas calderas se vuelven más homogéneos en el período 2016-2018.

La estabilización de las emisiones indica que las medidas de mitigación de cada caldera están teniendo éxito en la reducción de éstas; sin embargo, en el caso del “scrubber” instalado para la caldera HPB, esa reducción no es suficiente para alcanzar el valor normativo. Por ende, es fundamental explicar estas eficiencias en términos del funcionamiento de los equipos.

De acuerdo a la EPA (2002) un “scrubber” o depurador húmedo reduce la concentración de PM₁₀ a través del contacto del gas sucio con gotas líquidas. No obstante, estos equipos son más compactos y representan menor inversión inicial y de mantenimiento que un precipitador electrostático. Según un estudio de la agencia mencionada, la eficiencia de este equipo en cuanto a la remoción de las partículas > 5 μm es de aproximadamente 90%. Por otro lado, en un precipitador electrostático, el principio de funcionamiento del equipo es dar carga electrostática a partículas en una corriente de gas dada y luego pasar las partículas a través de un campo electrostático que las conduce a un electrodo colector. Tiene una eficiencia de hasta el 99% en remoción de material particulado (EPA, 1999).

La caldera HPB cuenta con un “scrubber” como mecanismo de mitigación, que como se había mencionado reduce la concentración de PM₁₀ a través del contacto del gas sucio con gotas líquidas. En el caso de la caldera HPB, el fluido usado como depurador es agua. A nivel ambiental, esto representa un consumo de ese recurso para el proceso de depuración o “scrubbing”, además de generarse un efluente que debe ser tratado y dispuesto. Esa eficiencia teórica fue contrastada con los datos obtenidos de PM₁₀ en un monitoreo realizado la en la caldera HPB en un para poder verificar el desempeño del “scrubber”.

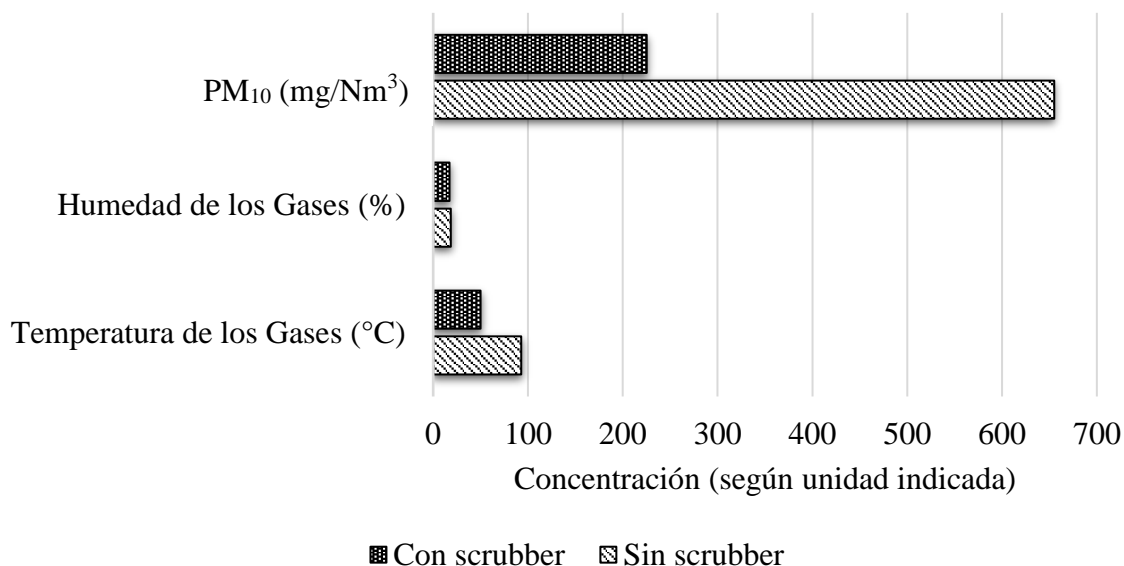


Figura 11. Comparación uso de “scrubber” y en escenario de no uso.

El porcentaje de remoción de PM₁₀ fue calculado con la ecuación 2:

$$\text{Remoción de PM}_{10} = \frac{\text{Uso sin "scrubber"} - \text{Uso con "scrubber"}}{\text{Uso sin "scrubber"}} \times 100\% \quad [2]$$

En ambos escenarios mostrados (con y sin uso de este equipo), los parámetros de humedad y temperatura variaron debido a que cuando se usa “scrubber” se utiliza agua asperjada, por lo tanto, ambos parámetros son mayores en contraste con el otro escenario. La humedad de los gases puede hacer que la pluma ascienda menos debido a que la temperatura del gas será más baja y su densidad aumenta. En cuanto al porcentaje de remoción de PM_{10} , al usar el “scrubber” es de 66%, que es lejano al 90% de remoción señalado por la EPA. No obstante, en ambos escenarios, no se cumplió con el valor límite de emisión de PM_{10} .

En el caso de la caldera ISGEC, ésta cuenta con un precipitador electrostático como medida de mitigación y según lo señalado por la EPA, estos equipos cuentan con una eficiencia de hasta 99% en remoción de material particulado. El valor máximo de emisión de PM_{10} para esta caldera nunca sobrepasó los 131.02 mg/Nm^3 y como se había explicado en la sección de proporción de contaminantes mayoritarios, en la caldera ISGEC el proceso de combustión es más eficiente. Por lo tanto, ese mecanismo de combustión sumado a contar con este equipo de remoción de PM, hizo posible el cumplimiento de la normativa en todo el período monitoreado.

4. CONCLUSIONES

- Las variables que influyeron de forma directa en la generación de emisiones y, por lo tanto, en el cumplimiento de la normativa, fueron el tipo de tecnología empleada en las calderas, el exceso de aire y los equipos de remoción de PM_{10} . Se generaron otros contaminantes mayoritarios, en su mayoría no regulados por la normativa hondureña de calidad de aire, lo que constituye una debilidad y riesgo a nivel ambiental.
- El transporte y destino de una emisión gaseosa en la atmósfera se rige por la interacción de variables de la fuente de emisión, meteorológicas y topográficas. La aplicación de herramientas de simulación que no consideren el efecto de estas condiciones, derivará en resultados que no representan la dinámica de la pluma y sus potenciales impactos.
- La incorrecta selección de variables para ejecutar un modelo matemático puede derivar en interpretaciones y resultados erróneos, en este caso, asociados al cumplimiento de los valores establecidos en la normativa. El uso de datos climatológicos diarios, y de ser posible, tomados de estaciones meteorológicas cercanas al sitio de estudio, proporcionarán resultados representativos del escenario de transporte.
- Las medidas de mitigación implementadas por la empresa mostraron una reducción en las emisiones de PM_{10} en ambas calderas. Aunque el uso del “scrubber” redujo la concentración del PM_{10} , no se logra cumplir con el valor límite de emisión. El mecanismo del precipitador electrostático, en combinación con factores como tecnología de combustión y altura de chimenea, condujo al cumplimiento de la normativa.

5. RECOMENDACIONES

- Para modelar la dispersión de PM_{10} se recomienda utilizar AERSCREEN y tomar en cuenta todas las variables que rigen la dispersión y no usar datos predeterminados. Asimismo, se recomienda el uso de los datos meteorológicos diarios, ya que el uso de datos locales reduce el error.
- Realizar más monitoreos puntuales a lo largo del año para ambas calderas y así poder realizar modelaciones de dispersión para conocer la influencia de la temporada climática en la concentración del contaminante.
- Realizar más mejoras a la caldera HPB, entre ellas verificar el exceso de aire y en cuanto al “scrubber”, si fuese posible, pudieren añadirse más boquillas o realizarse un cambio de equipo para la reducción PM_{10} y cumplir con la normativa de calidad de aire.
- Aumentar la altura de la chimenea de la caldera HPB para disminuir la concentración de PM_{10} y cumplir el valor límite de emisión.
- Realizar muestreos de calidad de aire (PM_{10}) en la distancia y dirección señalada desde la fuente de emisión para validar los datos obtenidos mediante el uso del modelo matemático AERSCREEN.
- Aunque la normativa de emisiones de fuentes fijas no considere otros contaminantes mayoritarios (CO , NO_x , SO_2), se recomienda llevar un registro y control de los mismos, ya que son indicadores ambientales y en general de eficiencia del proceso de combustión.
- Al momento de seleccionar la tecnología adecuada para tratamiento se debe tomar en consideración los consumos y salidas de las medidas de mitigación, ya que usar un “scrubber” consume agua y genera un efluente que debe ser tratado.

6. LITERATURA CITADA

- Allen, A. T. (2001). Modelos de Dispersión Atmosférica. En E. Roberts, *Manual de control de la calidad del aire* (págs. 3.1-3.5). México, D.F.: McGraw-Hill Interamericana Editores, S.A. DE C.V.
- Bhat, A., & Kumar, A. (18 de mayo de 2011). *Application of the United States Environmental Protection Agency's AERSCREEN to the Air Quality Problems*. Obtenido de Wiley Online Library: <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/ep.10569>
- Carbonell, L. T., & Rivero, N. D. (2005). *Modelación de la dispersión local de contaminantes atmosféricos en terrenos complejos*. Obtenido de Cuba Solar: <http://www.cubasolar.cu/Biblioteca/Ecosolar/Ecosolar04/HTML/articulo05.htm>
- Cerdá, E. (2009). *Energía obtenida a partir de biomasa*. Obtenido de Universidad Complutense de Madrid: http://www.revistasice.com/CachePDF/CICE_83_117-140__78E2E154C2BB213409D09C083013930C.pdf
- Chang, J. (2008). *Curso de Contaminación del Aire*. Obtenido de DSpace en ESPOL: <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/6169/5/Curso%20Contaminacion%202%20a%20Parte%202008.pdf>
- Echeverría, C. I. (2004). *Modelos para estimar la concentración de contaminantes atmosféricos*. Obtenido de Colección de Tesis Digitales Universidad de las Américas Puebla: http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/leip/arzate_e_ci/capitulo4.pdf
- Environmental Protection Agency. (1996). *https://www3.epa.gov*. Obtenido de Bagasse Combustion In Sugar Mills: <https://www3.epa.gov/ttnchie1/ap42/ch01/final/c01s08.pdf>
- Environmental Protection Agency. (septiembre de 1999). *Electrostatic Precipitators*. Obtenido de <https://www3.epa.gov>: <https://www3.epa.gov/ttn/ecas/docs/cs6ch3.pdf>
- Environmental Protection Agency. (2000). *Guía del Usuario del Modelo SCREEN3*. Obtenido de EPA United States Environmental Protection Agency: https://www3.epa.gov/scram001/dispersion_screening.htm

- Environmental Protection Agency. (julio de 2002). *Wet Scrubbers for Particulate Matter*. Obtenido de <https://www3.epa.gov>: <https://www3.epa.gov/ttnca1/dir1/cs6ch2.pdf>
- Environmental Protection Agency. (noviembre de 2008). *Air Pollution Control Equipment*. Obtenido de <https://archive.epa.gov>: https://archive.epa.gov/region6/6pd/rcra_c/pd-o/web/pdf/a4a-apc-equipment.pdf
- Environmental Protection Agency. (2016). *AERSCREEN User's Guide*. Obtenido de United States Environmental Protection Agency: https://www3.epa.gov/scram001/dispersion_screening.htm
- Fernández, J. A. (2012). *Aplicación de un modelo de dispersión atmosférica*. Obtenido de Pontificia Universidad Católica de Valparaíso: http://opac.pucv.cl/pucv_txt/txt-3000/UCF3110_01.pdf
- Intergovernmental Panel on Climate Change. (2011). *Special Report of The Intergovernmental Panel on Climate Change*. Obtenido de Intergovernmental Panel on Climate Change: https://www.ipcc.ch/pdf/special-reports/srren/SRREN_FD_SPM_final.pdf
- Internacional Energy Agency. (2016). *World Energy Outlook 2016*. Obtenido de Internacional Energy Agency: https://www.iea.org/publications/freepublications/publication/WEO2016_ExecutiveSummary_Spanishversion.pdf
- ISGEC HEAVY ENGINEERING LTD. (2016). *Circulating Fluidised Bed Combustion Boilers (CFBC Boilers)*. Obtenido de <http://www.isgec.com>: <http://www.isgec.com/boilers/ba-boilers-product-cfbc.php>
- Lee, C. C., Huffman, G. L., & Chang, J. C. (1999). Air Pollution Control Calculations. In C. C. Lee, & S. D. Lin, *Handbook of Environmental Engineering Calculations* (pp. 3.3-3.223). New York, NY: McGraw-Hill.
- Maine Department of Environmental Protection. (2018). *Screening models*. Obtenido de Maine.gov: <https://www.maine.gov/dep/air/meteorology/screening.html>
- Manzur, M. E., Benzal, G., & Gonzáles, S. N. (Mayo de 2012). *Modelo de Dispersión de Contaminantes Atmosféricos*. Obtenido de Universidad Nacional de La Plata: http://sedici.unlp.edu.ar/bitstream/handle/10915/26838/Documento_completo.pdf?sequence=1
- NASA Langley Research Center. (2018). *Power Data Access Viewer*. Obtenido de NASA Prediction of Worldwide Energy Resources: <https://power.larc.nasa.gov/data-access-viewer/>

- National Renewable Energy Laboratory. (marzo de 2003). *Biopower Technical Assesment: State of The Industry and Technology*. Obtenido de <https://www.nrel.gov/docs/fy03osti/33123.pdf>
- Oca, F. d.-M., Furet-Bridón, N. R., Turtós-Carbonell, L., & Lorente-Vera, M. (2011). *La dispersión atmosférica de contaminantes en una zona industrial de Cuba*. Obtenido de Red de Revistas Científicas de América Latina y el Caribe, España y Portugal: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=181623057006>
- Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). Urban Climates. En T. R. Oke, G. Mills, A. Christen, & J. A. Voogt, *Urban Climates* (págs. 156-196). Cambridge, United Kingdom: Cambridge University Press.
- Patiño, M. (2007). *Modelos de Dispersión Gaussianos*. Obtenido de Centro de Desarrollo Tecnológico Sustentable: <http://www.cdts.espol.edu.ec/documentos/Presentaci%C3%B3n%20DISPERION%20MP.pdf>
- Prieto, I. (2007). *Sistemas de Combustión en Lecho Fluidizado*. Obtenido de Universidad de Oviedo: http://ocw.uniovi.es/pluginfile.php/1011/mod_resource/content/1/1C_C12757_0910/04_GT13_Centrales_termicas_de_lecho_fluido.pdf
- Sardiñas, A. H., Morales, V. M., & Orozco, M. L. (julio de 2017). *Aprovechamiento de las posibles fuentes de biomasa para entregar más electricidad en la fábrica de azúcar Antonio Sánchez*. Obtenido de Scielo Cuba: <http://scielo.sld.cu/pdf/caz/v44n4/caz09417.pdf>
- Suárez, C. A. (junio de 2012). *Diagnóstico y control de material particulado: partículas suspendidas totales y fracción respirable PM10*. Obtenido de SCIELO: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1909-24742012000100012
- Testo. (2010). *Optimización de la combustión*. Obtenido de Tiempo Real S.A.: <http://www.tiemporeal.es/archivos/optimizacioncombustion.pdf>
- Tribunal Superior de Cuentas. (2011). *REGLAMENTO PARA EL CONTROL DE EMISIONES GENERADAS POR FUENTES FIJAS*. Obtenido de Tribunal Superior de Cuentas: <https://www.tsc.gob.hn/leyes/Reglamento%20para%20el%20control%20de%20emisiones%20generadas%20por%20fuentes%20fijas.pdf>
- Troen, I., & Lundtang Petersen, E. (1989). *European Wind Atlas*. Obtenido de Technical University of Denmark: http://orbit.dtu.dk/files/112135732/European_Wind_Atlas.pdf

7. ANEXOS

Anexo 1. Temperatura mensual mínima, máxima y promedio para el área de estudio.

Mes	Temperatura Mensual Promedio (°C)	Temperatura Mensual Máxima (°C)	Temperatura Mensual Mínima (°C)
Enero	22.17	32.76	15.28
Febrero	23.89	35.86	15.86
Marzo	25.87	38.93	16.79
Abril	27.77	40.45	18.91
Mayo	26.81	37.13	19.91
Junio	24.67	32.74	19.22
Julio	23.89	31.88	18.39
Agosto	24.36	32.89	18.66
Septiembre	23.86	31.71	18.68
Octubre	23.10	30.81	18.03
Noviembre	22.30	30.78	16.76
Diciembre	21.80	31.13	15.81

Anexo 2. Velocidad de viento mensual mínima, máxima y promedio.

Velocidad de viento mensual	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
Velocidad mínima (m/s)	2.2	2.1	2.0	1.7	1.4	1.4	1.7	1.4	1.1	1.4	1.9	2.1
Velocidad máxima (m/s)	5.7	5.5	5.1	4.4	4.0	4.3	5.1	4.5	3.7	4.1	5.1	5.5
Velocidad promedio (m/s)	3.8	3.7	3.5	3.0	2.7	2.7	3.2	2.8	2.3	2.6	3.3	3.6

Anexo 3. Variables a introducir en el software AerscreenEZ® y sus unidades.

Configuraciones Generales	
Unidades	Métricas
Uso del terreno	Rural
Terreno	Complejo
Tipo de coordenadas	UTM
Fuente de Emisión	
Tipo de fuente	Punto (Chimenea vertical destapada)
Tasa de emisión	g/s
Altura de chimenea	m
Diámetro de chimenea	m
Temperatura de emisión	K
Velocidad de salida de chimenea	m/s
Meteorología	
Velocidad de viento	
i. Altura de anemómetro	m
ii. Velocidad de viento mínima	m/s
Parámetros de superficie	
Opción 1	Insertar parámetros de superficie
i. Albedo	Adimensional
ii. Radio de Bowen	Adimensional
iii. Rugosidad de superficie	m
Temperatura	
i. Temperatura ambiente mínima	K
ii. Temperatura ambiente máxima	K
Terreno	
Altura de la fuente	
i. Altura de base de la fuente de emisión	m
ii. Datum	NAD83
Coordenadas de la fuente	
i. Este	UTM
ii. Norte	UTM
iii. Zona UTM	16 N
Archivos de terreno	
i. Formato de archivo de terreno	DEM
Química de NO₂	
Opción seleccionada	No usar química de NO ₂

Anexo 4. Estadísticos descriptivo y test de normalidad para emisiones de PM₁₀.

Análisis Estadístico Descriptivo		
	Caldera biomásica HPB	Caldera biomásica ISGEC
Media	528.97	23.61
Mediana	511.84	7.46
Desviación estándar	296.24	44.49
Test de Normalidad Shapiro-Wilk		
Valor-p	0.25	0.01
alfa	0.05	0.05
Normalidad	Sí	No

Anexo 5. Comparación de parámetros para caldera HPB con y sin “scrubber”.

Parámetro	Sin “scrubber”	Con “scrubber”	Cambio (Valor absoluto)
Temperatura de los gases (°C)	93.00	50.00	43.00
Humedad de los gases (%)	18.69	17.25	1.44
Velocidad de salida de gases (m/s)	13.63	11.60	2.03
Caudal (Nm ³ /min)	2068.00	2094.00	26.00
CO (ppm)	230.00	230.00	0.00
CO ₂ (%)	9.40	9.30	0.10
O ₂ (%)	6.50	6.50	0.00
PM ₁₀ (µg/Nm ³)	654.94	225.37	429.57
Normativa PM ₁₀ (µg/Nm ³)	150.00	150.00	-
Cumplimiento de normativa	No	No	-

Anexo 6. Input AerscreenEZ®, caldera ISGEC para simulación promedio diario.

Modelación de dispersión de PM₁₀	2016	2017	2018
Fecha	6/4/2016	10/1/2017	12/4/2018
Hora	10:40	10:35	10:00
Tasa de emisión (g/s)	0.77	0.45	0.80
Temperatura de emisión (K)	399.15	381.15	406.15
Temperatura mínima diaria (K)	291.87	287.28	292.40
Temperatura máxima diaria (K)	305.83	298.05	304.82
Velocidad del viento mínima diaria (m/s)	2.60	3.48	2.12
Velocidad de salida de chimenea (m/s)	11.14	10.18	13.42

Anexo 7. Input AerscreenEZ®, caldera HPB para simulación promedio mensual.

Modelación de dispersión de PM₁₀	2016	2017	2018
Fecha	6/4/2016	10/1/2017	12/4/2018
Hora	13:26	9:00	7:55
Tasa de emisión (g/s)	5.51	6.28	5.66
Temperatura de emisión (K)	335.16	337.16	323.16
Temperatura ambiente mínima diaria (K)	291.87	287.28	292.40
Temperatura ambiente máxima diaria (K)	305.83	298.05	304.82
Velocidad del viento mínima diaria (m/s)	2.60	3.48	2.12
Velocidad de salida de chimenea (m/s)	14.13	13.39	11.60

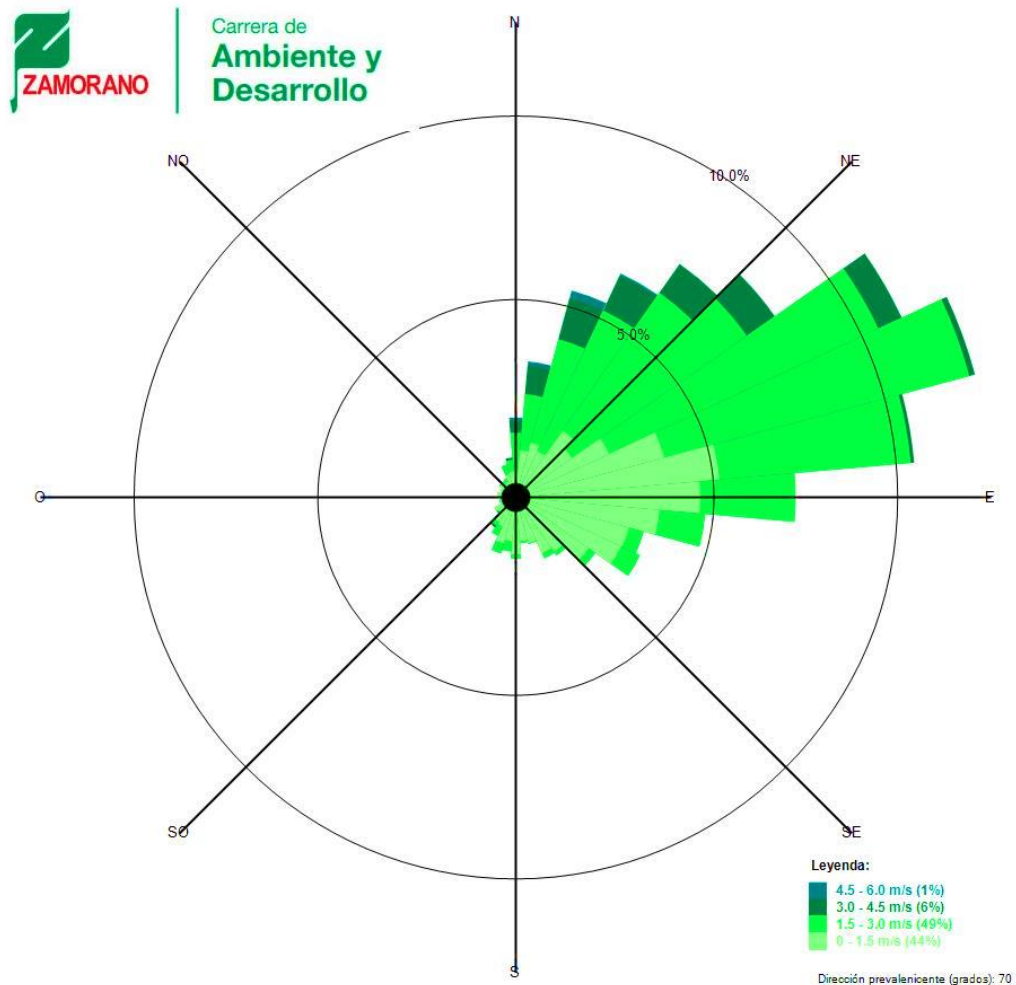
Anexo 8. Input AerscreenEZ®, caldera ISGEC para simulación promedio diario.

Modelación de dispersión de PM₁₀	2016	2017	2018
Fecha	6/4/2016	10/1/2017	12/4/2018
Hora	10:40	10:35	10:00
Tasa de emisión (g/s)	0.77	0.45	0.80
Temperatura de emisión (K)	399.15	381.15	406.15
Temperatura ambiente mínima mensual (K)	292.06	288.43	292.06
Temperatura ambiente máxima mensual (K)	300.92	305.91	300.92
Velocidad del viento mínima mensual (m/s)	1.74	2.29	1.74
Velocidad de salida de chimenea (m/s)	11.14	10.18	13.42

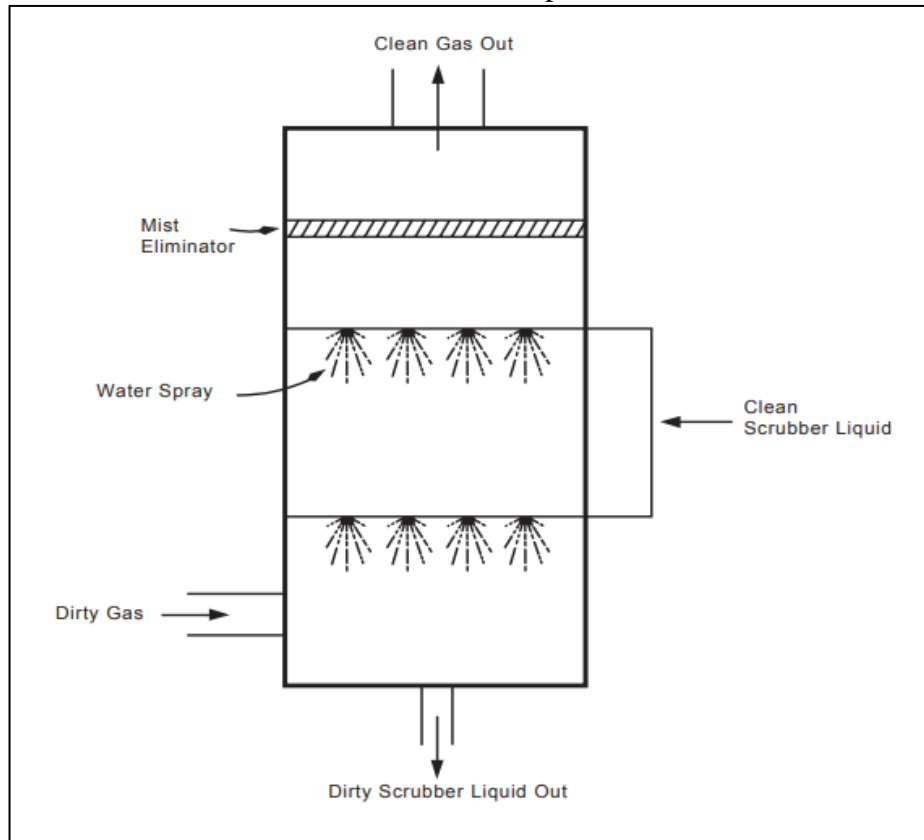
Anexo 9. Input AerscreenEZ®, caldera HPB para simulación promedio mensual.

Modelación de dispersión de PM ₁₀	2016	2017	2018
Fecha	6/4/2016	10/1/2017	12/4/2018
Hora	13:26	9:00	7:55
Tasa de emisión (g/s)	5.51	6.28	5.66
Temperatura de emisión (K)	335.16	337.16	323.16
Temperatura ambiente mínima mensual promedio (K)	292.06	288.43	292.06
Temperatura ambiente máxima mensual promedio (K)	300.92	305.91	300.92
Velocidad del viento mínima mensual (m/s)	1.74	2.29	1.74
Velocidad de salida de chimenea (m/s)	14.13	13.39	11.60

Anexo 10. Rosa de viento para la zona de estudio.



Anexo 11. Funcionamiento de un “scrubber” o depurador húmedo. Fuente: EPA (2008).



Anexo 12. Funcionamiento de un precipitador electrostático. Fuente: EPA (2008).

