

Estudio de modelación de dispersión de contaminantes PM₁₀ y CO debido al tráfico vehicular en las vías de la Universidad Industrial de Santander

Cristian Andrés Pérez Díaz

Monografía para optar el título de Especialista en Ingeniería Ambiental

Directora:

Olga Lucía Ramírez Pineda

Especialista en Química

**Universidad Industrial de Santander
Facultad de Ingeniería Físicoquímicas
Escuela de Ingeniería Química
Especialización en Ingeniería Ambiental
Bucaramanga**

2018

Contenido

	Pág.
Introducción	12
1. Objetivos	14
1.1 Objetivo general	14
1.2 Objetivos específicos	14
2. Marco legal	15
2.1 Norma de calidad del aire	15
3. Marco teórico	17
3.1 Descripción del modelo AERMOD	17
3.1.1 Variables meteorológicas de entrada al modelo	20
4. Generalidades	24
4.1 Ubicación del proyecto	24
4.2 Contaminantes evaluados	25
5. Análisis meteorológico	26
5.1 Temperatura	26
5.2 Velocidad y dirección del viento	28
5.3 Humedad relativa	34
5.4 Presión barométrica	35

5.5 Precipitación	36
5.6 Altura de mezcla	39
6. Metodología	40
6.1 Inventario de emisiones	40
6.2 Cálculo de emisiones	41
6.2.1 Factores de emisión.....	42
6.2.2 Variables para el cálculo de las emisiones.....	43
6.3 Resultados del cálculo de las emisiones	45
7. Modelación de dispersión de contaminantes en la atmosfera.....	46
7.1 Idealización de las fuentes	46
7.2 Receptores y dominio de modelación	49
7.2.1 Resolución y definición de dominio	49
7.3 Topografía.....	51
8. Resultados discusión y análisis.....	52
8.1 Archivos de entrada AERMOD	53
8.2 Archivos de salida AERMOD	54
8.3 Aportes de la modelación de material particulado PM10.....	55
8.4 Aportes de la modelación de monóxido de carbono CO.	58
8.5 Isopletas de modelación.....	61
9. Conclusiones y recomendaciones	66
Referencias bibliográficas.....	68

Lista de figuras

	Pág.
<i>Figura 1.</i> Esquema de modelización AERMOD	18
<i>Figura 2.</i> Macrolocalización del área de estudio.....	25
<i>Figura 3.</i> Temperatura promedio mensual	27
<i>Figura 4.</i> Temperatura promedio horaria.	28
<i>Figura 5.</i> Velocidad del viento promedio mensual	29
<i>Figura 6.</i> Velocidad del viento promedio horaria	30
<i>Figura 7.</i> Rosa de los vientos mensuales para el periodo de modelación	31
<i>Figura 8.</i> Distribución de frecuencia de vientos año 2017.....	33
<i>Figura 9.</i> Humedad relativa promedio mensual	34
<i>Figura 10.</i> Humedad relativa promedio horaria	35
<i>Figura 11.</i> Presión barométrica promedio mensual.....	35
<i>Figura 12.</i> Presión barométrica promedio horaria.....	36
<i>Figura 13.</i> Precipitación acumulada mensual.....	37
<i>Figura 14.</i> Precipitación acumulada horaria.....	38
<i>Figura 15.</i> Altura de mezcla horaria.....	39
<i>Figura 16.</i> Emisiones PM ₁₀ y CO por tramos.....	46
<i>Figura 17.</i> Idealización de las fuentes.	48

<i>Figura 18.</i> Malla de receptores utilizada en la definición del dominio	51
<i>Figura 19.</i> Modelo digital del terreno.....	52
<i>Figura 20.</i> Niveles de concentración PM_{10}	56
<i>Figura 21.</i> Concentración de PM_{10} vs límite máximo normativo Anual.....	57
<i>Figura 22.</i> Concentración de PM_{10} vs límite máximo normativo 24 horas.....	57
<i>Figura 23.</i> Niveles de concentración de CO.....	59
<i>Figura 24.</i> Concentración de CO vs límite máximo normativo 8 horas.....	60
<i>Figura 25.</i> Concentración de CO vs límite máximo normativo 1 hora	60
<i>Figura 26.</i> Isopleta anual PM_{10}	62
<i>Figura 27.</i> Isopleta Máxima 24 horas PM_{10}	63
<i>Figura 28.</i> Isopleta máxima 8 horas CO.....	64
<i>Figura 29.</i> Isopleta Máxima 1 hora CO.....	65

Lista de tablas

	Pág.
Tabla 1. <i>Niveles máximos permisibles para contaminantes criterio</i>	15
Tabla 2. <i>Niveles máximos permisibles para contaminantes criterio para el año 2030</i>	17
Tabla 3. <i>Parámetros requeridos por el modelo AERMOD</i>	20
Tabla 4. <i>Datos de entrada del modelo AERMOD</i>	22
Tabla 5. <i>Escala de velocidad del viento Beaufort</i>	31
Tabla 6. <i>Distribución de registros en función de la dirección y velocidad del viento.</i>	33
Tabla 7. <i>Escala de precipitación</i>	38
Tabla 8. <i>Número de vehículos que entran a la universidad</i>	41
Tabla 9. <i>Factor de emisión por vías pavimentadas</i>	43
Tabla 10. <i>Parámetros para el cálculo de las emisiones.</i>	44
Tabla 11. <i>Características de la flota vehicular.</i>	44
Tabla 12. <i>Longitudes de los tramos de las vías</i>	44
Tabla 13. <i>Emisiones estimadas CO y PM₁₀</i>	45
Tabla 14. <i>Resumen Fuentes de volumen.</i>	49
Tabla 15. <i>Coordenadas de origen malla de receptores</i>	50
Tabla 16. <i>Receptores discretos de modelación</i>	50
Tabla 17. <i>Resultados PM₁₀ 24 horas y anual.</i>	55

Tabla 18. <i>Comparación de PM_{10} respecto el valor permitido</i>	56
Tabla 19. <i>Resultados de concentración máxima CO 8 horas y 1 hora.</i>	58
Tabla 20. <i>Comparación de niveles de concentración respecto el valor permitido.</i>	59

Resumen

Título: Estudio de modelación de dispersión de contaminantes PM10 y CO debido al tráfico vehicular en las vías de la Universidad Industrial de Santander.*

Autor: Cristian Andrés Pérez Díaz**

Palabras claves: Dispersión de material, inventario de emisiones, inmisión, WRF, factor de emisión, AERMOD.

Descripción:

El presente estudio se realizó con el fin de estimar las emisiones y la dispersión de material particulado menor a 10 micras (PM₁₀) y monóxido de carbono (CO), que son generadas por las emisiones de los vehículos que transitan diariamente al interior de la Universidad Industrial de Santander, se tuvieron en cuenta las emisiones por resuspension de material en vías pavimentadas y por tubo de escape, las cuales se calcularon mediante factores de emisión del AP42 y el software Mobile 6.2.

En el ejercicio de la modelación de partículas, la topografía y la meteorología juegan un factor muy importante con lo cual se determinará la dirección del contaminante, altura de mezcla entre otros, por lo cual se contó con meteorología simulada de última generación WRF; la topografía fue obtenida del sensor radar ALOS PALSAR el cual cuenta con una capacidad de detalle entre 5 a 12 metros.

De acuerdo a los resultados arrojados por la modelación, el mayor aporte para PM₁₀ se presentó en el punto denominado Escuela Industrial, con concentraciones de 3.8 µg/m³ periodo anual y 7.0 µg/m³ periodo 24 horas y el menor en el ubicado en la portería 30 con concentraciones de 1.0 µg/m³ periodo anual y 2.6 µg/m³ periodo 24 horas. Para CO el mayor aporte se presentó en el punto ubicado en la portería 25 con concentraciones de 145.6 µg/m³ periodo 8 horas y 239.8 µg/m³ periodo 1 hora, el menor aporte se presentó en el punto Portería 30 con concentraciones de 17.3 µg/m³ periodo 8 horas y 49.5 µg/m³ periodo 1 hora.

* Trabajo de grado

** Facultad de Ingeniería Físicoquímicas. Escuela de Ingeniería Química. Especialización en Ingeniería Ambiental.
Directora: Olga Lucia Ramírez Pineda, Especialista en Química

Abstract

Title: Study of contaminants dispersion modeling of PM₁₀ and CO due to vehicular traffic in the roads of the Industrial University of Santander.*

Author: Cristian Andrés Pérez Díaz**

Key words: Material dispersion, emission inventory, inmission, WRF, emission factors, AERMOD.

Description:

The present study was realized in order to estimate the emission and the dispersion of particulate matter up to to 10 microns (PM₁₀) and carbon monoxide (CO), that are generated by the emission of the vehicles that circulate daily to the interior of the Industrial University of Santander. It was considered the resuspension emission of material in paved roads and by exhaust pipe, which were calculated by with the emission factors of the AP42 and the software Mobile 6.2.

Regarding the particle modeling, the topography and the meteorology has a very important factor because they are determinant to indicate the direction of the pollutant, height of mixture etc. For that reason, it was used a last generation simulated meteorology WRF; the topography was obtained of the radar sensor ALOS PALSAR which has a detail capacity from 5 to 12 meters.

According to the results gathered with the modeling, the biggest contribution for PM₁₀ appeared in the point named “Escuela Industrial”, which concentrations were 3.8 µg/m³ annual period and 7.0 µg/m³ 24 hours period and the lowest contribution was located one in the point called “Portería 30” which concentrations were 1.0 µg/m³ annual period and 2.6 µg/m³ 24 hours period. For CO, the biggest contribution appeared in the point located in the “Portería 25” which concentrations were 145.6 µg/m³ 8 hours period and 239.8 µg/m³ 1 hour period, the lowest contribution appeared in the point ‘Portería 30’ which concentrations were 17.3 µg/m³ 8 hours period and 49.5 µg/m³ 1 hour period.

* Degree work

** Faculty of Physicochemical Engineering. School of Chemical Engineering. Specialization in Environmental Engineering. Director: Olga Lucia Ramírez Pineda, Chemistry Specialist

Introducción

Actualmente, los índices de contaminación del aire en las ciudades se han aumentado considerablemente, a tal punto de decretar alertas ambientales como en Medellín Antioquia, la modelación permite determinar las zonas afectadas y hacer predicciones para la toma de decisiones de todas las partes interesadas, autoridades locales y/o nacionales.

En el presente estudio se empleó el modelo de simulación gaussiano AERMOD con el fin de realizar la estimación de emisiones y modelación de la dispersión de contaminantes debido al flujo de vehículos dentro de la Universidad Industrial de Santander UIS, ubicada en la ciudad de Bucaramanga – departamento de Santander. Con el fin de estimar los niveles de inmisión de partículas de diámetro aerodinámico inferior a 10 micras (PM_{10}) y Monóxido de Carbono (CO).

Los resultados obtenidos fueron comparados con los valores permitidos de acuerdo a Resolución 2254 de 2017, con la finalidad de evaluar los aportes a la calidad del aire por el tráfico de vehículos dentro de las instalaciones de la UIS.

El estudio de modelación está estructurado de la siguiente manera:

1) Análisis meteorológico a partir del modelo de simulación de última generación WRF (Weather Research and Forecasting) del año 2016, la cual permitirá conocer las condiciones que puedan afectar la dispersión de los contaminantes.

2) Inventario de emisiones de las operaciones de la planta para los contaminantes PM_{10} , y CO, con ayuda de factores de emisión del AP-42 de la US-EPA.

3) Modelación de un escenario para cada uno de los contaminantes el cual corresponde al tráfico de vehículos pesados y livianos por las vías internas de la Universidad Industrial de Santander.

El análisis e interacción de estos elementos permitirá tener un panorama de la influencia en la zona de las actividades que se generaron durante la operación normal en el periodo descrito. El estudio tendrá limitaciones para el cálculo de las emisiones, por ejemplo, información acerca del tipo y la calidad del combustible, modelo de la flota vehicular entre otras.

1. Objetivos

1.1 Objetivo general

Describir los procesos llevados a cabo e información necesaria para realizar la modelación mediante el software AERMOD del contaminante material particulado (PM_{10}) y monóxido de carbono (CO), generadas por el flujo de los vehículos en el campus de la Universidad Industrial de Santander, determinando la emisión y dispersión.

1.2 Objetivos específicos

- Estimar las emisiones de PM_{10} y de CO debido a la combustión interna y resuspension de material en las vías de la Universidad Industrial de Santander.
- Simular la dispersión de los contaminantes en estudio mediante el modelo AERMOD.
- Analizar el comportamiento meteorológico a partir de la modelación WRF del año 2017, permitiendo conocer condiciones que puedan afectar la dispersión de los contaminantes.
- Comparar los resultados de la modelación con mediciones realizadas en el sitio y realizar comparativos con la resolución 2254 de 2017.
- Representar mediante mapas los resultados de las simulaciones.

2. Marco legal

2.1 Norma de calidad del aire

La Resolución 2254 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS, antiguo MAVDT) establece la norma de calidad del aire o nivel de inmisión para todo el territorio nacional en condiciones de referencia. En estas se presentan los niveles máximos permisibles de contaminantes en la atmósfera; los procedimientos para la medición de la calidad del aire, los programas de reducción de la contaminación del aire y los niveles de prevención, alerta y emergencia y las medidas generales para su mitigación, norma aplicable a todo el territorio nacional.

En el Artículo 2 de la Resolución 2254 de 2017 se establecen los niveles máximos permisibles en condiciones de referencia para contaminantes criterio que regirán a partir del primero de enero del año 2018. En la Tabla 1 se detallan estos límites máximos permisibles.

Tabla 1.

Niveles máximos permisibles para contaminantes criterio

Contaminante	Nivel máximo permisible	Tiempo de exposición
	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
PM ₁₀	50	Anual
	100	24 horas
PM _{2.5}	25	Anual
	50	24 horas

Tabla 1. *Continuación*

Contaminante	Nivel máximo permisible	Tiempo de exposición
	($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
SO ₂	50	24 horas
	100	1 hora
NO ₂	60	Anual
	200	1 hora
O ₃	100	8 horas
CO	5,000	8 horas
	35,000	1 hora

** De acuerdo a National Ambient Air Quality Standards (NAAQS) (United States Environmental Protection Agency. (December 20, 2016). Related Topics: Criteria Air Pollutants. Disponible en: <https://www.epa.gov/criteria-air-pollutants/naaqs-table>) estos valores no deben superarse más de una vez por año.

Fuente: Resolución 2254 de 1 de noviembre de 2017.

De acuerdo a lo estipulado en el Parágrafo 1 establece que, a partir del 1 de julio de 2018, los niveles máximos permisibles de PM₁₀ y PM_{2.5} para un tiempo de exposición 24 horas serán de 75 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ y 37 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ respectivamente.

El Artículo 3 establece los niveles máximos permisibles para el año 2030 (ver Tabla 2) a condiciones de referencia para contaminantes criterio que regirán a partir del 1 de enero del año 2030.

Tabla 2.

Niveles máximos permisibles para contaminantes criterio para el año 2030

Contaminante	Nivel máximo permisible ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	Tiempo de exposición
PM ₁₀	50	Anual
PM _{2.5}	25	Anual
SO ₂	50	24 horas
NO ₂	60	Anual

Fuente: Resolución 2254 de 1 de noviembre de 2017.

3. Marco teórico

3.1 Descripción del modelo AERMOD

AERMOD (American Meteorology Society – E.P.A. Regulatory Model) es un modelo desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental de los Estados Unidos. Es un modelo de pluma de estado estacionario que asume que las concentraciones en todas las distancias están gobernadas por la meteorología promedio de una hora (U.S. EPA, 1998). La Figura 1 muestra el diagrama de flujo para el procesamiento de información en el modelo de dispersión AERMOD. Este consiste de un módulo principal (AERMOD) y dos preprocesadores (AERMET y AERMAP).

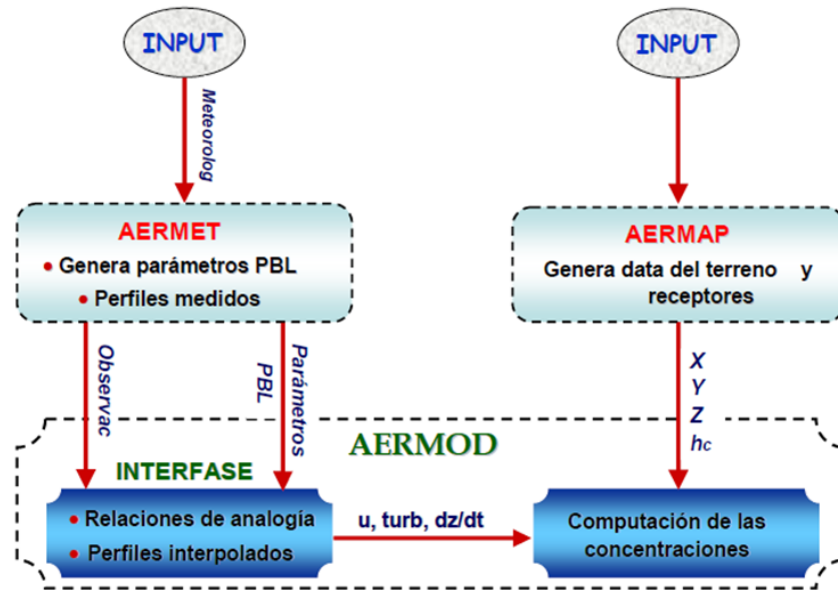


Figura 1. Esquema de modelización AERMOD

Fuente: Universidad Nacional Autónoma de México (Cabrera, 2008).

AERMET usa mediciones meteorológicas representativas del dominio de modelación para calcular parámetros de la capa límite (Caputo et al., 2003). La INTERFASE interna de AERMOD usa estos parámetros calculados para generar perfiles de viento, temperatura y turbulencia (U.S. EPA, 1998). La profundidad de la capa límite y la dispersión de los contaminantes dentro de ésta, están influenciadas a escala local por las características superficiales: rugosidad, albedo y radio de Bowen. Estas variables de superficie, junto con observaciones meteorológicas básicas (velocidad de viento, dirección de viento, temperatura y cobertura de nubes) son datos requeridos por AERMET para calcular los siguientes parámetros de la capa límite planetaria (PBL, por sus siglas en inglés) (U.S. EPA, 2004):

- 1) Velocidad de fricción, u^*
- 2) Longitud de Monin-Obukhov, L

- 3) Escala de velocidad convectiva, w^*
- 4) Escala de temperatura, θ^*
- 5) Altura de la capa de mezcla convectiva (z_{ic}) y mecánica (z_{im})
- 6) Flujo de calor superficial, H

La estabilidad de la PBL está dada por el signo de H (convectivo para $H > 0$ y estable para $H < 0$). El preprocesador de terreno AERMAP emplea la información topográfica para calcular la influencia del terreno en la dispersión, obteniendo una mejor valoración del escalamiento de altura del terreno en la concentración del material dispersado (Caputo et al., 2003). AERMAP también es usado para crear el mallado y las elevaciones de los receptores. Para cada receptor, el preprocesador AERMAP pasa la siguiente información hacia AERMOD: ubicación del receptor (x_r, y_r), altura sobre el nivel promedio del mar (z_r) y la escala de altura del terreno para un receptor específico (h_c) (U.S. EPA, 1998).

Para terreno complejo, AERMOD incorpora el concepto de la línea divisora de corriente para condiciones establemente estratificadas. Dependiendo del caso, la pluma es modelada combinando dos posibles casos: pluma de estado horizontal y/o pluma de estado topográfico. En terreno plano los dos estados son equivalentes, pero cuando se incorpora el concepto de la línea divisora de corriente en terreno elevado, la concentración total es calculada como la suma ponderada de las concentraciones asociadas a estos dos estados de la pluma (U.S EPA, 1998). La ponderación de los dos estados depende de:

- a) El grado de estabilidad atmosférica
- b) La velocidad de viento

c) La altura de la pluma con respecto al terreno.

AERMOD caracteriza la capa límite planetaria (PBL) por medio de un “escalamiento” de la capa de mezcla. Para ello, AERMOD construye perfiles verticales de velocidad de viento, dirección de viento, turbulencia y temperatura, basados en mediciones de campo y extrapolaciones. Sólo se requiere de una medición en superficie de la velocidad de viento (medido entre $7z_0$ y 100 m, donde z_0 es la rugosidad superficial). AERMOD también requiere de datos de cobertura de nubes, al igual que de un radiosondeo en la mañana para calcular la altura de mezcla convectiva a lo largo del día. Las características de superficie (rugosidad superficial, radio de Bowen y albedo) son también entradas requeridas para construir los perfiles de “analogía” de los parámetros de la PBL (U.S. EPA, 1998). Cabe mencionar también que, si no se cuenta con alguno de estos parámetros, el preprocesador AERMET los estima.

3.1.1 Variables meteorológicas de entrada al modelo. En la tabla siguiente se presentan todas las variables meteorológicas que puede requerir AERMOD dependiendo de las opciones seleccionadas.

Tabla 3.

Parámetros requeridos por el modelo AERMOD

Tipo	Símbolo	Descripción
Terreno	ED	Elevación digital
	US	Uso de suelos

Tabla 3. *Continuación*

	Tipo	Símbolo	Descripción
Meteorología	Parámetros meteorológicos	V	Velocidad del viento
		T	Temperatura ambiente
		Dv	Dirección del viento
		EA	Estabilidad Atmosférica
		Hrur	Altura de capa de mezcla rural
		Hurb	Altura de capa de mezcla urbana
		f v	Velocidad de fricción
		LMO	Longitud de Monin Obhukov
		R	Rugosidad
		Pc	Código de Precipitación
		Pr	Tasa de Precipitación
		FC	Flujo de Calor Sensible
		EV	Escala de velocidad convectiva
		B	Parámetro de Bowen
		A	Albedo de medio día
	Radio sondeo	PRE	Presión
		DIFTRC	Diferencia con la temperatura de rocío
		ALT	Altura sondeo
EMA	WSMDir	Dirección del viento más alto	
	WSMK	Velocidad del viento más alto	
	AvgRh	Humedad relativa promedio	
	AvgSR	Radiación solar	

Tabla 3. *Continuación*

	Tipo	Símbolo	Descripción
Meteorología	Observatorio	PRE24	Precipitación en las últimas 24 horas
		PRELAMP	Precipitación en el periodo
		PRETPO	Periodo de muestreo para precipitación
		TEMMAX	Temperatura máxima
		TEMAMB	Temperatura ambiente
		TEMMIN	Temperatura mínima
		TEMROC	Temperatura de rocío
		PRSMAR	Presión al nivel del mar
		NUBOCT	Nubosidad (Octas)
		NUBBAJ	Altura de las nubes más bajas

Fuente: MADS-ITESM, 2008

Tabla 4.

Datos de entrada del modelo AERMOD

	Tipo	Símbolo	Descripción	ISC	AERMOD
Meteorología	Parámetros primarios	V.V	Velocidad del viento	√	√
		T	Temperatura ambiente	√	√
		D.V	Dirección del viento	√	√
		R.S	Radiación solar	√	√
		EA	Estabilidad Atmosférica	√	√
	Parámetros secundarios	Hmix conv	Altura de capa de mezcla rural	√	√

Tabla 4. *Continuación*

Tipo	Símbolo	Descripción	ISC	AERMOD	
Meteorología	Parámetros secundarios	Altura de capa de mezcla urbana	√	√	
		Hmix mec			
		u^*	Velocidad de fricción	√*	√
		L	Longitud de Monin Obhukov	√*	√
		Z_o	Rugosidad superficial	√*	√
		Pc	Código de Precipitación	√**	
		Pr	Tasa de Precipitación	√**	
		H_o	Flujo de Calor Sensible		√
		w_*	Escala de velocidad convectiva		√
		B	Parámetro de Bowen		√
		α	Albedo de medio día		√
		N	Nubosidad (Octas)	√	√
√*	Si se desea cuantificar deposición seca y húmeda				
√**	Solo necesarios para cuantificar deposición húmeda				
√Δ	Para especificar altura en fuente y receptores				

Fuente: MADS-ITESM, 008

Debido a que en el país no existen los equipos para obtener todos los parámetros anteriores, se hace necesario estimar los secundarios por medio de las formulaciones recomendadas en la literatura. La metodología de (Sozzi, 1997) es la recomendada por IDEAM y ha sido usada en modelaciones del MADS (Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo Sostenible) en zonas mineras. A continuación, se expresa la metodología utilizada para el cálculo de los parámetros y

se presenta las constantes necesarias para generar los archivos meteorológicos (PFL y SFC) de modelación AERMOD.

4. Generalidades

4.1 Ubicación del proyecto

La Universidad Industrial de Santander se encuentra ubicada en el costado Norte de la ciudad de Bucaramanga departamento de Santander, la altura sobre el nivel del mar es de 994, comprendiendo un área aproximada de 30 ha (Ver Figura 2).



Figura 2. Macrolocalización del área de estudio.

4.2 Contaminantes evaluados

Los contaminantes a evaluar en el presente estudio serán material particulado con diámetro aerodinámico inferior a $10 \mu\text{m}$ (PM_{10}) y monóxido de carbono (CO).

- Material particulado PM_{10}
- Monóxido de carbono CO.

5. Análisis meteorológico

Para el análisis de dispersión de emisiones se utilizó el modelo de simulación de última generación WRF V3.7 (Weather Research and Forecasting), de acuerdo a recomendado por la EPA. La resolución temporal de los parámetros evaluados está dada por las condiciones topográficas y uso del suelo de la zona. Toda la información empleada en este capítulo corresponde a datos meteorológicos entre el 1 de Enero a 31 de Diciembre de 2017, simulados por la empresa española METEOSIM por medio de K2INGENIERIA S.A.S.

En este capítulo se certifica la calidad de los datos, en cuanto al funcionamiento en el procesador AERMET. Los datos fueron procesados en las tres etapas de AERMET ready, el cual fue publicado el 16 de Diciembre de 2013 en la página oficial de la US-EPA. Los archivos entregados por METEOSIM fueron “UIS.sfc” y “UIS.pfl”, generados a partir de los archivos “UIS.sam” y “UIS.ua”.

5.1 Temperatura

La Figura 3 muestra el comportamiento de la temperatura mes a mes a lo largo del período analizado.

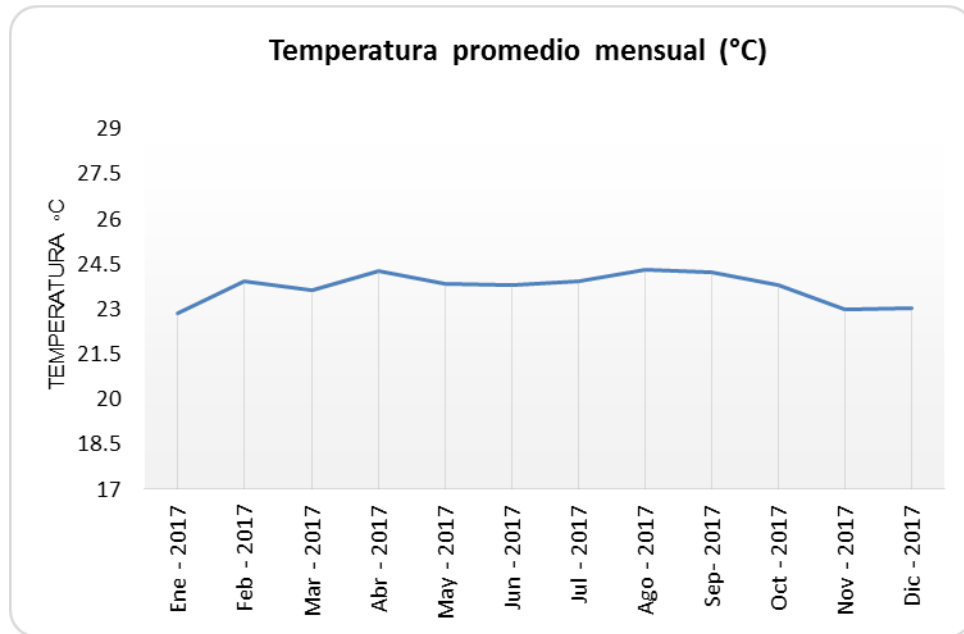


Figura 3. Temperatura promedio mensual

Se muestra que el mayor promedio mensual de temperatura se presenta en el mes de agosto con un valor de 24.33 °C y el mínimo se presenta en el mes de enero con un valor de 22.87 °C, el promedio anual de temperatura es de 23.73 °C.

La Figura 4 muestra los promedios de temperatura para cada hora del día obtenidos durante todo el año. En esta gráfica se obtiene que los mayores valores de temperaturas se presenten entre las 12 y las 17 horas, mientras que en horas de la madrugada la temperatura disminuye.

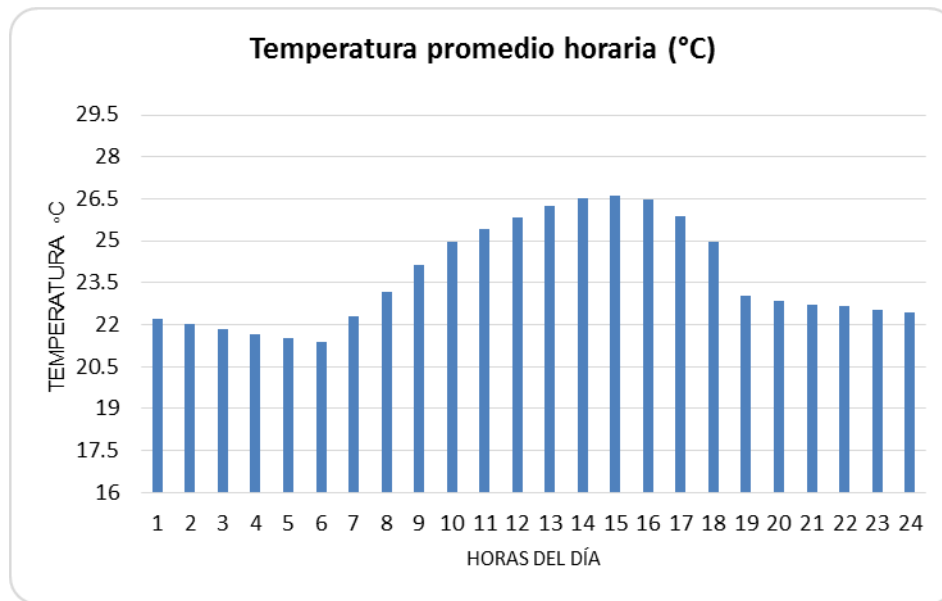


Figura 4. Temperatura promedio horaria.

5.2 Velocidad y dirección del viento

El comportamiento mensual de la velocidad del viento se puede apreciar en la Figura 5 donde se muestran velocidades promedio mensuales entre 1.72 y 2.02 m/s.

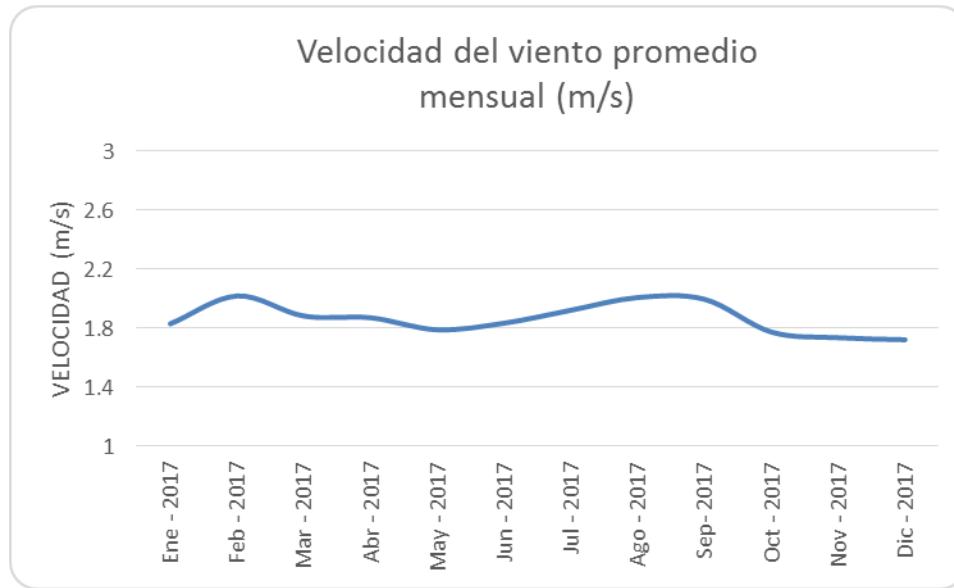


Figura 5. Velocidad del viento promedio mensual

De la gráfica anterior se observa que el mayor promedio mensual de velocidad del viento se presenta en el mes de febrero con 2.02 m/s y el promedio más bajo se presenta en el mes de diciembre con velocidades de 1.72 m/s. La dispersión de contaminantes en la atmósfera está influenciada significativamente por la velocidad y la variabilidad de la dirección del viento.

El viento también desempeña un papel significativo en el transporte y dilución de los contaminantes. Cuando su velocidad aumenta, en este caso a 2.02 m/s (valor máximo mensual), mayor es el volumen de aire que se desplaza por unidad de tiempo, por la zona donde está localizada una fuente de emisión de contaminantes. En consecuencia, la concentración disminuye si la emisión es constante. La velocidad del viento afecta el tiempo de recorrido de los contaminantes entre la fuente y los receptores.

Cuando los contaminantes son emitidos desde las fuentes con impulso vertical y calor, la elevación de los mismos también está afectada por la velocidad del viento. Generalmente, es aceptado que cuanto mayor es la intensidad del viento, menor será la concentración de

contaminantes en el aire. Esta relación se verifica generalmente cuando la fuente está ubicada a nivel del suelo. Sin embargo, las concentraciones máximas a nivel del suelo de contaminantes emitidos desde chimeneas con empuje térmico e impulso vertical, pueden no verificar esta “relación inversa” con la velocidad del viento lo que es probable que tengan una buena dispersión de los contaminantes. (Venegas & Mazzeo, sf)

La Figura 6 presenta la velocidad promedio horaria para el periodo de modelación, en esta se observa que los mayores valores de velocidad se presentan cerca del mediodía cuando la atmosfera se comporta de una forma turbulenta debido a la alta radiación solar.

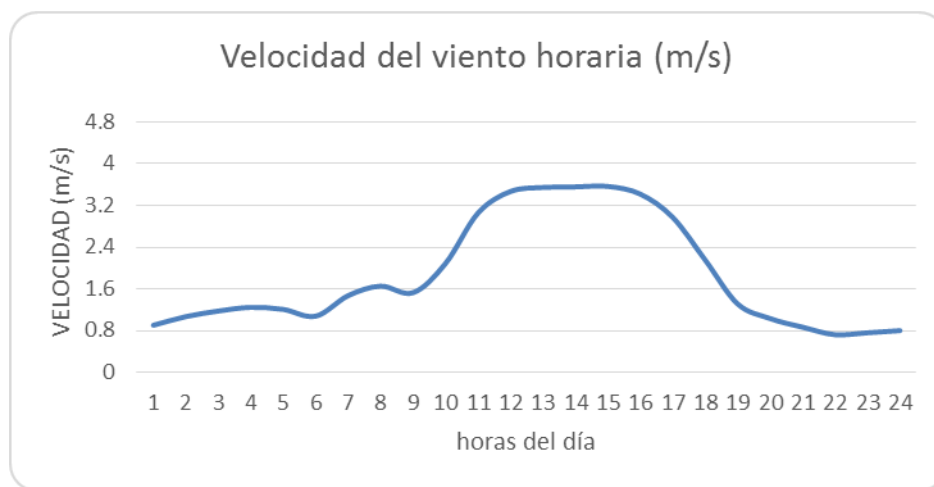


Figura 6. Velocidad del viento promedio horaria

En la Figura 7 se presenta la rosa de vientos del año 2017, donde se puede apreciar que los componentes predominantes provienen de la dirección Sureste (SE), Sur Sureste (SSE), Noroeste (NE) y Norte Noroeste (NNO) con otras componentes de menor predominancia provenientes del Norte (N), y Sur (S), lo que indica que los vientos en general tienen una dirección predominante Norte Noroeste (NNO) durante el año con vientos por lo general inferiores a 5.7 m/s (hora a hora).

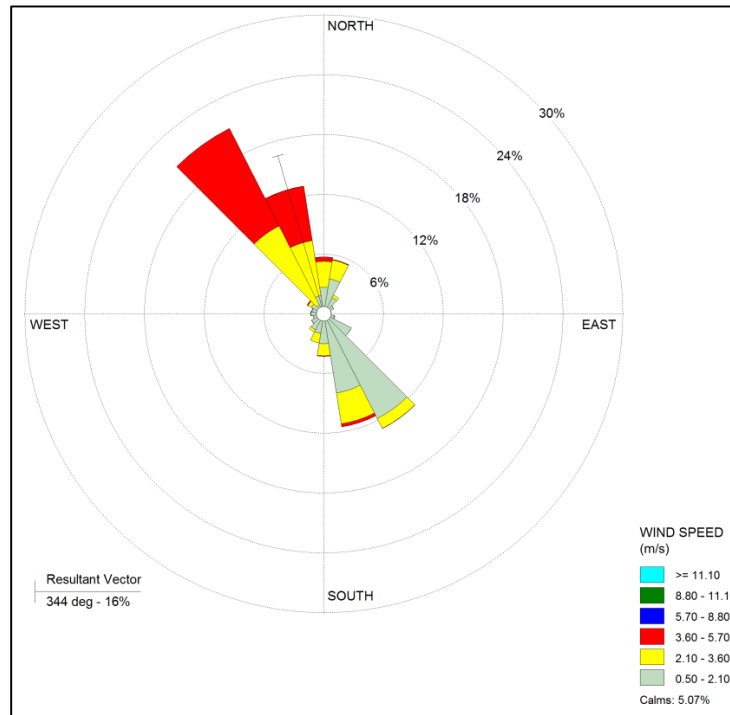


Figura 7. Rosa de los vientos mensuales para el periodo de modelación

Fuente: Estudio actual por medio de WRPLOT VIEW.

El rango de velocidades que se presentan con mayor frecuencia es de 0.5 a 2.10 m/s y 2.10 a 3.6 m/s correspondientes a “Aire ligero y brisa suave”, de acuerdo a la escala de Beaufort.

La Tabla 5 presenta una parte de la escala de Beaufort que puede ayudar a dimensionar los valores de velocidad del viento presentados en la gráfica anterior.

Tabla 5.

Escala de velocidad del viento Beaufort

Denominación	Velocidad del viento (m/s)		
Calma	0.0	-	0.2
Aire ligero	0.3	-	1.5

Tabla 5. *Continuación*

Denominación	Velocidad del viento (m/s)		
Brisa suave	1.6	-	3.3
Brisa leve	3.4	-	5.4
Brisa moderada	5.5	-	7.9
Brisa fresca	8.0	-	10.8
Brisa fuerte	10.9	-	13.8
Viento fuerte	13.9	-	16.9
Viento duro	17.0	-	20.5
Muy duro	20.6	-	24.1
Temporal	24.2	-	28.3
Borrasca	28.4	-	32.6
Huracán	32.7	-	

Fuente: Secretaria Distrital de Ambiente, Dirección de Control Ambiental, Red de monitoreo de Calidad del aire de Bogotá D.C. Informe anual consolidado sobre niveles de concentración de contaminantes, 2008.

Tabla 6.

Distribución de registros en función de la dirección y velocidad del viento.

Directions / Wind Classes (m/s)	0.50 - 2.10	2.10 - 3.60	3.60 - 5.70	5.70 - 8.80	8.80 - 11.10	>= 11.10	Total
N	1%	3%	2%	0%	0%	0%	5%
NNE	1%	2%	2%	2%	0%	0%	7%
NE	1%	1%	2%	3%	2%	1%	10%
ENE	1%	1%	1%	4%	4%	2%	13%
E	1%	2%	4%	10%	9%	3%	31%
ESE	2%	2%	1%	1%	1%	0%	8%
SE	2%	2%	0%	0%	0%	0%	4%
SSE	2%	2%	0%	0%	0%	0%	4%
S	1%	1%	0%	0%	0%	0%	3%
SSW	1%	1%	0%	0%	0%	0%	2%
SW	1%	1%	0%	0%	0%	0%	2%
WSW	0%	1%	0%	0%	0%	0%	1%
WSW	0%	0%	0%	0%	0%	0%	1%
WNW	0%	1%	1%	0%	0%	0%	2%
NW	0%	1%	1%	0%	0%	0%	3%
NNW	1%	2%	1%	0%	0%	0%	4%
Sub-Total	15%	23%	17%	21%	16%	6%	100%
Calms							0%
Missing/Incomplete							0%
Total							100%

Fuente: Universidad de Buenos Aires, Departamento de Geografía. La Observación meteorológica.

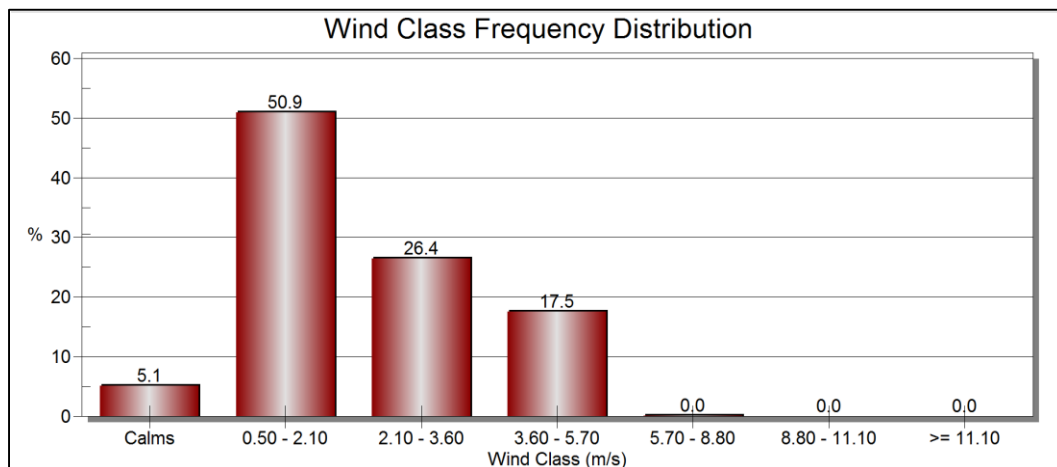


Figura 8. Distribución de frecuencia de vientos año 2017

5.3 Humedad relativa

La Figura 9 muestra el comportamiento de la humedad relativa cada mes para el año 2017.

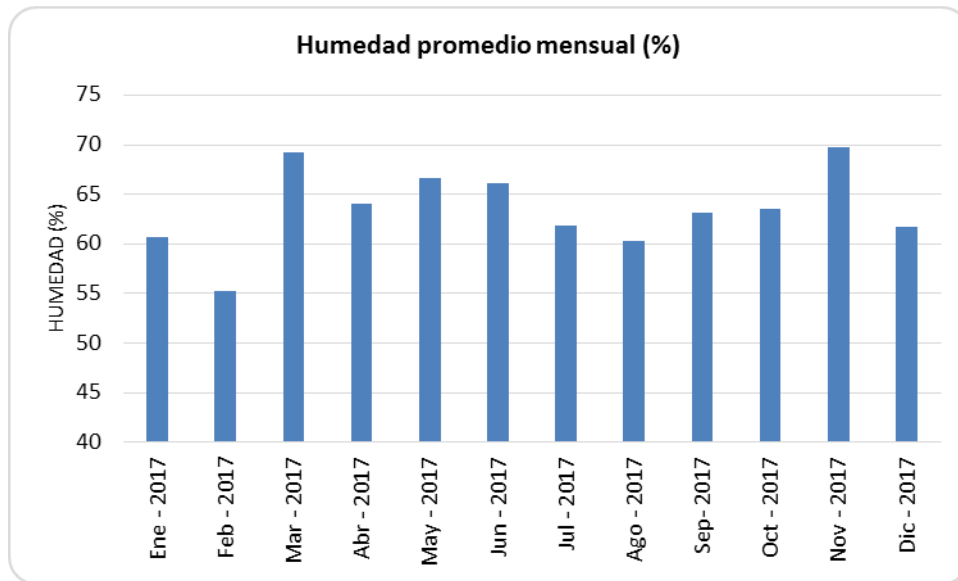


Figura 9. Humedad relativa promedio mensual

Debe tenerse en cuenta que la humedad relativa presenta una relación inversa con la temperatura del aire, por tanto, los valores máximos y mínimos del promedio mensual son presentados de forma contraria al comportamiento de la temperatura descrito en la sección 1.7.

La Figura 10 presenta el comportamiento del promedio horario de la humedad relativa para el periodo analizado en la zona.

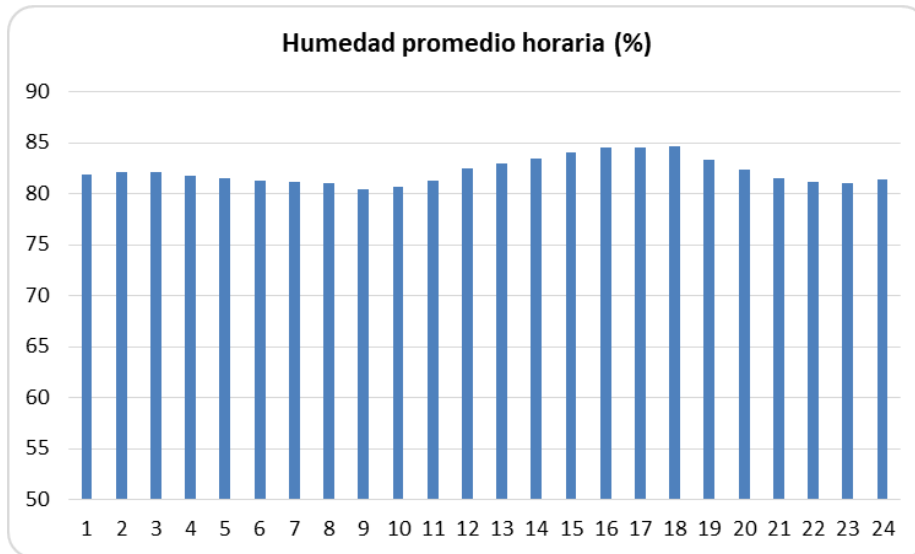


Figura 10. Humedad relativa promedio horaria

5.4 Presión barométrica

La Figura 11 muestra el comportamiento de la presión barométrica a lo largo del período analizado.

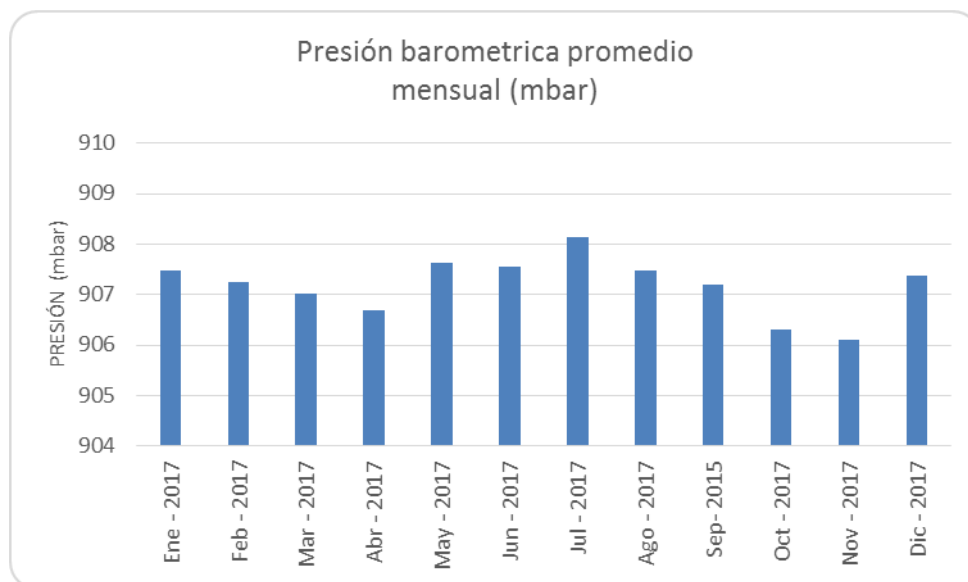


Figura 11. Presión barométrica promedio mensual

La figura muestra que el mayor valor mensual de presión se presenta en el mes de julio con un valor de 908.14 mbar y el mínimo se presenta en el mes de noviembre con un valor de 906.11 mbar, el promedio anual de presión barométrica es de 907.19 mbar.

La Figura 12 muestra los promedios de presión barométrica horarios obtenidos durante el año. Los menores promedios se presentan en horas de la tarde; mientras que durante las primeras horas de la mañana y cerca de la media noche los valores de presión barométrica son mayores, aunque no se presenta gran variación en el día.

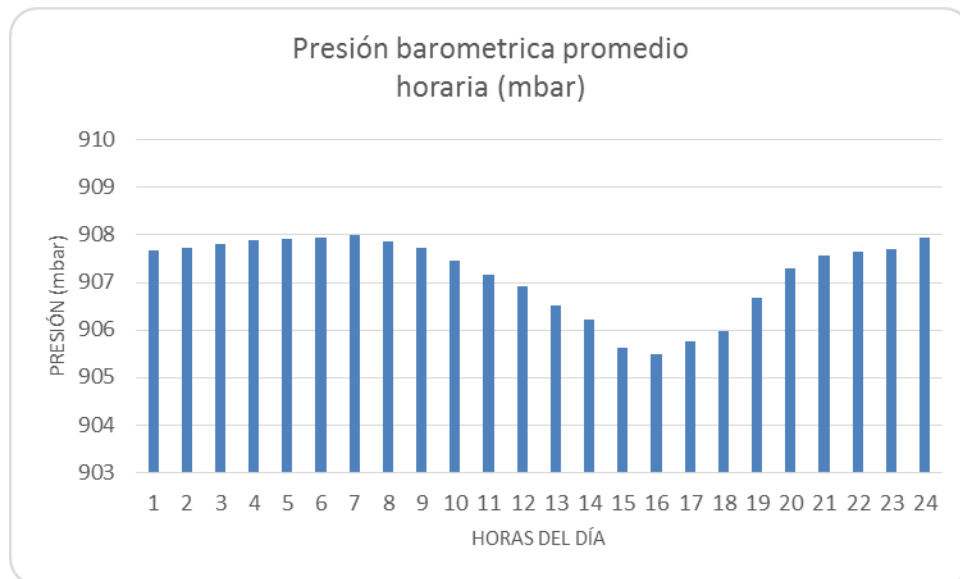


Figura 12. Presión barométrica promedio horaria

5.5 Precipitación

La Figura 13 muestra la precipitación acumulada mensual. La temporada de mayor intensidad de lluvias se presenta durante los meses de marzo, mayo, noviembre y diciembre; debe tenerse en cuenta que la mezcla Aire – Agua en la atmosfera tiene una dependencia de la presión barométrica

para la saturación por lo cual los descensos en la presión barométrica y de temperatura producen en la mayoría de los casos la saturación del aire y por ende la precipitación del agua.

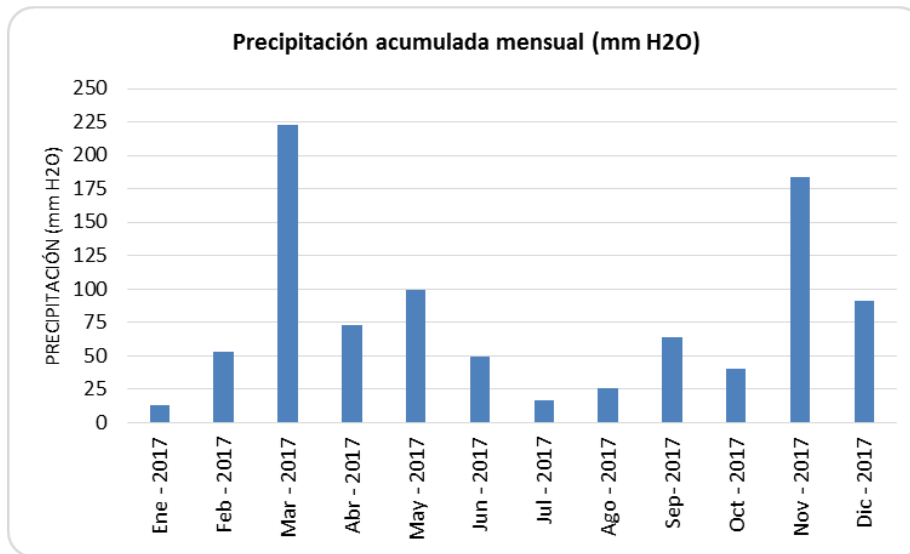


Figura 13. Precipitación acumulada mensual

La Figura 14 presenta la precipitación acumulada horaria. En esta gráfica se observa que las menores precipitaciones se presentan a la madrugada y en las horas de la mañana, mientras que, en horas de la tarde y la noche, se presentan los mayores valores de precipitación.

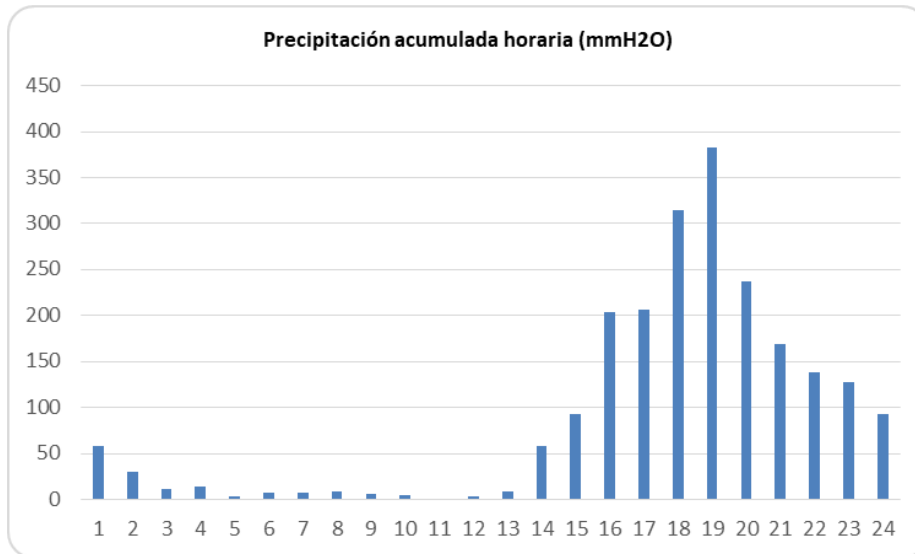


Figura 14. Precipitación acumulada horaria

La Tabla 7 muestra una escala para dimensionar los niveles de precipitación mensuales registrados.

Tabla 7.

Escala de precipitación

Denominación	Precipitación Mensual (mm)
Escasa	0 – 20
Ligera	21 – 40
Moderada	41 – 80
Fuerte	81 – 200
Muy Fuerte	201 – 280
Intensa	>281

Fuente: Secretaria Distrital de Ambiente, Dirección de Control Ambiental, Red de monitoreo de Calidad del aire de Bogotá D.C. Informe anual consolidado sobre niveles de concentración de contaminantes, 2008.

5.6 Altura de mezcla

Se puede definir la altura de mezcla como la elevación sobre la superficie hasta la cual se considera que ocurre un mezclado vertical vigoroso de los gases en la atmósfera.

De una manera más amplia se ha definido la altura de mezcla como la capa adyacente a la tierra sobre la cual los contaminantes o cualquier constituyente emitido dentro de esta capa o que ha entrado a ella es dispersado verticalmente por convección o turbulencia mecánica dentro de una escala de tiempo de una hora.

En la Figura 15 se presenta la altura de mezcla horaria. Como puede observarse en las últimas horas de la tarde y en la noche (10:00 p.m.) se alcanzan las mayores alturas de mezcla y en las horas de la madrugada se presenta la mayor estabilidad atmosférica (valores más bajos del parámetro).

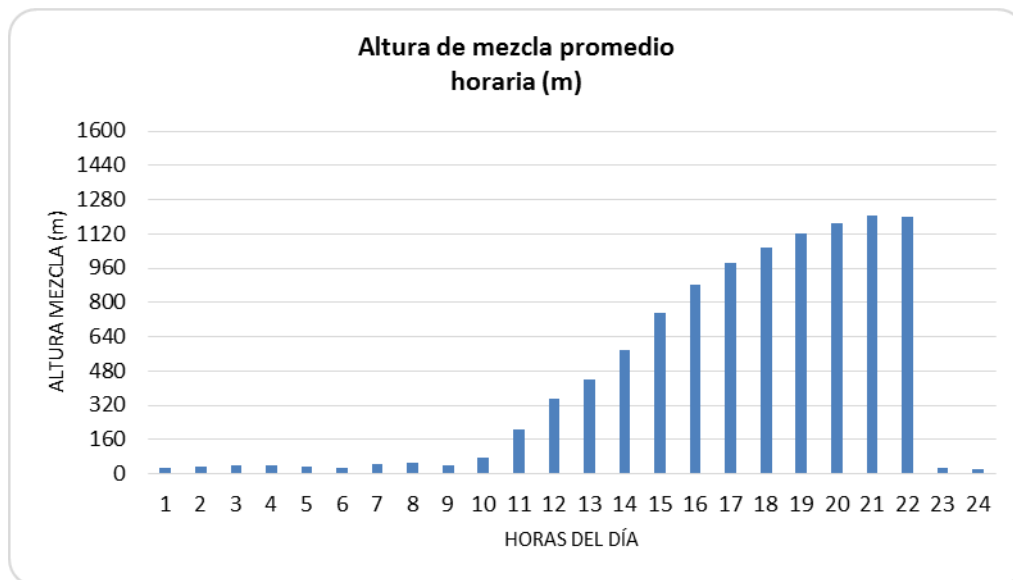


Figura 15. Altura de mezcla horaria

Puede identificarse que durante las horas que se presentan mayores temperaturas y mayores velocidades de los vientos se predicen mayores valores de la altura de capa de mezcla lo cual indica que durante dicho periodo la atmosfera se comporta de una forma turbulenta.

6. Metodología

A continuación, se presenta la estimación de emisiones que tendrían lugar para el tráfico de vehículos por el funcionamiento normal dentro del campus de la Universidad Industrial de Santander. Adicionalmente en esta sección se expone la metodología utilizada para la idealización de fuentes y definición de parámetros (datos de entrada) del modelo de dispersión de contaminantes AERMOD.

6.1 Inventario de emisiones

Para realizar la estimación de emisiones originadas por el tráfico de vehículos al interior del campus universitario se hace necesario consolidar un inventario de emisiones en el que se discriminen el número de camiones, automóviles y motos que hacen uso de éstas vías. En la tabla 8 se presenta el trafico promedio diario (TPD).

Tabla 8.

Número de vehículos que entran a la universidad

Vehículo	Número de entradas	Descripción
Camiones	7	Transporte de alimentos a bienestar universitario, cafetería, adicional el bus que transporta de los parqueaderos del estadio Alfonso López a la UIS.
Automóviles	2,500	Comunidad universitaria en general.

Tabla 8. *Continuación*

Vehículo	Número de entradas	Descripción
Motocicletas	2,300	Comunidad universitaria en general.

Fuente: División de planta física UIS.

6.2 Cálculo de emisiones

Para realizar el cálculo de las emisiones de la actividad considerada se consideró lo dispuesto en el *AP-42 Compilation of Air Pollutant Emission Factors, Volume I: Stationary Point and Area Sources, 11.9 Western Surface Coal Mining*. En el AP-42 se establece la ecuación general que determinará el factor de emisión.

Un factor de emisión es un valor representativo que intenta relacionar la cantidad de un contaminante emitido a la atmósfera con una cantidad asociada con el lanzamiento de ese contaminante, así mismo, estos factores se expresan normalmente como el peso del contaminante dividido por una unidad de peso, volumen, distancia, o la duración de la actividad de emisión de contaminante. Estos factores facilitan la estimación de las emisiones de las diversas fuentes de contaminación al aire presentes, para este caso tráfico de vehículos.

La ecuación general para la estimación de las emisiones es:

$$E = A * EF * \left(1 - \frac{ER}{100}\right)$$

Ecuación 1

Fuente: AP 42

Dónde:

E= emisión, A= tasa de actividad, EF= factor de emisión y ER= % de eficiencia de reducción global de emisiones.

De forma complementaria se usaron los siguientes documentos del AP-42 y NPI:

- Capítulo 13 Sección 13.2.1 *Paved Roads*
- Software Mobile 6.2: Emisiones de tubo de escapa de vehiculos en ruta

6.2.1 Factores de emisión. El factor de emisión que se utilizó para el cálculo de emisiones de material particulado PM₁₀ por tráfico de vehículos en vías pavimentadas se relaciona en la Tabla 9.

Tabla 9.

Factor de emisión por vías pavimentadas

Operación	Actividad	Factor de Emisión	Unidades
Transporte de Autos, buses, camiones y motos	Transporte en vías pavimentadas	$k'(sL)^{0.91}(W)^{1.02}\left(1 - \frac{P}{4N}\right)^*$	kg PM ₁₀ /VKT
	Tubo de escape equipos en vías	Software Mobile 6.2	g/Vehículo-milla

Fuente: AP-42. Compilation of Air Pollutant Emission Factors.

Dónde:

C: Factor de emisión en flota vehicular para: escape, uso de frenos y desgaste de neumáticos (lb/VMT).

p: Número de días en el año con mínimo 0.254 mm de lluvia (días).

sL: Carga de finos (pasa malla 200) del material manejado o de la superficie de las vías. (g/m²).

W: Peso promedio de los vehículos (toneladas cortas).

PM₁₀: Material Particulado con diámetro aerodinámico inferior a 10 µm.

VKT: Kilómetros viajados por un vehículo (km).

*: Se utiliza un factor multiplicador de 2.8185×10^{-1} para convertir de lb/VMT a kg/VKT

** : Se utiliza un factor multiplicador de 1.1219×10^{-4} para convertir de lb/Acre a kg/m²

6.2.2 Variables para el cálculo de las emisiones. La Tabla 10 integra información relevante utilizada para la estimación de emisiones de material particulado (PM₁₀):

Tabla 10.

Parámetros para el cálculo de las emisiones.

Parámetro	Unidades	Valor
*Carga de limos del suelo (Vías)	g/m ²	0.6
Velocidad promedio del viento	m/s	1.9
**Número de días en el año con mínimo 0.254 mm de lluvia (días)	Días	104

**Días de precipitación > 0.254 mm, información tomada de la meteorología WRF.

Fuente: *Tomado de: AP-42, Capítulo 13 Sección 13.2.1 Paved Roads.

En la Tabla 11 y Tabla 12 se presenta el peso promedio del vehículo y la longitud de la vía, los cuales son variables usadas para el cálculo de las emisiones.

Tabla 11.

Características de la flota vehicular.

Tipo de vehículo	Peso Promedio (short ton)	Velocidad promedio (km/h)
Camiones	7.5	25
Autos	1.7	25
Motos	0.2	25

Tabla 12.

Longitudes de los tramos de las vías

Tipo de vehículo	Longitud Km
Via_1	2.6
Via_E30	0.1
Via_E25	0.2

6.3 Resultados del cálculo de las emisiones

Las emisiones de los contaminantes de interés monóxido de carbono CO y material particulado PM₁₀ relacionadas en la Tabla 13 fueron determinadas a partir del tráfico promedio diario el cual se presentó anteriormente en la Tabla 8. Se puede apreciar que las emisiones del tramo Vía_1 son mayores, de igual manera el contaminante con las emisiones mayores es monóxido de carbono (ver Figura 16).

Tabla 13.

Emisiones estimadas CO y PM₁₀

Tramo	Emisiones Estimadas (Flota vehicular)	
	[Kg/año]	
	PM ₁₀	CO
Via_1	875.2	3066.6
Via_E30	2.2	114.7
Via_E25	7.1	366.0

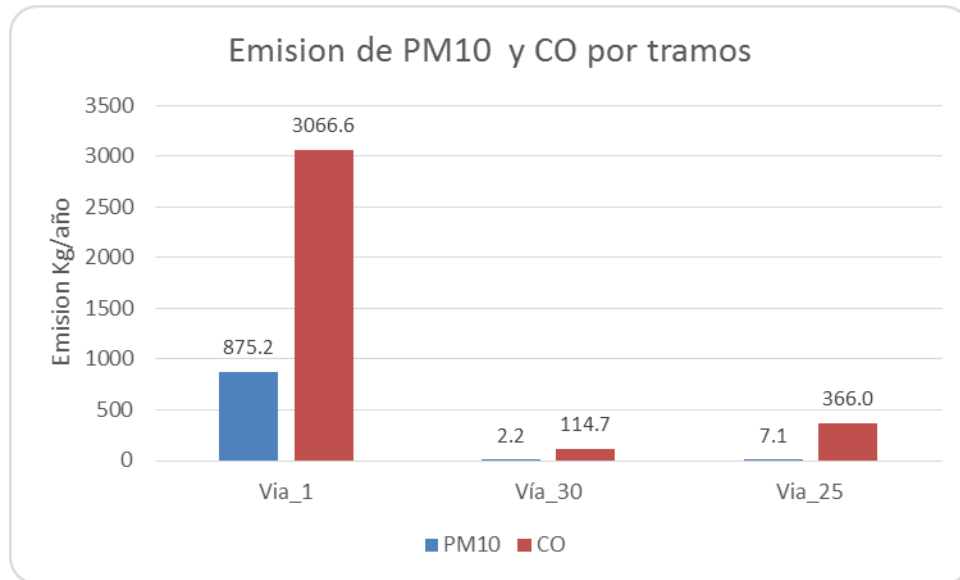


Figura 16. Emisiones PM₁₀ y CO por tramos

7. Modelación de dispersión de contaminantes en la atmosfera

Con el fin de estimar el comportamiento de las emisiones generadas se aplicó el modelo AERMOD de tipo gaussiano, idealizando las fuentes de emisión según la topografía y coordenadas Magna Sirga Bogotá de cada fuente.

7.1 Idealización de las fuentes

Se idealizaron las fuentes de emisión por tráfico de vehículos como fuentes de volumen, los datos básicos de las fuentes deben incluir como mínimo:

- Localización de la fuente a través de sus coordenadas Magna Colombia Bogotá X (Este), Y (Norte)
- Alturas sobre el nivel del mar de la base de la fuente
- Altura de la fuente sobre el nivel del terreno

Las siguientes figuras y tablas muestran la idealización de las fuentes en modelación AERMOD y el resumen con la codificación específica.

Tabla 14.

Resumen Fuentes de volumen.

Index	ID	Description	X coordinate m	Y coordinate m	Elevation meters	Emission rate g/s	Release height meters	Init. lat. dim. meters	Init. vert. dim. meters
1	YDONA07Z	Via_1	1105858.9	1281355.1	1009.17	0.000286153	2	10.23256	1.860465
2	YDONA080	Via_1	1105859.1	1281377.1	1008.1	0.000286153	2	10.23256	1.860465
3	YDONA081	Via_1	1105860	1281399.1	1007.49	0.000286153	2	10.23256	1.860465
4	YDONA082	Via_1	1105860.4	1281421	1007.94	0.000286153	2	10.23256	1.860465
5	YDONA083	Via_1	1105859.5	1281443	1008.64	0.000286153	2	10.23256	1.860465
6	YDONA084	Via_1	1105859.6	1281465	1008.39	0.000286153	2	10.23256	1.860465
7	YDONA085	Via_1	1105859.7	1281487	1007.22	0.000286153	2	10.23256	1.860465
8	YDONA086	Via_1	1105860.5	1281508.9	1006.23	0.000286153	2	10.23256	1.860465
9	YDONA087	Via_1	1105861.5	1281530.9	1005.51	0.000286153	2	10.23256	1.860465
10	YDONA088	Via_1	1105861.8	1281552.9	1004.81	0.000286153	2	10.23256	1.860465
11	YDONA089	Via_1	1105861.2	1281574.9	1004.08	0.000286153	2	10.23256	1.860465
12	YDONA08C	Via_1	1105849	1281445.8	1008.73	0.000286153	2	10.23256	1.860465
13	YDONA08D	Via_1	1105828.2	1281449.8	1008.37	0.000286153	2	10.23256	1.860465
14	YDONA08E	Via_1	1105816.6	1281432.4	1008.67	0.000286153	2	10.23256	1.860465
15	YDONA08F	Via_1	1105815.3	1281410.6	1008.06	0.000286153	2	10.23256	1.860465
16	YDONA08G	Via_1	1105816.8	1281388.7	1007	0.000286153	2	10.23256	1.860465
17	YDONA08H	Via_1	1105818.7	1281367.1	1007	0.000286153	2	10.23256	1.860465
18	YDONA08I	Via_1	1105835	1281358.1	1008.01	0.000286153	2	10.23256	1.860465
19	YDONA08J	Via_1	1105844.9	1281374.9	1007.55	0.000286153	2	10.23256	1.860465
20	YDONA08K	Via_1	1105845.6	1281396.8	1007.11	0.000286153	2	10.23256	1.860465
21	YDONA08L	Via_1	1105846	1281418.8	1007.91	0.000286153	2	10.23256	1.860465
22	YDONA08O	Via_1	1105716.9	1281601	1002.02	0.000286153	2	10.23256	1.860465
23	YDONA08P	Via_1	1105694.9	1281601.5	999.8	0.000286153	2	10.23256	1.860465
24	YDONA08Q	Via_1	1105673.1	1281604	997.43	0.000286153	2	10.23256	1.860465
25	YDONA08R	Via_1	1105651.1	1281605.6	996.23	0.000286153	2	10.23256	1.860465
26	YDONA08S	Via_1	1105629.1	1281605.9	996.1	0.000286153	2	10.23256	1.860465
27	YDONA08T	Via_1	1105607.1	1281606.2	996.76	0.000286153	2	10.23256	1.860465
28	YDONA08U	Via_1	1105585.2	1281607.5	996.82	0.000286153	2	10.23256	1.860465
29	YDONA08V	Via_1	1105563.2	1281608.3	996.34	0.000286153	2	10.23256	1.860465
30	YDONA08W	Via_1	1105541.2	1281608.2	995.12	0.000286153	2	10.23256	1.860465
31	YDONA08X	Via_1	1105519.3	1281609.4	992.89	0.000286153	2	10.23256	1.860465
32	YDONA08Y	Via_1	1105497.7	1281613.8	991.97	0.000286153	2	10.23256	1.860465
33	YDONA08Z	Via_1	1105475.8	1281615.1	987.87	0.000286153	2	10.23256	1.860465
34	YDONA090	Via_1	1105453.9	1281617	981.15	0.000286153	2	10.23256	1.860465
35	YDONA0CY	Via_1	1105769.4	1281342.6	1007.51	0.000286153	2	10.23256	1.860465
36	YDONA0CZ	Via_1	1105791.4	1281343.2	1008.44	0.000286153	2	10.23256	1.860465
37	YDONA0D0	Via_1	1105813.4	1281343.8	1008.88	0.000286153	2	10.23256	1.860465
38	YDONA0D1	Via_1	1105835.4	1281344.4	1009.13	0.000286153	2	10.23256	1.860465
39	YDONA0D2	Via_1	1105857.4	1281343.7	1009.73	0.000286153	2	10.23256	1.860465
40	YDONA0D3	Via_1	1105879.4	1281342.8	1010.81	0.000286153	2	10.23256	1.860465
41	YDONA0D4	Via_1	1105901.4	1281342	1013.56	0.000286153	2	10.23256	1.860465
42	YDONA0D5	Via_1	1105923.3	1281341.1	1015.87	0.000286153	2	10.23256	1.860465
43	YDONA0D6	Via_1	1105945.3	1281340.3	1017.57	0.000286153	2	10.23256	1.860465

7.2 Receptores y dominio de modelación

7.2.1 Resolución y definición de dominio. Para la modelación se utilizó dos mallas de receptores, la malla externa se extiende 5.2 km en dirección Este y 4.8 km en dirección Norte, con un espaciado de 200 metros; La malla interna se extiende 1.3 km en dirección Este y 1.0 km en

dirección Norte, con un espaciado de 30 metros, con el fin de cubrir las áreas donde se ubica la universidad. Las coordenadas de origen se encuentran registradas en la Tabla 15.

Tabla 15

Coordenadas de origen malla de receptores

Malla	Coordenada X	Coordenada Y
Externa	1,103,450.8	1,279,358.6
Interna	1,105,148.1	1,281,043.5

Adicional a las mallas se introdujeron receptores discretos en los cuatro (4) puntos en la vecindad de la universidad incluyendo la portería de la carrera treinta y de la carrera 25, lo anterior con el fin de establecer concentraciones de interés arrojadas por la modelación Aermod. Los receptores utilizados en la modelación se presentan en la Tabla 16 (coordenadas Magna Sirga Colombia Bogotá):

Tabla 16

Receptores discretos de modelación

Estación	Coordenadas planas	
	X	Y
Portería 30	1,106,060.87	1,281,334.73
Portería 25	1,105,422.03	1,281,415.37
Cancha Arena	1105932.63	1,281,375.17
Escuela Industrial	1,105,679.26	1,281,608.8

En la Figura 18 se pueden observar las mallas utilizadas y los receptores escogidos para la modelación.

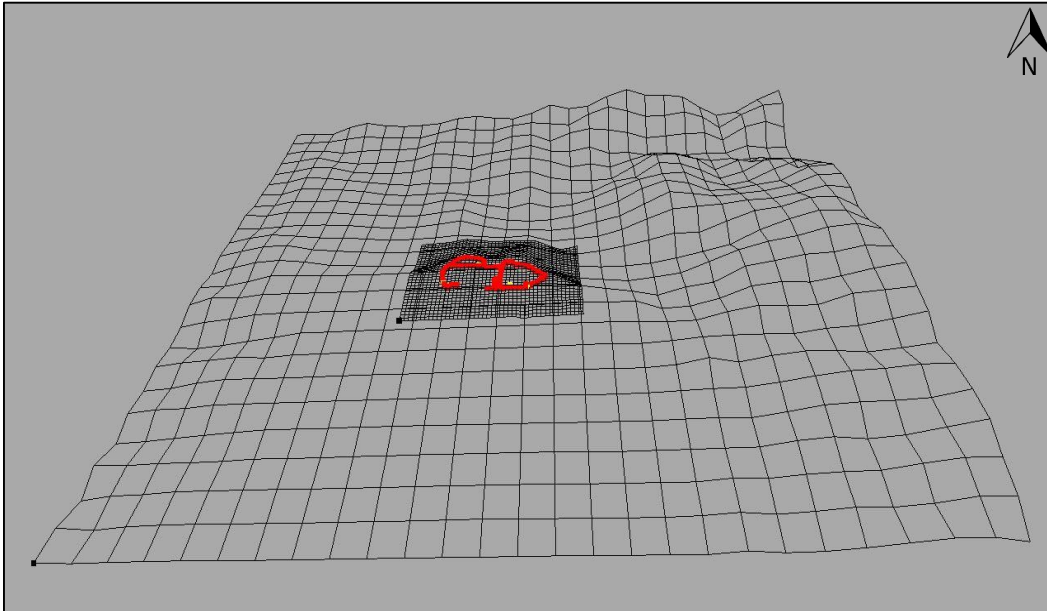


Figura 18. Malla de receptores utilizada en la definición del dominio

Fuente: Elaboración propia, por medio de AERMOD.

7.3 Topografía

En el modelo de dispersión objeto de estudio, se tuvo en cuenta el relieve de la zona que comprende el municipio de Bucaramanga, elevaciones tanto para los receptores como para las fuentes simuladas, reproduciendo de esta manera las condiciones topográficas en el dominio de interés.

Los modelos digitales de elevación fueron construidos a partir de información topográfica obtenida del sensor radar ALOS1 PALSAR cuyos datos se encuentran en el portal de la Universidad de Alaska (Alask satellite facility); estos sensores tienen una resolución temporal

desde el año 2006 hasta el 2011 y cuentan con una capacidad de detalle entre 5 a 12 metros. En la Figura 18 se observa la topografía utilizada en el escenario de estudio.

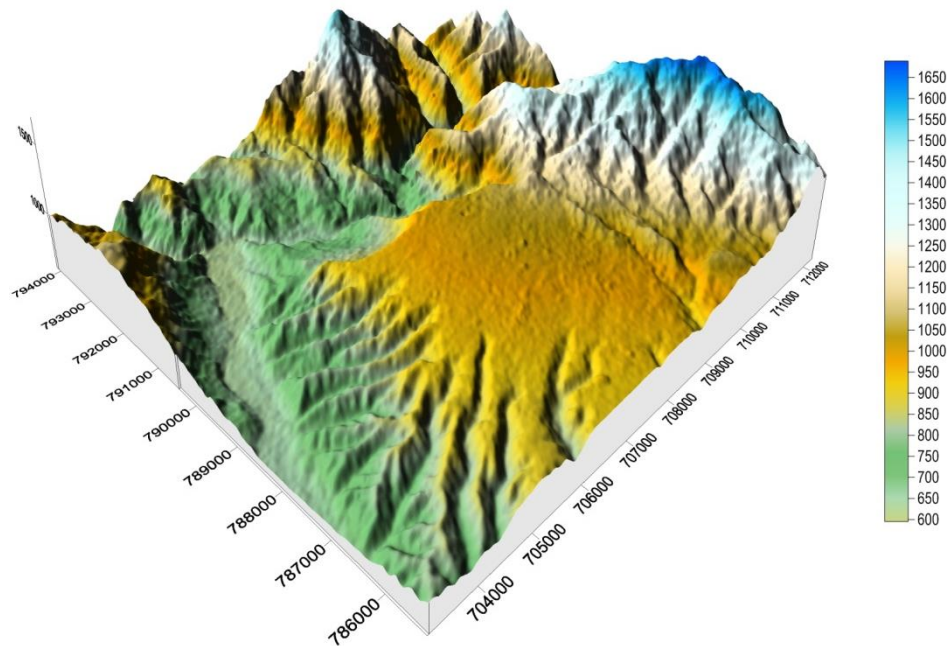


Figura 19. Modelo digital del terreno

Fuente: Elaboración con base en modelo digital PALSAR – 16/03/2011.

8. Resultados discusión y análisis

El modelo AERMOD es un modelo de dispersión atmosférica que se puede utilizar para evaluar la concentración de contaminantes emitidos desde diferentes tipos de fuentes, este modelo simula el transporte y la dispersión atmosférica de contaminantes emitidos desde fuentes de área y volumétricas. AERMOD es un modelo refinado que utiliza datos meteorológicos horarios

procesados secuencialmente con el objetivo de calcular las concentraciones de contaminantes en aire para diferentes escalas temporales de promedio desde una hora hasta un año.

8.1 Archivos de entrada AERMOD

Para la implementación y corrida de Modelación AERMOD se requiere información de entrada que se describe a continuación:

a) Datos de las fuentes: tipo de fuente, ubicación, altura, áreas, volúmenes y elevación del terreno en donde están ubicadas las fuentes, así como la geometría de la fuente.

b) Contaminantes a evaluar: Se seleccionan los contaminantes de interés para el proyecto que corresponden a: Material particulado específicamente PM_{10} y monóxido de carbono (CO).

c) Datos de Modelo digital de elevación: Esta información describe la altimetría de una zona mediante un conjunto de datos acotados.

d) Datos meteorológicos: Se requiere como datos de entrada las características de la superficie, incluyendo el parámetro de rugosidad de la superficie (z_0), la relación de Bowen y el albedo, así como datos horarios de velocidad y dirección del viento, etc. Dos archivos de entrada son producidos para modelación AERMOD, el archivo de superficie (SFC) contiene las variables horarias calculadas. El archivo de los perfiles (PFL) contiene los datos calculados en cada nivel por modelación meteorológica WRF.

e) Datos de los receptores: coordenadas, elevación, altura respecto de la superficie y la escala de la altura de las elevaciones del terreno que son generadas por el procesador de terreno para ingresar a AERMOD.

f) Datos de emisión: Se requiere como dato de entrada las emisiones calculadas en unidades de g/s de cada una de las fuentes idealizadas. Según la geometría de la fuente, el dato de emisión a incluir se determinará en $\text{g/s}\cdot\text{m}^2$ o en unidades que dependerá de la elección de la forma espacial.

8.2 Archivos de salida AERMOD

Los archivos de salida del modelo AERMOD incluye la información de entrada, tablas resúmenes de las concentraciones más altas por receptor y para tiempos específicos promedios, tablas resúmenes de las concentraciones máximas y de los valores concurrentes por receptor para cada hora o día procesado.

El modelo se ejecutó para los siguientes resultados:

- Promedio del período (año): Resultado de promediar los valores de concentración de cada uno de los receptores del escenario para todo el periodo evaluado. Aplica para el contaminante material particulado PM_{10} .
- Promedio de 24 horas: Arroja los datos máximos para cada receptor. Aplica para el contaminante material particulado PM_{10} .
- Promedio de 8 horas: Arroja el dato más elevado para cada receptor, aplicable específicamente para el contaminante monóxido de carbono (CO).
- Promedio de 1 hora: Arroja el dato más elevado para cada receptor, aplicable para los contaminantes: monóxido de carbono (CO).

8.3 Aportes de la modelación de material particulado PM10

En la Tabla 17 se presenta la contribución estimada de las concentraciones de material particulado PM10 en los receptores discretos. En el receptor ubicado en la escuela de Ingeniería Industrial se presentan los mayores aportes que fueron de 3.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el periodo anual y 7.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para 24 horas, el receptor con los menores aportes fue el ubicado en la Portería 30 con aportes de 1.0 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para el periodo anual y 2.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ para 24 horas.

Tabla 17.

Resultados PM₁₀ 24 horas y anual.

Estación	PM ₁₀ ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
	Anual	24 horas*
Portería 30	1.0	2.6
Portería 25	2.4	5.2
Cancha Arena	3.3	5.1
Escuela Industrial	3.8	7.0

**Corresponde al valor máximo de concentración estimado mediante modelación para cada receptor*

La Figura 20 representan los resultados anuales y 24 horas en los receptores discretos. Donde se puede apreciar que el receptor con mayores concentraciones de material particulado es el ubicado en Escuela Industrial, cabe resaltar que los valores arrojados por la simulación para el periodo 24 horas, son valores máximos presentados durante el año de simulación.

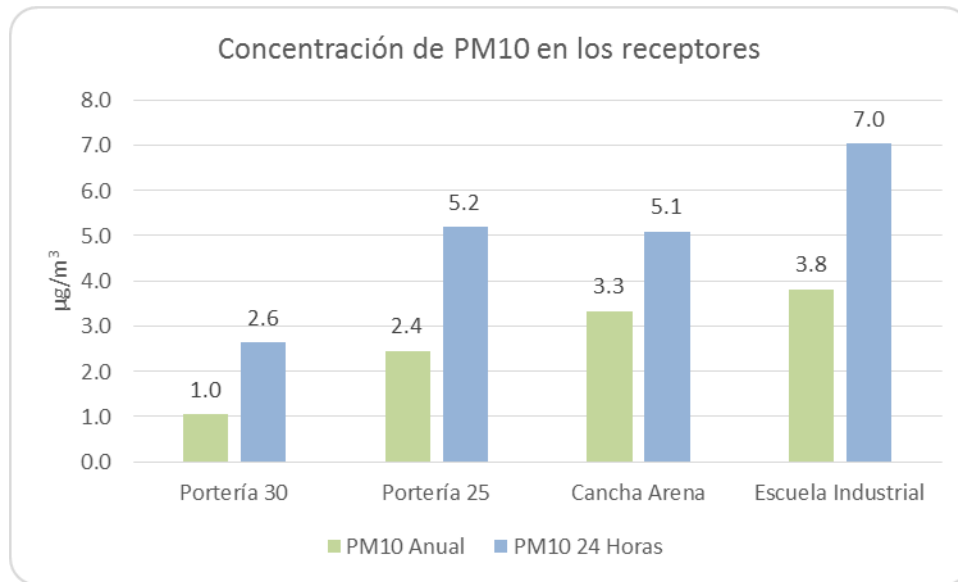


Figura 20. Niveles de concentración PM₁₀.

La Tabla 18 presenta una comparación de los niveles de concentración obtenidos mediante la modelación con los niveles máximos permisibles por la resolución 2254 del 2017, se observa que para el periodo anual los aportes se presentaron entre el 2% y el 8% y para el periodo 24 horas se presentaron aportes entre el 3% al 7%.

Tabla 18.

Comparación de PM₁₀ respecto el valor permitido

Receptor	PM ₁₀		Norma		% Respecto a la norma	
	Anual	24 Horas	Anual	24 horas	Anual	24 Horas
Portería 30	1.0	2.6	50	100	2%	3%
Portería 25	2.4	5.2	50	100	5%	5%
Cancha Arena	3.3	5.1	50	100	7%	5%
Escuela Industrial	3.8	7.0	50	100	8%	7%

La Figura 21 y Figura 22 muestran de manera gráfica la comparación de los niveles arrojados para material particulado PM_{10} con los valores máximos establecidos mediante la resolución 2254 de 2017.

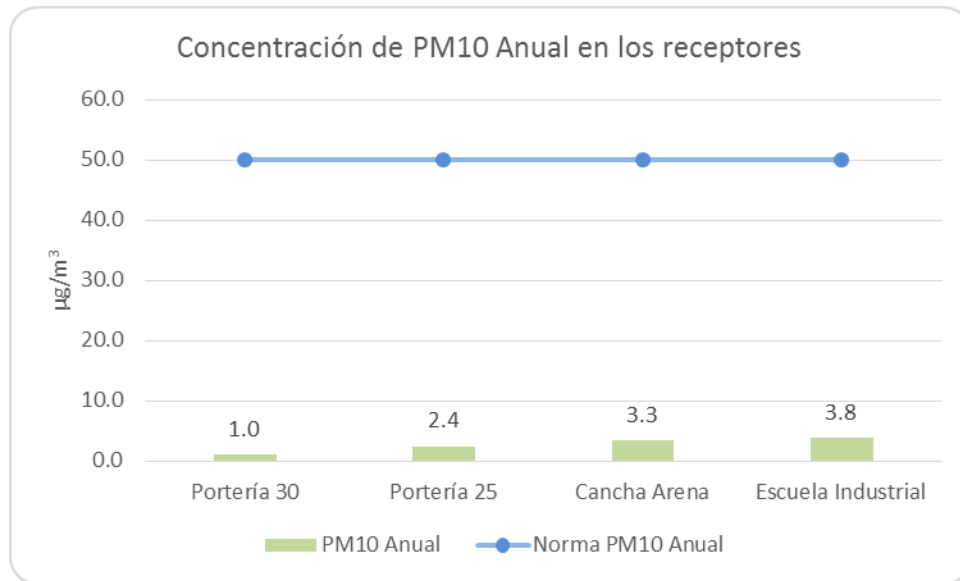


Figura 21. Concentración de PM_{10} vs límite máximo normativo Anual.

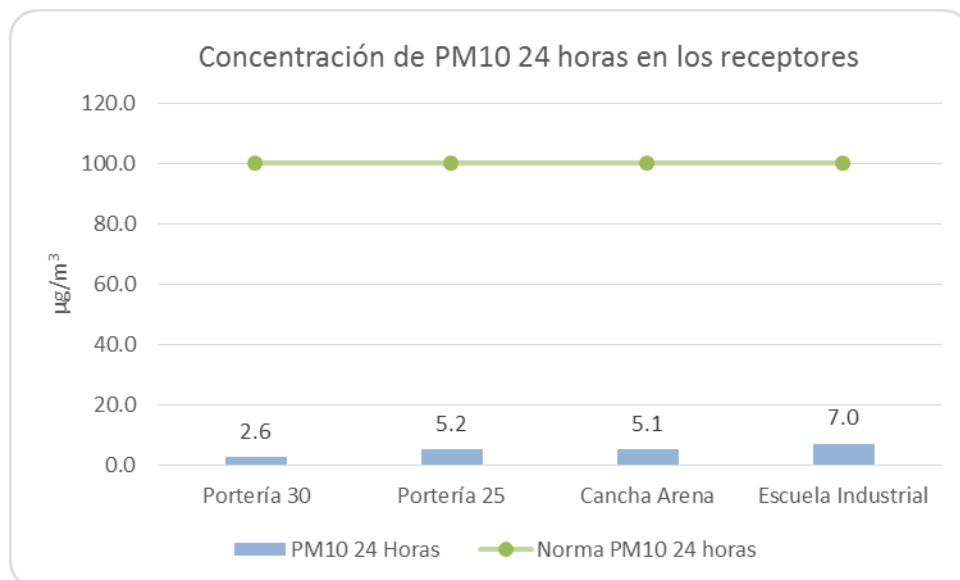


Figura 22. Concentración de PM_{10} vs límite máximo normativo 24 horas

8.4 Aportes de la modelación de monóxido de carbono CO.

La Tabla 19 presenta los resultados máximos arrojados por la modelación para monóxido de carbono (CO) en los periodos 8 horas y 1 hora, estos representan el valor más crítico presentado en el periodo de simulación. El receptor Portería 25 presento los mayores aportes tanto para el periodo 8 horas (145.6 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) como para una hora (239.8 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

Tabla 19.

Resultados de concentración máxima CO 8horas y 1 hora.

Estación	CO ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	
	8 horas*	1 Hora
Portería 30	17.3	49.5
Portería 25	145.6	239.8
Cancha Arena	30.7	54.8
Escuela Industrial	69.6	161.2

En la Figura 23 se presenta de manera gráfica los resultados arrojados por la simulación, donde se observa los mayores niveles en el receptor Portería 25 tanto para el periodo 8 horas como 1 hora.

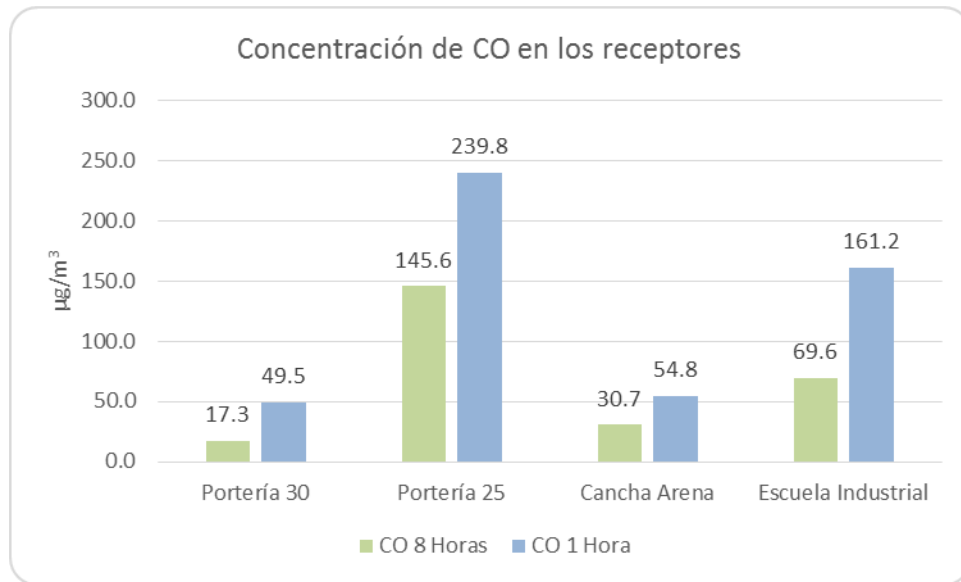


Figura 23. Niveles de concentración de CO.

En la Tabla 20 se hace una comparación entre los resultados de la modelación y los valores máximos permitidos por la resolución 2254 de 2017. Estos aportes no superan el 1% para el periodo 8 horas y el 3% para el periodo 1 hora.

Tabla 20.

Comparación de niveles de concentración respecto el valor permitido.

Receptor	CO		Norma		% Respecto a la norma	
	8 horas	1 hora	Norma CO	Norma CO	8 horas	1 hora
			8 horas	1 hora		
Portería 30	17.3	49.5	5,000	35,000	0%	0%
Portería 25	145.6	239.8	5,000	35,000	3%	1%
Cancha Arena	30.7	54.8	5,000	35,000	1%	0%
Escuela Industrial	69.6	161.2	5,000	35,000	1%	0%

Para tener mayor claridad de la comparación de los aportes respecto los niveles máximos permitidos, la Figura 23 e Figura 24 muestra gráficamente este comparativo, donde se observa que los niveles de concentración arrojados por la modelación comparados con la norma son bajos no supera el 3%.

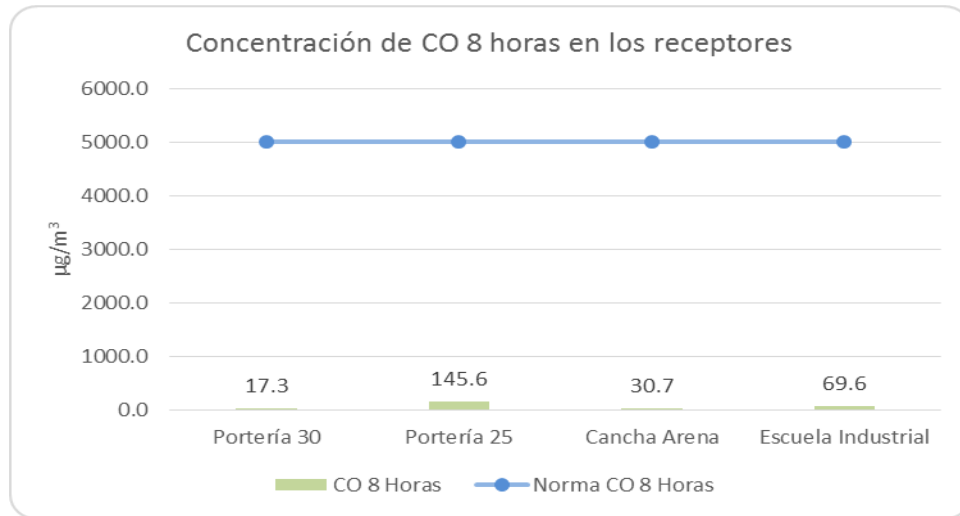


Figura 24. Concentración de CO vs límite máximo normativo 8 horas

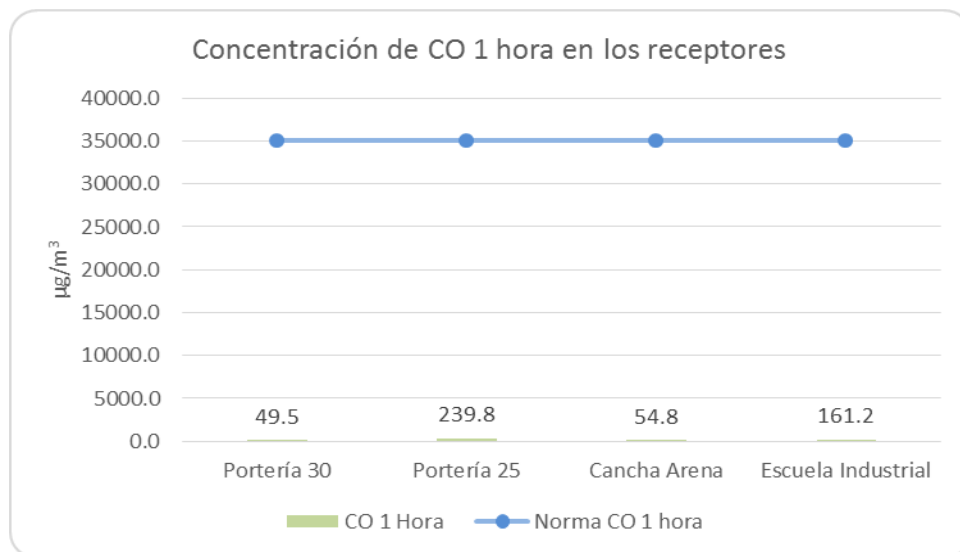


Figura 25. Concentración de CO vs límite máximo normativo 1 hora

8.5 Isopletas de modelación

A continuación, se presenta de manera gráfica la dispersión de los contaminantes material particulado PM_{10} y monóxido de carbono CO. La Figura 26 y Figura 27 muestran el comportamiento para PM_{10} para el periodo anual y 24 horas respectivamente, se observa que la dispersión se presenta hacia la dirección Noroeste (NO) conforme a la dirección del viento analizada en el capítulo de análisis meteorológico.

La dispersión de CO presentada en la Figura 28 y Figura 29 se observa que de igual forma se despliega en dirección Noroeste (NO) abarcando mayor área de dispersión que material particulado, no obstante, las concentraciones presentadas comparadas con la norma son bajas.

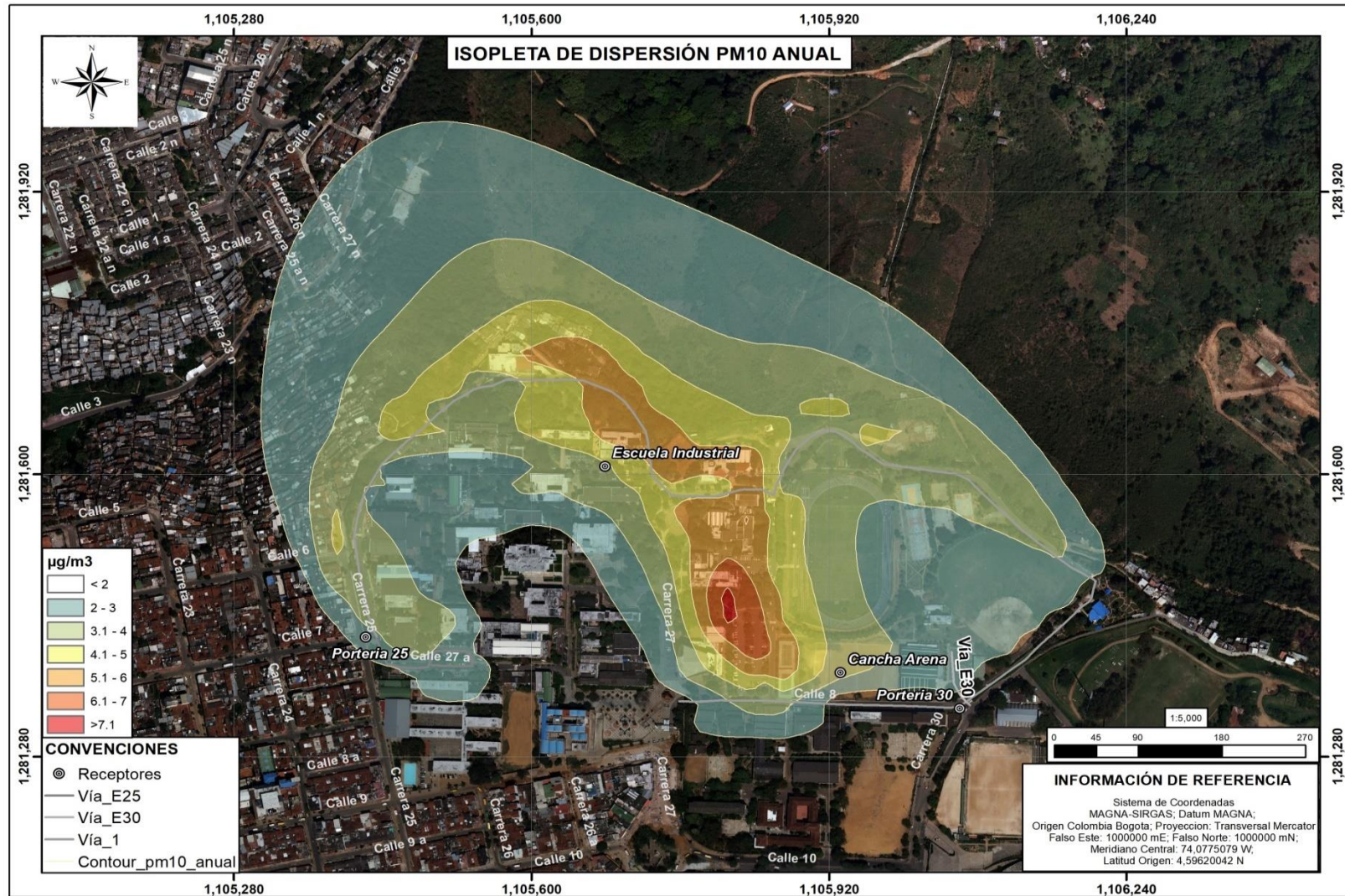


Figura 26. Isopleta anual PM₁₀.

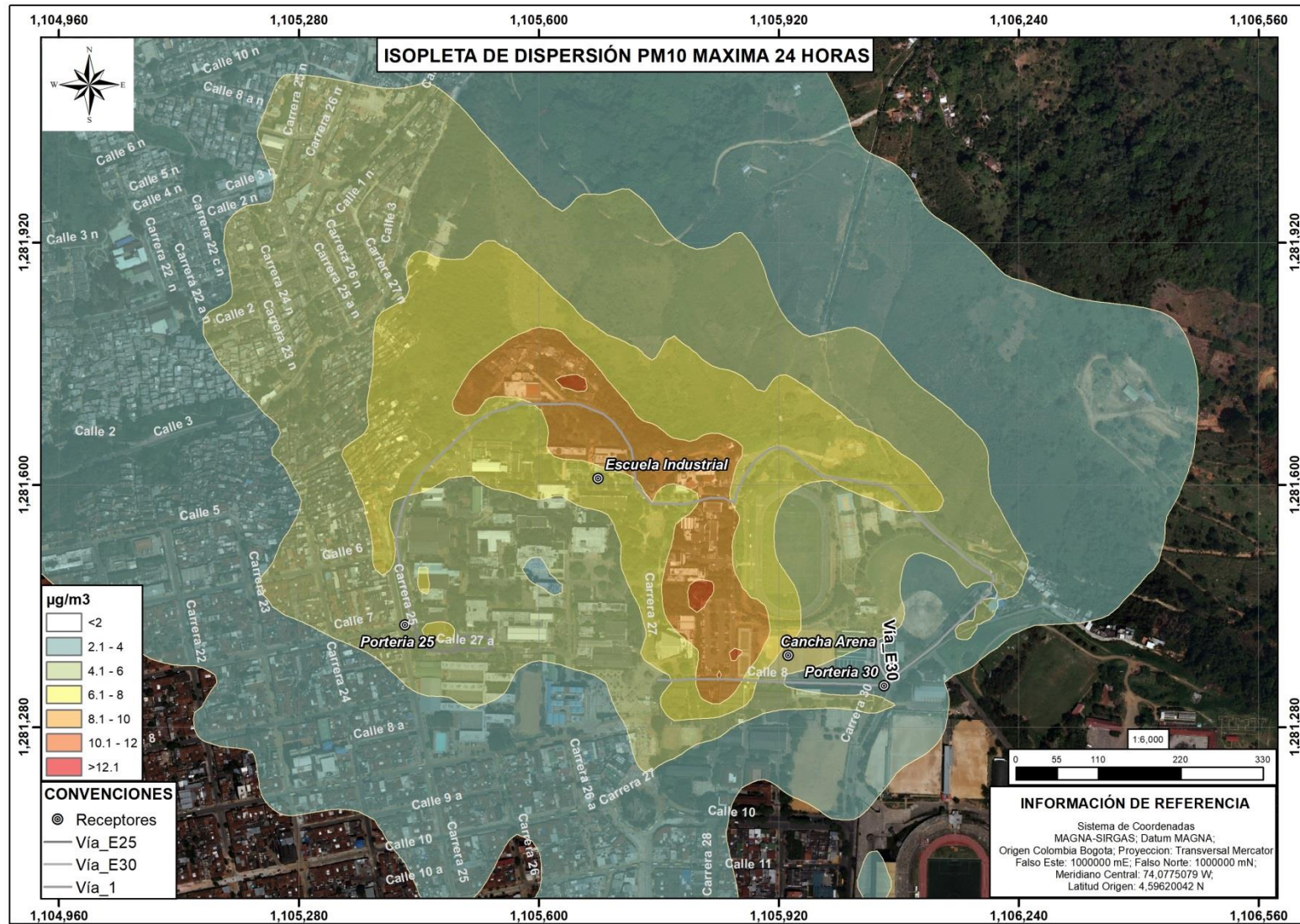


Figura 27. Isopleta Máxima 24 horas PM₁₀.

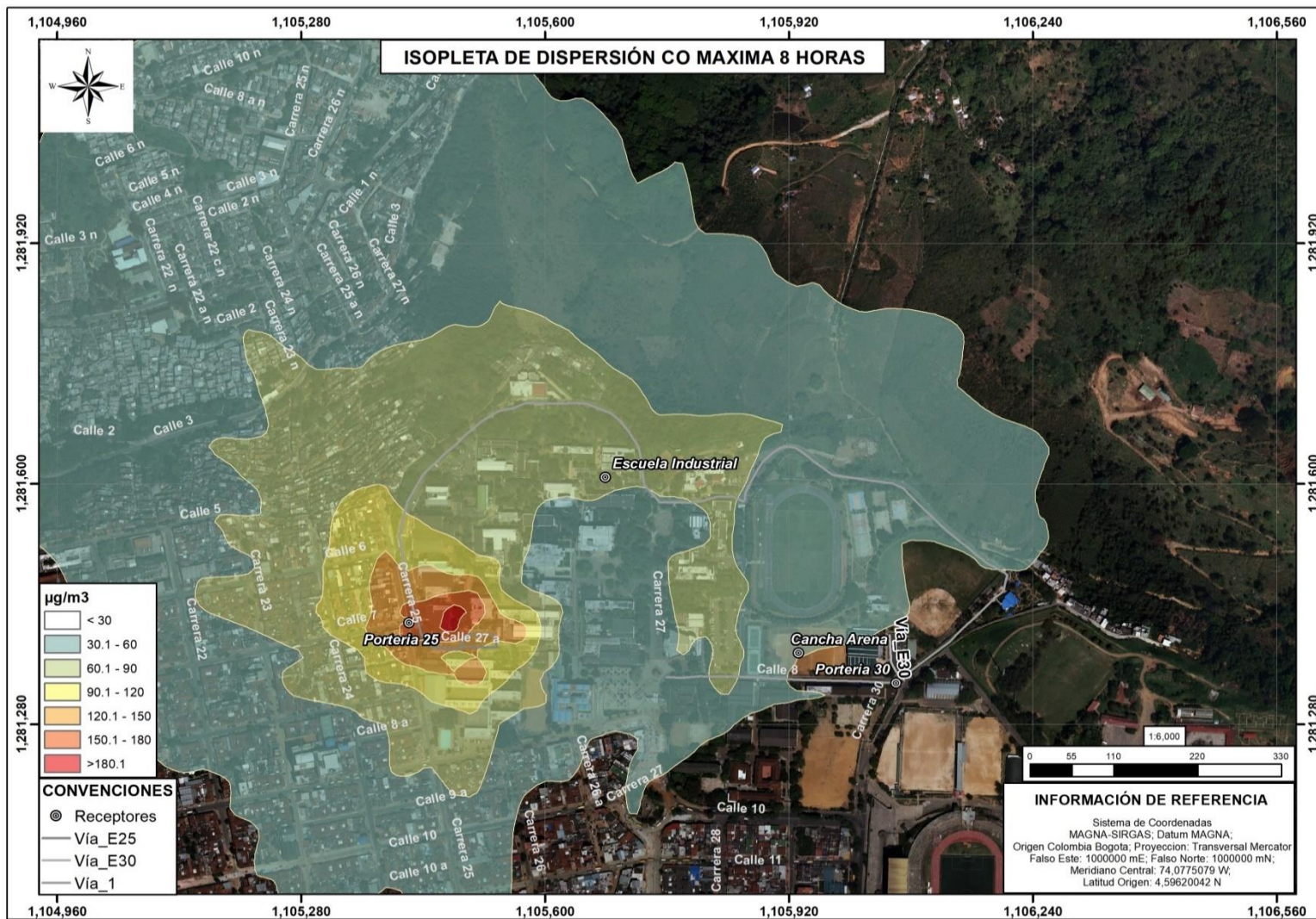


Figura 28. Isopleta máxima 8 horas CO.

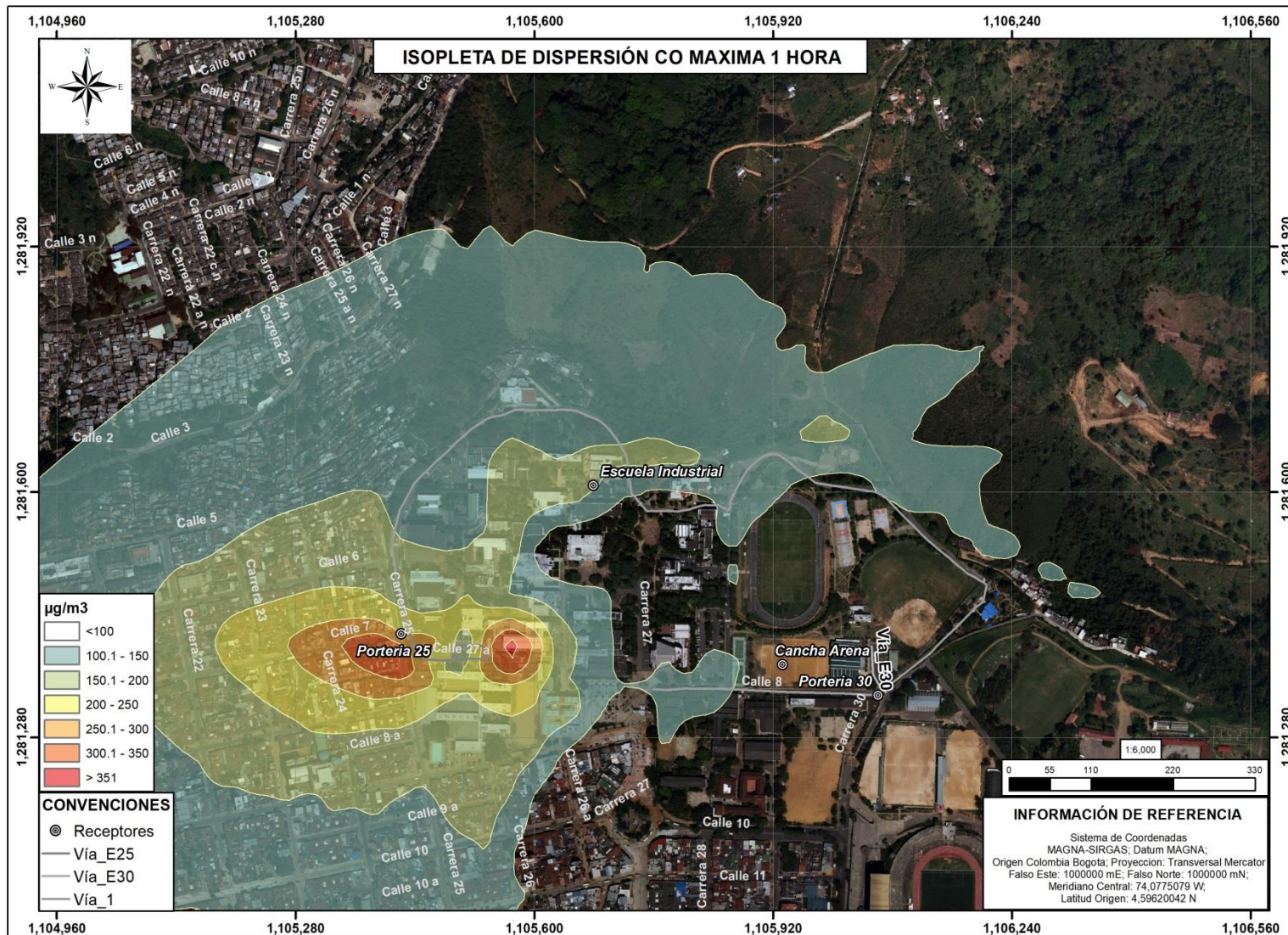


Figura 29. Isopleta Máxima 1 hora CO.

9. Conclusiones y recomendaciones

- Las emisiones calculadas por resuspension de material y por combustión interna (ver Tabla 13), indican que por la Vía_1 se generan las mayores emisiones 875.2 Kg/año de PM₁₀ y 3,066.6 Kg/año de CO, en la Vía_25 y la Vía_30 las emisiones son menores, lo anterior indica que es buena medida de control localizar los parqueaderos de motos en las entradas de la universidad ya que se disminuye el flujo y por ende las emisiones, adicionalmente una moto con combustión incompleta podría contaminar más que un automóvil.
- Los resultados arrojados por la modelación de material particulado PM₁₀ en los receptores evaluados indican que el de mayor aporte tanto para el periodo anual como el máximo 24 horas se presentó en el receptor denominado Escuela Industrial, con concentraciones de 3.8 µg/m³ y 7.0 µg/m³, el menor aporte se presentó en el receptor denominado Portería 30 con concentraciones de 1.0 µg/m³ periodo anual y 2.6 µg/m³ periodo 24 horas.
- Los resultados de monóxido de carbono de acuerdo a la modelación en los receptores evaluados indican que el de mayor aporte tanto para el periodo máximo 8 horas como el máximo 1 hora se presentó en el receptor denominado Portería 25, con concentraciones de 145.6 µg/m³ y 239.8 µg/m³, el menor aporte se presentó en el receptor denominado Portería 30 con concentraciones de 17.3 µg/m³ periodo 8 horas y 49.5 µg/m³ periodo 1 hora.
- Comparando los resultados de material particulado PM₁₀ respecto los niveles máximos permitidos por la resolución 2254 de 2017, para el periodo anual se dieron entre el 2% y el 8%, para el periodo máximo 24 horas se presentaron entre el 3% y el 7%.

- Comparando los resultados de monóxido de carbono CO respecto los niveles máximos permitidos por la resolución 2254 de 2017, para el periodo máximo 8 horas se dieron entre el 1% y el 3%, para el periodo máximo 1 hora no superaron el 1%.
- La dispersión de los contaminantes se presentó en dirección Norte Noroeste (NNO) para material particulado PM_{10} Noroeste y (NO) para monóxido de carbono, los niveles de las isopletas de material particulado se encontraron entre $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $7 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el periodo anual y entre $2 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $12 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el periodo máximo 24 horas, para monóxido de carbono se presentaron niveles entre $30 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $180 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el periodo máximo 8 horas y entre $100 \mu\text{g}/\text{m}^3$ y $350 \mu\text{g}/\text{m}^3$ para el periodo máximo 1 hora.
- Para tener menor incertidumbre en el estudio se recomienda realizar un aforo vehicular más detallado por cada una de las vías de la universidad estableciendo año de fabricación del vehículo, cilindraje y número de paradas en frío y caliente, otro factor que influye es la calidad del combustible entre otros.
- Se recomienda realizar mediciones con estaciones de monitoreo de calidad del aire para poder contrastar los resultados con los obtenidos mediante la modelación y poder realizar la calibración correspondiente del estudio.

Referencias bibliográficas

- Briggs, G.A. (1974). Diffusion Estimation for Small Emissions. In ERL, ARL USAEC Report ATDL-106. U.S. Atomic Energy Commission, Oak Ridge, Tennessee.
- Compilation Pollutant Emission Factors. (2010). AP-42, Fifth Edition, Volume I: Stationary Point and Area Sources, United States Environmental Protection Agency – U.S. EPA.
- Environment Australia. (1998). Best Practice Environmental Management in Mining. ISBN 0 642 54570 7.
- Horst, T.W. (1983). A correction to the Gaussian source depletion model. In Precipitation Scavenging, Dry Deposition and Resuspension, H.R. Pruppacher, R.G. Semonin, W.G.N. Slinn, eds., Elsevier, NY.
- K-2 Ingeniería S.A.S., (2001). Modelación de la dispersión de Contaminantes atmosféricos Manual de Control de la Calidad del Aire. E. Roberts Alley Associates, Inc. Mc Graw Hill.
- Instituto Tecnológico Geominero de España. (1989). Manual de restauración de terrenos y evaluación de impactos ambientales en minería. 2a.Ed. España.
- Pasquill, F. (1976). Atmospheric Dispersion Parameters in Gaussian Plume Modeling. Part II. Possible Requirements for Change in the Turner Workbook Values. EPA-600/4-76-030b, U.S. Environmental Protection Agency, Research Triangle Park, North Carolina 27711
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2006). Resolución 601.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2010). Resolución 610.
- Support Center for Regulatory Atmospheric Modeling – SCRAM. United States Environmental Protection Agency – U.S. EPA. Disponible en: <http://www.epa.gov/scram001/>.