

Dispersión de Contaminantes del Aire (PM₁₀, NO₂, CO, COV y HAP) emitidos desde una Estación Modular de Compresión, Tratamiento y Medición de Gas Natural

Roberto E. Rojano^(1, 2), Yoma I. Mendoza⁽¹⁾, Heli Arregoces^(1, 2) y Gloria M. Restrepo⁽²⁾

(1) Grupo de Investigación GISA, Facultad de Ingeniería, Universidad de La Guajira, Riohacha, Colombia

(2) Grupo Procesos Fisicoquímicos Aplicados, Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Antioquia UdeA, Calle 70 No. 52-21, Medellín, Colombia.

(email: gloma@udea.edu.co; rrojano@uniguajira.edu.co)

Recibido Dic Nov. 28, 2015; Aceptado Feb. 26, 2016; Versión final Abr. 6, 2016, Publicado Oct. 2016

Resumen

Este estudio presenta el análisis de la emisión, dispersión y concentración de PM₁₀, CO, NO₂, COV y HAP (contaminantes peligrosos del aire), emitida desde una estación modular de compresión, tratamiento y medición de gas natural, ubicada en la península de La Guajira al norte de Colombia. Se aplicó el modelo de dispersión Gaussiana WKBK2 para fuentes puntuales para estimar las concentraciones de los contaminantes. Las emisiones de los contaminantes se estimaron utilizando los factores de emisiones de la Agencia Ambiental de los Estados Unidos USEPA. La aplicación del modelo fue validado con PM₁₀ y NO₂ medido en un sitio cerca de la planta industrial. Las máximas concentraciones ocurren entre 100 a 200 metros de la fuente. Las concentraciones máxima estimadas de PM₁₀ estaría violando el estándar anual de la Organización Mundial de la Salud. En las cuatro comunidades indígenas ubicadas en la zona, se estimaron niveles menores a los establecidos en la norma Colombiana.

Palabras clave: factor de emisión, industrial, modelación, gas natural, contaminantes atmosféricos

Dispersion of Air Pollutants (PM₁₀, NO₂, CO, VOC and HAP) emitted from a Modular Station of Compression, Processing and Measurement of Natural Gas

Abstract

This study presents the analysis of the emission, dispersion, and concentration of PM₁₀, CO, NO₂, COV y HAP (Hazardous Air Pollutants), emitted from a modular station of compression, processing and measurement of natural gas located on the peninsula of La Guajira in northern Colombia. To estimate the concentrations of pollutants was applied Gaussian dispersion WKBK2 model for point source. Emissions of the pollutants are estimated using the US Environmental Agency emission factor. The application of the model was validated with PM₁₀ and NO₂ measured at a site near the Industrial Plant. The maximum concentration occurs between 100 to 200 meters from the source. The maximum concentrations of PM₁₀ exceeded the World Health Organization guideline value of 20 µg/m³. In four indigenous communities located in the area, the levels were lower than those established in the Colombian norm.

Keywords: emission factor; industrial; modeling; natural gas; atmospheric pollutants

INTRODUCCIÓN

Muchos estudios han referenciado los efectos sobre la salud de los contaminantes del aire partículas y gases (Aliyu et al., 2015; Basagaña et al., 2015; Guarnieri y Balmes, 2014; Pope y Dockery, 2006; Satsangi et al., 2014). Hay contaminantes de especial interés por su efecto cancerígeno, en especial los compuestos orgánicos volátiles (COV) y los contaminantes peligrosos del aire (Hazardous Air Pollutants, HAP, por su sigla en inglés) (Grineski et al., 2016; Woodruff et al., 2000; Wu et al., 2009). Los contaminantes peligrosos del aire (HAP), son sustancias conocidas o sospechosas de producir graves efectos sobre la salud. En la Sección 112(b) de la Ley de Aire Limpio de los EE.UU. identifica 188 contaminantes clasificados como HAP (USEPA, 2005). También se han estudiado efecto de contaminantes sobre el cambio climático global (Dawson et al., 2008; Jia et al., 2010). Son muchas las fuentes emisoras de estos contaminantes, pero las emisiones industriales despiertan interés debido a que son reconocidos como una fuente importante para PM₁₀, gases y metales pesados. Los residentes alrededor de los complejos industriales son expuestos a niveles elevados de contaminantes en comparación con los residentes que ubicados lejos de estas zonas (Lim et al., 2010). Este estudio analiza las emisiones de una planta de gas natural. El gas natural procesado a alta presión normalmente pasa a través de separadores para eliminar condensado de hidrocarburos y agua. La gasolina natural, butano y propano suelen estar presentes en el gas, y se requieren plantas de procesamiento de gas para la recuperación de estos componentes licuables. Para estos procesos en campo, se requieren turbinas de gas, para la generación de energía eléctrica, transporte de gas natural y varias aplicaciones de proceso. Las principales fuentes de emisión en la industria de procesamiento de gas natural son los motores compresores, los residuos de gases ácidos, las emisiones fugitivas de equipos de proceso con fugas y deshidratador de glicol.

En la estación Ballena se realizan actividades que según lo estipulado en la Resolución 909 de 2008 del estado colombiano, (por la cual se establecen las normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas) (MAVDT, 2008), se clasifica dentro de otras actividades industriales, que incluyen actividades como: plantas de procesamiento de gas natural, y aplica al sistema de extracción y los equipos en superficie. Estas actividades pueden generar emisiones contaminantes a la atmósfera tales como: Material particulado, gases y otros compuestos. En la estación Ballena las principales fuentes fijas (generadores eléctricos y turbocompresores) emiten a la atmósfera contaminantes como los óxidos de nitrógenos (NO_x), monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos volátiles (COV), partículas menores de 10 micras (PM₁₀) y contaminantes peligrosos del aire (HAP). Para cada uno de estos contaminantes el estado colombiano establece niveles de emisión y niveles permisibles en el ambiente. Estudios de calidad de aire realizados en la zona presentan resultados de los niveles de contaminantes criterios. El índice de calidad del aire ICA muestra que las condiciones de calidad del aire están dentro los límites legales. Alrededor de la Estación Ballena habitan comunidades indígenas de la etnia Wayuu. Estas comunidades se quejan constantemente de olores y material suspendidos que se emiten de la estación Ballena. Debido a esto, la autoridad ambiental sugiere hacer seguimiento a la calidad del aire a través de modelos de dispersión (Calderon y Sierra, 2013; Promigas, 2010). Como es citado por Abril et al. (2015), los modelos de dispersión atmosféricos son una herramienta útil, dado que incorporan los conocimientos de la dinámica atmosférica y pueden predecir, con cierto grado de confianza, los patrones de dispersión en la atmósfera durante un período determinado de tiempo.

El modelo de dispersión Gaussiana es un enfoque estándar para el estudio del transporte de contaminantes en el aire debido a la difusión turbulenta y la advección por el viento. Estos modelos describen mediante ecuaciones matemáticas los procesos físicos que gobiernan la dispersión atmosférica de partículas, gases o sustancias químicas dentro de la pluma (Arya, 1999; Ristic et al., 2015; Turner, 1994). La aplicación de modelos gaussianos de dispersión atmosférica con el objeto de estudiar el impacto de contaminantes particulado y gaseosos sobre el medio ambiente, ha sido tema de investigación de muchos autores (Chen et al., 2010; Ghenai y Lin, 2006; Goodrich et al., 2007; Tsuang, 2003). De igual manera, hay muchas investigaciones de la aplicación de esta herramienta para estimar concentraciones de contaminantes y posterior estimación de impacto de fuentes industriales individuales (Baroutian et al., 2006; Verma et al., 2013).

Hay modelos de dispersión utilizados para situaciones complejas de fuentes industriales. AERMOD y CALPUFF son dos los modelos de dispersión de contaminantes atmosféricos ampliamente utilizados este tipo de estimaciones (Rodríguez et al., 2014; Tartakovsky et al., 2016, 2013). Hay herramientas computacionales más sencillas y aplicable en terrenos no complejos que facilitan la toma de decisiones y seguimiento a fuentes industriales. Para la estimación de las concentraciones en este estudio, se aplicó el programa de dispersión atmosférica Gaussiana WKBK2. El modelo WKBK2 desarrollado por Turner (1994), basado en la dispersión Gaussiana, es un modelo sencillo y fácil de usar que permite determinar la concentración de contaminantes de una o varias fuentes incluyendo el efecto de viento y turbulencia. Este modelo desarrollado ha sido utilizado para determinar sitios óptimos para muestreo de contaminantes

atmosféricos (Rojano et al., 2008), estudiar emisiones de plantas termoeléctricas con condiciones mas desfavorable de condiciones meteorológicas (García et al., 2003; Rojano et al., 2000), para establecer condiciones ambientales optimas de quemadores industriales entre otros (Nava et al., 2007). En este estudio se estima la variación espacial de las concentraciones de PM₁₀, CO, CH₄, NO₂, COV y HAP emitida desde una estación modular de compresión, tratamiento y medición de gas natural ubicada al norte de Colombia. Para identificar qué tipos de contaminantes son los esperables de estas fuentes fijas y estimar la emisión se utilizó la herramienta de los factores de emisión establecidos por la Agencia Ambiental de los Estados Unidos (USEPA, 1995).

METODOLOGÍA

Se describe el área de estudio, se presenta el modelo de dispersión, se muestra el inventario de emisiones, se detalla el escenario de modelación y se hace la validación del modelo.

Descripción del área de estudio

La Estación Ballena se encuentra ubicado en jurisdicción del municipio de Manaure - departamento de La Guajira y hace parte del Contrato de Asociación Guajira, operado por Chevron Petroleum Company en asocio con la empresa colombiana de petróleo (ECOPETROL). Esta zona pertenece a la cuenca del Océano Atlántico cuyo principal rasgo geográfico es la cercanía con la línea de costa, con presencia de lagunas costeras. La estación modular de procesamiento de gas, está ubicada en las coordenadas 11° 41' 35.09" N y 72° 43' 19.11" O, en el corregimiento El Pájaro. La estación tiene un área de 10.382 m² y una distancia de referencia de 30 km de la ciudad de Riohacha (Fig. 1).

La estación esta ubicada en zona rural del municipio, con pequeñas comunidades indígenas (Rancherías) a menos de 1.500 metros de la zona industrial. Las comunidades según su posición geográfica, están en la dirección predominante del viento y cuentan con una población significativa.

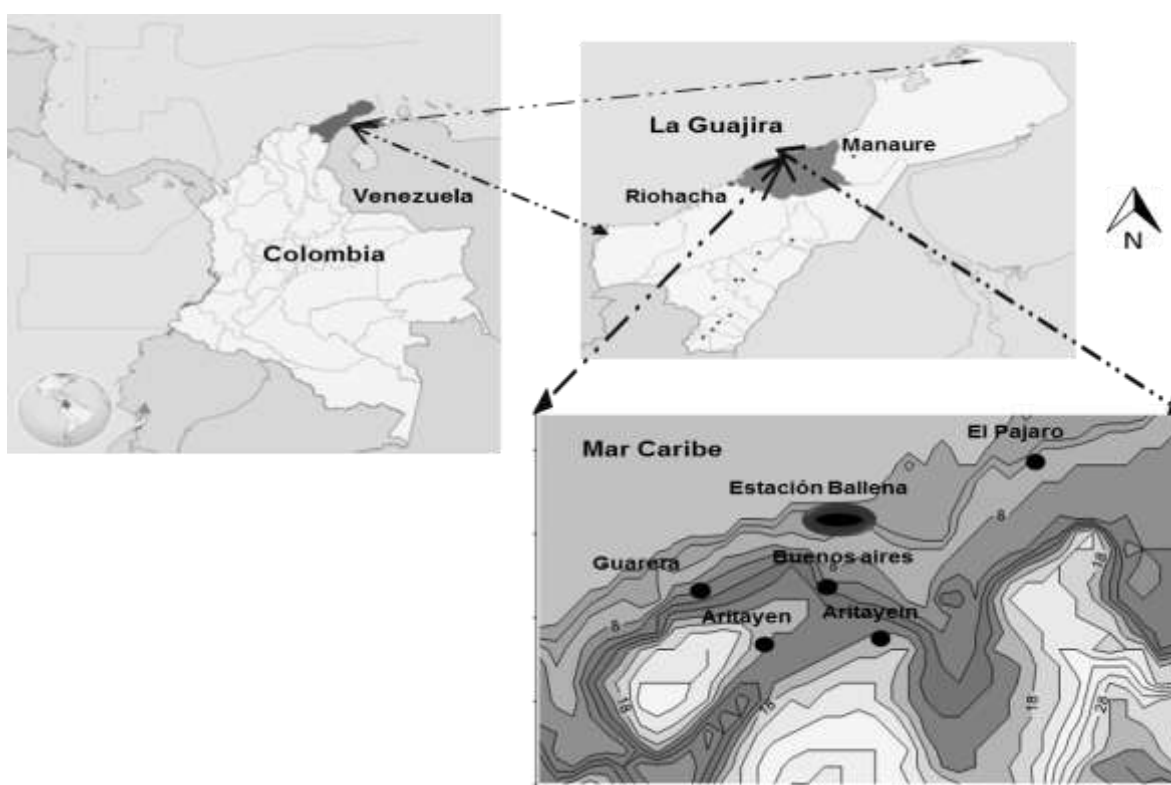


Fig. 1: Ubicación geográfica área de estudio. Estación Ballena, Manaure - La Guajira. Fuente: Autores.

Meteorología

La estación Ballena se ubica en una llanura plana pedregosa y suavemente ondulada, en la que predominan las dunas del litoral, las lagunas marinas, y playones arcillosos. Se tomaron datos meteorológicos horarios del 1 de enero al 30 de junio de 2014 registrados en la estación meteorológica Manaure del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia (IDEAM), ubicada en las coordenadas longitud -72,4500 y latitud 11,7667 con una elevación de 1 metro.

Su clima es caliente, con temperaturas que oscilan entre los 22 °C y los 38 °C, con promedio de 28 °C. La zona se caracteriza con viento fuertes, con dirección Este - Noroeste. La velocidad del viento es variable según los meses: La mínima velocidad corresponde a octubre y noviembre y la máxima a: febrero, marzo, abril y agosto. El análisis realizado de enero a junio de 2014, mostró velocidad del viento que oscilan entre 2,1 a 5,7 m/s el 51% de las veces, entre 5,7 a 11 m/s el 48% y registrándose viento en calma el 0,5%. El promedio es de 5,7 m/s (Fig. 2). La humedad relativa oscila entre 83,0% a 56,0%. Debido a las altas temperaturas y a la intensidad de los vientos la evaporación es muy alta, los vientos del noreste ocasionan la época de mayor sequía, las lluvias son muy escasas.

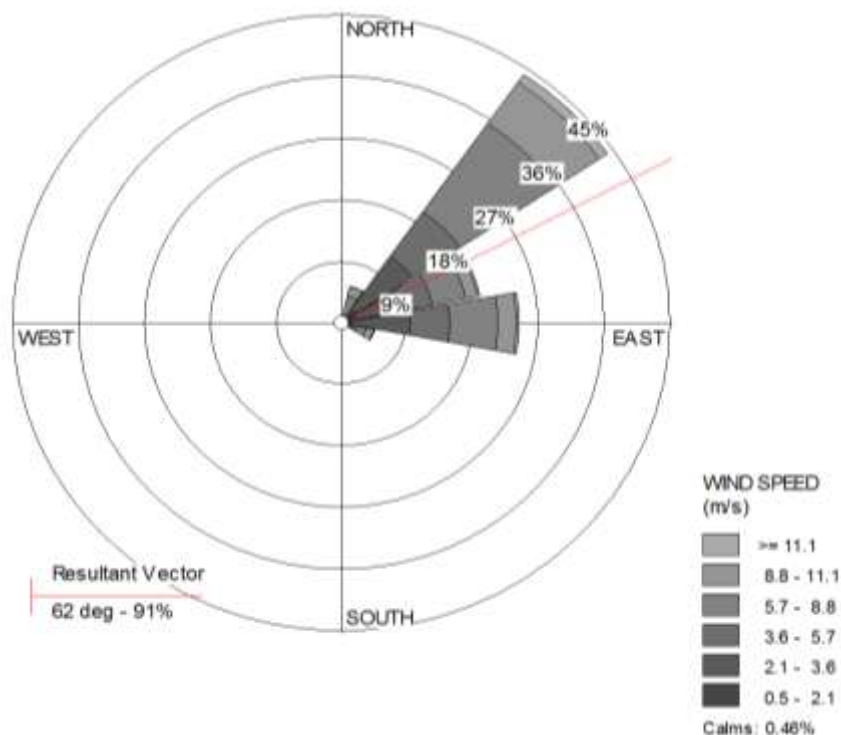


Fig. 2: Rosa de viento y rango de velocidades de viento: enero – junio de 2014. Fuente: (IDEAM, 2014)

De acuerdo al récord histórico de la series de datos en Manaure, el mes de mayores precipitaciones es septiembre, que registra niveles hasta de 421.6 mm. También se han registrado datos en el mismo mes con precipitación de 34.0 mm. En la zona predomina la estabilidad atmosférica C (ligeramente inestable), sin embargo, puede presentar inestables y neutral (B y D, respectivamente).

Modelo de Dispersión

Las concentraciones de los contaminantes se estimaron con el programa WKBK2, basado en la dispersión Gaussiana (Turner, 1994). Este modelo que permite determinar la concentración de contaminantes de una o varias fuentes incluyendo el efecto de viento y turbulencia. Las variables de entrada al modelo de dispersión la constituyen datos meteorológicos, información de emisiones de la fuente e información de receptores. Los parámetros meteorológicos horarios de entrada al modelo son: la clase de estabilidad de Pasquill, dirección del viento, velocidad del viento, temperatura y la altura de la capa de inversión. La información de emisiones son las coordenadas de la localización de la fuente, la altura física y el diámetro interno en el tope de los ducto de salida, velocidad y temperatura del gas de salida en los ductos.

La forma general de la ecuación de dispersión gaussiana, es la presentada en la ecuación 1 (Abdel-Rahman, 2008; Arya, 1998; Turner, 1994), seguida de las derivaciones de las ecuaciones para condiciones más especializada. La ecuación de dispersión Gaussiana estima la concentración en el receptor situado en “x” (metros) viento abajo, “y” (metros) viento transversal, y en una altura “z” (metros) sobre el suelo que resulta desde una emisión de altura efectiva H por encima del suelo. Resumiendo, la ecuación básica de dispersión puede ser escrita como:

$$C_{x,y,z;H} = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z u} \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{y^2}{\sigma_y^2}\right)\right] \left[\exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{(H-z)^2}{\sigma_z^2}\right)\right] + \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{(H+z)^2}{\sigma_z^2}\right)\right] \right] \quad (1)$$

Dónde $X_{(x, y, z, H)}$ es la concentración del contaminante, g/m³; Q es la tasa de emisión del contaminante, g/s; u es la velocidad del viento en el punto de liberación, m/s; σ_y es la desviación estándar de la distribución de

concentración en la dirección transversal, m, a una distancia x viento abajo de la fuente; σ_z es la desviación estándar de la distribución de concentración en la dirección vertical, m, a una distancia x viento abajo de la fuente; y π es la constante matemática pi, igual a 3.14159.

Los coeficientes de dispersión y la elevación de la pluma se determinaron según las ecuaciones de Briggs (1972), para dispersión rural. Los modelos de dispersión de Gauss asumen geometría de la pluma ideales, el estado de equilibrio ideal de las emisiones de contaminantes atmosféricos y las condiciones meteorológicas estacionarias, un terreno plano uniforme y una completa conservación de la masa. Con estas asunciones, estos modelos han dado resultados en estudios de calidad de aire (Buekers et al., 2015; Fritz et al., 2015; García et al., 2003).

Inventario de Emisiones

Las emisiones de contaminantes gaseosos o material particulado son influenciadas notablemente por los parámetros operacionales del proceso industrial (Srinivas y Venkatesan, 2005; Srivastava et al., 2004; Zhao et al., 2010). En la estación Ballena actualmente se encuentran en operación dos generadores eléctricos de la marca CATERPILLAR, MODELO G3508TA de la familia de motores CAT 3500, cada uno con capacidad de 0,365 MW. En el proceso también hay en operación dos compresores centrífugos fabricados por la marca Solar Turbines Inc, modelo C336 con potencia de 3.000 HP (2238 MW), con velocidad de diseño: 15.000 rpm y finalmente para regenerar el glicol hay un Rehervidor tipo vasija horizontal con tubo de fuego para 625.000 Btu/h (183 KW). Para identificar qué tipos de contaminantes son los esperables de estas fuentes fijas y estimar la emisión, se utilizó la herramienta de los Factores de Emisión basado en procesos industriales de procesamiento de gas natural y generación eléctrica a través de turbinas de gas estacionarias. Las emisiones se calcularon con los factores de emisión de los siguientes apartados: sección 3.1 (Stationary Gas Turbines), sección 3.2 (Natural Gas-fired Reciprocating Engines) y la sección 5.3 (Natural Gas Processing) (USEPA, 1995). El uso de los factores de emisión es apropiado cuando los materiales que se emplean son consumidos o combinados químicamente en los procesos o cuando se producen bajas pérdidas de material por liberación a la atmósfera, en comparación con las cantidades que se tratan en el proceso.

Como se mencionó anteriormente, las fuentes de emisión importante en la industria de procesamiento de gas natural son: los motores de combustión interna del compresor, los desechos de gases contaminantes, las emisiones fugitivas de equipos en el proceso y el rehervidor de glicol. Los principales contaminantes de los generadores eléctricos son los óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), y en menor medida, compuestos orgánicos volátiles (COV). La formación de óxido de nitrógeno depende de las altas temperaturas desarrolladas en la cámara de combustión. El monóxido de carbono, compuestos orgánicos volátiles, contaminantes peligrosos del aire (HAP) y material particulado son principalmente el resultado de una combustión incompleta, pero es importante resaltar que el contenido de azufre del gas en Ballena es cero según el estudio de cromatografía realizado (Promigas, 2010). Los contaminantes peligrosos del aire (HAP), se totalizaron teniendo en cuenta la norma colombiana que incluye: Benceno y tolueno.

Los principales contaminantes que emiten los compresores de gas son los óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO) y compuestos orgánicos volátiles (COV). El material particulado (PM) es despreciable y depende de la falta de mantenimiento de los equipos en el proceso, incluyen las emisiones de trazas de metales, material inorgánico no combustible, y condensables. La chimenea de ventilación atmosférica del rehervidor/regenerador de glicol es la fuente principal de las emisiones de metano, en los procesos industriales de gas natural; pero debido a que en los Rehervidores existe un sistema de condensación, la emisión de CH₄ es nula, al igual que hace insignificante las emisiones de compuestos orgánicos y tóxicos (USEPA, 1995). La eliminación de las emisiones de metano se logra, al reducir la cantidad de gas húmedo que se desvía para complementar el trietilenglicol enriquecido que se genera en el rehervidor.

Para estimar las emisiones usando los factores de emisión, Inicialmente se identificaron los contaminantes emitidos en cada proceso, se determinó la tasa de uso de combustible, calculando la energía de entrada en cada proceso y finalmente se calculó la emisión utilizando la ecuación 2 (USEPA, 1995). La Tabla 1 resume los datos principales en la emisión, tales como: Fuente de emisión, contaminante, factores de emisión y emisiones en la planta procesadora de gas natural Ballena.

$$E_c = TA * FE * \left(1 - \frac{ER}{100}\right) \quad (2)$$

Dónde E_c es la emisión de contaminante en unidad de masa por tiempo; TA es la tasa de Actividad; FE es el factor de emisión; y ER es la eficiencia de control.

Tabla 1: Fuente de emisión, contaminante, factores de emisión y emisiones. Planta procesadora de gas natural Ballena.
 *Factor de Emisión, scf/MMcf *Contaminantes peligrosos del aire (HAP) medido como: Benceno, y tolueno.

Fuente de emisión	Contaminante	Factor de emisión, lb/MMBtu (Calor de entrada)	Emisión, gr/seg
Emisiones de los Generadores Eléctricos	NO _x	0,320	0,00043
	CO	0,082	0,02230
	COV	0,0021	0,00060
	PM ₁₀	0,0047	0,00126
	HAP*	0.000142	4,26e-05
Emisiones del Turbocompresores	NO _x	1,940	0,10865
	CO	0,353	3,93400
	COV	0,120	0,00194
	PM ₁₀	0,038	0,04160
Emisiones del Rehervidor	CH ₄	318*	0,00000

Escenario de Modelación

La Tabla 2 presenta el escenario de modelación para cada una de las fuentes de emisión identificadas en el estudio. Los datos incluyen información de parámetros operacionales de las fuentes y los parámetros meteorológicos representativos de la zona de estudio. Como fue anotado anteriormente, la fuente del Rehervidor no se tuvo en cuenta debido a que en los Rehervidores existe un sistema de condensación, la emisión de CH₄ es nula, al igual que hace insignificante las emisiones de compuestos orgánicos y tóxicos (USEPA, 1995). Para el cálculo de las concentraciones en el área de estudio (terreno plano), se seleccionó los valores de los parámetros meteorológicos que presentaron mayor frecuencia de ocurrencia; para esto se combinaron velocidades del viento entre 1 m/s y 11 m/s, rango con aproximadamente el 90% de ocurrencia. Se trabajo con las estabildades B, C y D, se seleccionó la opción de arreglo de distancias automática del modelo WKBK2. Se diseñó un arreglo de 50 distancias preseleccionadas que van desde 100 m a 10 km. Se usan incrementos de 100 m hasta 3,000 m, incrementos de 500 m desde los 3.000 m hasta los 10 km, incrementos de 5 km desde los 10 km hasta los 30 km e incrementos de 10 km hasta los 50 km.

Tabla 2: Escenario de modelación para las fuentes de emisión. Planta procesadora de gas natural Ballena

Datos de entrada	Emisiones de los Turbocompresores	Emisiones del Generadores Eléctricos
Tasa (o cantidad) de emisión (g/s)	Ver tabla 1	Ver tabla 1
Altura de la chimenea (m)	8	10
Diámetro interior de la chimenea (m)	0,20	0,15
Velocidad de salida del gas de la chimenea (m/s) o tasa de flujo (ACFM o m ³ /s)	12	12
Temperatura del gas de la chimenea (K)	353	353
Temperatura ambiente (°C)	28	28
Altura del receptor sobre el suelo (puede usarse para definir receptores de hasta) (m)	0	0
Opción urbana/rural (U = urbana, R = rural)	R	R

Validación de los resultados del modelo

La Validación de los resultados simulados en la aplicación del programa de dispersión atmosférica Gaussiana WKBK2, se llevó a cabo comparando los resultados estimados y las concentraciones medidas durante el periodo de estudio. Hay una serie de medidas de validación para evaluar los modelos de dispersión (Chang y Hanna, 2004). Este estudio se utilizaron los siguientes índices: El error cuadrático medio normalizado (NMSE), el sesgo fraccional (FB) el factor de dos (FAC2) y el Coeficiente de correlación (r).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presentan en forma separada los resultados de concentración de material particulado PM₁₀, NO₂, CO, COV y HAP.

Concentración de material particulado PM₁₀

La concentración de PM₁₀ emitido a la atmosfera, ocasionado por los turbocompresores y generadores eléctricos a gas, se presentan en la Fig. 3; se puede observar que las concentraciones de PM₁₀, viento abajo de la fuente de emisión, presenta la máxima concentración a una distancia de 100 metros de la fuente con un nivel promedio estimado de 24,07 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para todas las velocidades de viento y estabilidad atmosféricas estudiadas. En un estudio realizado de calidad de aire en el mismo periodo de tiempo de la modelación y con muestreos de 24 horas en la estación Ballena, se determinó un nivel promedio de PM₁₀ de 31,08 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, concluyéndose que esta concentración captaría todo lo generado en el área de proceso, debido a que este punto de muestreo estaba ubicado viento abajo de la emisión (Calderon y Sierra, 2013). Según estos resultados, las emisiones de los turbocompresores y generadores eléctricos podrían estar aportando el 23% de material particulado PM₁₀ en la zona. Si analizamos la resolución 610 de 2010, El Artículo 4, establece los Niveles Máximos Permisibles para Contaminantes Criterio. Esta resolución para el PM₁₀ establece un nivel de 60 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para 24 horas. Si comparamos la máxima concentración obtenida en el estudio de emisión, se observa que no se estaría violando el nivel máximo permisible y estaría en un 40% por debajo que el este estándar legal.

Si analizamos el nivel de concentración de PM₁₀ que se podría estar presentando en las comunidades cercanas a la estación Ballena, se observa que las Rancherías Guarera, Aritayen y Buenos aires están directamente en la misma dirección de la emisión pero a distancias mayores de los 1.400 metros. Los resultados muestran concentraciones promedios de PM₁₀ menores de 7 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ a estas distancias. En la última actualización de las Guías de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud (OMS) se establecen niveles para el material particulado PM₁₀ de 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, media anual y 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, media de 24 horas (WHO, 2005). Las concentraciones estimadas en las comunidades aborígenes cercanas a la estación Ballena no exceden estos niveles. Sin embargo, el nivel máximo estimado para PM₁₀ si excede el estándar anual de la OMS en un 20%.

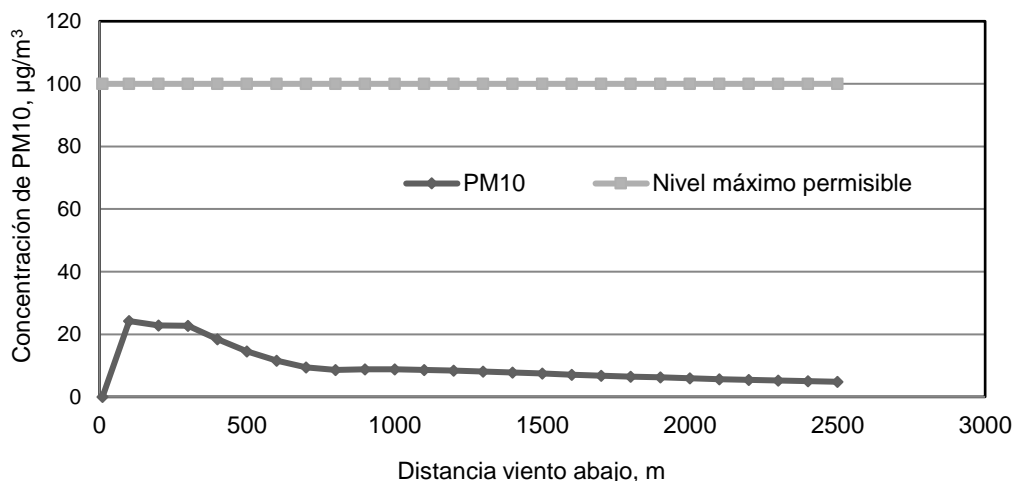


Fig. 3: Concentración de PM₁₀ viento abajo de la fuente

Las principales fuentes generadoras de material particulado en la zona de estudio aparte de las estudiadas en esta investigación podrían atribuirse según Calderon y Sierra (2013) a las áreas desprovistas de vegetación en donde los fuertes vientos producen la resuspensión de material particulado.

Concentración de contaminantes gaseosos NO₂ y CO

Las concentraciones de NO₂ y CO emitido a la atmosfera desde los procesos de turbocompresores y generadores eléctricos a gas se presentan en la Fig. 4. Las máximas concentraciones se presentan a 149 metros viento abajo de la estación, con valores estimado de 24,39 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el NO₂ y de 2165 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el CO para todas las velocidades de viento y estabilidad atmosféricas estudiadas.

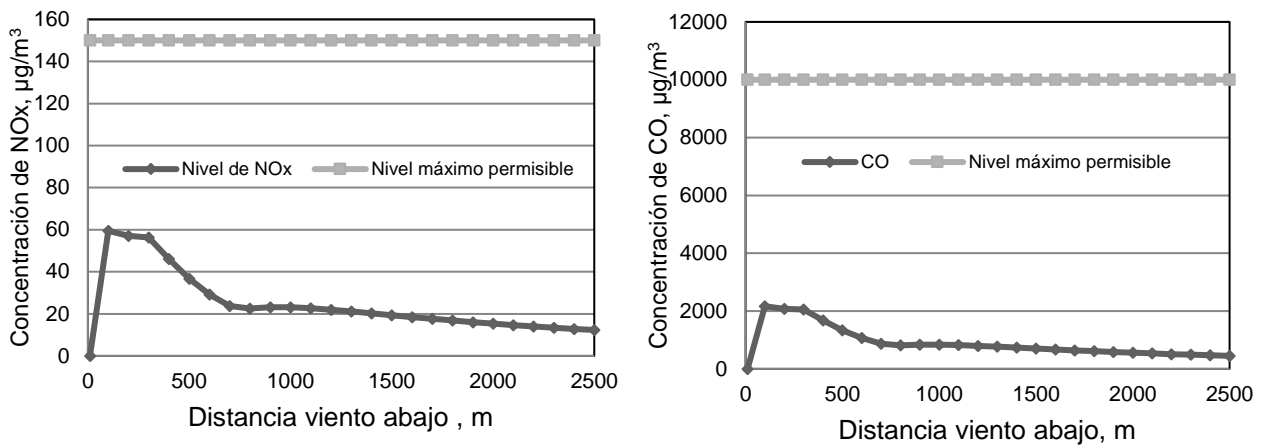


Fig. 4: Concentración de NO₂ y CO viento abajo de la fuente

El Valor promedio estimado de NO₂ es menor a el reportado por Calderón & Sierra (2013) de 29,45 µg/m³, caso contrario se observa en el promedio estimado para el CO, donde el promedio estimado es mayor al reportado en el mismo estudio de 1688,3 µg/m³. Según estos resultados, las emisiones de los turbocompresores y generadores eléctricos podrían estar aportando el 18% de NO₂ en la zona, contrario al CO que el valor estimado está muy por encima del valor medido. Comparando estos resultados con niveles reportados para las áreas urbanas de las ciudades de Riohacha (41,73 µg/m³ para NO₂ y 800 µg/m³ para CO) y Maicao (56,50 µg/m³ para NO₂ y 1257 µg/m³ para CO), se puede apreciar menor nivel de estos contaminantes en la zona influenciada por el proceso industrial (Corpoguajira, 2011). Si comparamos las máximas concentraciones de NO₂ y CO estimadas en el estudio de emisión podemos concluir que no se estaría violando los niveles permisibles. De igual manera, se puede apreciar que las concentraciones de NO₂ y CO en las Rancherías Guarera, Aritayen y Buenos aires son menores a las establecidas en la norma colombiana y por los establecidos en las guías de calidad del aire de la Organización Mundial de la Salud (OMS) para estos contaminantes (WHO, 2000).

Concentración de contaminantes no convencionales con efectos carcinogénicos COV y HAP

La norma colombiana establece seguimiento periódico para contaminantes no convencionales con efectos carcinogénicos, casos de contaminantes incluidos en la familia de los Compuestos orgánicos volátiles (COV) y contaminantes peligrosos del aire (HAP). La Fig. 5 presenta en los resultados de la modelación de COV y HAP (medido como Benceno y tolueno). Las máximas concentraciones se presentan a 169 metros viento abajo de la estación, con valores estimado de 1,06 µg/m³ para los COV y de 2,3e-3 µg/m³ para los HAP para todas las velocidades de viento y estabilidad atmosféricas estudiadas.

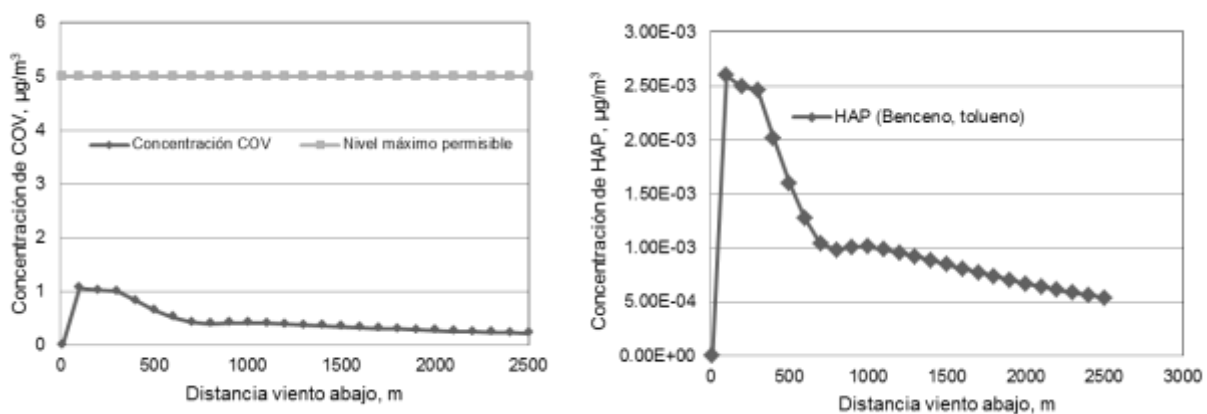


Fig. 5: Concentración de COV y HAP viento abajo de la fuente

Si comparan las máximas concentraciones estimadas de los COV y los HAP con los preceptos legales, se observa que no se estaría violando los niveles permisibles. De igual manera, se puede apreciar que las concentraciones de los COV y los HAP en las Rancherías Guarera, Aritayen y Buenos aires son menores a las establecidas en la norma colombiana que son de 5 µg/m³ promedio anual para el benceno y de 260 µg/m³ promedio semanal para el Tolueno. Estos resultados son menores a estándares de seis países incluyendo a Estados Unidos, Francia e Italia citados en un estudio de calidad de aire (Ravindra et al., 2008).

Validación de los resultados del modelo

Para la validación de los resultados simulados se obtuvo en cuenta los criterios de aceptación de Chang y Hanna (2004) para zona rural. La validación se realizó con el material particulado PM₁₀ y para el contaminante gaseoso NO₂, por ser dos contaminantes criterios con mayores datos observados en la zona. La Tabla 3 muestra los índices de validación del modelo de dispersión WKBK2 con datos observados y datos estimados. Todos los valores estadísticos estuvieron dentro de los rangos establecidos por Chang y Hanna (2004); esto indica que la validación del modelo es aceptable y que este modelo puede ser aplicado para evaluar la calidad del aire en el área de estudio. La correlación lineal para los dos contaminantes tiene valores significativos.

Tabla 3: Índice de validación para evaluar los modelos de dispersión WKBK2 con datos observados y datos estimados. D.O: dato observado; D.E: dato estimado; FB: Sesgo Fraccional; NMSE: Error Cuadrático Medio Normalizado; FAC2: factor de dos; r: Coeficiente de correlación

Contaminante	n	Media D.O.	Desv. Est. D.O	Media D.E.	Desv. Est. D.E.	FB	NMSE	FAC2	r
PM ₁₀	30	31.085	4.235	24.073	2.864	0.254	0.066	1.291	0.776
NO ₂	20	29,450	12.206	24.393	14.868	0.204	0.035	1.207	0.761

CONCLUSIONES

A partir de los resultados obtenidos, se pueden indicar las siguientes conclusiones: 1) El estudio muestra que el programa WKBK2 representa una buena herramienta para la estimación de contaminantes particulado y gaseosos en el aire emitidos desde fuentes industriales y puntuales. Aunque el análisis del programa es espacial y no temporal, es una herramienta que permite en corto tiempo tomar decisiones en seguimientos de calidad de aire en zonas industriales; 2) En las Rancherías indígenas: Guarera, Aritayen y Buenos aires ubicadas viento abajo de la estación Ballena, los niveles estimados de los 5 contaminantes estudiados son menores a las establecidos en la norma Colombiana. Es importante resaltar, que las concentraciones máxima estimadas de PM₁₀ estaría violando el estándar anual de la Organización Mundial de la Salud (OMS) en un 20%. Sin embargo, a la distancia de ubicación de las poblaciones indígenas, el nivel de PM₁₀ estaría en un 35% por debajo de la norma de la OMS; 3) Según los resultados de este estudio, el aporte de la estación Ballena es significativo para PM₁₀, NO_x COV y HAP, con aporte en concentración que varían del 42% al 83%.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan sus agradecimientos a la Corporación Autónoma Regional de La Guajira por el suministro de datos de la zona de estudio, a la Universidad de La Guajira y a la Universidad de Antioquia por el financiamiento y apoyo para el desarrollo de este proyecto.

REFERENCIAS

Abdel-Rahman, A., *On the Atmospheric Dispersion and Gaussian Plume Model*, 2nd Int. Conference on waste management, water pollution, air pollution, indoor climate (WWAI'08), 31-39, Corfu, Greece 26 to 28 October (2008)

Aliyu, A.S., Ramli, A.T., Saleh, M.A., *Assessment of potential human health and environmental impacts of a nuclear power plant (NPP) based on atmospheric dispersion modeling*. *Atmósfera*: 28, 13-26 (2015).

Arya, S.P., *Air Pollution Meteorology and Dispersion*, 1^{ra} edición, 220-237, Oxford University Press, North Carolina, USA (1998)

Baroutian, S.; A. Mohebbi y A.S. Goharrizi, *Measuring and modeling particulate dispersion: A case study of Kerman Cement Plant*. *J. Hazard. Mater.*, 136, 468-474 (2006)

Basagaña, X., B. Jacquemin, y otros 22 autores, *Short-term effects of particulate matter constituents on daily hospitalizations and mortality in five South-European cities: Results from the MED-PARTICLES project*, doi:10.1016/j.envint.2014.11.011, *Environ. Int.* (en línea), 75, 151-158 (2015)

Briggs G.A., *Chimney plumes in neutral and stable surroundings*, doi:10.1016/0004-6981(72)90037-6, *Atmos. Environ.* (en línea), 6, 19-35 (1972)

- Buekers, J., y otros 7 autores, *Assessment of human exposure to environmental sources of nickel in Europe: Inhalation exposure*, doi:10.1016/j.scitotenv.2015.02.092, Sci. Total Environ. (en línea), 521-522, 359-71, (2015)
- Calderón, O.J.; B.G. Sierra, *Evaluación Informe programa de Monitoreo de la Calidad de Aire, Radiación térmica, Ruido Ambiental y modelación de la calidad del aire, Complejo Ballena en el Municipio de Manaure la Guajira*. Reporte técnico, 1-12, Riohacha, Colombia, (2013)
- Chang, C.J. y R.S. Hanna, *Air quality model performance evaluation*, doi:10.1007/s00703-003-0070-7 Meteorol, Atmos. Phys. 87, 167-196 (2004)
- Chen, C.: J. Tsai; F. Chung; S. Kuo; K. Tseng; P. Kuo; L. Hsieh y I. Tsai, *Simulation of PM₁₀ Source Apportionment at An Urban Site in Southern Taiwan by a Gaussian Trajectory Model*, World Acad. Sci. Eng. Technol. 4, 742-745 (2010)
- Corpogujira, *Diseño y operación de campañas de monitoreo en Riohacha y Maicao*, Informe técnico, 1-91, Riohacha, Colombia (2011)
- Dawson, J. P.; P. N. Racherla; B. H. Lynn; P. J. Adams y S. N. Pandis, *Simulating present-day and future air quality as climate changes: Model evaluation*, Atmospheric Environment: 42, 4551-4566 (2008)
- Fritz, B.G.; J.M. Barnett; S.F. Snyder; L.E. Bisping y J.P. Rishel, *Development of criteria used to establish a background environmental monitoring station*, doi:10.1016/j.jenvrad.2015.02.010, J. Environ. Radioact. (en línea), 143, 52-57 (2015)
- García, C.; A. Machado; N. Garcia; C. Cárdenas; W. González; J. Martinez y S. Yabroudi, *Comparative evaluation of SO₂ in less favorable wind direction from a thermal power plant*. Rev. Técnica la Fac. Ing. Univ. del Zulia, 26, 78-92 (2003)
- Ghenai, C. y C.X. Lin; *Dispersion modeling of {PM₁₀} released during decontamination activities*, J. Hazard. Mater. 132, 58-67 (2006)
- Goodrich, L.B.; S. Capareda; J. Powell y G. Student, *Quantification of Almond Sweeping Emission Reductions Through Changes In a Sweeper Operation*, in: 2007, American Society of Agricultural and Biological Engineers, ASABE, 1-13, Minneapolis, USA (2007)
- Grineski, S.E.; S.E. Clark-Reyna y T.W. Collins, *School-based exposure to hazardous air pollutants and grade point average: A multi-level study*. doi:10.1016/j.envres.2016.02.004, Environ. Res. 147, 164-171. (2016)
- Guarnieri, M., Balmes, J.R., *Outdoor air pollution and asthma*. Doi: 10.1016/S0140-6736(14)60617-62014, Lancet 383, 1581-1592 (2014)
- IDEAM, *Análisis del comportamiento promedio y tendencias de largo plazo de la temperatura máxima media para las regiones Hidroclimáticas de Colombia*, Informe técnico, 4-55, Bogotá D.C. (2014)
- Jia, Y.; A. L. Clements y M. P. Fraser, *Saccharide composition in atmospheric particulate matter in the southwest US and estimates of source contributions*, Journal of Aerosol Science: 41, 62-73 (2010)
- Lim J. M.; J. H. Lee; J. H. Moon; Y. S. Chung y K. H. Kim, *Airborne PM10 and metals from multifarious sources in an industrial complex area*, Atmospheric Research: 96, 53-64 (2010)
- MAVDT, 2008. Resolución 909 de 5 de junio de 2008, Normas y estándares de emisión admisibles de contaminantes a la atmósfera por fuentes fijas, 1-36, Bogotá, Colombia (2008)
- Nava, E.; C. García; N. García; A. Machado y K. Martínez, *Atmospheric dispersion from flare stack*, Rev. la Fac. Ing. la U.C.V, 22, 95-105 (2007)
- Pope, C A. y D.W. Dockery, *Health Effects of Fine Particulate Air Pollution : Lines that Connec*, Air Waste Manag. Assoc., 56, 709-742 (2006)
- Promigas, *Estudio de emisiones de fuentes fijas en la estación Ballena- Guajira*, 1-60, Riohacha., Colombia (2010)

- Ravindra, K.; R. Sokhi y R. Van Grieken, *Atmospheric polycyclic aromatic hydrocarbons: Source attribution, emission factors and regulation*, Atmos. Environ. 42, 2895-2921 (2008)
- Ristic, B.; A. Gunatilaka y R. Gailis, *Achievable accuracy in Gaussian plume parameter estimation using a network of binary sensors*, Inf. Fusion 25, 42-48 (2015)
- Rodríguez, J.L.; L.C. Angulo; G.N. Restrepo; Rojano, R, *Evaluation of the models CALMET and CALPUFF in two sites topographically different in the coal mining zone of department of Cesar, Colombia*, doi:10.14644/dust.2014.015, ProScience 1, 94-99 (2014)
- Rojano, R.; C. Garcia; N. García, N.; A. Galindo; E. Toncel y J. Pérez, *Effect of the operational and meteorological variables in the atmospheric dispersión of SO₂*, Rev. Tec. Ing. Univ. Zulia, 23, 150-160 (2000)
- Rojano, R.; J. Pérez; A. Galindo; Y. Mendoza; D. Soto y E. Toncel, *Determination of the optimum point of sampling , for the evaluation of the concentrations of Total Suspended Particles (TSP) in a semiurban Colombian area*, Rev. Téc. Ing. Univ. Zulia, 31, 201-212 (2008)
- Satsangi, P.G.; S. Yadav; A.S. Pipal y N. Kumbhar, *Characteristics of trace metals in fine (PM_{2.5}) and inhalable (PM₁₀) particles and its health risk assessment along with in-silico approach in indoor environment of India*. Atmos. Environ. 92, 384-393 (2014)
- Srinivas, C.V y R. Venkatesan, *A simulation study of dispersion of air borne radionuclides from a nuclear power plant under a hypothetical accidental scenario at a tropical coastal site*, doi.org/10.1016/j.atmosenv.2004.11.016, Atmos. Environ. (en línea), 39, 1497-1511 (2005)
- Srivastava, R.K.; C. Miller; C. Erickson y R. Jambhekar, *Emissions of sulfur trioxide from coal-fired power plants*, J. Air Waste Manag. Assoc. 54, 750-762 (2004)
- Tartakovsky, D.; D.M. Broday y E. Stern, *Evaluation of AERMOD and CALPUFF for predicting ambient concentrations of total suspended particulate matter (TSP) emissions from a quarry in complex terrain*, doi:10.1016/j.envpol.2013.04.023, Environ. Pollut. 179, 138-145 (2013)
- Tartakovsky, D.; E. Stern y D.M. Broday, *Dispersion of TSP and PM₁₀ emissions from quarries in complex terrain*, doi:10.1016/j.scitotenv.2015.10.1332016, Sci. Total Environ. 542, 946-954 (2016)
- Tsuang, B.-J., *Quantification on the source/receptor relationship of primary pollutants and secondary aerosols by a Gaussian plume trajectory model: Part I-theory*, Atmos. Environ. 37, 3981-3991 (2003)
- Turner, D.B., *Workbook of Atmosphere Dispersion Estimates*, 1^{ra} edición, 5-43, Lewis publishers, Chapel Hill, North Carolina (1994)
- USEPA, *Emissions Factors & AP 42, Compilation of Air Pollutant Emission Factors*, (en la web; <http://www.epa.gov/ttn/chief/ap42/index.html>. Acceso: 15 de octubre 2015) (1995)
- USEPA, *Hazardous Air Pollutants* (en la web: <http://www.epa.gov/haps/health-and-environmental-effects-hazardous-air-pollutants>, acceso: 7 de marzo 2016), (2005)
- Verma, M.; P. Sahu; S. Ahmed y J.L Bhagoria, *Analysis of Wind Characteristics in And Around Open Cast Uranium Mine*, Int. J. ChemTech Res, 5, 601-609 (2013)
- WHO, *Air quality guidelines for particulate matter, ozone, nitrogen dioxide and sulfur dioxide: Global update 2005*, doi:10.1016/0004-6981(88)90109-6, Publications WHO Regional Office for Europe, Ginebra, Suiza. 31-54, (2005)
- Woodruff, T.J.; J. Caldwell; V.J. Cogliano y D.A. Axelrad, *Estimating cancer risk from outdoor concentrations of hazardous air pollutants in 1990*. doi:10.1006/enrs.1999.4021, Environ. Res. 82, 194-206 (2000)
- Wu, C.F.; S.Y. Wu; Y.H. Wu; A.C. Cullen; T.V. Larson; J. Williamson y L.J. Liu, *Cancer risk assessment of selected hazardous air pollutants in Seattle*, doi:10.1016/j.envint.2008.09.009, Environ. Int. 35, 516-522. (2009)
- Zhao, Y.; S. Wang; C.P. Nielsen X. Li y J. Hao, *Establishment of a database of emission factors for atmospheric pollutants from Chinese coal-fired power plants*. Atmos. Environ. 44, 1515-1523 (2010)

