

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE DE BOGOTÁ
CON BASE EN LA INFORMACIÓN DE LA RED DE
MONITOREO DE LA CIUDAD

MAURICIO GAITÁN

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
BOGOTÁ, D.C.
2007

EVALUACIÓN DE LA CALIDAD DEL AIRE DE BOGOTÁ
CON BASE EN LA INFORMACIÓN DE LA RED DE
MONITOREO DE LA CIUDAD

MAURICIO GAITÁN

Proyecto de grado presentado a la Universidad de los
Andes como requisito parcial para obtener el título de
ingeniero ambiental

ASESOR

EDUARDO BEHRENTZ VALENCIA

UNIVERSIDAD DE LOS ANDES
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL
BOGOTÁ, D.C.
2007



TABLA DE CONTENIDO

INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES	1
1.1 CIUDAD DE MÉXICO	1
1.2 BEIJING	3
1.3 LONDRES	4
1.4 CALIFORNIA	6
1.5 SÍDNEY	8
1.6 BOGOTÁ	9
2 OBJETIVOS	13
2.1 OBJETIVO GENERAL	13
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	13
3 JUSTIFICACIÓN	14
4 METODOLOGÍA	15
4.1 ACTUALIZACIÓN DE LA BASE DE DATOS	16
4.2 DIAGNÓSTICO DE LA CALIDAD DEL AIRE DE BOGOTÁ	17
4.3 ANÁLISIS TÉCNICO DE LA CONTAMINACIÓN POR MATERIAL PARTICULADO	18
5 DIAGNÓSTICO DE LA CALIDAD DEL AIRE DE BOGOTÁ	19
5.1 MONÓXIDO DE CARBONO	20
5.2 DÍOXIDO DE AZUFRE	21
5.3 DÍOXIDO DE NITRÓGENO	23



5.4	OZONO	25
5.5	MATERIAL PARTICULADO	27
6	MATERIAL PARTICULADO	30
6.1	ANÁLISIS DE LA CONTAMINACIÓN POR PM_{10} EN LA LOCALIDAD DE PUENTE ARANDA	33
6.1.1	TENDENCIAS DE LA CONTAMINACIÓN POR PM_{10} EN LA LOCALIDAD DE PUENTE ARANDA	34
6.1.2	ANÁLISIS DESCRIPTIVO DE LA CONTAMINACIÓN POR PM_{10} EN LA LOCALIDAD DE PUENTE ARANDA	39
6.2	CORRELACIÓN ENTRE LAS VARIABLES METEOROLÓGICAS Y LAS CONCENTRACIONES ATMOSFÉRICAS DE MATERIAL PARTICULADO	42
6.3	CORRECCIÓN DE LAS TENDENCIAS DE PM_{10} EN LA ESTACIÓN DE PUENTE ARANDA POR FACTORES METEOROLÓGICOS.....	47
7	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	49
8	REFERENCIAS.....	51



LISTADO DE FIGURAS

Figura 1.1 Ubicación de las estaciones de la RMCAB.	11
Tabla 1.2 Estaciones de monitoreo de la calidad del aire en Bogotá.	12
Figura 4.1 Diagrama esquemático de la metodología utilizada.	15
Ecuación 4.2 Cálculo IPE.	18
Figura 5.1 IPE de la norma de ocho horas de CO en Bogotá basado en la media Octo-horaria	20
Figura 5.2 Mapa de isocentración de CO en Bogotá año 2006.	21
Figura 5.3 IPE de la norma anual de SO ₂ en Bogotá basado en la media diaria.	22
Figura 5.4 Mapa de isocentración de SO ₂ en Bogotá año 2006.	23
Figura 5.5 IPE de la norma anual de NO ₂ en Bogotá basado en la media diaria.	24
Figura 5.6 Mapa de isocentración de NO ₂ en Bogotá año 2006.	25
Figura 5.7 IPE de la norma de ocho horas de O ₃ en Bogotá basado en la media Octo-horaria.	26
Figura 5.8 Mapa de isocentración de O ₃ en Bogotá año 2006.	27
Figura 5.9 IPE de la norma anual de PM ₁₀ en Bogotá basado en la media diaria.	28
Figura 5.10 Mapa de isocentración de PM ₁₀ en Bogotá año 2006.	28
Figura 5.11 Mapa de isocentración de PM ₁₀ en Bogotá año 2006 Escala.	29
Figura 5.12 IPE de la norma de larga duración para contaminantes criterio entre 1997 y 2006.	30
Figura 6.1 IPE de la norma anual de PM ₁₀ en Bogotá basado en la media diaria por estación.	32
Figura 6.3 Distribución del porcentaje días en los que superan diversas concentraciones de PM ₁₀ en la estación de Puente Aranda.	34



Figura 6.4 Media Móvil de la concentración de PM_{10} en la estación de Puente Aranda (Periodo = 365 días).....	35
Figura 6.5 Media Móvil de la concentración de PM_{10} en la estación de Puente Aranda (Periodo = 30 días), Norma 24h 150 μ g/m ³ , Norma Anual 70 μ g/m ³	37
Figura 6.6 IPE de la norma Anual y 24h de PM_{10} en la estación de puente Aranda con base en los promedios diarios.....	38
Figura 6.7 Histograma de las concentraciones de PM_{10} en la estación de Puente Aranda año 2006.....	39
Figura 6.8 Intervalos de confianza de las concentraciones mensuales de PM_{10} en la estación de Puente Aranda.	41
Figura 6.9 Diagrama de cajas para las concentraciones mensuales de PM_{10} en la estación de Puente Aranda.....	41
Figura 6.10 Gráfica comparativa entre las concentraciones mensuales de PM_{10} y precipitación en la estación de Puente Aranda.	44
Figura 6.11 Gráfica comparativa entre las concentraciones mensuales de PM_{10} y velocidad del viento en la estación de Puente Aranda.....	44
Figura 6.12 Diagrama de dispersión de PM_{10} y precipitación en la estación de Puente Aranda año 2006.....	45
Figura 6.13 Diagrama de dispersión de PM_{10} y velocidad del viento en la estación de Puente Aranda año 2006.	46
Figura 6.14 Serie de tiempo de la concentración de Material particulado en Puente Aranda corregida por la Velocidad del viento.....	48



RESUMEN.

La ciudad de Bogotá cuenta con una moderna red de monitoreo de la calidad del aire (RMCA B) operada de forma exitosa por la autoridad ambiental local. Esta red, a través de sus 15 estaciones, se encuentra en capacidad de generar registros confiables y en tiempo real de diversas variables meteorológicas (velocidad y dirección del viento, precipitación, intensidad lumínica) así como de concentraciones atmosféricas de contaminantes criterio (partículas totales, fracción respirable del material particulado, monóxido de carbono, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, y ozono).

El trabajo discutido en este documento consistió en un riguroso análisis de los registros contenidos en la RMCA B haciendo uso de herramientas estadísticas formales. Durante la primera etapa del trabajo (Cancino, 2006) se construyó una base de datos que fue organizada y estructurada para facilitar la validación y el análisis estadístico de la información registrada en la RMCA B. Dicha base de datos contiene los datos correspondientes al período comprendido entre Septiembre de 1997 (inicio de la operación de la red) y Noviembre de 2006.

Durante la segunda etapa del trabajo se evaluó de forma cuantitativa (y controlando por factores meteorológicos) el estado de la calidad del aire de la ciudad considerando la reglamentación ambiental vigente. Adicionalmente, se identificaron tendencias en el tiempo para los distintos contaminantes y se analizaron las posibles causas del problema actual de contaminación.



INTRODUCCIÓN Y ANTECEDENTES

Los problemas relacionados con el deterioro de la calidad del aire han cobrado gran importancia para la comunidad y los entes gubernamentales alrededor del mundo. La estrecha relación que existe entre salud pública y calidad del aire (POPE, 1991) ha evidenciado la necesidad de desarrollar herramientas analíticas que permitan implementar políticas de control encaminadas al mejoramiento de la calidad del aire en los centros urbanos.

La preocupación generalizada en torno a los problemas de contaminación atmosférica y el reto de controlar el impacto de dicha contaminación, ha sido asumido por diferentes entidades del gobierno de la ciudad de Bogotá, que encuentran en las respuestas de su red de calidad del aire una excelente fuente e información técnica.

A continuación se presenta un resumen de las características principales de algunas de las más importantes redes de monitoreo de calidad del aire alrededor del mundo.

1.1 Ciudad De México

La zona metropolitana del valle de México (ZMVM) se encuentra localizada al sur oriente de México. Su territorio se expande sobre una superficie de 4.560 m² en donde reside una población estimada de 18'850.000 habitantes (INEGI, 2000). En su interior se haya el Distrito Federal de la Ciudad de México, capital de Los Estados Unidos Mexicanos y principal centro económico e industrial del país. Este distrito está catalogado como el segundo centro urbano más



grande del mundo (UN, 2005). La flota vehicular de la ciudad supera los 3'750.000 vehículos (SCT, 2004) y su acelerado crecimiento industrial hacen de la ZMVM una gran fuente de contaminación. Esto sumado a su ubicación, 19°15 latitud Norte y 2.240 msnm, hacen de esta región una zona de alta radiación solar propicia para la formación de contaminantes fotoquímicos, entre otros.

La presencia de vientos ascendentes de circulación cerrada, la topografía conformada por un sistema montañoso que rodea a la región, al igual que los sistemas meteorológicos de baja presión hacen de la ZMVM una región con una alta tendencia a la estabilidad atmosférica, en donde diariamente se confinan las masas de aire generando intensos episodios de contaminación (SIMAT, 2001).

La ZMVM cuenta actualmente con 47 estaciones de monitoreo de calidad del aire operadas por el Sistema de Monitoreo Atmosférico de Ciudad de México (SIMAT), implementado en el año 2000 como parte de una estrategia integral para el mejoramiento de los sistemas de control y prevención de la contaminación atmosférica. El SIMAT integra de manera global la Red Automática de Monitoreo Atmosférico (RAMA), la Red meteorológica (REDMET), la Red Manual de Monitoreo Atmosférico (REDMA) y la Red de Depósito Atmosférico (REDDA). Por medio del SIMAT no sólo se puede acceder a información detallada sobre la calidad del aire desde 1986; sino que además es posible establecer de manera precisa y oportuna los rangos de contaminación que afectan sus áreas de influencia por medio de herramientas como el Índice Metropolitano de la Calidad del Aire (IMECA).



Los principales problemas de contaminación que afectan a ZMMV son las altas concentraciones de PM_{10} y O_3 que normalmente sobrepasan la norma oficial mexicana (NOM-02X-SSA 1-1993). Según los estudios realizados por la Dirección de Investigación y Posgrado del Campus Monterrey (Mejía, 2003), el 80% de los días sobrepasan la norma de 24 horas para ozono y el 40% de los días sobrepasan la norma de 24 horas para PM_{10} .

1.2 Beijing

Beijing es la capital de la República Popular China. Su población supera los 14'230.000 habitantes, lo que la ubica como la segunda ciudad más grande del país y uno de los centros urbanos más grandes del mundo según el último censo elaborado por el China's National Bureau of Statistics (CNBS, 2005).

Beijing se encuentra sobre una región montañosa al nororiente de China, y debido a su ubicación ($39^{\circ}55$ N y $116^{\circ}23$ O) está continuamente influenciada por los cambios relacionados con las estaciones. Las condiciones de estabilidad atmosférica que se presentan con frecuencia en ciertos periodos del año, acompañados del rápido crecimiento del sector industrial y de su flota vehicular, generan periódicamente intensos episodios de contaminación durante los cuales la población de Beijing está expuesta a altas concentraciones de PM_{10} , SO_x y NO_x (XIAO-CHUAN, 2004). Otro factor que afecta constantemente la calidad del aire en Beijing es el paso de tormentas de arena proveniente del desierto de Mongolia, las cuales cambian considerablemente las condiciones de la calidad del aire de la ciudad, fenómeno que se ve reflejado en un incremento significativo de las



concentraciones de PM_{10} y $PM_{2.5}$ entre los meses de marzo y mayo de cada año (Jhingua Guo, 2003).

Beijing cuenta actualmente con 28 estaciones automáticas de monitoreo de la calidad del aire, ubicadas estratégicamente sobre un área de 1040 Km^2 . Las estaciones, al igual que otros 150 puntos de muestreo pasivo, conforman la Red de monitoreo ambiental de Beijing (Yu Tong, 2002). Desde 1983 la Oficina de protección Ambiental de Beijing (BEPB) ha estado a cargo de la operación y mantenimiento de la red. En 1999 como parte de un plan de mejoramiento de los sistemas de información ambiental, la BEPB desarrolló el Air Pollution Index de Beijing (API), mecanismo mediante el cual se le informa diariamente a la comunidad el estado de la calidad del aire de la ciudad según los estándares de calidad establecidos por la Administración Estatal del la Protección Ambiental (SEPA) para las principales ciudades de la República popular China (JIMING HAO, 2001).

1.3 Londres.

Según el último reporte de la Oficina de Estadística Nacional (ONS) del Reino Unido, Londres es la segunda ciudad más grande de Europa con una población aproximada de 7 180.000 habitantes. Su superficie es de 1,580 Km^2 y se localiza a 20 msnm a orillas del río Támesis. Londres se caracteriza por tener un clima variable con frecuentes precipitaciones de baja intensidad y temperaturas medias que varían entre los 2,5°C y los 13°C, dependiendo de las estaciones que determinan las diferentes épocas del año (UKCIP, 2002).



Londres ha sido considerada, desde hace varias décadas, como una de las ciudades que presenta mayores problemas de contaminación atmosférica (GLA, 2001). Los agudos episodios de contaminación evidenciados en la década de los 50, al igual que el continuo crecimiento del sector industrial y de la flota vehicular, impulsaron en 1992 al gobierno británico a desarrollar nuevas herramientas de control que permitieron diagnosticar la calidad del aire al interior de la ciudad, de acuerdo a los parámetros establecidos por el Departamento para el Medio Ambiente, Alimentos y Asuntos Rurales (DEFRA). Estudios realizados (W.fuller, 2006; Green, 2006) muestran cómo la polución de Londres disminuyó a finales del siglo XX, gracias al control de las emisiones que fue implementado para el sector industrial y vehicular. Sin embargo, los niveles de contaminación de PM₁₀, NO_x, O₃ siguen siendo una preocupación para las autoridades ambientales. Durante el 2006 los promedios diarios de NO₂ sobrepasaron en el 40% de los días la norma de calidad de aire, en este mismo año las concentraciones de PM₁₀ en algunos sectores de la ciudad sobrepasaron la norma 230 días siendo 35 el límite establecido por la ley.

En 1993 se creó la Red de Monitoreo Ambiental de Londres (LAQN) por medio de la cual se integraron las antiguas estaciones de monitoreo a una moderna red automática (LAQN, 2004). La LAQN cuenta con sistemas de monitoreo de contaminantes criterio y variables meteorológicas en 30 de las áreas suburbanas más importantes de la ciudad. La información recopilada por la red se complementa diariamente con datos suministrados por estaciones



independientes operadas por el DEFRA y la Red Automática Rural y Urbana (AURN) (Green, 2006).

La Red de Monitoreo Ambiental de Londres cuenta, en la actualidad, con un novedoso sistema de información personal denominado AIRtext, mediante el cual se informa a la comunidad, por medio de correo electrónico o mensajes de texto, acerca de los episodios de contaminación. Este sistema de información permite una respuesta en tiempo real para evitar exposiciones a contaminantes que sean peligrosos para la población.

1.4 California

California está ubicada sobre la costa occidental de los Estados Unidos, entre los 32°N y 42°N. Su población que supera los 33'870.000 habitantes hacen de éste el estado con mayor población de los Estados Unidos (CSDC, 2000). El área total del territorio es de 411.013 Km² y su topografía se ve delimitada por 2,157 Km de costa y un sistema montañoso que lo atraviesa de extremo a extremo (Kauffman, 2006). La temperatura promedio de California oscila entre los 7°C en invierno y 27°C en verano, aunque es importante resaltar las variaciones climáticas entre las regiones del norte y del sur de dicho estado (DWR, 2006).

California cuenta con grandes centros urbanos como San Diego, San Francisco y Los Ángeles en donde se concentra la mayor parte de la población y en los cuales se presentan los principales focos de contaminación. Según la Asociación Americana del Pulmón, Los Angeles es una de las ciudades con la



peor calidad del aire del país (ALA , 2007). A pesar de los grandes esfuerzos gubernamentales por mejorar la calidad de los combustibles y disminuir las emisiones de industrias y vehículos, en Los Angeles aún se registran constantemente rangos de concentración de material particulado y ozono que sobrepasan los estándares de calidad de aire (ARB, 2006; SCAQMD, 2007).

Entre los factores que tienen mayor repercusión en los problemas de contaminación atmosférica en California se destacan los altos índices de flujo vehicular, ya que esta ciudad cuenta con una flota vehicular superior a los 23.4 millones de vehículos, constituyéndose de esta forma en el estado con mayor número de vehículos por habitante (ARB, 2007), lo cual sumado al crecimiento acelerado del sector industrial, los altos niveles de radiación solar durante los meses de verano que propician la formación de contaminantes fotoquímicos, y algunos factores meteorológicos como los sistemas de baja presión y las corrientes de aire que generan condiciones de estabilidad atmosférica, hacen más intensos los episodios de contaminación.

Según el último reporte generado por el Comité de Recursos del Aire (ARB) en el Plan Estatal y Local Para la Red de Monitoreo de la calidad del Aire (2007), California cuenta actualmente con más de 250 estaciones automáticas ubicadas estratégicamente sobre toda el área de influencia. La red de monitoreo se encuentra organizada en 35 localidades distribuidas en 15 cuencas con características geográficas similares. Las estaciones son operadas por la ARB, el Distrito Local de Control de la contaminación del aire (APCD), el Distrito Administrativo de la Calidad del Aire (AQMD), el Servicio de Parque Nacional (NPS) o por contratistas privados dependiendo de la



jurisdicción a la cual pertenecen. Este sistema de redes cuenta con datos de concentraciones en tiempo real para los contaminantes criterio contemplados en los estándares americanos de calidad del aire para el bienestar y protección de la salud pública (NAAQS), al igual que una gran variedad de sustancias tóxicas y variables meteorológicas relevantes para el análisis de calidad del aire del estado californiano.

1.5 Sídney

Según el último informe de la Oficina de Estadística de Australia (ABS, 2006), Sídney tiene una población aproximada de 4'230.000 habitantes lo cual hace de éste el centro urbano más grande del país. Su área de 12.150 Km² está ubicada sobre el mar pacífico en la costa sur-este del continente, fenómeno que influye fuertemente en el clima de la región. La temperatura promedio en la ciudad varía entre los 10°C y 26°C dependiendo de la estación (Bureau of Meteorology, 2007).

Sídney cuenta en la actualidad con 19 estaciones automáticas de monitoreo de la calidad del aire operadas por el Departamento de Conservación y Medio Ambiente de New South Wales. Desde 1997 los datos suministrados por las estaciones son la base para la elaboración de reportes diarios en los que, por medio de herramientas como el Índice de polución Regional (RIP), se le informa a la población sobre el estado de la calidad del aire para las diferentes zonas de la ciudad de acuerdo a los parámetros establecidos en las Medidas Nacionales de Protección Ambiental (NEMP).



En Sydney los principales problemas de contaminación hacen referencia a las altas concentraciones de ozono y material particulado, los cuales sobrepasan constantemente los estándares de calidad del aire establecidos por el NEMP (NWSEPA, 2001). Según el inventario de emisiones elaborado en 1997 por el NEMP (Carnovale, 1997), la principal fuente de contaminación en el estado de New South Wales es el alto flujo vehicular, el cual aporta un 60% de las emisiones de PM_{10} y 80% de las emisiones de NO_x , y 90% las emisiones de CO. Se cree, sin embargo, que los continuos incendios forestales de la región aportan significativamente al incremento de la contaminación.

1.6 Bogotá

Bogotá es actualmente el centro económico y de desarrollo más importante de Colombia, con una población aproximada de 6.800.000 habitantes y un área de 1.732 km² (DANE, 2007). Bogotá se encuentra ubicada sobre la cordillera oriental a 2.600 msnm y su temperatura media es de 14°C. El clima está determinado por un régimen de lluvias bimodal que se caracteriza por dos periodos de alta pluviosidad que tienen sus picos más altos en los periodos comprendidos entre los meses de marzo y abril, y octubre y noviembre. De igual manera, los periodos secos se presentan de enero a febrero y de julio a agosto (Ideam, 2006).

La velocidad y dirección del viento son factores variables en Bogotá, con una tendencia en dirección occidente en la mañana y norte en la tarde. El mes del año en el cual se registran las velocidades del viento más altas es agosto.



Bogotá cuenta actualmente con una flota vehicular que supera los 830.000 vehículos registrados en tránsito y transporte (Rodríguez, 2007). La actividad económica de la capital es la más importante del país con un aporte mayor al 25% del PIB nacional. La mayor parte del sector industrial se concentra en las localidades de Puente Aranda, Kennedy, Engativá y Fontibón al sur y occidente de la ciudad.

En 1967 el Ministerio de Salud instaló en Bogotá la primera red de monitoreo de calidad del aire de la ciudad, la cual contaba con 5 estaciones de monitoreo que hacían parte del programa de la Red Panamericana de Muestreo Normalizado de la Contaminación del Aire (PANAIRES). Ésta hacía parte de un proyecto internacional de la Organización Panamericana de la Salud (OPS) que pretendía generar un diagnóstico de la calidad del aire de toda Latinoamérica.

Para 1983 y como consecuencia del decreto 02 de 1982, por medio del cual se estableció la primera norma nacional de calidad del aire, se creó la Red Nacional de Vigilancia de la Calidad del Aire la cual contaba con 10 estaciones de monitoreo en Bogotá.

En 1992 se creó como parte de un estudio de JICA (Cancino, 2006), el Plan de Control de la Contaminación del Aire de Bogotá, investigación que estableció la necesidad de una nueva y moderna red de monitoreo. En este mismo año se creó la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCA), administrada desde entonces por el antiguo DAMA, actual Secretaría Distrital de Ambiente. La RMCA cuenta actualmente con trece estaciones automáticas de monitoreo mixto que miden tanto parámetros de calidad del aire como

variables meteorológicas, y dos que miden únicamente variables meteorológicas como se muestra en la Tabla 1.1. Estas quince estaciones están ubicadas estratégicamente sobre toda el área metropolitana acorde con los parámetros estipulados por el JICA. En la Figura 1.1 se puede apreciar la distribución actual de la RMCAB en la ciudad de Bogotá.



Figura 1.1 Ubicación de las estaciones de la RMCAB.



Tabla 1.2 Estaciones de monitoreo de la calidad del aire en Bogotá.

ZONA	ESTACION				CONTAMINANTES ATMOSFERICOS												VARIABLES METEOROLOGICAS							
	NOMBRE	COD.	DIRECCION	LOCALIDAD	PM 10	PM2,5	PST	CO	SO2	NO	NO2	Nox	O3	CH4	Benceno	Tolueno	Formaldehido	Precp	Vientos	Temp	Humedad	Presión	Dir Viento	Radiación
CENTRO	MAVDT	2	Calle 37 No. 8 - 40	Santa Fe					X		X		X		X	X	X							
	IDRD	5	Calle 63 No. 47 - 06	Barrios Unidos	X	X		X	X	X	X	X	X					X	X	X				X
	Santo Tomas	10	Carrera 9 No. 72 - 90	Chapinero	X				X	X	X	X						X	X					
	Puente Aranda	13	Carrera 65 No. 19 - 95	Puente Aranda	X			X	X	X	X	X	X					X	X	X				
NOROCCIDENTE	Carrefour	6	Calle 81 No. 68 - 50	Engativa	X			X	X	X	X	X						X	X					
	Corpas	11	Av Corpas Km. 13	Suba	X			X		X	X	X	X					X	X	X				
	Fontibón	14	Carrera 95 No. 24 - 49	Fontibón	X			X		X	X	X	X					X	X	X				
NORTE	Bosque	1	Trans. 9 No. 133 - 95	Usaquén	X		X		X	X	X							X	X					
	Escuela	8	AutoNorte Km. 13	Suba	X													X	X		X		X	X
SUR	Tunal	4	Crr 24 sur No. 49 - 86	Tunjuelito	X													X	X	X				
	Usme	15		Usme														X	X	X				X
	Vitelma	16		San Cristóbal														X	X	X				X
SUROCCIDENTE	Sony	3	AutoSur No. 61 - 40	Kennedy	X		X	X	X	X	X	X	X					X	X	X				
	Cazuca	7	Calle 14 No. 6 - 54	Ciudad Bolívar	X		X	X	X	X	X	X						X	X	X				
	Kennedy	9	Crr 86 sur No. 40 - 55	Kennedy	X	X			X								X	X	X					



2 OBJETIVOS

2.1 Objetivo General.

Realizar un análisis formal del estado de la calidad del aire en la ciudad con énfasis en la evolución de la contaminación por PM_{10} .

2.2 Objetivos específicos.

- Recopilar los registros de la RMCAB disponibles para el 2006.
- Organizar y validar los datos proporcionados por la red de calidad del aire de Bogotá para facilitar el análisis de la información.
- Actualizar la base de datos desarrollada por la Universidad de los Andes (Cancino, 2006) con la totalidad de la información recopilada.
- Realizar un análisis formal de la información validada que permita observar el comportamiento de las concentraciones de los contaminantes criterio en diferentes zonas de la ciudad.
- Realizar un análisis estadístico de la contaminación por material particulado en la localidad de Puente Aranda.
- Identificar y cuantificar el efecto de las variables meteorológicas en la calidad del aire de la ciudad.



3 JUSTIFICACIÓN.

El notable deterioro de la calidad del aire y su directa relación con el desarrollo económico, las distintas actividades antropogénicas y sus implicaciones en la salud, han generado una creciente preocupación por entender los fenómenos que ocurren en la atmósfera. En la actualidad, los principales centros urbanos del mundo cuentan con diversos sistemas de monitoreo de contaminantes atmosféricos que con el tiempo se han convertido en una herramienta indispensable para el desarrollo de las políticas ambientales enfocadas a la protección y control de la calidad del aire.

La información proporcionada por las redes de monitoreo de la calidad del aire es de gran utilidad para establecer la tendencia de las concentraciones de los contaminantes en el aire a través del tiempo, así como para entender las relaciones entre ellos. Esta información también es útil para entender la relevancia de distintas variables meteorológicas que influyen en la calidad del aire de la ciudad.

Dado el actual problema de contaminación atmosférica en Bogotá, es de vital importancia que la información suministrada por la RMCAB constituya el eje central de los análisis para establecer las líneas de acción y las políticas encaminadas al mejoramiento de las condiciones de calidad del aire. Las altas concentraciones de contaminantes, como el material particulado inferior a 10 micras, que se registran diariamente en la capital demuestran la necesidad de realizar un análisis estadístico formal del estado de la calidad del aire en el cual se analicen conjuntamente las posibles causas de dicho problema.

4 METODOLOGÍA.

En la figura 4.1 se presenta el resumen de la metodología utilizada para el desarrollo de este proyecto. A continuación se describe detalladamente cada etapa de la misma.

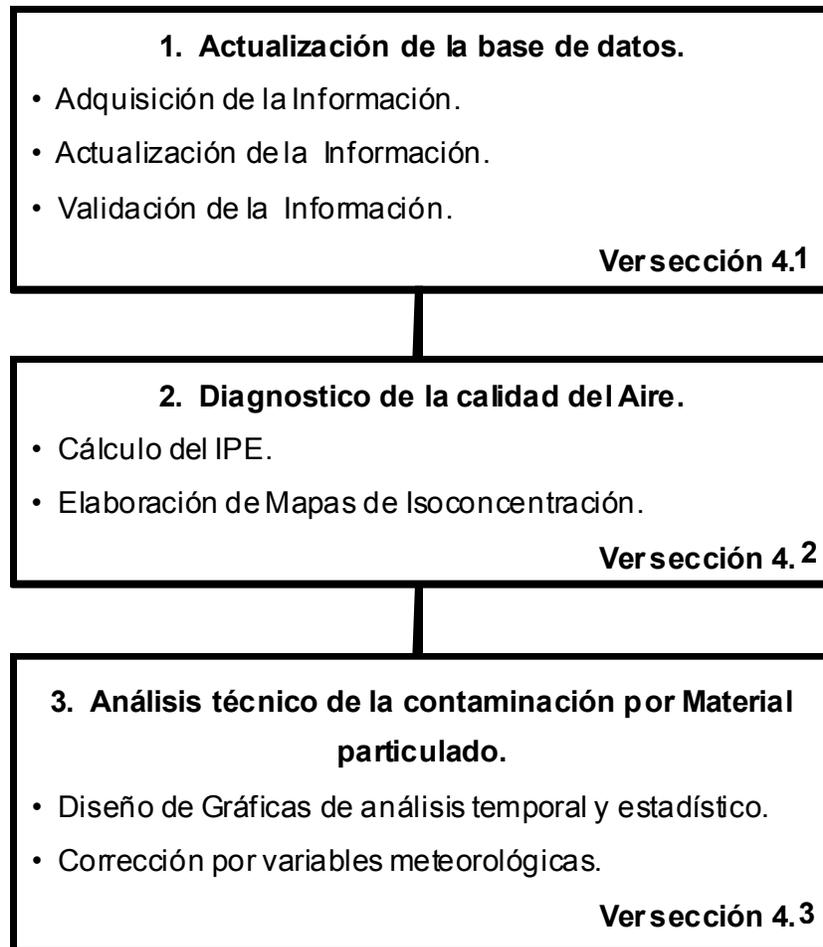


Figura 4.1 Diagrama esquemático de la metodología utilizada.



4.1 Actualización de la Base de Datos

Gracias a la colaboración del antiguo DAMA, actual Secretaria Distrital de Ambiente se logró, por medio de la oficina de Emisiones y Calidad del Aire, adquirir la información recopilada por la Red de Monitoreo de la Calidad del Aire de Bogotá, para el año 2006 (enero a noviembre 2006).

La información recolectada (formato texto, *txt.*) contiene los registros diez-minútales (tomados cada 10 minuto) de cada una de las variables contaminantes y meteorológicas medidas (ver tabla 1.1) en 13 de las 15 estaciones. Para este año no se obtuvo información de las estaciones de Usme y Vitelma.

Seguidamente, se vinculó cada uno de los registros a una base de datos elaborada en MICROSOFT ACCESS por la Universidad de los Andes (Cancino, 2006). En esta, se encuentra organizada la información en 16 tablas, las cuales corresponden a un directorio con la información general de la red y 15 tablas destinadas a cada estación. La base de datos actualmente constituye una herramienta para la consulta y el adecuado manejo de la información. El gran volumen de información existente y los formatos en que se encuentra registrada, hacen indispensable el uso de un instrumento adecuado que facilite su consulta y posterior evaluación.

Luego de haber vinculado la información a la base de datos, se realizó un proceso de validación de los registros, siguiendo cada una de las etapas propuestas por la Ingeniera Juliana Cancino en el documento Validación y Análisis de la Información de la Red de Calidad del Aire de Bogotá (Cancino,



2006). En este proceso se identificaron aquellos registros válidos (“V”), no válidos (“DN”), fuera de rango (“FR”) y la ausencia de los mismos (“SD”). Al finalizar esta etapa del proyecto se contó con una base de datos en la cual se encontraba la totalidad de la información de la RMCAB validada desde 1997 hasta noviembre de 2006.

4.2 Diagnóstico de la calidad del aire de Bogotá.

Para realizar el diagnóstico de la calidad del aire de Bogotá se partió del trabajo desarrollado por la Universidad de los Andes (Cancino, 2006). A partir de la información recopilada se calcularon promedios horarios, diarios, mensuales y anuales por medio del software con aplicaciones estadísticas SPSS y algunas herramientas y ayudas de MICROSOFT EXCEL, cumpliendo de esta forma con los parámetros estipulados por las autoridades ambientales para Bogotá (Res 1208-03, IDEAM-2005).

Para determinar cuantitativamente el grado de contaminación atmosférica en toda la ciudad se definió un índice para establecer la frecuencia de excedencia de la norma de calidad del aire. Este índice se denominó el índice porcentual de excedencias (IPE) (Cancino, 2006). El IPE se calcula como un promedio ponderado del número de veces que el promedio de ocho horas o diario excede la norma de calidad de aire basado en el número de datos existentes (ver ecuación 1).



$$IPE = \frac{\text{No. Veces que el promedio diario excede la norma}}{\text{No. Total de promedio existentes}} \times 100$$

Ecuación 4.2 Cálculo IPE.

Con el fin de identificar la distribución de la contaminación en la ciudad se desarrollaron, con ayuda de programas especializados en sistemas de información geográfica (ARCGIS y SURFER), mapas de isocentración de los contaminantes criterio con base en una escala normalizada de colores en la cual se representa comparativamente la relación entre los promedios anuales y la norma de larga duración para cada contaminante. De esta forma, los mapas presentados en este trabajo constituyen un soporte para establecer los niveles de contaminación relacionados con los diferentes contaminantes en la ciudad.

4.3 Análisis técnico de la contaminación por material particulado.

Para el análisis de la contaminación por material particulado se desarrollaron, por medio de SPSS y MICROSOFT EXCEL, análisis y gráficas en las cuales se identificó el comportamiento y las tendencias de las concentraciones de PM_{10} durante los últimos años. Entre estos se destacan las gráficas de tendencia a partir de los promedios mensuales y anuales, las medias móviles con periodos de un año y de 30 días, histogramas, diagramas de cajas e intervalos de confianza. Estos análisis además de proporcionar información útil sobre el estado de la calidad del aire de la ciudad, permiten definir parámetros estadísticos como la variabilidad y distribución de la información y generar un análisis formal del problema de contaminación en la ciudad.



Para cuantificar el efecto de las variables meteorológicas en los registros elaborados por la RM CAB se realizaron diferentes regresiones lineales simples por medio de las cuales se calculó el factor de correlación lineal de las mismas. De igual forma se estimaron los parámetros de correlación (coeficiente β) para la regresión lineal múltiple que involucra simultáneamente una o más variables.

Finalmente se realizó una evaluación de la contaminación por material particulado teniendo en cuenta los efectos de las variables meteorológicas.

5 DIAGNÓSTICO DE LA CALIDAD DEL AIRE DE BOGOTÁ.

Gracias a la información suministrada por la RM CAB, tanto las entidades gubernamentales (DAMA, 2006) como entes externos (Cansino, 2006) han logrado desarrollar diversos estudios, por medio de los cuales se ha analizado la distribución y evolución de las concentraciones de los contaminantes criterio (NO_2 , SO_2 , O_3 , PM_{10} , CO) en la atmósfera de la ciudad. Estas investigaciones son una aproximación del problema de calidad del aire que se vive diariamente en la capital.

Bogotá, como se describió en el capítulo 1.6 cuenta con una flota vehicular significativa y un amplio sector industrial ubicado al interior de la ciudad, lo cual sumado a la distribución de las corrientes de aire, las cadenas montañosas que la rodean y las zonas de baja presión que se generan en épocas secas, entre otros factores, propician la generación y confinamiento de masas de aire contaminantes sobre la ciudad.

5.1 Monóxido de Carbono

Las concentraciones atmosféricas de Monóxido de Carbono (CO) que se registran regularmente en Bogotá son muy bajas, en la mayoría de los casos el promedio de ocho horas no supera las 2,9 ppm valor que es comparativamente inferior a la norma de ocho horas vigente (9 ppm). En la figura 6.1 se observa por medio de IPE (ver capítulo 4.3) que históricamente son poco frecuentes los casos en los que se excede la norma. En la mayoría de los años no se registró ningún valor promedio de ocho horas que incumpliera la norma. En el caso particular del 2003, el IPE para CO alcanza su valor más alto debido a la escasez de información (56% de los datos) y a las altas concentraciones registradas en la estación de Fontibón en donde el IPE fue del 100%.

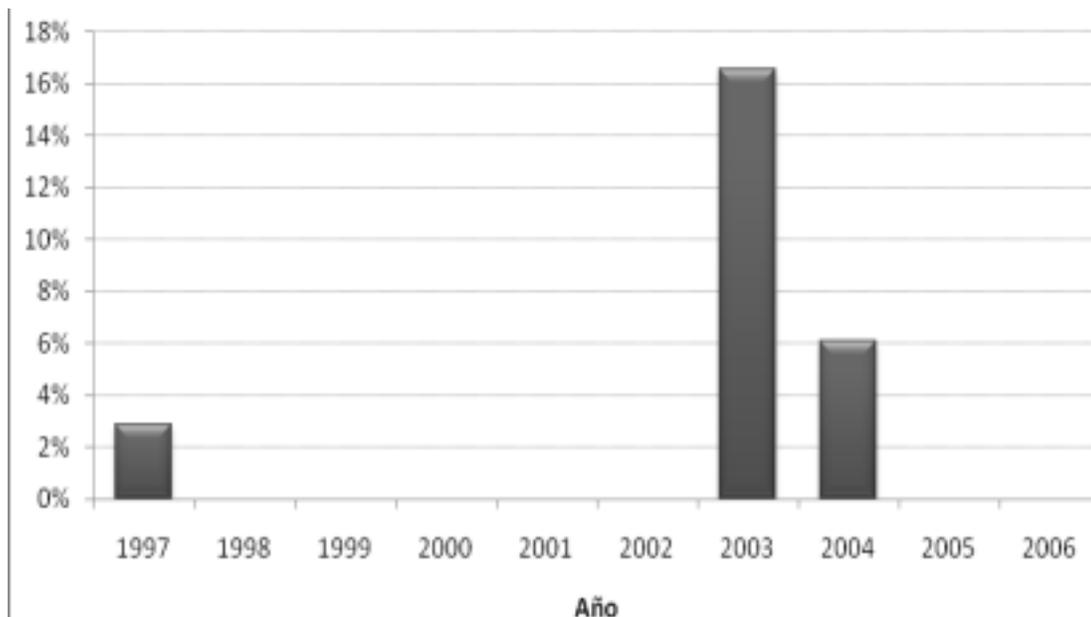


Figura 5.1 IPE de la norma de ocho horas de CO en Bogotá basado en la media Octo-horaria

En la figura 6.2 se puede observar claramente que en el 2006 el promedio anual de CO fue significativamente bajo en toda la ciudad, con un leve aumento en la zona sur occidental de la ciudad en las localidades de Kennedy, Bosa y Ciudad Bolívar.

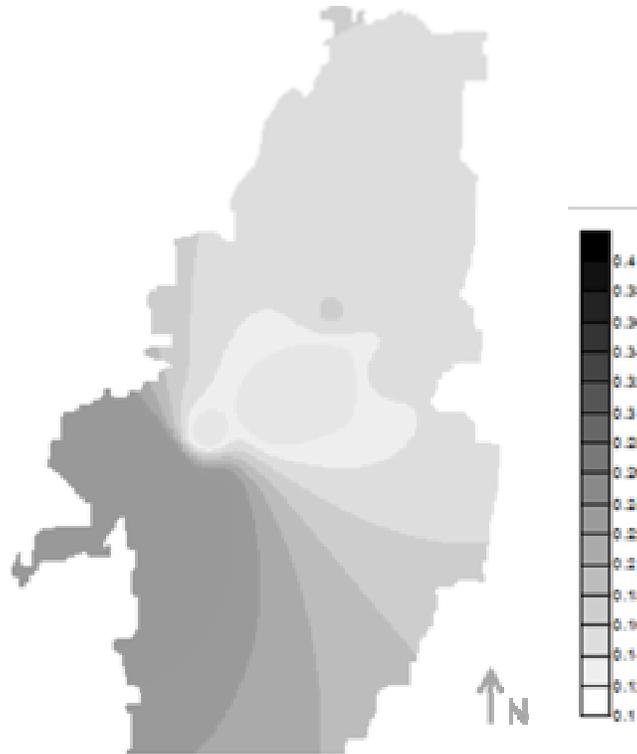


Figura 5.2 Mapa de isoconcentración de CO en Bogotá año 2006.

5.2 Dióxido de Azufre

Las concentraciones atmosféricas de dióxidos de azufre que se han registrado en la capital no constituyen un riesgo actual para la población. Aunque en el periodo comprendido entre 1998 y 2003 se alcanzaron IPE's cercanos al 10%, entre el 2004 y 2006 el índice porcentual de excedencia no superó el 1% (ver figura 5.3). Las concentraciones más altas de este contaminante se

presentaron en la estación de Sony, donde el IPE promedio de los últimos años fue del 17%.

En la figura 5.4 se observa cómo en el año 2006 las concentraciones más altas de dióxido de azufre se registraron al sur occidente de la ciudad en las localidades de Kennedy, Puente Aranda, Tunjuelito y el norte de Ciudad Bolívar.

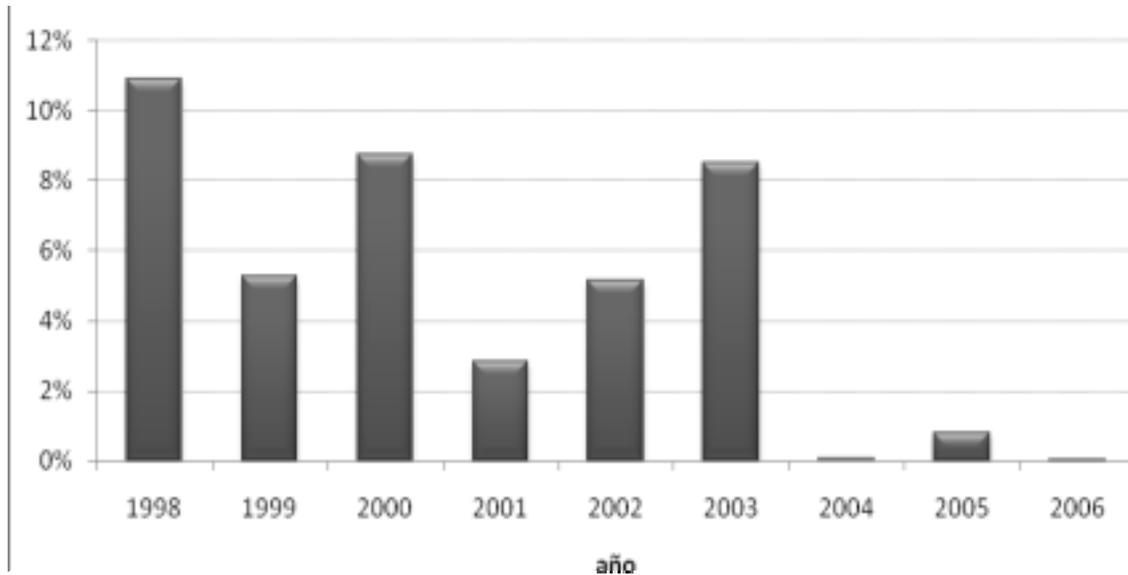


Figura 5.3 IPE de la norma anual de SO_2 en Bogotá basado en la media diaria.

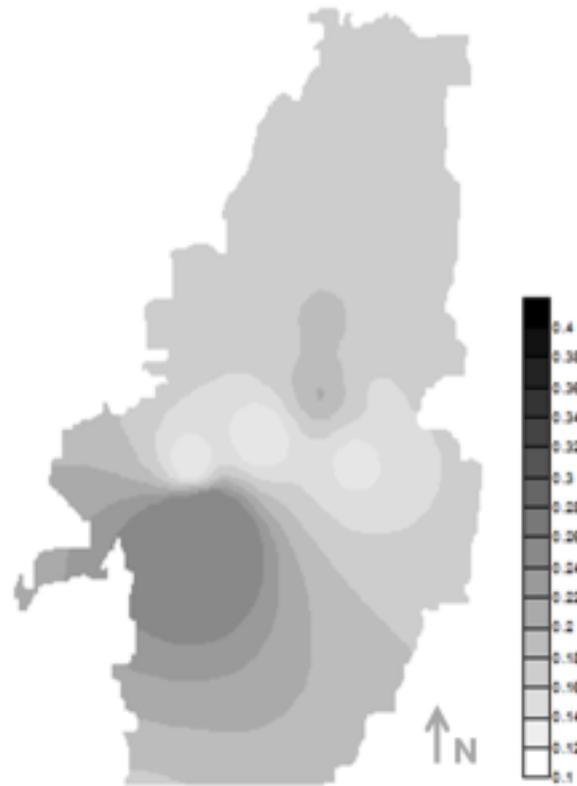


Figura 5.4 Mapa de isocentración de SO₂ en Bogotá año 2006.

5.3 Dióxido de Nitrógeno

Al igual que el monóxido de carbono, las concentraciones de dióxido de nitrógeno que se presentan en la ciudad son muy bajas. En la figura 5.5 se observa cómo durante los últimos años el IPE no superó el 0,5%. Para el caso específico del 2001 y 2005, las altas concentraciones registradas en la estación de Sony y Puente Aranda, al sur occidente de la ciudad, generaron un inusual incremento en el IPE de la ciudad.

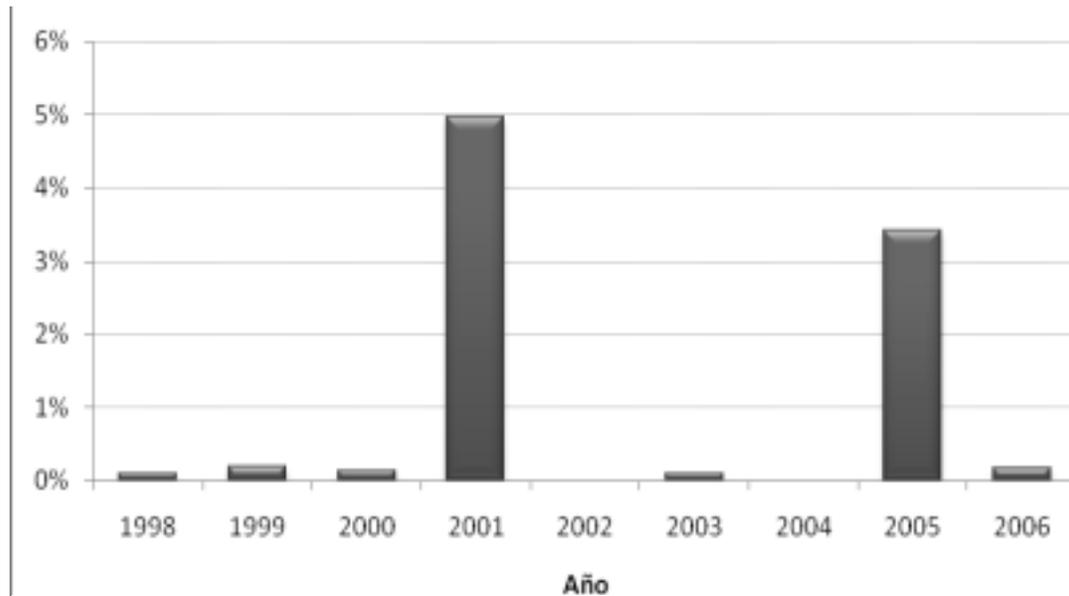


Figura 5.5 IPE de la norma anual de NO_2 en Bogotá basado en la media diaria.

En el 2006 las concentraciones de dióxido de nitrógeno registradas fueron considerablemente bajas. Únicamente se presentó un caso en Puente Aranda en donde el promedio de veinticuatro horas superó la norma anual. En la figura 5.6 se observa cómo el promedio anual de este contaminante no sobrepasa el 4% de la norma anual, exceptuando la localidad de Puente Aranda en donde el promedio anual registrado fue el 5% de la norma anual.

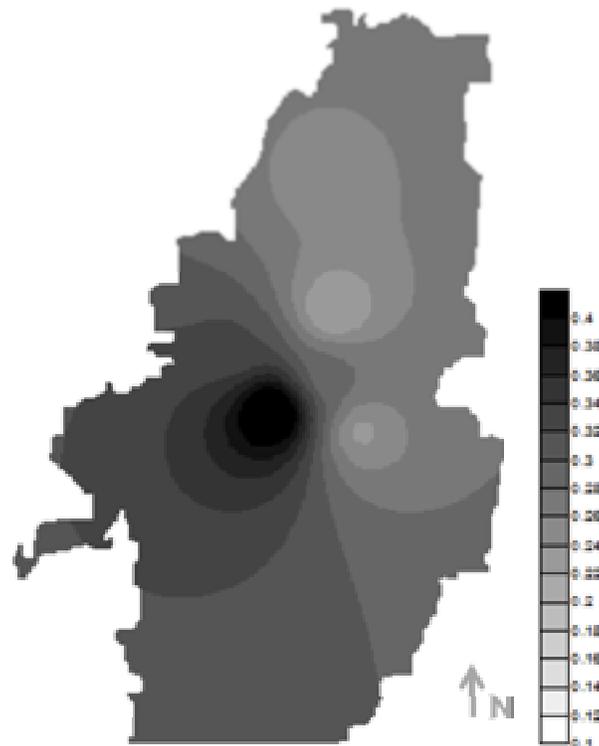


Figura 5.6 Mapa de isocentración de NO₂ en Bogotá año 2006.

5.4 Ozono

El ozono, a pesar de ser uno de los contaminantes que históricamente ha registrado un mayor índice porcentual de excedencia, ha disminuido considerablemente su concentración en los últimos años. En la figura 5.7 se observa cómo el IPE de ozono ha disminuido con el tiempo y cómo el 2006 fue el año con menor porcentaje de exceso de la norma de veinticuatro horas.

A diferencia de los otros contaminantes, en el 2006, los promedios anuales más altos de ozono se presentaron en las localidades de los Barrios Unidos, Teusaquillo y Chapinero en la zona norte y centro de la ciudad (ver figura 5.8).

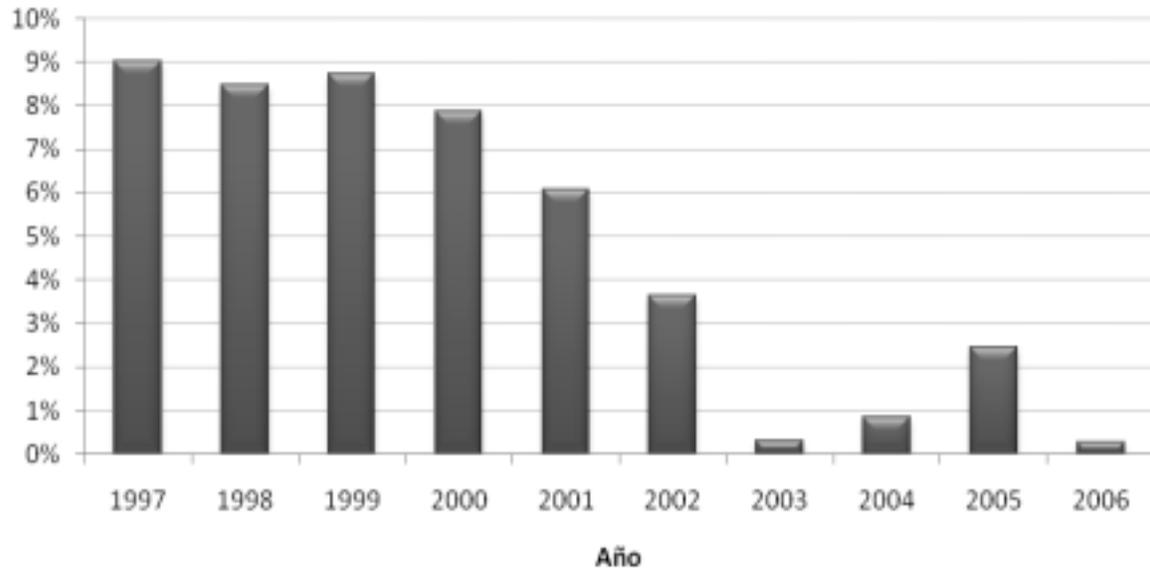


Figura 5.7 IPE de la norma de ocho horas de O_3 en Bogotá basado en la media Octo-horaria.



Figura 5.8 Mapa de isoc concentración de O₃ en Bogotá año 2006.

5.5 Material Particulado

Las concentraciones de la fracción respirable del material particulado (PM₁₀), como se muestra en la figura 5.9, sobrepasan constantemente la norma de calidad del aire para Bogotá. En el año 2005 se registró el porcentaje de exceso de la norma más alto de los últimos años. En el 50% de los días de este año, las concentraciones de PM₁₀ registradas en Bogotá incumplieron los límites de 70ug/m³ establecidos por la autoridad ambiental en la resolución 601 del 2006. Aunque en el 2006 se presentó una breve disminución en el IPE, la variabilidad del mismo en los últimos años no permite establecer una evidente tendencia en la disminución de la contaminación por PM₁₀ en la ciudad.

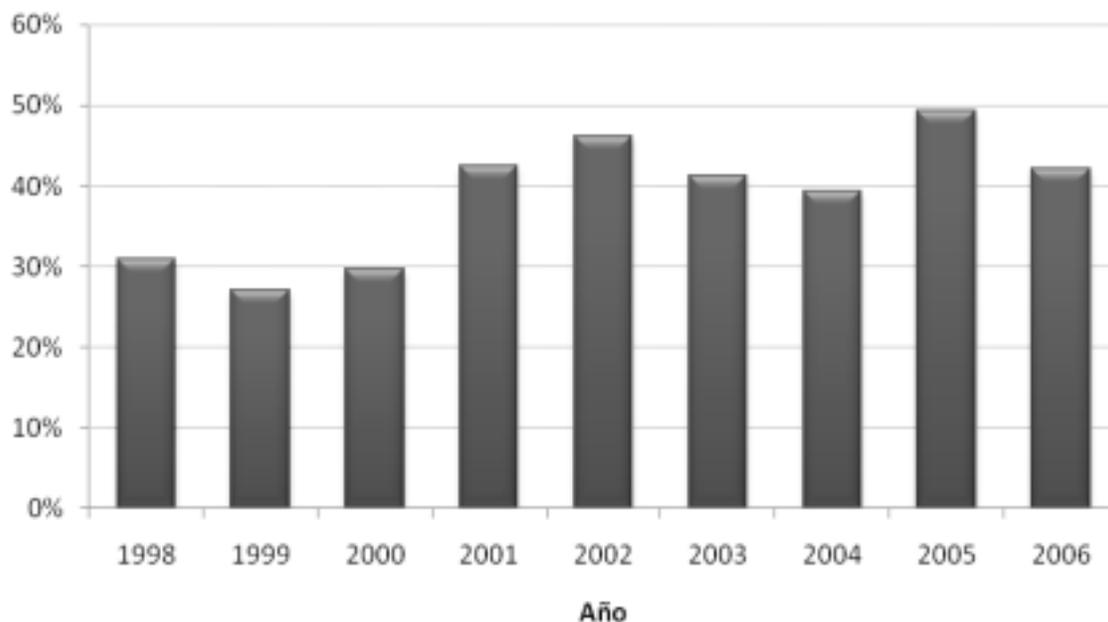


Figura 5.9 IPE de la norma anual de PM_{10} en Bogotá basado en la media diaria.

En La figura 5.10 se observa claramente cómo las concentraciones de material particulado inferior a 10 micras son significativamente superiores a la de cualquier otro contaminante. En la figura 5.11 se aprecia, en una escala de relación de concentración 3 veces mayor a la utilizada en las anteriores figuras, cómo en el 2006, en la mayor parte de la ciudad, el promedio anual de PM_{10} fue mayor a lo establecido por la ley y cómo en sectores industriales del sur occidente de Bogotá la concentración anual alcanzó a ser 1.5 veces más alta que la norma.

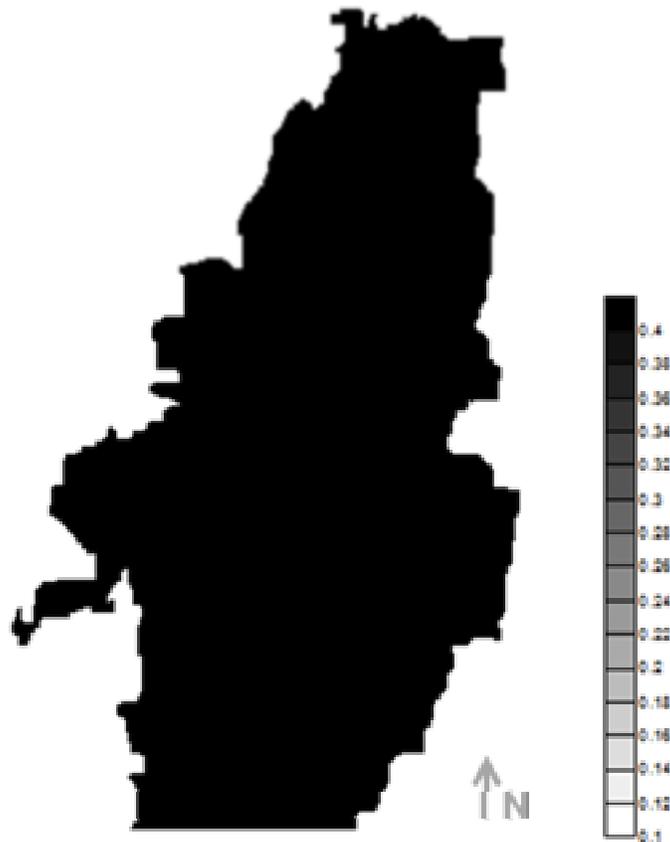


Figura 5.10 Mapa de isoconcentración de PM_{10} en Bogotá año 2006.

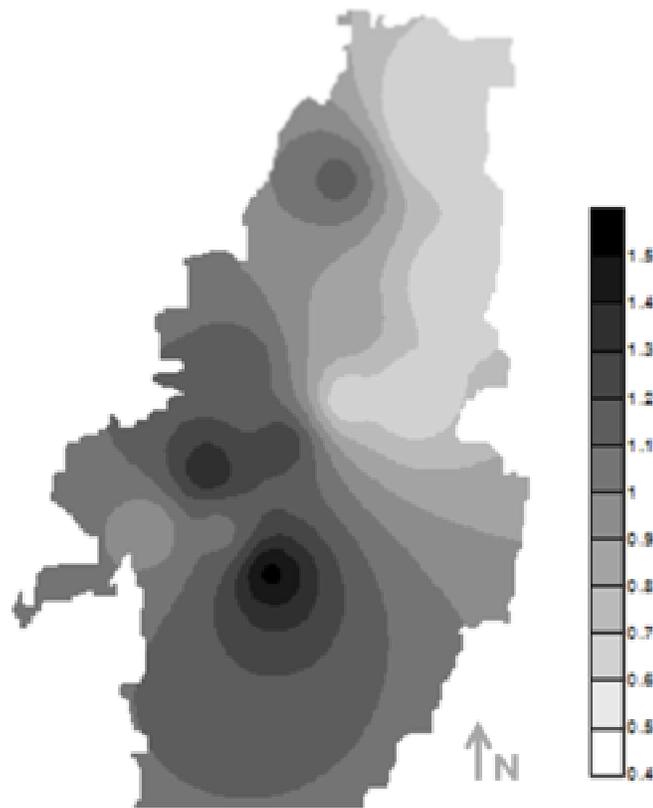


Figura 5.11 Mapa de isoconcentración de PM₁₀ en Bogotá año 2006 Escala.

En conclusión y como se puede evidenciar en la figura 5.12, el mayor problema de contaminación atmosférica al que se enfrenta actualmente Bogotá está relacionado con las altas concentraciones de PM₁₀ que se registran diariamente en la ciudad. Según el IPE calculado para los últimos 9 años, el 40% de los días se violó la norma anual de PM₁₀ en Bogotá, a diferencia de los otros contaminantes en los cuales el IPE no superó el 7%.

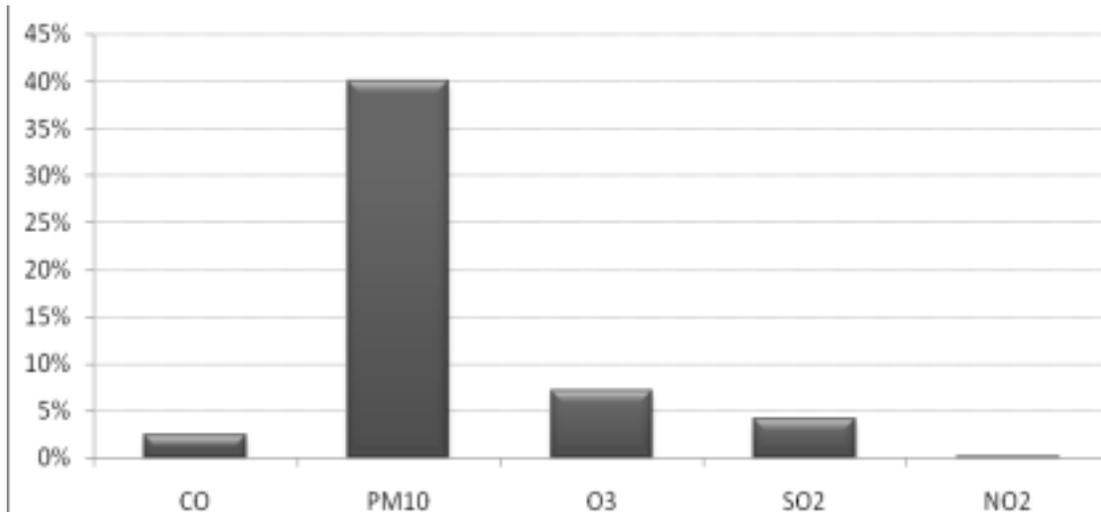


Figura 5.12 IPE de la norma de larga duración para contaminantes criterio entre 1997 y 2006.

6 MATERIAL PARTICULADO.

Como se mostró en el capítulo 5.0, Bogotá cuenta actualmente con un problema de contaminación por material particulado. Los altos niveles de PM_{10} registrados por la RM CAB, sumados a los riesgos en la salud de la población que estos pueden llegar a generar (Pope, 1991), evidencian la necesidad de estudiar a fondo el problema de contaminación por material particulado en la capital, con el fin de desarrollar políticas encaminadas al mejoramiento de la calidad del aire en Bogotá.

En la figura 6.1 se muestra el IPE de la norma anual ($70 \mu\text{g}/\text{m}^3$) de PM_{10} para las diferentes estaciones de Bogotá durante los últimos 9 años. En esta figura se puede observar que en las estaciones de Puente Aranda y Fontibón, al occidente de la ciudad, se presentan la mayor cantidad de casos de



incumplimiento de la norma. De igual forma en estaciones como el Bosque y la Escuela de Ingeniería en donde se registraron las menores concentraciones, se incumple la norma, lo que hace evidente que la contaminación por material particulado es un problema que afecta a toda la ciudad.

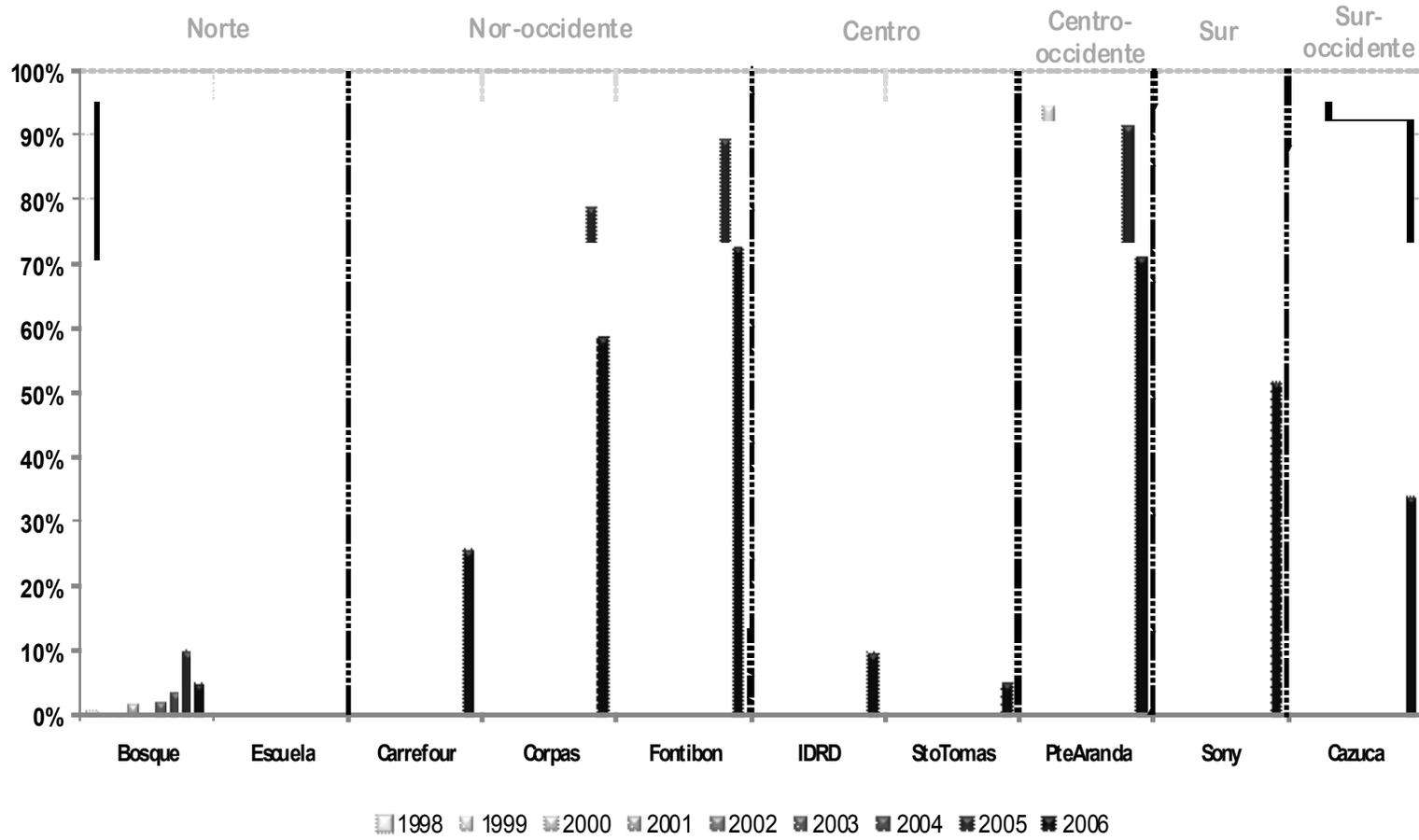


Figura 6.1 IPE de la norma anual de PM10 en Bogotá basado en la media diaria por estación.



6.1 Análisis de la contaminación por PM_{10} en la localidad de Puente Aranda.

Puente Aranda es la localidad número 16 de Bogotá y se ubica en el centro-occidente de la ciudad. Cuenta con 1723 hectáreas y una población de 221.000 habitantes (ALPA, 2007), y es considerada como el centro industrial de la capital. Las 2370.000 industrias (INAMCO, 2001) al igual que el impacto que genera el alto flujo vehicular, principalmente de carga pesada, que se presenta en vías principales como la Avenida 68, la Carrera 30, Avenida las Américas y la autopista Sur, generan un fuerte escenario de emisión que se refleja claramente en los estudios de calidad del aire de Bogotá.

Según los análisis realizados en este estudio (ver figura 6.2), entre 1999 y el 2006, el 81% de los días se superó la norma de calidad del aire. Entre los registros de la RMCA B se encuentran promedios diarios que superan los 200 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, siendo éstas concentraciones superiores a los límites de alerta máxima establecidos por las entidades ambientales tanto en Colombia como en el mundo. El 96% de los días se registraron en Puente Aranda concentraciones superiores a 50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, días en los cuales se estaría incumpliendo con la norma AAQS Americana.

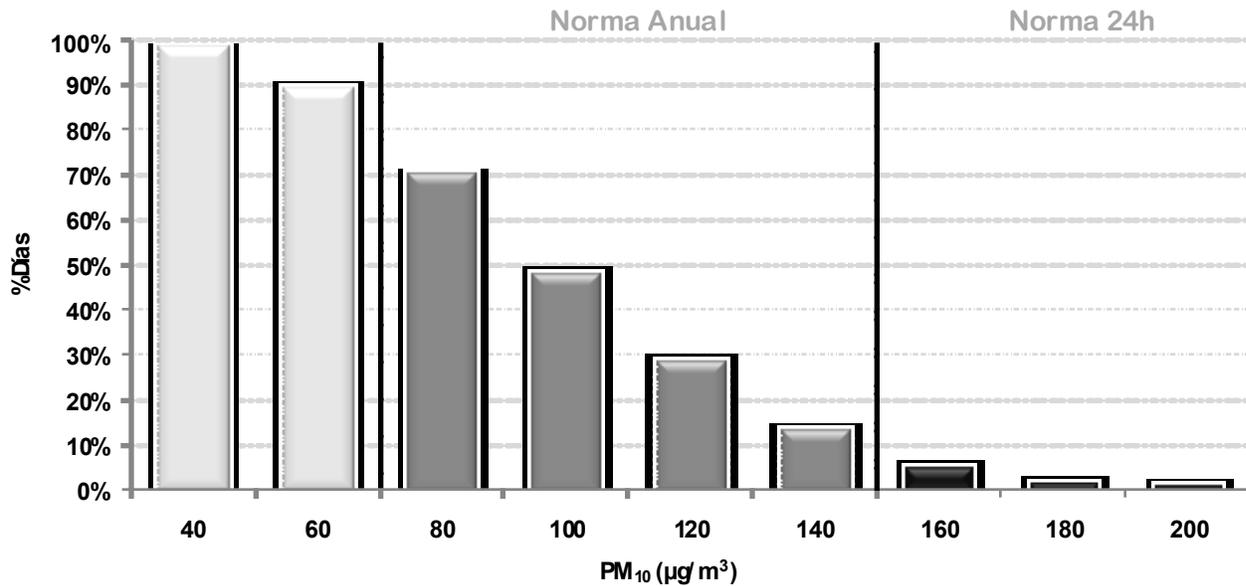


Figura 6.2 Distribución del porcentaje días en los que superan diversas concentraciones de PM₁₀ en la estación de Puente Aranda.

6.1.1 Tendencias de la contaminación por PM₁₀ en la localidad de Puente Aranda.

En la figura 6.3 se presenta la media móvil de la concentración de material particulado inferior a 10 micras con un periodo de un año. En esta gráfica se puede observar la evolución macro de la contaminación por PM₁₀ en la localidad de Puente Aranda. Como se evidencia en esta gráfica, desde finales de 1999 hasta mediados del 2002 se presentó una reducción considerable en las concentraciones de PM₁₀. Durante este periodo se pasó de concentraciones medias anuales mayores a los 110 µg/m³ (diciembre de 2000) a menores de 90 µg/m³ (junio de 2002). Para finales de 2005, se alcanzó el nivel máximo de 114 µg/m³; por su parte en el 2006 se presentó una tendencia general a la reducción en la contaminación por PM₁₀.



Figura 6.3 Media Móvil de la concentración de PM_{10} en la estación de Puente Aranda (Periodo = 365 días).

En la figura 6.4 se observa la media móvil de PM_{10} con un periodo de un mes para la estación de Puente Aranda. En esta figura se puede ver de forma más detallada la variación en la concentración de PM_{10} durante los últimos ocho años. En la gráfica se encuentran representados con dos líneas horizontales la norma anual ($70 \mu\text{g}/\text{m}^3$) y la norma de veinticuatro horas ($150 \mu\text{g}/\text{m}^3$), y con una línea gris continua la totalidad de los datos diez-minútales registrados en esta estación.

Por medio de esta gráfica se puede observar cómo históricamente la mayoría de los datos se encuentran por encima de la norma anual y, también cómo a pesar de que la media móvil no sobrepasa en ningún momento la norma de veinticuatro horas, existe una gran cantidad de registros que sí exceden la misma. Por otra parte, se puede apreciar un comportamiento periódico en la concentración de PM_{10} , el cual comienza en junio, julio y agosto con concentraciones típicamente bajas, seguido de un incremento en septiembre octubre y noviembre, el cual



culmina con concentraciones máximas en los primeros meses de cada año y finaliza con un decremento en marzo, abril y mayo, cumpliendo de esta forma ciclos cerrados de 12 meses.

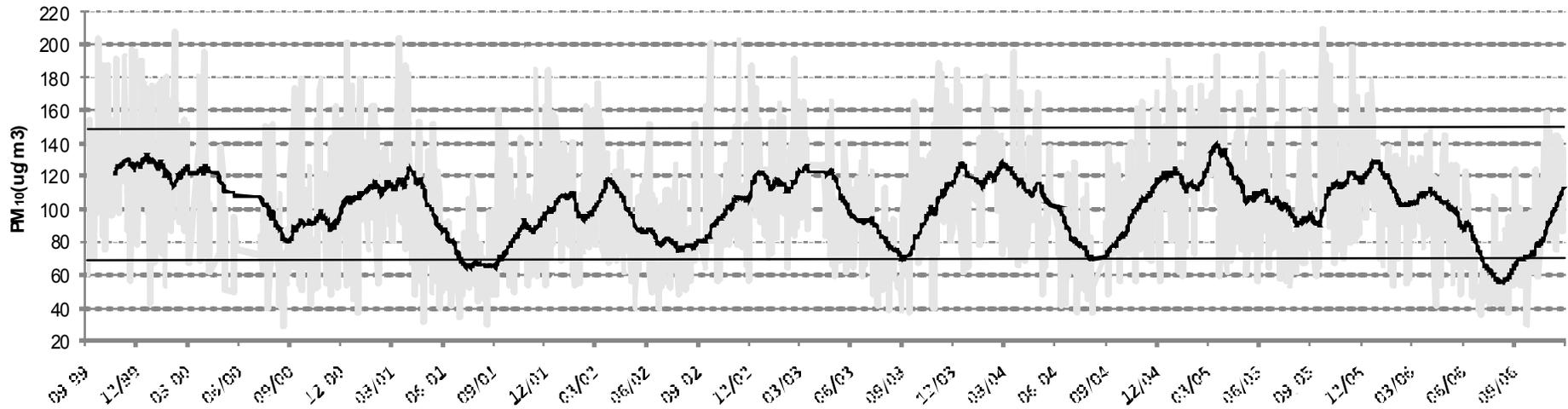


Figura 6.4 Media Móvil de la concentración de PM₁₀ en la estación de Puente Aranda (Periodo = 30 días), Norma 24h 150ug/m³, Norma Anual 70ug/m³.

Según el IPE de la norma anual y de veinticuatro horas de PM_{10} calculado para la estación de Puente Aranda (Figura 6.5), durante los últimos 8 años los promedios diarios registrados comúnmente sobrepasan las normas de calidad de aire. En 1999 se presentó el mayor número de casos de excedencia, tanto de la norma anual (93%) como de la norma diaria (23%). Así mismo, en el 2001 se presentó el menor índice porcentual de excedencia de la norma anual (69%) como de la norma diaria (23%). Así mismo, en el 2001 se presentó el menor índice porcentual de excedencia de la norma anual (69%). El año 2006 presentó un descenso significativo en el número de incumplimientos, pasando de 91% en el 2005 a 71% en el 2006. Durante el periodo de tiempo analizado para el año 2006 (enero a Noviembre), no se registró ningún promedio de veinticuatro horas que excediera la norma diaria de Material particulado inferior a 10 micras en Puente Aranda.

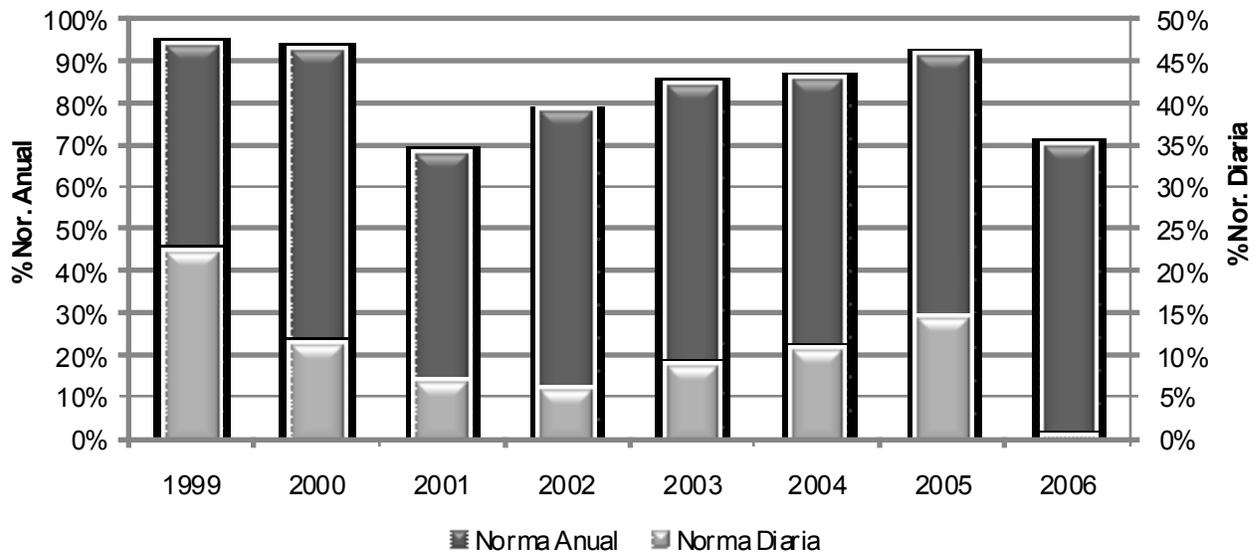


Figura 6.5 IPE de la norma Anual y 24h de PM_{10} en la estación de puente Aranda con base en los promedios diarios.

6.1.2 Análisis Descriptivo de la Contaminación por PM_{10} en la Localidad de Puente Aranda.

En la Figura 6.6 se observa la distribución de frecuencia de las concentraciones de material particulado registradas en la estación de Puente Aranda durante el 2006. Para este año la media de la concentración diaria fue aproximadamente $89 \mu\text{g}/\text{m}^3$, la desviación estándar 28,4 y el error típico 1.57. Parámetros que evidencian una variabilidad significativa en la distribución de los datos de PM_{10} durante este año.

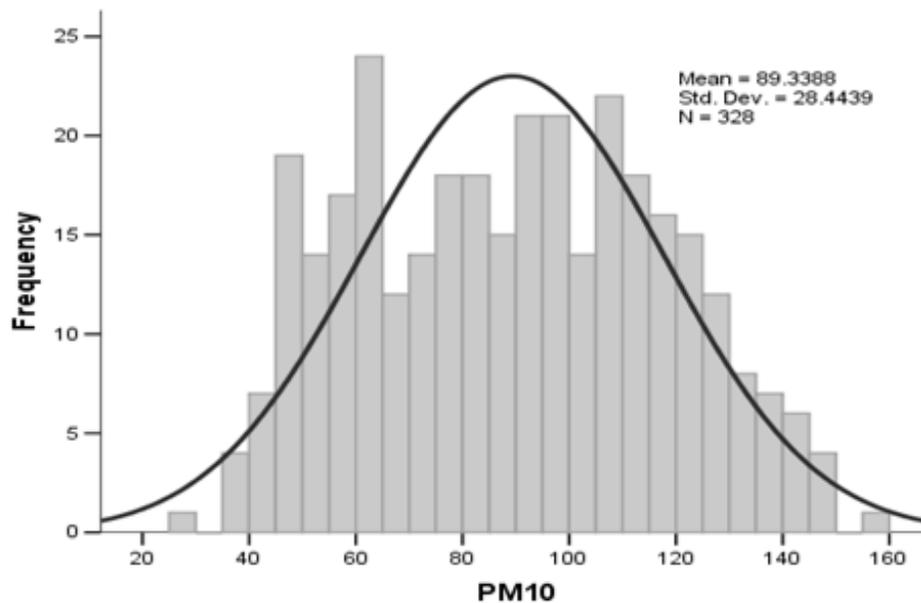


Figura 6.6 Histograma de las concentraciones de PM_{10} en la estación de Puente Aranda año 2006.

Las concentraciones de PM_{10} que se registran diariamente en Puente Aranda describen una distribución normal similar a la representada en la Figura 6.6. Para el caso específico del 2006, el nivel de significancia calculado por medio del test de normalidad de Kolmogorov-Smirnov fue de 0.001, valor considerablemente bajo que indica que es razonable asumir una distribución normal de la población y, por lo



tanto, la media aritmética calculada es una medida de tendencia central que representa adecuadamente a la población.

En la Figura 6.7 se muestra en una gráfica los intervalos de confianza (95%) para los promedios mensuales de las concentraciones de material particulado registrados en la estación de Puente Aranda durante los últimos 3 años. En esta gráfica se observa nuevamente cómo en los meses de junio, julio y agosto se registran las concentraciones promedio de PM_{10} más bajas; mientras que en el periodo comprendido entre noviembre y marzo se presentan las más altas del año. De igual forma, se observa cómo las concentraciones de PM_{10} constituyen una variable continua para la cual los promedios mensuales de los diferentes meses del año presentan variaciones estadísticas significativas, dificultando la identificación de una tendencia clara en la evolución de la misma.

En la Figura 6.8 se muestran los diagramas de cajas de los promedios mensuales de las concentraciones de PM_{10} registrados en la estación de Puente Aranda. En estas gráficas, se puede observar la distribución y variabilidad de los datos, teniendo en cuenta la influencia que puedan tener los valores extremos (IDEAM, 2005). En los diagramas de cajas se indica el rango en el que se concentra el 50% central de la información ("caja"), la mediana (la línea central), los rangos máximos y mínimos en los que se concentra el 95% central de los datos ("bigotes") y los registros atípicos o fuera de rango "outlier" (Díaz, 2001).

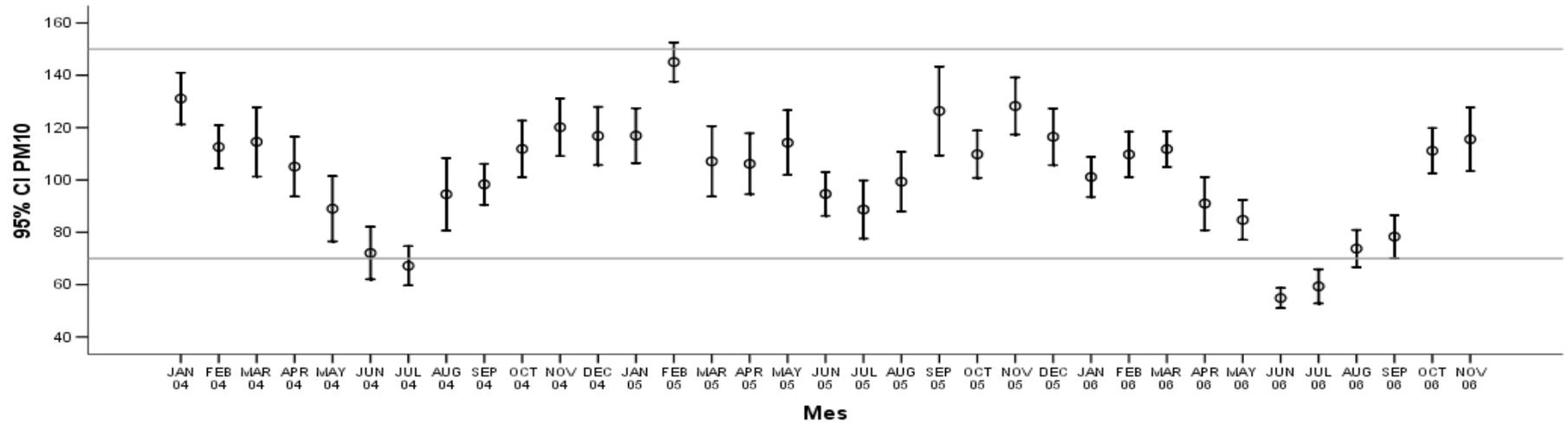


Figura 6.7 Intervalos de confianza de las concentraciones mensuales de PM_{10} en la estación de Puente Aranda.

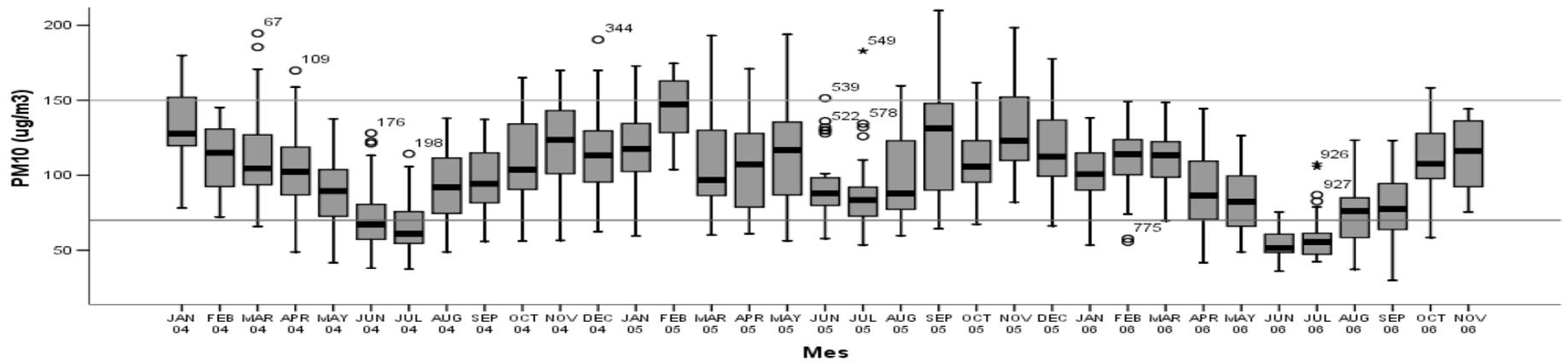


Figura 6.8 Diagrama de cajas para las concentraciones mensuales de PM_{10} en la estación de Puente Aranda.



De acuerdo a los diagramas de cajas (Figura 6.8), en la mayoría de los meses del año se presenta una variabilidad significativa en los datos de PM_{10} registrados en la localidad de Puente Aranda. Por ejemplo, en septiembre del 2005 se registró un rango de concentración muy amplio, lo cual difiere considerablemente con los registros de junio del 2006, en donde el rango de concentraciones fue muy bajo. De este último se puede derivar un valor representativo que se ajusta a una distribución simétrica.

La alta variabilidad que se presenta en los registros de contaminación por material particulado en la ciudad, obedece a un patrón externo que genera fluctuaciones cíclicas durante todo el año. Este fenómeno se puede evidenciar claramente en las gráficas de variación temporal como la media móvil Figura 6.4 y en los intervalos de confianza de los últimos 3 años Figura 6.7.

6.2 Correlación Entre las Variables Meteorológicas y las Concentraciones Atmosféricas de Material Particulado.

Como se describió en el capítulo 1.6, Bogotá cuenta con un clima sujeto a constantes cambios, en el cual se destacan dos periodos marcados de lluvias y dos periodos secos. En este capítulo se evaluará el efecto de la precipitación y la velocidad del viento en las concentraciones de material particulado que se registran en la localidad de Puente Aranda. En la Figura 6.10 se muestra una serie de tiempo con los promedios mensuales de PM_{10} y precipitación proporcionados por la RMCA B durante los últimos ocho años.



A través del gráfico que se muestra en la Figura 6.9 no se puede establecer una relación clara entre los registros de material particulado y los niveles de precipitación medidos.

En la Figura 6.10 se encuentra una gráfica comparativa entre los promedios mensuales de PM10 y velocidad del viento. A diferencia de la Figura 6.9 en esta Figura si se puede identificar claramente un patrón de correlación. Para este caso durante los últimos ocho años en los meses que se presentaron los valores medios de velocidad del viento más altos (julio y agosto), se registraron simultáneamente las concentraciones de material particulado más bajas.

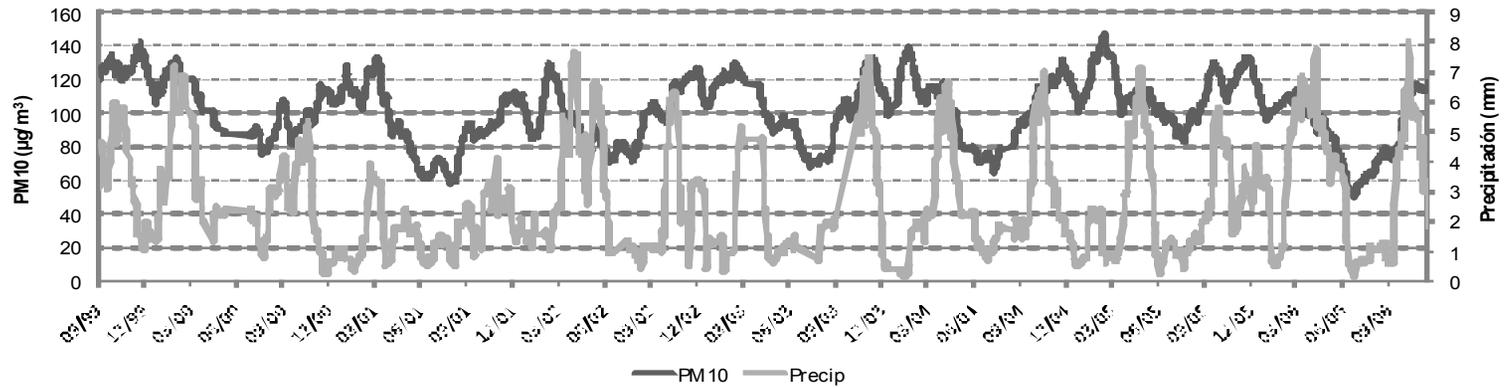


Figura 6.9 Gráfica comparativa entre las concentraciones mensuales de PM_{10} y precipitación en la estación de Puente Aranda.

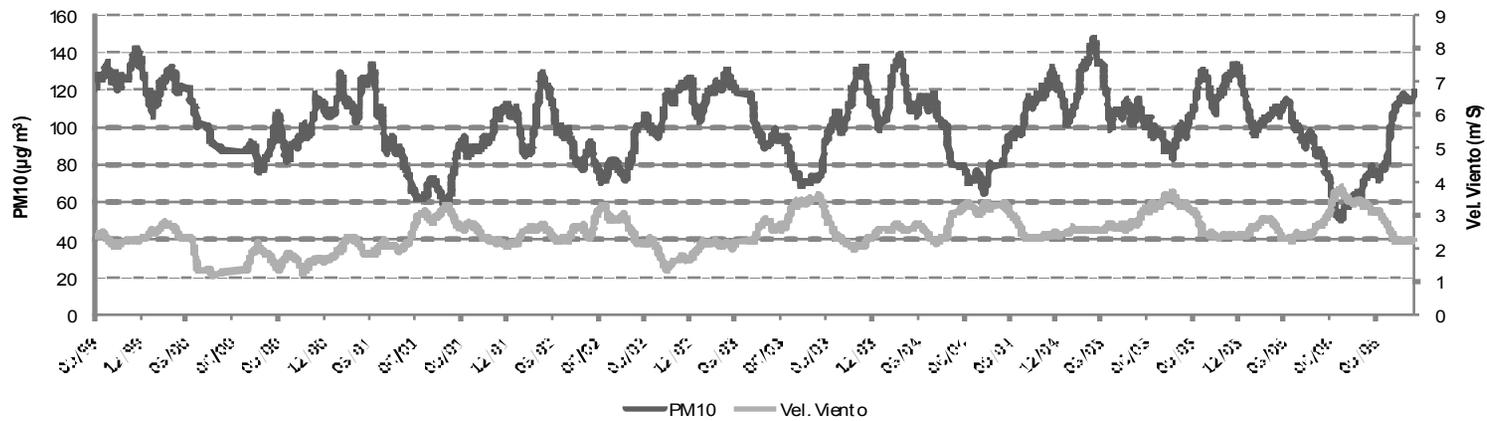


Figura 6.10 Gráfica comparativa entre las concentraciones mensuales de PM_{10} y velocidad del viento en la estación de Puente Aranda.

En la Figura 6.11 se muestra el diagrama de dispersión para la relación entre la precipitación y las concentraciones de material particulado. El coeficiente de correlación R^2 de 0.044 calculado para la misma establece una correlación mínima entre las variables.

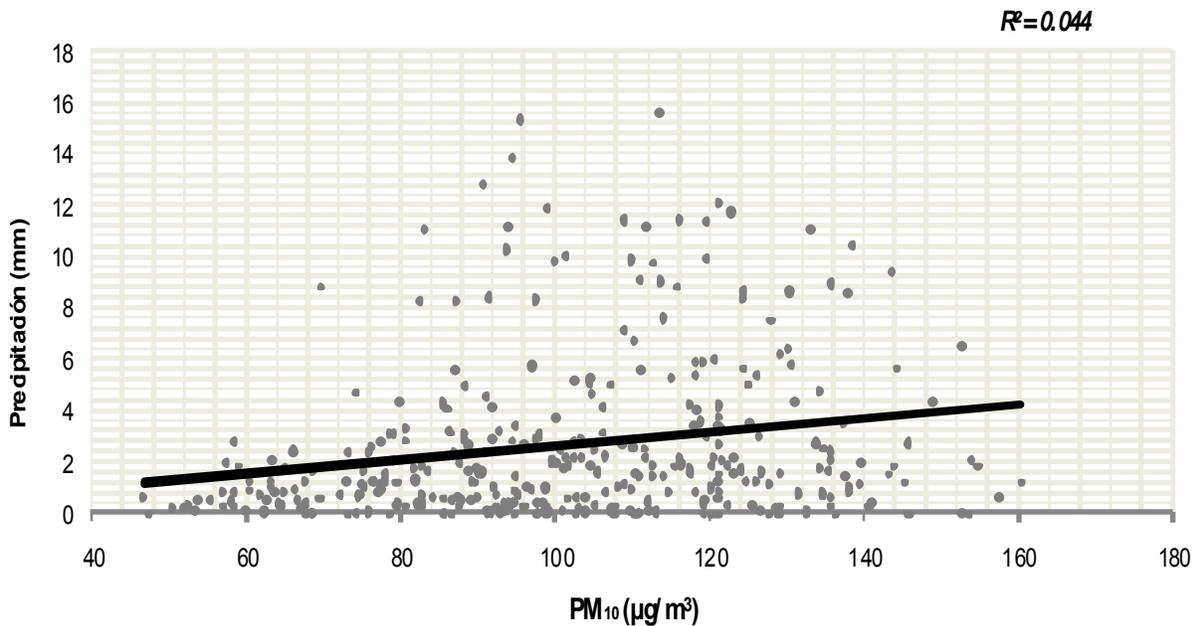


Figura 6.11 Diagrama de dispersión de PM₁₀ y precipitación en la estación de Puente Aranda año 2006.

En la Figura 6.2.3 se puede observar de forma más clara la relación que existe entre la velocidad del viento y las concentraciones atmosféricas de PM₁₀. Por medio de la gráfica de dispersión, se halló una relación inversamente proporcional con un coeficiente de correlación R^2 de 0.402. Basado en lo anterior, podría afirmarse que a mayor velocidad del viento, menor concentración de PM₁₀.

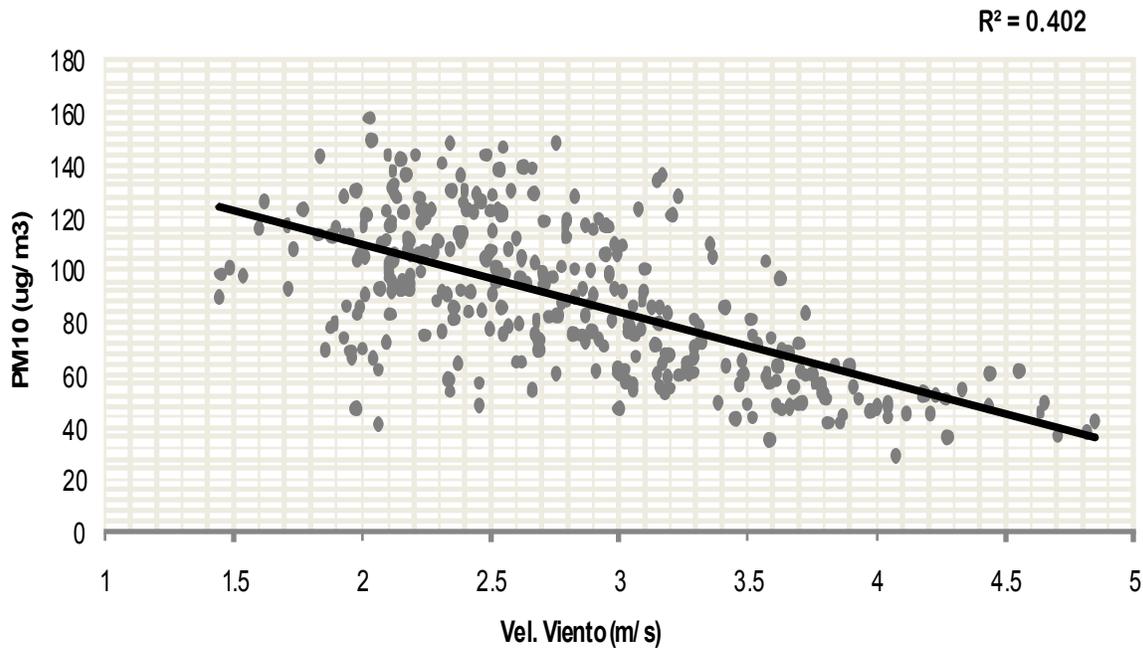


Figura 6.12 Diagrama de dispersión de PM_{10} y velocidad del viento en la estación de Puente Aranda año 2006.

Para llegar a una mejor aproximación del efecto de las variables meteorológicas en las concentraciones de material particulado se realizó una Regresión lineal múltiple, en la cual se determinaron los coeficientes betas apropiados para expresar la concentración de PM_{10} en función de la velocidad del viento y la precipitación.

$$Y = \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2$$

Con base en los datos de precipitación, velocidad del viento y material particulado registrados durante el 2006 en la estación de Puente Aranda, se encontró para el primero de los casos un coeficiente beta de 0.01 y un nivel de significancia de 0.61; mientras que para la velocidad del viento se presentó un coeficiente beta de -0.44 y un nivel de significancia de 0.00, lo cual corrobora que las concentraciones de material particulado que se registran en la ciudad



tienen una mayor correlación con la velocidad del viento que con la precipitación.

6.3 Corrección de las Tendencias de PM_{10} en la estación de Puente Aranda por factores Meteorológicos.

Como se analizó en el capítulo 6.2, los valores de material particulado que se registran a diario en las estaciones de monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá dependen de la velocidad del viento. En este capítulo se desarrollo una corrección de la información teniendo en cuenta los rangos de velocidad del viento a partir de los cuales los registros de material particulado decaen considerablemente.

En la Figura 6.13 se presenta una Serie de tiempo con las concentraciones mensuales promedio de Material particulado corregidas por la Velocidad del viento (línea oscura). Para esta gráfica solo se tuvieron en cuenta los datos de aquellos días en los que la velocidad del viento promedio fue inferior a la media (2,6 m/s). Como se puede observar en la gráfica; la curva de concentración corregida (línea oscura) por velocidad del viento presenta una menor variabilidad que la curva original (línea Clara). En el caso específico del 2006, se puede ver claramente que la velocidad del viento fue uno de los factores que influyeron en las concentraciones bajas de material particulado registradas durante los meses de junio y julio, afectando considerablemente los promedios anuales. A pesar de esto sigue siendo evidente que el 2006 fue un año comparativamente más limpio que los anteriores.

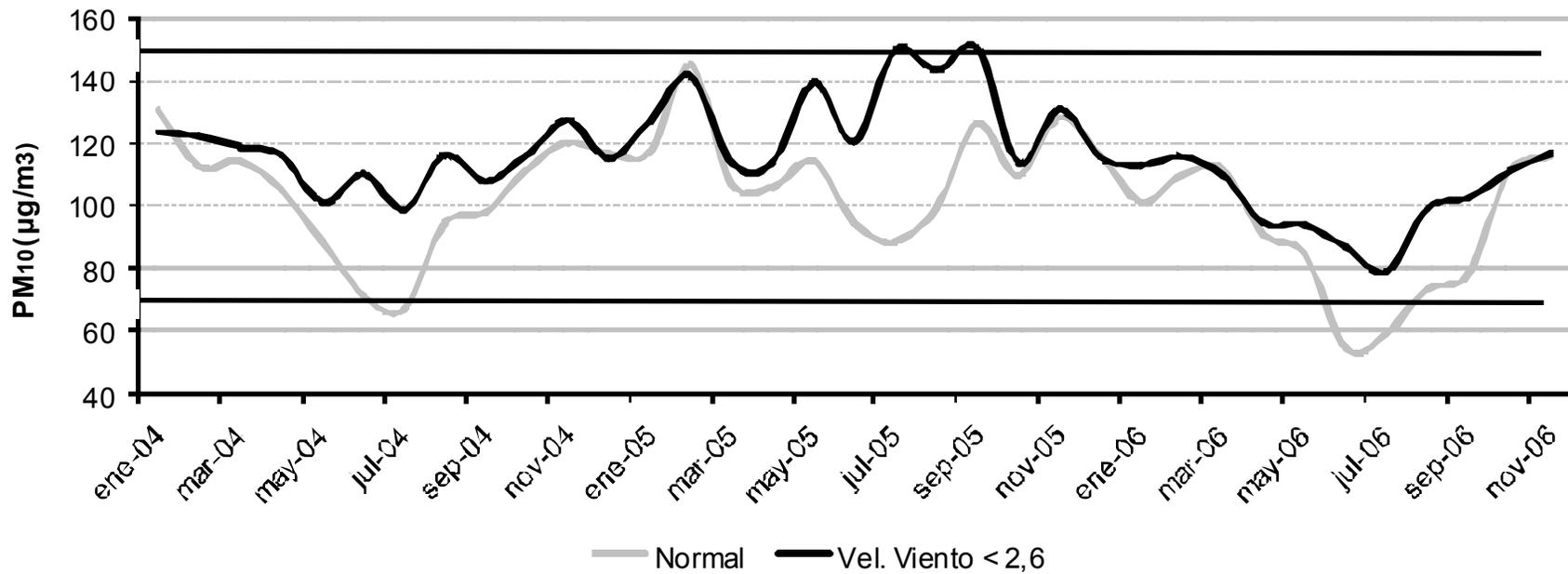


Figura 6.13 Serie de tiempo de la concentración de Material particulado en Puente Aranda corregida por la Velocidad del viento.



7 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.

Los resultados de los análisis realizados sugieren que para contaminantes gaseosos tales como los óxidos de azufre y de nitrógeno así como para el monóxido de carbono, Bogotá no presenta en la actualidad un problema significativo de contaminación del aire.

Al mismo tiempo, las concentraciones atmosféricas de la fracción respirable de material particulado (PM_{10}) en Bogotá tienden a encontrarse muy por encima de los niveles sugeridos por las normas de calidad del aire. Por ejemplo, durante el año 2006, en ciertos sectores de la ciudad (especialmente en las zonas con elevados niveles de actividad industrial y vehicular) se superó la norma anual de PM_{10} el 71% de los días del año. Durante el mismo año, fue común encontrar valores de concentraciones medias diarias de PM_{10} que superaron los $110 \mu g m^{-3}$.

Al observar la tendencia de los niveles de contaminación por PM_{10} en la ciudad de Bogotá, se identificó un comportamiento periódico en la concentración de dicho contaminante. El movimiento oscilatorio descrito se caracteriza por registrar concentraciones típicamente bajas durante los meses de junio, julio y agosto, y niveles máximos en los últimos meses de cada año.

Al analizar de forma conjunta los datos de las concentraciones de PM_{10} y los valores de velocidad de viento, se determinó que dicha variable, por encima de la intensidad de precipitación, es la condición meteorológica que más influyente



al momento de determinar los niveles de contaminación en Bogotá. De esta forma, los registros de la RMCA B para la última década muestran de forma inequívoca que en las temporadas en las que se presentan vientos fuertes en la ciudad se disminuyen de forma importante los niveles de contaminación del aire.

Para que la información de la red de monitoreo sean una herramienta útil a la hora de evaluar las políticas enfocadas en el mejoramiento de la calidad del aire de la ciudad, es indispensable generar controles que involucren los efectos generados por factores externos, que de una u otra forma impidan identificar una tendencia clara de la contaminación atmosférica en Bogotá.



8 REFERENCIAS

ALA, American Lung Association's , 2007 Annual Air Pollution ranking lists, Metropolitan Areas Most Polluted by Short-term Particle Pollution (24-Hour PM_{2.5}),2007.

ALPA, Alcaldía Local De Puente Aranda, Plan de Desarrollo 2005-2008.

ARB, Air Resources Board, California Almanac of Emissions and Air Quality 2006 Edition, 2006.

ARB, Air Resources Board, California's Air Quality History Key Events, disponible en: www.arb.ca.gov, 18/06/2007.

BEHRENTZ E. Contaminación Atmosférica en Bogotá: Relación entre Salud Pública y Calidad del Combustible Vehicular y Propuesta de Acciones Pertinentes. Revista ANDESCO –Asociación Nacional de Empresas de Servicios Públicos Domiciliarios y Actividades Complementarias. 2006

BUREAU OF METEOROLOGY, New South Wales Forecasts 2007 , 2007.
CARNOVALE, Air Emissions Inventory for the Greater Metropolitan Region in NSW , Department of Environment and Conservation, Australia, 1997.

CANCINO JULIANA, Validación y Análisis de la Información de la Red de Calidad del Aire De Bogotá, Proyecto de grado Universidad de los Andes, Bogotá, 2006.

CHINA'S NATIONAL BUREAU OF STATISTICS, Fifth National Census 2000, Beijing, 2001.

CSDC, California State Data Center, Census 2000 data for the State of California, 2000.

DÍAZ S, FERNÁNDEZ S, Representación gráfica en el Análisis de Datos , Unidad de Epidemiología Clínica y Bioestadística. Complejo Hospitalario Juan Canalejo. España, 2001.

DWR, Department of Water Resources California, California State Climatologist Monthly Climate Summary, 2007.

GLA, Greater London Authority, Assembly Scrutiny of The mayor's Air Quality Strategy, 2001.

GREEN D, Air Quality in London 2005 and mid 2006, London Air Quality Network report, 2006.



IDEAM, Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales. Red de Estaciones Hidrometeorológicas de Colombia – Bogotá. Datos de Precipitación y Vientos.

IDEAM, Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales. *Análisis e Interpretación de Datos de la Calidad del Aire Bogotá, 2005.*

IDEAM, Instituto de Hidrología, Meteorología, y Estudios Ambientales. *Documento Soporte Norma de Calidad del Aire.* Subdirección de estudios ambientales. Bogotá. 2005.

INAMCO-DAMA, Inventario de fuentes fijas de Emisión 2001.

INEGI, Instituto Nacional de Estadística Geografía e Informática, XII Censo General de Población y vivienda 2000, México, 2001.

JHINGHUA GUO, A mechanism for the increase of pollution elements in dust storms in Beijing, Center for Atmospheric Environmental Study, Beijing Normal University, 2003.

JIMING HAO, YEWU, LIXIN FU, Source Contributions to Ambient Concentrations of CO and NO_x in the Urban Area of Beijing, Department of Environmental Science and Engineering, Tsinghua University. Beijing, 2001.

KAUFFMAN ERIC, Atlas of the Biodiversity of California, Climate and topography, California department of fish and game, 2006.

LAQN, London Air Quality Network, Air Quality in London 2004 (final report), 2004.

MEJÍA VELÁZQUEZ G, Calidad del Aire en Ciudad de México Una Aproximación Multidisciplinaria para su Adecuada Gestión, Centro de Calidad Ambiental, Dirección de Investigación y Posgrado del Campus de Monterrey, 2003.

OFFICE FOR NATIONAL STATISTICS, government departments and devolved administrations, 2001 Census report, UK, 2002.

POPE CA, DOCKERY DW, Spengler JD, Raizenne ME. Respiratory health and PM₁₀ pollution. A daily time series analysis. Department of Economics, Brigham Young University, Provo, Utah 1991.

RODRIGUEZ PAULA, Actualización Del Inventario De Emisiones Para Vehículos Operados con Gasolina y gas Natural En Bogotá, Proyecto De Grado Universidad De Los Andes, 2007.



SCAQMD, South Coast Air Quality Management Districts, 2007 Air Quality Management Plan, 2007.

SCT, Secretaría de Comunicaciones y Transporte, Estadística Básica del Auto-transporte Federal, Estadística Básica 2004, Ciudad de México, 2004.

SDA, Secretaria distrital de Ambiente. Base de Datos Red de Medición de la Calidad del Aire de Bogotá RM CAB.

SDA, Secretaria distrital de Ambiente. *Informe Anual de Calidad del aire de Bogotá Año 2005*. Bogotá, Marzo de 2006.

SIMAT, Sistema de Monitoreo Atmosférico, Gobierno del distrito Federal, Secretaría del Medio Ambiente, Informe del Estado de la Calidad del Aire y Tendencias 2001, 2002.

UK CLIMATE IMPACTS PROGRAMME (UKCIP), London Warming's The Impact of Climate Change on London, summary report, University of Oxford, 2002.

UN, United Nations, World Urbanization Prospects, The 2005 Revision Population Database, 2006. Disponible en:
esa.un.org/unup/index.asp?panel=2

W. FULLER GARY, Evidence for increasing concentrations of primary PM10 in London, Environmental Research Group, King's College London, 2006.

XIAO-CHUAN PAN, Time-Series Study On The Air Pollution And Daily, 2002.

YUTONG, Air Quality Monitoring In Beijing, Beijing Municipal Environmental Monitoring Center, BAQ- HONGKONG, 2002.



*Gracias a todas las personas que de
alguna manera u otra hicieron
posible este proyecto.*