

Maestría en Ingeniería Civil

Modelación de fuentes de emisión en AERMOD con información meteorológica de Bogotá.

Gustavo Adolfo Burbano Sefair

Bogotá, D.C., 30 de enero de 2018

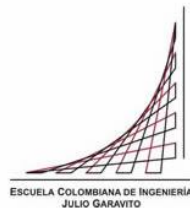


Modelación de fuentes de emisión en AERMOD con información meteorológica de Bogotá.

Tesis para optar al título de magíster en Ingeniería Civil, con énfasis en ingeniería ambiental

Henry Torres Posada
Director

Bogotá, D.C., 30 de enero de 2018



La tesis de maestría titulada “Modelación de fuentes de emisión en AERMOD con información meteorológica de Bogotá”, presentada por Gustavo Adolfo Burbano Sefair, cumple con los requisitos establecidos para optar al título de Magíster en Ingeniería Civil con énfasis en Saneamiento Ambiental.

Director de la tesis

Henry Torres Posada

Jurado

Héctor Matamoros Rodríguez

Jurado

Héctor Alfonso Rodríguez Díaz

Bogotá, D.C., 30 de enero de 2018

Resumen

Los requerimientos de las autoridades ambientales para la solicitud de permisos de emisiones atmosféricas y los estudios de impacto ambiental conllevan a la ejecución, en la mayoría de los casos, de modelaciones de emisiones atmosféricas para conocer los impactos en la calidad del aire por la ejecución de un proyecto u actividad. Parte fundamental para la ejecución de dichas modelaciones se centra en la información meteorológica a utilizar, y en el nivel de detalle necesario para conocer exposiciones anuales, 24 horas o menores. En ese orden de ideas, es necesario utilizar información de temperatura, humedad relativa, nubosidad, precipitación, presión atmosférica, velocidad y dirección del viento de manera horaria. Según objetivos misionales, el IDEAM presta servicios especializados en meteorología aeronáutica y registra datos hidrometeorológicos. De otra parte, es necesario resaltar que en sus funciones está "...obtener, almacenar, analizar, estudiar y divulgar información meteorológica básica sobre hidrología, hidrogeología, meteorología, geografía básica..." entre otros, según el manual corporativo (IDEAM, 2015, pág. 7 y 8). De esta manera las variables climáticas mencionadas registran datos únicamente a las 7, 13 y 19 horas, información que es insuficiente para modelos de dispersión de contaminantes refinados como AERMOD. Así mismo, la cobertura de las estaciones con valores horarios está muy limitada, razón por la cual es necesario utilizar información proveniente de modelos de pronóstico de clima para poder obtener los 8760 datos anuales requeridos para cada una de las variables climáticas necesarias para correr el modelo de emisiones.

Por lo anterior, las fuentes de datos utilizadas para correr los modelos la mayoría de las veces no corresponde a la información disponible en las estaciones meteorológicas colombianas, razón por la cual, con este proyecto se efectuó la construcción de los archivos meteorológicos para una modelación hipotética de PM10, a partir de la interpolación de los datos obtenidos de la estación el Dorado (IDEAM) y la información horaria de vientos de la estación las Ferias (SDA) con el fin de comparar los resultados obtenidos frente a una modelación realizada con información meteorológica obtenida de un modelo de pronóstico de Clima, en este caso el modelo WRF (versión 3.9).

De la comparación realizada, se pudo concluir que los resultados obtenidos con AERMOD en cada una de las fuentes de datos meteorológicas mencionada, generó grandes diferencias en las concentraciones máximas 24 horas, y valores muy similares para los resultados obtenidos para la exposición anual.

Índice General

Resumen.....	4
Introducción	11
Capítulo 1. Marco teórico	13
1.1 Sistema de modelación AERMOD	13
1.1.1 AERMAP.....	13
1.1.2 AERMET	13
1.1.3 AERMOD	15
1.2 Variables meteorológicas para la modelación de la calidad del aire	18
1.2.1 Información meteorológica superficial	18
1.2.2 Información meteorológica de perfil	20
1.3 Clasificación de las estaciones meteorológicas de Colombia – IDEAM	22
1.3.1 Agrometeorológica (AM)	22
1.3.2 Estación Climatológica ordinaria (CO).....	22
1.3.3 Estación climatológica Principal (CP)	22
1.3.4 Estación de radiosonda (RS)	22
1.3.5 Sinóptica principal	22
1.3.6 Sinóptica suplementaria (SS).....	23
1.3.7 Meteorológica marina (MM)	23
1.4 Modelos de pronóstico de clima	23
Capítulo 2. Metodología	25
Capítulo 3. Análisis de las fuentes de información meteorológica en Colombia – Estaciones del IDEAM.....	26
3.1 Cobertura de las estaciones hidrometeorológicas a nivel nacional.....	26
3.2 Cobertura geográfica de las estaciones.....	28
Capítulo 4. Construcción de los archivos meteorológicos de entrada para su uso en AERMOD	31
4.1 Información superficial.....	31
4.2 Información de perfil	32
4.3 Procesamiento de datos en AERMET.....	32
4.3.1 Precipitación	33
4.3.2 Temperatura	33
4.3.3 Humedad relativa	34
4.3.4 Presión atmosférica.....	34
4.3.5 Nubosidad.....	34

4.3.6	Flujo de calor sensible.....	35
4.3.7	Velocidad y dirección del viento.....	36
4.3.8	Estabilidad atmosférica	38
4.3.9	Altura de mezcla.....	40
Capítulo 5. Modelación de calidad de aire en la ciudad de Bogotá con fuentes de emisión hipotéticas.....		43
5.1	Descripción de las fuentes modeladas.....	43
5.2	Localización de las fuentes de emisión.....	44
5.3	Análisis de variación de resultados a diferente espaciamiento de grilla	45
5.4	Comparación de los resultados del modelo de dispersión de PM10 con información meteorológica construida y obtenida de WRF	49
5.4.1	Resultados obtenidos en el perfil E-W.....	49
5.4.2	Resultados obtenidos en receptores discretos.....	51
5.4.3	Resultados obtenidos en las isopletras o pluma de dispersión.....	53
5.5	Comparación de los resultados diarios del modelo en los Receptores discretos	63
5.6	Análisis de resultados.....	66
Conclusiones		67
Bibliografía:.....		68

Índice de tablas

Tabla 1 Constantes en función de la estabilidad para calcular σ_y	16
Tabla 2 Constantes en función de la estabilidad para calcular σ_z	17
Tabla 3 Composición encabezado del archivo formato SAMSON.....	18
Tabla 4 Composición estructura del archivo SAMSON.....	19
Tabla 5 Composición primera parte archivo TD-6201.....	20
Tabla 6 Composición segunda parte archivo TD-6201.....	21
Tabla 7 Tipo de instrumental por categoría de estación.....	23
Tabla 8 Número de estaciones IDEAM clasificadas por clase.....	26
Tabla 9 Número de estaciones IDEAM clasificadas por categoría.....	27
Tabla 10 Estaciones hidrometeorológicas por área.....	29
Tabla 11 Comparación de las series de datos de temperatura.....	33
Tabla 12. Comparación de las series de datos de humedad relativa.....	34
Tabla 13 Comparación de las series de datos de Nubosidad.....	35
Tabla 14 Comparación de las series de datos de calor sensible.....	36
Tabla 15 Clasificación de la estabilidad atmosférica de Pasquill.....	39
Tabla 16 Comparación de las series de datos de la altura de la capa límite convectiva ...	40
Tabla 17 Comparación de las series de datos de la altura de la capa límite mecánica.....	41
Tabla 18 Tiempos de simulación para cada una de las grillas seleccionadas.....	45
Tabla 19 Descripción de los resultados obtenidos para cada una de las grillas de modelación.....	46
Tabla 20 Cobertura de los intervalos de concentración generados por las isopleas del modelo con datos Bogotá 24 h.....	57
Tabla 21 Cobertura de los intervalos de concentración generados por las isopleas del modelo con datos WRF 24 h.....	57
Tabla 22 Cobertura de los intervalos de concentración generados por las isopleas del modelo con datos Bogotá - anual.....	62
Tabla 23 Cobertura de los intervalos de concentración generados por las isopleas del modelo con datos WRF - anual.....	62
Tabla 24 Resumen de los resultados diarios de PM10 para cada una de las Fuentes de datos.....	63

Índice de figuras

Figura 1 Muestra del encabezado del archivo SAMSON.....	19
Figura 2 Muestra de la organización de variables meteorológicas en el archivo SAMSON	20
Figura 3 Muestra del archivo TD-6201	21
Figura 4 Estado de operación de las estaciones hidrometeorológicas - IDEAM.....	26
Figura 5 Estaciones en operación según Clase - IDEAM	27
Figura 6 Estaciones en operación según categoría - IDEAM	28
Figura 7 Localización de las fuentes de emisión y las estaciones meteorológicas	31
Figura 8 Valores horarios de temperatura 2015	33
Figura 9 Valores horarios de humedad relativa.....	34
Figura 10 Valores horarios de nubosidad.....	35
Figura 11 Valores horarios de calor sensible	36
Figura 12 Rosa de vientos – Archivo horario superficial	37
Figura 13 Rosa de vientos aeropuerto el Dorado - multianual.....	37
Figura 14 Distribución de frecuencia clases de viento	38
Figura 15 Distribución de velocidad en los rangos establecidos de estabilidad atmosférica	39
Figura 16 Altura de la capa límite convectiva (2015-01-07).....	40
Figura 17 Altura de la capa límite convectiva 2015.....	41
Figura 18 Altura de la capa límite mecánica (2015-01-07)	42
Figura 19 Altura de la capa límite mecánica 2015	42
Figura 20 Características de la Fuente fija de emisión	43
Figura 21 Características de la Fuente lineal de área.....	43
Figura 22 Características de la Fuente de área	44
Figura 23 Localización de las fuentes de emisión	44
Figura 24 Representación del perfil para la obtención de concentraciones de PM10	46
Figura 25 Comportamiento de las concentraciones de PM10 24 h a diferente espaciamento de grilla	47
Figura 26 Comportamiento de las concentraciones de PM10 Anual a diferentes espaciamentos de grilla.....	47
Figura 27 Concentración máxima obtenida en el perfil de cada grilla de modelación valores 24 h de PM10	48
Figura 28 Concentración máxima obtenida en el perfil de cada grilla de modelación valores anuales de PM10.....	49
Figura 29 Comparación del comportamiento de las concentraciones de PM10 24 h entre las dos fuentes de estudio	50
Figura 30 Comparación del comportamiento de las concentraciones de PM10 anual entre las dos fuentes de estudio.....	51
Figura 31 Comparación de las concentraciones de PM10 24 h para los receptores discretos entre las dos fuentes de estudio	52
Figura 32 Comparación de las concentraciones de PM10 anual para los receptores discretos entre las dos fuentes de estudio.....	52
Figura 33 Pluma de dispersión – PM10 24 horas con datos de estaciones Bogotá	54
Figura 34 Pluma de dispersión – PM10 24 horas con datos de WRF	54

Figura 35 Pluma de dispersión y localización receptores discretos – PM10 24 h con datos de estaciones Bogotá.....	55
Figura 36 Pluma de dispersión y localización receptores discretos – PM10 24 h con datos de WRF.....	55
Figura 37 Perfil de concentraciones en sentido W desde el nivel más alto de concentración datos Bogotá.....	56
Figura 38 Perfil de concentraciones en sentido SW desde el nivel más alto de concentración datos WRF.....	56
Figura 39 Pluma de dispersión – PM10 anual con datos de estaciones Bogotá.....	59
Figura 40 Pluma de dispersión – PM10 anual con datos de WRF.....	59
Figura 41 Pluma de dispersión y localización receptores discretos – PM10 Anual con datos de estaciones Bogotá.....	60
Figura 42 Pluma de dispersión y localización receptores discretos – PM10 Anual con datos WRF.....	60
Figura 43 Perfil de concentraciones en sentido W desde el nivel más alto de concentración datos Bogotá.....	61
Figura 44 Perfil de concentraciones en sentido WNW desde el nivel más alto de concentración datos WRF.....	61
Figura 45 Concentraciones de PM10 - Receptor 1.....	64
Figura 46 Concentraciones de PM10 - Receptor 2.....	64
Figura 47 Concentraciones de PM10 - Receptor 3.....	64
Figura 48 Concentraciones de PM10 - Receptor 4.....	64
Figura 49 Concentraciones de PM10 - Receptor 5.....	65
Figura 50 Concentraciones de PM10 - Receptor 6.....	65
Figura 51 Concentraciones de PM10 - Receptor 7.....	65
Figura 52 Concentraciones de PM10 - Receptor 8.....	65

Índice de anexos

Anexo 1 Archivos meteorológicos generados a partir de las estaciones de Bogotá	69
Anexo 2 Archivo meteorológicos generados con WRF obtenidos en Meteocolombia SAS	70
Anexo 3 Archivos de entrada y salida de las diferentes corridas de AERMOD para el análisis de espaciamiento de grilla.....	71
Anexo 4 Archivos de entrada y salida del modelo con los datos meteorológicos de Bogotá	72
Anexo 5 Archivos de entrada y salida del modelo con los datos meteorológicos de WRF	73

Introducción

Una de las áreas de interés de la ingeniería ambiental en los estudios de calidad de aire se basa en el conocimiento del transporte de los contaminantes que son emitidos a la atmósfera por diversas fuentes, ya sea de origen natural o antrópico. La normatividad ambiental en este sentido es cada vez más estricta y exige la aplicación de modelos matemáticos para evaluar el impacto de las actividades industriales, equipos de combustión externa, instalaciones de incineración, parque automotor, entre otros; para entender el comportamiento de los contaminantes en la atmósfera, evaluar el impacto ambiental generado, establecer los mecanismos de prevención y control tanto de fuentes fijas como de fuentes móviles y dar cumplimiento a los estándares de emisión y descarga de los contaminantes.

El sistema de modelación AERMOD, ha sido presentado dentro del PROTOCOLO PARA EL SEGUIMIENTO Y MONITOREO DE LA CALIDAD DEL AIRE (MANUAL DE DISEÑO)¹ como un modelo Gaussiano de dispersión para contaminantes no reactivos de fuentes fijas y como una herramienta de diagnóstico para la ejecución de modelaciones preliminares con el fin de entender la dispersión de los contaminantes, conocer donde se presentan sus mayores concentraciones y el nivel de influencia de las diferentes fuentes. Esta información es tenida en cuenta en el diseño del sistema de vigilancia de la calidad del aire (MAVDT, 2010).

Es importante anotar que, en las modelaciones de calidad del aire, el principal insumo de entrada corresponde a la información meteorológica del área de estudio. La principal fuente de información en Colombia es registrada en las redes hidrometeorológicas del IDEAM². Sin embargo, la información que requiere el sistema de modelación AERMOD es a nivel horario, lo que indica que son necesarios como mínimo 8760 datos de información para un año, a nivel superficial y para el perfil meteorológico se necesitan cuando menos 365 datos (al menos el sondeo de 1 hora del día). Este tipo de información normalmente no se encuentra en las estaciones administradas por el IDEAM, por lo que en la mayoría de los casos es necesario el uso de información proveniente de modelos regionales de pronóstico de clima como MM5³, WRF⁴, GFS⁵, entre otros.

El sistema de modelación AERMOD, tiene un componente meteorológico que es procesado a través de un módulo denominado AERMET, para el cual es necesario introducir información atmosférica superficial y vertical (perfil de la atmósfera), con el fin de conocer cuál es el comportamiento de los vientos y otras variables meteorológicas que afectan la dispersión de los contaminantes en el aire.

Por lo anterior la idea de este proyecto es la de verificar si la información meteorológica colombiana obtenida en la red de estaciones del IDEAM está disponible, tiene una cobertura en todo el país, es utilizable y ajustable en las modelaciones de calidad de aire con el

¹ Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire. Manual de Diseño de sistemas de Vigilancia de la Calidad del aire. Octubre de 2010.

² INSTITUTO DE HIDROLOGÍA METEOROLOGÍA Y ESTUDIOS AMBIENTALES DE COLOMBIA. Autoridad en el registro de observaciones hidrometeorológicas y reportes de información para Colombia.

³ Fifth-Generation Penn State/NCAR Mesoscale Model

⁴ Weather Research and Forecasting

⁵ Global Forecast System Model

sistema de modelación AERMOD. Así como establecer cuál sería el procedimiento para utilizarla, y evaluar si la información proveniente de los modelos matemáticos como MM5, GFS y WRF es aplicable, y que tan diferentes o similares serían los resultados obtenidos.

El objetivo general de este trabajo es el de evaluar los resultados de una modelación de calidad de aire empleando el sistema de modelación AERMOD con base en la información meteorológica local (red estaciones IDEAM) e información meteorológica proveniente de modelos de pronóstico de clima como WRF, GFS y MM5.

El capítulo 1 contiene el marco teórico desarrollado a partir de la revisión bibliográfica sobre la información meteorológica mínima requerida para la modelación de la dispersión de contaminantes en el aire en el sistema de modelación AERMOD, así como los aspectos más relevantes de la atmósfera.

Determinar las diferencias entre los requerimientos de la información meteorológica definidos en AERMOD contra la información disponible en las estaciones climatológicas del IDEAM.

Establecer la variabilidad en los resultados obtenidos de una modelación con información obtenida del IDEAM contra información de otras fuentes como el modelo de pronóstico de clima WRF, GFS o el modelo de pronóstico MM5, mediante la ejecución de una modelación sobre un caso hipotético en la ciudad de Bogotá.

Capítulo 1. Marco teórico

1.1 Sistema de modelación AERMOD

El sistema de modelación AERMOD está compuesto por un preprocesador meteorológico AERMET y un preprocesador de terreno AERMAP.

1.1.1 AERMAP

AERMAP es un procesador de terreno que permite obtener las alturas sobre el nivel del mar de cada una de las fuentes de emisión, de los receptores definidos y de la grilla de interés para la cual se requiere calcular las concentraciones de los contaminantes a modelar. El procesador determina cada altura a través del uso de una imagen satelital (SRTM3 de 90 m de resolución - Shuttle Radar Topography Mission) que debe ser descargada previamente para el área de influencia del proyecto de modelación.

Una vez se corre el programa, este genera dos archivos con las alturas, uno para las fuentes de emisión que puede ser utilizado directamente en AERMOD agregando previamente las características de las fuentes de emisión, y otro con las alturas de los receptores, que también es usado directamente en AERMOD para la determinación de las concentraciones en los puntos deseados.

1.1.2 AERMET

AERMET es un procesador de información meteorológica horaria que permite preparar la información del área de estudio obtenida a partir de las estaciones meteorológicas o del modelo de pronóstico de clima (MM5, WRF) para ser utilizada en AERMOD.

La información de los modelos de pronóstico de clima resulta de la modelación de datos meteorológicos en cualquier parte del mundo mediante la utilización del modelo NCAR⁶ MM5 (Modelo Mesoescala de quinta generación) o a través del modelo WRF, entre otros.

Una vez se corren estos modelos, se generan dos archivos de salida para utilizar en AERMET (Environment Protection Authority Victoria, 2013):

- Surface Met Data en formato SAMSON: Este archivo contiene la información horaria a nivel superficial.
- Upper Air Met Data en formato TD-6201: Este archivo contiene la información horaria a nivel vertical.

AERMET utiliza información meteorológica a nivel superficial y a nivel vertical de la atmósfera. Por lo tanto, al procesar los datos anteriores con AERMET este genera dos archivos de información a nivel horario para que sean introducidos a AERMOD.

⁶ National Center for Atmospheric Research: Instituto de los Estados Unidos dedicado a la investigación en ciencias de la atmósfera.

Estos archivos tienen las siguientes extensiones: “.SFC” para la información meteorológica superficial, y “.PFL” para la información a nivel del perfil de la atmósfera (vertical).

La información contenida en el archivo superficial se relaciona a continuación:

1. Flujo de calor sensible (W/m^2)
2. Velocidad de fricción superficial (m/s)
3. Escala de velocidad convectiva (m/s)
4. Gradiente vertical de temperatura potencial por encima de la Capa Planetaria Límite
5. Altura de mezcla convectiva (m)
6. Altura de mezcla mecánica (m)
7. Longitud de Monin-Obukhov (m)
8. Rugosidad superficial - Z_0 (m)
9. Cociente de Bowen
10. Albedo
11. Velocidad del viento (m/s)
12. Dirección del viento ($^\circ$)
13. Altura de referencia para vientos (10m)
14. Temperatura superficial (K)
15. Altura de referencia para la temperatura superficial (2 m)
16. Código de precipitación
17. Tasa de precipitación (mm/hr)
18. Humedad relativa (%)
19. Presión superficial (mb)
20. Nubosidad (decimos)

La información del archivo de perfil o vertical se relaciona a continuación:

1. Altura de medición (m)
2. Dirección del viento a la altura de medición ($^\circ$)
3. Velocidad del viento a la altura de medición (m/s)
4. Temperatura al nivel de medición ($^\circ C$)

En este procesador es necesario indicar las características del terreno (uso del suelo) para la determinación de los valores de albedo, cociente de Bowen y Rugosidad.

1.1.2.1 Albedo (r)

Porcentaje de radiación solar que cualquier superficie refleja de vuelta al espacio respecto a la radiación que incide sobre la misma (U. S. Environmental Protection Agency , 2008).

1.1.2.2 Cociente de Bowen (B_o)

El cociente de Bowen es un indicador de la humedad superficial, es la relación entre el flujo de calor sensible y flujo de calor latente. Junto con el albedo y otras observaciones meteorológicas, es utilizado para determinar parámetros de la capa límite planetaria para condiciones convectivas dominadas por el flujo de calor sensible superficial (U. S. Environmental Protection Agency , 2008).

1.1.2.3 Longitud de rugosidad superficial (Z_o)

Está relacionada con la altura de los obstáculos y el flujo de viento. Se define por lo tanto como la altura por encima del nivel del suelo en la cual la velocidad horizontal promedio del viento es usualmente cero con base en un perfil logarítmico. La longitud de rugosidad superficial es importante porque influye en el esfuerzo superficial de cizalla y es un factor importante en la determinación de la magnitud de la turbulencia mecánica y en la estabilidad de la capa límite (U. S. Environmental Protection Agency , 2008).

1.1.3 AERMOD

AERMOD es un modelo de pluma de estado estacionario. En la capa límite estable, asume la distribución de la concentración de tipo Gaussiano tanto a nivel vertical como a nivel horizontal. En la capa convectiva límite, la distribución horizontal es asumida como Gaussiana, pero en la distribución vertical se describe como una función de densidad de probabilidad bi-Gaussiana.

AERMOD es aplicable a áreas rurales y urbanas, de terreno plano y complejo, a emisiones elevadas o a nivel superficial y para múltiples fuentes (puntuales, área y volumen).

De acuerdo con los datos de la fuente de emisión, tales como altura de descarga, diámetro de la chimenea, velocidad de salida de los gases, temperatura de salida de los gases, tasa de emisión y contaminante a modelar, entre otras características, el modelo utiliza la ecuación Gaussiana para la determinación de las concentraciones del contaminante emitido en el área de influencia definida por el usuario.

$$X = \left[\frac{(QKV)}{2\pi U_s \sigma_y \sigma_z} \right] * e^{\left[-0.5 \left(\frac{y}{\sigma_y} \right)^2 \right]}$$

En donde:

- X= Concentración del contaminante modelado.
- Q= Tasa de emisión del contaminante (g/s)
- K= Coeficiente escalar que permite convertir las concentraciones a las unidades determinadas (1×10^6 para obtener la concentración en $\mu\text{g}/\text{m}^3$).
- V= Término vertical que incluye los efectos de la elevación de la fuente, elevación del receptor, elevación de la pluma, mezcla limitada en la vertical y la deposición gravitacional y seca de partículas con diámetros mayores a 0.1 micrones. (Agua Claras, Ingeniería Limitada, 2008)
- U_s = Velocidad promedio del viento a la altura de la chimenea.
- σ_y, σ_z = Desviación estándar para la distribución de la concentración vertical y lateral.

Para calcular la desviación estándar de concentración Pasquill-Gifford, se utilizan las siguientes fórmulas:

- Para calcular el valor de σ_y se utiliza la siguiente ecuación:

$$\sigma_y = 465,11628(x) * \text{Tan}[0,017453293(c - d(\ln x))]$$

En donde:

X= Distancia en Kilómetros.

c,d= Contantes en función de la estabilidad, presentadas en la Tabla 1

Tabla 1 Constantes en función de la estabilidad para calcular σ_y

Parámetros usados para calcular σ_y		
Categoría de Estabilidad Pasquill	c	d
A	241,67	25,33
B	183,33	18,09
C	125	10,86
D	83,33	0,72382
E	62,5	0,54287
F	41,66	0,36191

Fuente: (Environmental Protection Agency, 1995)

➤ Para calcular el valor de σ_z se utiliza la siguiente ecuación:

$$\sigma_z = ax^b$$

En donde:

- X= Distancia en Kilómetros.
- a, b= Contantes en función de la estabilidad, presentadas en la Tabla 2.

Tabla 2 Constantes en función de la estabilidad para calcular σ_z

Parámetros usados para calcular σ_z			
Categoría de Estabilidad Pasquill	x (km)	a	b
A*	<0,10	122,800	0,94470
	0,10 - 0,15	158,080	105,420
	0,16 - 0,20	170,220	109,320
	0,21 - 0,25	179,520	112,620
	0,26 - 0,30	217,410	126,440
	0,31 - 0,40	258,890	140,940
	0,41 - 0,50	346,750	172,830
	0,51 - 3,11	453,850	211,660
	>3,11	**	**
B*	<0,20	90,673	0,93198
	0,21 - 0,40	98,483	0,98332
	>0,40	109,300	109,710
C*	Todo	61,141	0,91465
D	<0,30	34,459	0,86974
	0,31 - 1,00	32,093	0,81066
	1,01 - 3,00	32,093	0,64403
	3,01 - 10,00	33,504	0,60486
	10,01 - 30,00	36,650	0,56589
	>30,00	44,053	0,51179
E	<0,10	24,260	0,83660
	0,10 - 0,30	23,331	0,81956
	0,31 - 1,00	21,628	0,75660
	1,01 - 2,00	21,628	0,63077
	2,01 - 4,00	22,534	0,57154
	4,01 - 10,00	24,703	0,50527
	10,01 - 20,00	26,970	0,46713
	20,01 - 40,00	35,420	0,37615
	>40,00	47,618	0,29592
F	<,20	15,209	0,81558
	0,21 - 0,70	14,457	0,78407
	0,71 - 1,00	13,953	0,68465
	1,01 - 2,00	13,953	0,63227

Parámetros usados para calcular σ_z			
Categoría de Estabilidad Pasquill	x (km)	a	b
	2,01 - 3,00	14,823	0,54503
	3,01 - 7,00	16,187	0,46490
	7,01 - 15,00	17,836	0,41507
	15,01 - 30,00	22,651	0,32681
	30,01 - 60,00	27,074	0,27436
	>60,00	34,219	0,21716
* Si el valor de σ_z supera los 5.000 m, σ_z es igual a 5.000 m			
** σ_z es igual a 5.000 m			

Fuente: (Environmental Protection Agency, 1995)

1.2 Variables meteorológicas para la modelación de la calidad del aire

A continuación, se presentan las variables meteorológicas utilizadas como información de entrada en los modelos de calidad de aire, el formato de los archivos utilizados para alimentar el modelo AERMET y AERMOD con su respectiva estructura tanto a nivel superficial como vertical de la atmósfera. En el numeral 1.1 se presenta la composición del sistema de modelación AERMOD.

1.2.1 Información meteorológica superficial

El formato SAMSON (Solar and Meteorological Surface Observation Network, extensión .sam) contiene la información horaria a nivel superficial. Este es el archivo de entrada que puede ser procesado en AERMET. El formato del encabezado de este archivo contiene los datos de identificación, localización y zona horaria de la estación meteorológica o punto geográfico a donde pertenecen los datos y está compuesto de la siguiente manera⁷:

Tabla 3 Composición encabezado del archivo formato SAMSON

Columna	Elemento	Definición
001	Indicador	~ Indica un encabezado
002-006	Número	Número de identificación de la estación
008-029	Ciudad	Ciudad donde se localiza la estación
031-032	Estado	Estado donde se localiza la estación
033-036	Zona horaria	Número de horas de retraso o adelanto del tiempo local estándar frente al tiempo universal.
039-044	Latitud	Coordenada geográfica, latitud de la estación
039		N = Norte del Ecuador
040-041		Grados
043-044		Minutos
047-053	Longitud	Coordenada geográfica, longitud de la estación
047		W = Oeste, E = Este
048-050		Grados
052-053		Minutos
056-059	Elevación	Elevación de la estación en metros sobre el nivel del mar.

Fuente: <http://www.webmet.com/MetGuide/Samson.html>. 2017

⁷ <http://www.webmet.com/MetGuide/Samson.html>

Figura 1 Muestra del encabezado del archivo SAMSON

66666		Ituango		Co		-5	N	7	7	W	75	41	1243	CR	15												
~YR	MO	DA	HR	I	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	
13	1	1	1	0	9999	9999	9999	70	9999	70	9999	70	3	3	17.6	13.2	75	874	318	2.8	999999	2438	9999999999	9999	999999	9999	9999
13	1	1	2	0	9999	9999	9999	70	9999	70	9999	70	3	3	17.9	12.4	70	874	306	2.3	999999	2438	9999999999	9999	999999	9999	9999
13	1	1	3	0	9999	9999	9999	70	9999	70	9999	70	3	3	17.8	12.3	70	875	303	2.7	999999	2438	9999999999	9999	999999	9999	9999
13	1	1	4	0	9999	9999	9999	70	9999	70	9999	70	3	3	17.6	12.4	71	875	299	3.5	999999	2438	9999999999	9999	999999	9999	9999
13	1	1	5	0	9999	9999	9999	70	9999	70	9999	70	3	3	17.5	12.8	74	875	299	4.3	999999	2438	9999999999	9999	999999	9999	9999
13	1	1	6	0	9999	9999	9999	70	9999	70	9999	70	3	3	17.2	13.2	77	875	299	4.2	999999	2438	9999999999	9999	999999	9999	9999
13	1	1	7	0	9999	9999	9999	70	9999	70	9999	70	3	3	17.2	13.6	79	875	298	4.2	999999	2438	9999999999	9999	999999	9999	9999
13	1	1	8	0	9999	9999	9999	70	9999	70	9999	70	3	3	18.5	14.8	79	875	307	3.0	999999	2438	9999999999	9999	999999	9999	9999
13	1	1	9	0	9999	9999	9999	70	9999	70	9999	70	3	3	20.1	15.0	72	875	326	1.8	999999	2438	9999999999	9999	999999	9999	9999
13	1	1	10	0	9999	9999	9999	70	9999	70	9999	70	3	3	21.4	15.3	68	875	350	1.2	999999	2438	9999999999	9999	999999	9999	9999
13	1	1	11	0	9999	9999	9999	70	9999	70	9999	70	3	3	22.2	15.5	65	874	21	1.6	999999	2438	9999999999	9999	999999	9999	9999
13	1	1	12	0	9999	9999	9999	70	9999	70	9999	70	3	3	23.0	15.9	64	874	36	2.3	999999	2438	9999999999	9999	999999	9999	9999
13	1	1	13	0	9999	9999	9999	70	9999	70	9999	70	3	3	23.1	16.3	65	874	45	3.2	999999	2438	9999999999	9999	999999	9999	9999
13	1	1	14	0	9999	9999	9999	70	9999	70	9999	70	3	3	23.1	16.7	67	874	50	3.8	999999	2438	9999999999	9999	999999	9999	9999
13	1	1	15	0	9999	9999	9999	70	9999	70	9999	70	3	3	22.6	17.0	70	874	49	4.4	999999	642	9999999999	9999	999999	9999	9999
13	1	1	16	0	9999	9999	9999	70	9999	70	9999	70	4	4	21.8	17.4	76	874	49	4.2	999999	2438	9999999999	9999	999999	9999	9999
13	1	1	17	0	9999	9999	9999	70	9999	70	9999	70	4	4	20.9	18.1	84	874	39	3.5	999999	2438	9999999999	9999	999999	9999	9999
13	1	1	18	0	9999	9999	9999	70	9999	70	9999	70	5	5	19.4	18.5	95	874	31	1.8	999999	2438	9999999999	9999	999999	9999	9999
13	1	1	19	0	9999	9999	9999	70	9999	70	9999	70	5	5	18.1	18.1	100	874	358	1.2	999999	2438	9999999999	9999	999999	9999	9999
13	1	1	20	0	9999	9999	9999	70	9999	70	9999	70	5	5	17.4	17.4	100	874	310	1.3	999999	2438	9999999999	9999	999999	9999	9999
13	1	1	21	0	9999	9999	9999	70	9999	70	9999	70	4	4	17.1	16.7	97	874	315	3.3	999999	2438	9999999999	9999	999999	9999	9999
13	1	1	22	0	9999	9999	9999	70	9999	70	9999	70	4	4	16.6	15.9	95	874	322	3.8	999999	2438	9999999999	9999	999999	9999	9999
13	1	1	23	0	9999	9999	9999	70	9999	70	9999	70	3	3	16.5	14.5	88	874	322	3.5	999999	2438	9999999999	9999	999999	9999	9999
13	1	1	24	0	9999	9999	9999	70	9999	70	9999	70	3	3	16.5	13.4	82	874	320	3.4	999999	2438	9999999999	9999	999999	9999	9999

Fuente: Archivo obtenido de Lakes Environmental. 2016

Después del encabezado, en el mismo archivo se presenta las variables meteorológicas en una posición ordenada. A continuación, se presenta su composición:

Tabla 4 Composición estructura del archivo SAMSON

Posición	Descripción
	Año, Mes, día, hora (LST), indicador de observación
1	Radiación extraterrestre horizontal
2	Radiación directa normal extraterrestre
3	Radiación Global Horizontal
4	Radiación normal directa
5	Radiación horizontal difusa
6	Cubierta total de nubes
7	Cubierta opaca de nubes
8	Temperatura de bulbo seco
9	Temperatura de rocío
10	Humedad Relativa
11	Presión atmosférica de la estación
12	Dirección del viento
13	Velocidad del viento
14	Visibilidad
15	Altura de techo
16	Tiempo presente
17	Agua precipitable
18	Profundidad óptica de aerosol
19	Profundidad de nieve
20	Días desde la última nevada
21	Cantidad de precipitación horaria

Fuente: <http://www.webmet.com/MetGuide/Samson.html>. 2017

Figura 2 Muestra de la organización de variables meteorológicas en el archivo SAMSON

66666 Ituango		Co	-5	N	7	7	W	75	41	1243	CRIME															
~YR	MO	DA	HR	I	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
13	1	1	1	0	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	0
13	1	1	2	0	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	0
13	1	1	3	0	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	0
13	1	1	4	0	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	0
13	1	1	5	0	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	0
13	1	1	6	0	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	0
13	1	1	7	0	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	0
13	1	1	8	0	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	0
13	1	1	9	0	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	0
13	1	1	10	0	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	0
13	1	1	11	0	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	0
13	1	1	12	0	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	0
13	1	1	13	0	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	0
13	1	1	14	0	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	0
13	1	1	15	0	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	0
13	1	1	16	0	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	0
13	1	1	17	0	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	0
13	1	1	18	0	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	0
13	1	1	19	0	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	0
13	1	1	20	0	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	0
13	1	1	21	0	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	0
13	1	1	22	0	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	0
13	1	1	23	0	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	0
13	1	1	24	0	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	9999	0

Fuente: Archivo obtenido de Lakes Environmental. 2016

Los valores que están representados por números “9”, indican que no se cuenta con información. Estos números son entendidos por el modelo evitando que se genere error a la hora de procesar los datos.

1.2.2 Información meteorológica de perfil

La información de perfil (upper air data) se presenta en el formato TD-6201 (extensión .ua). Este archivo está constituido en dos partes, la primera corresponde a la identificación y localización de la estación y la segunda a los datos de las variables meteorológicas.

La primera parte está conformada por 32 caracteres de la siguiente manera:

Tabla 5 Composición primera parte archivo TD-6201

CAMPO	POSICIÓN DEL REGISTRO	DESCRIPCIÓN
001	001-008	Identificación de la Estación
002	009-012	Latitud
003	013	Código de latitud N/S
004	014-018	Longitud
005	019	Código de longitud E/W
006	020-029	Fecha y hora (año/mes/día/hora)
007	030-032	Número de grupos de porción de datos que siguen a diferentes niveles

Fuente: <http://www.webmet.com/MetGuide/TD6200.html>

La segunda parte, hace referencia a los datos de las variables meteorológicas:

Tabla 6 Composición segunda parte archivo TD-6201

CAMPO	POSICIÓN DEL REGISTRO	DESCRIPCIÓN
008	033	Indicador de nivel de calidad
009	034-037	Tiempo (Tiempo transcurrido desde la liberación)
010	038-042	Presión
011	043-048	Altura
012	049-052	Temperatura
013	053-055	Humedad Relativa
014	056-058	Dirección del viento
015	059-061	Velocidad del viento
016	062-067	Bandera de calidad (control de calidad)
017	068	Tipo de nivel

Fuente: <http://www.webmet.com/MetGuide/TD6200.html>

Figura 3 Muestra del archivo TD-6201

The image shows a screenshot of a text file containing TD-6201 data. The data is organized into a grid with 17 columns and many rows. The first few columns contain station and time information. The remaining columns contain numerical data points. Three specific columns are highlighted with red boxes and labeled 'Altura nivel 1', 'Altura nivel 2', and 'Altura nivel 3'. The text 'Parte 1' and 'Parte 2' is overlaid on the grid. At the bottom of the screenshot, there is a status bar showing file information: 'nal text file', 'length: 497860', 'lines: 731', 'Ln: 10', 'Col: 32', 'Sel: N/A', 'Dos/Windows', 'ANSI as UTF-8', and 'INS'.

Fuente: Archivo obtenido de Lakes Environmental. 2016

Los datos en el perfil de la atmósfera pueden obtenerse a través de los Radiosondeos. En el aeropuerto el Dorado se hacen lanzamientos de radiosonda diariamente y estos datos son reportados al National Climatic Data Center (NCDC), esta información esta estandarizada y codificada, y puede ser descargada a través del archivo global de datos de radiosonda (Integrated Global Radiosonde Archive (IGRA) Version 2).

Sin embargo, AERMET recibe la información de la Radiosonda en formato TD6201 o en formato FSL. La información de la radiosonda puede ser obtenida en este último formato a

través de internet⁸. Los sondeos realizados en Bogotá corresponden a uno diario. El modelo pide dos, pero acepta un solo sondeo.

1.3 Clasificación de las estaciones meteorológicas de Colombia – IDEAM

Las estaciones meteorológicas corresponden a los sitios en los cuales se hace la medición y observación de las variables meteorológicas. La siguiente clasificación y sus respectivas definiciones son tomadas del Atlas Climatológico de Colombia (IDEAM - MAVDT, 2005)

1.3.1 Agrometeorológica (AM)

En esta estación se realizan observaciones meteorológicas y biológicas, incluyendo fenológicas y otras observaciones que ayuden a determinar las relaciones entre el tiempo y el clima, por una parte y la vida de las plantas y los animales, por la otra. Incluye el mismo programa de observaciones de la estación CP, más registros de temperatura a varias profundidades (hasta un metro) y en la capa cercana al suelo (0, 10 y 20 cm sobre el suelo).

1.3.2 Estación Climatológica ordinaria (CO)

Este tipo de estaciones poseen obligatoriamente un pluviómetro, pluviógrafo y psicrómetro. Es decir, miden lluvias y temperaturas extremas e instantáneas.

1.3.3 Estación climatológica Principal (CP)

Es aquella en la cual se hacen observaciones de visibilidad, tiempo atmosférico presente, cantidad, tipo y altura de las nubes, estado del suelo, precipitación, temperatura del aire, humedad, viento, radiación, solar, brillo solar, evaporación y fenómenos especiales. Gran parte de estos parámetros se obtienen de instrumentos registradores. Por lo general se efectúan tres observaciones diarias.

1.3.4 Estación de radiosonda (RS)

La estación de radiosonda tiene por finalidad la observación de temperatura, presión, humedad y viento en las capas altas de la atmósfera (tropósfera y baja estratósfera), mediante el rastreo, por medios electrónicos o de radar, de la trayectoria de un globo meteorológico que asciende libremente.

1.3.5 Sinóptica principal

Permite observar cada hora variables meteorológicas como nubosidad, dirección y velocidad del viento, presión atmosférica, temperatura del aire, tipo y altura de las nubes, visibilidad, fenómenos especiales, humedad, precipitación y temperaturas extremas.

⁸ Página web <https://ruc.noaa.gov/raobs/Welcomes.cgi>.

1.3.6 Sinóptica suplementaria (SS)

Al igual que en la estación SP, las observaciones se realizan a horas convenidas internacionalmente y los datos corresponden comúnmente a visibilidad, fenómenos especiales, tiempo atmosférico, nubosidad, estado del suelo, precipitación, temperatura del aire, humedad del aire y viento.

1.3.7 Meteorológica marina (MM)

Estaciones para observación del estado del mar. Mide nivel, temperatura y salinidad de las aguas marinas. Se incluyen en la categoría de estaciones meteorológicas especiales.

En la Tabla 7 se presentan los instrumentos presentes en cada una de las estaciones mencionadas.

Tabla 7 Tipo de instrumental por categoría de estación

Tipo de instrumental	PM	PG	CO	SS	SP	CP	AM	MM
Pluviómetro	X	X	X	X	X	X	X	
Pluviógrafo		X	X	X	X	X	X	
Sicrómetro			X	X	X	X	X	
Anemógrafo				X	X	X	X	
Heliógrafo					X	X	X	
Termógrafo					X	X	X	
Higrógrafo					X	X	X	
Tanque de evaporación						X	X	
Actinógrafo					X	X	X	
Anemómetro						X	X	
Geotermómetros							X	
Rociógrafo							X	
Suelo (ss)							X	
Microbarógrafo					X	X		
Barómetro					X	X		
Limnómetro								X
Maxímetro								X
Limnógrafo								X
Mareógrafo								X

Fuente: (IDEAM - MAVDT, 2005)

1.4 Modelos de pronóstico de clima

- Weather Research and forecasting Model - WRF

El Weather Research and Forecasting (WRF) es un modelo de predicción numérica de mesoescala de próxima generación, diseñado tanto para la investigación atmosférica como para las aplicaciones de pronóstico operacional. Cuenta con dos núcleos dinámicos, un sistema de asimilación de datos, y una arquitectura de software que soporta la computación paralela y la extensibilidad del sistema. El modelo sirve a una amplia gama de aplicaciones

meteorológicas a través de escalas de decenas de metros a miles de kilómetros. Fue desarrollado en colaboración del Centro Nacional de Investigación Atmosférica (NCAR), la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (representada por los Centros Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP), la Agencia de Tiempo de la Fuerza Aérea (AFWA), el Laboratorio Naval de Investigación, la Universidad de Oklahoma y la Administración Federal de Aviación (FAA) (NCAR, 2017).

- MM5

El modelo de mesoescala MM5 es un modelo de coordenadas sigma de área limitada, no hidrostática, diseñado para simular o predecir la circulación atmosférica de mesoescala. El modelo es apoyado por varios programas de pre y post-procesamiento, que se denominan colectivamente como el sistema de modelado MM5. El software del sistema de modelado MM5 está escrito principalmente en Fortran, y ha sido desarrollado en Penn State y NCAR como un modelo de mesoescala de la comunidad con contribuciones de usuarios de todo el mundo (University corporation for Atmospheric Research, 2017).

Capítulo 2. Metodología

Inicialmente se efectuó una revisión bibliográfica sobre las variables meteorológicas utilizadas en el software AERMOD y su importancia en la modelación de contaminantes en la atmosfera. Posteriormente, se hizo una revisión de la información recolectada en las estaciones climatológicas del IDEAM, identificando el tipo de estación y la frecuencia con la cual se toman los datos. Se consultaron guías existentes para la construcción de los archivos meteorológicos de entrada para el software AERMOD con el fin de identificar los requisitos mínimos de información para correr el modelo, y establecer una metodología sencilla para la construcción de un archivo meteorológico, definiendo las variables meteorológicas mínimas requeridas a partir de datos de estaciones del IDEAM.

Así mismo, se efectuó una revisión bibliográfica de la información proporcionada por los modelos MM5 y WRF, indagando sobre sus limitaciones, las fuentes de información y los modelos empleados para el pronóstico de las variables meteorológicas en un área espacial determinada.

Para alcanzar el objeto de este proyecto, se efectuó un modelo de dispersión de PM10 de una actividad industrial hipotética en la ciudad de Bogotá, con meteorología construida a partir de los registros de las estación del aeropuerto El Dorado del IDEAM y la estación las Ferias de la Secretaria Distrital de Ambiente (La SDA reporta datos horarios de velocidad y dirección del viento, en una clara intención de conocer el comportamiento dinámico de la atmósfera, y la evolución de la calidad del aire de la ciudad asociado a los ciclos meteorológicos diarios) y la misma modelación empleando información del modelo predictivo WRF para el año 2015. Cada uno de los resultados obtenidos se compararon para determinar las principales diferencias presentes en la dispersión de los contaminantes en un área específica, tanto en las concentraciones obtenidas como en la distribución espacial de los conos de dispersión.

Finalmente, se establecerán las conclusiones y recomendaciones derivadas del estudio para su implementación en la modelación de la calidad del aire.

Capítulo 3. Análisis de las fuentes de información meteorológica en Colombia – Estaciones del IDEAM

3.1 Cobertura de las estaciones hidrometeorológicas a nivel nacional

A nivel nacional el IDEAM tiene alrededor de 4.514 estaciones distribuidas a lo largo del territorio nacional. De acuerdo con el catálogo de estaciones versión 9 de enero de 2017 publicado en la página web⁹ de la entidad, se pudo establecer que solo 2639 estaciones se encuentran operando, esto corresponde al 58,89%. Del total en operación, el 43,02% corresponde a estaciones meteorológicas, el 1,75% son hidrometeorológicas y el 14,11% son hidrológicas.

Tabla 8 Número de estaciones IDEAM clasificadas por clase

No.	CLASE	CANTIDAD	%	ESTACIONES SUSPENDIDAS	ESTACIONES OPERANDO	%DE ESTACIONES OPERANDO POR CLASE
1	METEOROLÓGICA	3091	68,5%	1163	1928	42,71%
2	HIDROLÓGICA	1327	29,4%	708	619	13,71%
3	HIDROMETEOROLÓGICA	96	2,1%	4	92	2,04%
	TOTAL	4514	100,0%	1875	2639	58,46%

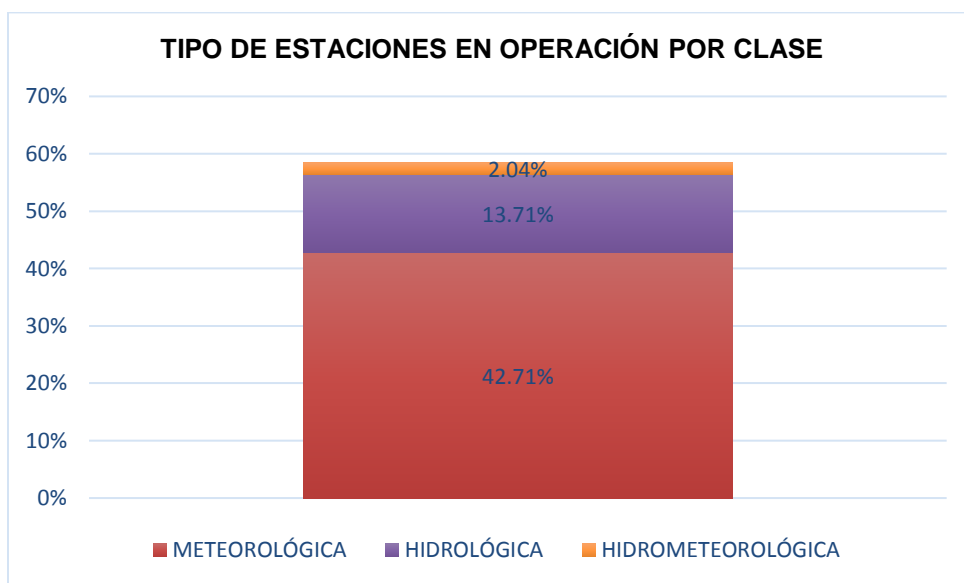
Figura 4 Estado de operación de las estaciones hidrometeorológicas - IDEAM



Fuente: El autor con base en información del IDEAM. 2017

⁹ <http://www.ideam.gov.co/solicitud-de-informacion>

Figura 5 Estaciones en operación según Clase - IDEAM



Fuente: El autor con base en información del IDEAM. 2017

Tabla 9 Número de estaciones IDEAM clasificadas por categoría

No.	CATEGORÍA	TOTAL ESTACIONES	%DE ESTACIONES POR CATEGORÍA	ESTACIONES SUSPENDIDAS	ESTACIONES OPERANDO	%DE ESTACIONES OPERANDO POR CATEGORÍA
1	PM	1823	40,39%	657	1166	25,83%
2	LG	488	10,81%	139	349	7,73%
3	LM	862	19,10%	565	297	6,58%
4	CO	516	11,43%	241	275	6,09%
5	CP	293	6,49%	81	212	4,70%
6	PG	214	4,74%	93	121	2,68%
7	AM	78	1,73%	15	63	1,40%
8	SP	47	1,04%	4	43	0,95%
9	HA	58	1,28%	3	55	1,22%
10	ME	102	2,26%	63	39	0,86%
11	SS	14	0,31%	7	7	0,16%
12	MM	9	0,20%	5	4	0,09%
13	RS	6	0,13%	2	4	0,09%
14	DEH	2	0,04%	0	2	0,04%
15	MR	2	0,04%	0	2	0,04%
	TOTAL	4514	100,00%	1875	2639	58,46%

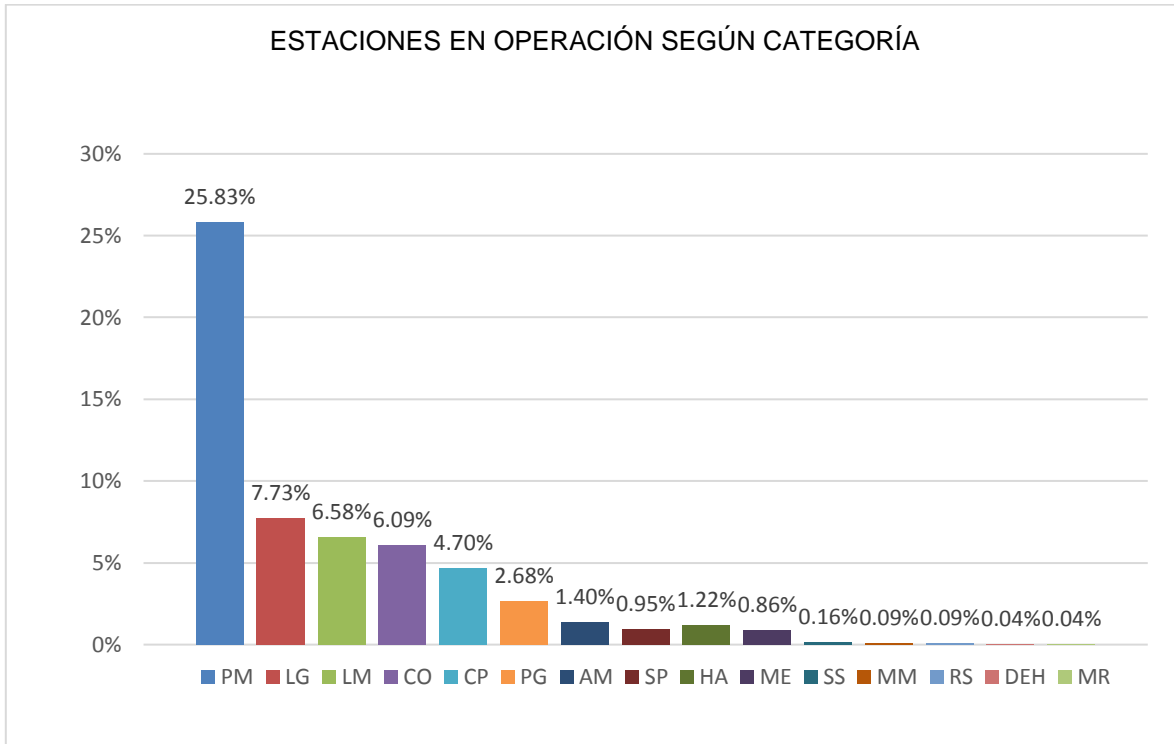
Fuente: El autor con base en información del IDEAM. 2017

De acuerdo con la tabla anterior, no todas las estaciones registran las variables físicas para la construcción del archivo micrometeorológico que AERMOD requiere, es decir, registros a pequeña escala y periodos de tiempo cortos. Por el contrario,

las estaciones del IDEAM fueron diseñadas para registrar variaciones de propiedades físicas de la atmósfera que sufren cambios en periodos de escala superior a 6 horas y en escala sinóptica, es decir, cientos de kilómetros cuadrados.

A continuación, se presentan las estaciones por categoría.

Figura 6 Estaciones en operación según categoría - IDEAM



Fuente: El autor con base en información del IDEAM. 2017

De acuerdo lo presentado en la Tabla 9 y Figura 6, se puede observar que el 25,83% de las estaciones miden precipitación, el 14,31% miden caudales (LG y LM), el 6,09% mide además de la precipitación, datos de temperatura, humedad relativa, evaporación, brillo solar, nubosidad y punto de rocío y solo en el 4,7% de las estaciones se pueden obtener además datos de velocidad y dirección del viento.

Lo anterior, representa una limitante de información para la modelación de la calidad del aire en el país y por tanto toma relevancia la necesidad de utilizar modelos de pronóstico de clima para obtener los datos necesarios. Cabe resaltar que las estaciones del IDEAM no hacen mediciones horarias de las diferentes variables meteorológicas para modelación de calidad de aire porque no fueron concebidas para eso, lo que hace aún más difícil el uso de modelo AERMOD y del procesador AERMET para obtener resultados del modelo que sean comparables con las normas de inmisión anuales y de 24 horas de los contaminantes.

3.2 Cobertura geográfica de las estaciones

A continuación, se presenta la Tabla 10 con el número de estaciones por departamento y distrito capital y la cobertura respecto al área de cada entidad territorial. En la tabla se puede observar que las islas de San Andrés, Providencia y Santa Catalina tienen la mayor cobertura geográfica con 3,4 estaciones por cada 10 km², seguida por el Distrito Capital

que tiene 40,9 estaciones por cada 1000 km² y por el departamento de Risaralda que tiene 21,07 estaciones por cada 1000 km². La mediana en Colombia corresponde a 7 estaciones hidrometeorológicas por cada 1000 km².

Tabla 10 Estaciones hidrometeorológicas por área

ID	DEPARTAMENTO	Area_Km2	Nº Estaciones_Catalogo	Estaciones /Km2	No. estaciones /1000 Km2
1	SAN ANDRÉS, PROVIDENCIA Y SANTA CATALINA	49,72	17	0,3419	3,42*
2	BOGOTÁ D.C.	1.636,63	67	0,0409	40,94
3	RISARALDA	3.560,35	75	0,0211	21,07
4	ATLÁNTICO	3.321,99	68	0,0205	20,47
5	HUILA	18.136,80	248	0,0137	13,67
6	BOYACÁ	23.151,95	304	0,0131	13,13
7	TOLIMA	24.148,73	287	0,0119	11,88
8	CALDAS	7.438,90	83	0,0112	11,16
9	CUNDINAMARCA	23.983,86	249	0,0104	10,38
10	NORTE DE SANTANDER	21.835,06	220	0,0101	10,08
11	BOLÍVAR	26.697,93	268	0,0100	10,04
12	SANTANDER	30.558,41	288	0,0094	9,42
13	CESAR	22.562,17	176	0,0078	7,80
14	LA GUAJIRA	20.616,58	159	0,0077	7,71
15	CÓRDOBA	25.005,24	189	0,0076	7,56
16	SUCRE	10.679,71	79	0,0074	7,40
17	CAUCA	31.249,40	220	0,0070	7,04
18	VALLE DEL CAUCA	20.654,80	144	0,0070	6,97
19	MAGDALENA	23.137,67	151	0,0065	6,53
20	ANTIOQUIA	62.963,06	396	0,0063	6,29
21	QUINDÍO	1.932,17	11	0,0057	5,69
22	NARIÑO	31.486,47	128	0,0041	4,07
23	PUTUMAYO	25.977,04	81	0,0031	3,12
24	CHOCÓ	48.190,97	101	0,0021	2,10
25	CASANARE	44.362,93	85	0,0019	1,92
26	META	85.551,24	148	0,0017	1,73
27	ARAUCA	23.820,24	33	0,0014	1,39
28	AMAZONAS	109.497,50	71	0,0006	0,65
29	CAQUETÁ	90.108,23	53	0,0006	0,59
30	VICHADA	100.090,73	58	0,0006	0,58
31	GUAVIARE	55.579,12	21	0,0004	0,38
32	VAUPÉS	53.290,34	19	0,0004	0,36
33	GUAINÍA	71.274,70	17	0,0002	0,24
	TOTAL	1.142.550,65	4514	0,0040	3,95
				Mediana	7,01
				Promedio	7,89

*Para San Andrés, Providencia y Santa Catalina, se toma estaciones por cada 10 Km².

Fuente: El autor con base en información del IDEAM. 2017

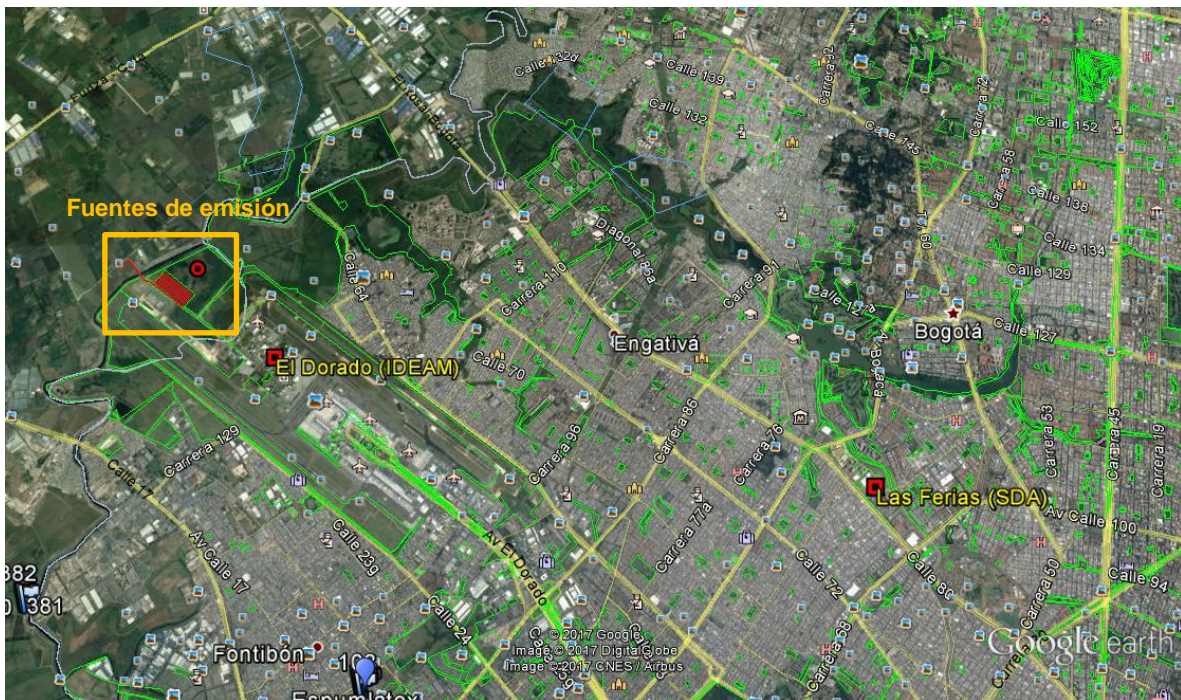
De acuerdo con lo presentado en la tabla anterior, se puede observar que la cobertura de estaciones es muy pobre en comparación con la extensión del País en cuanto a la ejecución de modelos de calidad de aire, pues la cobertura de una estación en términos de modelación de calidad de aire recomendada es de 6 km. Sin embargo, no es posible saturar

las regiones con estaciones meteorológicas, razón por la cual se hace necesario el uso de los modelos de pronóstico de clima.

Capítulo 4. Construcción de los archivos meteorológicos de entrada para su uso en AERMOD

Con base en la información meteorológica requerida para un proyecto de modelación, se seleccionó la estación 21205790 APTO El Dorado (Aeropuerto El Dorado) para la obtención de información horaria de las estaciones del IDEAM y la estación meteorológica las Ferias perteneciente a la red de monitoreo de calidad de aire de la ciudad de Bogotá. Con base en la información de esas dos estaciones se efectuó el proceso de consecución de datos y modelación de un caso hipotético. En la Figura 7 se presenta la localización de las estaciones y las fuentes hipotéticas de emisión.

Figura 7 Localización de las fuentes de emisión y las estaciones meteorológicas



Fuente: Imagen de Google Earth editada por el autor. 2017

4.1 Información superficial

Se obtuvieron datos de precipitación, evaporación, nubosidad, temperatura, velocidad y dirección del viento y rosa de vientos para el año 2015. Sin embargo, se pudo observar que la información suministrada no corresponde a todas las horas del día, sino que se registran lecturas en horas específicas (7:00, 13:00 y 19:00 horas).

Es así como para la temperatura, se hace en 3 lecturas diarias, a las 7, 13 y 19 horas, razón por la cual se decidió efectuar la interpolación de los valores de temperatura entre las 7 y 13 h, entre las 13 y 19 h y entre las 19 y 7 h del día siguiente. La interpolación se propone teniendo en cuenta que entre las 7 y las 13 h la temperatura va aumentando hasta alcanzar su máximo en la hora 13, y entre las 13 y las 19, y las 19 y las 7 del día siguiente, va disminuyendo. Para las demás variables, humedad relativa y punto de rocío, que también son reportados a las mismas horas, se decidió efectuar el mismo procedimiento, para no llenar el archivo de datos faltantes o desconocidos. De esta manera, se obtienen los 8760 datos requeridos para cada variable.

La presión atmosférica se tomó de manera constante, pues se asume que no hay mayor variación con la altura sobre el nivel del mar (742,71 mb).

En cuanto a la dirección y velocidad del viento, como solo se pudo obtener información diaria, se decidió obtener información de la estación meteorológica Las Ferias perteneciente a la red de monitoreo de calidad de aire de la ciudad de Bogotá, y la cual cuenta con información horaria de velocidad y dirección del viento. Así mismo, esta puede ser descargada a través de internet y por lo tanto la consecución de los datos es de gran facilidad. Cabe anotar, que la información de vientos es tal vez la más importante a la hora de la ejecución de un proyecto de modelación, puesto que finalmente estos determinan hacia donde se dirigirán los contaminantes de una fuente de emisión. El esquema de almacenamiento de datos del IDEAM no contempla el reporte de datos para modelos de dispersión, por cuanto no generan registros horarios. A pesar de todo, el aeropuerto maneja este tipo de información, pero esta no es accesible al público y es administrada por el área de meteorología aeronáutica de la Aerocivil.

Los datos de radiación solar se obtuvieron a partir de la aplicación Pysolar¹⁰. En esta aplicación se establecen las coordenadas del sitio de modelación para obtener la radiación horaria del año deseado.

Por las consideraciones mencionadas anteriormente, se genera una diferencia entre las fuentes de datos y por lo tanto no es posible hacer un sustento estadístico de la información meteorológica usada y de los resultados obtenidos en la modelación. Sin embargo, se efectúa un análisis estadístico básico para explicar los resultados obtenidos y las diferencias que presentan cada conjunto de datos.

Es importante mencionar que la identificación de datos faltantes se etiqueta o marcan en el archivo meteorológico con el carácter nueve (9).

4.2 Información de perfil

Estos datos se obtienen a partir de registros de radiosondeo del aeropuerto El Dorado. Si bien el IDEAM lo suministra al público en general por petición directa, también se encuentra disponible de manera libre en el siguiente enlace de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica de los Estados Unidos, <https://ruc.noaa.gov/raobs/Welcome.cgi>. Los datos de este archivo corresponden a registros de temperatura, humedad relativa, presión, velocidad y dirección del viento a diferentes niveles o altitudes. Como ya se sabe, el procesador AERMET requiere datos de dos tipos, estos son micrometeorología superficial y de propiedades físicas a diferentes alturas obtenido por radiosondeo, para construir la meteorología utilizada por AERMOD.

4.3 Procesamiento de datos en AERMET

Una vez se construye el archivo superficial y el archivo de perfil, este se procesa en AERMET para obtener los archivos de entrada .sfc y .pfl que se utilizan en AERMOD.

Los resultados obtenidos con AERMET son los siguientes:

¹⁰ Pysolar es una aplicación compuesta por una colección de bibliotecas de Python para simular la irradiación de cualquier punto de la tierra por el sol.

4.3.1 Precipitación

En cuanto a precipitación, los datos del aeropuerto El Dorado corresponde a registros que totalizan la cantidad de lluvia acumulada para la escala sinóptica, razón por la cual no es posible determinar la precipitación horaria. Esta situación se resuelve utilizando la bandera para datos faltantes en el relleno de datos del archivo micrometeorológico, al respecto conviene mencionar que la ausencia de este registro no afecta el ejercicio de modelación por cuanto no se emplea la opción depositación o remoción húmeda de contaminante en la ejecución de AERMOD. En cambio en el modelo WRF se reportan 1532 datos, con un valor mínimo de 0 mm/hr y un valor máximo de 28,9 mm/hr.

4.3.2 Temperatura

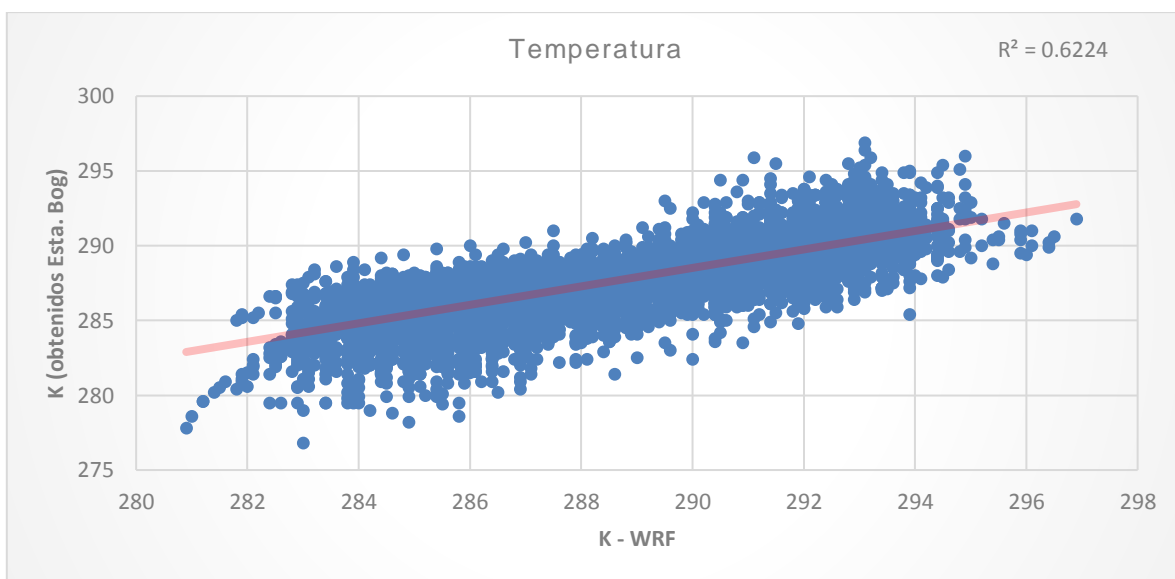
Los datos de temperatura obtenidas de la estación del aeropuerto El Dorado e interpolados entre sus 3 datos reportados diariamente (7:00, 13:00 y 19:00 horas) varían entre 276,8 K y 296,9 K. Los datos obtenidos a partir de la información del modelo WRF presentan variaciones entre 280,9 K y 296,9K. La diferencia en el promedio de temperatura entre las dos series de datos es de 0,83K. Los datos presentan una correlación baja a moderada y su tendencia se puede observar en la Tabla 11 y Figura 8.

Tabla 11 Comparación de las series de datos de temperatura

ESTADISTICOS	TEMPERATURA (K)	
	WRF	BOG
PROMEDIO	288,29	287,46
MAX	296,90	296,90
MIN	280,90	276,80
Coeficiente de correlación	0,7889	
R2	0,6224	

Fuente: El autor. 2017

Figura 8 Valores horarios de temperatura 2015



Fuente: El autor. 2017

4.3.3 Humedad relativa

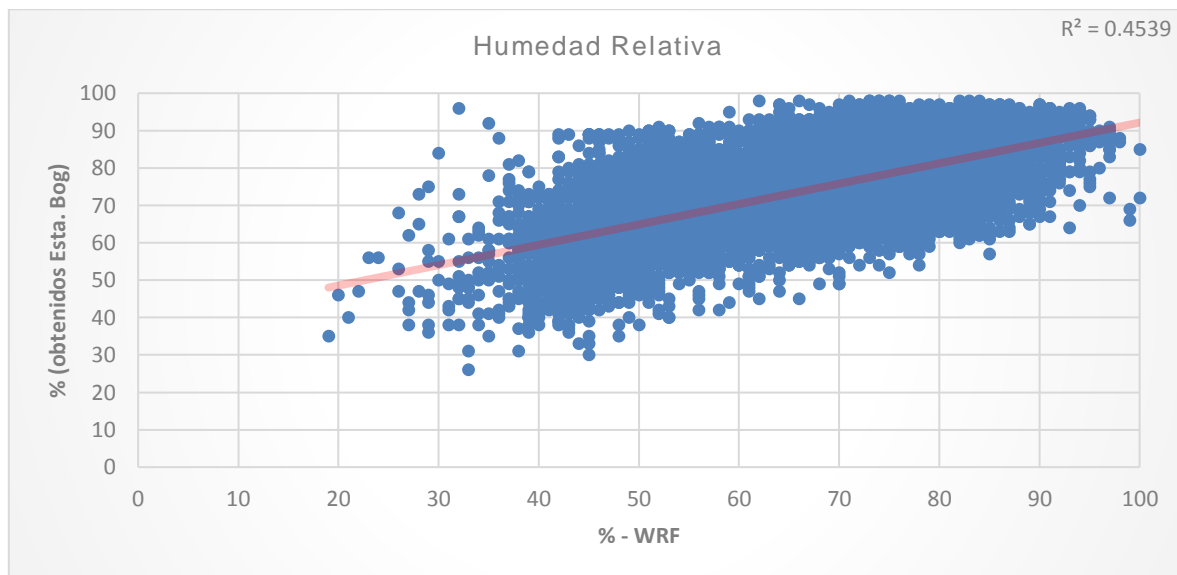
En la Tabla 12 se presenta la comparación entre las series de datos de humedad relativa. La humedad relativa a nivel horario varía entre el 26% y el 98% para los datos interpolados entre las 7:00, 13:00 y 19:00 horas de la estación del aeropuerto El Dorado, y entre 19% y 100% para los datos obtenidos con WRF. La humedad relativa promedio es más alta con los datos interpolados y se presenta una diferencia entre los promedios de las series de datos de 7,19%. En la Figura 9 se presenta la tendencia de los datos. Allí se puede observar una correlación baja o débil entre los datos.

Tabla 12. Comparación de las series de datos de humedad relativa

ESTADISTICOS	HUMEDAD RELATIVA (%)	
	WRF	BOG
PROMEDIO	66,95	74,14
MAX	100	98
MIN	19	26
Coeficiente de correlación	0,6737	
R2	0,4539	

Fuente: El autor. 2017

Figura 9 Valores horarios de humedad relativa



Fuente: El autor. 2017

4.3.4 Presión atmosférica

Para los datos generados a partir de la estación El Dorado, se tomó una presión atmosférica constante de 743 mb (557 mm Hg), la cual se determinó por la altura sobre el nivel del mar. Los datos provenientes de WRF presentan una variación horaria de presión atmosférica entre 748 y 788 mb.

4.3.5 Nubosidad

Los valores de nubosidad no tienen correlación. Para los datos obtenidos con WRF, la nubosidad promedio es de 2/10 mientras que con los datos construidos es de 8/10. Esto

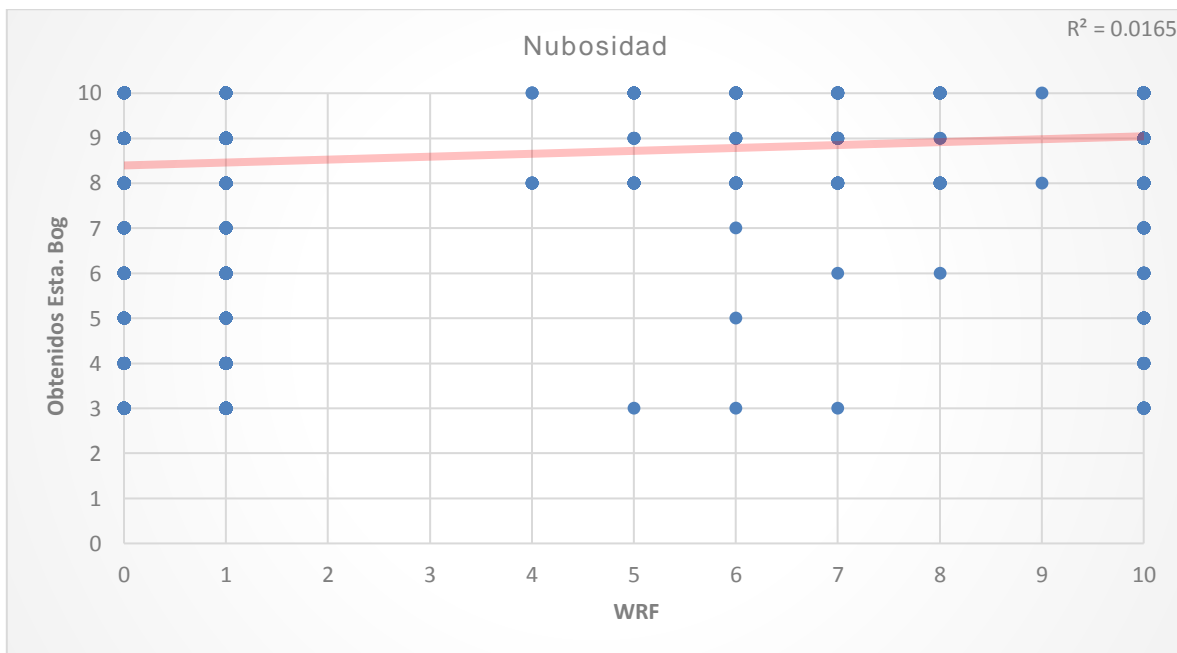
pudo ser afectado por la interpolación efectuada entre las 7:00, 13:00 y 19:00 horas, pues el método de interpolación lineal incrementa la nubosidad significativamente y por lo tanto no es apropiado. En la Figura 10 se presenta el comportamiento de nubosidad.

Tabla 13 Comparación de las series de datos de Nubosidad

ESTADISTICOS	NUBOSIDAD	
	WRF	BOG
PROMEDIO	2,14	8,53
MAX	10	10
MIN	0	3
Coefficiente de correlación	0,1284	
R2	0,0165	

Fuente: El autor. 2017

Figura 10 Valores horarios de nubosidad



Fuente: El autor. 2017

4.3.6 Flujo de calor sensible

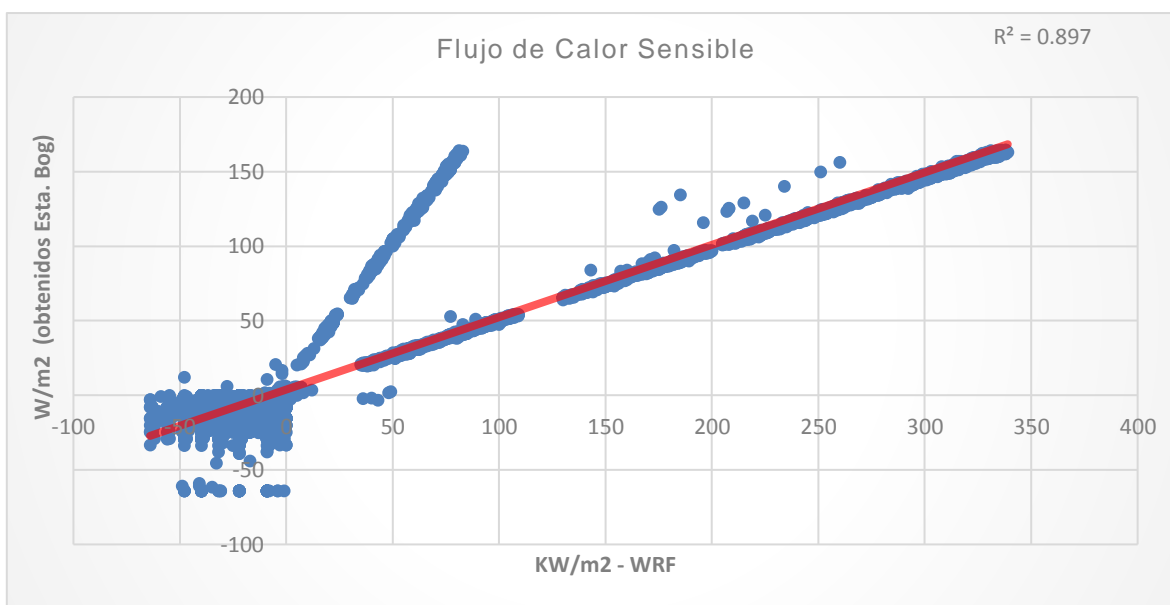
En la Tabla 14 se presenta la comparación de los datos de flujo de calor sensible calculado. En la tabla se puede observar que para la estación el Dorado estos datos varían ente -64 y 164 W/m². Mientras que los datos obtenidos a partir de WRF varían entre -64 y 339. Estos datos pueden verse afectados por la nubosidad, razón por la cual los datos de la estación el Dorado presentan un flujo más bajo debido a la alta nubosidad que se obtuvo con AERMET. Sin embargo, los datos presentan una correlación moderada. En la Figura 11 se presenta la tendencia de las series de datos.

Tabla 14 Comparación de las series de datos de calor sensible

ESTADISTICOS	CALOR SENSIBLE (W/m ²)	
	WRF	BOG
PROMEDIO	74,34	35,52
MAX	339	325,3
MIN	-64	-64
Coeficiente de correlación	0,8245	
R2	0,6798	

Fuente: El autor. 2017

Figura 11 Valores horarios de calor sensible



Fuente: El autor. 2017

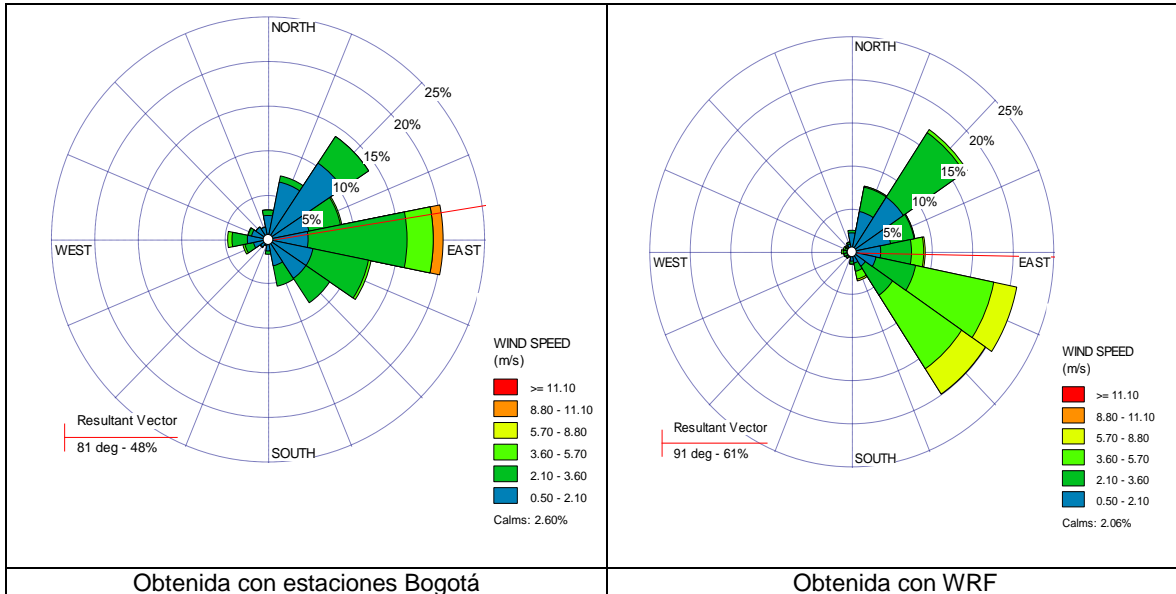
4.3.7 Velocidad y dirección del viento

En la Figura 12 se observan las rosas de vientos elaboradas a partir de los datos de la estación Las Ferias de la Secretaría de Ambiente de Bogotá y la generada a partir de la información obtenida con el modelo WRF, las cuales fueron procesadas en AERMET. Es importante recordar que no se pudo obtener la información horaria del aeropuerto El Dorado y por lo tanto se debió utilizar la información de la estación las Ferias de la SDA, la cual está localizada a unos 7 km de distancia del aeropuerto, por lo tanto los datos tienen desviaciones relacionadas principalmente con las características del área de influencia de donde se localiza la estación de la SDA (la velocidad y dirección del viento puede estar influenciada por la presencia de edificios del área urbana donde se localiza la estación).

En la rosa de vientos de la estación las Ferias se puede observar que la dirección predominante del viento corresponde a la dirección E y a la dirección NE con velocidades predominantes entre 2,1 y 3,6 m/s y entre 0,5 y 2,1 m/s, mientras que la rosa de vientos obtenida con WRF, se puede observar que los vientos provienen del ESE, SE y NE con velocidades entre 3,6 y 5,7 m/s y entre 2,1 y 3,6 m/s. En la Figura 14 se puede observar la distribución de velocidades de cada fuente de datos.

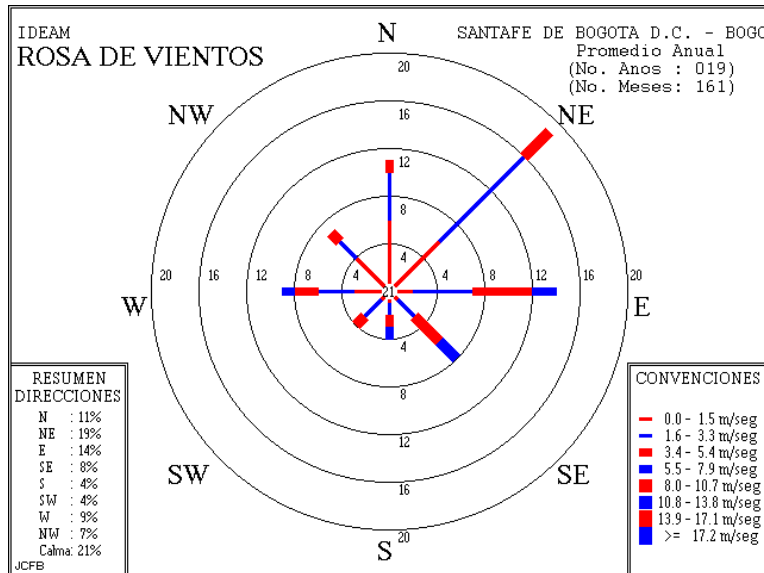
Por otro lado, en la Figura 13 se presenta la rosa de vientos del aeropuerto El Dorado. En esta figura se pueden observar similitudes en la dirección y velocidad del viento respecto a las rosas de viento generadas con las dos fuentes de datos. Cabe anotar, que las rosas de vientos generadas corresponden al año 2015, mientras que la rosa de vientos del aeropuerto se genera a partir de datos multianuales.

Figura 12 Rosa de vientos – Archivo horario superficial



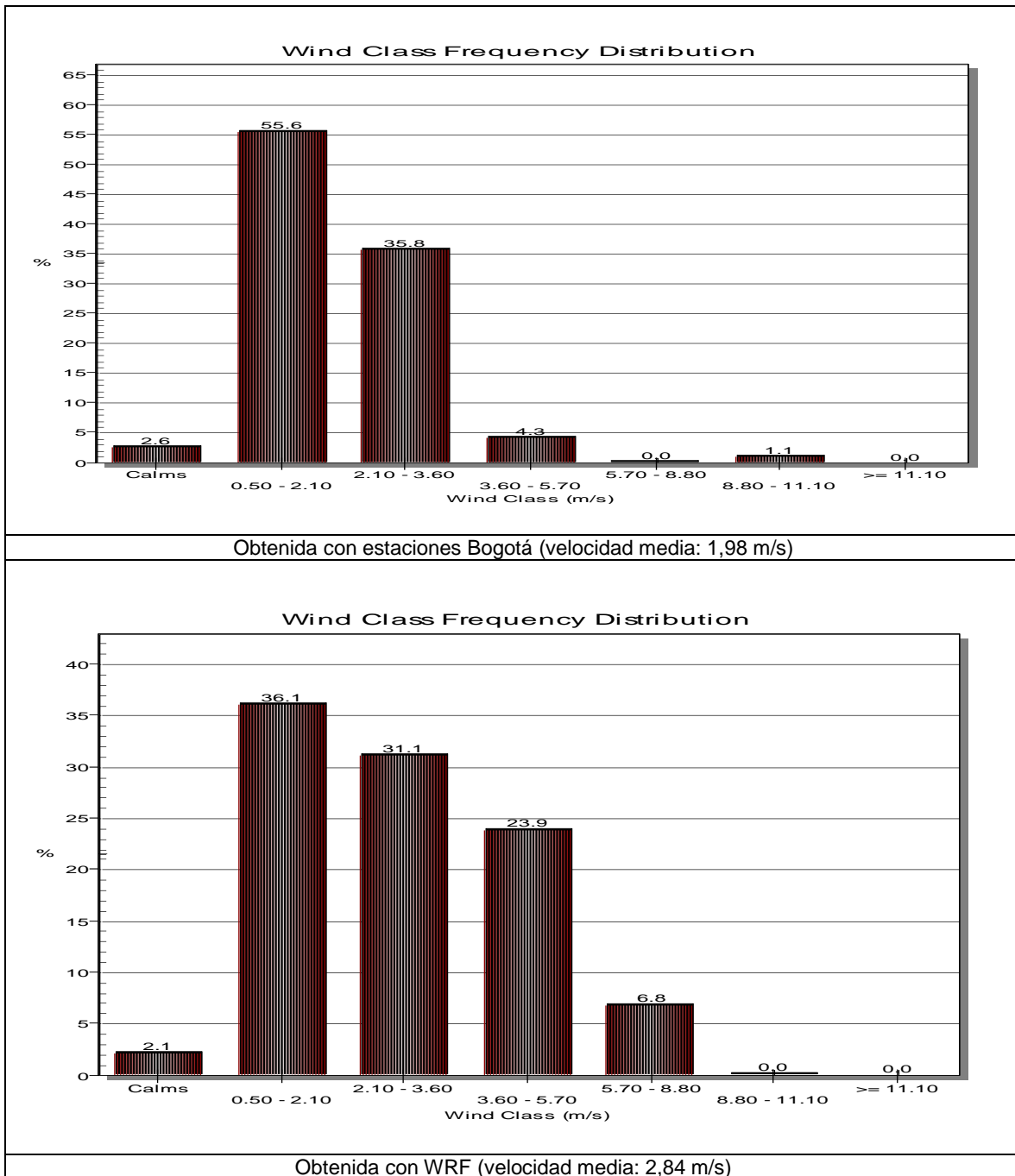
Fuente: El autor con el procesador AERMET. 2017

Figura 13 Rosa de vientos aeropuerto el Dorado - multianual



Fuente: IDEAM. 2016

Figura 14 Distribución de frecuencia clases de viento



Fuente: El autor con el procesador AERMET. 2017

4.3.8 Estabilidad atmosférica

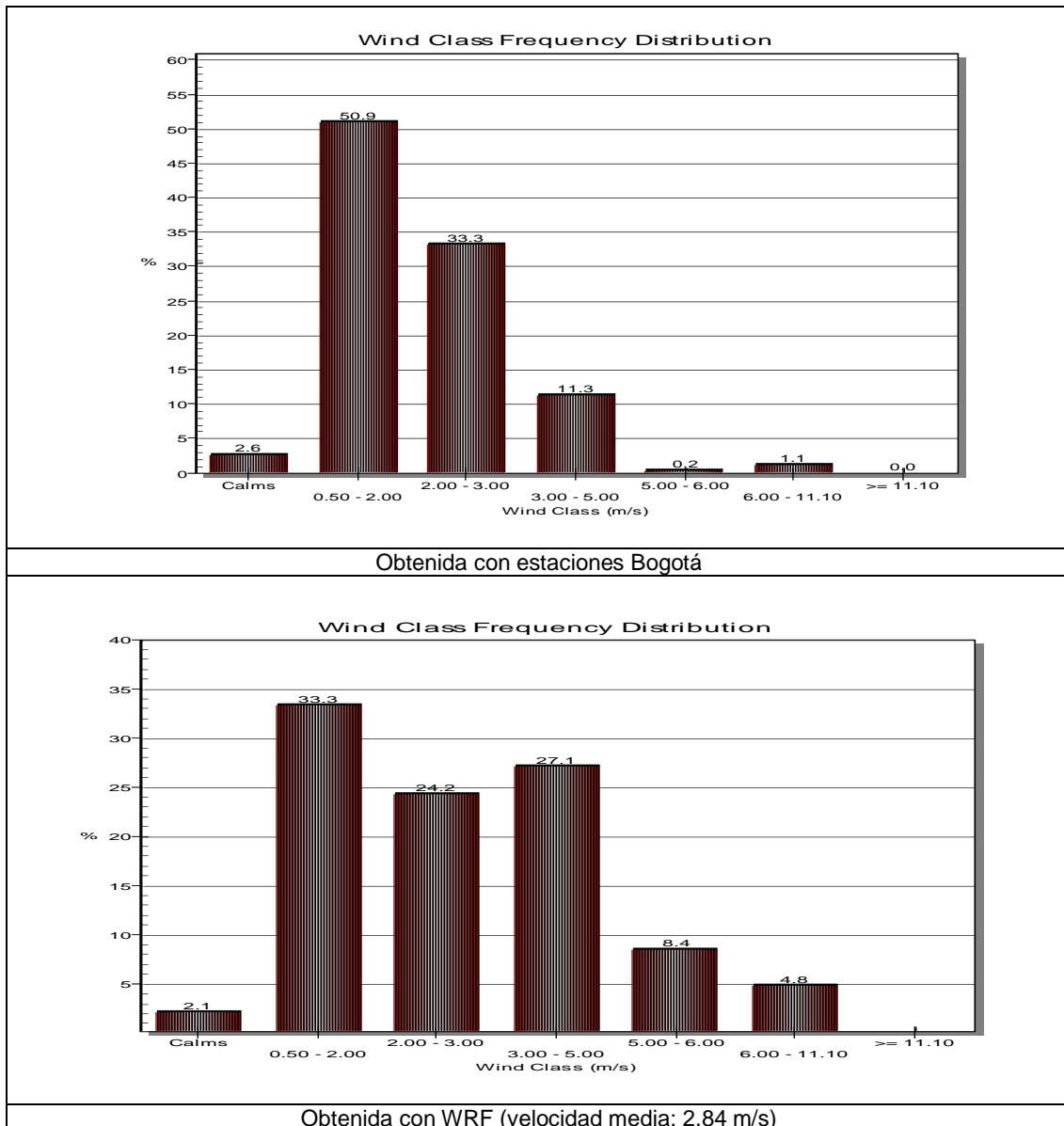
De acuerdo con las estabildades atmosféricas de Paquill-Guifford presentadas en la siguiente tabla, y de acuerdo con las características de velocidad presentadas en la Figura 15 (acorde con las velocidades de la Tabla 15), radiación y nubosidad del área donde se desarrolla el proyecto, la estabilidad atmosférica varía de muy inestable a inestable (A -B), y ligeramente inestable (C) en el día y ligeramente estable (E) y estable (F) en la noche.

Tabla 15 Clasificación de la estabilidad atmosférica de Pasquill

VELOCIDAD DEL VIENTO SUPERFICIAL (m/s)	DÍA			NOCHE	
	RADIACIÓN SOLAR			CIELO CUBIERTO O NUBOSIDAD > 4/8	NUBOSIDAD < 3/8
	FUERTE	MODERADA	DÉBIL		
< 2	1	1 - 2	2	----	----
2 - 3	1 - 2	2	3	5	6
3 - 5	2	2 - 3	3	4	5
5 - 6	3	3 - 4	4	4	4
>6	3	4	4	4	4

Fuente: EPA. (U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2000)

Figura 15 Distribución de velocidad en los rangos establecidos de estabilidad atmosférica



Obtenida con WRF (velocidad media: 2,84 m/s)

Fuente: El autor con el procesador AERMET. 2017

4.3.9 Altura de mezcla

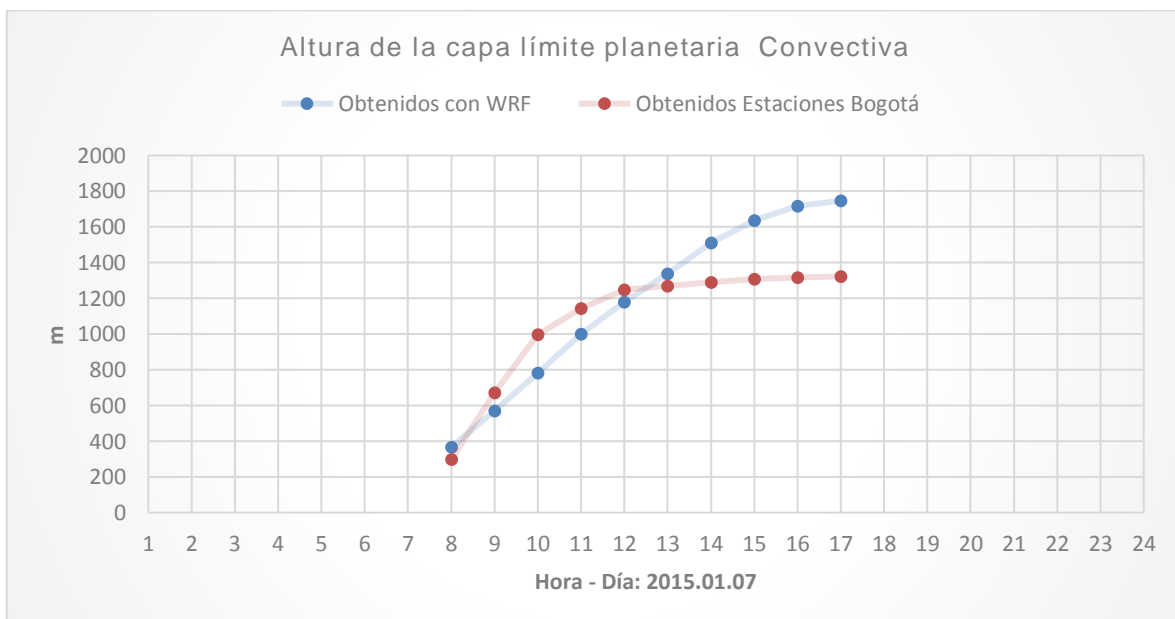
La capa límite convectiva (CBL o PBL) está dominada por el calentamiento de la superficie, se desarrolla durante el día y genera mezcla vertical moderada a fuerte. La capa límite estable (SBL) esta conducida por el enfriamiento de la superficie, se desarrolla en la noche y genera una mezcla vertical débil o no genera mezcla vertical. En la Figura 16 se presenta el comportamiento general de la capa limite convectiva. En esta gráfica se puede observar que en las primeras horas del día la altura de esta capa es baja y alcanza su valor máximo al final de la tarde. En la Figura 17 se observa el gráfico de dispersión de los datos de la capa límite convectiva obtenida para cada fuente de datos, en ella se puede observar una correlación moderada. Con los datos de WRF se presenta una variación de la capa de 0 a 2433 m, y con la fuente de datos del aeropuerto El Dorado, esta capa se calculó entre 0 y 2101 m.

Tabla 16 Comparación de las series de datos de la altura de la capa límite convectiva

ESTADISTICOS	ALTURA CAPA LÍMITE GENERADA CONVECTIVAMENTE (m)	
	WRF	BOG
PROMEDIO	1.418,78	1.125,09
MAX	2433	2679
MIN	15	8
Coefficiente de correlación	0,7815	
R2	0,6108	

Fuente: El autor. 2017

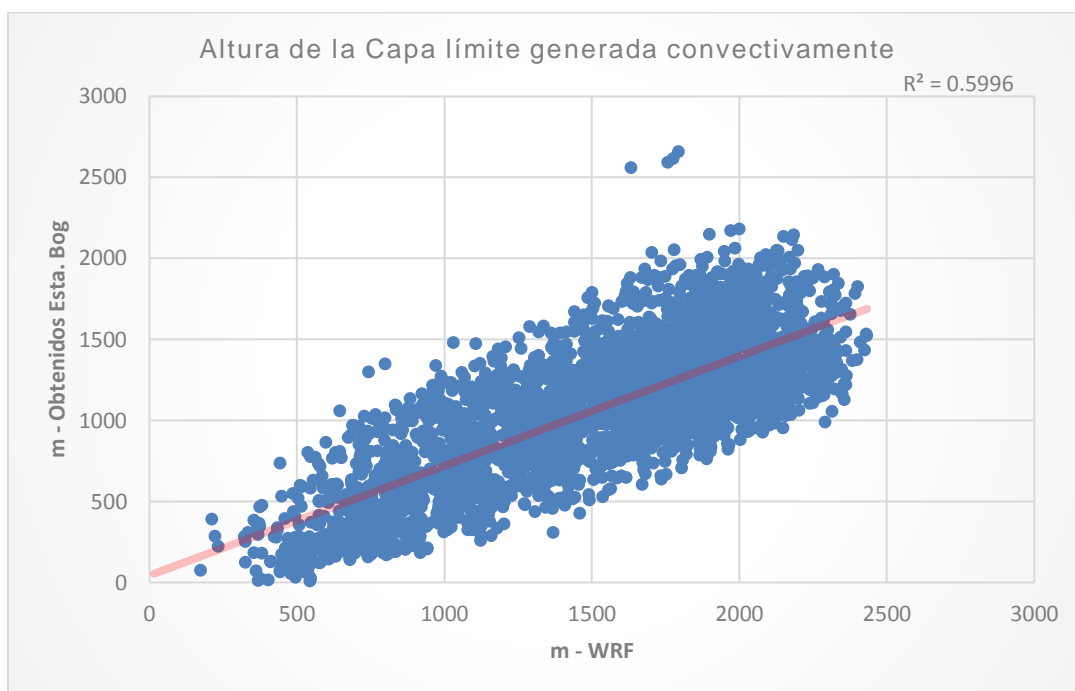
Figura 16 Altura de la capa límite convectiva (2015-01-07)



(Datos graficados: Enero 7 de 2015)

Fuente: El autor. 2017

Figura 17 Altura de la capa límite convectiva 2015



Fuente: El autor. 2017

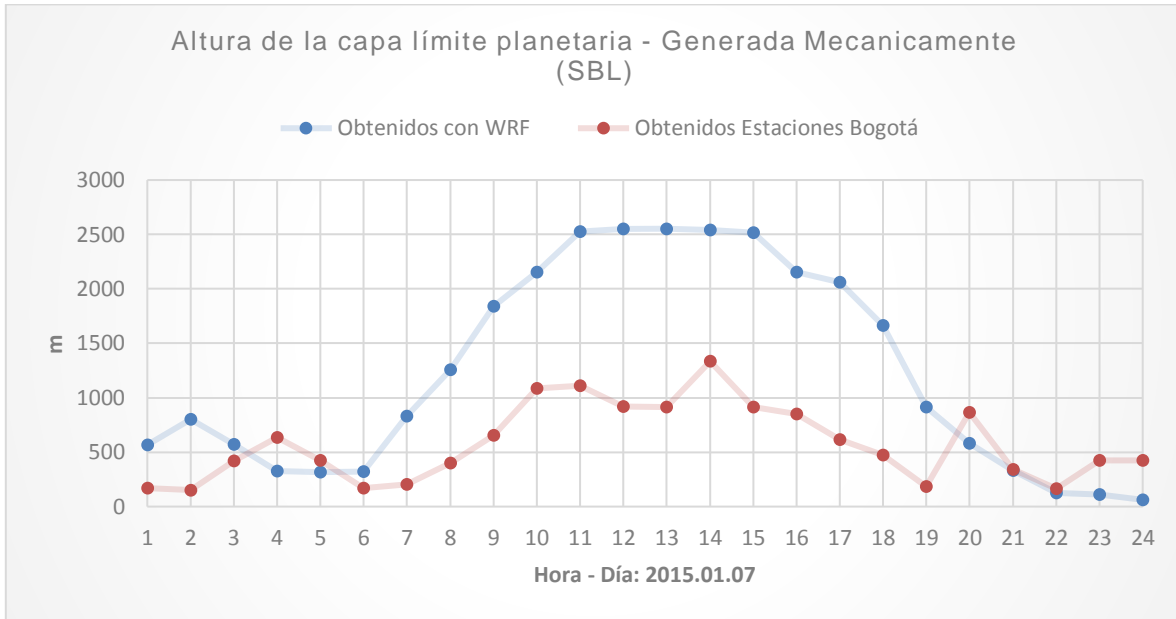
Los resultados obtenidos para la altura de la capa límite mecánica presentan una correlación muy baja entre las series de datos, de otra parte, se observa una gran diferencia entre ellos con respecto a la profundidad promedio de la capa mecánica. En ambas fuentes de datos se puede observar que existe una variación entre 0 y 4000 m, sin embargo, el valor promedio de la capa mecánica obtenida con los datos de las estaciones de Bogotá es 412 m inferior a la obtenida con WRF. En la Figura 18 se presenta el comportamiento característico de esta capa en 24 horas. En la Figura 19 se presenta el gráfico de dispersión.

Tabla 17 Comparación de las series de datos de la altura de la capa límite mecánica

ESTADISTICOS	ALTURA CAPA LÍMITE GENERADA MECÁNICAMENTE (m)	
	WRF	BOG
PROMEDIO	961,56	541,60
MAX	4000	4000
MIN	22	22
Coeficiente de correlación	0,4299	
R2	0,1848	

Fuente: El autor. 2017

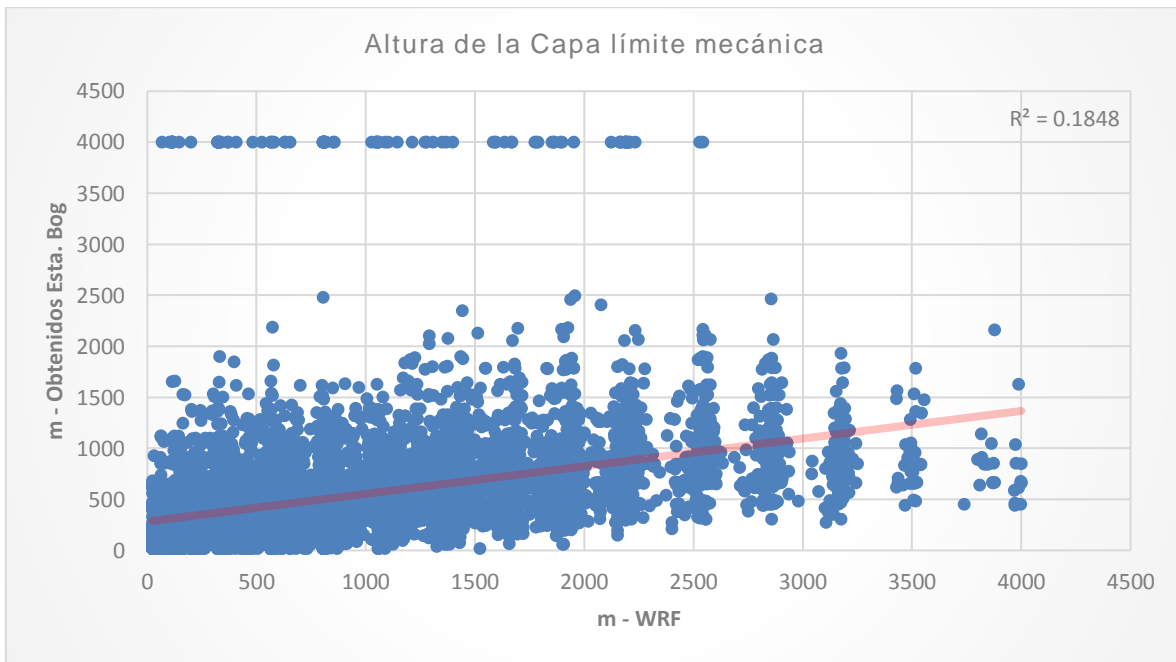
Figura 18 Altura de la capa límite mecánica (2015-01-07)



(Datos graficados: Enero 7 de 2015)

Fuente: El autor. 2017

Figura 19 Altura de la capa límite mecánica 2015



Fuente: El autor. 2017

Capítulo 5. Modelación de calidad de aire en la ciudad de Bogotá con fuentes de emisión hipotéticas

5.1 Descripción de las fuentes modeladas

Para la modelación se utilizaron tres tipos diferentes de fuentes de emisión. Una fuente fija puntual (chimenea), una fuente lineal de área (vía) y una fuente de área (acopio), en el que se simula la operación de un proyecto termoeléctrico. A continuación, se presentan las características de las fuentes de emisión incluidas en AERMOD.

Figura 20 Características de la Fuente fija de emisión

Source Type
Type: POINT Source ID: STCK2
Description: Chimenea de termoelectrica (Optional)

Source Location
X Coordinate: 593075.62 [m]
Y Coordinate: 521371.03 [m]
Base Elevation: 2544.36 [m]
Release Height: 50.0 [m]

Source Release Parameters
Emission Rate: 100.0 [g/s]
Gas Exit Temperature: 350.0 [K] Fixed Ambient Above Ambient
Stack Inside Diameter: 2.0 [m]
Gas Exit Velocity: 35.0 [m/s]
Gas Exit Flow Rate: 109.9557 [m³/s]

Fuente: El autor con uso del modelo AERMOD VIEW (9.0.0). 2017

Figura 21 Características de la Fuente lineal de área

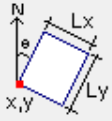
Source Type
Type: LINE AREA Source ID: ARLN1 Source ID Prefix:
Description: Via de acceso descarga Carbón (Optional)

Line Source Parameters (Represented by Area Sources)
Length of Side: 9.0 [m]
Initial Vertical Dimension: 2.37 [m] (Optional)
Emission Rate: 9.427E-06 [g/sec-m²] 0.1 [g/s]
Ratio 1: 10 Total Length [m]: 1178.6

Fuente: El autor con uso del modelo AERMOD VIEW (9.0.0). 2017

Figura 22 Características de la Fuente de área

Source Type	
Type: AREA	Source ID: AREA1
Description: Pila de almacenamiento de carbón	(Optional)
Source Location	
X Coordinate:	593038.92 [m]
Y Coordinate:	521069.44 [m]
Base Elevation:	2543.9 [m]
Release Height:	15.0 [m]
Source Release Parameters	
Emission Rate:	1.16E-06 [g/sec-m ²]
Length of the X Side:	504.24 [m]
Length of the Y Side:	170.92 [m]
Orientation Angle from North:	-143.493 [deg]
Initial Vertical Dimension:	[m] (Optional)



Fuente: El autor con uso del modelo AERMOD VIEW (9.0.0). 2017

5.2 Localización de las fuentes de emisión

Como se mencionó antes, el ejercicio de modelación consiste en una industria hipotética que funcionaría en un lote en la parte norte del aeropuerto El Dorado. En la Figura 23 se puede identificar una fuente puntual o chimenea, una fuente lineal o vía de acceso y una fuente de área o sitio de acopio de materia prima generadoras de emisiones de PM10. Las fuentes están georreferenciadas en el modelo.

Figura 23 Localización de las fuentes de emisión



Fuente: Imagen de Google Earth. Editada por el autor. 2017

5.3 Análisis de variación de resultados a diferente espaciamiento de grilla

Para conocer la variación de las concentraciones, se efectuaron simulaciones con las mismas condiciones de las fuentes de emisión, pero con variación en los espaciamientos de grilla (esto es cada 100, 150, 200, 250, 300, 400 y 500 m de distancia). La comparación, se realizó a partir de un perfil de concentraciones en sentido Este-Oeste entre las coordenadas X1: 596.047,8 Y1: 521522,8 y X2: 588878,2 Y2: 521532,1. En este perfil se obtuvieron 73 receptores ubicados en línea recta o puntos para determinar la concentración de PM10, en una longitud de 7169,6 m.

Tabla 18 Tiempos de simulación para cada una de las grillas seleccionadas

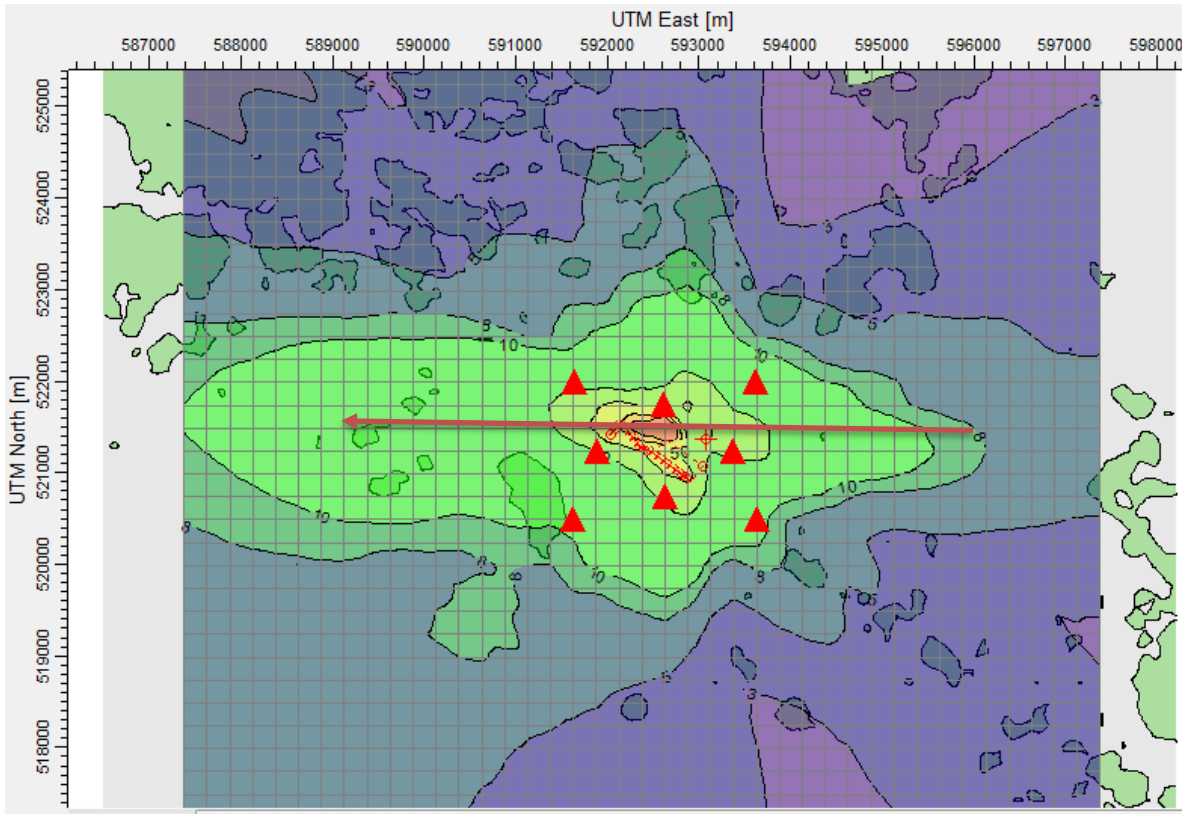
ESPACIAMIENTO DE GRILLA (m)	DURACIÓN DE LA SIMULACIÓN*	ARCHIVO DE ENTRADA	ARCHIVO DE SALIDA
500	00:11:53	EIDorado_500.ADI	EIDorado_500.ADO
400	00:18:33	EIDorado_400.ADI	EIDorado_400.ADO
300	00:31:46	EIDorado_300.ADI	EIDorado_300.ADO
250	00:44:53	EIDorado_250.ADI	EIDorado_250.ADO
200	01:10:02	EIDorado_200.ADI	EIDorado_200.ADO
150	02:06:12	EIDorado_150.ADI	EIDorado_150.ADO
100	04:35:51	EIDorado_100.ADI	EIDorado_100.ADO
250+Discretos	00:46:53	EIDorado250_Disc.ADI	EIDorado250_Disc.ADO

*Tiempos obtenidos en un computador con procesador Intel Core i5-3317U 1,7 GHz. Ram 6GB.

Fuente: El autor. 2017

Para la grilla seleccionada (250m), se establecieron además 8 receptores discretos distribuidos de manera ordenada, con el fin de observar si esto generaba algún cambio en las concentraciones máximas, respecto al mismo escenario con grilla de 250 m pero sin receptores discretos.

Figura 24 Representación del perfil para la obtención de concentraciones de PM10



Perfil: X1: 596.047,8 Y1: 521522,8 y X2: 588878,2 Y2: 521532,1.

Fuente: El autor con uso del modelo AERMOD VIEW 9.0.0. 2017

Tabla 19 Descripción de los resultados obtenidos para cada una de las grillas de modelación

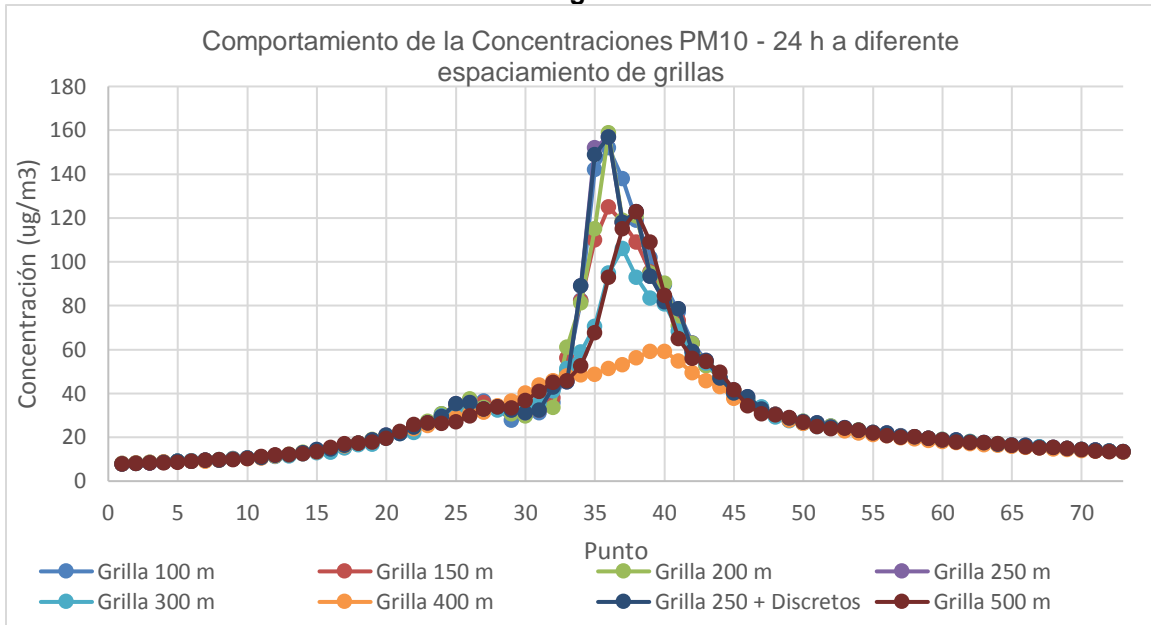
DESCRIPCIÓN	GRILLA 10 Km x 10 Km							
	100x100	150x150	200x200	250x250	250x250 + Discretos	300x300	400x400	500x500
Espacio (m)	100x100	150x150	200x200	250x250	250x250 + Discretos	300x300	400x400	500x500
No. de Nodos	10201	4624	2601	1681	1681 + 8	1156	676	441
Concentración Máx. 24h ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	164,58	173,94	164,58	166,97	166,97	111,74	67,17	124,26
Concentración Máx. Anual ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)	35,79	30,08	35,79	26,66	26,66	28,33	20,39	20,04
Coordenada Concentración Máx. 24h (E,N)	592580 521486	592630 521436	592580 521486	592630 521486	592630 521486	592480 521586	592180 521686	592380 521486
Coordenada Concentración Máx. Anual (E,N)	592180 521486	592330 521286	592580 521486	592630 521486	592630 521486	592780 520986	592580 521286	592380 521486

Fuente: El autor. 2017

En la Figura 25 se presentan los resultados del modelo para PM10 24 horas en cada una de las grillas seleccionadas. Mientras que en la Figura 26 se presentan los resultados de PM10 anuales.

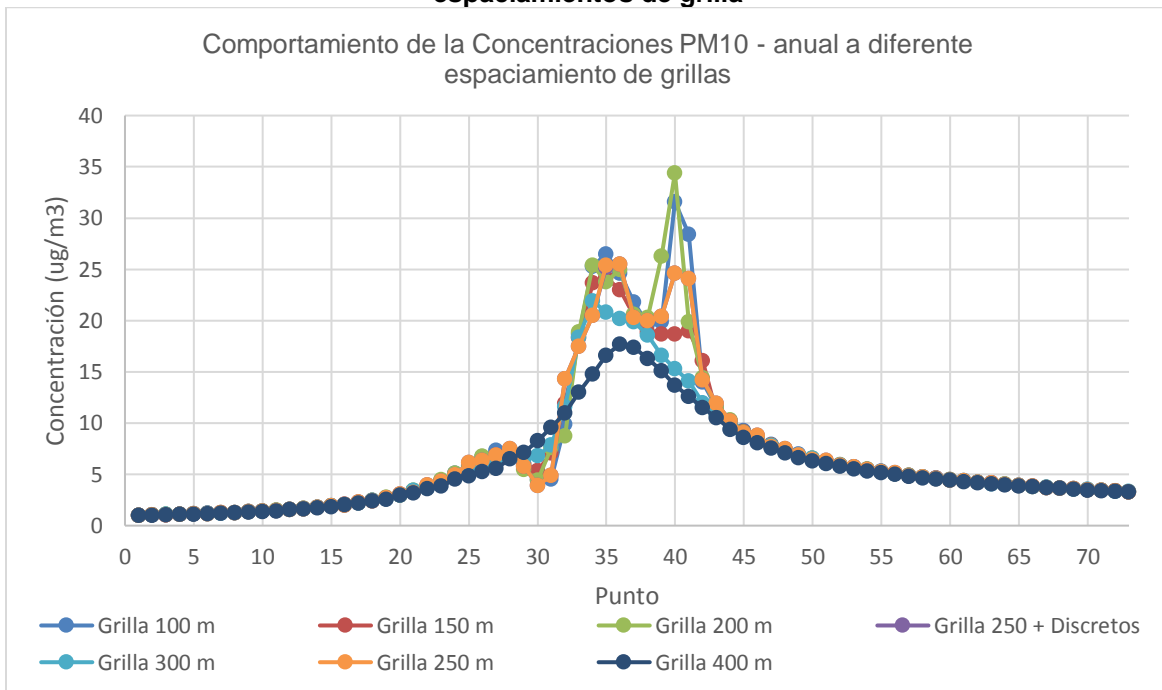
Con base en los resultados obtenidos para cada una de las grillas, se pudo observar que las grillas con espaciamiento de 300, 400 y 500 m de distancia generan una subestimación de las concentraciones obtenidas respecto a las demás grillas. Las grillas entre 100 y 250 m de distancia dan resultados que se acercan entre sí a la concentración máxima del perfil.

Figura 25 Comportamiento de las concentraciones de PM10 24 h a diferente espaciamiento de grilla



Fuente: El autor. 2017

Figura 26 Comportamiento de las concentraciones de PM10 Anual a diferentes espaciamientos de grilla

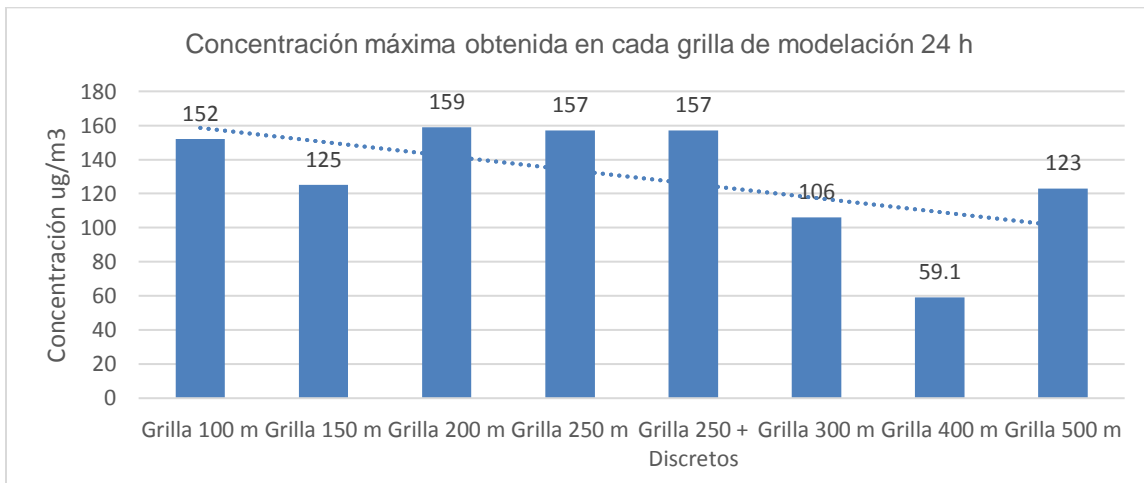


Fuente: El autor. 2017

En la Figura 27 se presentan los resultados de la concentración máxima de PM10 24 horas obtenida en cada uno de los perfiles de las grillas en estudio. La concentración más alta para los perfiles de las grillas de 100, 150, 200 y 250 m se obtuvieron en el punto 36 que corresponde a la coordenada X: 592.562,6 Y: 521.527,3. La concentración máxima para el perfil de la grilla de 300 m se obtuvo en el punto 37, para la grilla de 400 m en el punto 40 y para la grilla de 500 m en el punto 38.

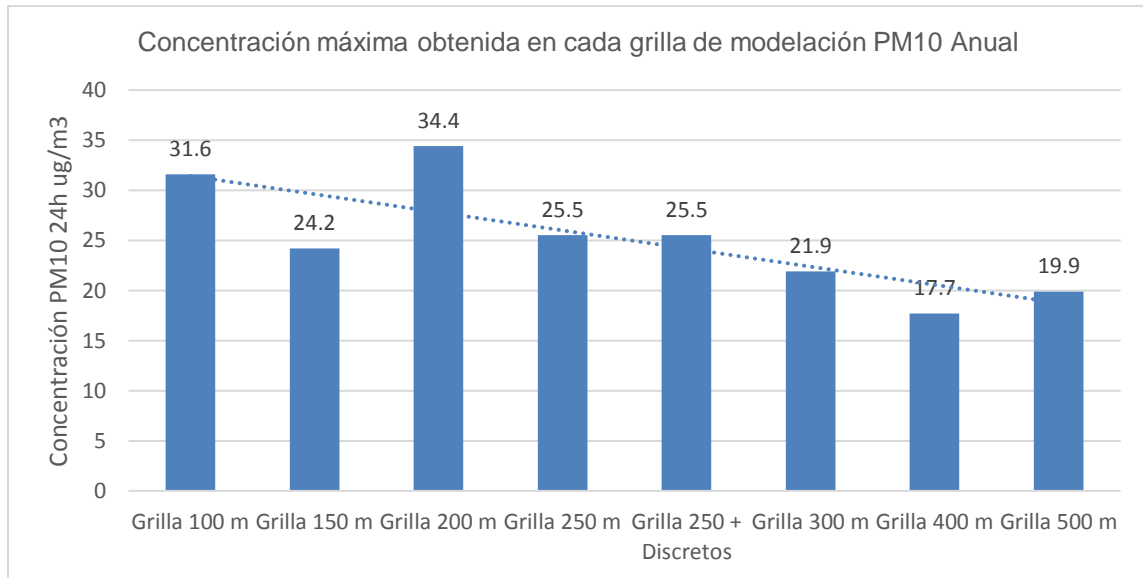
En la Figura 28 se presentan los resultados de las concentraciones máximas de PM10 anual obtenidas en cada uno de los perfiles. En la grilla de 100 y 200 m el valor máximo se alcanza en el punto 40 (X:592.164,3 Y:521.527,8), para la grilla de 150 el valor máximo se alcanza en el punto 35 (X: 592.662,2 Y: 521.527,2), para la grilla de 250 m el valor máximo se alcanza en el punto 35 y 36 (X: 592.562,6 Y: 521.527,3), para la grilla de 250 m incluido receptores discretos el valor máximo se alcanza solo en el punto 36, para la grilla de 300 m el valor máximo se alcanza en el punto 34 (X: 592.761,7 Y: 521.527,1), para la grilla de 400 m el valor máximo se alcanza en el punto 36 y finalmente para la grilla de 500 m en el punto 38 (X: 592363,4 Y: 521527,6).

Figura 27 Concentración máxima obtenida en el perfil de cada grilla de modelación valores 24 h de PM10



Fuente: El autor. 2017

Figura 28 Concentración máxima obtenida en el perfil de cada grilla de modelación valores anuales de PM10



Fuente: El autor. 2017

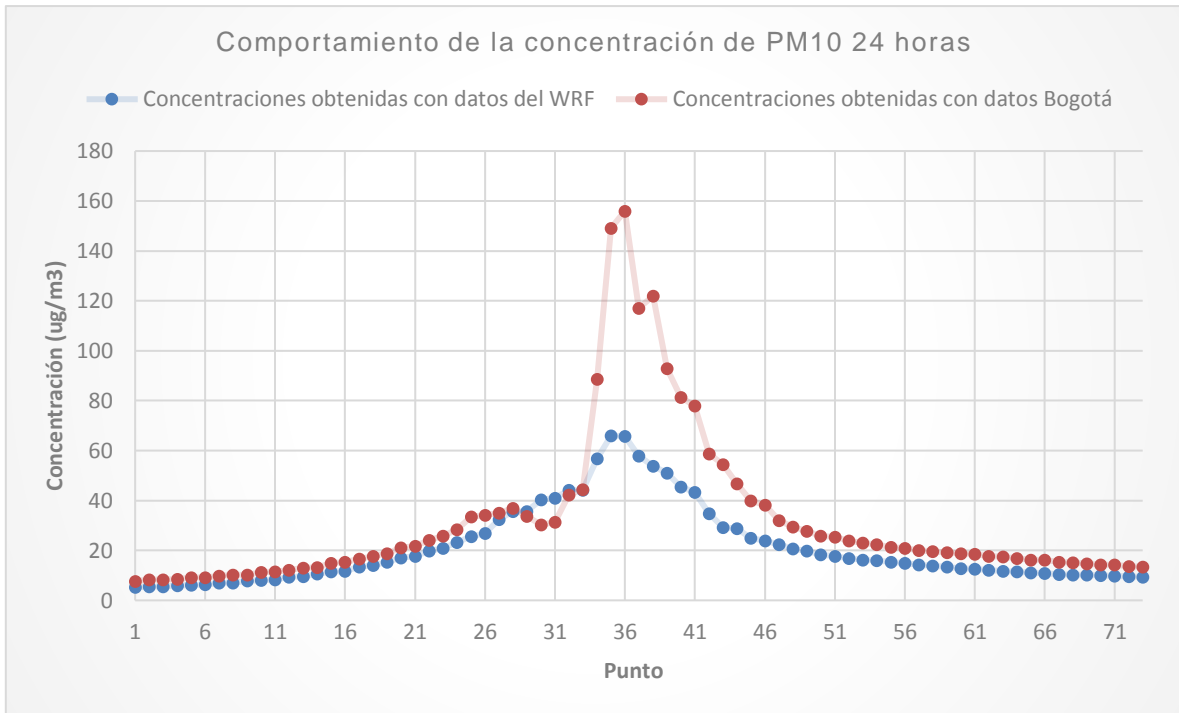
Entre la grilla de 100 y 250 m se observa una menor variabilidad de los resultados obtenidos, por lo tanto, se escoge la grilla con espaciamento de 250 m para efectuar la modelación con los datos meteorológicos de las dos fuentes en estudio. Con esta grilla, se obtienen menores tiempos de modelación (alrededor de 45 min) en comparación con la grilla de 100 m, donde los tiempos de modelación son de más de 4 horas.

5.4 Comparación de los resultados del modelo de dispersión de PM10 con información meteorológica construida y obtenida de WRF

5.4.1 Resultados obtenidos en el perfil E-W

En la Figura 29 se presentan las concentraciones en el perfil establecido previamente para la definición de la grilla de modelación. En esta oportunidad, se hace una comparación de los resultados obtenidos con los archivos meteorológicos construidos a partir de la información meteorológica de las estaciones de Bogotá (Las Ferias y El dorado), contra los resultados obtenidos a partir de los archivos generados por METEOCOLOMBIA S.A.S a partir del modelo WRF. En la gráfica se puede observar una gran diferencia en las concentraciones máximas obtenidas, las cuales se localizan cerca de las fuentes de emisión (punto 36). Con la información construida a partir de la metodología propuesta, en el perfil en evaluación se obtiene un valor máximo de $156 \mu\text{g}/\text{m}^3$ mientras que con la información proveniente de WRF, se alcanza un valor máximo de $65,9 \mu\text{g}/\text{m}^3$, esto quiere decir que con la metodología propuesta las concentraciones máximas se incrementan 236%. Las demás concentraciones son muy similares a medida que se alejan de la fuente de emisión.

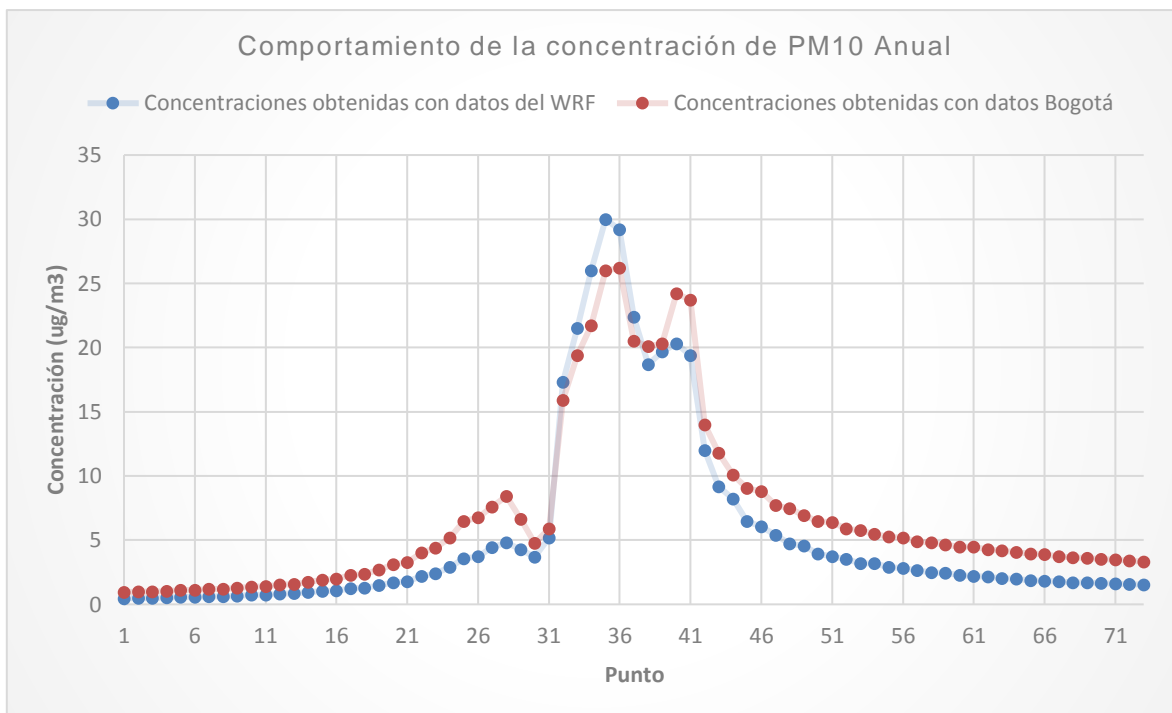
Figura 29 Comparación del comportamiento de las concentraciones de PM10 24 h entre las dos fuentes de estudio



Fuente: El autor. 2017

En la Figura 30 se presenta el perfil de concentraciones para los resultados anuales. En esta gráfica se puede observar que las concentraciones obtenidas son muy similares para las dos fuentes de datos. En esta oportunidad, el valor máximo se obtiene con los datos de WRF, sin embargo, estos se encuentran 11% por encima del valor máximo obtenido con el método propuesto. Mientras que, en las concentraciones bajas del perfil, se observa que los valores obtenidos a partir del método propuesto están por encima de los valores obtenidos con WRF.

Figura 30 Comparación del comportamiento de las concentraciones de PM10 anual entre las dos fuentes de estudio



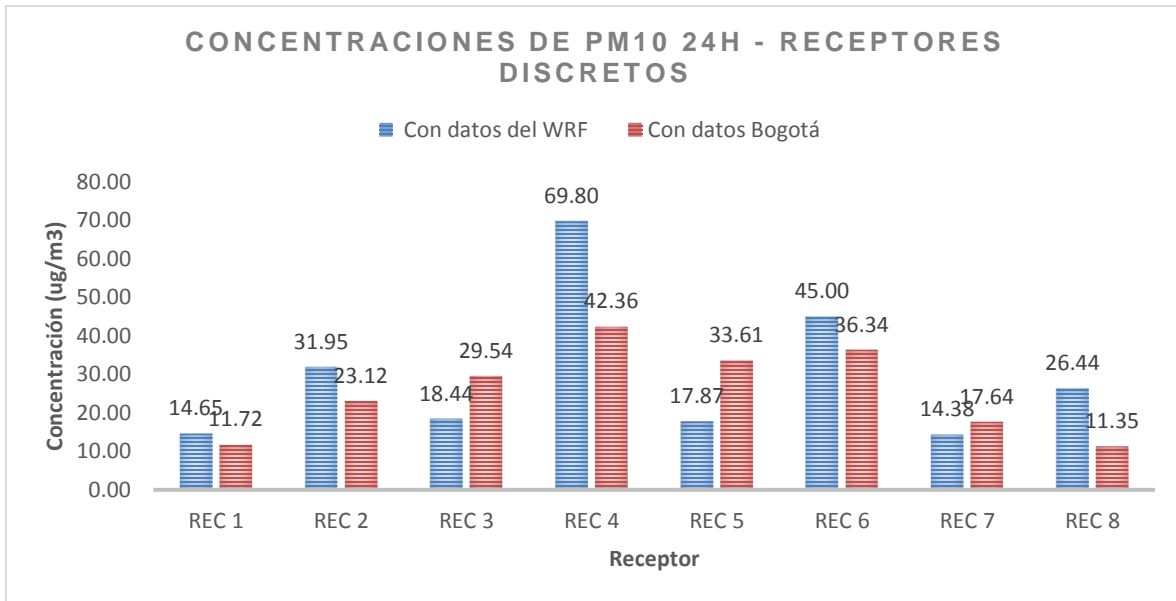
Fuente: El autor. 2017

5.4.2 Resultados obtenidos en receptores discretos

Con el fin de evaluar las concentraciones en puntos específicos, se definieron 8 receptores discretos ubicados alrededor de las fuentes de emisión de manera ordenada. En la Figura 31 se puede observar los resultados obtenidos en cada uno de ellos. En los receptores 1,2,4,6 y 8 las concentraciones obtenidas con WRF son más altas, mientras que en los receptores 3,5 y 7 las concentraciones más altas son obtenidas con datos del método propuesto. En este sentido, las diferencias están asociadas al comportamiento de la pluma de dispersión frente a los receptores.

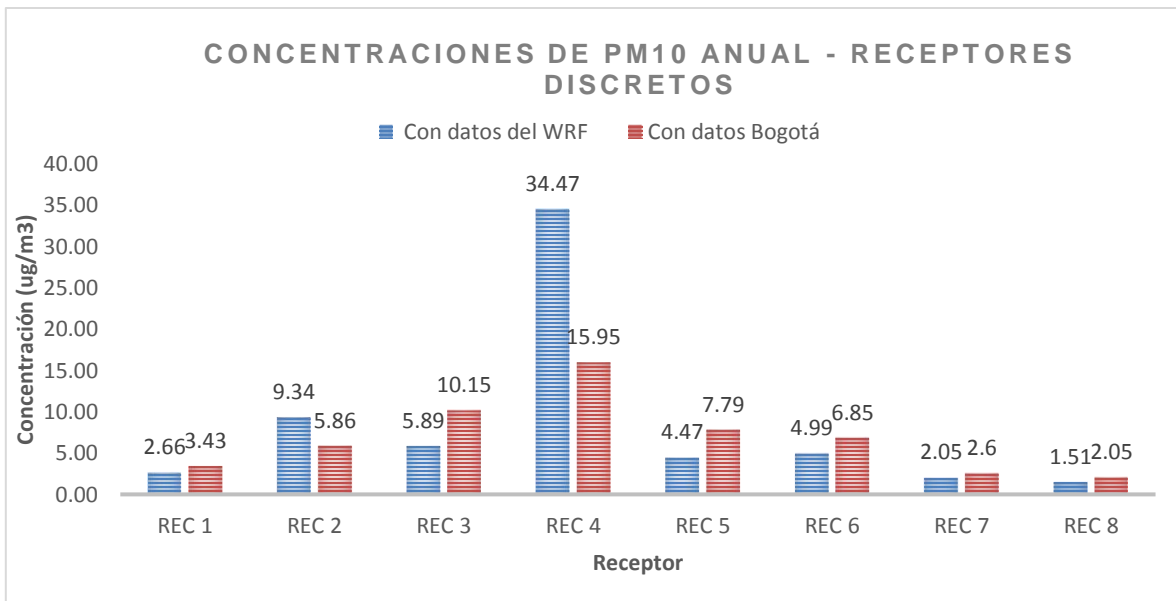
En la Figura 32 se presentan los resultados anuales para los 8 receptores. Allí se puede observar que las concentraciones anuales en los receptores 1,3,5,6, 7 y 8 son más altas para los datos del método propio, mientras que en los receptores 2 y 4 las concentraciones más altas se obtienen con WRF.

Figura 31 Comparación de las concentraciones de PM10 24 h para los receptores discretos entre las dos fuentes de estudio



Fuente: El autor. 2017

Figura 32 Comparación de las concentraciones de PM10 anual para los receptores discretos entre las dos fuentes de estudio



Fuente: El autor. 2017

5.4.3 Resultados obtenidos en las isopletas o pluma de dispersión

Con el fin de entender el comportamiento de los resultados anteriores, es necesario evaluar espacialmente el comportamiento de la pluma y la localización de los receptores. La flecha roja en las gráficas representa la dirección del perfil de concentraciones de PM10.

5.4.3.1 Resultados para PM10 24 horas

En la Figura 33 se observa una dispersión en todas las direcciones con mayor amplitud en la isopleta de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la dirección W, seguida de la isopleta de $8 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en las direcciones W y SW. Las isopletas entre 20 y $167 \mu\text{g}/\text{m}^3$ se localizan muy cerca de las fuentes de emisión con una menor cobertura. Como se puede observar en el perfil de la Figura 37, a 1 km de distancia de la concentración máxima de PM10, se obtienen valores por debajo de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$. En la Figura 35 se observa la localización de los receptores discretos frente a la pluma de dispersión. Nótese que a pesar de que los receptores 3,4,5 y 6 se encuentra cerca de las fuentes de emisión, no se ven afectados por las altas concentraciones de PM10 debido a que ellas decrecen rápidamente con la distancia.

Por otro lado, en los resultados de las concentraciones obtenidas con WRF se observa una mayor amplitud de la isopleta de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en la dirección SSW y en menor proporción en la dirección W. También se puede observar que hay dispersión en todos los sentidos. En este caso, las concentraciones máximas llegan a $70 \mu\text{g}/\text{m}^3$. Sin embargo, como se observa en la Figura 36, el receptor 4 se encuentra dentro del cono de dispersión de mayor concentración, razón por la cual se observa una gran diferencia en comparación con los resultados obtenidos para el mismo punto con los datos del método propuesto. Al analizar el perfil de concentraciones en la dirección predominante del viento, se observa que las concentraciones caen rápidamente a valores por debajo de $40 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a 500 m de distancia del valor máximo. En este sentido, la extensión del impacto es menor en comparación con los resultados del método propuesto.

Figura 33 Pluma de dispersión – PM10 24 horas con datos de estaciones Bogotá

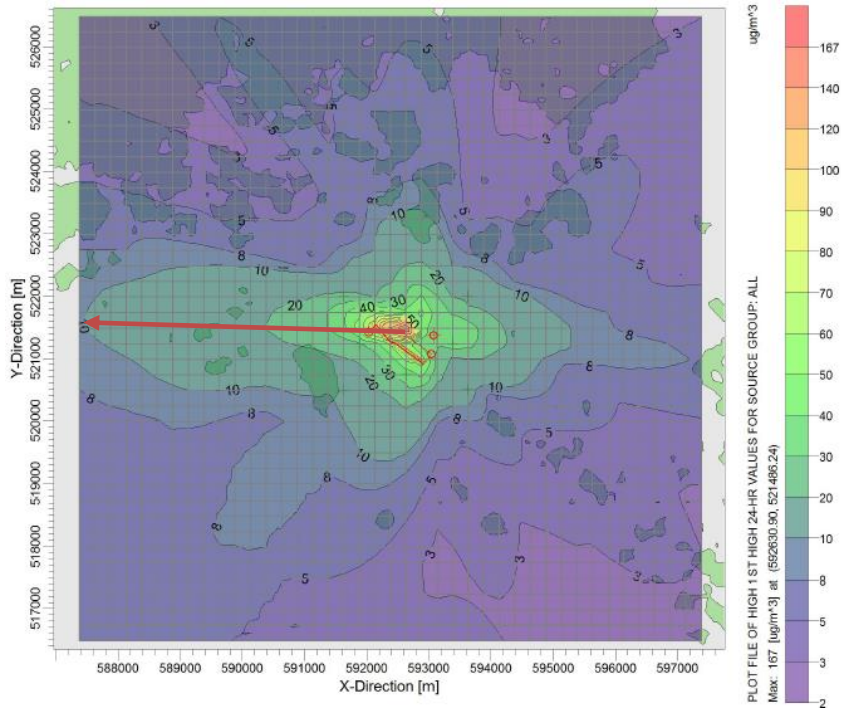
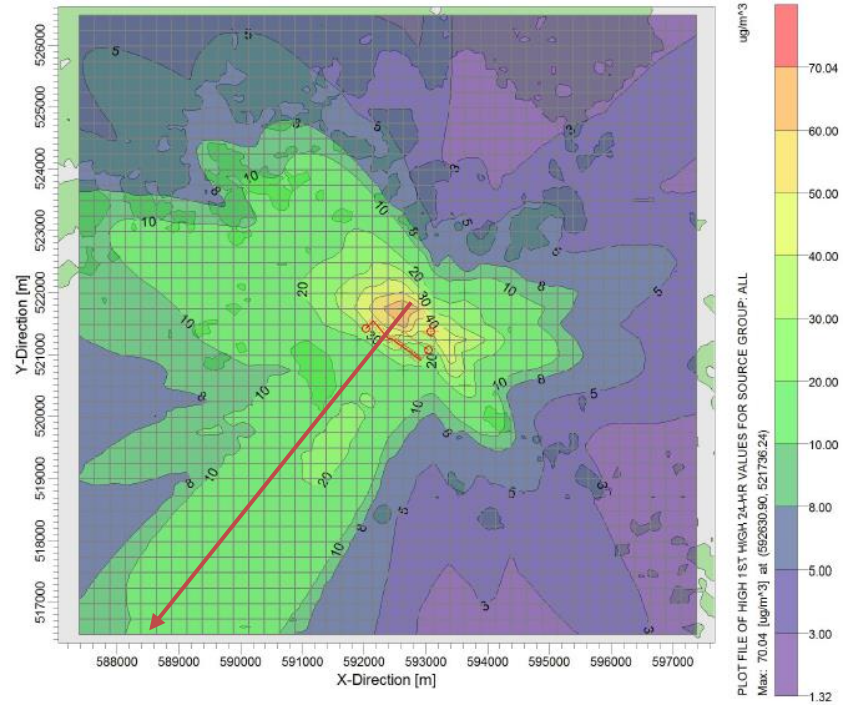


Figura 34 Pluma de dispersión – PM10 24 horas con datos de WRF



Fuente: El autor con uso del modelo AERMOD VIEW 9.0.0. 2017

Figura 35 Pluma de dispersión y localización receptores discretos – PM10 24 h con datos de estaciones Bogotá

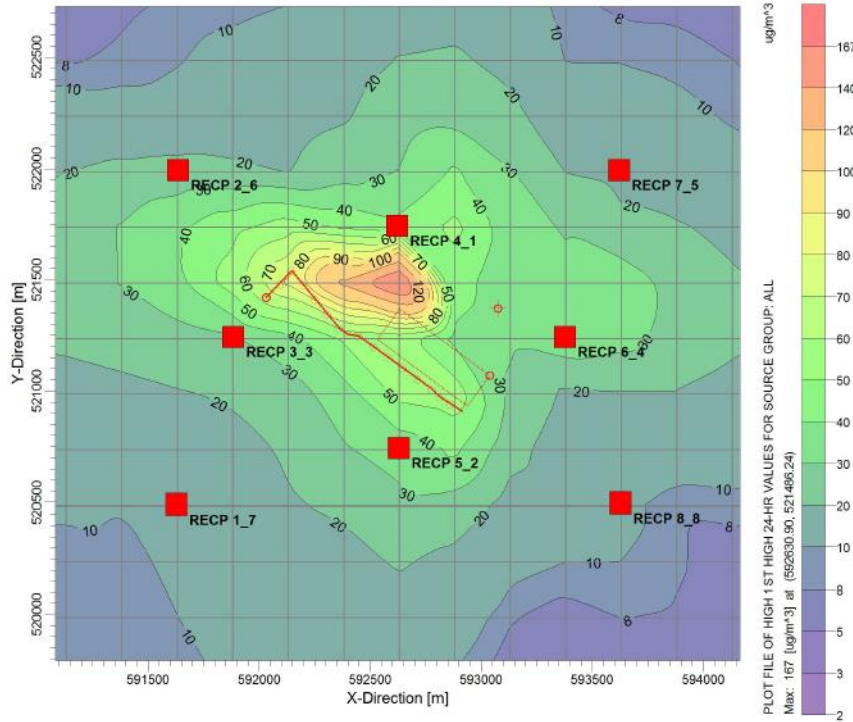
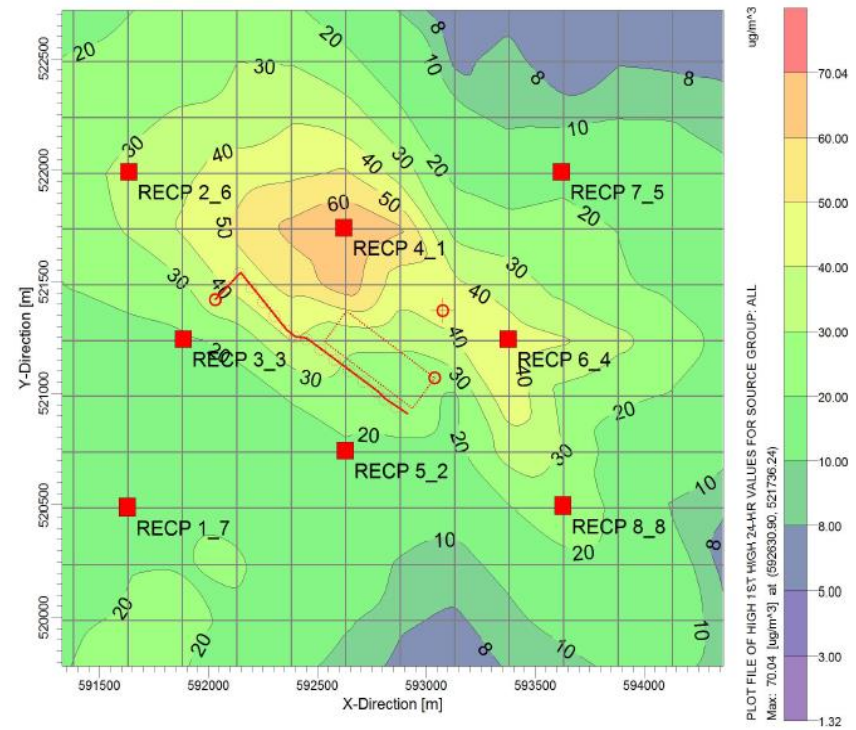


Figura 36 Pluma de dispersión y localización receptores discretos – PM10 24 h con datos de WRF

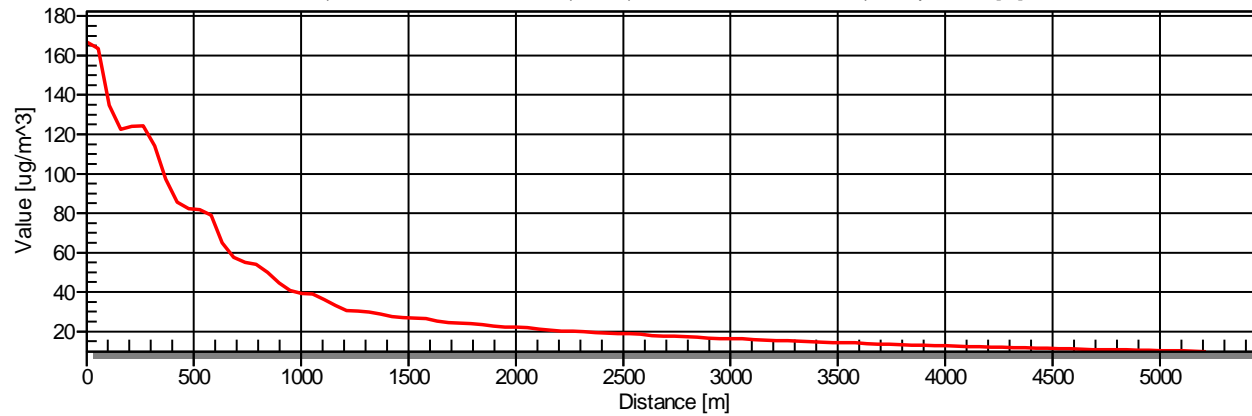


Fuente: El autor con uso del modelo AERMOD VIEW 9.0.0. 2017

Figura 37 Perfil de concentraciones en sentido W desde el nivel más alto de concentración datos Bogotá

PLOT FILE OF HIGH 1ST HIGH 24-HR VALUES FOR SOURCE GROUP: ALL

P1 (X: 592635.55 / Y:521493.73) - P2 (X:587423.38 / Y:521547.99) - Step: 52.65 [m]

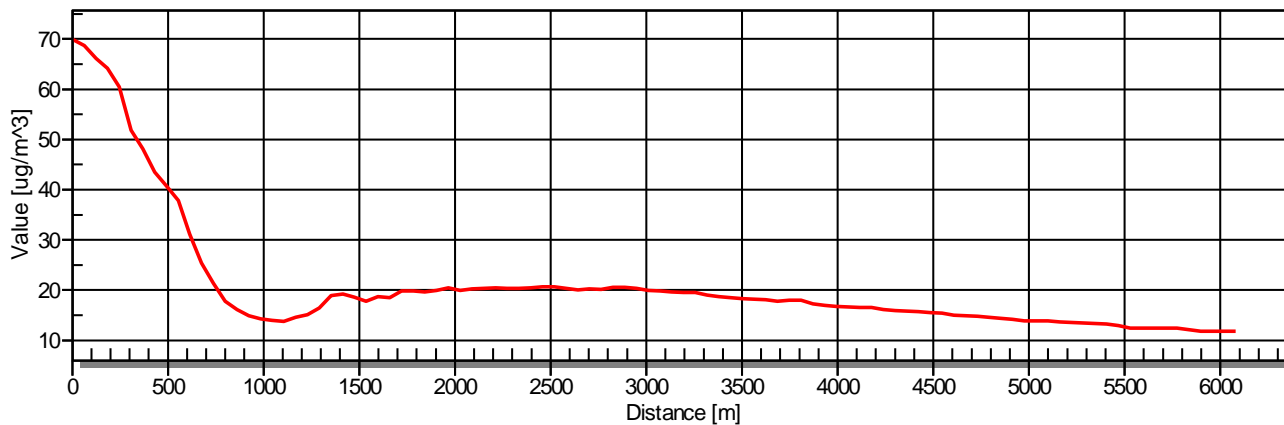


Fuente: El autor con uso del modelo AERMOD VIEW 9.0.0. 2017

Figura 38 Perfil de concentraciones en sentido SW desde el nivel más alto de concentración datos WRF

PLOT FILE OF HIGH 1ST HIGH 24-HR VALUES FOR SOURCE GROUP: ALL

P1 (X: 592635.18 / Y:521679.68) - P2 (X:589315.08 / Y:516586.54) - Step: 61.41 [m]



Fuente: El autor con uso del modelo AERMOD VIEW 9.0.0. 2017

En la Tabla 20 y en la Tabla 21 se puede observar la extensión del cono de dispersión para los diferentes intervalos de concentración obtenidos con cada una de las fuentes de datos. Para el caso del método propuesto a partir de los datos de las estaciones de Bogotá, las concentraciones entre 70 y 167 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ocupan el 0,24% del área de modelación, las concentraciones entre 3 y 5 ocupan el 31,15%, seguida de las concentraciones entre 5 y 8 con un 30,58%. Para el caso de los resultados obtenidos con WRF, las concentraciones entre 60 y 70 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ocupan el 0,13% del área de modelación. Las concentraciones con mayor cobertura se encuentran entre 3 y 5 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ocupando el 25,19% del área de modelación, seguida de las concentraciones entre 10 y 20 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ocupando el 22,43%.

Tabla 20 Cobertura de los intervalos de concentración generados por las isopletras del modelo con datos Bogotá 24 h

24h-Bogota			
NIVEL MÍNIMO $\mu\text{g}/\text{m}^3$	NIVEL MÁXIMO $\mu\text{g}/\text{m}^3$	ÁREA (ha)	%
2	3	1.201,1	12,01%
3	5	3.114,7	31,15%
5	8	3.058,5	30,58%
8	10	1.051,5	10,51%
10	20	1.128,6	11,29%
20	30	235,1	2,35%
30	40	111,0	1,11%
40	50	45,0	0,45%
50	60	22,7	0,23%
60	70	8,2	0,08%
70	80	6,2	0,06%
80	90	4,6	0,05%
90	100	3,6	0,04%
100	120	5,1	0,05%
120	140	2,8	0,03%
140	167	1,2	0,01%
TOTAL		10.000	100%

Fuente: El autor. 2017

Tabla 21 Cobertura de los intervalos de concentración generados por las isopletras del modelo con datos WRF 24 h

24h-WRF			
NIVEL MÍNIMO $\mu\text{g}/\text{m}^3$	NIVEL MÁXIMO $\mu\text{g}/\text{m}^3$	ÁREA (ha)	%
1	3	1.355	13,55%
3	5	2.519	25,19%
5	8	2.138	21,38%
8	10	1.255	12,55%
10	20	2.243	22,43%
20	30	295	2,95%
30	40	97	0,97%
40	50	60	0,60%
50	60	25	0,25%
60	70	13	0,13%
TOTAL		10.000	100%

Fuente: El autor. 2017

5.4.3.1 Resultados para PM10 anual

Respecto a las concentraciones de PM10 se puede observar que existe una mayor uniformidad en los resultados obtenidos, tanto en la forma de las isopletras como en los niveles de concentración obtenidos para las diferentes fuentes de datos meteorológicos.

En la Figura 39 se puede observar el cono de dispersión generado con los datos del método propuesto, en el gráfico se observa la dirección predominante W. En la Figura 40 se puede observar que la pluma de dispersión generada con WRF se dirige hacia WNW. Sin embargo, en este caso, las concentraciones máximas anuales son mayores con la fuente de datos de WRF. En cuanto a los receptores discretos, en los resultados obtenidos con WRF se observa que el receptor 4 es el más expuesto a las altas concentraciones de PM10, mientras que los demás receptores tienen concentraciones similares, todos menores a $10,5 \mu\text{g}/\text{m}^3$ en ambos casos.

Por otra parte, en los perfiles de concentración presentados en la Figura 43 y en la Figura 44 se puede observar en ambos casos que las concentraciones disminuyen rápidamente hasta un valor por debajo de $10 \mu\text{g}/\text{m}^3$ a 1500 m de distancia del valor máximo en cada uno de sus respectivas direcciones predominantes de dispersión.

Figura 39 Pluma de dispersión – PM10 anual con datos de estaciones Bogotá

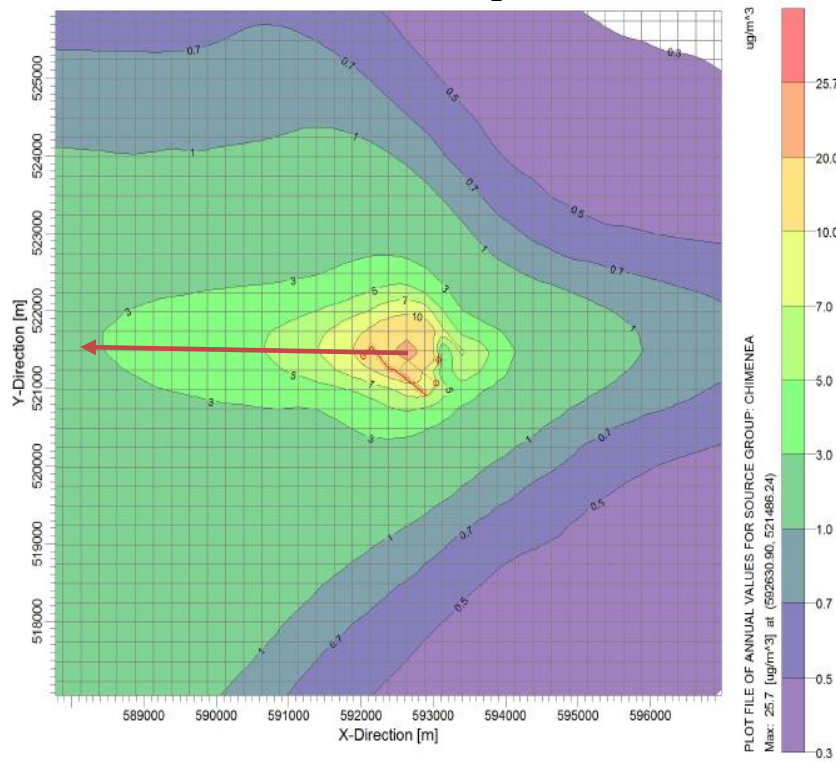
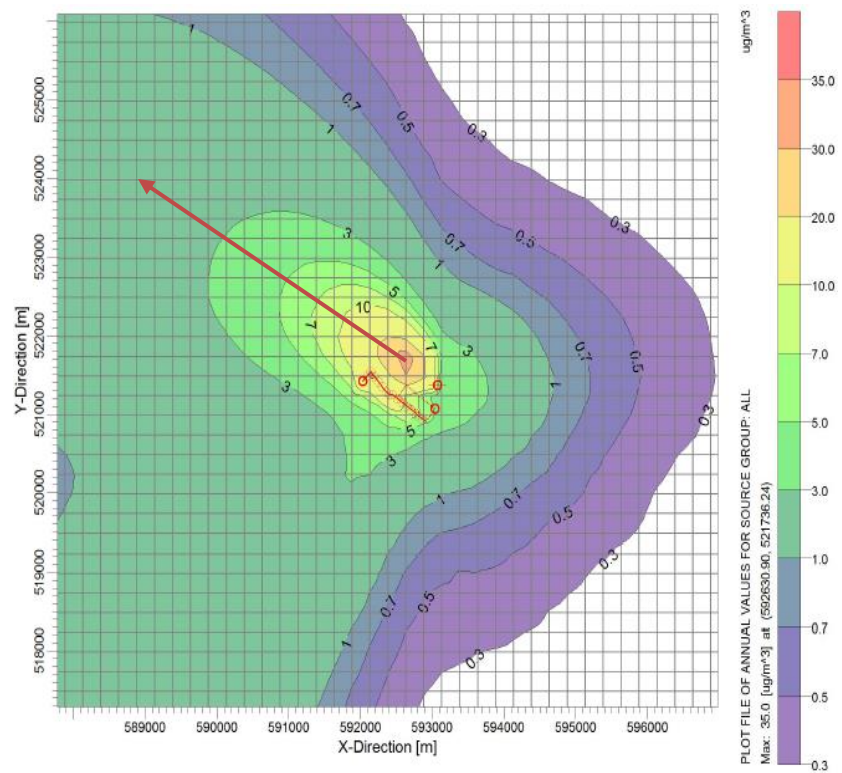


Figura 40 Pluma de dispersión – PM10 anual con datos de WRF



Fuente: El autor con uso del modelo AERMOD VIEW 9.0.0. 2017

Figura 41 Pluma de dispersión y localización receptores discretos – PM10 Anual con datos de estaciones Bogotá

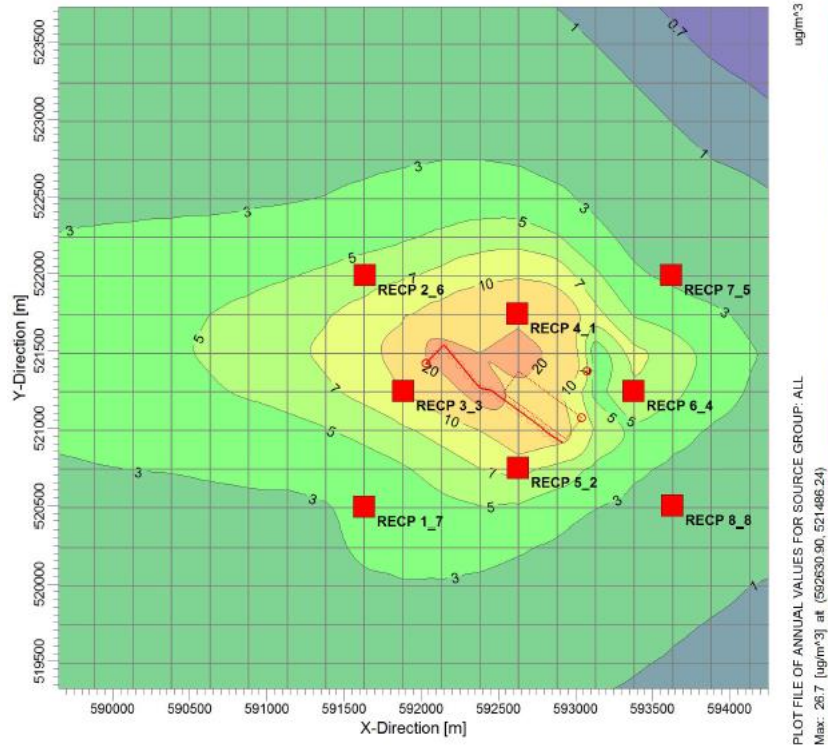
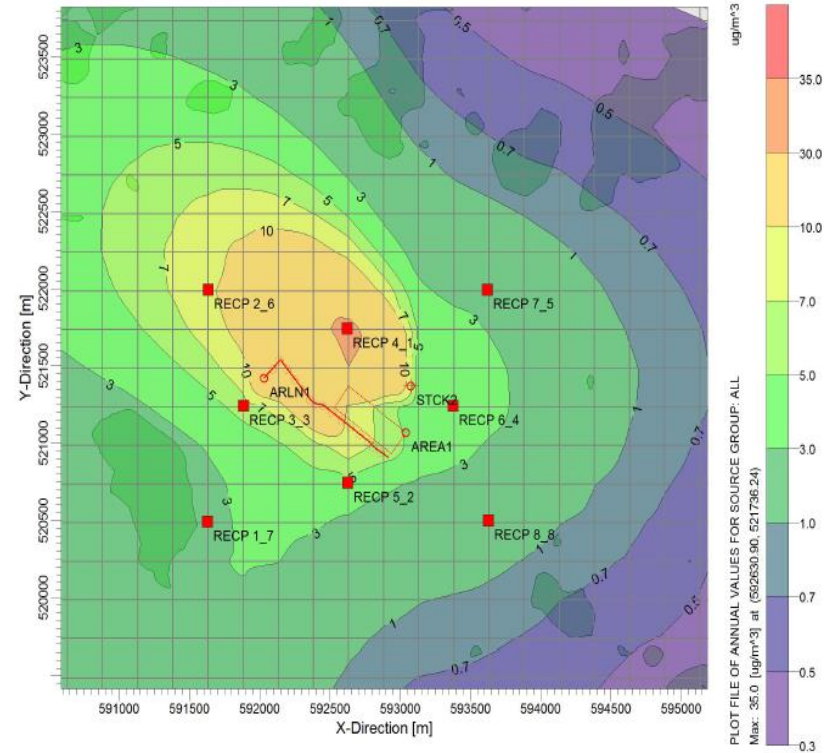
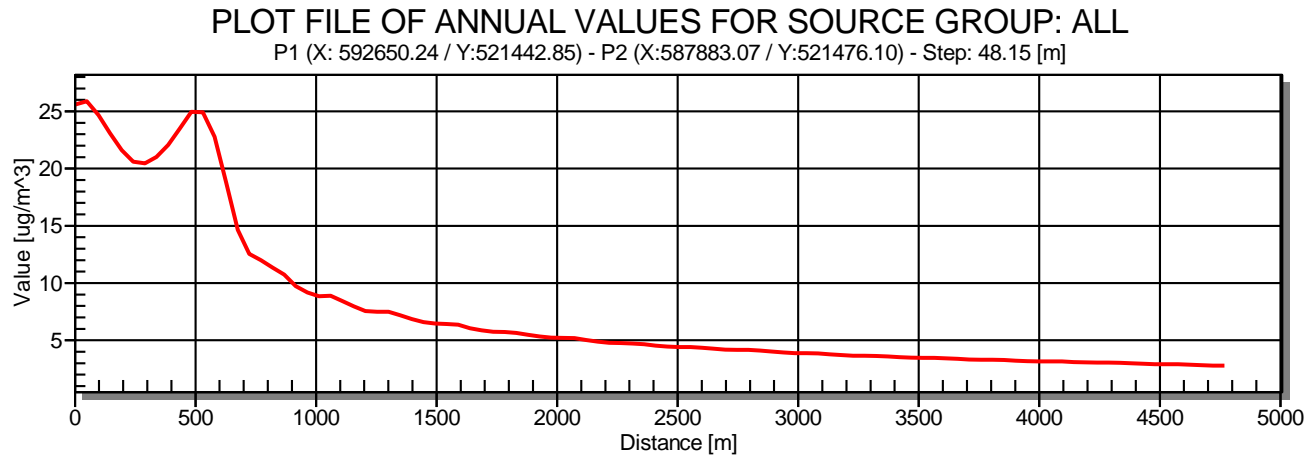


Figura 42 Pluma de dispersión y localización receptores discretos – PM10 Anual con datos WRF



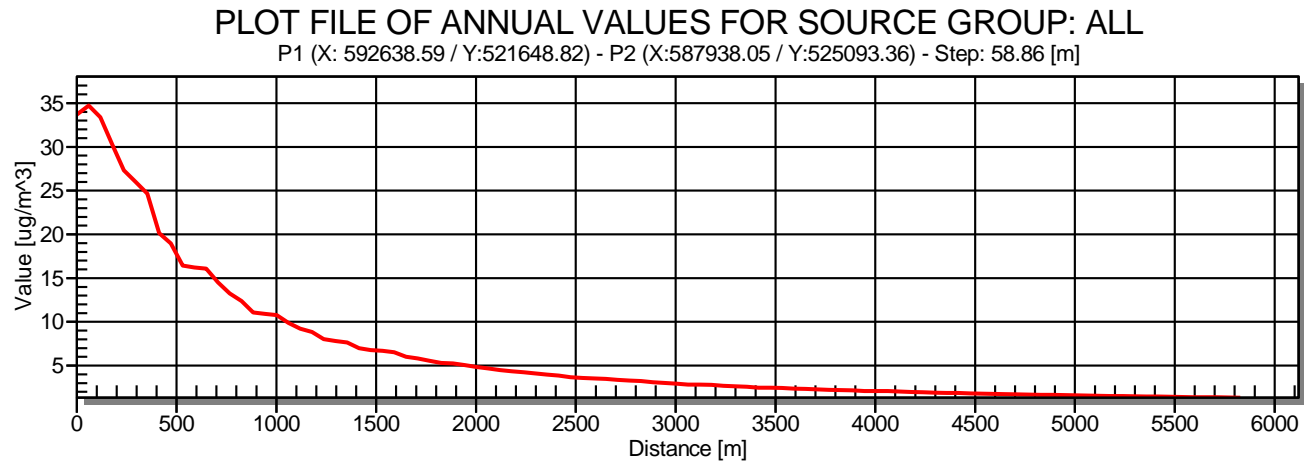
Fuente: El autor con uso del modelo AERMOD VIEW 9.0.0. 2017

Figura 43 Perfil de concentraciones en sentido W desde el nivel más alto de concentración datos Bogotá



Fuente: El autor con uso del modelo AERMOD VIEW 9.0.0. 2017

Figura 44 Perfil de concentraciones en sentido WNW desde el nivel más alto de concentración datos WRF



Fuente: El autor con uso del modelo AERMOD VIEW 9.0.0. 2017

En la Tabla 22 y en la Tabla 23 se puede observar la extensión del cono de dispersión para los diferentes intervalos de concentración obtenidos con cada una de las fuentes de datos. Para el caso del método propuesto a partir de los datos de las estaciones de Bogotá, las concentraciones anuales entre 0,3 y 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ocupan el 98,93% del área de modelación, mientras que las concentraciones superiores a 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ solo corresponden al 1,07% del área.

Para el caso de los resultados obtenidos con WRF, las concentraciones entre 0,3 y 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ocupan el 98,34% del área de modelación, mientras que las superiores a 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ ocupan solo el 1,66% del área.

En las dos tablas se puede observar que el área total de la pluma de dispersión es menor a 10.000 ha, lo anterior debido a que la influencia de la pluma no abarca toda la grilla de modelación.

Tabla 22 Cobertura de los intervalos de concentración generados por las isopletras del modelo con datos Bogotá - anual

Anual -Bogotá			
NIVEL MÍNIMO $\mu\text{g}/\text{m}^3$	NIVEL MÁXIMO $\mu\text{g}/\text{m}^3$	AREA (ha)	%
0,3	0,5	2.161	22,20%
0,5	0,7	1.461	15,02%
0,7	1	1.534	15,76%
1	3	3.598	36,97%
3	5	608	6,25%
5	7	176	1,81%
7	10	91	0,93%
10	20	83	0,85%
20	27	21	0,21%
TOTAL		9.732	100,00%

Fuente: El autor. 2017

Tabla 23 Cobertura de los intervalos de concentración generados por las isopletras del modelo con datos WRF - anual

Anual -WRF			
NIVEL MÍNIMO $\mu\text{g}/\text{m}^3$	NIVEL MÁXIMO $\mu\text{g}/\text{m}^3$	AREA (ha)	%
0,3	0,5	1.136	15,29%
0,5	0,7	714	9,61%
0,7	1	703	9,46%
1	3	4.130	55,58%
3	5	424	5,71%
5	7	122	1,65%
7	10	78	1,05%
10	30	119	1,60%
30	35	4	0,05%
TOTAL		7.432	100,00%

Fuente: El autor. 2017

5.5 Comparación de los resultados diarios del modelo en los Receptores discretos

Con el fin de analizar las diferencias entre los resultados obtenidos para el modelo con las dos fuentes de datos meteorológicos, se obtuvieron las concentraciones diarias en cada uno de los 8 receptores discretos definidos, esto es 365 datos en cada receptor, con el fin de establecer la variabilidad y la tendencia de los resultados.

En la Tabla 24 se presenta los resultados comparativos de los resultados obtenidos con los datos de Bogotá y los datos de WRF. Para cada receptor se presenta su localización, el promedio de las concentraciones diarias, la concentración máxima y mínima, la desviación estándar, la varianza y finalmente el coeficiente de correlación.

De acuerdo con los datos presentados en la tabla, se puede observar que los resultados obtenidos presentan una correlación positiva. La desviación estándar en cada uno de los receptores indica una buena uniformidad en los datos. Las diferencias presentadas entre los valores máximos y mínimos de cada fuente de datos se deben principalmente al comportamiento de la pluma de dispersión, la cual varía considerablemente para los resultados diarios, básicamente por las diferencias en las rosas de vientos. El receptor 4 es el que presenta mayor varianza debido a que es el más expuesto a las emisiones de las fuentes en estudio.

A continuación, de la Figura 45 a Figura 52 se presentan los gráficos de dispersión para los resultados diarios de PM10 obtenidos a partir de cada fuente de datos meteorológico.

Tabla 24 Resumen de los resultados diarios de PM10 para cada una de las Fuentes de datos

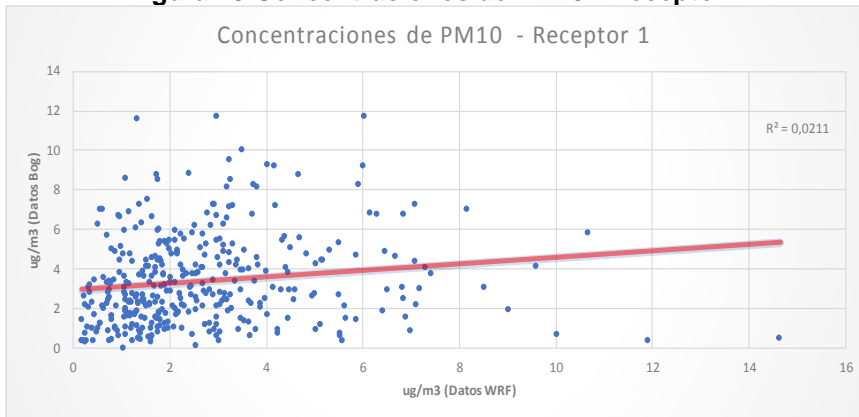
BOG	RECP. 1	RECP. 2	RECP. 3	RECP. 4	RECP. 5	RECP. 6	RECP. 7	RECP. 8
COORDENADA X	591628,51	591634,76	591884,64	592621,78	592628,03	593377,6	593621,29	593627,54
COORDENADA Y	520492,49	521991,76	521242,12	521741,88	520742,36	521242,12	521991,76	520498,73
PROMEDIO	3,38	5,71	9,97	15,47	7,70	6,72	2,55	2,01
MÁXIMO	11,72	23,12	29,54	42,36	33,61	36,34	17,64	11,35
MÍNIMO	0,001	0,000	0,869	0,001	0,002	0,000	0,000	0,000
DESV.ESTÁNDAR	2,26	4,01	5,82	9,96	5,93	6,04	2,06	1,66
VARIANZA	5,10	16,11	33,93	99,23	35,13	36,48	4,26	2,76

WRF	RECP. 1	RECP. 2	RECP. 3	RECP. 4	RECP. 5	RECP. 6	RECP. 7	RECP. 8
COORDENADA X	591628,51	591634,76	591884,64	592621,78	592628,03	593377,6	593621,29	593627,54
COORDENADA Y	520492,49	521991,76	521242,12	521741,88	520742,36	521242,12	521991,76	520498,73
PROMEDIO	2,67	9,31	5,90	34,38	4,49	5,06	2,06	1,52
MÁXIMO	14,65	31,95	18,44	69,80	17,87	45,00	14,38	26,44
MÍNIMO	0,184	0,229	0,453	1,019	0,675	0,515	0,554	0,391
DESV.ESTÁNDAR	2,01	5,11	3,19	13,44	2,95	6,71	2,33	1,99
VARIANZA	4,03	26,16	10,19	180,52	8,71	45,01	5,42	3,98

Coef. Correlación	0,6020	0,6019	0,6015	0,6025	0,6014	0,6017	0,6019	0,6017
-------------------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

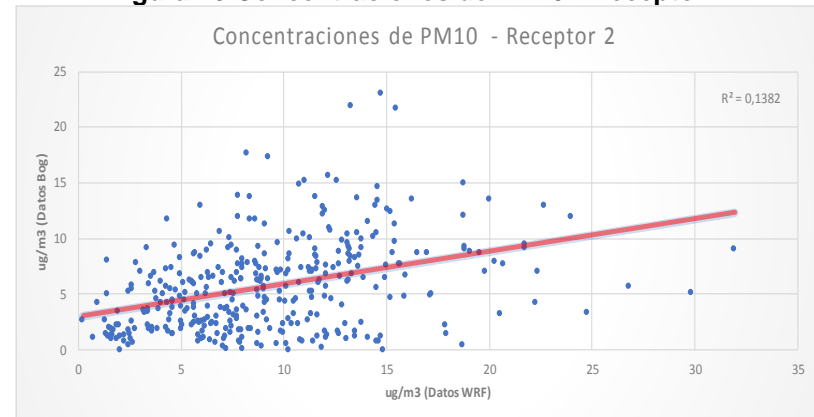
Fuente: El autor. 2017

Figura 45 Concentraciones de PM10 - Receptor 1



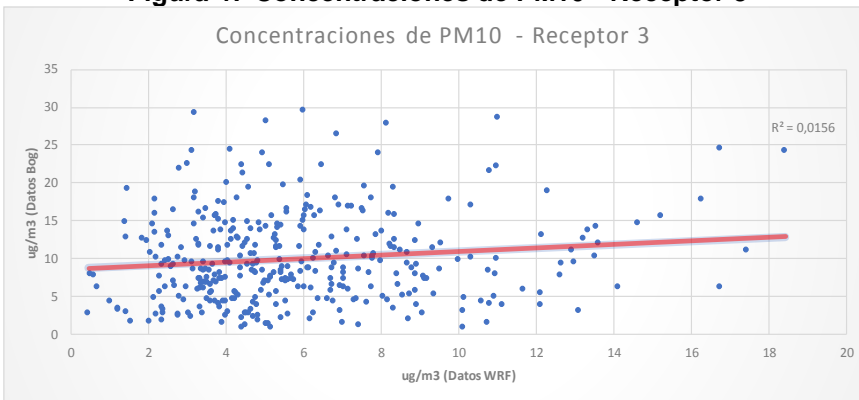
Fuente: El autor. 2017

Figura 46 Concentraciones de PM10 - Receptor 2



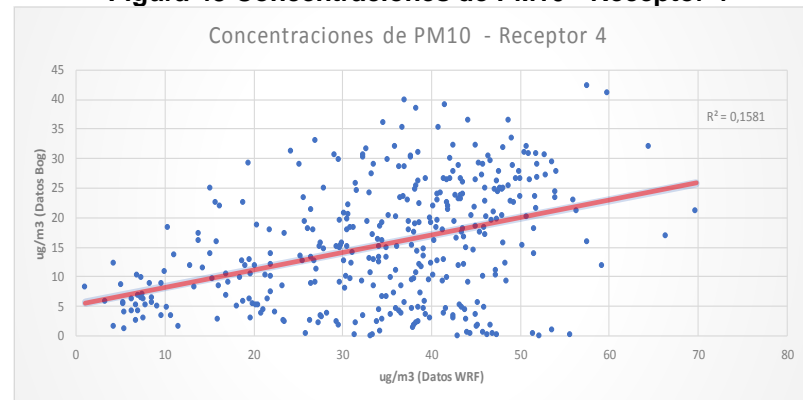
Fuente: El autor. 2017

Figura 47 Concentraciones de PM10 - Receptor 3



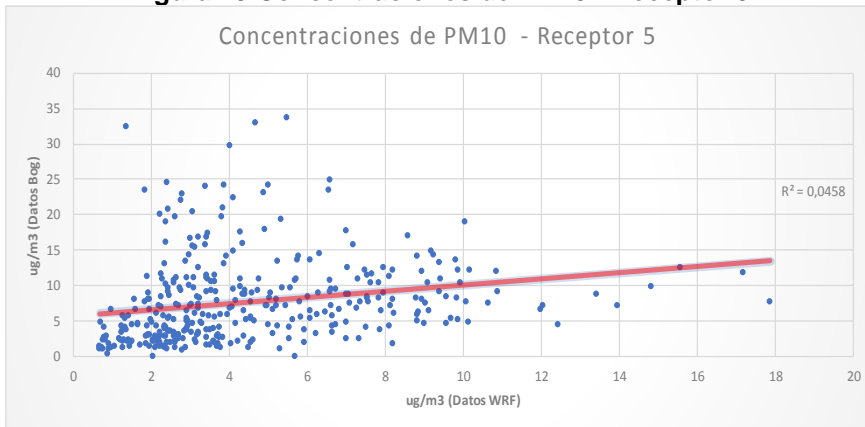
Fuente: El autor. 2017

Figura 48 Concentraciones de PM10 - Receptor 4



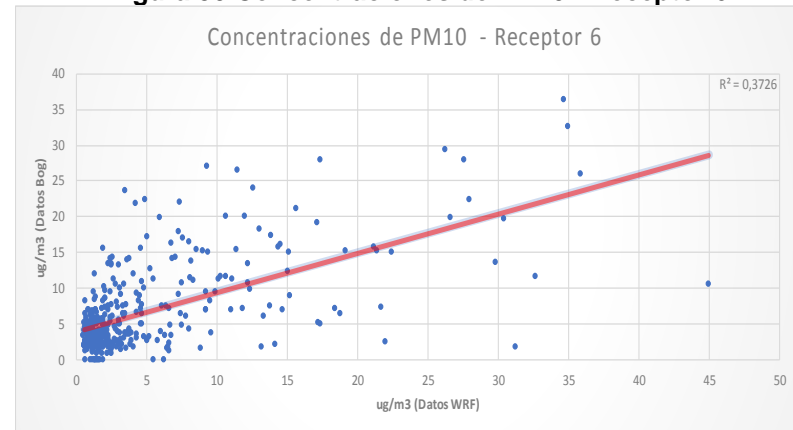
Fuente: El autor. 2017

Figura 49 Concentraciones de PM10 - Receptor 5



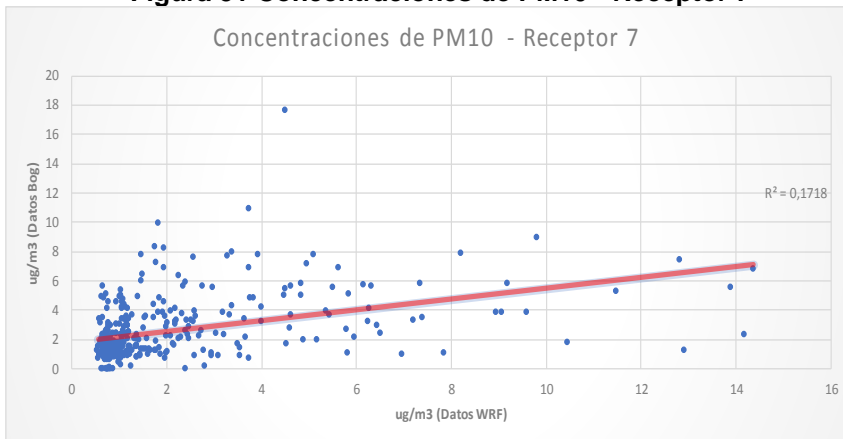
Fuente: El autor. 2017

Figura 50 Concentraciones de PM10 - Receptor 6



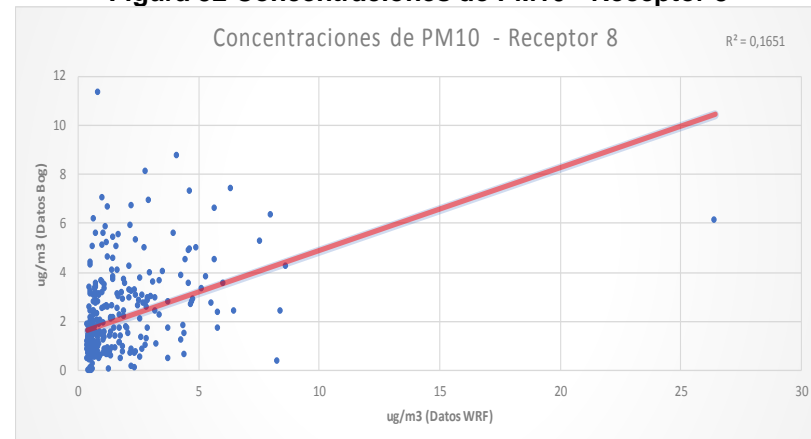
Fuente: El autor. 2017

Figura 51 Concentraciones de PM10 - Receptor 7



Fuente: El autor. 2017

Figura 52 Concentraciones de PM10 - Receptor 8



Fuente: El autor. 2017

5.6 Análisis de resultados

Se encontraron diferencias entre la rosa de vientos generada con la estación las Ferias, la obtenida a través del modelo WRF y la publicada por el IDEAM para el aeropuerto El Dorado. Cabe anotar que las dos primeras corresponden a información del año 2015, en donde se observa que la dirección predominante del viento en las ferias es la W, mientras que la obtenida con WRF es la dirección SW. Es importante resaltar que la estación las ferias se encuentra a unos 7 km de distancia del Aeropuerto El Dorado, y se debió utilizar al no poder obtener esta información de la estación El Dorado de la manera que lo requiere AERMET, por lo tanto, debe existir una desviación en la dirección y velocidad del viento generada por las características del suelo y los edificios del área urbana que se localizan alrededor de la estación las Ferias.

La principal diferencia en los resultados del modelo para PM10 se dio en los valores máximos obtenidos para la exposición de 24 horas y en la distribución espacial de las isoplethas. Las concentraciones máximas obtenidas con los datos de las estaciones de Bogotá superaron en más del doble a las concentraciones máximas obtenidas con los datos de WRF. Sin embargo, a medida que se alejaba de las fuentes de emisión las concentraciones disminuían y guardan cierta similitud en su comportamiento con variaciones entre las concentraciones alrededor de un 30%.

Por lo anterior, es muy importante ejecutar las modelaciones para un periodo mínimo de 5 años, lo que conlleva al incremento de costos de los proyectos de modelación, por los costos en que se incurre para comprar la información meteorológica y por el incremento en los tiempos de computo en AERMOD, que para un proyecto con diversas fuentes de emisión y complejidad en la grilla de modelación puede llegar a tomar tiempo mayores a 24 horas por cada corrida.

Por el contrario, los resultados del modelo para PM10 anual, mostraron un comportamiento muy similar para las fuentes de datos meteorológicos utilizados, con baja diferencia en los resultados máximos, en comparación con lo observado para la exposición de 24 horas. En este caso, las variaciones son del 11% y la diferencia entre los dos escenarios de modelación se nota en la distribución espacial de las isoplethas.

Los resultados obtenidos en receptores discretos también guardan grandes diferencias. Con los resultados obtenidos se puede observar que existe una correlación baja entre los resultados de las dos fuentes de datos, es preciso aclarar que las diferencias en velocidad y dirección del viento hacen que uno de los receptores este expuesto en mayor proporción a concentraciones altas respecto a los otros. En el caso de modelación, se pudo observar que la concentración más alta la obtuvo el receptor 4 con la fuente de datos de WRF puesto que el cono de dispersión de mayor concentración se centró sobre este receptor. A pesar de que en este escenario de modelación las concentraciones fueron mucho menores en comparación con los datos de las estaciones de Bogotá, este receptor quedó expuesto a las concentraciones más altas, mientras que, en el otro escenario, las concentraciones obtenidas en los receptores fueron relativamente bajas puesto que el cono de dispersión de mayor concentración no afectó ningún receptor.

Conclusiones

Se lograron construir los archivos meteorológicos a partir de la información horaria de temperatura, humedad relativa y nubosidad reportada por el IDEAM, completando los datos faltantes mediante el método de interpolación lineal entre las 7 y las 13 horas, entre las 13 y 19 horas y entre las 19 y 7 horas del día siguiente. Sin embargo, la interpolación lineal no es una metodología que asegure la obtención de datos acorde con el comportamiento de la atmósfera, por lo que sería necesario utilizar modelos estadísticos de predicción para cada variable meteorológica a partir de las series de datos del IDEAM. Por lo anterior, no se puede hacer sustentación estadística de la información utilizada.

Con la información meteorológica levantada y procesada, se pudo correr el procesador AERMET y se obtuvieron datos con coeficientes de correlación bajos para temperatura, calor sensible, altura de la capa límite convectiva, humedad relativa y altura de la capa límite mecánica, y no hubo correlación en nubosidad. Sin embargo, no se puede establecer una correlación estadística entre las dos fuentes de datos por la diferencia entre las metodologías de evaluación.

La información meteorológica disponible es incipiente para modelación de dispersión de contaminantes en Colombia, por cuanto las estaciones del IDEAM no reportan datos de manera horaria, ya que no fueron diseñadas con fines de modelación o seguimiento de la calidad de aire. Por lo anterior, la información de los modelos de pronóstico de clima se sitúa como la mejor fuente de información disponible, cuando no es posible obtener los datos horarios que requiere AERMET.

Se observa una diferencia notable en los resultados de los conos de dispersión de PM10 atribuidos a la diferencia encontrada en la dirección predominante del viento entre las dos fuentes de información utilizadas, la cual puede estar influenciada por las diferencias en la localización de las estaciones donde se obtuvo la información de velocidad y dirección del viento, ya que se encontraban a 7 km de diferencia.

Con el fin de disminuir la incertidumbre frente al comportamiento de los conos de dispersión de los contaminantes por la dirección y velocidad del viento, se recomienda efectuar modelaciones con 5 años de información meteorológica horaria de cualquier fuente de datos. Sin embargo, para obtener confiabilidad en los modelos lo ideal sería utilizar series históricas de 20 años, solución que sería ineficiente por los tiempos de cómputo.

Las desviaciones más altas del modelo con las dos fuentes de datos meteorológicos se generan en las concentraciones máximas de PM10 que se obtiene en cada uno.

La definición del espaciamiento de la grilla de modelación es importante para conocer en cuál de ellas se obtiene la menor variabilidad en la concentración de los contaminantes, con el fin de no subestimar las concentraciones del modelo y conocer y optimizar los tiempos de cómputo que puede tomar cada corrida.

Bibliografía:

- (EPA)., U. S. (Noviembre de 2004). USER'S GUIDE FOR THE AERMOD METEOROLOGICAL PREPROCESSOR (AERMET). . Victoria, USA.
- Aguas Claras, Ingeniería Limitada. (2008). Ampliación de la planta de chapados y contrachapados EAGON LAUTARO S.A. Lautaro, Chile.
- Ahrens, C. D. (2009). *Meteorology Today: An Introduction to Weather, Climate, and the Environment*. Belmont, USA: Brooks/Cole, Cengage Learning.
- Environment Protection Authority Victoria. (Octubre de 2013). Construction of input meteorological data files for EPA Victoria's regulatory air pollution model (AERMOD). Carlton, Australia.
- Environmental Protection Agency. (1995). User's Guide for the Industrial Source Complex (ISC3) Dispersion models. Volume II. North Carolina, E.E.U.U.
- IDEAM - MAVDT. (2005). *Atlas Climatológico de Colombia*. Bogotá: IDEAM.
- Lazaridis, M. (2010). *Environmental Pollution 19. First principles of meteorology and air pollution*. London: Springer.
- MAVDT. (Octubre de 2010). Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire. Manual de Diseño de sistemas de Vigilancia de la Calidad del aire. Bogotá, Colombia.
- NCAR. (6 de 10 de 2017). *National Center for Atmospheric Research (NCAR)*. Obtenido de <https://www.mmm.ucar.edu/weather-research-and-forecasting-model>
- U. S. Environmental Protection Agency . (Enero de 2008). AERSURFACE User's Guide. North Carolina, USA.
- U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. (Febrero de 2000). Meteorological Monitoring Guidance for Regulatory Modeling Applications. EPA.
- United States Environmental Protection Agency (EPA). (2013). Guidance notes for using the regulatory air pollution model AERMOD in Victoria. Victoria, USA.
- United States Environmental Protection Agency (EPA). (2013). Construction of input meteorological data files for EPA Victoria's regulatory air pollution modeelo (AERMOD).
- University corporation for Atmospheric Research. (6 de 10 de 2017). *MM5 Community Model*. Obtenido de <http://www2.mmm.ucar.edu/mm5/>

Anexo 1 Archivos meteorológicos generados a partir de las estaciones de Bogotá

(Ver este anexo en el CD Adjunto)

Anexo 2 Archivo meteorológicos generados con WRF obtenidos en Meteocolombia SAS

(Ver este anexo en el CD Adjunto)

Anexo 3 Archivos de entrada y salida de las diferentes corridas de AERMOD para el análisis de espaciamiento de grilla

(Ver este anexo en el CD Adjunto)

Anexo 4 Archivos de entrada y salida del modelo con los datos meteorológicos de Bogotá

(Ver este anexo en el CD Adjunto)

Anexo 5 Archivos de entrada y salida del modelo con los datos meteorológicos de WRF

(Ver este anexo en el CD Adjunto)