



UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA

**EVALUACIÓN DE LOS INVENTARIOS DE EMISIONES DE FUENTES
MÓVILES DE BOGOTÁ MEDIANTE DATOS DE LA RED DE CALIDAD
DE AIRE**

LEONARDO QUIÑONES CANTOR

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA – INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.
2012**

**EVALUACIÓN DE LOS INVENTARIOS DE EMISIONES DE FUENTES
MÓVILES DE BOGOTÁ MEDIANTE DATOS DE LA RED DE CALIDAD
DE AIRE**

LEONARDO QUIÑONES CANTOR

Trabajo final presentado para optar al título de
Magister en Ingeniería Ambiental

Director
Ing. NÉSTOR Y. ROJAS ROA, PhD

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE COLOMBIA
FACULTAD DE INGENIERÍA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA QUÍMICA Y AMBIENTAL
MAESTRÍA EN INGENIERÍA – INGENIERÍA AMBIENTAL
BOGOTÁ D.C.
2012**

Ahora es necesario reconocer que
ante el vasto conocimiento que se nos escapa
de las manos no somos nada, solo lo que hacemos
bien da valor a lo poco que sabemos y al empeño
que hemos puesto en aprenderlo.

A mi madre y a mi padre
A mi abuelita, a Angelita
A Orlando por su legado imborrable
A todos aquellos que me han acompañado
Y por supuesto a mi amada esposa Bibiana

Sin ustedes mi corta alegría por este pequeño
paso de muchos que me faltan no sería posible.

El autor agradece de manera especial a:

- Ing. Néstor Rojas y al grupo de Calidad del aire de la Universidad Nacional de Colombia por su apoyo en el desarrollo de este trabajo.
- Ing. Ernesto Romero y demás integrantes de la Subdivisión de calidad del aire de la SDA por su apoyo en la consecución de datos.
- La Universidad Nacional de Colombia.

CONTENIDO

RESUMEN.....	1
ABSTRACT.....	1
INTRODUCCIÓN.....	2
CAPITULO I. ANTECEDENTES.....	4
1.1. INVENTARIOS DE EMISIONES PARA LA CIUDAD DE BOGOTÁ.....	4
1.2. EVALUACIÓN DE INVENTARIOS DE EMISIONES.....	8
1.3. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN.....	15
1.3.1. Problema de investigación.....	15
1.3.2. Objetivos.....	16
CAPITULO II. MARCO CONCEPTUAL.....	17
2.1. INVENTARIOS DE EMISIONES DE FUENTES MÓVILES.....	17
2.1.1. Concepto.....	17
2.1.2. Complejidad de los inventario.....	18
2.1.3. Modelos para el cálculo de emisiones.....	19
2.1.4.1. Modelo MOBILE.....	20
2.1.4.2. Modelo COPERT.....	21
2.1.4.3. Modelo IVE.....	21
2.1.5. Incertidumbre de los inventarios.....	21
2.2. EVALUACIÓN DE INVENTARIOS DE EMISIONES PARA FUENTES MÓVILES.....	22
2.2.1. Concepto.....	22
2.2.2. Metodologías de evaluación.....	22
2.2.2.1. Comparación de inventarios globales y de fuentes móviles.....	23
2.2.2.2. Comparación de emisiones per cápita.....	23
2.2.2.3. Comparación de emisiones y factores de actividad.....	23
2.2.2.4. Comparación con datos ambientales.....	24
2.2.2.5. Otras metodologías.....	25
2.3. EVALUACIÓN DE INVENTARIOS DE EMISIONES CON DATOS AMBIENTALES.....	25
2.4. INFORMACIÓN BASE PARA LA CIUDAD DE BOGOTÁ.....	26
2.4.1. Comportamiento de los vientos.....	26
2.4.2. Temperatura y altura de capa de mezcla.....	27
2.4.3. Flota vehicular.....	28
CAPITULO III. PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO.....	30
3.1. REVISIÓN DE DATOS DE INVENTARIOS DE EMISIONES.....	32
3.2. PROCESAMIENTO DE DATOS DE CALIDAD DEL AIRE.....	33
3.2.1. Revisión de datos.....	33
3.2.2. Selección de estaciones de monitoreo.....	34
3.2.3. Validación de datos para las estaciones escogidas.....	35

3.3.	CARACTERIZACIÓN DE ESTACIONES DE MONITOREO ELEGIDAS.....	36
3.3.1.	Determinación de la hora pico.....	36
3.3.2.	Influencia del viento.....	37
3.4.	EVALUACIÓN DE INVENTARIOS A TRAVÉS DE DATOS AMBIENTALES - TENDENCIAS DE CO.....	38
3.4.1.	Comportamiento estacional del CO.....	39
3.4.2.	Evaluación de tendencias de CO.....	39
3.5.	EVALUACIÓN DE INVENTARIOS A TRAVÉS DE DATOS AMBIENTALES - RELACIÓN CO/NO _x	41
3.6.	INCERTIDUMBRE Y LIMITACIONES DEL ANÁLISIS.....	44
CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN		45
4.1.	REVISIÓN DE DATOS DE INVENTARIOS DE EMISIONES.....	45
4.2.	PROCESAMIENTO DE DATOS DE CALIDAD DEL AIRE.....	48
4.2.1.	Revisión de datos.....	48
4.2.2.	Selección de estaciones de monitoreo.....	49
4.3.	CARACTERIZACIÓN DE ESTACIONES DE MONITOREO ELEGIDAS.....	54
4.3.1.	Determinación de la hora pico.....	54
4.3.2.	Influencia del viento.....	58
4.3.2.1.	Estación IDR.....	61
4.3.2.2.	Estación Las Ferias.....	63
4.4.	EVALUACIÓN DE INVENTARIOS A TRAVÉS DE DATOS AMBIENTALES - TENDENCIAS DE CO.....	64
4.4.1.	Comportamiento estacional del CO ambiental.....	64
4.4.2.	Tendencias de CO a partir de datos ambientales y de IE.....	65
4.4.3.	Evaluación de tendencias de CO.....	68
4.5.	EVALUACIÓN DE INVENTARIOS A TRAVÉS DE DATOS AMBIENTALES - RELACIÓN CO/NO _x	71
CONCLUSIONES.....		78
RECOMENDACIONES.....		82
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....		84
Anexo 1. Gráficos de comportamiento CO y NO _x Interanual.....		91
Anexo 2. Gráficos de comportamiento CO y NO _x Interanual.....		93
Anexo 3. Comportamiento estacional para CO.....		95
Anexo 4. Resumen modelo de comportamiento estacional con GAM.....		97
Anexo 5. Regresiones OLS para las estimaciones de CO y NO _x a través de IE.....		97
Anexo 6. Regresiones WLS para la relación CO/NO _x de datos ambientales.....		98

LISTADO DE TABLAS

Tabla 1. Datos anuales de CO, NO _x y CO/NO _x para los IE 2002-2008.....	45
Tabla 2. Datos temporalmente distribuidos de CO, NO _x y CO/NO _x para los IE 2002-2008	46
Tabla 3. Existencia de datos de CO y NO _x para la RMCAB 2002-2009	48
Tabla 4. Zonificación de las estaciones de monitoreo con registros de CO y NO _x	49
Tabla 5. Cubrimiento máximo de las estaciones por cuadrante conforme a velocidad del viento ...	61
Tabla 6. Relaciones CO/NO _x para horas pico de la mañana obtenidas de datos ambientales	72
Tabla 7. Relaciones CO/NO _x IE/DA para valores individuales.....	75

LISTADO DE FIGURAS

Figura 1. Etapas para la elaboración de un inventario de fuentes móviles	18
Figura 2. Comportamiento horario de los vientos para el año 2005 y 2008 por estaciones	26
Figura 3. Dirección resultante de los vientos en la mañana para el año 2005 y 2008.....	27
Figura 4. Comportamiento de la temperatura y capa de mezcla en Bogotá	28
Figura 5. Crecimiento de la flota vehicular en Bogotá.....	29
Figura 6. Desarrollo metodológico del proyecto.....	32
Figura 7. Esquema del análisis de vientos por cuadrantes	38
Figura 8. Existencia de datos para la estación de IDR D	50
Figura 9. Existencia de datos para la estación de Las Ferias	51
Figura 10. Existencia de datos para la estación de Suba	52
Figura 11. Existencia de datos para I+F.....	53
Figura 12. Ubicación estaciones seleccionadas e influencia de fuentes fijas	54
Figura 13. Variación de la concentración de CO y NO _x en función del tiempo para IDR D.....	55
Figura 14. Variación de la concentración de CO y NO _x en función del tiempo para Las Ferias	56
Figura 15. Variación de la concentración de CO y NO _x en función del tiempo para I+F	57
Figura 16. Influencia del viento sobre la concentración de CO y NO _x en la estación IDR D	59
Figura 17. Influencia del viento sobre la concentración de CO y NO _x en la estación Ferias	60
Figura 18. Tendencias de concentración ambiental de CO para IDR D, Las Ferias e I+F	66
Figura 19. Tendencias normalizadas de CO para IDR D, Las Ferias, I+F e IE.....	67
Figura 20. Tendencias de la relación molar CO/NO _x para IDR D e I+F.....	73
Figura 21. Tendencias de la relación molar CO/NO _x para IDR D, I+F e IE	74

RESUMEN

Se emplean datos de monóxido de carbono (CO) y óxidos de nitrógeno (NO_x) para evaluar seis inventarios de emisiones (IE) llevados a cabo entre 2002 y 2008. Se evalúa la concordancia de las tendencias de CO y la relación molar CO/NO_x con datos ambientales (DA) en hora pico (06:00 - 08:00 horas). Las tendencias de CO a partir de IE para toda la flota vehicular (TF) y la flota liviana (FL) presentan un aumento mucho mayor de CO frente a datos ambientales (9,55% Vs. 18,74% anual y 5,44% vs. 22,74% anual); las tendencias de la relación CO/NO_x para TF concuerdan con los DA (-8,61% vs. -7,22% anual) y presentan diferencias para FL (-9,55% anual vs. -4,29% anual). Los valores de CO/NO_x para TF en los IE concuerdan dentro de un 25% con los DA, para FL se presentan discrepancias entre 35 y 122%. Los datos sugieren una sobreestimación de las emisiones de CO por parte de los IE, especialmente aquellos elaborados con el modelo IVE, posiblemente por errores en la determinación de los factores de emisión (FE). Se determina una sobrestimación en las tendencias de CO y NO_x para TF cercanas al 98% y 42% anual respectivamente.

ABSTRACT

Carbon monoxide (CO) and nitrogen oxide (NO_x) concentrations data were used to evaluate six emission inventories (EI) performed from 2002 to 2008. The consistency of CO and CO/NO_x molar ratio trends from the inventories was compared with air quality data (AQD). CO trends for the total fleet (TF) and the light-duty vehicle fleet (LDF) from the EI show higher growth trends versus AQD (9,55%/year vs. 18,74%/year and 5,44%/year vs. 22,74%/year); TF trends of CO/NO_x ratio are in agreement with AQD (-8,61%/year vs. -7,22%/year) and show differences for the LDF (-9,55%/year vs. 4,29%/year). The TF CO/NO_x emission ratios are in good agreement with AQD within 25% and the FL CO/NO_x emission ratio exhibit discrepancies from 35% to 122% with AQD ratios. The evaluation suggests that CO is overestimated by the EI, particularly the EI calculated using the IVE model, owing to errors in the emission factors (EF) determination. Significant differences between EI preclude calculating any overestimation value of CO emissions. However, an IE overestimation of CO and NO_x trends for TF were estimated as 98% and 42% by year.

Palabras Clave Evaluación de inventarios, inventarios de emisiones, relación CO/NO_x, emisiones, calidad del aire, fuentes móviles.

Key Words Top-down evaluation, emission inventories, CO/NO_x ratio, air quality, mobile sources.

INTRODUCCIÓN

La contaminación atmosférica es un aspecto cotidiano en ciudades tan importantes como México D.F., Rio de Janeiro, Los Ángeles, Londres, entre otras, donde las concentraciones excesivas de material particulado (PM), ozono (O₃), óxidos de azufre (SO_x), óxidos de nitrógeno (NO_x), monóxido de carbono (CO), compuestos orgánicos volátiles (VOC), Hidrocarburos totales (THC), entre otros, han hecho que la calidad de vida y salud de los ciudadanos se vea afectada, produciendo impactos negativos tanto a nivel social como económico (Kutzbach 2009; Alem et al. 2005; Rosales et al. 2001) .

En Bogotá, este hecho es evidente y sustentable con múltiples estudios. Solarte et al. (2002), encontró que un aumento de 10µg/m³ en las concentraciones de PM₁₀ produce un aumento de 8% en consultas por Enfermedad Respiratoria Aguda (ERA). Torres (2002), analizando los efectos a corto plazo de la contaminación atmosférica en Bogotá concluyó que existe una relación positiva y significativa entre las emisiones y la morbilidad diaria, no superando el 0,007% y el 0,027% en el número de casos reportados de enfermos de ERA ante el aumento de 1 mg/m³ de PM₁₀ y SO₂. Hernández et al. (2011), reportó que se presentan cerca de 600.000 atenciones por año, de niños menores de 5 años con ERA en la red distrital de salud. Estevez (2010), analizó el efecto de la exposición al PM emitido por fuentes móviles sobre la salud respiratoria de policías de tránsito de nivel operativo y administrativo, mostrando que existe mayor prevalencia de afecciones como tos (18,6% vs. 6,2%), expectoración (19,9% vs. 8,2%), rinosinusitis (59,1 vs. 55,7), irritación nasal (62,3 vs. 30,9), irritación ocular (32,9 vs. 7,2) en el personal operativo.

Lo anterior ha generado una creciente preocupación por parte de las autoridades ambientales y sanitarias, que han tomado medidas para controlar las emisiones tanto de fuentes fijas como móviles y han aumentado las campañas de monitoreo y prevención con el fin de mitigar los impactos. Sin embargo, las medidas de control implementadas han sido insuficientes, debido al aumento de la actividad económica de la ciudad, reflejada en

el incremento del consumo de energía por parte de la industria y un aumento importante de la flota vehicular (Gaitán et al. 2007).

La cuantificación de las emisiones a la atmósfera se realiza a través de la elaboración de inventarios de emisiones (IE) para fuentes móviles, fuentes fijas, áreas fuente y fuentes biogénicas. Estos inventarios son esenciales para entender cómo influyen las actividades antropogénicas de una ciudad, en la calidad del aire local y regional (Parrish, et.al, 2006), y son la principal herramienta técnica que tienen las autoridades ambientales para la toma de decisiones en el aspecto normativo.

Un análisis de los inventarios de emisiones realizados en Bogotá, muestra que el mayor problema de contaminación lo generan las fuentes móviles (vehículos de carga, transporte público, particulares y motos), las cuales contribuyen con un 85% del total de emisiones de PM, NO_x, THC, CO y CO₂ (SDA - Secretaría Distrital de Ambiente 2010), siendo el 15% restante, atribuible a fuentes fijas. En términos concretos, se ha determinado que un 57% de las emisiones a la atmósfera de material particulado (PM), corresponde a las fuentes móviles. Así mismo, las fuentes móviles son responsables por la emisión del 96% del total de monóxido de carbono (CO), un 72% de las emisiones de NO_x y un 99,8% de las emisiones de hidrocarburos totales (THC) (CCB - Observatorio de Movilidad 2011).

Es claro entonces, que disponer de inventarios de emisiones confiables para fuentes móviles, proporciona información valiosa para las autoridades ambientales y es el sustento técnico para la toma de decisiones en materia de control de la contaminación, siendo relevante evaluar la precisión y representatividad de sus estimaciones con el ánimo principal de establecer falencias y puntos de mejora para predicciones futuras.

El presente trabajo pretende evaluar los inventarios de emisiones realizados en la ciudad de Bogotá, mediante la comparación de los registros de CO y NO_x reportados por la Red de Monitoreo de Calidad del Aire de Bogotá (RMCAB) y las emisiones reportadas por los IE para estos contaminantes en el periodo 2002-2008. La evaluación se realiza mediante la comparación de tendencias de CO y la relación molar CO/NO_x de los datos ambientales (DA) en horas pico diurnas y los IE a través del periodo de estudio.

CAPITULO I. ANTECEDENTES

1.1. INVENTARIOS DE EMISIONES PARA LA CIUDAD DE BOGOTÁ

Entre el año 2000 y 2010, se han realizado diversos IE tanto de fuentes móviles como de fuentes fijas en Bogotá, gracias al trabajo mancomunado entre las universidades y la autoridad ambiental local (Secretaría Distrital de Ambiente – SDA, anteriormente Departamento Técnico Administrativo del Medio Ambiente – DAMA). A continuación se resumen los principales estudios sobre fuentes móviles efectuados en la última década, que a su vez serán el objeto de evaluación del presente trabajo:

Behrentz et al. (2004), elaboraron un IE para vehículos livianos aplicando la metodología de cálculo directa (ecuación (1) mostrada más adelante). El IE incluyó los vehículos particulares de pasajeros (PC), camperos y camionetas (LDT), así como taxis (T). Para el inventario, se emplearon factores de emisión (FE) estimados en California (EE.UU.) a través de pruebas en dinamómetro a más de 2300 vehículos, estableciendo equivalencias con los vehículos de Bogotá mediante una categorización basada en característica comunes, tales como la presencia de sistemas de control de emisiones, el tamaño del motor y el kilometraje. El estudio contempló la determinación del aporte de fuentes móviles a contaminantes como CO, NO_x y THC. Adicionalmente, se calcularon las emisiones de los gases de efecto invernadero: CO₂, metano (CH₄) y óxido nitroso (N₂O). Los resultados del estudio muestran que este tipo de vehículos emiten en total 230.000 ton/año de CO, 12.000 ton/año de NO_x, 25.000 ton/año de THC, 3.000.000 ton/año de CO₂, 1.400 ton/año de CH₄ y 90 ton/año de N₂O. Los aportes por categoría también se encuentran reportados en el estudio.

Giraldo, (2005), realizó el IE de fuentes móviles tomando como base el año 2005. El inventario abarca vehículos que emplean gasolina, diesel y gas como combustible, determinando para las categorías vehiculares escogidas (incluyendo motocicletas), el

aporte individual a las emisiones de contaminantes como PM_{10} , CO, COV, NO_x , SO_x . Para el estudio, Giraldo empleo el modelo *International Vehicle Emissions* (IVE), desarrollado por la U.S. EPA, en colaboración con la Universidad de California, para ser empleado en países en vías de desarrollo. Para la información de entrada del modelo, se efectuaron campañas en campo con las siguientes actividades: i) Encuestas en 15 parqueaderos, para determinar la distribución tecnológica de los vehículos (tipo de combustible y de vehículo, edad vehicular; tecnologías asociadas a control de emisiones, kilometraje); ii) Aforos, mediante filmaciones en la ciudad, para determinar el número y los tipos de vehículos que circulan por vías seleccionadas; iii) Seguimiento en tiempo real (GPS) a vehículos particulares (VP, incluye PC y LDT), Motos (M), T, Buses (B) y camiones (C) - sin incluir a los vehículos del sistema BRT (Transmilenio (TM) y buses alimentadores (ATM)) - para determinar las prácticas de conducción, recorridos usuales, tiempo de espera de los vehículos, entre otros indicadores de tráfico. El número total de vehículos, meteorología, calidad de los combustibles, entre otros se obtuvieron de otros estudios: los FE empleados corresponden a los preestablecidos por el modelo (ciclos de conducción de EE.UU. corregidos). Del estudio, se calculó una emisión total de 822.500 ton/año para CO, 49.350 ton/año para NO_x , 1.974 ton/año de PM_{10} , 65.800 ton/año para VOC, y 2303 ton/año para SO_x . Los aportes por categoría también se encuentran reportados en el estudio.

Zarate (2007), elaboró dos estimaciones de inventarios de emisiones provenientes de fuentes móviles (transporte terrestre y tráfico aéreo), fijas (industria, servicios y distribución de combustibles como área fuente) y biogénicas empleando el módulo de cálculo de emisiones AIREMIS, que permite una estimación espacial y temporal del aporte de PM_{10} , CO, NO_x , VOCs, SO_2 , CH_4 y CO_2 para cada una de ellas. Para fuentes móviles se tomó como base para la recolección de información de entrada al módulo, el año 2002 y se calcularon emisiones producto de la evaporación y la combustión (en frío y en caliente) para toda la flota vehicular, excepto TM y ATM. Para las estimaciones se emplearon en un primer caso FE cargados por defecto en el módulo, los cuales son tomados del modelo COPERT III de la Agencia Europea del Medioambiente (EEA, por sus siglas en inglés). En un segundo caso, se tomaron los FE establecidos por Manzi (2003) en un estudio específico para Bogotá (FE de operación en caliente obtenidos aplicando modelación inversa en un cañón urbano) complementados con datos de COPERT III para

FE faltantes. Los resultados obtenidos con FE COPERT III y locales mostraron que las emisiones fueron respectivamente: 54.285 ton/año y 275.965,2 ton/año de CO; 12.831 ton/año y 12.304,6 ton/año de NO_x; 14.015,4 ton/año y 42.901,6 ton/año de VOCs (excluido el metano), 2072,7 ton/año de SO₂, 460,6 ton/año de CH₄ y 1688.888,6 ton/año de CO₂.

Herrera (2007), elaboró un nuevo inventario de emisiones tomando como base el año 2006 y estimó las emisiones de CO, NO_x, VOCs, PM_{2,5} y N₂O. . En este estudio, se realizaron dos estimaciones, una con el modelo matemático propuesto por IVE y otra empleando cálculos directos (ecuación 1), con el fin de generar un modelo para el cálculo de inventarios para Bogotá (EVB). El uso de IVE y EVB se fundamenta en el hecho de haber encontrado errores en los algoritmos de cálculo que podrían generar una sobrestimación de las emisiones con el modelo IVE. Como información de entrada se empleó la recolectada por Giraldo en 2005 y se actualizó con respecto a la flota vehicular activa, categorizando nuevamente los vehículos según criterios como tipo, cilindraje, tecnología y edad. Con respecto a los factores de actividad, se emplearon aquellos sugeridos por investigaciones locales anteriores e IVE. Los FE se tomaron del modelo IVE. De acuerdo con los resultados obtenidos, se observó una sobreestimación de las emisiones calculadas a través de IVE frente al empleo del EVB. Con el empleo del EVB se estimó que las fuentes móviles emiten 339.857 ton/año de CO, 38.164 ton/año de NO_x, 35.203 ton/año de COV, 987 ton/año de PM_{2,5}, y 62,51 ton/año de N₂O. Los datos también se encuentran disponibles para el modelo IVE y en ambos casos se reportan las emisiones por categoría vehicular (VP, M, T, B, C, TM)

Rodríguez (2007), realizó mediciones en ruta de CO, NO_x, THC y CO₂ para 116 vehículos que funcionan con gasolina o gas natural comprimido (GNC), con el fin de estimar FE específicos para Bogotá. Estos datos fueron usados por Rodríguez y Behrentz (2009), quienes realizaron la actualización del inventario de emisiones tomando como base el año 2008, empleado la metodología de cálculo directo (ecuación (1) mostrada más adelante) para tal fin. En los estudios mencionados, con el fin de actualizar y mejorar la información referente a FE locales, se realizaron en total 202 mediciones directas en vehículos tanto de gasolina, como gas natural y diesel, categorizando la flota de acuerdo a los siguientes criterios: edad del vehículo (año modelo); tipo de vehículo (PC, LDT, T, B, Microbuses

(MB), C, bus escolar o de turismo (ET), TM, (no se incluyeron M y ATM); tecnología de control de emisiones; tamaño del motor y tipo de combustible (Gasolina, Diesel o GNV); estos FE se complementaron con los calculados en estudios anteriores. Durante la campaña se determinaron las emisiones de CO, NO_x, THC y CO₂ para la flota liviana (PC, LDT, T) y emisiones de PM_{2,5} para vehículos pesados (B, MB, C, ET, TM). Los factores de actividad se determinaron con base en estudios previos y con base en información entregada por la Secretaría de Movilidad del Distrito (SDM), y agremiaciones de transportadores. Conforme a lo reportado, la flota liviana (FL) emite 450.000 ton/año de CO, 30.000 ton/año de NO_x, 60.000 ton/año de THC y 4.800.000 ton/año de CO₂, mientras que la flota pesada (FP) emite 1.00 ton/año de PM_{2,5}. Los datos también se encuentran desagregados por categoría vehicular.

Peñaloza (2010), realizó un inventario de emisiones distribuido espacial y temporalmente en un dominio de 55 km x 55 km, con resolución espacial de 1 km² y resolución temporal de una hora, tomando como base un día típico del año 2008 como paso inicial para modelar la calidad del aire de la ciudad. Peñaloza calculó la emisión de CO, NO_x, THC, VOC, SO_x y PM para la FL y como complemento al trabajo de Rodríguez y Behrentz, calculo las emisiones para la FP. Para el estudio se empleó el modelo de emisiones EMISENS en todo el dominio y posteriormente en cada una de las celdas, para realizar la distribución temporal y espacial de contaminantes. Para fuentes móviles, se emplearon los FE calculados por Rodríguez y Behrentz en 2009 y se complementaron con los contenidos en el modelo COPERT VI. La categorización de la flota vehicular se realizó conforme a lo establecido por Rodríguez en 2007, agrupando las categorías en favor de la economía computacional, quedando: VP (PC + LDT); T; B (incluye buses grandes, busetas y MB); C; ET; TM; además se incluyeron M y ATM. El número, la distribución y las distancias recorridas por la flota vehicular se tomaron de la actualización realizada en 2009 y se complementaron con datos de Transmilenio S.A. y la SDM para los buses del sistema de transporte masivo y motos respectivamente. El modelo EMISENS requiere de la definición de la malla vial para computar los cálculos, por lo cual el autor empleó datos del Programa de investigación en Tránsito y Transporte de la Universidad Nacional de Colombia (PITT-UNAL), y definió el uso de la misma conforme a aforos vehiculares realizados por la SDM en 2008 y el uso del suelo de acuerdo con el POT distrital para zonas donde no se contaba con aforos. Como valores promedio, se muestra que las

fuentes móviles generan 706.925 ton/año de CO, 57.658 ton/año de NO_x, 108.011 ton/año de VOC, 1594 ton/año de PM y 13.009 ton/año de SO₂. Los datos también se encuentran desagregados por categoría vehicular.

1.2. EVALUACIÓN DE INVENTARIOS DE EMISIONES

Los IE de fuentes móviles están sujetos a una gran cantidad de incertidumbres, debido a que deben contemplarse miles de fuentes emisoras que pueden estar erróneamente clasificadas, omitidas o sobre estimadas, afectando la calidad de los datos de entrada (Western Governors' Association and Binational Advisory Committee 1996), también se dan debido al empleo de datos prefijados en los modelos de cálculo y aproximaciones inherentes al modelo matemático de cálculo en sí. Lo anterior ha motivado la realización de numerosas evaluaciones de inventarios, que implican el análisis de la validez de datos de entrada, el análisis de la validez de los algoritmos de cálculo o la comparación con datos independientes del inventario. Dados los alcances de la presente propuesta, se mencionan a continuación algunos de los estudios encaminados a realizar la evaluación de inventarios por medio de datos independientes (evaluaciones externas o *top-down*).

Fujita et al. (1992), realizaron una validación externa para los IE existentes en la Cuenca Atmosférica de la Costa Sur de la Bahía de California, evaluando la consistencia de las relaciones de CO/NO_x y VOCs/NO_x de datos promedio y locales recolectados en una campaña intensiva de medición durante el verano e invierno de 1987, entre 07:00 a 08:00 de la mañana (hora pico en la zona), y los datos de inventarios de emisiones distribuidos espacial y temporalmente para los días y horarios específicos. En este estudio se encontró que la relación CO/NO_x para el promedio de datos ambientales (DA), son 1,5 veces mayores en verano y 2,0 veces mayores en invierno que las obtenidas por medio de los inventarios. De igual forma, para la relación NMOG/NO_x se encontró un valor 2,5 veces más elevado al emplear DA frente a lo calculado con datos de inventarios. De acuerdo con el estudio, se sugiere que las emisiones de CO y NMOG están subestimadas (esto se comprobó posteriormente con estudios de emisión en túnel), debido posiblemente al uso de factores de emisión inferiores a los reales para FL y FP.

Jolly et al. (2000), realizaron mediciones ambientales de NO_x y 55 tipos de VOCs en una zona con un alto grado de concentración de fuentes móviles y fijas de la ciudad de Houston (EE.UU.), con el fin de evaluar los resultados obtenidos en el inventario de emisiones de la ciudad, realizado entre agosto y septiembre de 2000. Para esto, instalaron dos puntos de monitoreo cercanos a la rivera del canal de barcos del Rio Houston con el fin de medir la variabilidad de las emisiones en puntos cercanos a la zona industriales y de transporte y que posiblemente no pueden ser detectados por redes de monitoreo instaladas a mayor distancia de estas zonas. Los monitoreos se realizaron entre 1999 y 2001, y se analizaron los datos registrados entre las 05:00 y las 06:59 horas con el propósito de minimizar la pérdida de hidrocarburos por efectos fotoquímicos. Adicionalmente, los datos se analizaron conforme a la dirección del viento y se agruparon de forma polar, dividiendo el área de influencia (una circunferencia) en 36 partes, es decir grupos de análisis cada 10 grados, con el fin de determinar los aportes por fuentes. La comparación de las relaciones VOCs/ NO_x para DA y de IE muestran que las primeras son 4,6 veces mayores, es decir que las mediciones de los inventarios se encuentran subestimadas. De acuerdo con el tipo de VOC analizado, estas discrepancias varían, encontrándose para el propeno, por ejemplo, discrepancias entre 1,9 y 16 veces dependiendo del grupo analizado. De igual forma se encontraron discrepancias entre 0,46 y 19 veces y 0,18 y 96 para butanos y butadieno respectivamente. Como conclusión del estudio por grupos de dirección del viento se sugiere que las fuentes móviles poseen inventarios más exactos que las fuentes fijas.

Manschreck et al. (2002), realizaron en marzo y octubre de 1998 una campaña de medición de hidrocarburos diferentes al metano (NMHC), CO y NO_x , con el propósito de evaluar los inventarios de emisiones realizados en la ciudad de Augsburgo (Alemania). La evaluación consistió en comparar las concentraciones ambientales diarias y promedios mensuales de especies individuales de HC, CO y NO_x , con los resultados predichos por el modelo de calidad del aire desarrollado por el Instituto de Economía Energética de la Universidad de Augsburgo y alimentado con datos de los inventarios de emisiones de la ciudad. Los puntos de medición ambiental se escogieron teniendo en cuenta la dirección preponderante de los vientos, estableciendo uno al noreste y otro al sureste de la ciudad. Los datos de estos puntos se validaron con mediciones aéreas de la ciudad para determinar si las relaciones HC/CO y HC/ NO_x correlacionaban adecuadamente y eran

representativas del ambiente urbano. Las comparaciones de las relaciones de HC/CO y HC/NO_x, teniendo en cuenta que los valores individuales de CO y NO_x ambientales se ajustaron adecuadamente a lo estimado por el modelo, se obtuvo que en marzo las relaciones predichas son entre un 30 y 60% más elevadas que las medidas en el ambiente, mientras que para octubre ambos resultados son comparables, esto es atribuido a errores en los factores de emisión de fuentes móviles para HC de bajo peso molecular (C₂-C₉), errores en los factores de emisión y en la identificación de fuentes de emisión móviles y fijas para los HC de mediano y alto peso molecular (C₄-C₁₂).

Parrish (2002), Validó la representatividad nacional de las emisiones de fuentes móviles de las ciudades de Nashville y Boulder (EE.UU.) mediante comparación de las relaciones de CO/NO_x obtenidas en IE locales y nacionales de Estados Unidos. Se evaluaron así los inventarios estadounidenses realizados con los modelos MOBILE 5a y MOBILE 5b, al compararlos con los resultados de DA de las ciudades mencionadas, empleando la comparación directa de la tendencia anual de CO, NO_x y CO/NO_x, tanto para los inventarios como para las mediciones ambientales. El estudio estableció que la disminución de la relación CO/NO_x en la década de 1987-1999 estaba subestimada por los inventarios nacionales llevados a cabo por la U.S.EPA frente a lo obtenido por mediciones ambientales (3,4% Vs. 8% de disminución anual promedio para las dos ciudades del estudio). Las mediciones ambientales permitieron inferir que existe una adecuada estimación de la disminución de las emisiones de CO. Sin embargo, puede existir una subestimación de la emisión de NO_x dentro del modelo MOBILE, debido a falta de exactitud en los cálculos de emisiones para los vehículos de carga pesada - cuyo número aumentó en la década estudiada, al igual que las distancias recorridas.

Brown et al. (2002), realizaron la evaluación del inventario de emisiones temporal y espacialmente desagregado de fuentes fijas fuentes móviles y áreas fuente realizado para el año 200 en el área de Houston-Galveston (EE.UU.). Para la evaluación de los IE de fuentes móviles, se emplearon datos ambientales de VOCs y NO_x recolectados entre el año 2000 y 2001 y entre las 06:00 y las 09:00 horas. Adicionalmente se evaluó la influencia del viento y el patrón de desplazamiento de contaminantes en el área de estudio. La comparación de las relaciones VOCs/NO_x de DA y de inventarios para las 3 horas de estudio muestran que las primeras son entre 2 y 5 veces mayores que las

segundas. Un análisis hora por hora mostró que las relaciones VOC/NO_x ambientales en hora pico (07:00 horas) son 2 veces mayores a las halladas en inventarios. Dado que la actividad industrial en esa zona es fuerte después de las 07:00, los resultados sugieren aportes importantes de VOC y, por tanto, una subestimación de estos contaminantes en los inventarios realizados, tanto para fuentes móviles como para fuentes fijas.

Arriaga-Colina et al. (2004), emplearon las mediciones de VOCs realizadas durante los años 1992 a 2001 en investigaciones independientes, así como las mediciones de CO y NO_x realizadas por la red de monitoreo, para evaluar el inventario oficial de emisiones de 1998 realizado en el área metropolitana de Ciudad de México. Para el análisis se tomaron las mediciones tanto de VOCs como CO y NO_x realizadas en horas de la mañana, más específicamente entre las 06:00 y las 09:00 LT, con el fin de evitar pérdidas de VOCs y NO_x por efecto de procesos fotoquímicos y disminuir la influencia de contaminantes emitidos el día anterior, considerando que en las noches hay un fuerte descenso en la actividad de la ciudad. Los autores calcularon las relaciones VOCs/NO_x para DA e IE y las compararon entre sí, encontrando para DA, una relación entre 2,5 y 3,2 veces mayor, indicando una subestimación por parte de los IE. De igual manera la relación CO/NO_x para datos ambientales fue entre 2 y 3 veces mayor, sugiriendo una subestimación de esta relación por parte del IE. De acuerdo con la experiencia de estos y otros autores, se establece que estas discrepancias se deben mayoritariamente a la subestimación de los VOCs y CO, más que a una sobre estimación de los NO_x por parte de los IE, lo cual se refuerza al tener en cuenta que por lo general las mediciones ambientales de NO_x están ligeramente sobreestimadas dado que la técnica de quimioluminiscencia además de detectar NO y NO₂ (que componen los NO_x), puede detectar HNO₃ y otros compuestos nitrogenados.

Pollack et al. (2004), efectuaron una evaluación externa del modelo de estimación de inventarios de emisiones para fuentes móviles *MOBILE 6* (desarrollado por la U.S. EPA en 2002), usando datos de estudios de emisiones en túnel y datos de calidad del aire. Para la evaluación por medio de datos de calidad del aire se emplearon las mediciones de THC, CO y NO_x, y se compararon con los datos arrojados por *MOBILE 6* para las ciudades de Chicago, Washington, Lynn y Detroit. La evaluación se realizó comparando la relación THC/NO_x y CO/NO_x, obteniéndose que las relaciones CO/NO_x de DA son entre

1,6 y 4,7 veces superiores a la de los inventarios., De acuerdo con los autores, esto pudo deberse a una subestimación de las emisiones de CO o sobreestimación de las emisiones de NO_x por parte del modelo, cuestión que requiere de más estudios y pruebas adicionales.

Mellios et al. (2006), emplearon los datos de calidad del aire de múltiples estaciones locales reportados por varios países europeos en el sistema AirBase, con el fin de evaluar los inventarios de emisiones nacionales obtenidos por los autores empleando el modelo de emisiones TRENDS, el cual a su vez emplea datos de entrada provenientes del modelo COPERT III. Se obtuvieron Las relaciones CO/NO_x, PM₁₀/CO y NO_x/PM₁₀, a partir de datos ambientales, mediante la regresión lineal de los valores medios, máximos y mínimos para cada par de contaminantes y se compararon con los datos obtenidos en los inventarios. Para países ubicados al norte del continente, como Alemania, Finlandia y Reino unido, se encontró que los valores de los IE, concuerdan con los valores máximos de la relación CO/NO_x. Con el fin de investigar más profundamente estas tendencias, los autores realizaron un análisis de sensibilidad, variando los porcentajes de desplazamiento urbano de varias categorías de fuentes móviles (vehículos a gasolina y diesel y sus subcategorías encontrando que la relación de emisiones CO/NO_x es más sensible a cambios en los factores de actividad para vehículos diesel que frente a otras categorías vehiculares, con lo cual se puede suponer una subestimación de las emisiones de NO_x.

Vivanco & Andrade (2006), evaluaron el inventario oficial de emisiones de fuentes móviles realizado en 1999 para la región metropolitana de Sao Paulo (Brasil). Para la evaluación emplearon DA de VOCs, CO y NO_x recolectadas por la red de monitoreo de la ciudad en julio y agosto de 1999, entre las 07:00 y las 08:00 horas. Calcularon las relaciones VOCs/NO_x y NO_x/CO, encontrando que los datos de NO_x/CO ambientales son 2,4 veces más grandes que los estimados por inventarios. Basados en varios estudios que indican que las emisiones de CO están adecuadamente estimadas por los IE, concluyen que las emisiones de NO_x estaban significativamente subestimadas, debido muy probablemente a errores en los valores de los FE o factores de actividad para vehículos pesados que funcionan con diesel.

Guo et al. (2007), evaluaron los resultados obtenidos del modelo IVE para la ciudad de Hangzhou (China), empleando la metodología de medición remota (RS, por las siglas en inglés de *Remote Sensing*). La evaluación consistió en comparar los FE en caliente, cargados por defecto en el modelo IVE (determinados por pruebas dinamométricas estándar de Estados Unidos), con factores de emisión basados en el consumo de combustible y calculados a partir de los datos recolectados por RS. Se consideraron las emisiones de HC, CO y NO_x para vehículos de pasajeros a gasolina (*passenger cars*, PC), camiones ligeros a gasolina (*light-duty gasolina trucks*, LDGT), y vehículos pesados a gasolina (*high-duty gasolina trucks*, HDGT). Los resultados mostraron que: i) Para HC en PC los FE del modelo IVE no tienen discrepancias significativas frente a los calculados mediante RS; para LDGT los FE de IVE tienen una subestimación de hasta 50%; para HDGT, los FE de IVE y los calculados por RS presentaron una concordancia adecuada; ii) Con respecto a CO, se presenta una clara subestimación en el modelo IVE; para PC los FE se encuentran subestimados entre un 12% a 50% dependiendo del tamaño del motor; para LDGT, los FE son un 47% inferiores y para HDGT son cerca de un 23% inferiores; iii) Para NO_x se muestra en general, una sobreestimación del modelo, encontrando que para PC los FE de IVE son entre un 50% y 250% más altos con respecto a los calculados por RS; para LDGT son un 94% superiores y para HDGT tienen una sobreestimación de más del 200%. De acuerdo con los autores, esto demuestra que, con tecnologías similares, evaluadas a las mismas condiciones, las variables de manejo, tráfico y mantenimiento son muy influyentes en la determinación de factores de emisión, situación que muchas veces no se refleja con FE provenientes de pruebas dinamométricas.

Zavala, Herndon, et al. (2009, como parte de una investigación que involucró la determinación de FE a través de monitoreo remoto, compararon las tendencias de CO y NO_x y de la relación CO/NO_x obtenidas a partir de datos de la Red de monitoreo de calidad del aire de la ciudad de México, con los resultados obtenidos de diversos IE realizados para vehículos a gasolina en el área metropolitana. Para las tendencias de contaminantes individuales se emplearon datos promedio horarios. Las tendencias de CO/NO_x se calcularon determinando la pendiente de la regresión lineal de datos CO Vs. NO_x; ambos casos emplearon datos monitoreados entre las 06:00 y las 09:00 horas para el año 1990 a 2008. El análisis de tendencias mostró una compatibilidad entre resultados, con una relación CO/NO_x que decreció a un ritmo de 1,9%/año. Sin embargo, el análisis

de las tendencias individuales de CO y NO_x mostró que este descenso se debió mayoritariamente al aumento de fuentes móviles propulsadas por diesel. Un análisis de históricos de venta de combustibles corroboró los hallazgos pues se evidenció un aumento de 4% en la venta de diesel. Un análisis de los datos de IE y monitoreo remoto, mostró que se puede presentar una sobreestimación de los IE de un 20-28% para NO_x y 14-20% para CO, lo cual está dentro de lo esperado teniendo en cuenta la incertidumbre de las comparaciones.

Smit et al. (2010), realizaron un meta-análisis de 50 artículos de investigación relacionados con la validación de modelos de emisiones e inventarios de emisiones mediante técnicas como mediciones remotas, mediciones en túnel o evaluación mediante concentraciones ambientales, pruebas de laboratorio y balance de masas. El meta-análisis arrojó que en general, existe una subestimación de los resultados de los IE frente a los observados por las diversas técnicas de evaluación. Es así como: para CO₂ las observaciones son 1,3 veces mayores frente a lo estimado por los IE; para HC las observaciones son mayores en un factor de 2,0; para CO y PM las observaciones son en promedio mayores en un factor de 3; para NO_x las observaciones son inferiores en un factor de 2, lo cual indica una sobreestimación de este contaminante por parte de los IE. El estudio muestra también que, a modelos más complejos, los resultados son mejores en términos de errores de predicción.

Gallardo et al. (2012), emplearon DA de CO y NO_x correspondientes a horas pico para evaluar los inventarios de emisiones de Bogotá, Buenos Aires, Santiago y Sao Paulo, mediante comparación de la relación CO/NO_x. Encontraron que los DA tienen fallas importantes que limitan los análisis y que se presentan discrepancias significativas entre los valores arrojados por estos datos y los inventarios. En el caso específico de Bogotá, debido a la calidad de los datos, solo se tomaron en cuenta dos estaciones de monitoreo (Ferias e IDRD), durante el periodo 2007-2010, lo que no permitió una adecuada comparación de datos ambientales e inventarios.

1.3. PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. Problema de investigación

Los IE son esenciales para entender cómo influyen las actividades antropogénicas de una ciudad, sobre la calidad del aire local, regional y global y cuál es su contribución específica. Esta importancia es evidente cuando se analizan los aportes a emisiones provenientes de fuentes móviles, teniendo en cuenta que son las principales generadoras de contaminantes de interés para la salud pública como VOCs de alta reactividad fotoquímica (precursores de ozono troposférico O₃), PM, CO y NO_x, (Parrish 2006). De igual manera, estos inventarios son la herramienta principal de las autoridades ambientales, para determinar las acciones de control sobre las fuentes que contribuyen mayoritariamente a las emisiones. Lo anterior muestra una clara necesidad de evaluar de una manera objetiva los resultados obtenidos en los inventarios de emisiones de fuentes móviles, con el fin de verificar si son representativos y consistentes con las observaciones ambientales.

Se plantea entonces el siguiente interrogante: ¿Los inventarios de emisiones de fuentes móviles elaborados para la ciudad de Bogotá estiman de manera adecuada los contaminantes aportados por estas fuentes?. Para responder esta pregunta, el presente trabajo pretende evaluar, mediante datos independientes, los inventarios de emisiones realizados en la ciudad de Bogotá. La evaluación se realizará, como primera aproximación, con base en las estimaciones de CO y NO_x de los inventarios de la ciudad y su consistencia con lo observado en mediciones ambientales. Sin embargo, la evaluación también puede realizarse para otros contaminantes de interés como VOC y PM, bajo ciertas restricciones. Esto permitirá realizar un acercamiento a las fallas que pueden tener los inventarios y diversas metodologías empleadas, así como establecer cuáles de ellas generan los mejores resultados y dónde pueden concentrarse los esfuerzos para mejoras futuras a los inventarios, lo que redundará en políticas ambientales más ajustadas con la realidad de la calidad del aire de la ciudad.

1.3.2. Objetivos

Objetivo general

Evaluar los inventarios de emisiones de fuentes móviles realizados en Bogotá D.C., empleando datos de calidad del aire provenientes de la Red de monitoreo.

Objetivos específicos

- Determinar las estaciones de monitoreo a ser usadas para la evaluación e los inventarios de emisiones.
- Evaluar con base en concentraciones de CO y NO_x y su tendencia relativa, relaciones CO/NO_x y su tendencia relativa, la congruencia de los datos reportados por los inventarios de emisiones vs. Los datos ambientales de las estaciones de monitoreo incluidas en el estudio.
- Inferir a través de los resultados obtenidos, posibles causas de incongruencias y posibles puntos para mejorar los inventarios analizados.

CAPITULO II. MARCO CONCEPTUAL

2.1. INVENTARIOS DE EMISIONES DE FUENTES MÓVILES

2.1.1. Concepto

Un inventario de emisiones tiene como propósito el cuantificar la cantidad de contaminantes emitidos por una fuente específica. Para fuentes móviles se busca cuantificar la emisión de múltiples fuentes, con características y patrones de desplazamiento diferentes. La metodología más extendida para determinar las emisiones del contaminante j - E_j consiste en establecer un factor de emisión - FE (g de contaminantes/km recorrido) por tipo de fuente - i y multiplicarlo por un factor de actividad - FA_i . La ecuación general es la siguiente:

$$E_j = \sum_1^i FE_{ij} \times FA_i \times N_i \quad (1)$$

Un inventario de emisiones requiere un gran esfuerzo para la recopilación de datos de entrada, pues es necesario a través de diversas etapas, establecer datos como estadísticas de consumo de combustible, velocidades y distancias recorridas, datos de la flota vehicular del área de interés (vehículos totales, vehículos por tipo de combustible, vehículos por tamaño del motor, etc.), calidad de los combustibles, entre otros muchos. La Figura 1 muestra estas etapas.

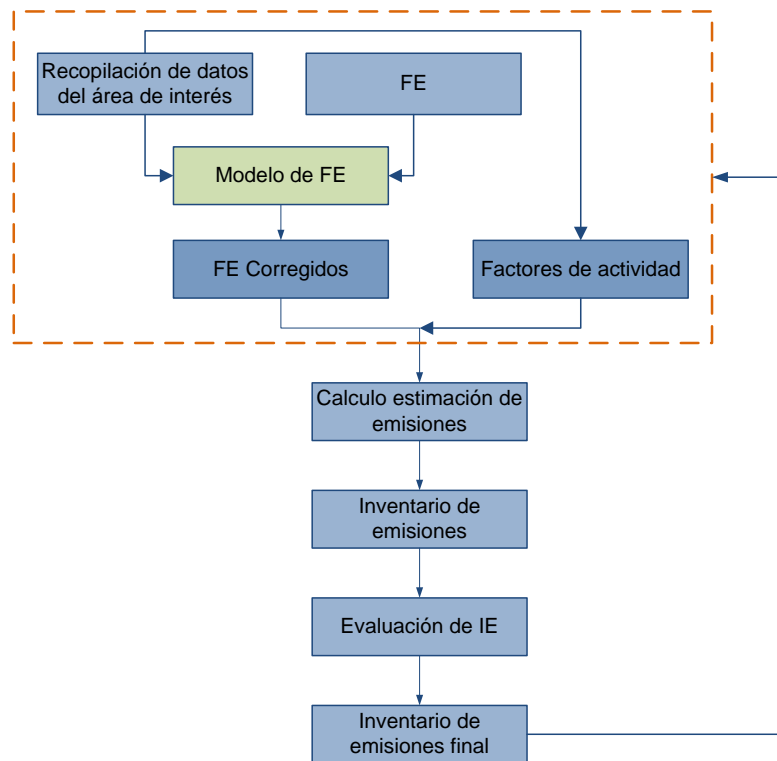


Figura 1. Etapas para la elaboración de un inventario de fuentes móviles

Fuente: Adaptado de International Radian. 1997

2.1.2. Complejidad de los inventarios

Conforme a la ecuación (1) se establece que los tres factores relevantes para cuantificar la emisión de contaminantes son los FE, los FA y el número de vehículos por categoría vehicular. Los valores de los FA y número de vehículos son difíciles de estimar, ya que el cálculo se basa generalmente en estadísticas de consumo de combustibles, modelos de transporte, aforos vehiculares, entre otros, que encierran incertidumbres propias asociadas con el grado de aproximación de cada esquema.

Los FE a que hace referencia la ecuación (1), son críticos, dado que un inventario urbano contempla miles o millones de vehículos de diversa edad (año modelo), diferentes tecnologías para el control de emisiones; patrones de conducción únicos (velocidad, aceleración, frenada), grado de mantenimiento disímil. Adicionalmente, las condiciones climáticas y geográficas (temperatura, humedad, altitud) y la calidad de los combustibles

pueden tener impactos significativos en las características de emisión de un vehículo, lo cual puede generar grandes diferencias en las emisiones de vehículos similares (International Radian. 1997). Dada la complejidad que atañe la estimación de los FE, estos no se encuentran como datos tabulados por categoría vehicular o tipo de vehículo sino que son estimados por modelos computacionales que contemplan algoritmos de cálculo y el posterior empleo de la ecuación 1, para el cálculo de emisiones vehiculares. En estos modelos, un FE base (para emisiones en frío o en caliente) es corregido a través de diversos factores que contemplan las variables mencionadas en el párrafo anterior. Un ejemplo de cálculo de un FE aplicado por el modelo IVE, para una categoría vehicular específica, se muestra a continuación (IVE MODEL V. 2.0 2008):

$$Q_{[t]} = B_{[t]} * K_{(Base)[t]} * K_{(Tmp)[t]} * K_{(Hmd)[t]} * K_{(IM)[t]} * K_{(Fuel)[t]} * K_{(Alt)[t]} * K_{(Cntry)[t]} \quad (2)$$

$$Q_{running} = \bar{U}_{FTP} * D / \bar{U}_C * \sum_{[t]} \{ f_{[t]} * Q_{[t]} * \sum_{[dt]} [f_{[dt]} * K_{[dt]}] \} \quad (3a)$$

$$Q_{start} = \sum_{[t]} \{ f_{[t]} * Q_{[t]} * \sum_{[dt]} [f_{[dt]} * K_{[dt]}] \} \quad (3b)$$

Dónde: $B_{[t]}$ es el FE base por categoría vehicular (FE en frío o caliente); $Q_{[t]}$ es el FE ajustado por categoría vehicular, $f_{[t]}$ fracción de desplazamiento por categoría; $f_{[dt]}$ fracción de paradas y arranques para por categoría; \bar{U}_{FTP} velocidad promedio en el ciclo de conducción LA4; D Distancia recorrida por categoría; \bar{U}_C velocidad promedio para un ciclo de conducción; $K_{(Base)[t]}$ factor de corrección para el FE base; $K_{(Tmp)[t]}$ factor de corrección por temperatura, $K_{(Hmd)[t]}$ factor de corrección por humedad; $K_{(IM)[t]}$ factor de corrección por inspección y mantenimiento; $K_{(Fuel)[t]}$ factor de corrección por calidad del combustible; $K_{(Alt)[t]}$ factor de corrección por altura; $K_{(Cntry)[t]}$ factor de corrección por país; $K_{[dt]}$ corrección por arranques y paradas (incluye uso de A/C). Se debe aclarar que para muchos modelos como IVE o MOBILE, es posible reemplazar los FE establecidos por defecto ya sea en la interfaz del usuario o a través de la modificación de las bases de datos.

2.1.3. Modelos para el cálculo de emisiones

El modelo ideal para la establecer de las emisiones vehiculares en un lugar determinado es, por supuesto, la determinación de FE reales para el sitio de estudio y la aplicación directa de la ecuación (1). Los FE se determinan para las emisiones en caliente o frío

(haciendo referencia a la temperatura del motor) que a su vez se dividen en emisiones evaporativas y emisiones producto del proceso de combustión. Para determinar los FE de combustión existen varias técnicas que se pueden aplicar: i) Determinación mediante chasis dinamométrico; ii) Modelación inversa (medición en túneles y cañón urbano); iii) Medición por detección remota; iv) Medición directa con PEMS (Portable Emissions Measurement Systems). Cada una de estas técnicas tiene ventajas y desventajas propias (Miller et al. 2006).

Otra alternativa, al no disponer de recursos para la determinación de FE propios, es el uso de modelos computacionales desarrollados por la Agencia Ambiental Europea o la Agencia Estadounidense de Protección del Medio Ambiente (EEA o EPA, respectivamente), los cuales utilizan FE determinados a partir de análisis en chasis dinamométrico. La meta final de los modelos consiste en calcular un factor de emisión promedio (entre emisiones en frío y caliente) para cada tipo de vehículo y emplear la ecuación (1) para determinar las emisiones por categoría vehicular y global (Manzi 2003). Existen en la actualidad varios paquetes de cálculo de factores de emisión (y por ende cálculo de emisiones), dentro de los cuales se encuentran el modelo MOBILE, IVE y COPERT, PARTS5, EMFACT (Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo 2008).

2.1.4.1. Modelo MOBILE

El modelo MOBILE, que ya se encuentra en su sexta versión, es desarrollado en EE.UU. por la EPA para el cálculo de FE en vehículos a partir de los resultados de las pruebas estándar nacionales en chasis dinamométrico (FTP y SFTP) y mediciones de campo (reales). El MOBILE permite calcular CO, NO_x, SO_x, hidrocarburos, PM y VOCs tóxicos, clasificando los vehículos en 8 categorías principales y considerando variables como temperatura ambiente, calidad del combustible, humedad, entre otras. El modelo también permite estimar emisiones a escala regional, local y micro escala. Ha sido utilizado en EE.UU., México, Colombia, entre otros países.

2.1.4.2. Modelo COPERT

El modelo COPERT ya se encuentra en su cuarta versión y fue desarrollado por la EAA para la estimación de FE y emisiones de CO, NO_x, COVs, PM, entre otros. Emplea FE resultado de estudios que datan desde 1989 y clasifica los vehículos se realiza según estándares EURO. Ha sido empleado en varios países de Europa, Chile y Colombia. Puede estimar emisiones anuales a meso-escala, aunque puede usarse con buena precisión para calcular emisiones a micro escala con resolución de una hora.

2.1.4.3. Modelo IVE

Fue desarrollado por la EPA y la universidad de Riverside (EE.UU.), con el fin de proporcionar herramientas más ajustadas a los países en vías de desarrollo para la estimación de FE y emisiones. Puede estimar CO, VOC, NO_x, PM_{2.5}, PM10, CO₂, N₂O, CH₄, NH₃, entre otros, empleando FE provenientes del modelo MOBILE con sus respectivas correcciones, clasifica los vehículos en más de 300 categorías y se ha probado en países como Chile, Colombia, India, entre otros.

2.1.5. Incertidumbre de los inventarios

La incertidumbre de los IE de fuentes móviles está dada por: i) Uso de factores de emisión predeterminados en los modelos de cálculo y que pueden ser inapropiados para el entorno local o regional ii) Errores en la estimación de factores de emisión locales, donde se requiere información de tipos de vehículos y categorización, tecnología de control de la contaminación, estado de los vehículos, hábitos de conducción, entre otros; iii) Incertidumbres al estimar los factores de actividad (velocidad promedio, distancia recorrida), por cada categoría de vehículos, iv) Errores en la estimación de la flota activa del dominio elegido para realizar el inventario. Estas incertidumbres disminuyen la calidad de los resultados obtenidos (Mobley & Cadle 2004).

2.2. EVALUACIÓN DE INVENTARIOS DE EMISIONES PARA FUENTES MÓVILES

2.2.1. Concepto

La evaluación de un IE es un paso lógico después de la obtención de los resultados, pues en su elaboración intervienen una gran cantidad de variables que contribuyen a la incertidumbre de los datos finales. Adicionalmente, el cambio tecnológico que han sufrido los vehículos en los últimos años, así como el aumento en la tasa de renovación vehicular, la entrada en servicio de un número cada vez mayor de automotores y la permanencia de una porción de parque automotor de elevado tiempo de servicio (fuentes importantes de emisión), hace que sea necesario evaluar la representatividad de los datos con que cuentan las autoridades ambientales para la toma de decisiones y su capacidad para alimentar de manera adecuada los modelos de calidad del aire existentes.

2.2.2. Metodologías de evaluación

Existen básicamente dos metodologías de evaluación de inventarios, internas (bottom-up) y externas (top-down). Una evaluación interna requiere una revisión de los protocolos de recopilación de datos, estudio de las incertidumbres de los datos de entrada al modelo, evaluación del modelo de estimación seleccionado, análisis de sensibilidad y típicamente demanda mucho tiempo y dinero, siendo aplicable por lo general durante la construcción de un inventario. Una evaluación externa emplea información independiente, pero relacionada al inventario, por ejemplo puede emplear balance de masas por consumo de combustible, tendencias de concentraciones o razón de concentraciones de una red de monitoreo de calidad del aire, modelos de receptor o modelación directa o inversa. Este tipo de evaluación implica menor tiempo, menor esfuerzo y menos recursos, por lo cual es ampliamente usado (Zavala 2008). De acuerdo con los alcances del presente trabajo, se reseñan aquí brevemente algunas de las metodologías externas.

2.2.2.1. Comparación de inventarios globales y de fuentes móviles

Esta comparación es la más simple e inmediata y consiste en determinar la fracción que corresponde a cada tipo de fuente (móvil, de área, fija) de cada contaminante o grupo de contaminantes evaluado. Esta fracción puede ser comparada con históricos de inventarios anteriores o en su defecto, con inventarios de otras regiones con características similares. Este tipo de evaluación solo ofrece una visión estimada de la racionalidad de un IE y debe tratarse con cuidado, puesto que las condiciones cambiantes de una ciudad o región, así como los errores en los IE y diferencias específicas entre regiones pueden generar variaciones importantes en los resultados.

2.2.2.2. Comparación de emisiones per cápita

En esta evaluación se comparan los datos de emisiones per cápita de fuentes móviles con los obtenidos por otras regiones. Al igual que la anterior metodología, esta solo permite verificar la racionalidad de los datos obtenidos. Sin embargo, es necesario que las regiones objeto de comparación, compartan características socioeconómicas y de infraestructura similares, dada la influencia que puede tener un factor como el PIB sobre el volumen de adquisición de vehículos (Aguirre 2011) y la mayor facilidad de acceso a vehículos con mejores tecnologías y menores emisiones a mayor ingreso per cápita.

2.2.2.3. Comparación de emisiones y factores de actividad

Teniendo en cuenta la ecuación (1), se esperaría que la relación entre E y FA, fuese lineal. Sin embargo, pueden presentarse desviaciones debido a las correcciones introducidas por los modelos sobre los FE (ecuaciones 2 y 3), razón por la cual una comparación del tipo FA vs. E para inventarios de emisión obtenidos en otras regiones puede ser útil ya que desviaciones importantes de la linealidad pueden significar errores importantes en los datos de entrada a los modelos. Este tipo de análisis no se puede considerar del todo independiente del inventario, pero es un método que puede ser utilizado con facilidad para obtener indicios acerca de la calidad de los IE elaborados.

2.2.2.4. Comparación con datos ambientales

Los datos de muestreos ambientales son ampliamente utilizados en la evaluación de inventarios de emisiones, teniendo en cuenta que la calidad del aire urbano es un reflejo de las emisiones generadas por diversas fuentes y que los resultados obtenidos son totalmente independientes. Existen variantes para esta metodología, tales como el uso de modelos de receptor, el uso de relaciones entre contaminantes y la modelización tridimensional.

Los modelos de receptor utilizan métodos estadísticos y datos de monitoreo ambiental para estimar la contribución relativa de fuentes en un área determinada (*source apportionment*), aproximación útil para evaluar contaminantes no reactivos o con muy baja reactividad, tales como PM y CO. Se han desarrollado también metodologías de modelación de receptor para la evaluación de contaminantes reactivos como NO_x, O₃ y VOCs (Vargas 2009).

Los datos de redes de monitoreo, se utilizan con el fin de evaluar los inventarios, ya sea mediante la comparación de tendencias de concentraciones de contaminantes individuales (CO, NO_x, SO_x) o con el uso de relaciones entre contaminantes. En el caso de las fuentes móviles, el uso de las relaciones VOCs/NO_x, VOCs/CO, CO/NO_x, está bastante extendido, teniendo en cuenta que las fuentes móviles aportan cantidades importantes al total de éstos contaminantes y además, que estas relaciones minimizan la variabilidad causada por las condiciones meteorológicas (Mobley & Cadle 2004). Una de las principales desventajas para su aplicación es la limitada disponibilidad de datos del monitoreo ambiental disponibles para ser utilizados en el análisis.

Los modelos de calidad del aire tridimensionales emplean los datos arrojados por los IE con el propósito de modelar la calidad del aire a la escala tanto espacial como temporal de interés. Por tanto, es posible establecer si los resultados obtenidos por los modelos concuerdan con las mediciones de calidad del aire en un espacio y tiempo determinados.

2.2.2.5. Otras metodologías

Otras metodologías más sofisticadas se basan en determinar si los FE de combustión (ya sea en caliente o frío), empleados en los IE están acordes con la realidad. Sin embargo, requieren mayor inversión en equipos, logística y tiempo. La determinación de los FE “reales” se realizan a través de estudios de túnel, sistemas portátiles de monitoreo de emisiones (PEMS, por sus siglas en inglés), monitoreo remoto de emisiones, entre otros, que básicamente buscan verificar que los FE de modelo vs. reales sean similares.

2.3. EVALUACIÓN DE INVENTARIOS DE EMISIONES CON DATOS AMBIENTALES

Las redes de monitoreo de calidad del aire constituyen una importante base de datos que permite observar las tendencias de los contaminantes a través de los años para diferentes ubicaciones, que por lo general, son seleccionadas con cuidado por las autoridades ambientales, con el fin de obtener datos representativos de un centro urbano o región. La evaluación de IE para fuentes móviles se basa por lo general en el uso de DA recopilados para VOCs, NO_x y CO, debido a que: i) Son generados principalmente por el parque automotor; ii) Los VOCs y NO_x actúan como precursores de O₃ troposférico y PM secundario producto de reacciones fotoquímicas, iii) Las mayores emisiones de estos contaminantes se producen generalmente donde se presentan grandes concentraciones de personas (NARSTO 2005; Felix et al. 2010)

Las tendencias o la relación de concentraciones de contaminantes de los DA pueden ser comparadas con las obtenidas al revisar los datos de IE para evaluar su consistencia. Este tipo de análisis a diferencia de los estudios de túnel, monitoreo remoto y otros que están limitados a cortos periodos de tiempo, con tamaños de flota, estilos de conducción restringidos, permiten ser llevados a cabo en una amplia variedad de sitios donde se cuente con datos ambientales confiables y continuos en el tiempo, con lo cual se puede evaluar un IE de manera global. (Pollack et al. 2004).

2.4. INFORMACIÓN BASE PARA LA CIUDAD DE BOGOTÁ

2.4.1. Comportamiento de los vientos

Bogotá se caracteriza por tener vientos que varían entre la calma y suaves en la mañana; y de suaves y moderados en las tardes (escala Beaufort). La Figura 2 muestra los promedios horarios de diversas estaciones de monitoreo para el año 2005 y 2008.

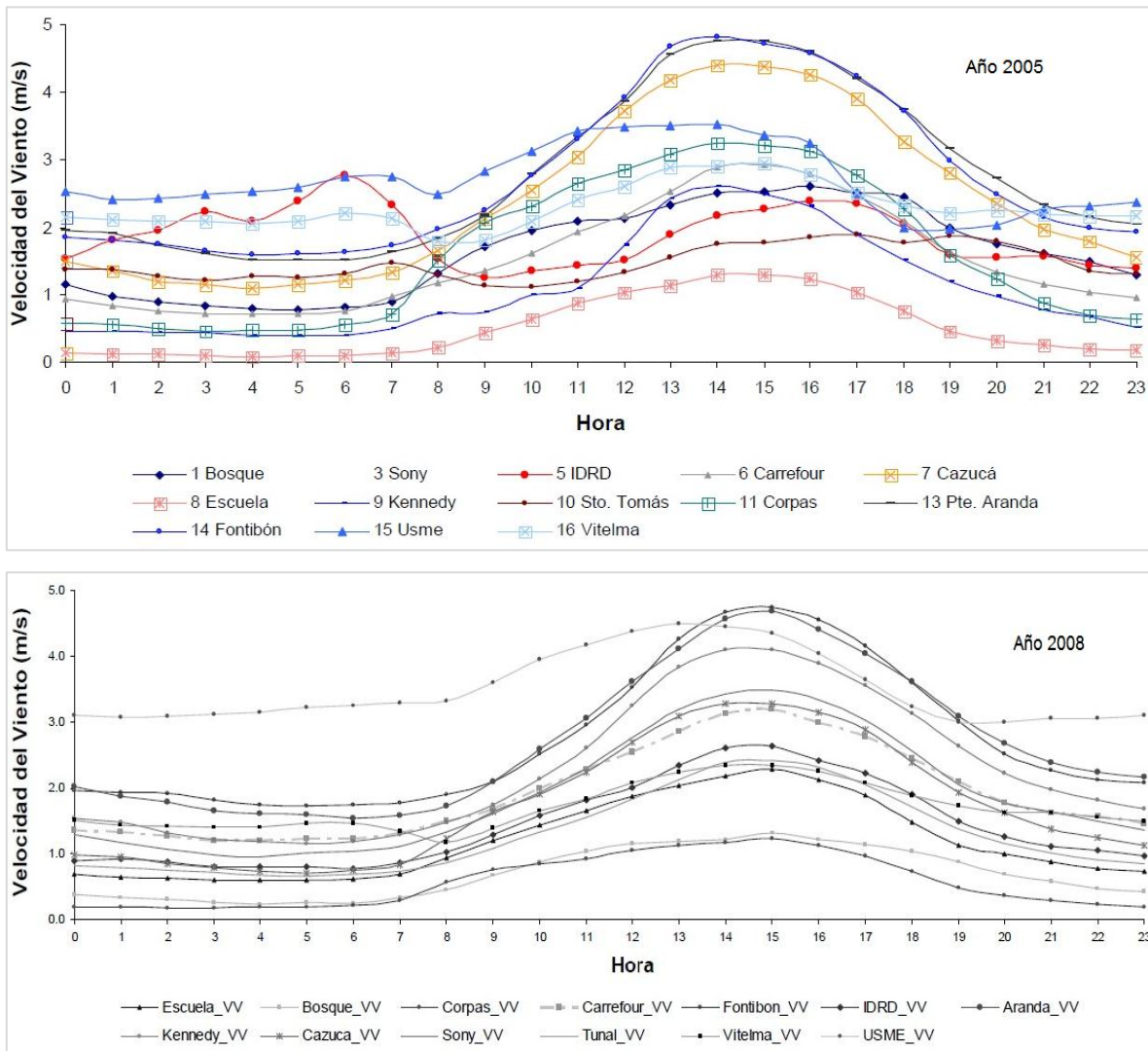


Figura 2. Comportamiento horario de los vientos para el año 2005 y 2008 por estaciones
Fuente: (SDA 2006; SDA 2009)

La dirección de los vientos depende mucho de las condiciones atmosféricas. Sin embargo, al observar los comportamientos del viento en horas de la mañana para la zona

centro y norte, se puede ver que existe un aporte de corrientes provenientes del oriente y nororiente de la ciudad, así como vientos del sur como lo muestra La Figura 3.

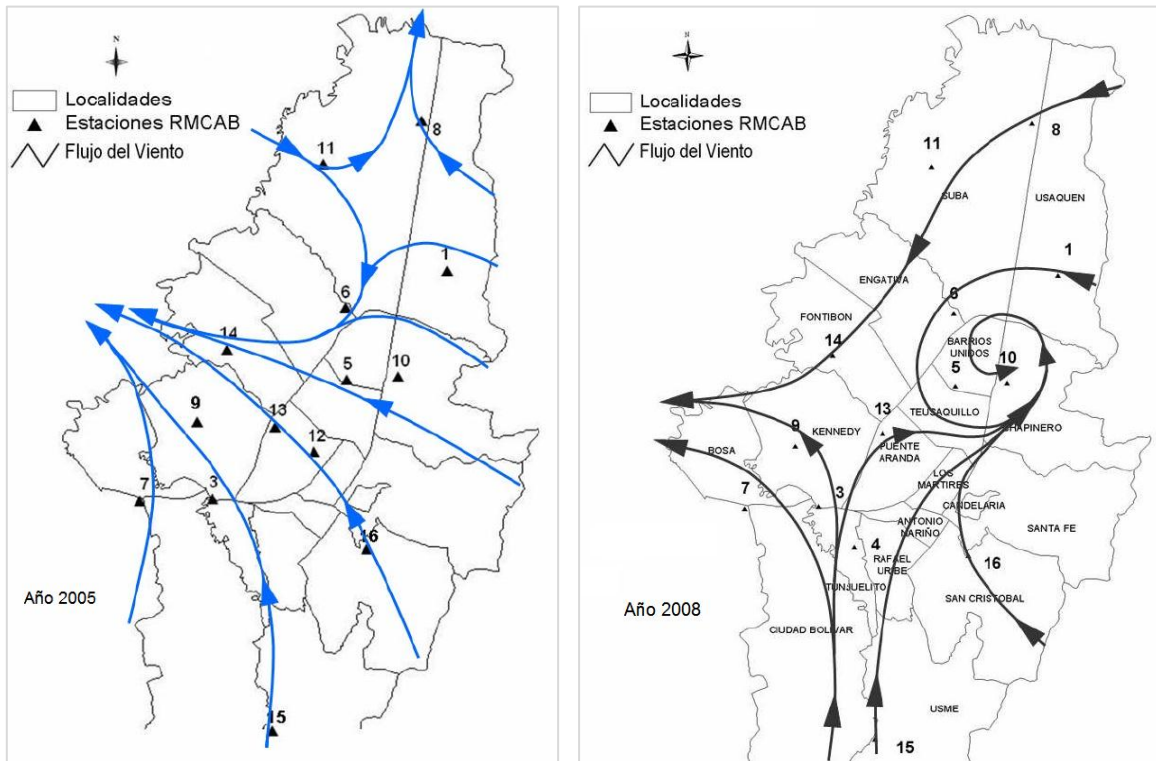
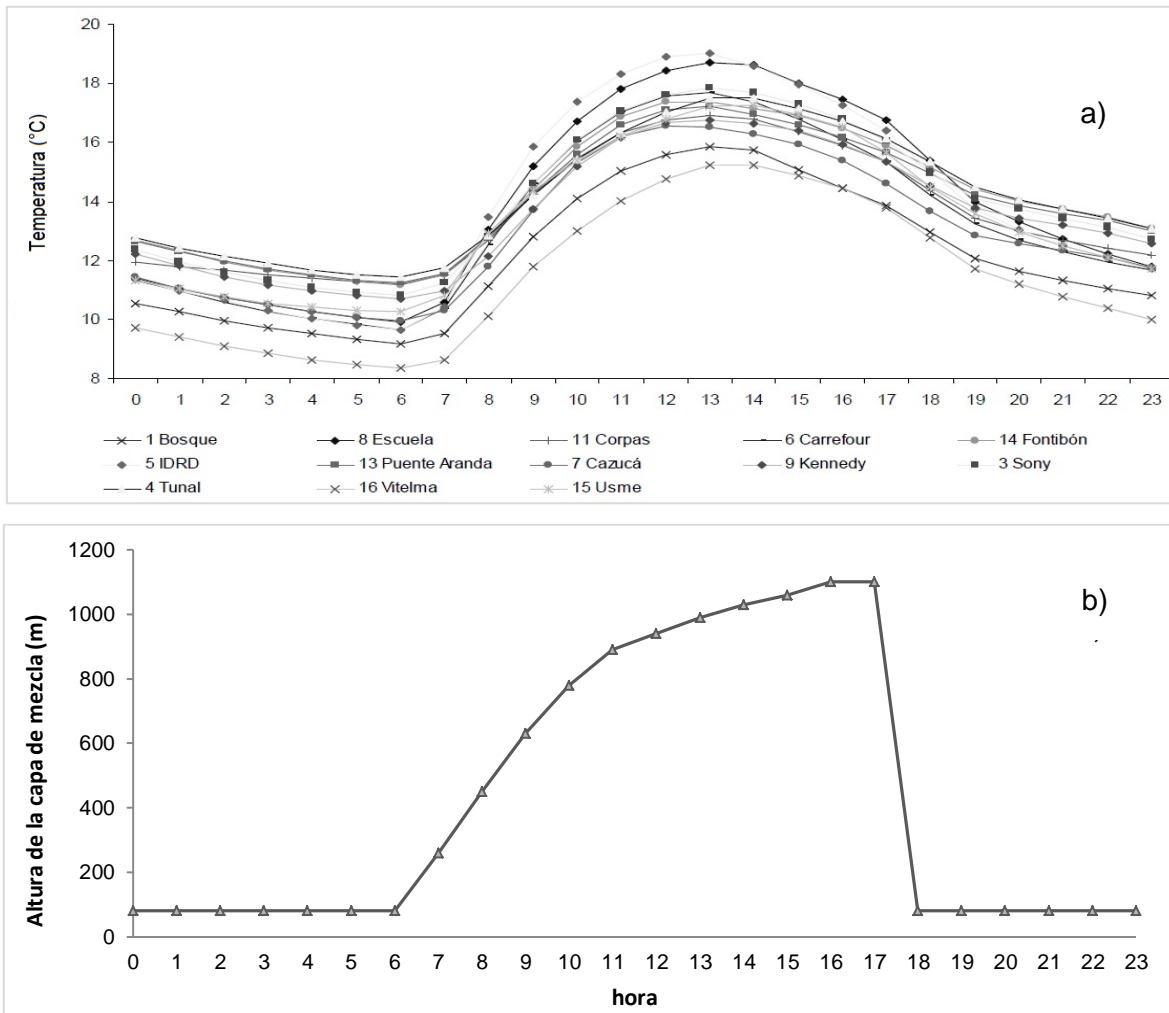


Figura 3. Dirección resultante de los vientos en la mañana para el año 2005 y 2008
Fuente: (SDA 2006; SDA 2009)

2.4.2. Temperatura y altura de capa de mezcla

El comportamiento promedio horario de la temperatura en Bogotá en un día típico, muestra periodos de baja temperatura en la madrugada y primeras horas de la mañana, luego un aumento hasta la media tarde y nuevamente un descenso hasta la madrugada (SDA 2009). Este comportamiento influye en la altura de la capa de mezcla en la ciudad, la que a su vez repercute en la concentración y dispersión de contaminantes. La Figura 4 describe el comportamiento de la temperatura y capa límite en el día para la ciudad de Bogotá.



2.4.3. Flota vehicular

El crecimiento de vehículos en la ciudad ha sido importante en los últimos años. Se evidencia que entre el año 2002 y 2009 los vehículos particulares crecieron en promedio 13% anual. Los vehículos de servicio público crecieron en 3%; los vehículos oficiales han aumentado en un 28% y las motos, cuyo aumento es el más importante, han crecido un 131% anual. Adicionalmente en Bogotá transitan cerca de 25258 vehículos de carga. La grafica muestra el aumento en la flota vehicular bogotana.

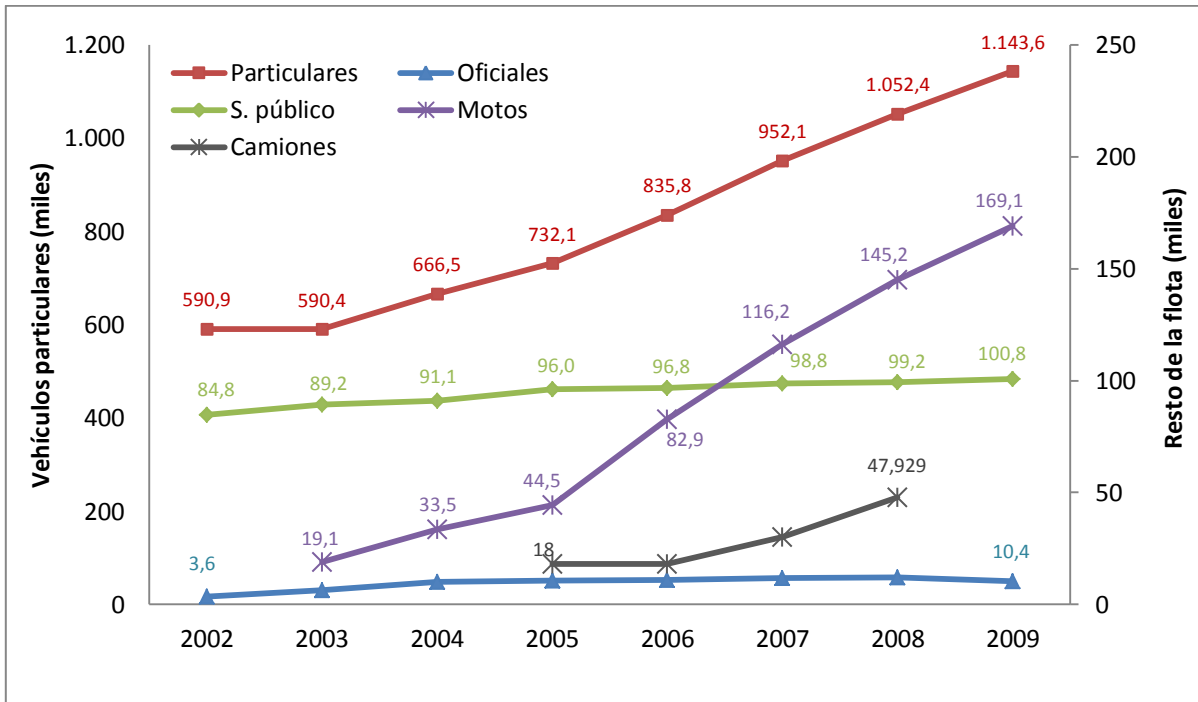


Figura 5. Crecimiento de la flota vehicular en Bogotá

Fuente: Adaptado de datos de la Dirección de estudios sectoriales y de servicios 2012 e Inventarios de emisiones

CAPITULO III. PLANTEAMIENTO METODOLÓGICO

La evaluación de IE de fuentes móviles a través de datos de calidad del aire esta sujeta a ciertas complejidades o factores de interés que pueden influir en los resultados finales. Fujita et al. (1992); Brown et al. (2002); Parrish (2002); Pollack et al. (2004) mencionan los factores de mayor influencia al efectuar este tipo de análisis:

- a. Aporte de otras fuentes (industriales, domésticas), cercanas a los sitios de medición.
- b. Aporte de contaminantes por transporte desde otros sectores ajenos al análisis.
- c. Cambios diarios en la emisión de contaminantes, ya que los aportes pueden diferir entre días de la semana o entre días laborales y no laborales.
- d. Variación en el aporte de contaminantes en horas de alto y bajo tráfico vehicular.
- e. Variaciones en la concentración de contaminantes por efectos de la química atmosférica.
- f. Variaciones estacionales de la concentración de contaminantes.
- g. Variaciones debido a la meteorología (dirección del viento, precipitaciones, altura de la capa de mezcla atmosférica).
- h. Incertidumbre de las mediciones ambientales.

La evaluación de IE de fuentes móviles por medio de DA se basa en dos supuestos principales: i) Que las mediciones ambientales están correctamente realizadas y sus incertidumbres están dentro de los parámetros establecidos para los contaminantes a analizar; ii) Que la concentración de contaminantes primarios en las regiones urbanas está influenciada principalmente por fuentes vecinas a las estaciones de monitoreo y puede ser representativa de la flota vehicular bajo ciertos criterios. Los autores mencionados anteriormente, así como Funk et al. (2001); Parrish (2006); Reid et al. (2008) indican que esta última suposición abarca la mayor parte de las complejidades mencionadas en el párrafo anterior y han implementado diversas técnicas que permiten

utilizar de manera adecuada los datos de calidad del aire para el análisis de IE de fuentes móviles:

- a. Emplear datos provenientes de estaciones de monitoreo ubicadas en áreas urbanas influenciadas por un alto tráfico vehicular, evitando interferencias de otras fuentes como calderas, hornos, centrales de generación eléctrica a carbón o gas, maquinaria pesada, fuentes domésticas, entre otras.
- b. Escoger sitios o estaciones de monitoreo que reflejen las emisiones del tráfico urbano, más que el tráfico particular de una zona.
- c. Escoger estaciones de monitoreo con datos suficientes para realizar los análisis temporales, con datos validados y recolectados con prácticas reconocidas que permitan un adecuado nivel de confianza en los mismos.
- d. Emplear de datos provenientes de periodos del día con alto flujo vehicular con el fin de minimizar los efectos de otras fuentes, además de periodos donde los efectos de las reacciones fotoquímicas sean reducidos. En general esto se cumple en horas pico de la mañana.
- e. Emplear datos correspondientes a días laborales únicamente, con el fin de evaluar toda la flota o uso de datos de fin de semana para evaluar flota liviana.
- f. Emplear datos agrupados por dirección del viento y bajas velocidades para facilitar la identificación de fuentes y/o disminuir el aporte de contaminantes de fuentes específicas.
- g. Emplear en lo posible, datos ambientales que concuerden con el periodo de tiempo en el cual se elaboró el IE.
- h. Emplear las relaciones de contaminantes CO/NO_x, VOCs/NO_x, PM/NO_x, entre otras, para la evaluación, lo cual permite disminuir de manera importante la influencia de las variaciones meteorológicas.

Basado en lo anterior, la metodología planteada para el presente proyecto constó de cinco fases que se resumen en la Figura 6

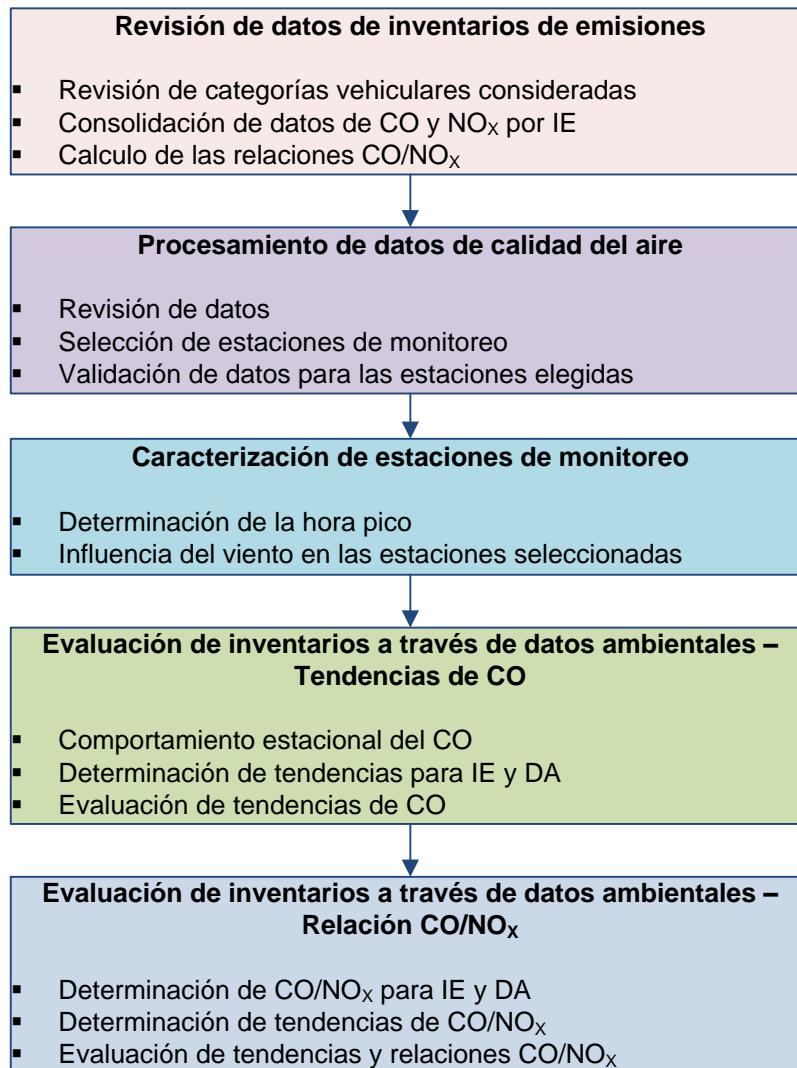


Figura 6. Desarrollo metodológico del proyecto
Fuente: Elaboración propia

3.1. REVISIÓN DE DATOS DE INVENTARIOS DE EMISIONES

Zarate (2007) y Peñaloza (2010), emplearon modelos de emisiones para determinar la distribución temporal y espacial de contaminantes. Los restantes emplearon modelos de FE que reportan emisiones para un día o año para toda la ciudad. Zarate reportó emisiones en ton/día espacialmente distribuidas para el total de fuentes (fijas, móviles, biogénicas), así como datos de emisión para toda la ciudad por fuente en ton/día; Peñaloza realizó un reporte espacial de fuentes móviles y fijas, mediante mapas de

concentración que no permiten visualizar datos absolutos por zona. Sin embargo reportó datos de emisión de fuentes móviles para el año 2008 y para un día típico de ese año. Una comparación espacial directa frente a datos de calidad del aire no es posible para ningún IE y una comparación temporal solo es posible con el IE de Peñaloza.

Los inventarios realizados en Bogotá pueden contener datos de emisiones de toda la flota considerada y/o datos desglosados por categoría vehicular principal (VP, LDT, C, TM, entre otros). En el presente trabajo se realizó una revisión detallada de los IE con el fin de establecer los resultados de CO y NO_x para toda la flota y por categoría. Del mismo modo, para facilitar la comparación con datos ambientales, se calculó la relación CO/NO_x transformando los datos de los IE de base másica a molar, multiplicando por los pesos moleculares de los contaminantes. Para CO se empleó un peso molecular de 28 kg/kmol; para NO_x se empleó un peso molecular de 31,6 kg/kmol suponiendo que está compuesto por 90% de NO y 10% de NO₂, teniendo en cuenta que se emplearon datos de hora pico cuando se registran emisiones frescas de la flota vehicular y los efectos fotoquímicos se minimizan, con lo cual el NO es el principal componente del NO_x monitoreado (DEFRA 2004; Arriaga-Colina et al. 2004)

3.2. PROCESAMIENTO DE DATOS DE CALIDAD DEL AIRE

3.2.1. Revisión de datos

La base de datos de calidad del aire fue suministrada por la SDA en hojas de cálculo con formato xls, con registros independientes de CO y NO_x, velocidad del viento (VV) y dirección del viento (DV). Existen dos tipos de bases de datos, una con registros tomados cada diez minutos (diez-minutales) y otra con registros tomados cada hora (horarios). La base de datos horaria corresponde al periodo 1997-2010 y contiene datos de CO, NO_x, VV, DV, estos últimos solo para estaciones que monitorean NO_x. La base de datos diez-minutal corresponde al periodo 2002-2011 y contiene datos de CO, NO_x, VV y DV.

Se emplea la base de datos diez-minutal debido a que permite una mejor representatividad del comportamiento de los contaminantes al poseer una mayor cantidad de registros. La base de datos se transformó de formato xls a formato csv con el fin de hacerla accesible a los paquetes de análisis estadístico. Para el análisis se emplearon MS Excel®, Minitab®, R y el paquete **openair**, especializado en el análisis de datos de calidad del aire para R (Carslaw & Ropkins 2011).

3.2.2. Selección de estaciones de monitoreo

La selección de estaciones se basa en los criterios establecidos al comienzo de este capítulo, con el fin de garantizar la calidad de los datos y la ubicación adecuada de las estaciones de monitoreo a ser empleadas en la evaluación de IE. Se siguieron los pasos descritos a continuación:

- Preselección de estaciones de monitoreo que posean una continuidad a través del tiempo en el registro de datos pareados, es decir, registros de CO y NO_x para el mismo año. Una revisión previa de los registros interanuales para las estaciones de monitoreo mostró faltantes importantes de información y discontinuidad en el registro de datos de CO y NO_x para la mayoría de las estaciones (ver Tabla 3.), Por tanto, se escogieron estaciones en las cuales los faltantes interanuales no superaran dos años entre sí (Pollack et al. 2004).
- Evaluación intraanual de los datos, para las estaciones preseleccionadas en el apartado anterior. Se generaron series de tiempo cualitativas con reportes de datos válidos y perdidos, así como parámetros estadísticos básicos, empleando el paquete **openair**.
- Verificación de la ubicación adecuada de las estaciones preseleccionadas, para lo cual se emplearon los criterios de ubicación dados por la SDA en los distintos informes anuales de calidad del aire y se realizó una inspección a escala urbana para identificar fuentes fijas que influyan en los datos. Se sobrepusieron mapas de vías y localidades

obtenidos de Google Maps®, sobre mapas de ubicación de fuentes fijas de Bogotá en un dominio de 27km x 27km.

- Selección de las estaciones que contengan la mayor cantidad interanual e intranual de datos, que presentaran homogeneidad en los registros, tratando de evitar gran cantidad de datos atípicos o periodos de tiempo no concordantes y cuya ubicación permitiera evitar la influencia de fuentes fijas, maximizando la de fuentes móviles.
- Combinación de datos de las estaciones seleccionadas con el fin de obtener una base de datos consolidada con registros validados según lo descrito en el numeral 3.2.3. La evaluación de inventarios al emplear datos de diversas estaciones de monitoreo por separado, puede causar diferencias en las comparaciones debido a patrones de tráfico y meteorología particulares para cada sector de la ciudad, entre otros, por lo cual, combinar las series de tiempo de varios puntos de monitoreo para el análisis puede aumentar la representatividad de los datos y por ende la confianza en los resultados, aunque no es regla general (NARSTO 2005; Smit et al. 2010). En el presente trabajo se combinaron los datos coincidentes por fecha, calculando su media.

3.2.3. Validación de datos para las estaciones escogidas

Las bases de datos fueron validadas previamente por la SDA, de acuerdo con protocolos internos (SDA 2011), y cuentan con registros reportados como no válidos (*invalid*), no registrados por fallos en estación (*FailTech*), por apagado del equipo (*apagado*) o por errores de calibración (*Calib*), entre otros. También existen registros perdidos y, por supuesto, registros válidos. Una revisión detallada de la base de datos mostró que existían registros con valores inusualmente altos, registros perdidos o con valor cero, causados por inexactitud de los instrumentos de monitoreo (Gallardo et al. 2012). El valor cero no tiene sentido, en especial para CO, dado que siempre existe una concentración de fondo en el ambiente que es susceptible de ser monitoreada, por lo cual los datos se sometieron a una re-validación en dos etapas.

La primera etapa de validación se realizó con los datos para las 24 horas del día y que fueron empleados para caracterizar las estaciones (determinar las horas pico e influencia de los vientos sobre los contaminantes). Se realizó una inspección visual para determinar cambios abruptos en las series de tiempo, se eliminaron los registros con valor cero y con valor inferior al límite de detección de los instrumentos de medición (40 ppbv para CO; 0,04 ppbv para NO_x), se eliminaron los datos atípicos que se encontraran por encima del percentil 99 y los datos atípicos detectados en el análisis planteado en el numeral 3.2.2. La segunda etapa de validación se efectuó para los datos registrados únicamente en horas pico y que fueron empleados para la evaluación de IE; se removieron los registros en los cuales la concentración de CO fuera menor a 100 ppbv (eliminación de registros de fondo o background) y la de NO_x fuera menor a 10 ppbv (Arriaga-Colina et al. 2004; S. G. Brown et al. 2002; Jolly et al. 2000).

3.3. CARACTERIZACIÓN DE ESTACIONES DE MONITOREO ELEGIDAS

3.3.1. Determinación de la hora pico

Para el empleo de datos de calidad del aire con el propósito de evaluar IE, es importante minimizar el aporte de contaminantes de otras zonas y establecer los periodos de la mañana cuando el tráfico es abundante y, por ende, las emisiones de fuentes móviles son predominantes (horas pico). Los patrones de tráfico y emisiones son, por lo general, recurrentes en días laborales y es posible que hayan tomado importancia en los fines de semana, especialmente los sábados (Reid et al. 2011). Esto puede presentarse a tempranas horas de la mañana, cuando la velocidad del viento es baja, al igual que la temperatura de la atmósfera y, por tanto, la altura de la capa de mezcla es baja. Se realizó entonces, para todo el conjunto de datos existente, por estación y para la base de datos consolidada, un análisis de la variación de las emisiones en función del tiempo para cada día de la semana, calculando su media horaria y su intervalo de confianza del 95%, para determinar las horas pico de registro de contaminantes y los días de la semana que representan de mejor manera el tráfico vehicular en hora pico. Se tuvo en cuenta también

que las horas pico coincidieran con condiciones meteorológicas favorables para el análisis (06:00 a 09:00 horas, como se muestra en el numeral 2.4.).

3.3.2. Influencia del viento

La concentración de CO y NO_x puede variar conforme a la velocidad y dirección del viento por la influencia de diferentes fuentes que pueden ser identificadas al realizar un análisis bivariable de su comportamiento. Para evaluar la influencia de esta variable meteorológica en el comportamiento de la concentración de contaminantes, se siguió el procedimiento descrito a continuación para los datos de hora pico de lunes a sábado en cada estación. Este procedimiento no pudo ser aplicado en la base de datos consolidada, pues claramente la distribución de vientos es distinta en cada punto de la ciudad.

- Construir rosas de vientos para el total de datos disponibles, con el fin de conocer la distribución de velocidad y dirección del viento promedio en las estaciones de interés.
- Construir rosas de contribución de contaminantes, en donde los valores de velocidad del viento de una rosa de los vientos convencional son reemplazados por el valor de concentraciones de contaminantes y se establece la contribución de la concentración del contaminante por dirección del viento a la media global.
- Construir gráficas de contornos en coordenadas polares que permiten establecer la concentración de contaminantes conforme a la velocidad y dirección del viento; se trata de gráficas bivariables, donde se dibuja una superficie continua de concentración vs. velocidad y dirección del viento. La superficie es calculada mediante técnicas de suavizado a través de Métodos Aditivos Generalizados (GAM), los cuales permiten determinar la contribución de fuentes locales y fuentes lejanas a través de la comparación de la concentración de contaminantes a bajas y altas velocidades del viento en determinada dirección. En este caso, se utilizaron cuadrantes, conociendo la distancia máxima de detección de un contaminante hasta la estación de interés (Funk et al. 2001; Brown et al. 2002; Carslaw et al. 2006; Jones et al. 2010).

Para establecer de manera aproximada la distancia máxima de detección se realizó un análisis vectorial de las condiciones del viento en la superficie (velocidad y dirección) para estimar de manera gruesa el alcance máximo del transporte de contaminantes en el intervalo de hora pico por cuadrante de un plano cartesiano (se denominarán cuadrantes de influencia). Solo se consideraron vientos horizontales (una dimensión) y se supuso que los vientos viajan en línea recta (U.S. EPA 2000; Funk et al. 2001; Jolly et al. 2000). La Figura 7 muestra de manera esquemática la división por cuadrantes.

- Hacer una superposición de gráficas de contorno y cuadrantes de influencia en mapas de 5 km x 5 km para CO y NO_x para identificar las vías de influencia en cada estación por cuadrante.

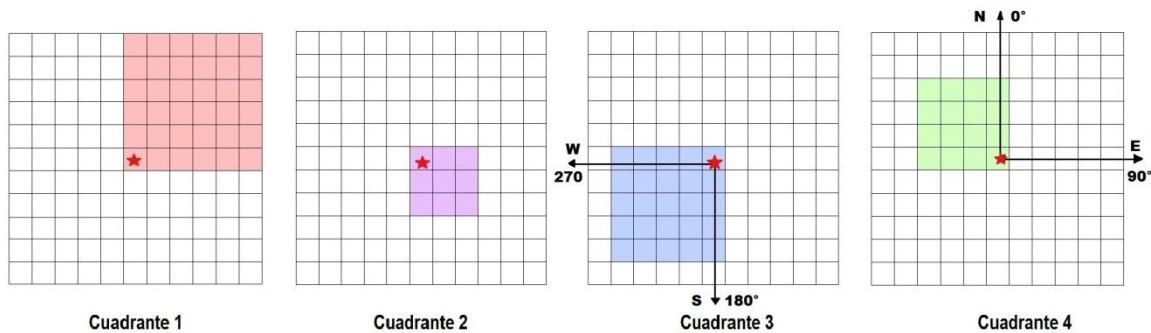


Figura 7. Esquema del análisis de vientos por cuadrantes
Fuente: Elaboración propia

3.4. EVALUACIÓN DE INVENTARIOS A TRAVÉS DE DATOS AMBIENTALES - TENDENCIAS DE CO

Un análisis de los DA y los estimados de contaminantes a partir de IE para un cierto periodo, permite determinar la magnitud de las tendencias temporales y realizar una comparación en términos relativos (porcentuales) de los datos medidos y los estimados. La evaluación se basó en la comparación de las tendencias ambientales de CO en hora pico, para los días laborales de la semana (incluyendo sábados) y por cuadrantes con las tendencias de CO derivadas a partir de IE de fuentes móviles para toda la flota vehicular y por categorías. Se escogió el CO teniendo en cuenta que este contaminante es menos influenciado por la química atmosférica (Zarate et al. 2007; Felix et al. 2010), su determinación a través de IE suele ser más confiable y las mediciones ambientales, más

precisas (Parrish 2006; Vivanco & Andrade 2006). Adicionalmente, es un indicativo adecuado del comportamiento de la flota vehicular de Bogotá, teniendo en cuenta que el 96% de las emisiones de CO corresponden a fuentes móviles, frente a un 72% en el caso de los NO_x.

3.4.1. Comportamiento estacional del CO

La estacionalidad en los datos de concentración de contaminantes influye en la determinación de las tendencias de concentración, puesto que muchas veces pueden presentarse periodos de disminución o aumento en la concentración y periodos de estabilidad, que impiden un adecuado análisis con el uso de regresiones lineales ordinarias (OLS) para series de tiempo. Se realizó entonces un análisis exploratorio por estación y en la base de datos consolidada, empleando el modelo aditivo generalizado (GAM, por sus siglas en inglés), con el fin de comprobar la estacionalidad y elegir el mejor método de regresión. El modelo GAM es una variante del modelo lineal generalizado (GLM), que permite el análisis de datos mediante el empleo de funciones suaves ponderadas localmente y no un parámetro (pendiente en OLS) para relacionar el contaminante y el tiempo. Los datos fueron desestacionalizados mediante el modelo LOES para mejorar la respuesta del análisis, lo cual se realiza mediante el paquete *mgcv*¹, vinculado a Openair para R (Carslaw et al. 2007; Carslaw & Ropkins 2011).

3.4.2. Evaluación de tendencias de CO

El análisis descriptivo planteado en el numeral 3.4.1, mostró un comportamiento estacional de los datos ambientales (ver numeral 4.4.1.), por lo cual se recurrió a regresiones por el método Theil-Sen para calcular las tendencias de CO a través del periodo de estudio en cada estación y la base de datos consolidada. Las tendencias se determinaron para el total de datos por estación y para cada uno de los cuadrantes, conforme a la Figura 7. Theil-Sen es un método robusto de regresión lineal no paramétrica, que calcula la pendiente para cada uno de los datos registrados en función

¹ Routines for GAMs and other generalized ridge regression with multiple smoothing parameter selection by GCV, REML or UBRE/AIC. also GAMMs by REML or PQL.

del tiempo y calcula la mediana de dicha pendiente para datos con la misma abscisa, lo cual permite que sea un método poco sensible a los datos atípicos y adecuado para conjuntos de datos asimétricos y heterocedásticos, siendo ampliamente utilizado en el análisis de series de tiempo para datos de calidad del aire y agua (Wong 2010; Wilcox 2010; Carslaw & Ropkins 2011).

Las regresiones se realizaron para obtener la variación porcentual por año según la ecuación (4), donde T es la tendencia porcentual o variación porcentual por año, $C_{inicial}$ es la concentración o valor inicial de la variable de interés de acuerdo con la regresión obtenida, C_{final} es la concentración o valor final de la variable de interés, n es el número de años considerados en la regresión. Para el análisis de IE solo se tuvieron en cuenta aquellas regresiones ambientales que contaran con nivel de significancia igual o inferior a 0,01 (99% de confianza o mayor).

$$T \left(\frac{\%}{\text{año}} \right) = \left(\frac{C_{inicial}}{C_{final}} - 1 \right) / n \quad (4)$$

Para determinar la tendencia en los IE, no es posible emplear el método Theil-Sen debido a que se requiere un mínimo de 6 años con datos para que sea posible realizar la regresión. Adicionalmente, para calcular los intervalos de confianza, se requiere que sea posible tomar más de 600 pares de datos (método de remuestreo *Bootstrap*). La heterogeneidad de los datos reportados por cada IE, debido a las diferentes metodologías de cálculo empleadas, el bajo número de datos y otros factores de incertidumbre asociados, obligaron a realizar una regresión OLS para los datos de CO con el propósito de obtener una tendencia aproximada de este contaminante a través del tiempo y emplear la ecuación (1). Se realizaron regresiones para datos de toda la flota vehicular (TF), la flota vehicular liviana (FL) y los vehículos particulares (VP), con el fin de ampliar el análisis. Los datos obtenidos de las regresiones ambientales y de IE se normalizaron y graficaron con el fin de visualizar de manera adecuada las tendencias y facilitar las comparaciones.

3.5. EVALUACIÓN DE INVENTARIOS A TRAVÉS DE DATOS AMBIENTALES - RELACIÓN CO/NO_x

La comparación de relaciones de contaminantes en horas pico, cuando se aseguran altas concentraciones debido al tráfico vehicular y baja actividad fotoquímica, aumentan la probabilidad de que un sitio de monitoreo sea representativo del tráfico local y urbano. Las comparaciones con todos los DA disponibles para un sitio pueden ser adecuadas, sin embargo, el cálculo por cuadrantes o incluso por horas y cuadrantes pueden mejorar las estimaciones (Reid et al. 2006).

La comparación de tendencias de contaminantes individuales como CO y NO_x permite observar fallas generales de los IE a través del tiempo. Sin embargo, no permite una comparación directa de resultados entre los datos monitoreados y los datos estimados por cada IE. Adicionalmente, los contaminantes individuales están sujetos a variabilidad debido a efectos meteorológicos, ciclos de actividad urbana, efectos de química atmosférica, transporte de contaminantes, entre otros. Las relaciones molares de contaminantes como CO/NO_x pueden disminuir estas interferencias al ser afectadas en menor medida por ciclos estacionales o cambios climáticos (M. Zavala, S. C. Herndon, et al. 2009); razón por la cual, para el análisis de DA y de IE se emplearon las tendencias a través del tiempo de la relación CO/NO_x y la comparación directa de la relación ambiental y la derivada para cada inventario.

La relación entre dos contaminantes como el CO y NO_x puede derivarse a partir de la regresión lineal de las concentraciones ambientales bajo los siguientes supuestos: los aportes son provenientes mayoritariamente del tráfico urbano o local; la concentración de fondo es estable y constante en el tiempo; la reactividad de los contaminantes es despreciable. Pueden, entonces, aplicarse algunos conceptos de modelo de receptor a las estaciones de interés para determinar la concentración $c_i(t)$ para un contaminante i (Mellios et al. 2006). Sea $p_i(t)$ la concentración de fondo del contaminante i en ausencia de emisiones locales; $q_i(t)$ la contribución del tráfico al contaminante i determinada mediante las emisiones locales $E_{i,l}(t)$ de la categoría vehicular l (función de la actividad vehicular $A_l(t)$ y factores de emisión $FE_{i,l}$) y el factor de dispersión D_i el cual depende de

la meteorología y características de la zona de monitoreo. Asumiendo que D_i es independiente del contaminante (razonablemente valido para CO y NO_x), se tiene que:

$$q_i(t) = c_i(t) - p_i(t) = \sum_1^i FE_{i,l} x A_l(t) x D_i(t) = D_i(t) \sum_1^i E_{i,l}(t) \quad (5)$$

La ecuación anterior se escribe de manera similar para un contaminante j, con lo cual:

$$D_i(t) = \frac{q_i(t)}{\sum_1^i E_{i,l}(t)} \quad \text{y} \quad D_j(t) = \frac{q_j(t)}{\sum_1^j E_{j,l}(t)} \quad (6)$$

Considerando que los FE son determinados para las mismas características de tráfico y la dispersión de contaminantes es similar, (5) para i y j se puede escribir como:

$$c_i(t) - p_i(t) = \frac{\sum_1^i E_{i,l}(t)}{\sum_1^j E_{j,l}(t)} c_j(t) - p_j(t) \quad (7)$$

Donde la relación de contaminantes en función del tiempo estaría dada por

$$r_{i,j} = \frac{\sum_1^i E_{i,l}(t)}{\sum_1^j E_{j,l}(t)} \quad (8)$$

Suponiendo que p(t) para i y j es constante y que $r_{i,j}$ varía poco en el tiempo, la ecuación (8) queda como:

$$c_i(t) = r_{i,j} c_j(t) + constante \quad (9)$$

La ecuación (8) es la ecuación de una recta y la constante puede interpretarse como la concentración de fondo de $C_i(t)$. Sin embargo, para este caso, dado que se eliminaron los datos de CO < 100 ppbv, tal interpretación no es válida. La realización de regresiones sobre DA ofrece dificultades como falta de normalidad en los errores, varianza no constante, suma de errores diferente a cero, incertidumbres en la variable regresora y variable respuesta, que incumplen las hipótesis para regresión OLS (Carslaw et al. 2007; Helsel & Hirsch 2002), por lo cual se emplearon regresiones lineales ponderadas (WLS); de acuerdo con el análisis de los datos y sus residuales, la ponderación para cada registro

es $1/\sigma_i^2$, donde σ_i es la incertidumbre estimada para cada registro ambiental conforme a lo descrito por NIST/SEMATECH 2012; Helsel & Hirsch 2002. Adicionalmente, se realizó un análisis de residuales para la relación CO vs. NO_x en donde se eliminaron datos atípicos (*outliers*), con residuales estudentizados² superiores a 2, datos influyentes (*levers*), con valores superiores a $2 \cdot p/n$ y datos mixtos³, es decir con errores significativos en la ordenada y abscisa (Kisys & Pérez 2006; Reid et al. 2006).

Se graficaron las pendientes obtenidas para cada una de las estaciones y cuadrantes (relación CO/NO_x) para cada año de datos disponibles, para obtener el comportamiento tendencial de CO/NO_x, y se realizaron regresiones OLS sobre estos datos; Las regresiones fueron sometidas a un análisis de varianza para establecer su significancia, empleándose aquellas que fueran significativas a un nivel del 95% de confianza. El comportamiento de los datos no permitió realizar ajustes exponenciales con graficas semi-logarítmicas para obtener las pendientes de acuerdo a lo realizado por Parrish en 2002 y 2006, así como por Gallardo et al. en 2012.

Los datos de IE también se graficaron en función del tiempo y se sometieron a una regresión OLS para establecer el comportamiento tendencial de los mismos (no se realizó análisis de varianza). Finalmente, se realizaron dos tipos de comparaciones: i) Se compararon los valores de CO/NO_x de cada inventario con los DA del año base correspondiente al IE o en su defecto la extrapolación de las regresiones ambientales; ii) Se compararon las tendencias de los IE por categoría vehicular con las tendencias significativas de CO/NO_x ambiental. Debe tenerse en cuenta que la comparación de relaciones de contaminantes es útil para examinar la composición relativa de los IE. Sin embargo, esta metodología no permite obtener datos de emisión másica (absolutos).

² Es el error del i-esimo término dividido por la desviación estándar

³ p es el número de variables regresoras mas la constante, n corresponde al tamaño de la muestra

3.6. INCERTIDUMBRE Y LIMITACIONES DEL ANÁLISIS

La comparación de tendencias de contaminantes y relación CO/NO_x entre DA e IE conlleva tres tipos principales de incertidumbres: i) Incertidumbres en el desarrollo de los IE (datos de entrada y uso de FE); ii) Incertidumbres en la determinación de las concentraciones de contaminantes en las estaciones de monitoreo de calidad del aire (límites de detección, precisión de las mediciones, calibración y mantenimiento de equipos); iii) La confiabilidad de las aproximaciones realizadas para poder realizar la comparación de datos (referidas a la resolución temporal y espacial de los IE, frente a los datos analizados, factores meteorológicos, efectos fotoquímicos).

La metodología empleada, implica restricciones en el uso de los datos de calidad del aire, por lo cual estos pueden no ser representativos del total de la flota contemplada en los inventarios de emisiones globales (por restricción del análisis a horas pico) De igual manera, el análisis de la influencia de los vientos puede verse limitado al no disponerse de datos de IE espacialmente distribuidos, lo que ocasionaría comparaciones de IE globales frente a datos de calidad del aire categorizados espacial y temporalmente. El tráfico de vehículos pesados puede no ser representado adecuadamente por los datos de calidad del aire de la hora pico, pues en Bogotá existen restricciones a su circulación, de acuerdo con el Decreto 034 de 2009, en el perímetro correspondiente a las estaciones de monitoreo seleccionadas. Adicionalmente, los picos de tráfico para esta categoría vehicular se encuentran alrededor de las 10 de la mañana (Peñaloza 2010) por lo cual existe una potencial desproporción de flota vehicular liviana vs. pesada en horas pico. Sin embargo, al incluir un análisis de tendencias, es de esperar que un análisis interanual de CO mitigue los efectos de la desproporción de datos (Parrish 2006).

CAPITULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. REVISIÓN DE DATOS DE INVENTARIOS DE EMISIONES

Se revisaron 6 inventarios de emisiones, realizados en el periodo 2002-2008 (años base). La Tabla 1. muestra los resultados obtenidos para cada uno de ellos con respecto a CO y NO_x, así como para la relación CO/NO_x.

Tabla 1. Datos anuales de CO, NO_x y CO/NO_x para los IE 2002-2008

Estudio	FE	ítem ²	Categoría vehicular						
			Todos	VP	T	M	B	C	TM ⁵
Zarate 2007 ¹ NOTA 1: Año base 2002 NOTA 2: Modelo AIREMIS	FE COPERT	Flota	684.428	641.993	ND		42.435	ND	
		CO (ton/año)	54.285	ND	ND	ND	ND	ND	
		NO _x (ton/año)	12.831	ND	ND	ND	ND	ND	
		CO/NO _x	5	ND	ND	ND	ND	ND	
	FE Locales	CO (ton/año)	275.965	ND	ND	ND	ND	ND	
		NO _x (ton/año)	12.304	ND	ND	ND	ND	ND	
Behrentz 2004 NOTA 1: Año base 2004 NOTA 2: Modelo directo	FE California	Flota	577.941	533.827	44.114	ND	ND	ND	
		CO (ton/año)	230.000	170.890	59.110	ND	ND	ND	
		NO _x (ton/año)	12.000	10.308	1.692	ND	ND	ND	
		CO/NO _x	21,6	18,7	39,4	ND	ND	ND	
Giraldo 2005 ³ NOTA 1: Año base 2005 NOTA 2: Modelo IVE	FE IVE teóricos	Flota	923.587	788.000	50.000	32.000	35.000	18.000	
		CO (ton/año)	842.240	329.000	88.830	29.610	230.300	164.500	
		NO _x (ton/año)	49.350	13.160	6.580	ND	19.740	9.870	
		CO/NO _x	19,3	28,2	15,2	ND	13,2	18,8	
Herrera 2007 ⁴ NOTA 1: Año base 2006 NOTA 2: Modelo IVE para 1 NOTA 3: Modelo directo EVB para 2	FE IVE 1	Flota	868.335	705.432	51.035	60.667	31.821	18.194	
		CO (ton/año)	840.000	324.800	89.600	30.800	229.600	165.200	
		NO _x (ton/año)	49.350	13.160	6.580	ND	19.740	9.870	
		CO/NO _x	19,2	27,9	15,4	ND	13,1	18,9	
	FE IVE 2	CO (ton/año)	339.857	149.366	41.125	12.831	88.501	47.376	
		NO _x (ton/año)	38.196	13.160	2.895	230	17.108	3.948	

Estudio	FE	ítem ²	Categoría vehicular						
			Todos	VP	T	M	B	C	TM ⁵
		CO/NO _x	10,0	12,8	16,0	63,0	5,8	13,5	0,9
Rodríguez 2009 ⁶ NOTA 1: Año base 2008 NOTA 1: Modelo directo	FE Locales metodología IVE	Flota	1.186.400	891.163	78.789	128.912	38.123	47.929	1.484
		CO (ton/año)	450.000	404.000	42.000	ND	ND	ND	ND
		NO _x (ton/año)	30.000	18.200	11.500	ND	ND	ND	ND
		CO/NO _x	16,9	25,1	4,1	ND	ND	ND	ND
Peñalosa 2010 ⁷ NOTA 1: Año base 2008 NOTA 2: Modelo EMISENS	FE locales + ICOPERT VI	Flota	1.186.400	891.163	78.789	128.912	38.123	47.929	1.484
		CO (ton/año)	706.925	552.108	66.451	63.623	21.208	3.323	212
		NO _x (ton/año)	57.658	19.488	14.069	288	13.475	8.130	2.208
		CO/NO _x	13,8	32,0	5,3	249,1	1,8	0,5	0,1

Fuente: Propia con datos de los diferentes IE de la ciudad de Bogotá

1. Pueden presentarse discrepancias para el número de vehículos por categoría vehicular al ser valores estimados.
2. La relación CO/NO_x corresponde a la relación molar de contaminantes.
3. Pueden presentarse discrepancias entre los valores reportados de flota y CO entre este estudio y el original por omisión o inclusión de algunas categorías vehiculares (TM) y la aproximación de decimales.
4. Los taxis cuentan con emisiones desagregadas para gas y gasolina, aquí se incluyen las dos en un solo ítem.
5. Incluye buses articulados y alimentadores.
6. En el total de la flota no se incluye maquinaria pesada. Los FE son calculados localmente con metodologías IVE para flota liviana
7. Los FE Locales para flota liviana son tomados del estudio de Rodriguez en 2009, para M, B, C, TM los factores son teóricos COPERT VI.. La categoría buses incluye buses, microbuses, buses escolares y de turismo.

Modelo directo hace referencia al empleo de la ecuación (1) para la estimación de emisiones.

Tabla 2. Datos temporalmente distribuidos de CO, NO_x y CO/NO_x para los IE 2002-2008

Estudio	FE	Contaminante	Hora		
			06:00 - 07:00	07:00 - 08:00	08:00 - 09:00
Peñalosa 2010 6 NOTA 1: Año base 2008 NOTA 2: Modelo EMISENS	FE locales + COPERT VI	CO (ton/hora)	98,1	122,3	108,6
		NO _x (ton/hora)	8,4	9,5	8,9
		CO/NO _x	13,2	14,6	13,7

Fuente: Propia con datos de los diferentes IE de la ciudad de Bogotá

Un análisis de los datos reportados en la tabla anterior reveló discrepancias importantes con relación a los estimados de flota vehicular entre inventarios. Los IE de Zarate y Behrentz, presentaron diferencias en la estimación de la flota vehicular liviana (referida a VP y T) con una disminución entre el año 2002 y 2004, lo que influyó en los resultados obtenidos para el CO, mientras que los NO_x permanecieron constantes; es de resaltar que estos IE emplearon FE diferentes para los cálculos. Los IE de Behrentz y Giraldo, con año base 2004 y 2005 respectivamente, también presentaron diferencias notables en cuanto a la FL (VP y T), incluida en los inventarios, con una diferencia del 45% en tan solo un año. Este hecho, sumado al origen de los FE (FE de California vs. FE IVE) causaron que Giraldo reporte emisiones de CO y NO_x superiores en un 81% y 65% respectivamente, frente a lo reportado por Behrentz.

Los IE realizados por Rodríguez y Peñalosa con año base 2008, presentaron discrepancias importantes a pesar de emplear los mismos FE para FL y la misma flota vehicular; se presentan diferencias entre las emisiones de CO y NO_x para FL de un 38% y 12% respectivamente; no es posible comparar M y FP (B, C, TM), al no disponer de datos en el IE de Rodríguez. Otro ejemplo de inconsistencias se presentaron en los inventarios de Giraldo y Herrera, donde la flota vehicular de VP contemplada por este último en 2006 fue inferior a la contemplada para 2005 por Giraldo, lo cual no está acorde con evolución de la flota mostrada en la Figura 5, donde se aprecia un continuo crecimiento de los vehículos particulares y en general de toda la flota.

La tabla de resumen también muestra que algunos inventarios presentaron datos atípicos para la emisión de contaminantes individuales y para la relación CO/NO_x. El inventario llevado a cabo por Zarate con FE COPERT III presentó datos inusualmente bajos de CO, NO_x y CO/NO_x con respecto los demás inventarios, probablemente por el uso de FE europeos y/o fallas en asignación de los FE a las categorías vehiculares escogidas; por tanto, este IE no se tuvo en cuenta para la evaluación. De igual manera, el IE desarrollado por Herrera basado en cálculos directos, presentó datos muy bajos de emisiones frente a los IE precedentes, razón por la cual no fue tomado en consideración para el análisis.

Finalmente, las discrepancias mencionadas para VP, así como la falta de datos suficientes a través del tiempo para la flota pesada (B, C, TM), impidieron realizar un análisis completo de las tendencias de CO y NO_x y la relación CO/NO_x por categorías vehiculares, razón por la cual se opta por realizar una comparación de DA e IE solo para FT y FL.

4.2. PROCESAMIENTO DE DATOS DE CALIDAD DEL AIRE

4.2.1. Revisión de datos

Para el periodo 2002-2009 se revisa la existencia de datos interanuales de CO y NO_x registrados la base de datos diez-minutal. La Tabla 3. muestra los resultados obtenidos

Tabla 3. Existencia de datos de CO y NO_x para la RMCAB 2002-2009

No.*	Estación	Cont.	Año							% del total	
			2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008		2009
3	Carvajal (Sony)	CO	•	•	•		•	•	•	•	87,5
		NO _x	•			•			•	•	50,0
4	Tunal	CO								•	12,5
		NO _x							•	•	25,0
5	IDRD (Parque Simón Bolívar)	CO				•		•	•	•	62,5
		NO _x				•		•	•	•	62,5
6	Ferias (Carrefour)	CO				•	•	•	•	•	62,5
		NO _x	•	•		•	•	•	•	•	87,5
7	Cazucá	CO	•	•	•	•	•	•	•		87,5
		NO _x	•								12,5
8	Escuela (Guaymaral)	CO						•			12,5
		NO _x	•	•				•	•	•	62,5
9	Kennedy	CO						•	•	•	37,5
		NO _x						•			12,5
10	Chico-Lago (Santo Tomas)	CO								•	12,5
		NO _x	•			•					25,0
11	Suba (Corpas)	CO	•	•	•		•	•			62,5
		NO _x		•	•	•	•	•		•	75,0
13	Puente Aranda	CO	•	•			•		•	•	62,5
		NO _x	•			•	•	•	•	•	75,0
14	Fontibón	CO	•		•	•	•	•	•	•	87,5
		NO _x	•		•	•	•	•	•	•	87,5

Fuente: Propia con datos de la RMCAB

* El número de la estación corresponde a la numeración dada por la SDA

Para el periodo de interés se encontraron 11 estaciones que monitoreaban CO y/o NO_x, sin embargo, este monitoreo no fue continuo en el tiempo en todas las estaciones para uno o los dos contaminantes de interés, lo cual dificultó la elección de estaciones de monitoreo para la evaluación. Las 11 estaciones mostradas en la Tabla 3. se ubicaban en el perímetro urbano de Bogotá y tienen un cubrimiento zonal diverso, que permite el monitoreo de localidades con actividad económica diferente. En la Figura 3 se muestra la

ubicación de las estaciones por localidades y la Tabla 4. muestra la zonificación realizada por la SDA para las estaciones de interés.

Tabla 4. Zonificación de las estaciones de monitoreo con registros de CO y NO_x

Sector	Estación	Características de ubicación
Norte	8. Guaymaral (Escuela)	Zona residencial de baja densidad poblacional y alto tráfico vehicular
Noroccidente	11. Suba (Corpas) 6. Las Ferias (Carrefour) 14. Fontibón	Alto tráfico vehicular y uso residencial y comercial
Centro	10. Chicó-Lago (Santo Tomás) 5. IDR (Parque Simón Bolívar)	Alto tráfico vehicular y uso residencial, comercial e institucional
Centroccidente	13. Puente Aranda	Zona industrial con alto tráfico vehicular y uso residencial
Suroccidente	9. Kennedy 7. Cazucá	Zona industrial con alto tráfico vehicular y uso residencial
Sur	3. Carvajal (Sony) 4. Tunal	Alto tráfico vehicular, uso residencial. Comercial

Fuente: (SDA 2009)

4.2.2. Selección de estaciones de monitoreo

Los resultados de la Tabla 3. muestran que existen estaciones con una baja cantidad de datos individuales y/o datos pareados interanuales, entre ellas se encuentran Tunal, Cazucá, Guaymaral, Kennedy, Chicó-Lago y Carvajal (esta última con una gran concentración de microindustria), razón por la cual se descartaron para realizar la evaluación de IE. Las estaciones de monitoreo ubicadas en la localidad de Puente Aranda y Fontibón cuentan con un porcentaje adecuado de registros interanuales, sin embargo, conforme a lo descrito en la Tabla 4. , están ubicadas en un sector con alta concentración industrial, por lo cual se descartan para el análisis.

Las estaciones IDR, Las Ferias y Suba cuentan con una adecuada continuidad de registros interanuales, pero es necesario establecer la calidad de los datos registrados para cada año, teniendo en cuenta que se sugiere el uso de periodos con registros válidos superiores al 75% (SDA 2011); las Figura 8Figura 9 y Figura 10 muestran el resumen de datos a través de los años para estas estaciones.

La estación de IDRD muestra faltantes importantes de datos para el año 2005, en especial para CO (60%), sin embargo, al existir continuidad en el último trimestre, este año fue empleado para determinar tendencias de CO y NO_x y para el cálculo de CO/NO_x. Para el año 2006, no existen datos para ninguna variable y para el periodo 2007-2009 la existencia de datos es adecuada para el análisis al contar con registros válidos por encima del 75% para todas las variables.

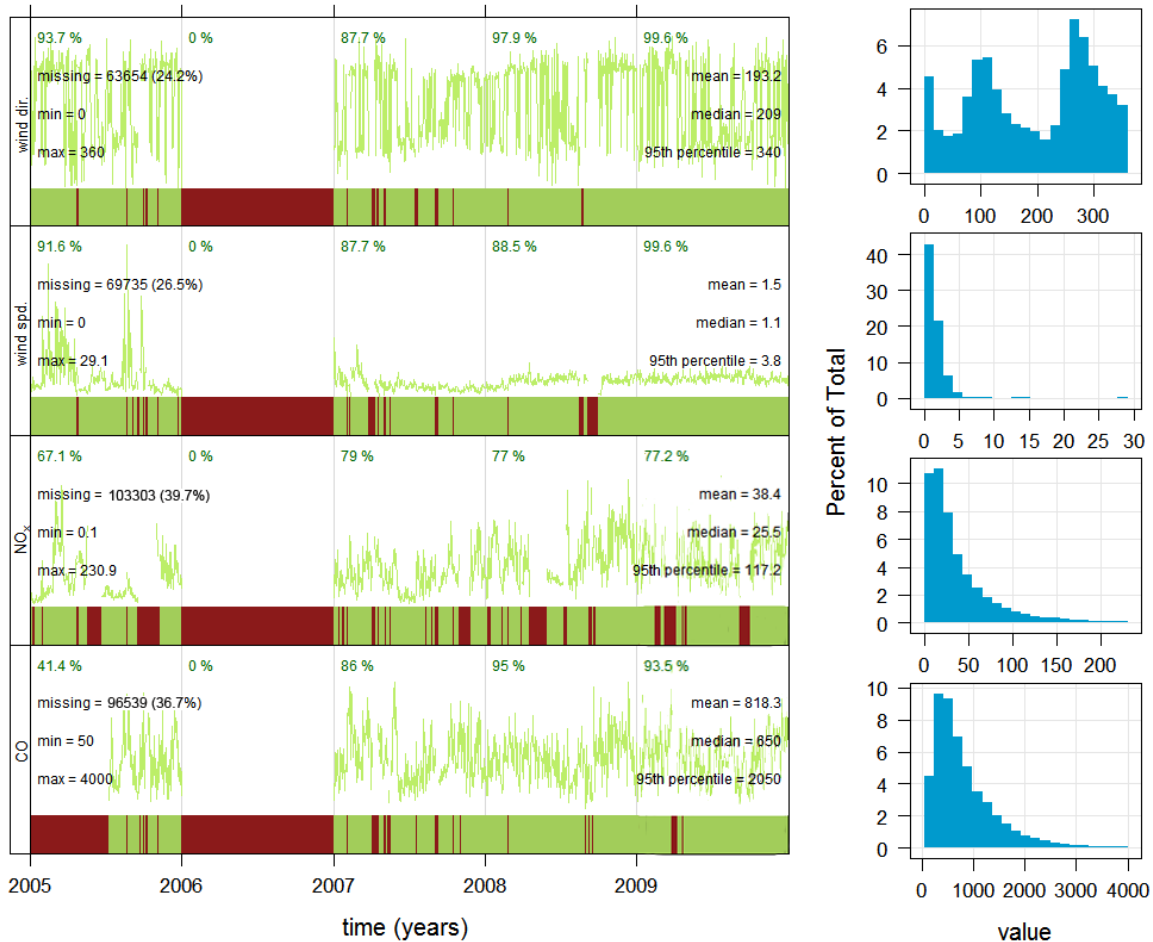


Figura 8. Existencia de datos para la estación de IDRD
Fuente: Elaboración propia empleando datos de calidad del aire de la RMCAB

Los datos de la estación Las Ferias muestran, que los registros no válidos o perdidos se concentraron en el primer semestre para el año 2005, este periodo se descartó y se emplearon los datos a partir del segundo semestre, cuando las pérdidas de información son reducidas, y puede efectuarse el cálculo de tendencias y relaciones de CO y NO_x. El año 2006 presentó pérdidas considerables, con cerca de un 50% de los registros no

válidos para CO, además de un comportamiento atípico (aumento inusual a través del tiempo), de este contaminante, por tanto, este año se descartó para el cálculo de tendencias de CO y la relación CO/NO_x. Para NO_x se consideró que los datos son adecuados para el cálculo de tendencias de concentración. El periodo 2007-2009 mostraron una adecuada cantidad de registros válidos, aunque se debe tener precaución con el análisis pues el número de datos válidos para NO_x son inferiores al 75%.

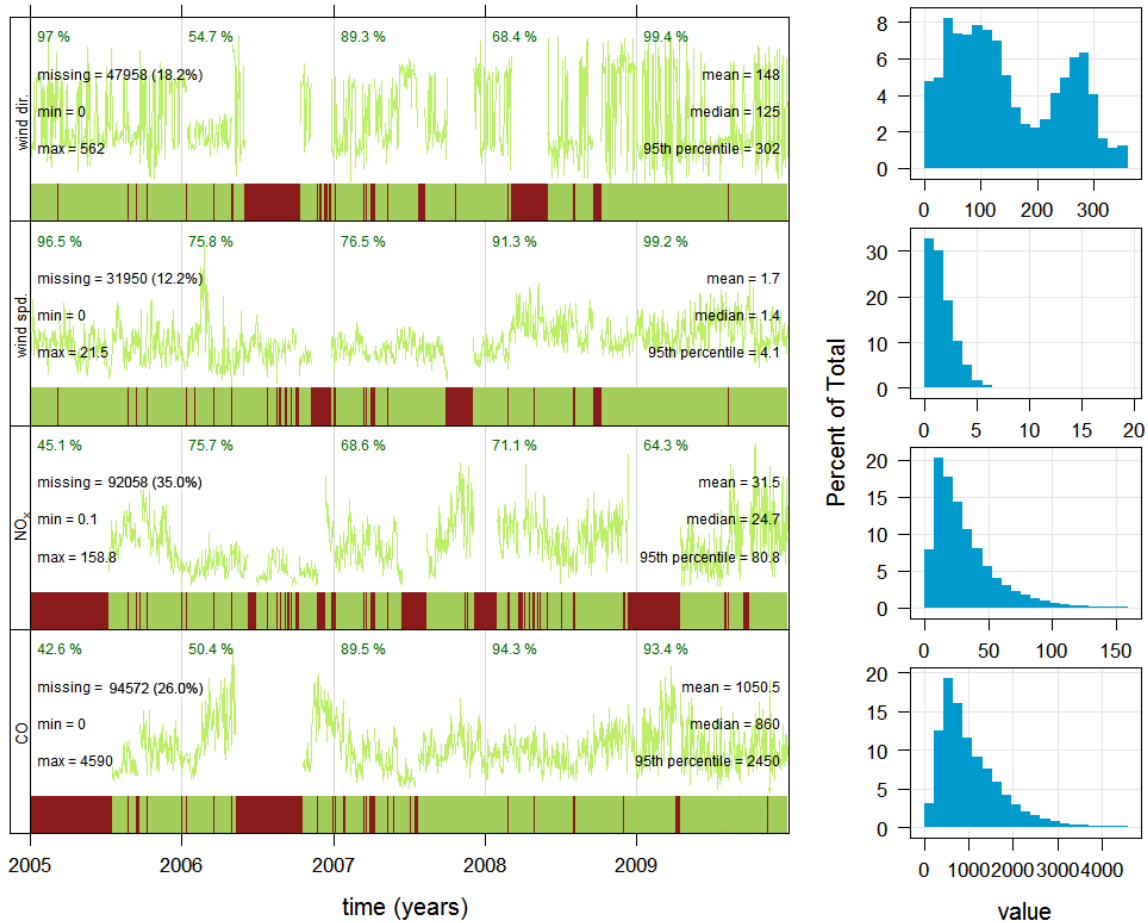


Figura 9. Existencia de datos para la estación de Las Ferias
Fuente: Elaboración propia empleando datos de calidad del aire de la RMCAB

La estación suba presentó la mayor cantidad de registros no válidos, Siendo el CO el contaminante con las pérdidas más considerables con un 68%; los años 2005 y 2006 fueron los más críticos, lo cual impidió un adecuado análisis interanual de la tendencia de la relación CO/NO_x. Los años 2003 y 2007 presentaron un gran porcentaje de datos no válidos y una alta variabilidad de los datos por lo cual el uso de estos periodos no es confiable.

El análisis de los gráficos de resumen mostró que los datos registrados por las estaciones de IDRD y Las Ferias son adecuados para realizar la evaluación de inventarios. La estación Suba por otro lado no permite un análisis confiable y es descartada.

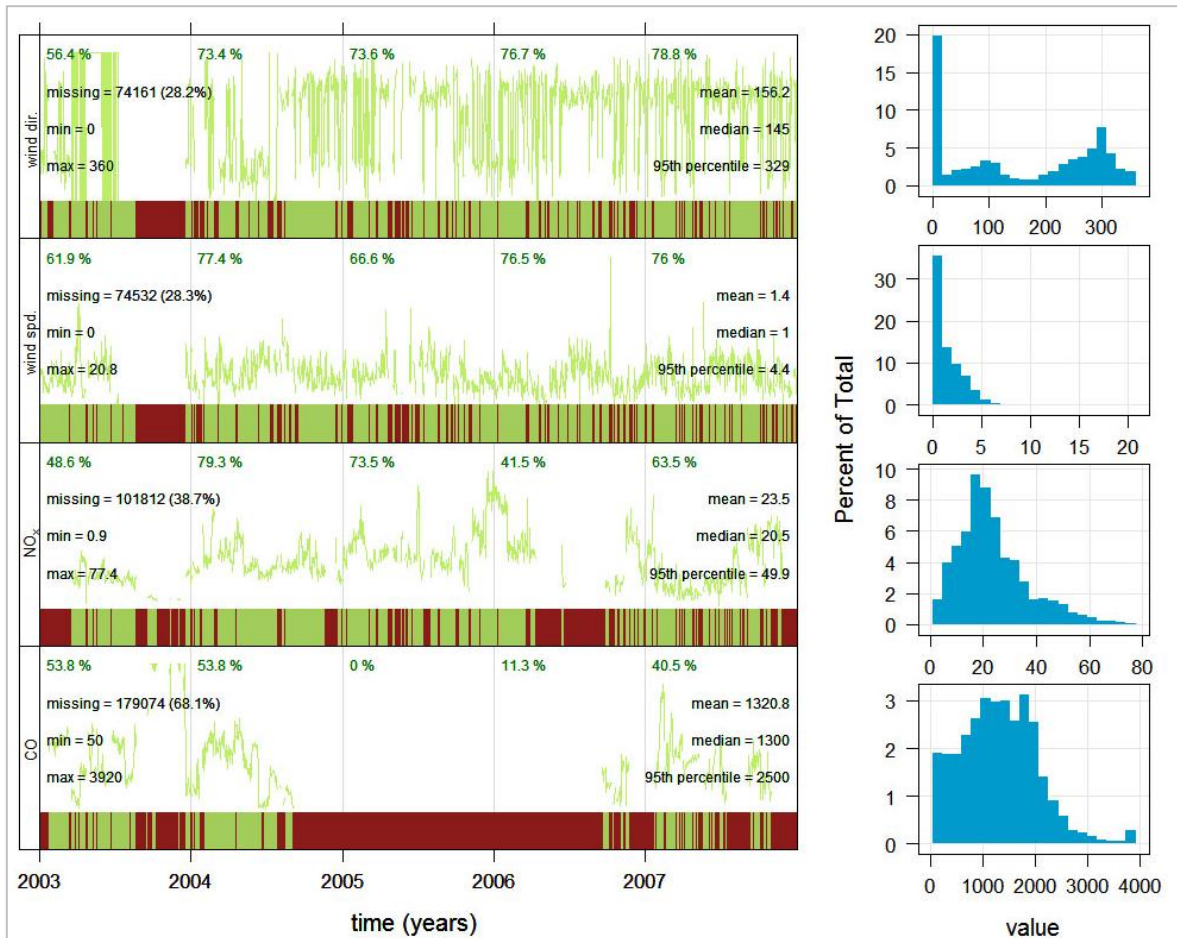


Figura 10. Existencia de datos para la estación de Suba
Fuente: Elaboración propia empleando datos de calidad del aire de la RMCAB

Las estaciones de IDRD y las Ferias se emplearon para obtener una base de datos consolidada (en adelante I+F), producto de los datos promediados. La Figura 11 muestra que la consolidación de datos tiene un aumento en los datos disponibles, con un 68,2% para NO_x y 85,5% para CO a lo largo del periodo 2005-2009. Persiste la falta de datos para CO durante el año 2005, pero al tratarse de promedios de dos sitios de muestreo, los datos existentes se consideraron útiles para determinar tanto las tendencias de CO como

la relación CO/NO_x. No fue posible el uso de datos para el año 2006. Para los restantes años el número de datos es apropiado para el análisis.

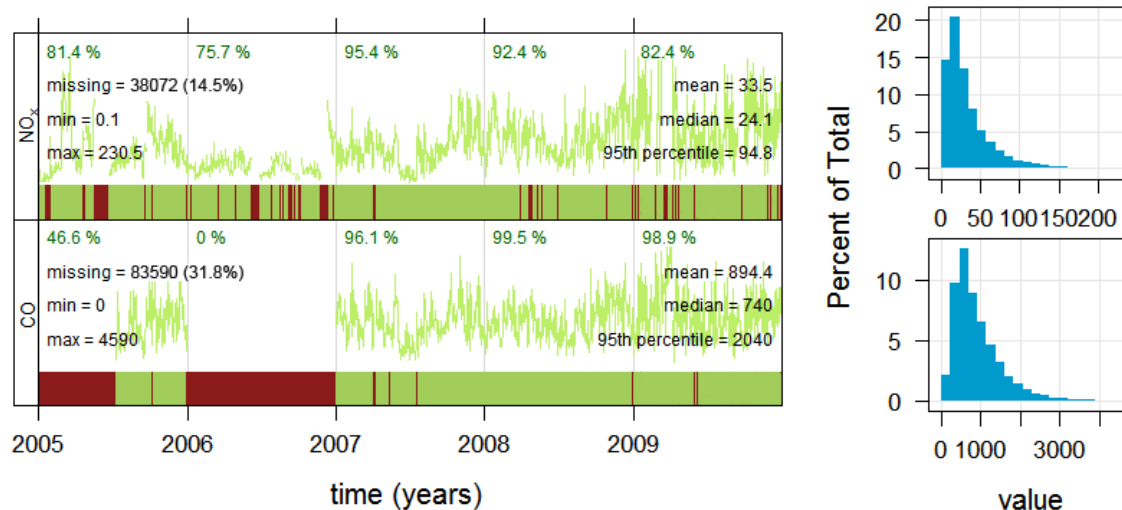


Figura 11. Existencia de datos para I+F

Fuente: Elaboración propia empleando datos de calidad del aire de la RMCAB

En cuanto a la ubicación para la estaciones seleccionadas, IDRDR y Las Ferias, analizando lo reportado por la SDA, el aforo vehicular reportado por la SDM en 2008 (Peñalzoa 2010) y lo mostrado en la Figura 12 se tiene que:

- La estación del IDRDR está en una zona con cercanía de vías principales como la NQS, de alto tráfico de FL y bajo de B y C; Calle 26 con alto flujo de FL y bajo de B (ambas a 1500 m aprox.); Calle 63 con tráfico preponderante de FL y B en proporción significativamente menor (a 40 m aprox.); Carrera 68 con alto tráfico FL, B y C (a 800 m aprox.). Adicionalmente la densidad de fuentes fijas es baja.
- La estación de Las Ferias está en una zona con cercanía de vías principales como la Calle 80 de alto tráfico de FL TM y C (a 200 m de distancia); Av. Boyacá con alto flujo de FL, B y C (a 600 m aprox.); Carrera 68 con alto tráfico FL, B y C (a 950 m aprox.); av. Suba (a 1700 m), y otras secundarias con tráfico de FL principalmente. Para esta estación la densidad de fuentes fijas es baja

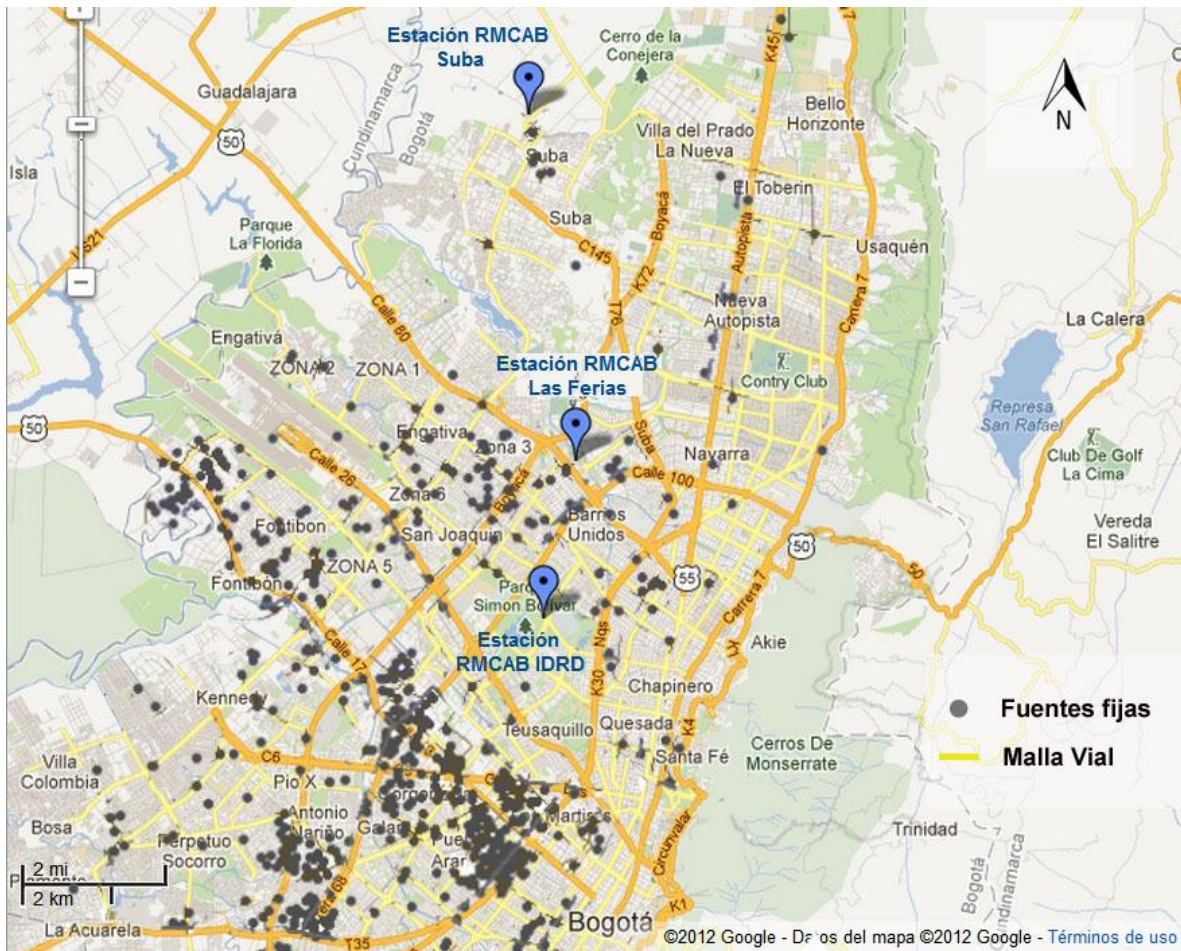


Figura 12. Ubicación estaciones seleccionadas e influencia de fuentes fijas

Fuente: Elaboración propia empleando Google Maps y la ubicación de fuentes móviles dada por Fandiño en 2009
La estación de Suba se muestra de manera referencial

4.3. CARACTERIZACIÓN DE ESTACIONES DE MONITOREO ELEGIDAS

4.3.1. Determinación de la hora pico

Para todo el intervalo de interés (2005-2009), la Figura 13 y Figura 14 muestran de izquierda a derecha para cada estación: el comportamiento del CO y NO_x en función de la hora para cada uno de los días de la semana, el comportamiento de un día típico (no se incluye domingo para los cálculos); el comportamiento de un año típico, una semana

típica, y el comportamiento horario de los contaminantes para todos los años del periodo. Para la determinación de estos comportamientos se emplea la media horaria, diario o semanal según sea el caso. Así mismo, el Anexo 1 muestra el comportamiento interanual de los contaminantes para los días de la semana, en función de la hora, con el fin de establecer la evolución de la hora pico a través de los años.

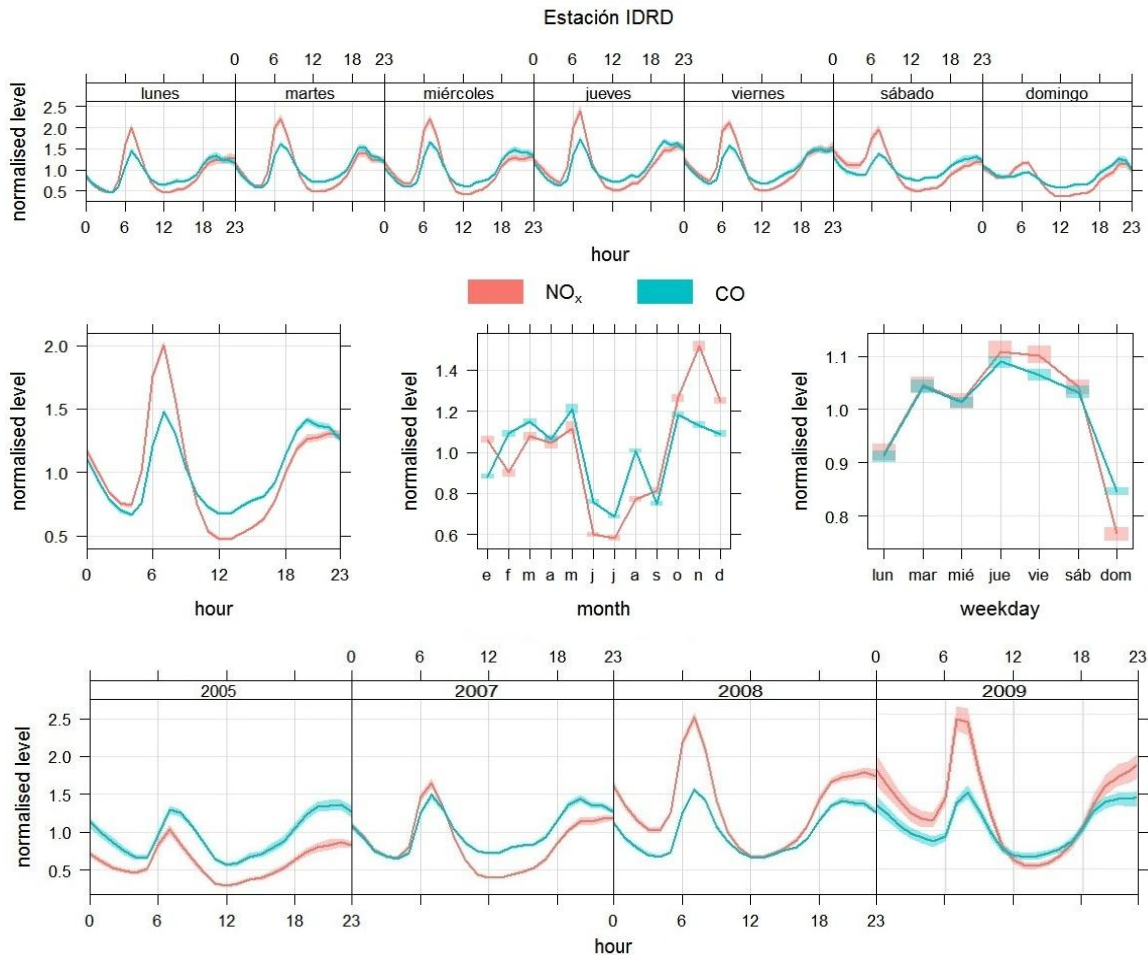


Figura 13. Variación de la concentración de CO y NO_x en función del tiempo para IDR

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la SDA. Los datos están normalizados por la media para cada contaminante. Los contornos sombreados muestran el intervalo de confianza del 95% para los datos promediados

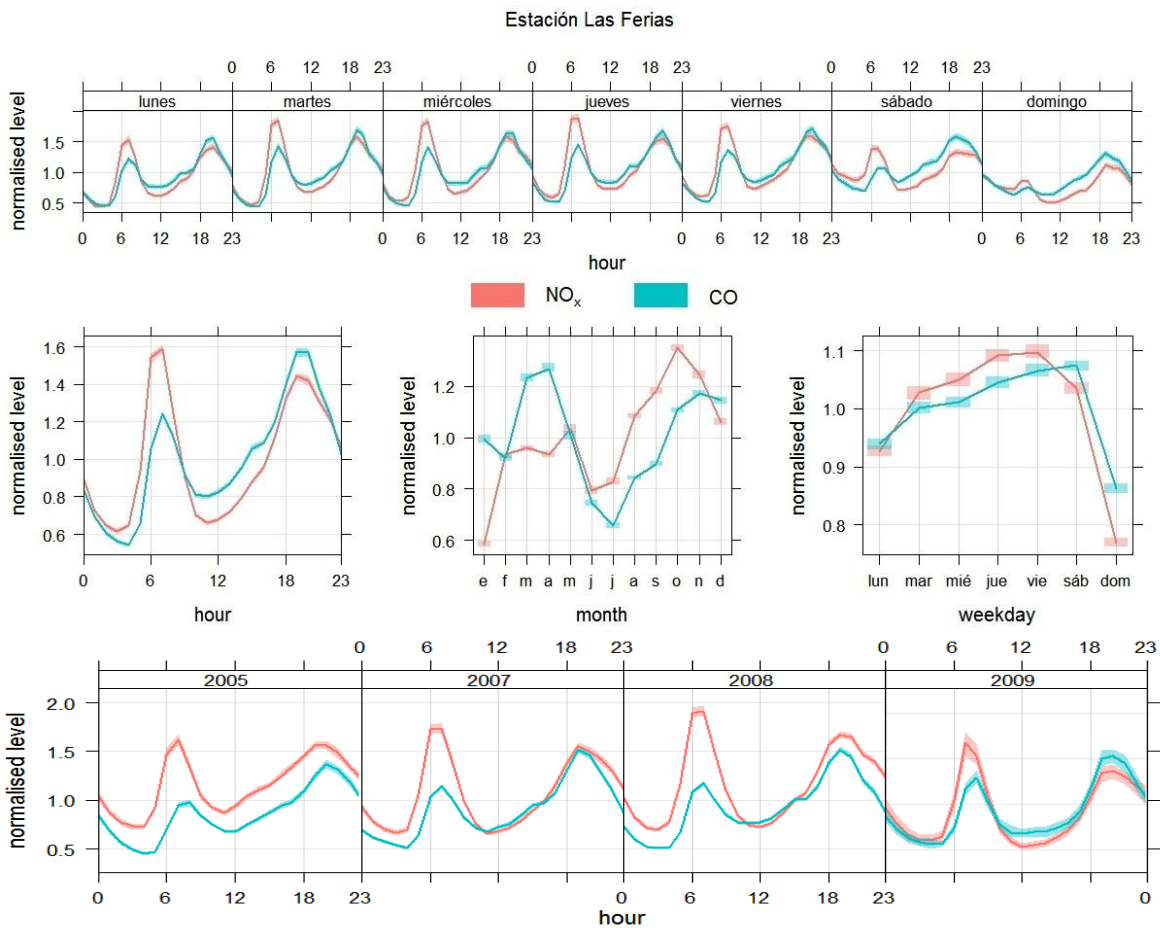


Figura 14. Variación de la concentración de CO y NO_x en función del tiempo para Las Ferias
 Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la SDA. Los datos están normalizados por la media para cada contaminante. Los contornos sombreados muestran el intervalo de confianza del 95% para los datos promediados

Las estaciones IDRD y Las Ferias mostraron un comportamiento propio de hora pico en horas de la mañana de los días hábiles de la semana, con concentraciones máximas para el día jueves y un descenso leve en las emisiones para el día sábado, probablemente por la menor actividad laboral y diferentes horarios de entrada al trabajo. Para el día domingo, el comportamiento de las emisiones es totalmente diferente, con concentraciones mucho más bajas que las mostradas entre semana, lo cual es propio de la reducción de la actividad vehicular en ese día.

Un análisis del comportamiento horario de los contaminantes para los días hábiles de la semana en el periodo 2005-2009, así como de un día típico, revelaron que la hora pico para la estación IDRD y Las Ferias va desde las 06:00 hasta las 08:00 horas. Los datos graficados en el Anexo 1 permiten ver que el comportamiento de hora pico se mantiene

para todos los días hábiles a través de los años en ambas estaciones, presentándose un incremento en los picos desde 2005 hasta 2009. Este último año mostró una mayor dispersión de los datos, evidente por el aumento de intervalo para una confianza del 95% (parte sombreada en las líneas de tendencia). Los datos para un año típico mostraron un posible comportamiento estacional para los dos contaminantes con fluctuaciones trimestrales. Los intervalos de tiempo estimados como hora pico para las dos estaciones están dentro del intervalo de tiempo donde las condiciones meteorológicas son apropiadas para el análisis de fuentes locales de contaminación, conforme a lo descrito en el numeral 2.4., y el planteamiento metodológico del capítulo III.

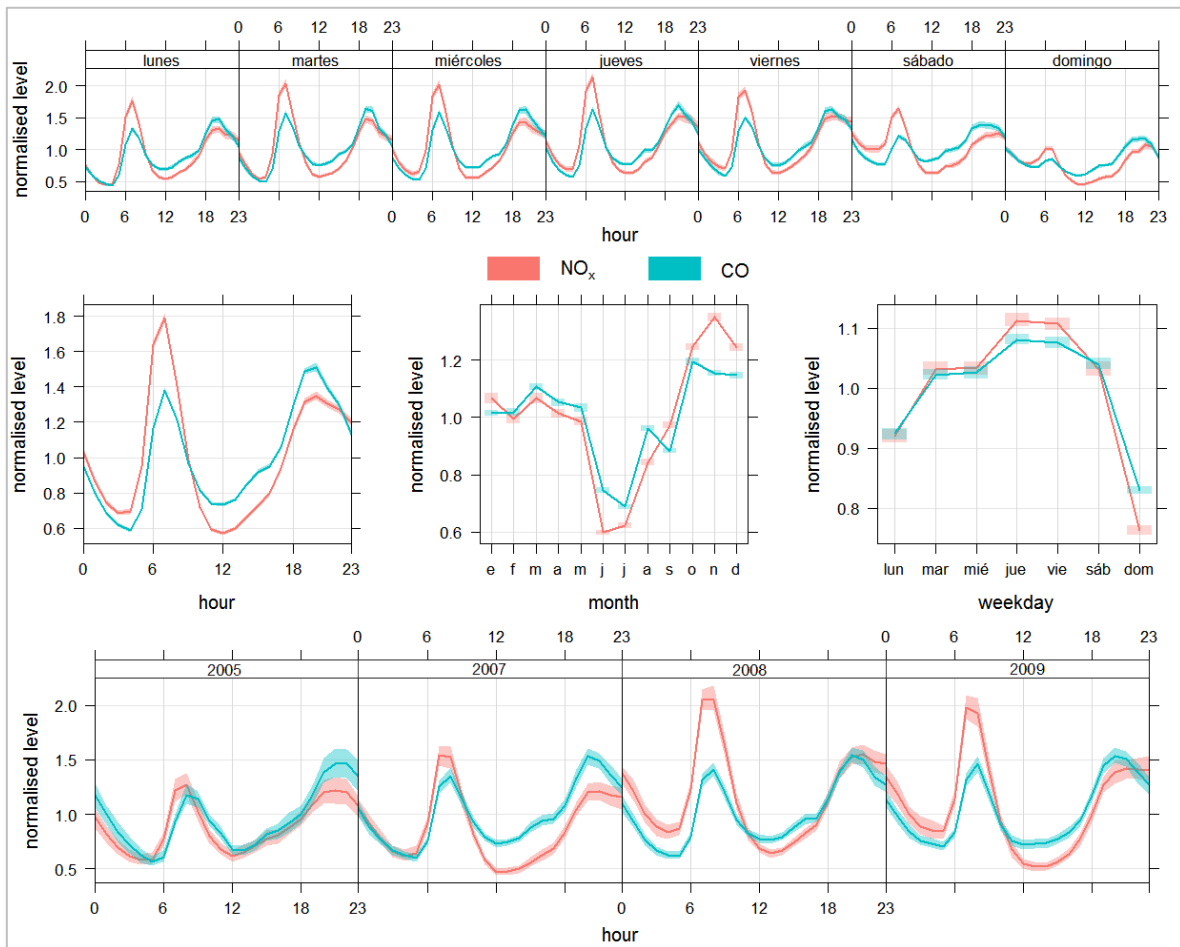


Figura 15. Variación de la concentración de CO y NO_x en función del tiempo para I+F
 Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la SDA. Los datos están normalizados por la media para cada contaminante. Los contornos sombreados muestran el intervalo de confianza del 95% para los datos promediados

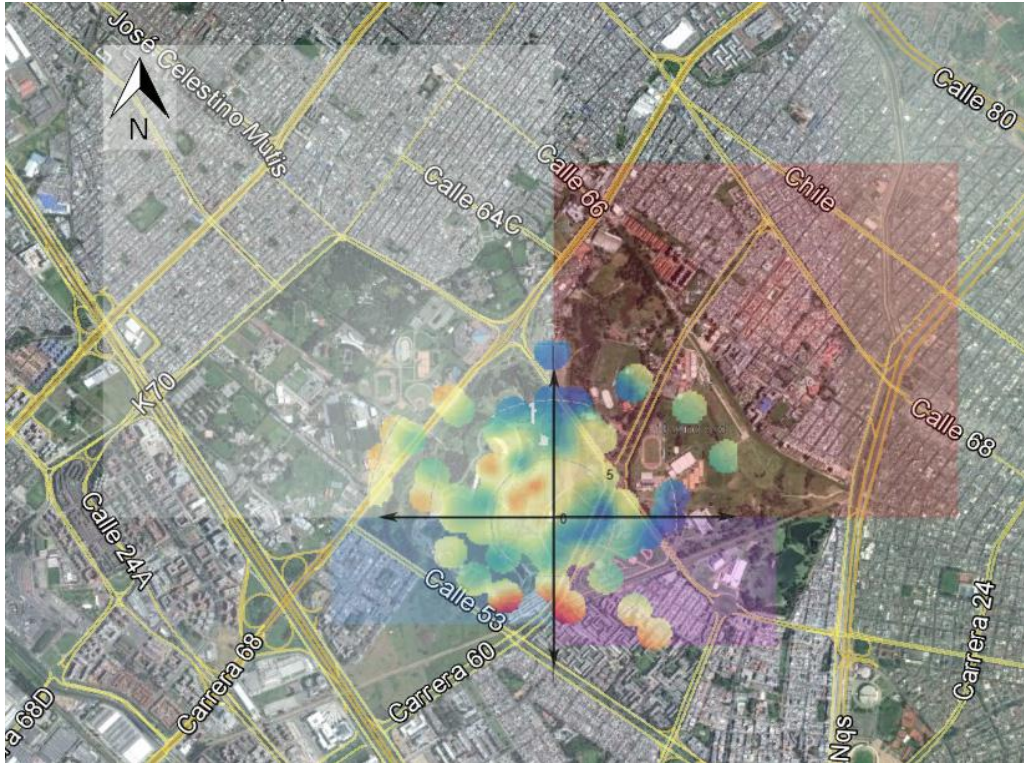
El mismo análisis se realizó para la base consolidada (I+F), arrojando resultados consistentes con lo compilado para las estaciones por separado. Las gráficas permiten establecer que la hora pico para los datos de I+F está entre las 06:00 y las 08:00 horas., con comportamientos de día, semana y año típico, similares a las estaciones por separado. La Figura 15 muestra los resultados descritos.

4.3.2. Influencia del viento

Los gráficos de rosas de vientos, gráficos de rosas de contribución de contaminantes y gráficos de contornos en coordenadas polares se muestran en el Anexo 2 para cada una de las estaciones. La superposición de los gráficos de contornos sobre mapas de ubicación para las estaciones IDRD y Ferias se muestran en la Figura 16 y Figura 17. La Tabla 5. resume el análisis vectorial de vientos realizado para las dos estaciones y de las cuales se deriva el cálculo del cubrimiento máximo que puede tener una estación por cuadrante (transporte de contaminantes detectable por la estación) en hora pico, cubrimiento se representa en las figuras mediante rectángulos coloreados.

Como se mencionó en la metodología, el gráfico de contornos permite inferir la influencia de fuentes locales (cercanas), cuando el viento sopla a bajas velocidades y lejanas cuando sopla a velocidades mayores. Adicionalmente se debe tener en cuenta que con este tipo de gráficos y la superposición en mapas es posible la detección de influencias de fuentes específicas, para este caso de fuentes móviles, sustentadas el hecho de que los vehículos a gasolina son responsables de la mayor parte de las emisiones de CO y los vehículos diesel son los principales emisores de NO_x (Zavala, Herndon, et al. 2009). Los vehículos a gasolina puede aportar alrededor del 85% del CO y entre el 20 - 35% del NO_x emitido por fuentes móviles, siendo los vehículos diesel y a gas natural los mayores aportantes de NO_x con el 65% - 80% (D'Angiola et al. 2010; Peñaloza 2010; Carslaw & Beevers 2005).

a) Gráfico de contornos para CO en la estación IDR



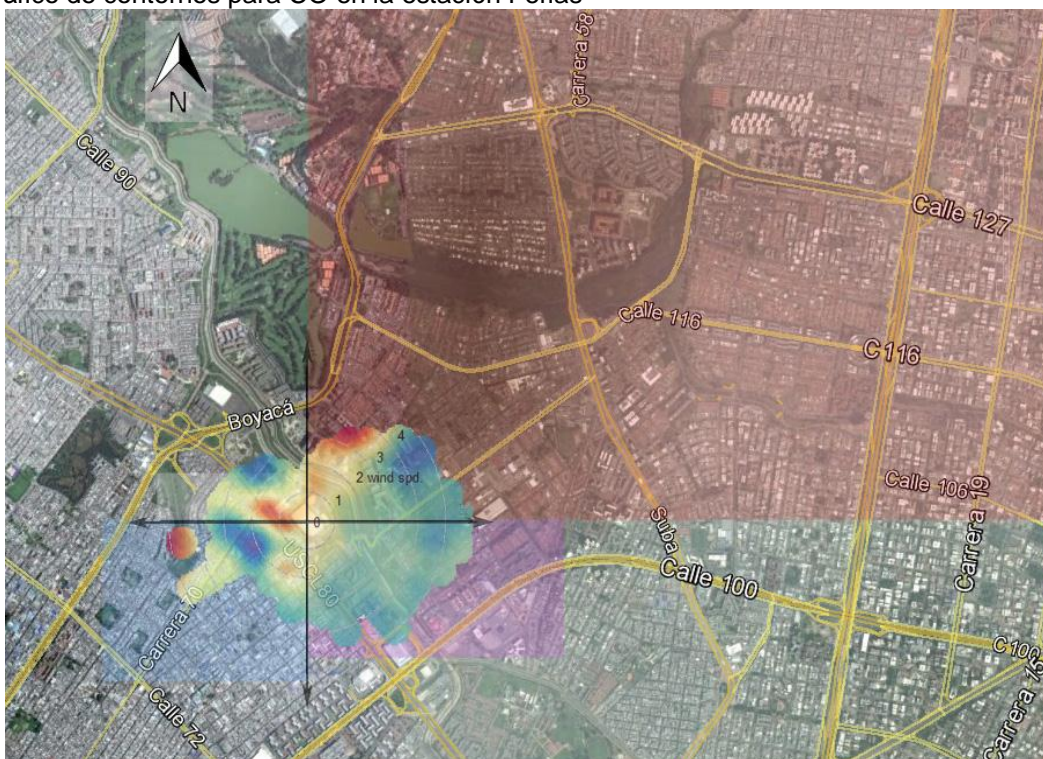
b) Gráfico de contornos para NO_x en la estación IDR



Figura 16. Influencia del viento sobre la concentración de CO y NO_x en la estación IDR

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la SDA. Los recuadros sombreados corresponden a la distancia máxima de transporte de contaminantes en el intervalo de 06:00 a 08:00 horas conforme al análisis vectorial de vientos.

a) Gráfico de contornos para CO en la estación Ferias



b) Gráfico de contornos para NO_x en la estación Ferias

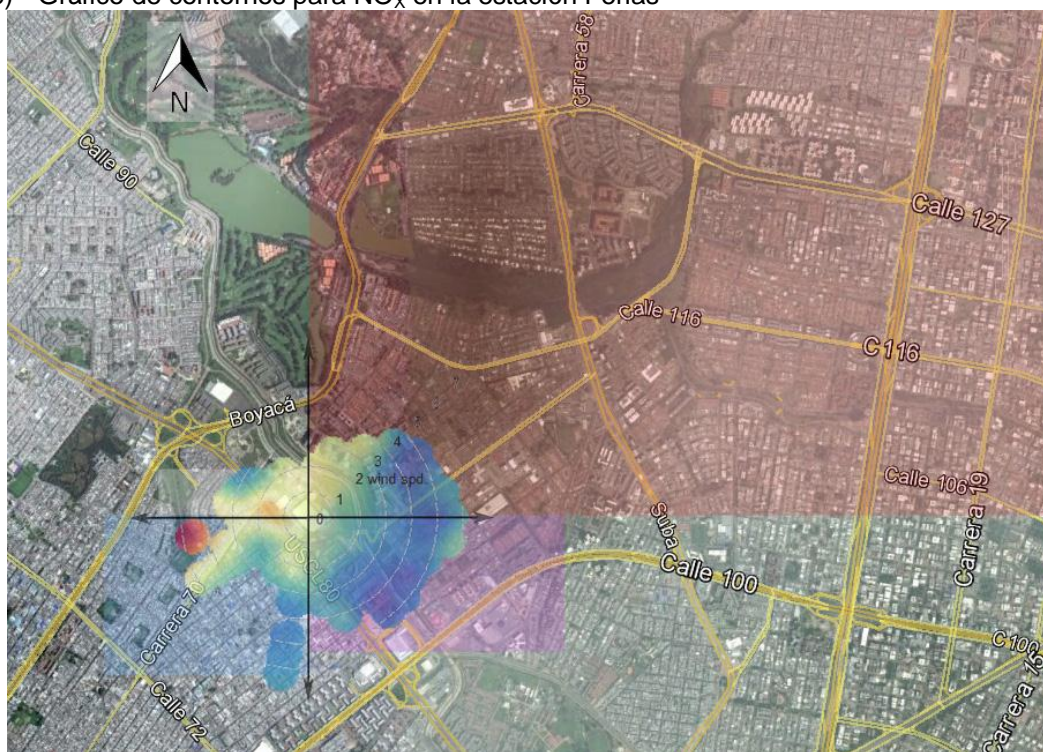


Figura 17. Influencia del viento sobre la concentración de CO y NO_x en la estación Ferias
 Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la SDA. Los recuadros sombreados corresponden a la distancia máxima de transporte de contaminantes en el intervalo de 06:00 horas a 08:00 horas conforme al análisis vectorial de vientos.

Tabla 5. Cubrimiento máximo de las estaciones por cuadrante conforme a la velocidad del viento

Estación IDR D								
Cuadrante	Vx (m/s)	Vy (m/s)	Vr (m/s)	α_r (°)	Frecuencia	Dx _{max} (km)	Dy _{max} (km)	
1	0° - 90°	0,74	0,80	1,09	42,89	0,27	1,83	1,97
2	90° - 180	0,89	-0,53	1,04	120,50	0,14	1,09	-0,64
3	180° - 270°	-0,62	-0,35	0,71	240,80	0,19	-1,03	-0,58
4	270° - 360°	-0,62	0,66	0,91	317,05	0,41	-2,26	2,43
Estación Las Ferias								
Cuadrante	Vx (m/s)	Vy (m/s)	Vr (m/s)	α_r (°)	Frecuencia	Dx _{max} (km)	Dy _{max} (km)	
1	0° - 90°	1,00	0,76	1,26	53,02	0,56	5,08	3,82
2	90° - 180	1,03	-0,62	1,20	121,21	0,12	1,14	-0,69
3	180° - 270°	-0,56	-0,43	0,71	232,40	0,21	-1,04	-0,80
4	270° - 360°	-0,83	0,20	0,85	283,55	0,11	-0,81	0,20

Fuente: Elaboración propia con datos de la SDA. Vx = Componente de velocidad eje x por cuadrante, Vy = Componente de velocidad eje y por cuadrante, Vr = Velocidad resultante, α_r = Angulo velocidad resultante, Frecuencia = fracción de tiempo durante la hora pico en el cual el viento sopla hacia un cuadrante determinado, Dx_{max} = Distancia máxima de cubrimiento en el eje x, Dy_{max} = Distancia máxima de cubrimiento en el eje y.

4.3.2.1. Estación IDR D

Los datos graficados para esta estación en hora pico muestran que los vientos predominantes vienen en dirección NE, N, NW y W, es decir, los cuadrantes 1 y 4, los cuales contribuyeron con más del 70% de la velocidad media para el periodo analizado. Las rosas de contaminantes indican que el CO y los NO_x se vieron primordialmente influenciados por vientos provenientes del cuadrante 4, con un aporte a la media cercano al 40%, resultado que concuerda con el mayor cubrimiento de este cuadrante que involucra vías principales de la ciudad como Calle 26, Carrera. 68 y Av. Boyacá y múltiples vías secundarias. El aporte de los vientos en los cuadrantes 1 y 3 para ambos contaminantes fue de 21% y 19% respectivamente. La Tabla 5. y la Figura 16, muestran que el mayor cubrimiento de la estación se presentó en el cuadrante 4, seguidos por los cuadrantes 1, 2 y 3, en concordancia con la frecuencia, dirección y velocidad preponderante de los vientos. Con respecto a los contaminantes de interés:

- El CO y los NO_x para el cuadrante 1, presentaron concentraciones moderadas y bajas a lo largo de todo el cuadrante A bajas velocidades del viento, el CO se vio más influenciado que los NO_x debido a la cercanía de la Calle. 63 y Carrera. 60. A velocidades intermedias y altas se pudo observar una influencia mayor sobre el CO

que sobre los NO_x debido a la Calle. 68 y Av. Chile. Este cuadrante tiene influencia de vías con tráfico de VP principalmente y en menor medida de T, B y C ligeros. Debe tenerse en cuenta que los faltantes de datos (espacios vacíos del gráfico) impidieron observar de manera adecuada el comportamiento del CO para todo el intervalo de velocidades.

- El cuadrante 2 mostró concentraciones bajas moderadas y altas de CO, conforme aumenta la velocidad del viento, clara influencia de vías como la Carrera 60 donde priman los VP y baja densidad vehicular e influencia de la Calle 53 y probablemente calle 26 y NQS bajo algunos patrones de viento para velocidades del viento concentraciones altas de CO. Los NO_x presentaron bajas concentraciones para todo el sector, claro indicio de que el cuadrante se ve influenciado por FL principalmente.
- El cuadrante 3 presento una influencia local más marcada sobre la concentración de CO que el cuadrante anterior, probablemente por la cercanía de la Calle 53, lo que pudo mitigar la dilución de contaminantes. Así mismo, se presentaron concentraciones de NO_x más elevadas a bajas velocidades con respecto al cuadrante anterior, resultados coincidente con los patrones de tráfico con un mayor aporte de B en esta Calle. A velocidades mayores, en los 180° y 270° , se observó una posible influencia de la Calle 26 y la Carrera 68 sobre el CO, respectivamente; para los 270° , se puede notar la influencia de la Carrera 68 sobre el NO_x , dado el tráfico mixto de esta vía. Por el cubrimiento de este cuadrante se puede concluir que representa adecuadamente el tráfico de FL y menor medida B y C ligeros.
- En el cuadrante 4, se pudo ver la influencia local de la Carrera 68 sobre ambos contaminantes, comportamiento propio de una vía con tráfico mixto. A velocidades intermedias se evidenció una disminución en la concentración de NO_x debido al cubrimiento sobre vías secundarias con tráfico de VP principalmente (la falta de datos no permite generar un adecuado perfil de concentraciones de CO a velocidades medias). Entre los 270 y 315° , a velocidades altas del viento, se observó un aumento en la concentración de CO y NO_x , posiblemente por la influencia de la Av. Boyacá que cuenta con tráfico mixto importante; para esta vía el aporte a CO no es claro (datos faltantes en el gráfico) pero un análisis para NO_x muestra bajas concentraciones de

éste, lo que indica influencias preponderantes de FL . Entre los 345 a 360° la influencia puede deberse a algunas fuentes fijas (ver Figura 12).

4.3.2.2. Estación Las Ferias

En hora pico, la estación Las Ferias tiene vientos predominantes en la dirección NE y W, es decir, cuadrante 1. Este cuadrante contribuye con más del 50% de la media de velocidad para el periodo analizado. Las rosas de contaminantes muestran que el CO y NO_x se ven primordialmente influenciados por vientos provenientes del cuadrante 1 con un aporte a la media del 45% para ambos contaminantes, consistente con la preponderancia de vientos y el mayor cubrimiento de ese cuadrante. Le siguen en importancia de cubrimiento los cuadrantes 3, 2 y 1.

- El cuadrante 1 mostró un área de influencia bastante importante, incluso más allá de la autopista norte por el oriente y la intersección de la Av. Suba y Boyacá hacia el norte. En esta zona se encuentran vías de importancia como la Calle 116, Calle 127, Av. Suba, Av. Boyacá y otras intermedias. Entre 0° y 45° se observaron concentraciones elevadas de CO y NO_x para todo el intervalo de velocidades del viento, lo cual es atribuido a la influencia de la Av. Boyacá, av. Suba, Calle 116 y 127; la primera con alto tráfico de FL, B y C ligeros y pesados; la segunda con tráfico de FL, B y C ligeros; la tercera y cuarta con tráfico predominante de FL y tráfico bajo de TM y C ligeros. Entre 45° y 90° se observó una disminución en la concentración de CO a velocidades del viento bajas e intermedias, esto por el aumento en la distancia a la Calle 116, Calle 127, Av. Suba y la pérdida de cobertura sobre la Av. Boyacá; para velocidades más altas donde es posible tener influencia de la Autopista Norte, se observó que la concentración se mantiene baja; también se observó una notable disminución en los NO_x debido a que el tráfico pesado de la Av. Boyacá no es captado en esa zona. En general, se puede establecer que este cuadrante es representativo del tráfico de la ciudad debido a la variedad de flota vehicular que circula por las vías que están dentro de su cobertura.

- El cuadrante 2 mostró una influencia local de la Calle 80 a bajas velocidades del viento, y una disminución moderada de las concentraciones de CO y NO_x a velocidades intermedias y altas, probablemente por el aumento en la distancia a vías principales como la Carrera 68.
- El cuadrante 3 reveló una clara influencia local de la Calle 80 sobre la concentración de CO y NO_x, resultado que concuerda con la tipología de vía, que presenta tráfico mixto con FL, C ligeros y TM como fuentes de importancia. Entre los 225° y 270° a velocidades del viento intermedias y más altas, es evidente un pico de concentración para CO y NO_x fruto de la influencia de la Av. Boyacá y su importante tráfico mixto donde C y B pesados son importantes. Este cuadrante puede considerarse representativo de tráfico mixto, con preponderancia de C ligeros y pesados, así como B y TM.
- En el cuadrante 4 se observó la notoria influencia local que ejercen la Calle 80 y la Av. Boyacá sobre los dos contaminantes con características de tráfico iguales a las descritas en el párrafo anterior. Debido al limitado cubrimiento del cuadrante, sólo es posible observar la influencia de estas dos vías principales, por lo cual se puede esperar que sea representativo de tráfico mixto donde los C ligeros y pesados, así como B y TM cobran importancia

4.4. EVALUACIÓN DE INVENTARIOS A TRAVÉS DE DATOS AMBIENTALES - TENDENCIAS DE CO

4.4.1. Comportamiento estacional del CO ambiental

Conforme al análisis realizado mediante GAM, se obtuvo el comportamiento tendencial y estacional del CO para los años de interés El Anexo 3 muestra los resultados para la estación IDR, Ferias e I+F. Se presentó un importante comportamiento estacional para el CO en ambas estaciones, con altas concentraciones entre el mes 2 y 4, un descenso de la concentración hasta un mínimo en junio y un aumento paulatino hasta fin de año.

Las irregularidades pueden atribuirse al ajuste de los modelos, los cuales se encuentran en el Anexo 4. El método Theil-Sen es apropiado para calcular las tendencias de la concentración de CO debido al comportamiento no lineal en el componente tendencial y un componente estacional relevante, según lo propuesto en la metodología.

4.4.2. Tendencias de CO a partir de datos ambientales y de IE

Los resultados de las regresiones con el método Theil-Sen para las estaciones de IDR, Ferias e I+F se muestran en la Figura 18. Las estrellas al frente de las tendencias representan la significancia de la regresión basada en el valor-p así: sin estrella $P > 0.05$, * $P \leq 0.05$, ** $P \leq 0.01$, *** $P \leq 0.001$, **** $P \leq 0.0001$; el valor P se compara con el nivel de significancia (α) escogido, en este caso 0.01. Para IDR y Las Ferias, así como para I+F, la regresión global fue significativa a un nivel igual o inferior al 0,01. Para IDR solo el cuadrante Q3 es tenido en cuenta para el análisis Para Las Ferias, los cuadrantes Q1, Q3 y Q4 se tuvieron en cuenta para el análisis.

Los resultados de la regresión a través de OLS para los datos de CO de los IE se muestran en el Anexo 5. Se realizaron regresiones para el CO estimado para TF, en la cual se excluyeron los IE realizados por Behrentz y Rodríguez por no contar con datos para FP; esta regresión arrojó un coeficiente de correlación R^2 bajo debido a la heterogeneidad de los datos. También se realizaron regresiones para FL (VP+T) y VP, para los cuales la correlación es mucho más adecuada. No es posible realizar regresiones para la FP debido a la falta de continuidad de datos a través de los IE, tampoco se incluyen M por las mismas razones. Con los DA se generaron graficas normalizadas de tendencias por estación; las tendencias de IE también se normalizaron con el fin de hacer más fácil la comparación de datos. La normalización de datos causa un comportamiento particular para VP y FL de los IE, en los cuales la línea de tendencia de VP cruza a FL debido a que el CO emitido por T presenta un comportamiento decreciente a través de los IE y disminuye la pendiente de FL. Esto es consistente con el uso del GNV en los T que disminuye las emisiones de este contaminante y aumenta la emisión de NO_x (Rodríguez & Behrentz 2009).

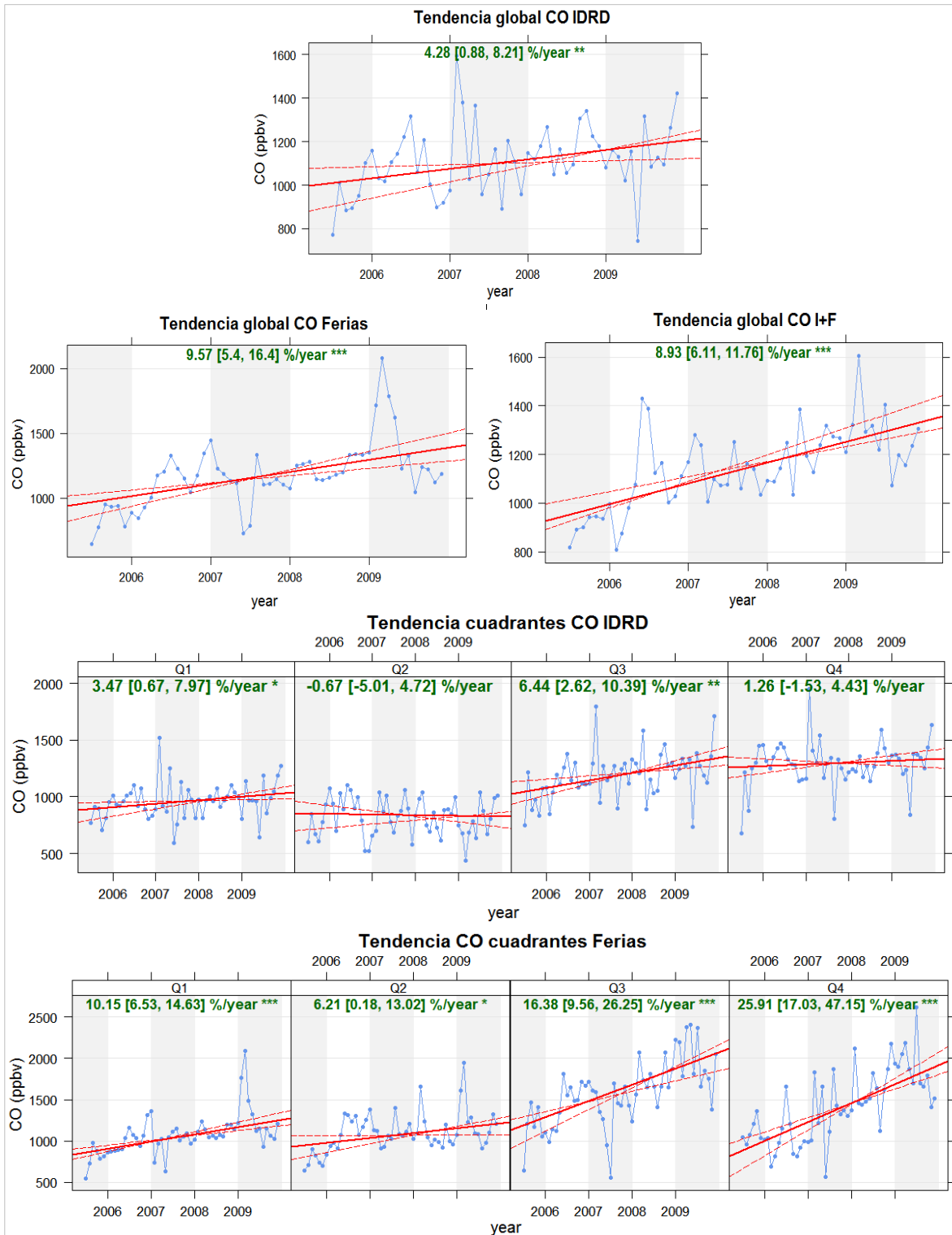


Figura 18. Tendencias de concentración ambiental de CO para IDRD, Las Ferias e I+F

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la SDA. Las líneas punteadas en rojo corresponden al nivel de confianza del 95% 95%. Para todas las gráficas el paquete estadístico interpola los datos faltantes para lograr una secuencia continua.

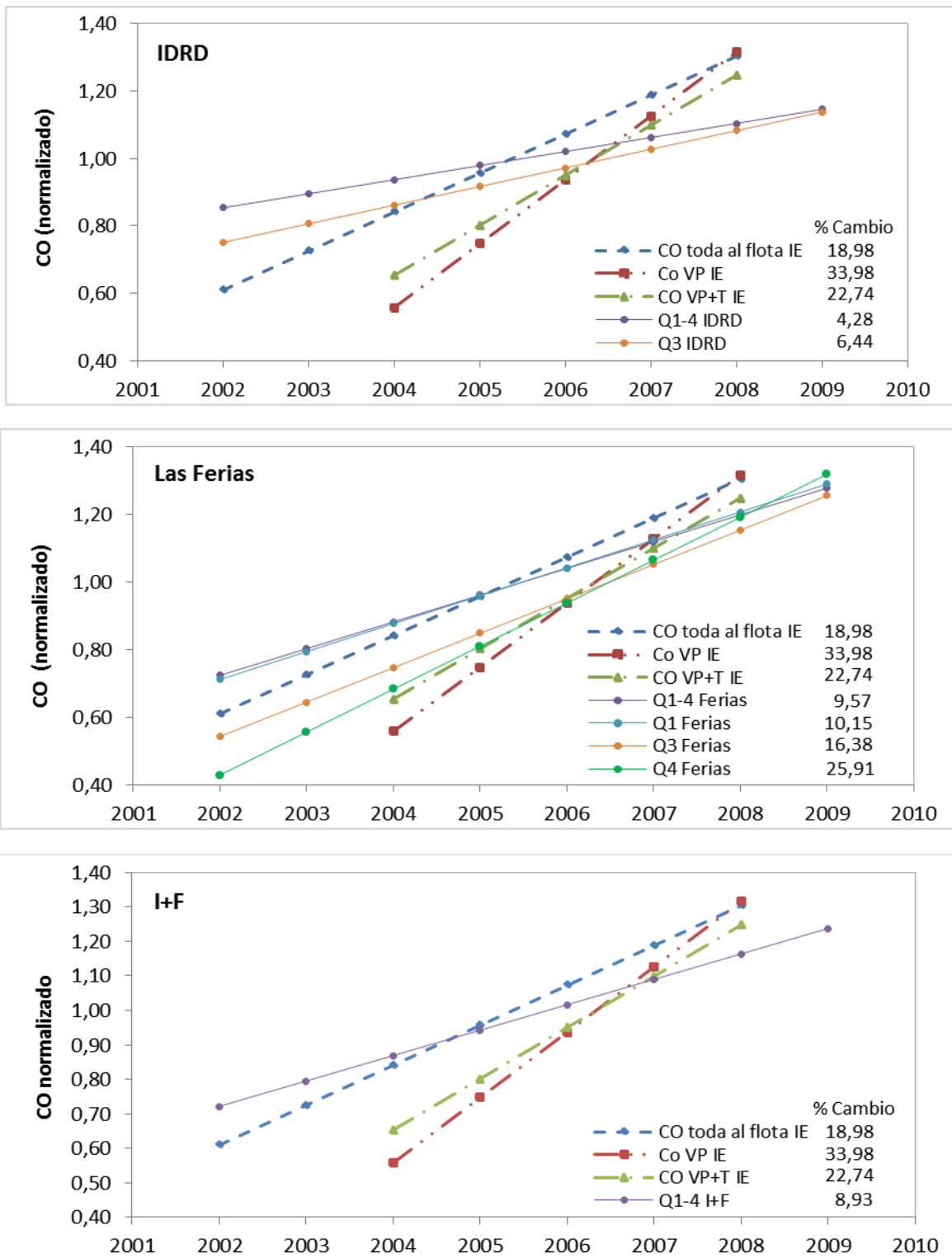


Figura 19. Tendencias normalizadas de CO para IDRDR, Las Ferias, I+F e IE

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la SDA e inventarios. Los datos están normalizados por la media de los datos arrojados por la regresión en cada caso. Las tendencias ambientales son extrapoladas para el periodo 2002-2005

4.4.3. Evaluación de tendencias de CO

La comparación de tendencias ambientales y de IE se realizó con los resultados obtenidos de manera global para cada estación y por cuadrantes. El análisis general de las tendencias ambientales, así como las tendencias de IE, indicaron un claro aumento del CO; estas tendencias son consistentes con lo reportado para China, India, Sudeste asiático y otros países en desarrollo, donde se han registrado aumentos paulatinos de las emisiones de CO como producto del aumento de la flota vehicular, en especial vehículos de pasajeros y motocicletas (H. Wang et al. 2010; Hao et al. 2001; Faiz & Sturm 2000; Felix et al. 2010), así como con el fuerte aumento de la flota vehicular registrada en los últimos años para Bogotá y la disminución paulatina de la movilidad (CCB - Observatorio de Movilidad 2009). Esto corresponde exclusivamente a horas pico y puede diferir con respecto al comportamiento en otras horas del día.

Los numerales 4.2.2 y 4.3.2., mostraron que todos los datos registrados por la estación IDRDR (Q1-4), pueden representar las emisiones de vías con características de movilidad promedio y flota vehicular compuesta principalmente por FL, esto también es válido para los cuadrantes Q1, Q2 y Q3; el Q4 puede tener una mayor influencia de B y C.

Los numerales mencionados en el párrafo anterior mostraron que la estación Las Ferias cubre vías con movilidad reducida, evidenciado en concentraciones más elevadas de CO frente a IDRDR, pues el CO depende mucho de la velocidad de circulación (DAMA 2002; Zavala, Herndon, et al. 2009). En esta estación tienen gran importancia categorías como VP, T, B y C ligeros y pesados, así como TM. Por tanto, los registros globales (Q1-4), pueden considerarse representativos del tráfico urbano mixto. Por cuadrantes, Q1 tiene un vasto cubrimiento con vías de condiciones de tráfico variadas lo que también lo hace representativo del tráfico mixto urbano; los cuadrantes Q2, Q3 y Q4 representan tráfico locales con alto componente de tráfico vehicular ligero y pesado de B, C, así como TM.

Con base en los numerales 4.2.2 y 4.3.2., es posible afirmar que I+F (Q1-4), es representativa del tráfico de la ciudad, al combinar las características descritas para las estaciones de IDRDR y Las Ferias, aunque se observó que esta última estación influye

fuertemente en los datos consolidados, debido a las concentraciones de CO más elevadas

Lo anterior permitió establecer que la tendencia de CO para Q1-4 en la estación Las Ferias en y la obtenida en el Q1 de esta misma estación pueden emplearse para evaluar la tendencia de CO para TF en los IE; la tendencia calculada para I+F también es adecuada para esta evaluación y sustenta lo dicho para Las Ferias en cuanto a representatividad del tráfico urbano, al tener tendencias similares. La comparación mostró que el comportamiento tendencial del CO para TF de la ciudad, no está adecuadamente representado por la tendencia calculada a partir de los IE, pues los patrones de crecimiento de este contaminante en el ambiente y en los IE no son coincidentes (9,57%, 10,15% y 8,93% por año para Las Ferias Q1-4, Q1 e I+F, respectivamente, vs. 18,97% anual de IE), mostrando una diferencia de crecimiento anual de 9,42% (sobreestimación de la tendencia en un 98% anual). Cabe aclarar que las discrepancias tolerables entre DA y de IE no deben ser mayores al 50% incluso se sugieren diferencias menores al 25% para considerar que los resultados sean comparables (Reid et al. 2011; Reid et al. 2008; Funk et al. 2001).

Del mismo modo, la tendencia global de la estación IDRD, así como la obtenida del Q3 (4,28% anual y 6,44% anual respectivamente), se emplearon para evaluar las tendencias de CO para FL de los IE (22,74%), presentando una diferencia de 17% anual en el crecimiento frente a lo ajustado con datos de IE (400% de sobreestimación frente a tendencias ambientales). Los resultados mostrados en la Figura 19 indican una clara sobrestimación en las tendencias de emisiones de la FL por parte de los IE frente a los DA. Teniendo en cuenta la representatividad de los DA de IDRD con la FL, las regresiones de DA sugieren que el crecimiento en las emisiones de FL es de $5,4\% \pm 5,6$ (promedio de Q1-4 y Q3),

Las tendencias de CO para la estación IDRD también permitieron inferir que para VP existe una notoria sobrestimación en las tendencias de crecimiento de CO. Lo anterior se sustenta en el hecho de que en países desarrollados el CO ha tenido un descenso paulatino a través de los años, producto del mejoramiento tecnológico en motores a gasolina y la introducción de mejores catalizadores (Parrish 2006), esto también ha

ocurrido en Bogotá, que en los últimos años ha sufrido un aumento de la flota de VP cercano al 13,4% anual⁴, con la consecuente renovación del parque automotor⁵, sumado a la creciente conversión de T a GNV y el uso de etanol como oxigenante para todos los vehículos a gasolina. Podría esperarse que el aumento en las emisiones no sea proporcional a la tasa de crecimiento del parque automotor, sino muy inferior. Lamentablemente los datos ambientales no permiten una comparación directa para esta categoría vehicular, pero, teniendo en cuenta el grado de correlación de los datos de IE para VP y su importante contribución a las emisiones de CO, se puede inferir que esta categoría vehicular es la causa principal de sobreestimación en las tendencias de este contaminante en los IE.

Las tendencias del Q3 y Q4 de la estación Las Ferias pueden emplearse para evaluar las tendencias de tráfico mixto y bajas velocidades con alto componente de B y C ligeros y pesados y TM, característica usual en muchas vías de la ciudad como la Av., Ciudad de Cali, Calle 13, Autopista Sur, entre otras. Desafortunadamente, la falta de una distribución espacial y temporal para un número significativo de IE (solo el de Peñaloza cuenta con esta información en modo gráfico), impiden la realización de una evaluación para estas condiciones. Sin embargo, es posible realizar una aproximación para la FP, si se tiene en cuenta que $T_{TF} = T_{FL}P_{FL} + T_M P_M + T_{FP}P_{FP}$ donde T representa las tendencias y P el aporte de la flota específica. A partir de esta ecuación, se estimó una tendencia de crecimiento del 13,92%/año en el CO aportado por la flota pesada (B, C y TM), bajo los siguientes supuestos: i) El incremento en la emisión global de CO corresponde al promedio de lo calculado por las estaciones de monitoreo de Las Ferias en Q1-4, el Q1 de esta estación y el consolidado I+F, es decir, 9,55% ± 4,13 anual; ii) El crecimiento de las emisiones de CO provenientes de FL corresponde con el 5,4% anual estimado anteriormente a partir de datos ambientales; iii) La FL aporta el 85% del CO de fuentes móviles (ver numeral 4.3.2.); iv) Las motos contribuyen con el 9% de las emisiones de CO de acuerdo con el inventario de Peñaloza y han tenido un crecimiento de 28,7% anual entre 2005 y 2008, conforme a lo reportado por Giraldo y Peñaloza. Este valor puede ser superior si se tiene en cuenta que para el cálculo de emisiones, los IE posteriores a 2005 consideran que las

⁴ Años 2002 a 2009

⁵ De acuerdo con las estadísticas para 2008, más del 50% de la flota vehicular liviana tiene un modelo posterior a 1997, fecha a partir de la cual es obligatorio el uso de convertidor catalítico en los vehículos a gasolina (CCB - Observatorio de Movilidad 2009).

motos con año modelo posterior a 1998 cuentan con motores de 4 tiempos, supuesto que no se ajusta a la realidad, pues las prohibiciones para motores de 2 tiempos comenzaron a partir del año 2009 para Bogotá (Decreto 035 de 2009 – Alcaldía Mayor de Bogotá).

La tendencia de 13,92%/año coincide con lo estimado para el cuadrante Q3 de la estación de Las Ferias dentro del $\pm 25\%$ y es contrario a las tendencias reportadas por los IE, que muestran un descenso en el aporte de CO por parte de la FP entre los años 2005 y 2008, posiblemente por cambios y ajustes en los modelos de cálculo. El resultado no coincide con lo reportado en el Q4, quizá debido a que este cuadrante registra emisiones muy localizadas representativas solo de la flota que circula en la Calle 80 y/o la dispersión heterogénea de contaminantes que no permiten una adecuada representatividad de los datos. Es necesario tener cuidado al emplear este valor, puesto que está sujeto a múltiples incertidumbres relacionadas con los datos ambientales, de IE y regresiones que no se pueden cuantificar con los datos existentes.

4.5. EVALUACIÓN DE INVENTARIOS A TRAVÉS DE DATOS AMBIENTALES – RELACIÓN CO/NO_x

Los resultados de las regresiones WLS para la obtención de la pendiente CO/NO_x a partir de datos ambientales se muestran en el Anexo 6. Los datos de las regresiones se emplearon para determinar las tendencias de CO/NO_x a través del tiempo; los ajustes de estas regresiones se muestran en la Tabla 6. Las gráficas de tendencias a través del tiempo para la relación CO/NO_x de IDR D e I+F se muestran en la Figura 20. Para Las Ferias se muestra en el Anexo 6.

Tabla 6. Relaciones CO/NO_x para horas pico de la mañana obtenidas de datos ambientales

Estación	Periodo	Relación CO/NO _x ^a	Tendencia (%/año)	R ²	Significancia ^b
IDRD					
Q1-4	2005-2009	11,02 ± 0,17	-11,18 ± 4,5	0,93	*
Q3	2005-2009	9,88 ± 0,47	-10,92 ± 4,31	0,93	*
Las Ferias					
Q1-4	2005-2009	16,45 ± 0,22	-2,77 ± 4,46	0,48	ns
Q1	2005-2009	16,01 ± 0,27	-0,66 ± 13,50	0,01	ns
Q3	2005-2009	15,21 ± 1,24	2,86 ± 10,81	0,12	ns
Q4	2005-2009	17,07 ± 0,62	-4,69 ± 3,76	0,76	ns
I+F					
Q1-4	2005-2009	12,50 ± 0,19	-8,61 ± 0,09	0,99	***
Inventarios de emisiones					
Toda la flota	2002-2008	13,80	-7,2 ± 1,83	0,97	**
VP	2004-2008	32,00	7,84 ± 11,20	0,39	ns
VP+T	2004-2008	20,80	-4,29 ± 5,82	0,42	ns

a. Datos de regresiones ambientales para el año 2008 únicamente de acuerdo con lo reportado en el Anexo 6; para IE corresponden a la relación CO/NO_x para el año 2008 empleando los datos de la Tabla 1. b. sin estrella P > 0.05, * P ≤ 0.05, ** P ≤ 0.01, *** P ≤ 0.001, **** P ≤ 0.0001 (P = Valor P)

La Tabla 6. permite ver que la relación CO/NO_x para la estación Las Ferias y sus cuadrantes, no presentó una tendencia significativa, dado su pobre ajuste al modelo lineal planteado, esto puede atribuirse a problemas de medición de NO_x que se ven representados en una mayor dispersión de los datos graficados en la Figura A 6.1. del Anexo 6 (la tendencia para CO es significativa), posibilidad que debe investigarse más a fondo. También puede deberse a influencia de fuentes locales y/o fenómenos que impiden el adecuado mezclado y dispersión de contaminantes, esto puede ser discutible debido a que el Q4, cuadrante con influencia local más marcada, cuenta, con datos más ajustados al modelo lineal a pesar de arrojar una tendencia no significativa. Debido a la falta de significancia en las regresiones, los DA de CO/NO_x para Las Ferias no son tenidos en cuenta para el análisis.

Para la estación IDRD la tendencia CO/NO_x es significativa a un nivel de confianza del 95% y con una excelente correlación lineal (R²>0,9). Adicionalmente, el error asociado y por tanto la dispersión de los datos, para la determinación de las pendientes es inferior al encontrado en Las Ferias. Para I+F la tendencia es significativa a un nivel de confianza superior al 99,9% y el valor de R² ~1, lo cual comprueba lo planteado en la metodología con respecto al uso de datos multiestación para mejorar la confiabilidad de los análisis.

Es de destacar que tanto las tendencias para IDRDR como para I+F son decrecientes. Si se tiene en cuenta que las tendencias de DA para CO son crecientes, se evidencia que ha existido un fuerte aumento en las emisiones de NO_x , lo cual es consistente con el paulatino aumento de los VP que funcionan con diesel, el aumento en la flota de carga liviana diesel, el aumento de los vehículos convertidos a GNV (Dirección de estudios sectoriales y de servicios 2012; Rodríguez & Behrentz 2009) y el uso extendido de etanol como carburante, que disminuye las emisiones de CO a costa de un incremento en las emisiones de NO_x (Al-Hasan 2003). Los DA de CO/NO_x y su tendencia decreciente para IDRDR e I+F, concuerdan también con lo reportado para Santiago de Chile, Sao Paulo Ciudad de México y Estados Unidos (Gallardo et al. 2012; Parrish et al. 2009; Stephen Reid et al. 2008) siendo indicio de que las mediciones ambientales representan adecuadamente las emisiones de fuentes específicas, en este caso las fuentes móviles.

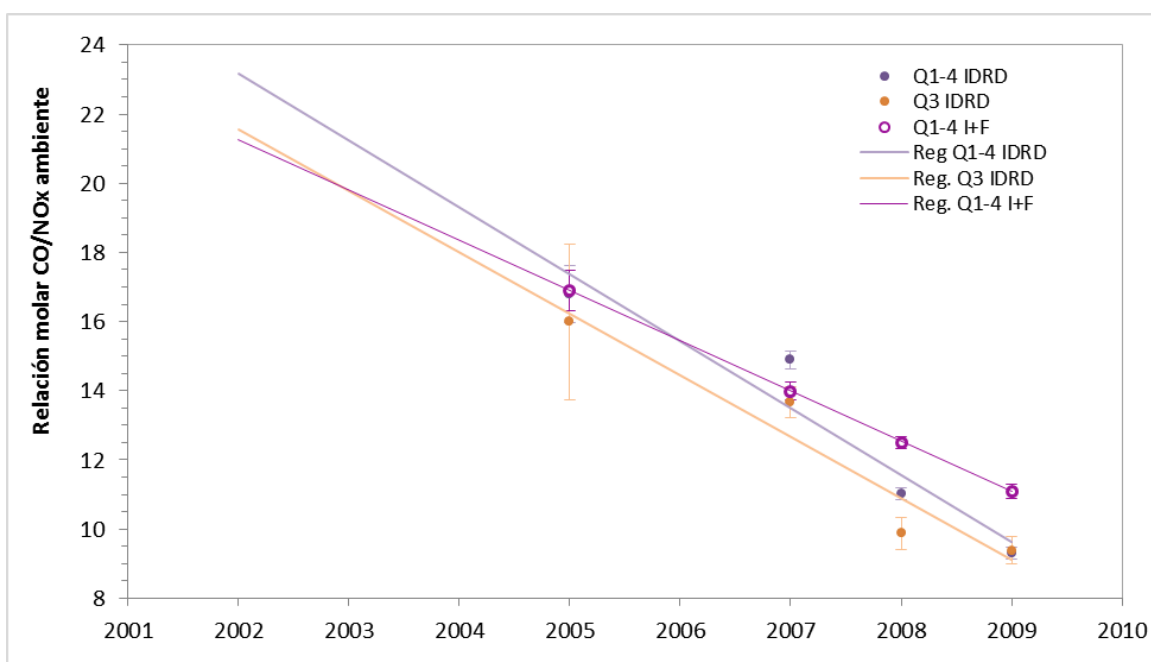


Figura 20. Valores y tendencias de la relación molar CO/NO_x para IDRDR e I+F

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la SDA. Los puntos representan las pendientes derivadas de la regresión WLS (relación CO/NO_x anual). Las barras de error corresponden a los intervalos de confianza del 95 calculados para cada pendiente a través de la regresión WLS. Las líneas continuas representan la regresión OLS realizada sobre las pendientes.

Conforme a lo discutido anteriormente el consolidado de registros I+F puede representar de manera adecuada el comportamiento del tráfico mixto de la ciudad e IDRDR puede representar de mejor manera la FL con bajo componente de B y C. La Figura 20 muestra

los valores obtenidos para la relación CO/NO_x , producto de las regresiones sobre los DA de IDRDR e I+F, así como las barras de error asociadas a la regresión para cada año. La Figura 21 muestra el comportamiento tendencial de la relación molar CO/NO_x para IDRDR, I+F y los IE, así como los valores año a año para los datos ambientales y de IE. Una comparación de resultados muestra que la tendencia de relación CO/NO_x para I+F y TF son descendentes (-8,61% y -7,2% respectivamente), y coinciden dentro del 25% de diferencia. La relación CO/NO_x derivada de DA de la estación IDRDR (Q1-4 y Q3), descienden más rápidamente frente a la relación para FL en los IE (-10,92% y -11,18% anual Vs. -4,29% anual), lo cual es claro resultado de la sobre-estimación en la tendencia de CO para esta flota por parte de los IE.

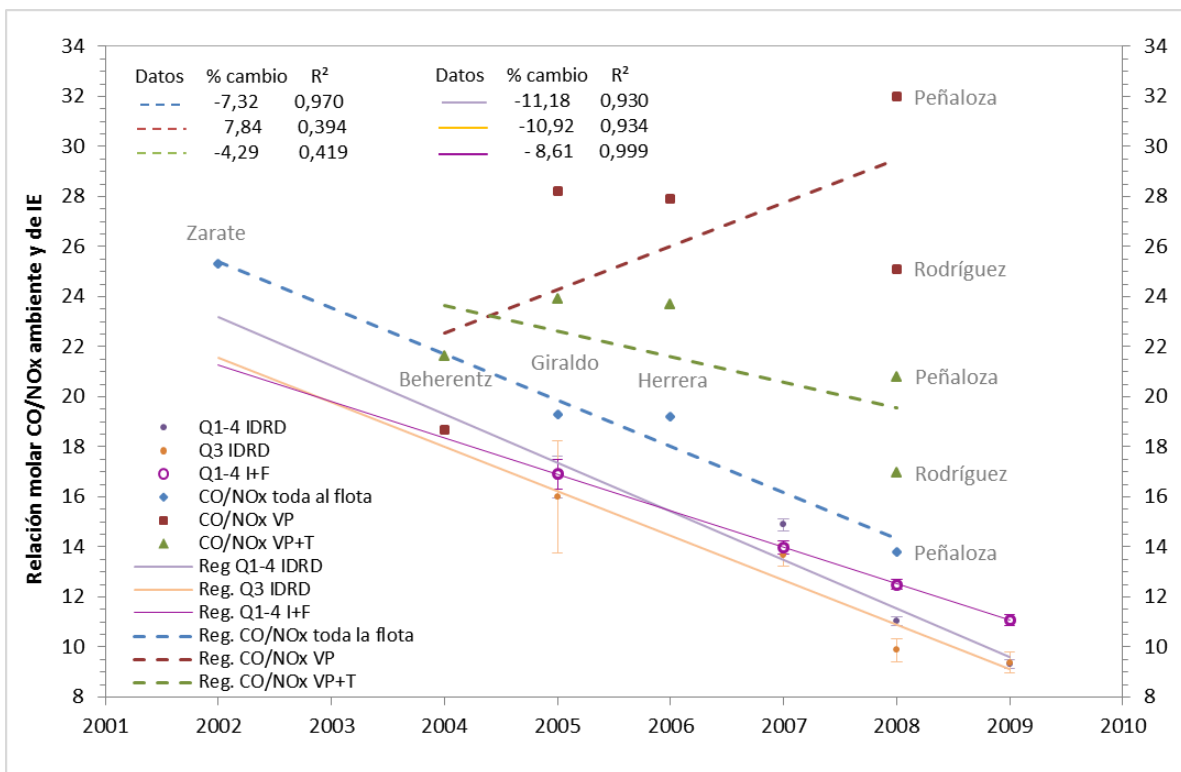


Figura 21. Tendencias de la relación molar CO/NO_x para IDRDR, I+F e IE

Fuente: Elaboración propia. Se muestran las regresiones OLS para datos ambientales y de IE, así como los datos individuales para cada caso.

Si se toman en cuenta los resultados de DA, en el numeral 4.4., donde se estima un aumento del CO para TF de $9,55\% \pm 4,13$ por año (promedio de Q1-4, Q1 de Las Ferias e I+F) y el descenso de la relación CO/NO_x para TF de -8,61% por año mostrado en el

párrafo anterior, se obtiene que la emisión de NO_x global deberían crecer a una tasa de 19,87% anual; este valor puede ser empleado para evaluar IE realizados con una misma metodología a través del periodo de estudio.

Al realizar la comparación de los valores de CO/NO_x de cada IE frente a los datos de CO/NO_x ambientales del año correspondiente, se obtiene que, para TF, existe una sobre-estimación inferior al 25% al compararla con el resultado de I+F, con lo cual puede afirmarse que existe una concordancia entre datos ambientales y de IE. Para FL se presenta una sobre-estimación entre el 35% y 122% con relación a los DA, por lo cual, a excepción del IE desarrollado por Behrentz, no existe concordancia entre los datos (ver Tabla 7.). No es posible realizar una comparación directa para VP, cuyos datos se grafican a manera de referencia.

Tabla 7. Relaciones CO/NO_x IE/DA para valores individuales

Inventario	Año base	Toda la flota	VP+T
Zarate	2002	1,19	
Behrentz	2004		1,35
Giraldo	2005	1,14	1,49
Herrera	2006	1,24	1,73
Rodríguez	2008		1,81
Peñaloza	2008	1,10	2,22

Fuente: Elaboración propia. La relación se calcula con base en los datos de cada IE y los datos derivados de la regresión WLS para cada año en IDRD e I+F. Toda la flota se compara con los datos ambientales de I+F, VP+T se comparan con el Q3 de IDRD al ser el cuadrante con más discrepancia..

Valores de CO/NO_x y de tendencias para IE por encima de los DA pueden indicar: estimaciones más elevadas para CO y/o estimaciones más bajas de NO_x o que el CO crece a una tasa mayor a la real y/o los NO_x disminuyen o crecen más lentamente de lo que debieran. Los resultados del numeral 4.4 para TF y FL, muestran que las tendencias de CO para IE aumentan a una tasa mayor que para los datos ambientales, lo que confirma que las discrepancias en las relaciones CO/NO_x se deben más a una sobre-estimación de las emisiones de CO que a una subestimación en las emisiones de NO_x.

Con lo anterior, las coincidencias en las tendencias y relaciones de CO/NO_x entre DA e IE para TF, a pesar de la sobreestimación en las emisiones de CO para FL, sugieren una posible inexactitud en la estimación de CO para T y/o M y/o FP. Para T y M no existen

datos que permitan corroborar esta afirmación. Sin embargo, para FP en el numeral 4.4., se estimó a través de DA de manera gruesa, un aumento del 13,92% anual. Esto es contrario a la tendencia presentada en los IE, donde las emisiones reportadas decrecen drásticamente. Esta inexactitud en las estimaciones de CO puede dar lugar a compensaciones entre categorías vehiculares para obtener un resultado ajustado de TF a los DA, pero se requiere un análisis más detallado de los IE para corroborar esto. Discrepancias en la estimación de NO_x que no son posibles de establecer a través del análisis realizado, también pueden influir en el ajuste entre DA y FT, requiriéndose de un mayor estudio sobre la estimación de este contaminante.

Si se observa la ecuación (1) para una categoría vehicular específica o conjunto de categorías, las discrepancias halladas para FL en cuanto a la relación CO/NO_x pueden indicar fallas generalizadas en el uso o estimación de FE y/o FA. Las estimaciones de flota vehicular no tiene efecto pues son las mismas para cualquier contaminante en una categoría vehicular dada. Debido a que los FA empleados en los IE elaborados a partir de 2005 son calculados a partir de la metodología abordada por Behrentz, es poco probable que estos tengan un marcado efecto sobre la relación CO/NO_x, siendo más razonable suponer que los FE son responsables de las sobre-estimaciones de CO. Las mayores diferencias en emisiones de CO se presentan para los IE de Giraldo y Herrera, obtenidos con el modelo IVE, lo que indica que los FE de este modelo sobre-estiman de manera importante las emisiones de este contaminante. Estos resultados concuerdan con lo reportado por Herrera como argumento para emplear un modelo EVB para Bogotá en reemplazo del modelo IVE y lo reportado por Gallardo en 2012. Las tendencias de contaminantes si pueden ser afectadas por una inadecuada estimación de la flota vehicular adicional a los FE y FA.

Comparando cada uno de los IE, el mejor ajuste de la relación CO/NO_x para TF corresponde al realizado por Peñaloza. Los resultados temporalmente distribuidos de este IE (Tabla 2.), también coinciden con los DA, mostrando que la relación anual puede ser comparada con datos de horas pico de la mañana. Sin embargo, es importante tener en cuenta que este IE tiene importantes discrepancias con los DA en cuanto a la relación CO/NO_x para FL y estas discrepancias son mucho mayores a las presentadas por el IE de Rodríguez; aun cuando ambos IE emplean los mismos FE, FA y flota vehicular para esta

categoría. Una razón para esta diferencia puede ser que se emplean modelos diferentes (directo y EMISENS). El IE determinado por Behrentz se ajusta más a los datos ambientales para FL, con discrepancias menores al 50% ($\text{CO/NO}_x \text{ IE/ambiente} = 1,35$). El IE de Zarate arroja valores CO/NO_x ajustados con los datos ambientales, pero no existen datos para FL o FP que permitan inferir una correcta estimación por categorías.

La metodología empleada para la evaluación y los datos disponibles no permiten establecer qué modelo de estimación de IE es el adecuado para Bogotá, sin embargo, las continuas mejoras realizadas través de los inventarios, llevan a suponer que IEs como los realizados por Peñaloza o Rodríguez pueden ser más adecuados que los desarrollados en años previos. Resultados como los de Behrentz para FL indicarían que es un buen punto de partida para efectuar correcciones, de ser necesario, a IEs como el de Peñaloza o Rodríguez. Lo anterior es solo una suposición que necesita ser corroborada mediante la realización de IEs para años previos y posteriores al 2008 con una misma metodología con el fin de poder comparar los datos a través del tiempo con los DA.

CONCLUSIONES

La revisión de los datos de IE realizados con año base entre 2002 y 2008 revela que se presentan discrepancias importantes a nivel de datos de entrada como estimación de flota vehicular; IE de años contiguos presentan disminuciones o aumentos abruptos en la flota vehicular evaluada (Zarate vs. Behrentz, Behrentz vs. Giraldo), ocasionando diferencias importantes en las tendencias de emisión de contaminantes. Las discrepancias también son importantes en inventarios que emplean los mismos FE, factores de actividad y número de vehículos para la flota liviana como el de Rodríguez y Peñaloza con diferencias en las estimaciones de CO y NO_x de 38% y 12% respectivamente.

No todos los IE contemplan las mismas categorías vehiculares para la estimación de la emisión de CO y NO_x. A través de los años se ha hecho más énfasis en estimar estas emisiones para la flota liviana, debido a su importancia relativa frente al total de la flota de la ciudad y en la estimación de la emisión de PM por parte de la flota pesada. Esta circunstancia impide tener una mayor cantidad de datos a través del tiempo para un análisis más adecuado de las tendencias de CO y CO/NO_x para toda la flota.

A pesar de existir una cantidad importante de estaciones con registros de CO y NO_x (11 en el periodo 2002-2009), se evidencia falta de continuidad en la medición de estos contaminantes a través de los años; estaciones como Suba, Chicó y Tunal, adecuadas para el análisis, no se tomaron en cuenta por esta razón. Las estaciones de IDRD y Las Ferias fueron seleccionadas por contar con una adecuada continuidad interanual de los datos, una ubicación adecuada, lejos de fuentes fijas de emisiones y representativa del tráfico urbano al estar en la confluencia de múltiples vías principales de la ciudad. Sin embargo, presentan faltantes importantes de datos que dificultan el uso de la base de datos completa, pero que no impiden la realización de los análisis. De manera global IDRD presenta una pérdida de datos del 39,7% (el mayor entre CO y NO_x); Las Ferias presenta pérdida globales de 35% de los datos; el consolidado de la estación IDRD y la estación Las Ferias (I+F) permite mejorar la disponibilidad de datos, dar robustez al

análisis y aumentar la representatividad de los registros, obteniendo pérdidas de datos inferiores al 32%%.

El análisis de datos para IDRDR, Las Ferias e I+F, permite establecer que la hora pico de la ciudad está comprendida entre las 06:00 horas y las 08:00 horas; también permite establecer que la actividad vehicular para los sábados en la mañana se ha incrementado notablemente, reflejado esto en el aumento de las emisiones entre las 06:00 y las 08:00 horas a través de los años; los domingos presentan un comportamiento totalmente diferente, caracterizado por bajas emisiones, por lo cual se excluyen de los análisis de tendencias y relación CO/NO_x.

El análisis de influencia de los vientos sobre las estaciones IDRDR y Las Ferias permite concluir que IDRDR representa de mejor manera el tráfico vehicular a velocidades promedio de flota liviana, con baja proporción de buses y camiones ligeros y pesados. La estación Las Ferias representa mejor el tráfico mixto de la ciudad con vías de tráfico lento, con cuadrantes que reflejan el comportamiento de tráfico mixto y un importante componente de flota pesada. Cada estación cuenta con cuadrantes de cubrimiento local y cuadrantes con un rango de cubrimiento superior, que permiten asegurar el monitoreo de una amplia variedad de condiciones de tráfico y flota. Por lo tanto, los datos consolidados de I+F pueden considerarse como representativos del tráfico de la ciudad.

El uso de datos multiestación (I+F) aumenta la disponibilidad de datos y la robustez del análisis; los datos de I+F considerados como representativos para la ciudad, muestran coincidencias notables con los datos de tendencias de CO para Las Ferias (considerados también como representativos de la ciudad) y con los datos de tendencias de CO/NO_x para IDRDR (los datos de Las Ferias no son significativos para esta relación) permitiendo un análisis con datos más representativos de la ciudad.

El análisis de tendencias de CO para las series de tiempo ambientales en hora pico muestra un continuo crecimiento de la concentración de este contaminante, compatible con el aumento de la flota vehicular bogotana. Este aumento también es registrado por las tendencias de CO para IE, mostrando que los datos de emisiones siguen los patrones de comportamiento de las fuentes móviles de la ciudad. Sin embargo, las tendencias de los

IE no se encuentran ajustadas a las tendencias calculadas a partir de datos ambientales. Las tendencias calculadas para el total de la flota y para la flota liviana se encuentran sobreestimadas en un 98% y 400% respectivamente, frente a las tendencias ambientales. Estos resultados sugieren una fuerte sobreestimación de las emisiones de CO por parte de los IE, donde la flota liviana es la causa principal al mostrar un crecimiento de 22,74% anual, frente a 5,4% anual de los datos ambientales. Los resultados estimados para la flota pesada también sugieren errores de estimación de los datos por parte de los IE, que muestran una tendencia decreciente frente al crecimiento de 13,94% derivado del análisis de datos ambientales.

Las tendencias de la relación CO/NO_x derivadas de datos ambientales son decrecientes, lo cual indica un fuerte crecimiento en las emisiones de NO_x, resultado compatible con el aumento de la flota diesel, el aumento en el uso de GNV por parte de los taxis y la introducción de la gasolina oxigenada con etanol desde el año 2004.

Los IE evaluados presentan valores de la relación CO/NO_x superiores a los reportados por los registros ambientales en hora pico. Estas discrepancias son inferiores al 25% cuando se contemplan las emisiones de toda la flota, por lo cual se consideran como coincidentes, pero superiores al 25% si se consideran las emisiones de la flota liviana. Las diferencias de CO/NO_x para los datos ambientales y los estimados de IE para la flota liviana, sumadas a los resultados tendenciales de CO, que muestran un crecimiento sostenido de este contaminante, demuestran que el CO está siendo sobreestimado por parte de los IE. La concordancia de la relación CO/NO_x para las emisiones de toda la flota, a pesar de las discrepancias para flota liviana (que aporta la mayor parte del CO de cuentas móviles), sugiere que se presentan imprecisiones en la estimación de emisiones de CO, tanto de taxis, motos y flota pesada. Sin embargo, los datos disponibles no permiten corroborar este supuesto.

Los resultados obtenidos sugieren que la sobreestimación de CO por parte de los IE se debe, en mayor parte, a errores en la estimación de los FE, lo cual es especialmente cierto para FE calculados a partir del modelo IVE.

Los IE con valores CO/NO_x más ajustados a los registros ambientales de hora pico son: el de Peñaloza, cuando se consideran las emisiones de toda la flota; y el de Behrentz, si se

considera la flota liviana. Los IE de Rodríguez y Peñaloza, con año base 2008, presentan diferencias marcadas en la relación CO/NO_x para la flota liviana, a pesar de emplear los mismos factores de emisión, actividad y flota vehicular. Esto se debe al uso de modelos distintos para el cálculo de emisiones. La metodología de evaluación empleada no permite establecer el modelo más adecuado para Bogotá. Sin embargo, los resultados sugieren que es pertinente la revisión y corrección de los IE de Rodríguez y Peñaloza, a partir de lo establecido por Behrentz para la flota liviana, con el fin de solventar problema principal referido a la sobreestimación de CO para la flota liviana. Se requiere una seria revisión de los resultados de la flota pesada, con el fin de comprobar si existen errores en la determinación de la emisión de CO y NO_x e introducir las mejoras pertinentes. Adicionalmente a la conclusión anterior, es necesario realizar IE para años anteriores y posteriores al 2008 con una misma metodología, con el fin de comparar los resultados con los registros ambientales.

El uso de cuadrantes permitió ampliar la evaluación de inventarios más allá de los resultados globales. Sin embargo, la falta de inventarios distribuidos espacialmente restringen este tipo de análisis, pues no es posible evaluar los efectos del tráfico particular de un área. Igualmente, la falta de inventarios temporalmente distribuidos puede introducir errores en la evaluación al comparar resultados calculados para las 24 horas de un año con datos ambientales de un periodo de tiempo restringido (hora pico).

Evaluar la precisión global de los inventarios de emisiones de fuentes móviles ofrece grandes dificultades, puesto que los valores verdaderos de emisión son desconocidos y no pueden ser determinados a través de una única medición o comparación. Se requiere una evaluación constante de las emisiones calculadas para zonas y periodos específicos. Por lo tanto, sólo la evaluación parcial de inventarios fue posible en el presente trabajo.

RECOMENDACIONES

Análisis como los descritos en el presente trabajo pueden llevarse a cabo para evaluar contaminantes de interés para la salud pública y el ambiente como PM_{10} , $PM_{2.5}$, y VOC. Para esto, es necesario mejorar la infraestructura de la RMCAB en sitios específicos tales como zonas con alta influencia de fuentes móviles o industriales que permitan comparaciones temporales y espaciales, confiables y oportunas. El análisis de los datos reportados por la RMCAB para CO y NO_x ha mostrado fallas en la red tales como monitoreo interanual intermitente de contaminantes, grandes cantidades de datos perdidos por estación por año, faltante de equipos de medición en sitios de alto impacto por fuentes móviles como la zona centro, entre otros; estas mejoras están relacionadas con la instalación de equipos de monitoreo de contaminantes de interés, permanencia de los mismos en los sitios escogidos, control y aseguramiento de la calidad de los datos recibidos y reportados.

La metodología empleada en este trabajo permite una evaluación primaria de los inventarios realizados. Sin embargo, conforme se disponga de más y mejores inventarios de emisiones, esta metodologías deberá ser complementada con otras que permitan una evaluación más profunda y acertada o una comparación de contraste, como por ejemplo evaluaciones a partir de estimados de consumo de combustible, comparación de emisiones de un una flota específica obtenidos a partir de los factores de emisión y mediciones reales, monitoreo remoto de contaminantes en zonas críticas o de interés, estudio de emisión en túnel o cañón urbano, modelación de la calidad del aire y comparación en datos ambientales, entre otros.

Los resultados obtenidos muestran que se requiere un mejoramiento continuo de las rutinas de cálculo de emisiones, dado que estas dependen de múltiples factores. Es recomendable realizar análisis de sensibilidad de la relación CO/NO_x de IE futuros frente a datos ambientales, con el fin de establecer variables de relevancia que puedan afectar los resultados.

Es recomendable realizar un IE bajo una misma metodología, como la seguida por Peñaloza y/o Rodríguez, para los años base de inventarios pasados, con el fin de realizar un análisis similar al presentado en este trabajo, con el fin de identificar fallas en la metodología y establecer si realmente las mejoras introducidas en estos IE se reflejan en la calidad de los resultados obtenidos.

Las relaciones CO/NO_x caracterizan adecuadamente las fuentes móviles de un entorno urbano, mientras que las relaciones SO₂/NO_x son adecuadas para representar fuentes fijas. Este hecho puede aprovecharse para evaluar el potencial de uso de otras estaciones de la ciudad de Bogotá, para evaluar ya sea fuentes móviles o fijas y aumentar la cantidad y calidad de datos disponibles.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aguirre, D., 2011. *Posibles relaciones entre la implementación del pico y placa de 14 horas y el aumento del parque automotor privado de la ciudad de Bogotá*. Bogotá, Colombia: Universidad de Los Andes.
- Al-Hasan, M., 2003. Effect of ethanol–unleaded gasoline blends on engine performance and exhaust emission. *Energy Conversion and Management*, 44(9), pp.1547–1561.
- Alem, N., Luján, M. & Bascopé, D., 2005. Impacto de la Contaminación del Aire en Enfermedades Respiratorias Atendidas en el Centro Pediátrico Albina Patiño. *Acta Nova*, 3(1), pp.56–78.
- Arriaga-Colina, J.L. et al., 2004. Measurements of VOCs in Mexico City (1992–2001) and evaluation of VOCs and CO in the emissions inventory. *Atmospheric Environment*, 38(16), pp.2523–2533.
- Behrentz, Eduardo et al., 2004. Emisiones de gases invernadero y otros contaminantes por parte de la flota vehicular liviana de Bogotá. Universidad de los Andes.
- Brown, S.G. et al., 2002. *Reconciliation of the VOC and NO_x Emission Inventory with Ambient Data in the Houston, Texas Region*, Sonoma Tech.
- CCB - Observatorio de Movilidad, 2009. *Comportamiento de los indicadores de movilidad de la ciudad a Diciembre de 2008*, Bogotá D.C., Colombia.
- CCB - Observatorio de Movilidad, 2011. *Comportamiento de los indicadores de movilidad de la ciudad a Diciembre de 2010*, Bogotá D.C., Colombia.
- Carshaw, D et al., 2006. Detecting and quantifying aircraft and other on-airport contributions to ambient nitrogen oxides in the vicinity of a large international airport. *Atmospheric Environment*, 40(28), pp.5424–5434.
- Carshaw, D & Beevers, S, 2005. Development of an urban inventory for road transport emissions of NO and comparison with estimates derived from ambient measurements. *Atmospheric Environment*, 39(11), pp.2049–2059.
- Carshaw, D & Ropkins, K., 2011. openair — an R package for air quality data analysis. , (In press).
- Carshaw, David, Beevers, Sean & Tate, J., 2007. Modeling and assessing trends in traffic-related emissions using a generalized additive modeling approach. *Atmospheric Environment*, 41(26), pp.5289–5299.
- DAMA - Departamento Técnico Administrativo de Ambiente, 2002. *Plan de Gestión Ambiental*, Bogotá D.C., Colombia.

- DEFRA - Air Quality Expert Group, 2004. *Nitrogen Dioxide in the United Kingdom*, London, U.K.
- Dirección de estudios sectoriales y de servicios, 2012. *Evaluación de alternativas de modificación a la medida de restricción del tránsito de vehículos particulares "pico y placa,"* Bogotá D.C., Colombia.
- D'Angiola, A. et al., 2010. On-road traffic emissions in a megacity. *Atmospheric Environment*, 44, pp.483–493.
- Estevez, A., 2010. *Exposición laboral a contaminación Atmosférica: Material particulado y efectos respiratorios en la salud de policías de tránsito de Bogotá 2008-2009*. Bogotá D.C., Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Sede Bogotá.
- Faiz, A. & Sturm, P., 2000. New Directions: Air pollution and road traffic in developing countries. *Atmospheric Environment*, 34, pp.4745–4746.
- Fandiño, M., 2009. Actualización del inventario de emisiones atmosféricas provenientes de fuentes fijas en Bogotá.
- Felix, M. et al., 2010. An urban emissions inventory for South America and its application in numerical modeling of atmospheric chemical composition at local and regional scales. *Atmospheric Environment*, 44(39), pp.5072–5083.
- Fujita, E.M. et al., 1992. Comparison of Emission Inventory and Ambient Concentration Ratios of CO, NMOG, and NO_x in California South Coast Air Basin. *Journal of the Air Waste Management Association*, 42(3), pp.264–276.
- Funk, T. et al., 2001. Compilation and evaluation of a Paso del Norte emission inventory. *The Science of the total environment*, 276(1-3), pp.135–51.
- Gaitán, M., Cancino, J. & Behrentz, Eduardo, 2007. Análisis del estado de la calidad del aire en Bogotá. *Revista de ingeniería*, (26), pp.81–92.
- Gallardo, L. et al., 2012. Evaluation of Vehicle Emission Inventories for Carbon Monoxide and Nitrogen Oxides for Bogotá, Buenos Aires, Santiago, and São Paulo. *Atmospheric Environment*, 47(x), pp.12–19.
- Giraldo, L., 2005. *Estimación del inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad de Bogotá e identificación de variables pertinentes*. Bogotá D.C., Colombia: Universidad de Los Andes.
- Guo, H. et al., 2007. Evaluation of the International Vehicle Emission (IVE) Model with On-Road Remote Sensing Measurements. *Journal of environmental sciences (China)*, 19(7), pp.818–26.
- Hao, J. et al., 2001. Source contributions to ambient concentrations of CO and NO_x in the urban area of Beijing. *Journal of Environmental Science and Health , Part A*, (November 2011), pp.37–41.
- Helsel, D.R. & Hirsch, R.M., 2002. *Statistical Methods in Water Resources: Techniques of Water Resources Investigations* Book 4., chapter A3. U.S. Geological Survey.

- Hernández, L. et al., 2011. Asociación entre la contaminación del aire y la morbilidad por enfermedad respiratoria aguda en menores de cinco años en tres localidades de Bogotá. In Eduardo Behrentz & A. Otros, eds. *Memorias II Congreso Colombiano y Conferencia Internacional de Calidad del Aire y Salud pública*. Cartagena de Indias: Universidad de los Andes, pp. 47–50.
- Herrera, D., 2007. *Modelo de emisiones vehiculares para la ciudad de Bogotá (EVB)*. Bogota D.C., Colombia: Universidad de Los Andes.
- IVE MODEL V. 2.0, 2008. International Vehicle Emissions Model Attachment A. Development of the Base Emission Rates for Use in the IVE Model.
- International Radian., 1997. *Manuales del programa de inventarios de emisiones de México. Vol. IV - Desarrollo de inventarios de emisiones de vehículos automotores*, Asociación de Gobernadores del Oeste. Sacramento, EE.UU.
- Jolly, J., Mercado, F. & Sullivan, D., 2000. *A Comparison of Ambient and Emissions VOC to NO_x Ratios at Two Monitors in Houston - Texas*, Texas Commission on Environmental Quality.
- Jones, A.M., Harrison, R.M. & Baker, J., 2010. The wind speed dependence of the concentrations of airborne particulate matter and NO_x. *Atmospheric Environment*, 44(13), pp.1682–1690.
- Kisys, R. & Pérez, Á., 2006. *Multicolinealidad y observaciones atípicas*, Universitat Oberta de Catalunya, Barcelona, España.
- Kutzbach, M.J., 2009. Motorization in developing countries: Causes, consequences, and effectiveness of policy options. *Journal of Urban Economics*, 65(2), pp.154–166.
- Mannschreck, K. et al., 2002. Evaluation of an Emission Inventory by Comparisons of Modelled and Measured Emission Ratios of Individual HCs, CO and NO_x. *Atmospheric Environment*, 36(1), pp.81–94.
- Manzi, Verónica, 2003. *Selección y aplicación de una metodología para la estimación de los factores de emisión de las fuentes móviles vehiculares de la ciudad de Bogotá*. Universidad de Los Andes.
- Mellios, G., Vanaalst, R. & Samaras, Z., 2006. Validation of road traffic urban emission inventories by means of concentration data measured at air quality monitoring stations in Europe. *Atmospheric Environment*, 40(38), pp.7362–7377.
- Miller, C.A. et al., 2006. Air emission inventories in North America: a critical assessment. *Journal of the Air & Waste Management Association (1995)*, 56(8), pp.1115–29.
- Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo, 2008. *Manual de Inventario de fuentes móviles*, Bogota D.C., Colombia.
- Mobley, J.D. & Cadle, S.H., 2004. Innovative Methods for Emission Inventory Development and Evaluation: Workshop Summary. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 54(11), pp.1422–39.

- NARSTO, 2005. *Improving Emission Inventories for Effective Air Quality Management Across North America*, Pasco, Washington, U.S.A.
- NIST/SEMATECH, 2012. Accounting for Non-Constant Variation Across the Data. In *NIST/SEMATECH e-Handbook of Statistical Methods*. Available at: <http://www.itl.nist.gov/div898/handbook/index.htm>.
- Parrish, D. et al., 2009. Comparison of air pollutant emissions among mega-cities. *Atmospheric Environment*, 43(40), pp.6435–6441.
- Parrish, D., 2006. Critical Evaluation of US On-Road Vehicle Emission Inventories. *Atmospheric Environment*, 40(13), pp.2288–2300.
- Parrish, D., 2002. Decadal Change in Carbon Monoxide to Nitrogen Oxide Ratio in U.S. Vehicular Emissions. *Journal of Geophysical Research*, 107(D12), pp.5–1 – 5–9.
- Peñaloza, N., 2010. *Distribución espacial y temporal del inventario de emisiones provenientes de las fuentes móviles y fijas de la ciudad de Bogotá, DC*. Bogotá D.C.: Universidad Nacional de Colombia.
- Pollack, A.K. et al., 2004. *Evaluation of the U.S. EPA MOBILE6 Highway Vehicle Emission Factor Model (CRC Project E-64) - Final Report*, U.S. EPA Office of Transportation and Air Quality. Novato, CA, U.S.A.
- Reid, S, Brown, S. & McCarthy, M., 2006. Comparison of Ambient Measurements to Emissions Representations for Modeling in California's San Joaquin Valley. *Sonoma Technology, Inc.*
- Reid, Stephen et al., 2008. *A Comparison of Ambient Measurements to Emissions Representations for Modeling to Support the Central California Ozone Study (CCOS)*, Sacramento (California). U.S.A.
- Reid, Stephen et al., 2011. *A Top-Down Emissions Inventory Evaluation for the Upper Midwest*, Sonoma Technology Inc., Golden (Co), U.S.A.
- Rodríguez, P., 2007. *Actualización del inventario de emisiones para vehículos operados con gasolina y gas natural en Bogotá*. Bogotá D.C., Colombia: Universidad de Los Andes.
- Rodríguez, P. & Behrentz, E, 2009. *Actualización del inventario de emisiones de fuentes móviles para la ciudad de Bogotá a través de mediciones directas*. Bogotá D.C.: Grupo de estudios en Sostenibilidad Urbana y Regional (SUR) - Universidad de Los Andes.
- Rosales, J. et al., 2001. Los efectos agudos de la contaminación del aire en la salud de la población : evidencias de estudios epidemiológicos. *Salud Pública de México*, 43(6), pp.544–555.
- Ruíz, J., 2002. *contaminación atmosférica Simulación de la generada por fuentes móviles en Bogotá*. Bogotá D.C., Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- SDA - Secretaría Distrital de Ambiente, 2009. *Informe anual de calidad del aire de Bogotá - Año 2008*, Bogotá D.C., Colombia.

- SDA - Secretaría Distrital de Ambiente, 2011. *Manual de procesos y procedimientos - Validación de datos de la RMCAB*, Bogotá D.C., Colombia.
- SDA - Secretaría Distrital de Ambiente, 2010. *Plan Decenal de Descontaminación del Aire para Bogotá*, Bogotá D.C., Colombia.
- SDA - secretaria Distrital de Ambiente, 2006. *Informe anual de calidad del aire de Bogotá - Año 2005*, Bogotá D.C.
- Smit, R., Ntziachristos, L. & Boulter, P., 2010. Validation of Road Vehicle and Traffic Emission Models – A Review and Meta-analysis. *Atmospheric Environment*, 44(25), pp.2943–2953.
- Solarte, P., Caicedo, M. & Restrepo, S., 2002. Contaminación atmosférica y enfermedad respiratoria en niños menores de 14 años en Bogotá. *Revista Médica Sanitas*, 5(2).
- Torres, J., 2002. *Análisis de los efectos a corto plazo de la contaminación atmosférica en Bogotá*. Universidad de Los Andes.
- U.S. EPA - U.S. Environmental Protection Agency, 2000. *EPA Meteorological Monitoring Guidance for Regulatory Modeling Applications Meteorological Monitoring Guidance*, Research Triangle Park, North Carolina, United States of America.
- Vargas, F., 2009. *Identificación de la contribución de fuentes al material particulado suspendido en el aire de Bogotá a través del uso de un modelo de receptor*. Bogotá D.C., Colombia: Universidad Nacional de Colombia.
- Vivanco, M.G. & Andrade, M., 2006. Validation of the emission inventory in the Sao Paulo Metropolitan Area of Brazil, based on ambient concentrations ratios of CO, NMOG and NOx and on a photochemical model. *Atmospheric Environment*, 40(7), pp.1189–1198.
- Wang, H. et al., 2010. Trends in vehicular emissions in China's mega cities from 1995 to 2005. *Environmental Pollution*, 158(2), pp.394–400.
- Western Governors' Association and Binational Advisory Committee, 1996. *Mexico Emission Inventory Methodology V. 2.0*, Denver, Colorado.
- Wilcox, R., 2010. *Fundamentals of Modern Statistical Methods: Substantially Improving Power and Accuracy* Second edi., Los Angeles, U.S.A.: Springer.
- Wong, R., 2010. *A Procedure to Analyze Air Quality Data for the Detection of Linear Time Trends*, Air Policy Branch, Alberta Environment.
- Zarate, E et al., 2007. Air quality modeling over Bogota, Colombia: Combined techniques to estimate and evaluate emission inventories. *Atmospheric Environment*, 41(29), pp.6302–6318.
- Zarate, Erika, 2007. *Understanding the Origins and Fate OF air Pollution in Bogotá, Colombia*. Lausanne, Francia: École Polytechnique fédérale de Lausanne.

- Zavala, M., Herndon, S., et al., 2009. Comparison of emissions from on-road sources using a mobile laboratory under various driving and operational sampling modes. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(1), pp.1–14.
- Zavala, M., Herndon, S., et al., 2009. Evaluation of mobile emissions contributions to Mexico City's emissions inventory using on-road and cross-road emission measurements and ambient data. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 9(17), pp.6305–6317.
- Zavala, Miguel, 2008. Nuevas metodologías para la evaluación de inventarios de emisiones. In *II Taller sobre implicaciones en política pública de nuevos hallazgos científicos sobre contaminación atmosférica*. Jalisco (México).

ANEXOS

Anexo 1. Gráficos de comportamiento CO y NO_x Interanual

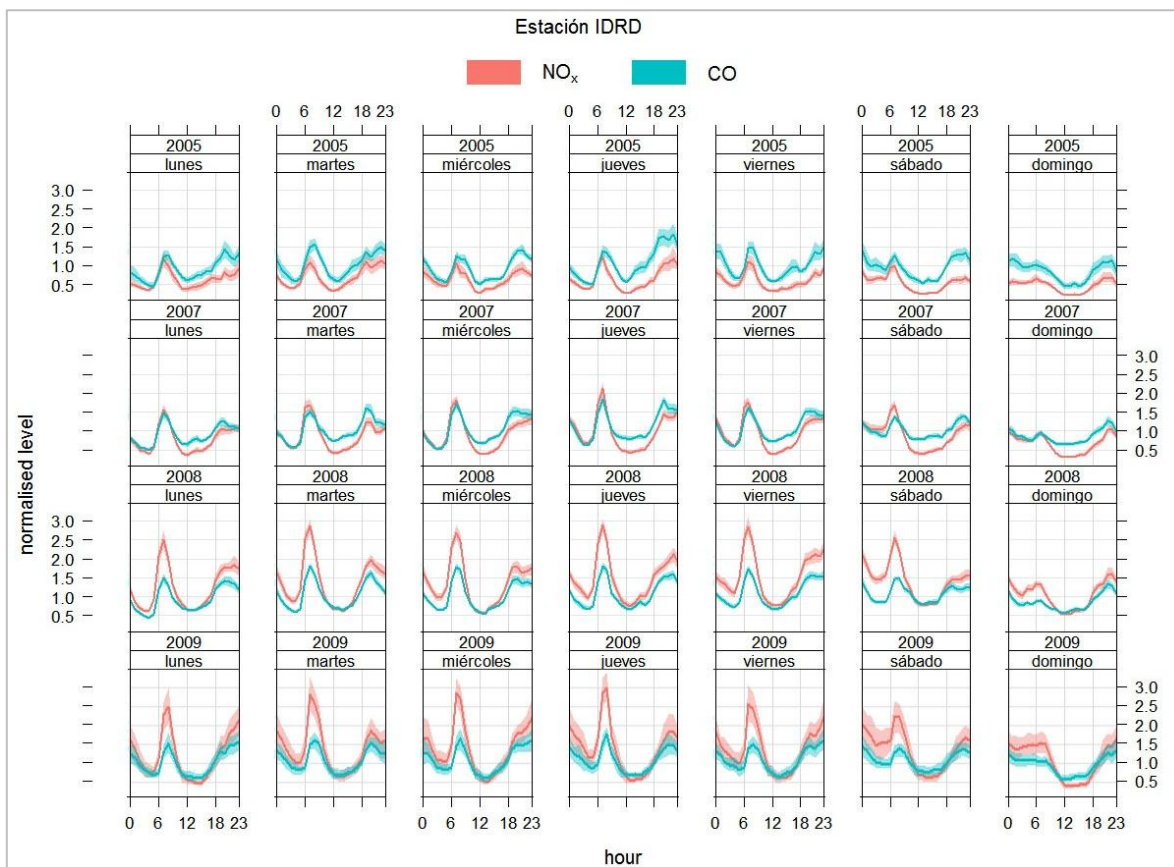


Figura A. 1.1 Comportamiento del CO y NO_x interanual para los días de la semana Estación IDRDR

Fuente: Elaboración propia con datos de la SDA

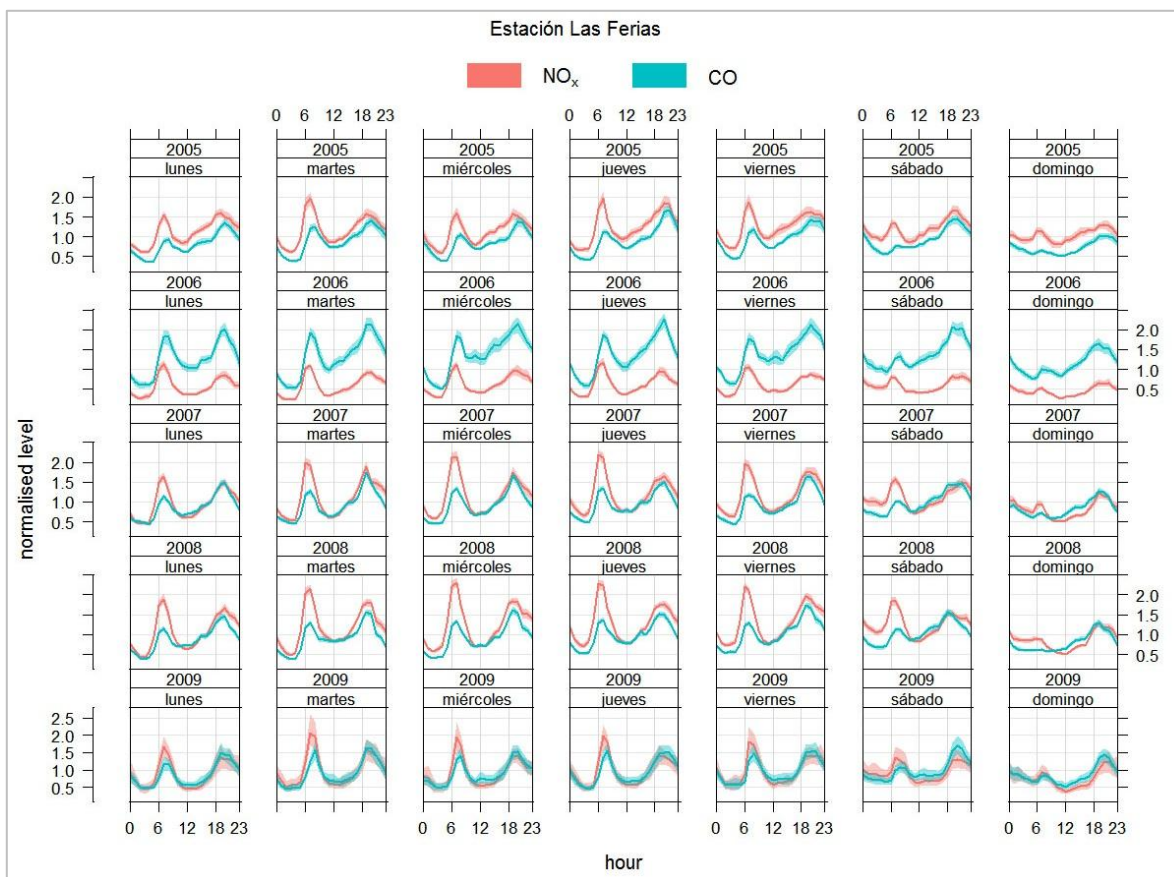


Figura A. 1.2 Comportamiento del CO y NO_x interanual para los días de la semana Estación Las Ferias

Fuente: Elaboración propia con datos de la SDA

Anexo 2. Gráficos de comportamiento CO y NO_x Interanual

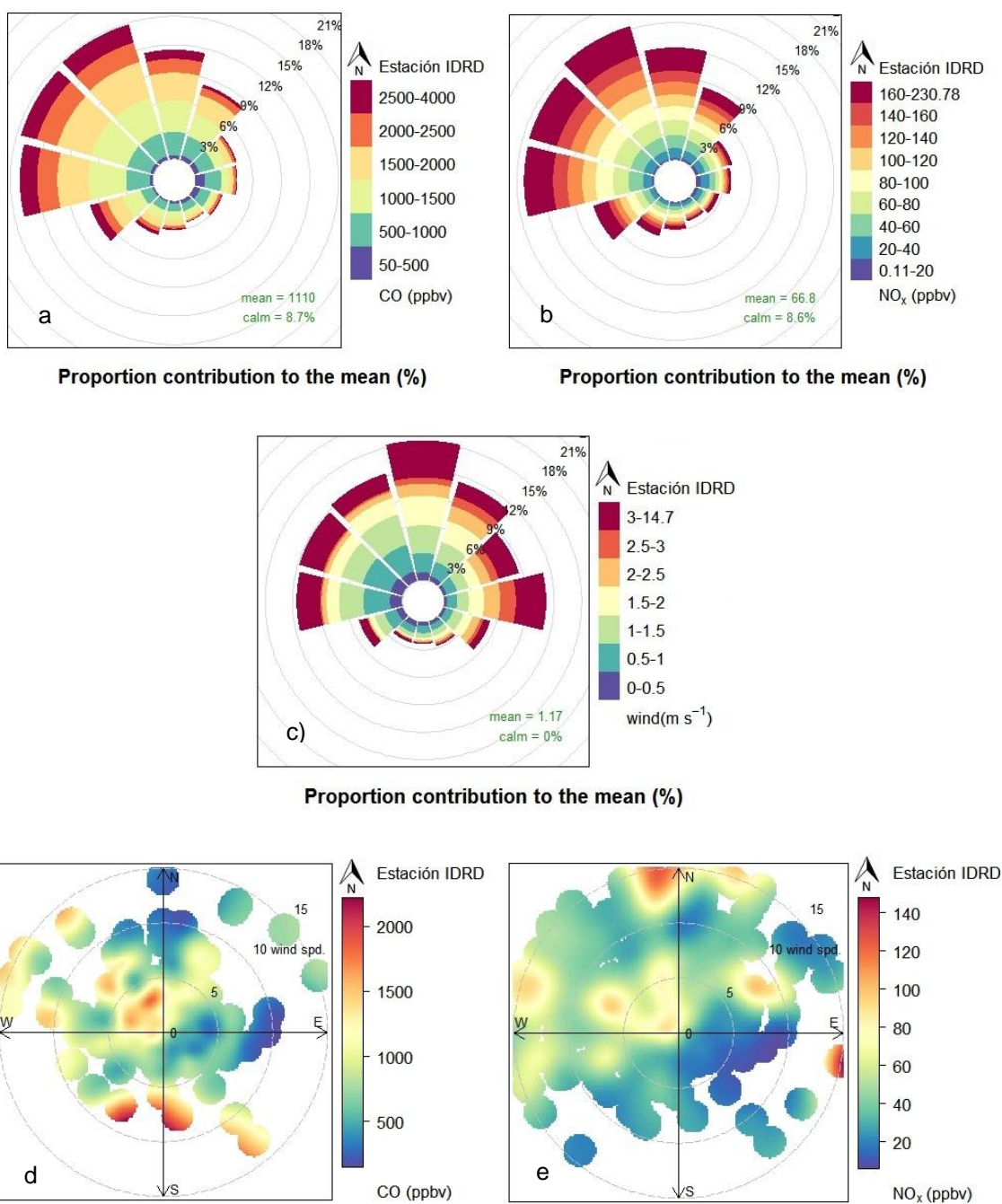


Figura A. 2.1 Comportamiento del CO y NO_x con respecto al viento para la estación IDRD
 Todos los datos graficados corresponden a los registrados entre las 06:00 y las 08:00 horas (hora pico). a) y b) Contribución a la media de CO y NO_x con relación a la dirección del viento; c) Rosa de los vientos; d) grafico de contornos en coordenadas polares que relaciona velocidad y dirección del viento, superficie generada a partir de método de suavización con GAM. Fuente: Elaboración propia con datos de la SDA

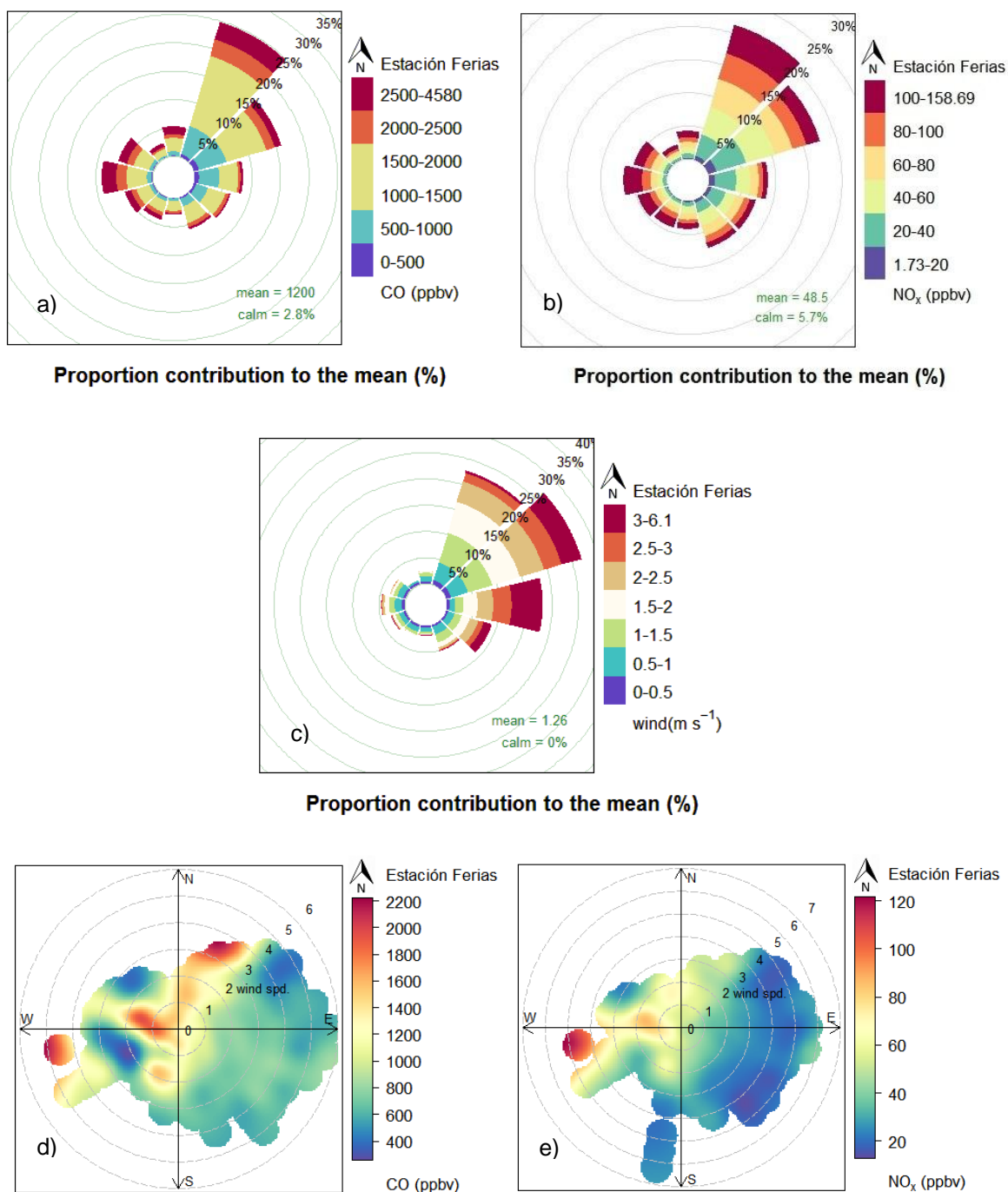


Figura A. 2.2 Comportamiento del CO y NO_x con respecto al viento para la estación Las Ferias
 Todos los datos graficados corresponden a los registrados entre las 06:00 y las 08:00 horas (hora pico). a) y b) Contribución a la media de CO y NO_x con relación a la dirección del viento; c) Rosa de los vientos; d) grafico de contornos en coordenadas polares que relaciona velocidad y dirección del viento, superficie generada a partir de método de suavización con GAM. Fuente: Elaboración propia con datos de la SDA

Anexo 3. Comportamiento estacional para CO

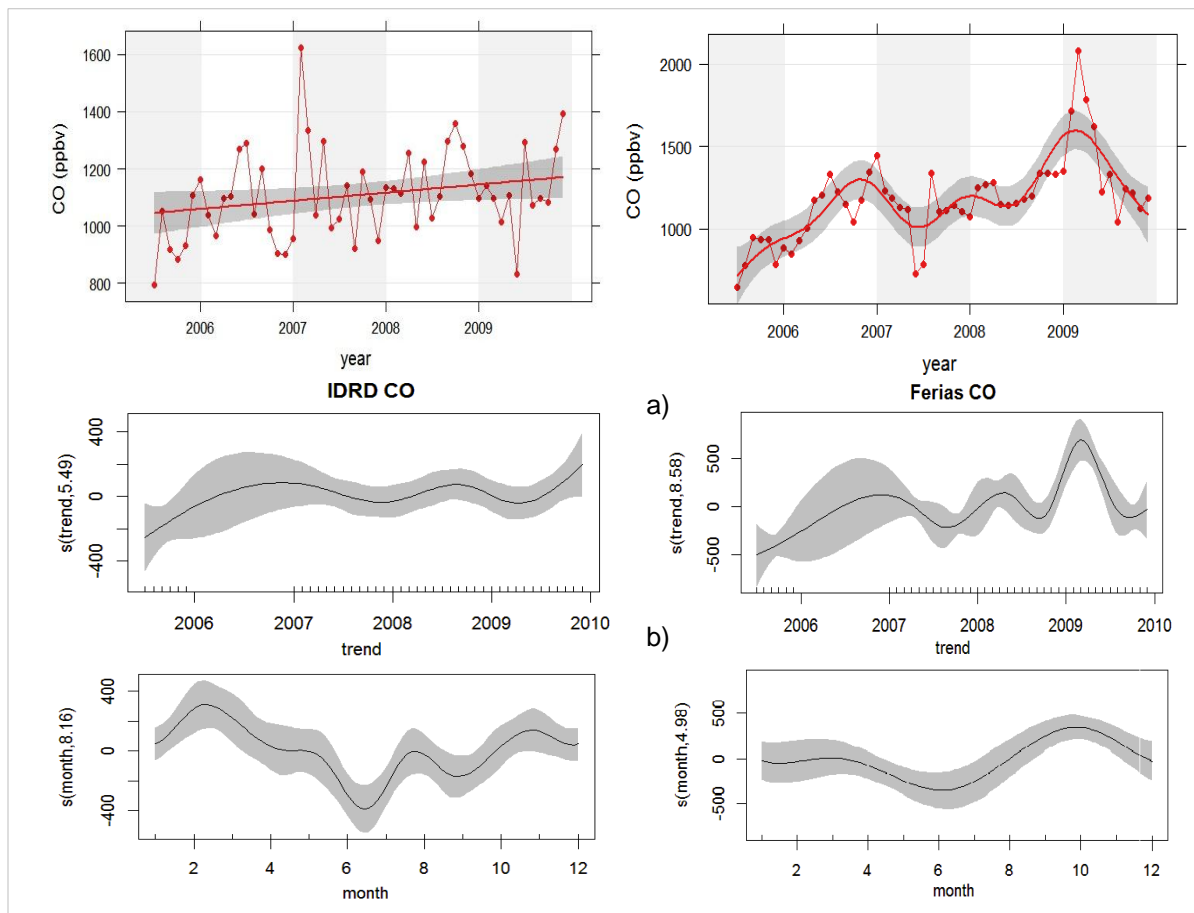


Figura A. 3.1. Comportamiento estacional del CO para la estación IDRD y Las Ferias

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la SDA. Los datos graficados corresponden al intervalo entre las 06:00 y 08:00 horas. La franja sombreada en las líneas de tendencia corresponde al nivel de confianza del 95%. El algoritmo de suavización interpola los datos faltantes de acuerdo con el comportamiento de la serie de tiempo, por lo cual aparecen datos mensuales de CO para periodos donde no hay registros ambientales. a) Componente tendencial, b) Componente estacional.

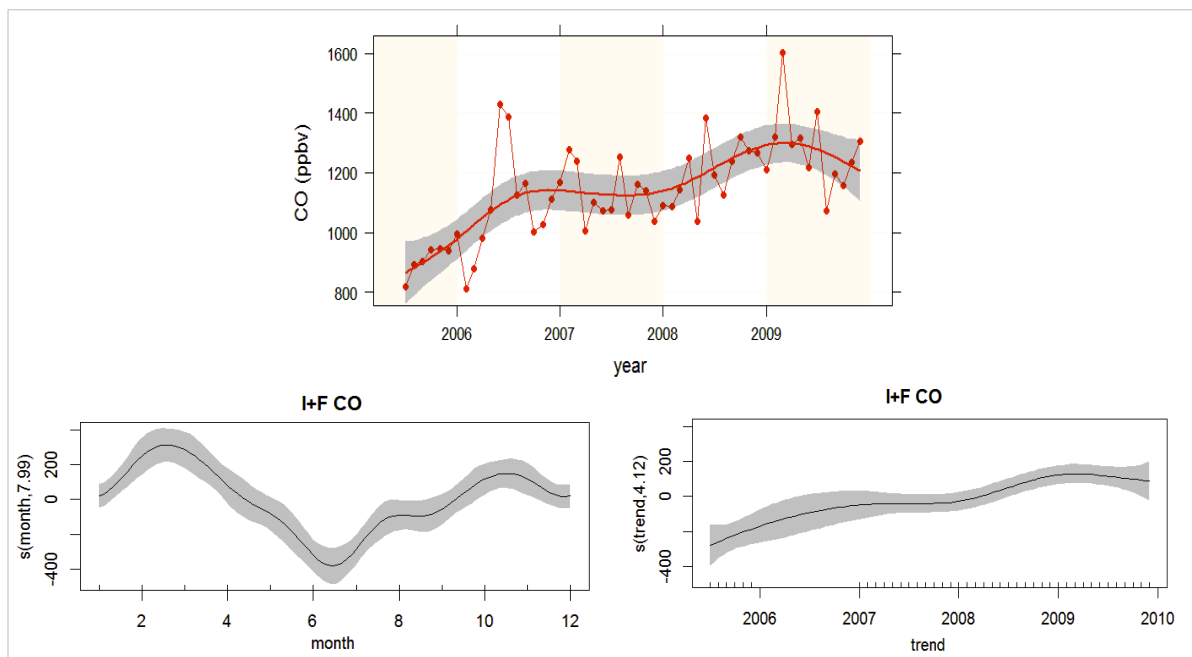


Figura A. 3.2. Comportamiento estacional del CO para I+F

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la SDA. Los datos graficados corresponden al intervalo entre las 06:00 a 08:00 horas. La franja sombreada en las líneas de tendencia corresponde al nivel de confianza del 95%. El algoritmo de suavización interpola los datos faltantes de acuerdo con el comportamiento de la serie de tiempo, por lo cual aparecen datos mensuales de CO para periodos donde no hay registros ambientales.

Anexo 4. Resumen modelo de comportamiento estacional con GAM

Para CO en hora pico en IDRDR se tiene:

Family: gaussian
Link function: identity

Formula:
co ~ s(trend, bs = "cr") + s(month, bs = "cp")

Parametric coefficients:
Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 1116.43 22.82 48.93 <2e-16 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Approximate significance of smooth terms:

edf Ref.df F p-value
s(trend) 5.488 6.354 2.586 0.03866 *
s(month) 8.164 8.785 4.513 0.00111 **

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

R-sq.(adj) = 0.621 Deviance explained = 74.7%
GCV score = 33576 Scale est. = 21862 n = 42

Para CO en hora pico en Ferias se tiene:

Family: gaussian
Link function: identity

Formula:
co ~ s(trend, bs = "cr") + s(month, bs = "cp")

Parametric coefficients:
Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 1197.05 18.89 63.36 <2e-16 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Approximate significance of smooth terms:

edf Ref.df F p-value
s(trend) 8.575 8.861 13.33 7.39e-08 ***
s(month) 4.984 6.141 10.69 3.57e-06 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

R-sq.(adj) = 0.846 Deviance explained = 89.7%
GCV score = 22944 Scale est. = 14990 n = 42

Para CO en hora pico datos consolidados (I+F):

Family: gaussian
Link function: identity

Formula:
co ~ s(trend, bs = "cr") + s(month, bs = "cp")

Parametric coefficients:
Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept) 1159.75 15.45 75.06 <2e-16 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Approximate significance of smooth terms:

edf Ref.df F p-value
s(trend) 4.125 4.954 10.99 5.65e-06 ***
s(month) 7.990 8.697 13.89 3.17e-08 ***

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

R-sq.(adj) = 0.822 Deviance explained = 87.5%
GCV score = 14579 Scale est. = 10027 n = 42

Anexo 5. Regresiones OLS para las estimaciones de CO y NO_x a través de IE

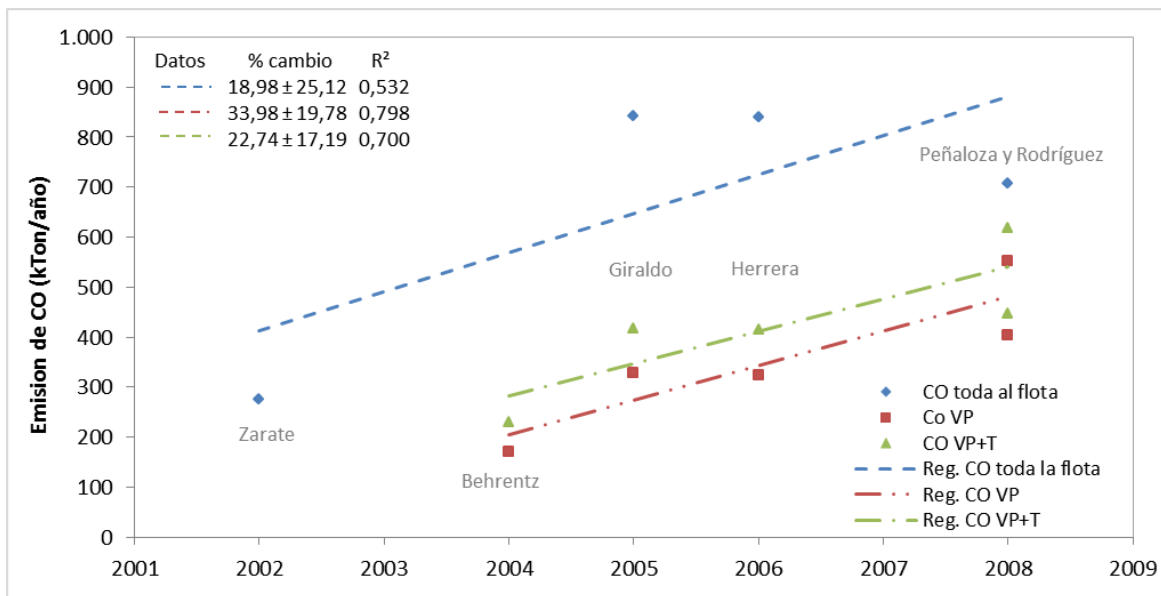


Figura A. 5.1. Tendencia de concentración de CO en los IE

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de IE de la ciudad de Bogotá

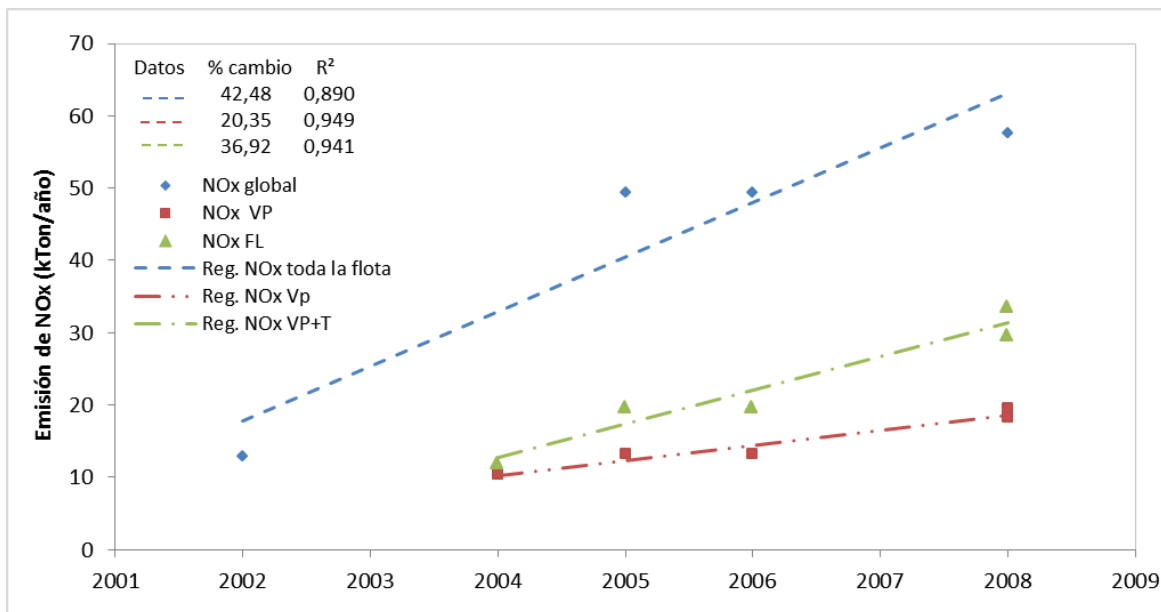


Figura A. 5.2. Tendencia de concentración de NO_x en los IE

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de IE de la ciudad de Bogotá

Anexo 6. Regresiones WLS para la relación CO/NO_x de datos ambientales

Tabla A. 6.1. Regresiones WLS para los registros ambientales

Estación IDR D							
Año	Cuadrante	Pendiente	IC pendiente		Error	Intercepto	R ²
2005	Q1-4	16,79	15,96	17,63	0,83	279,53	0,69
	Q3	15,99	13,74	18,24	2,25	207,65	0,67
2007	Q1-4	14,89	14,64	15,13	0,25	226,37	0,85
	Q3	13,67	13,22	14,13	0,46	258,69	0,84
2008	Q1-4	11,02	10,85	11,19	0,17	218,59	0,87
	Q3	9,88	9,42	10,35	0,47	313,10	0,77
2009	Q1-4	9,31	9,13	9,48	0,18	254,10	0,80
	Q3	9,38	8,97	9,78	0,40	234,72	0,82
Estación Las Ferias							
Año	Cuadrante	Pendiente	IC pendiente		Error	Intercepto	R ²
2005	Q1-4	16,67	16,30	17,04	0,37	-22,55	0,85
	Q1	15,92	15,45	16,40	0,48	0,90	0,84
	Q3	13,36	12,10	14,62	1,26	204,60	0,75
	Q4	18,28	16,24	20,33	2,05	-73,74	0,66
2007	Q1-4	17,35	17,07	17,63	0,28	107,17	0,88
	Q1	10,92	10,49	11,34	0,43	336,20	0,85
	Q3	18,28	17,70	18,86	0,58	90,83	0,90
	Q4	17,29	15,74	18,85	1,56	82,50	0,84
2008	Q1-4	16,45	16,23	16,66	0,22	211,66	0,89
	Q1	16,01	15,75	16,28	0,27	198,00	0,91
	Q3	15,21	13,97	16,45	1,24	351,60	0,79
	Q4	17,07	16,46	17,69	0,62	218,10	0,92
2009	Q1-4	14,47	14,20	14,75	0,28	288,21	0,89
	Q1	14,68	14,41	14,96	0,28	240,70	0,92
	Q3	15,36	14,07	16,65	1,29	321,60	0,82
	Q4	14,25	13,31	15,20	0,94	3,88	0,85
Consolidado I+F							
Año	Cuadrante	Pendiente	IC pendiente		Error	Intercepto	R ²
2005	Q1-4	16,90	16,32	17,47	0,57	127,60	0,76
2007	Q1-4	13,99	13,73	14,26	0,27	260,30	0,76
2008	Q1-4	12,50	12,31	12,68	0,19	240,50	0,83
2009	Q1-4	11,09	10,88	11,31	0,22	354,20	0,77

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la SDA. Resultados obtenidos en el software MINITAB 16.

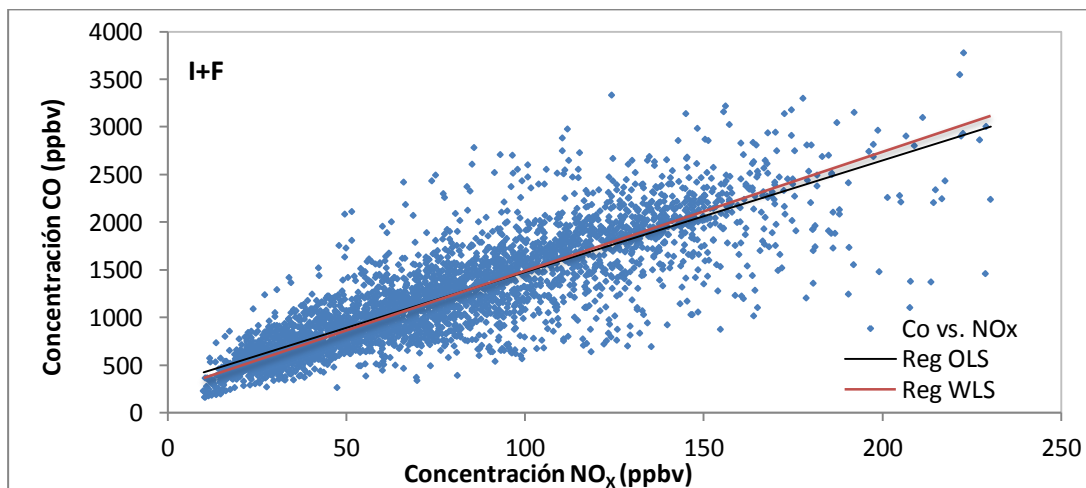
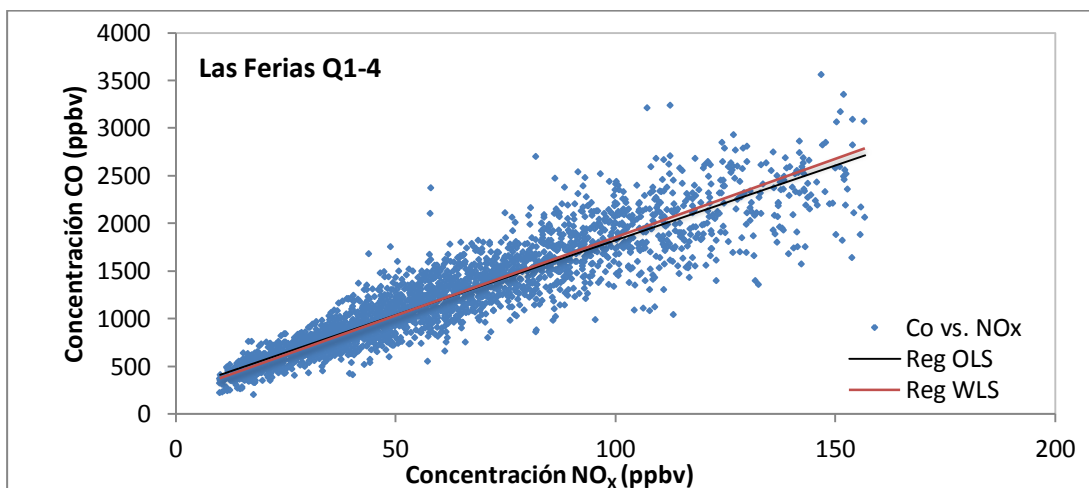
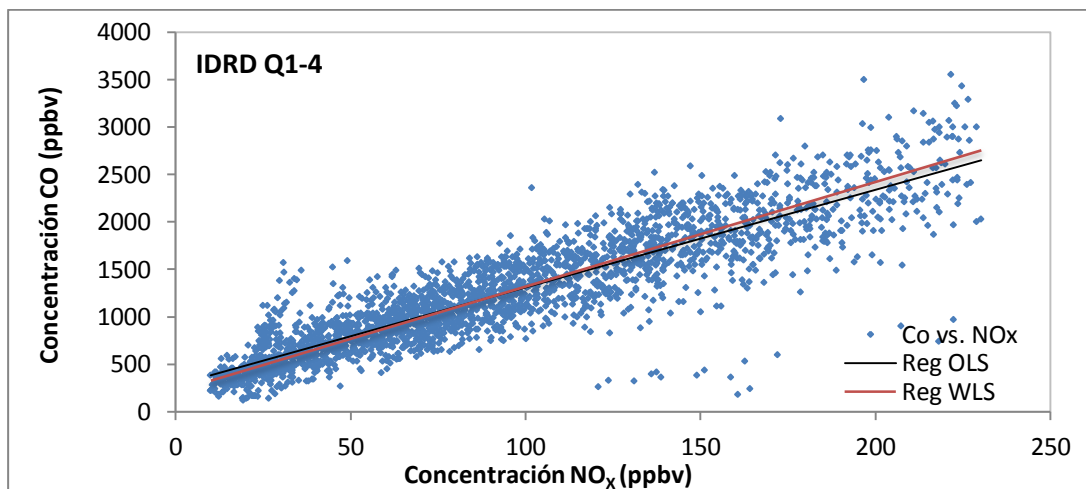


Figura A. 6.1. CO vs. NO_x para datos ambientales

Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la SDA. Lo graficado corresponde a datos globales de hora pico del año 2008 para las estaciones IDRQ1-4, Las ferias y el consolidado I+F. La línea negra corresponde a una regresión OLS y la línea roja a la regresión WLS, esta última es la empleada para la evaluación de IE

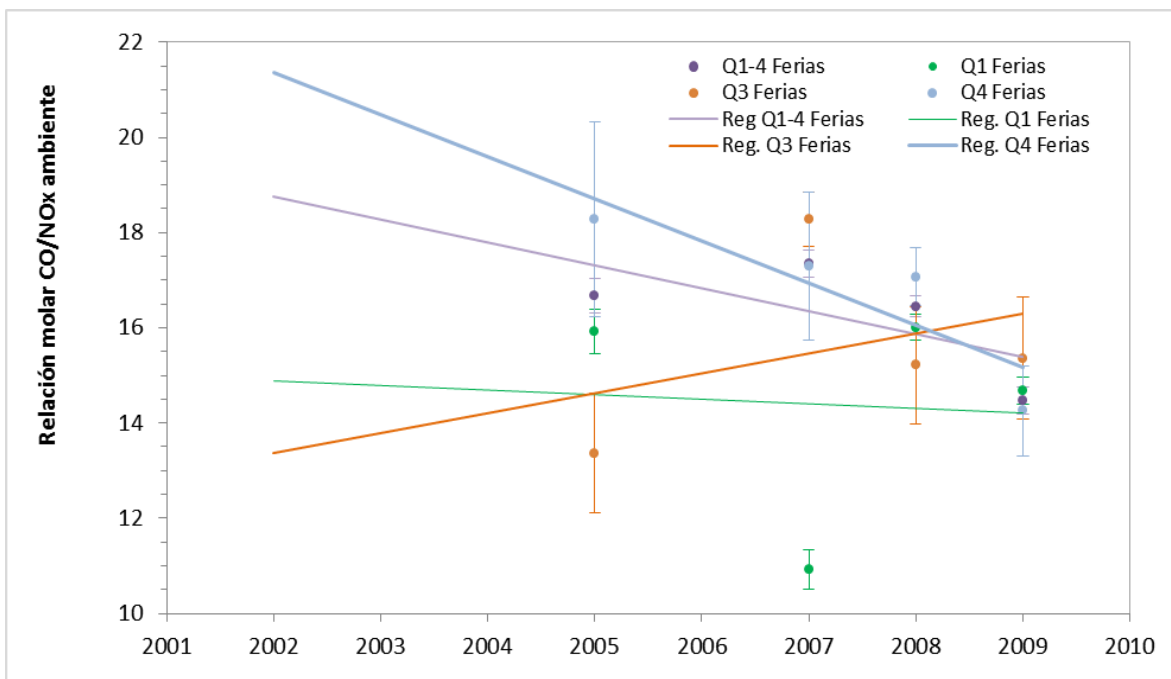


Figura A. 6.2. Tendencia de la relación molar CO/NO_x para la estación Las Férias
 Fuente: Elaboración propia a partir de datos de la SDA. Los puntos representan las pendientes derivadas de la regresión WLS (relación CO/NO_x anual). Las barras de error corresponden a los intervalos de confianza del 95% calculados para cada pendiente a través de la regresión WLS. Las líneas continuas representan la regresión OLS realizada sobre las pendientes.

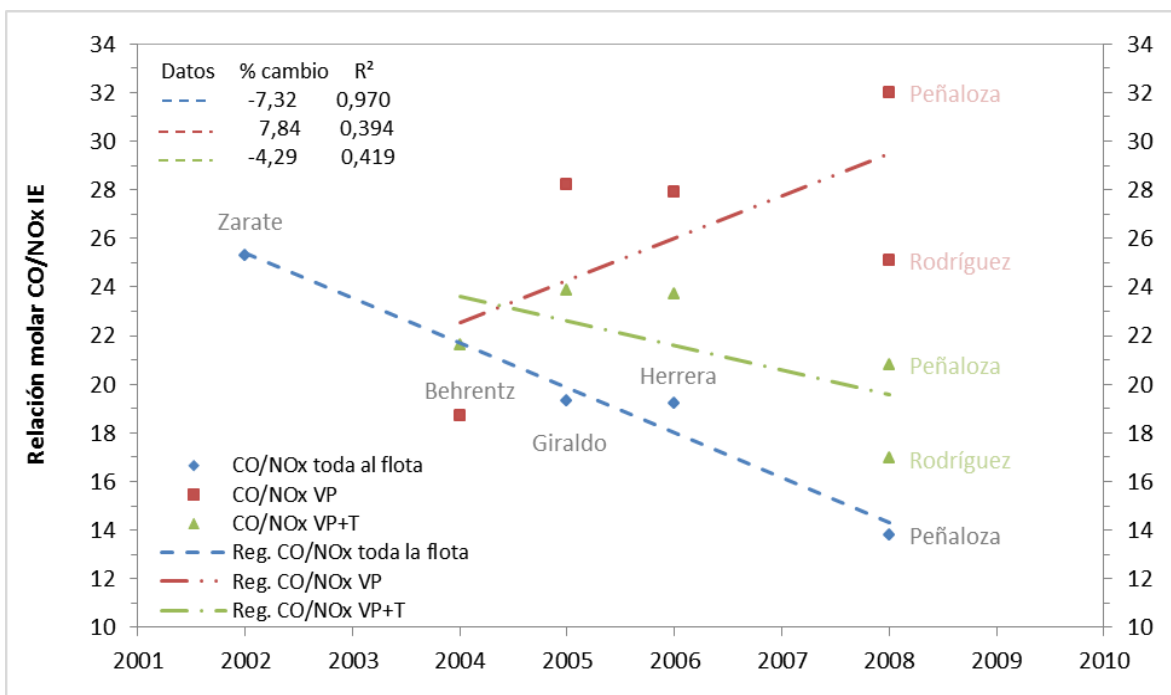


Figura A. 6.3. Tendencia de la relación molar CO/NO_x para los IE
 Fuente: Elaboración propia a partir de datos de IE. Los puntos representan los datos de cada IE. Las líneas punteadas, los resultados de la regresión OLS realizada sobre los datos de IE.