

METODOLOGÍA PARA EVALUAR EL IMPACTO AMBIENTAL SOBRE LA CALIDAD DEL AIRE EN LOS PROYECTOS DE REDISEÑO DE RUTAS DE TRANSPORTE PÚBLICO COLECTIVO EN LAS CIUDADES. ESTUDIO DE CASO: MEDELLÍN*

Carlos Echeverri**
Germán Valencia-Hernández***
Alejandro Acosta****

Recibido: 17/05/2011

Aceptado: 15/05/2012

RESUMEN

Este documento establece la metodología y los procedimientos necesarios para evaluar el impacto ambiental sobre la calidad del aire en los proyectos de rediseño de rutas de transporte público colectivo en las principales ciudades del mundo. Para este propósito, se formuló un caso hipotético en la ciudad de Medellín teniendo en cuenta las rutas de transporte público colectivo complementarias al sistema integrado de transporte en el Valle de Aburrá, convirtiendo algunas rutas radiales en rutas transversales o de migración a otras cuencas.

Con la reconfiguración propuesta para las rutas de transporte público colectivo la emisión de contaminantes proveniente de los buses no presentó cambios sustanciales. Sin embargo, la concentración de partículas aumentó en ciertos puntos de la zona de estudio y alcanzó valores que superan la norma anual de calidad del aire ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Palabras clave: Contaminación atmosférica, rediseño de rutas de transporte público colectivo y modelación de la calidad del aire.

* Producto de una investigación terminada. Proyecto “Metodología de rediseño de rutas de transporte público colectivo complementarias al sistema integrado de transporte en el Valle de Aburrá”, cofinanciado entre la Universidad de San Buenaventura y la Universidad de Medellín, 2010.

** Ingeniero Químico, M.Sc. Ingeniería Ambiental. Jefe del programa de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Medellín. Investigador del Grupo de Investigaciones y Mediciones Ambientales. Correo electrónico: cecheverri@udem.edu.co.

*** Ingeniero Ambiental. Director del programa de Ingeniería Ambiental y Coordinador de la Especialización en Sistemas de Información Geográfica de la Universidad de San Buenaventura (Medellín). Correo electrónico: especialización.sig@usbmed.edu.co.

**** Ingeniero Ambiental. Profesor del programa de Ingeniería Ambiental de la Universidad de Medellín. Correo electrónico: hacosta@udem.edu.co.

METHODOLOGY FOR ASSESSING ENVIRONMENTAL IMPACT ON AIR QUALITY IN PROJECTS REDESIGNING COLLECTIVE PUBLIC TRANSPORT ROUTES IN THE CITIES. CASE STUDY: MEDELLÍN

ABSTRACT

This document provides the methodology and necessary procedures to assess the environmental impact on air quality in the projects of redesign of collective public transport routes in main cities around the world. For this purpose, it has been formulated a hypothetical case in the city of Medellin keeping in mind the public transport routes that are complementary to the integrated transport system in the Aburrá Valley, transforming some radial routes in transversal routes or migration to other basins.

With the reconfiguration proposed for collective public transport routes, pollutant emissions from buses did not show substantial changes. However, the concentration of particles increased at certain points in the study area, reaching values that exceed the annual standard for air quality ($50 \mu\text{g}/\text{m}^3$).

Key words: Air pollution, redesign of collective public transport routes and modeling of air quality.

INTRODUCCIÓN

Medellín, por su conformación geográfica y espacial presenta condiciones especiales que limitan su proceso de expansión y crecimiento. Cuenta con una malla vial construida y heredada de los procesos de urbanización definidos desde el plan piloto de los años 50, con adaptaciones funcionales que están llegando a su límite potencial. La densidad vehicular en el Área Metropolitana del Valle de Aburrá se ha incrementado alrededor del 45% en los últimos cinco años, y se evidencia una relación desigual entre el ritmo de crecimiento del parque automotor y el incremento de la capacidad de la malla vial, que incide en el deterioro de la calidad del aire [1].

En este contexto, para los próximos años se propone la estructuración y puesta en operación del Sistema Integrado de Transporte en el Valle de Aburrá, así como la construcción de la infraestructura vial que genere nuevas conexiones en el territorio, que permitan una mayor integración y cohesión social, y nuevas alternativas de accesibilidad a los diferentes barrios y zonas de la ciudad [1]. Medellín se ha preocupado en los últimos años por reconfigurar las redes de transporte público colectivo a través de sus distintos modos de transporte y de su plan estratégico de movilidad y transporte, que pretende reestructurar 170 rutas de las 250 existentes actualmente.

El objetivo de este proyecto fue hacer un análisis comparativo de la calidad del aire en la ciudad de Medellín entre las condiciones actuales y las resultantes de la reconfiguración propuesta para las rutas de transporte público colectivo complementarias al sistema integrado de transporte en el Valle de Aburrá en una zona de estudio comprendida entre las carreras 51D y 43 y entre las calles 44 y 58. También se buscó evaluar el comportamiento de la emisión de contaminantes atmosféricos y establecer una metodología aplicable a otras ciudades para estudios similares.

1 METODOLOGÍA

En este proyecto se implementó el método de análisis multicriterio de SAATY para convertir las rutas radiales en rutas transversales o de migración a otras cuencas. Este método fue incluido en la metodología con el fin de seleccionar objetivamente las rutas que tienen el potencial de ser integradas para posteriormente convertirlas en una sola ruta transversal. También se tuvo en cuenta la red del sistema integrado de transporte, conformada por el sistema Metro, las rutas integradas y Metroplús para efectos de la reconfiguración de las rutas. Igualmente se tuvieron en cuenta otros atributos como el número de pasajeros transportados, las frecuencias y tiempos de desplazamiento de las rutas para efectos de validación. En la tabla 1 se muestran los criterios tenidos en cuenta dentro del análisis multicriterio.

En la figura 1 se describe el proceso operativo llevado a cabo para la selección e integración de las rutas en este trabajo.

Como resultado de la implementación de la anterior metodología se obtuvieron las rutas bipolares potenciales a ser unificadas según los criterios de valoración asignados. Después de pasar por las etapas de validación con las restricciones que arroja el SITVA, se escogieron cuatro (4) rutas radiales para ser convertidas en dos (2) nuevas rutas transversales. A estas rutas se les midió el desempeño en niveles de servicio, tales como la frecuencia, la longitud de la ruta resultante, el recorrido y el número de vehículos en operación, así como el impacto ambiental de contaminación por gases y partículas.

Las rutas candidatas a ser integradas fueron la 240 (Floresta Calazans) con la 103 (La Sierra); la 96 (Buenos Aires) con la 275A (Alfonso López); la 301 (Circular Coonatra), 302 (Circular Sur) y 303 (Circular Sur) con la 201 (Éxito Corazón); y la 204 (Belencito) con la 102 (Cataluña) o 105 (Golondrina) o 106 (Tres Esquinas).

Tabla 1. Criterios económicos, ambientales y de movilidad para la definición de rutas a ser integradas mediante el método de Saaty

<i>Criterio</i>	<i>Nombre</i>	<i>Descripción</i>	<i>Unidad</i>	<i>Importancia en la integración</i>
Movilidad	Longitud de la ruta en el centro	Longitud del tramo de la ruta que pasa por el centro de Medellín	Metros	+
Movilidad	Número de pasajeros transportados	Demanda fija	Número de pasajeros	+
Ambiental	Uso del suelo	Combinación origen -destino en suelo residencial, servicios e industrial.	Metros	+
Ambiental	Estrato	Longitud de tramo en estratos más bajos	Metros	+
Ambiental	Tipo de vehículo	Bus-Microbús	Bus-microbús	+ (Bus)
Ambiental	Capacidad	Capacidad no utilizada del vehículo	Número de puestos del vehículo no ocupados	+
Económico	Tiempo de viaje	Pérdida de tiempo en transporte	Tiempo	+
Movilidad	Cercanía al sistema SITVA	Distancia a la que pasa la ruta por la estación más cercana del SITVA	Metros	menos metros + probabilidad integración
Movilidad	Demanda origen y destino % viajes entre cuencas diferentes en la matriz origen y destino			

Fuente: elaboración propia.

1.1 Selección de la zona de estudio

Para la selección de la zona de estudio se hizo un análisis sobre las rutas candidatas a ser articuladas, el sector que permitiría una eventual unificación y el nivel de contaminación atmosférica que en él se produce debido al tráfico vehicular. Dado el comportamiento radial que posee el transporte público en la ciudad de Medellín, se evidencia una convergencia hacia el sector del centro, en donde el transporte público se traslada desde una periferia hasta la zona centro y retorna hacia su sitio de origen. La acumulación de transporte público en

esta zona tiene grandes incidencias en los niveles de contaminación atmosférica que se generan. Adicionalmente, en este sector se desarrolla un importante porcentaje de las actividades laborales, comerciales e industriales que tienen influencia directa en el número de personas que se trasladan hacia allí.

Basados en los criterios anteriormente expuestos se escogió parte del centro de Medellín como zona de estudio. Se seleccionó el sector comprendido entre las carreras 51D y 43 y las calles 44 y 58 para efectuar la simulación de la calidad del aire (ver figura 2).

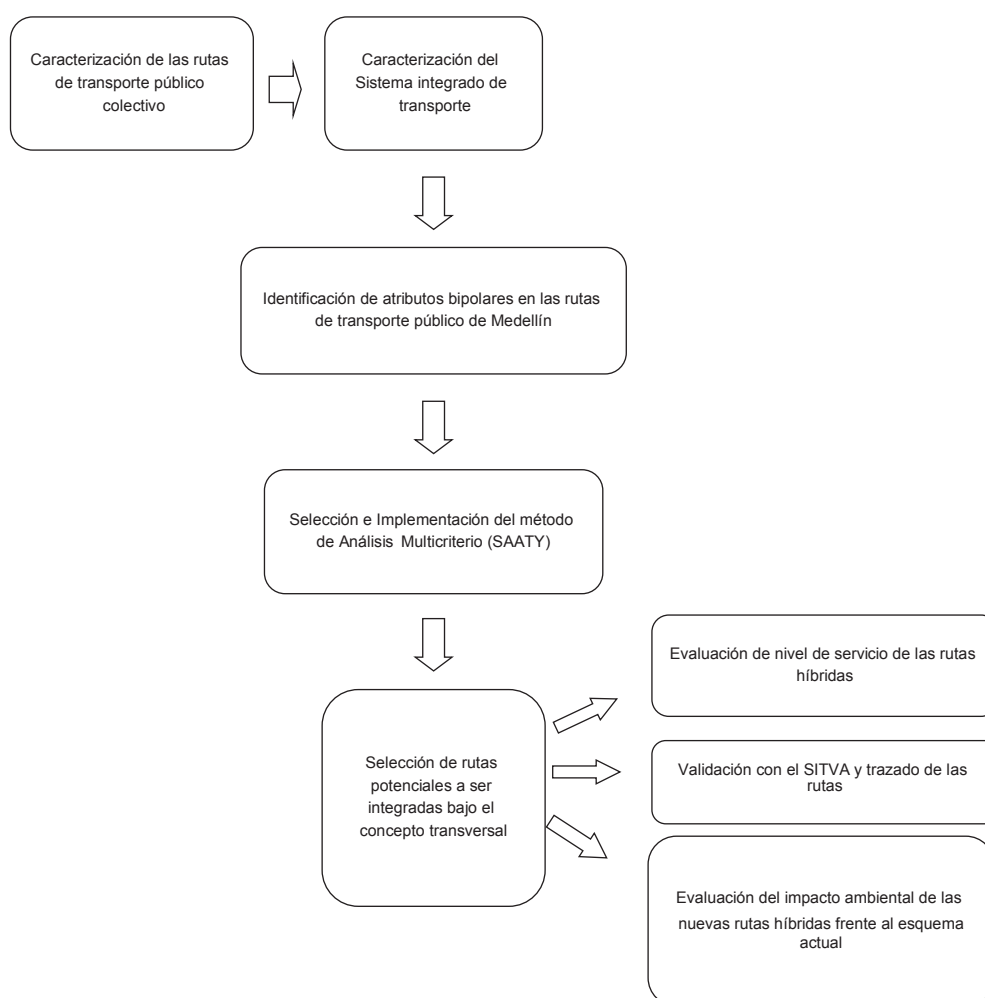


Figura 1. Diagrama de proceso

Fuente: elaboración propia

1.2 Selección de los puntos de medición para las variables ambientales

Luego de seleccionar la zona de estudio se hizo una salida de campo con el fin de reconocer el lugar y establecer los posibles puntos de medición para las variables ambientales (monóxido de carbono y partículas PM_{2.5}). Ver tabla 2.

1.3 Estimación de la emisión de contaminantes en la zona de estudio

Se utilizó el modelo IVE (International Vehicle Emission Model) versión 2.0 para estimar la emi-

sión de contaminantes atmosféricos provenientes de las fuentes móviles. Este modelo fue desarrollado especialmente para ser usado en países en vías de desarrollo, en los que existen condiciones de tráfico y tecnología vehicular diferentes a los de los países en desarrollo [2].

Se estimaron las emisiones actuales de monóxido de carbono y partículas respirables (PM₁₀) provenientes de los vehículos automotores que circulan en la zona de estudio y las resultantes de la reconfiguración de las de rutas de transporte público colectivo en la misma zona.

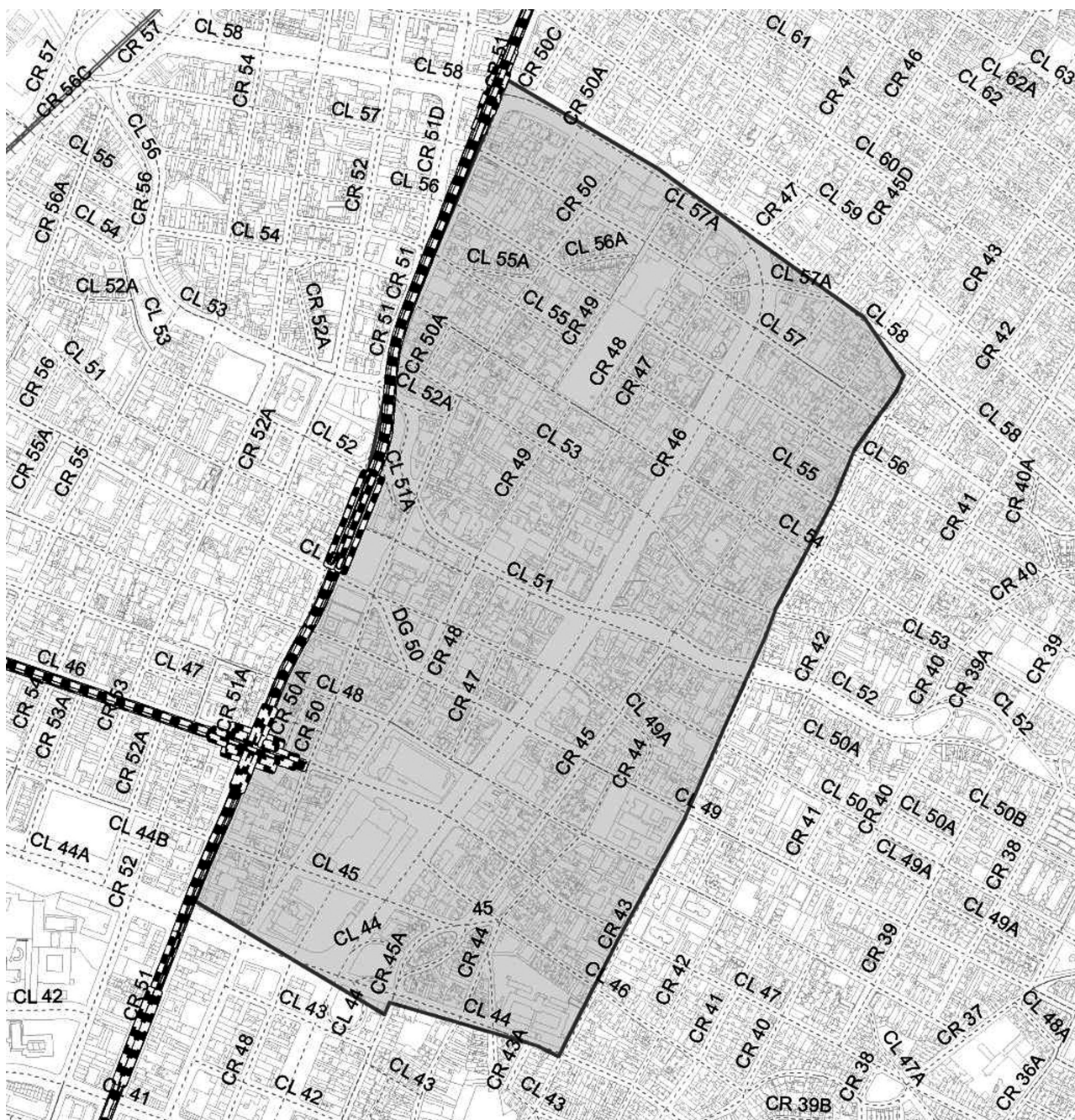


Figura 2. Zona de estudio.

Fuente: elaboración propia

1.4 Estimación de la calidad del aire en la zona de estudio

Por el alcance a pequeña escala del estudio se utilizó el modelo *Industrial Source Complex* (ISCLT) para determinar concentraciones

de contaminantes no reactivos, tales como el monóxido de carbono (CO) y las partículas finas (PM_{2.5}). Se estimaron las concentraciones en la zona de estudio con y sin el rediseño de rutas [3].

Tabla 2. Puntos de medición para las variables ambientales

Punto	Cruce
1	Carrera 49 con calle 46 (Junín con Maturín)
2	Carrera 46 con calle 45 (Oriental con Amador)
3	Carrera 44 con calle 46
4	Carrera 43 con calle 46 (Girardot con Maturín)
5	Carrera 43 con calle 48 (Girardot con Pichincha)
6	Carrera 44 con calle 48
7	Carrera 43 con calle 49 (Girardot con Ayacucho)
8	Carrera 45 con calle 50 (El Palo con Colombia)
9	Carrera 46 con calle 50 (Oriental con Colombia)
10	Carrera 49 con calle 50 (Junín con Colombia)
11	Carrera 46 con calle 51 (Oriental con La Playa)
12	Carrera 49 con calle 51A (Junín con La Playa)
13	Carrera 46 con calle 53 (Oriental con Maracaibo)
14	Carrera 43 con calle 55 (Girardot con Perú)
15	Carrera 45 con calle 56 (El Palo con Bolivia)
16	Carrera 46 con calle 56 (Oriental con Bolivia)
17	Carrera 49 con calle 56 (Venezuela con Bolivia)
18	Carrera 50 con calle 54 (Caracas con Palacé)
19	Carrera 48 con calle 58 (Ecuador con Oriental)
20	Carrera 50 con calle 58 (Palacé con Oriental)

Fuente: elaboración propia

2 RESULTADOS

2.1 Emisión de contaminantes en la zona de estudio

La tabla 3 presenta la estimación actual de la emisión diaria de contaminantes criterio (CO , COV's , NO_x , SO_x , PM_{10}) y gases de efecto invernadero (CO_2 , N_2O y CH_4) provenientes de las fuentes móviles.

La emisión diaria de contaminantes proveniente del parque automotor en la zona de estudio es de 558.7 t/día, de los cuales, el 9.35% proviene de los buses. Las motos contribuyen con el 88% de la emisión de contaminantes criterio y el 58.6% del total de contaminantes. La cantidad total de contaminantes criterio emitida por los buses en la zona de estudio es de 384.2 kg/día, que corresponde al 0.07% de la emisión total. La emisión de contaminantes de efecto invernadero proveniente de los buses es de 51.9 t/día, que corresponde al 9.28% de la emisión total. El contaminante que más emiten los buses es el dióxido de carbono con 51.8 t/día (9.28%).

La tabla 4 presenta la emisión diaria de contaminantes criterio y de efecto invernadero

Tabla 3. Emisión diaria de contaminantes proveniente del parque automotor en la zona de estudio en la actualidad

Vehículo	Criterio		Invernadero		Total	
	Emisión (g/día)	Porcentaje (%)	Emisión (g/día)	Porcentaje (%)	Emisión (g/día)	Porcentaje (%)
Motos	261507726	87.99	66016083	25.24	327523809	58.62
Automóviles	10070453	3.39	37285106	14.26	47355559	8.48
Taxis	23954435	8.06	66016083	25.24	89970518	16.10
Buses	384241	0.13	51850983	19.83	52235224	9.35
Camiones	1287713	0.43	40339171	15.43	41626884	7.45
Total	297204568	100.00	261507426	100.00	558711994	
Porcentaje	53.19		46.81			

Fuente: elaboración propia

proveniente de los buses con y sin la implementación del rediseño de rutas de transporte público colectivo en la zona de estudio. En ellas se puede observar que la emisión de contaminantes proveniente de los buses, excepto la de partículas, aumenta levemente con el rediseño de rutas.

2.2 Concentración de contaminantes en la zona de estudio

2.2.1. Partículas finas.

La tabla 5 presenta la concentración promedio de partículas finas en dos puntos seleccionados en la zona de estudio para el período de muestreo descrito en la misma.

2.2.2. Monóxido de carbono.

La tabla 6 presenta la concentración promedio de monóxido de carbono en diferentes puntos seleccionados en la zona de estudio para el período de muestreo comprendido entre el 16 y 22 de noviembre de 2009.

2.3. Modelación de la calidad del aire en la zona de estudio

2.3.1. Meteorología

Los datos meteorológicos fueron suministrados por REDAIRE y corresponden a los capturados en la estación meteorológica ubicada en el barrio Colombia entre enero de 2009 y abril de 2009. Los

Tabla 4. Comparación de la emisión diaria de contaminantes criterio proveniente de los buses en la zona de estudio

Contaminante		Estimación de emisiones (g/día)		Variación (%)
		Sin rediseño	Con rediseño	
Criterio	CO	109300	109763	0.42
	COV's	61495	61756	0.42
	NO _x	183479	184261	0.43
	SO _x	5194	5216	0.42
	PM10	24773	24371	-1.62
	Subtotal	384241	385367	0.29
Efecto Invernadero	CO ₂	51850565	52071656	0.43
	N ₂ O	418	419	0.24
	CH ₄	0	0	0.0
	Subtotal	51850983	52072075	0.43
Total		52235224	52457442	0.42

Fuente: elaboración propia.

Tabla 5. Concentración de PM_{2.5} a condiciones de referencia ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Punto	Dirección	Período de muestreo	Concentración ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)
1	Carrera 47 # 52-86	16 al 22 de noviembre de 2009	20
2	Carrera 45 N° 44-121	10 al 16 de diciembre de 2009	43

Fuente: elaboración propia

datos meteorológicos se utilizaron como insumo para la modelación de la calidad del aire en la zona de estudio.

La figura 3 muestra la distribución conjunta de velocidad y dirección del viento para los datos meteorológicos. En ella se observa que la dirección predominante del viento en la zona de estudio es de norte a sur (N), con una ligera presencia de vientos con dirección NNW.

2.3.2. Estabilidad atmosférica

Para la evaluación de las condiciones de estabilidad en la zona de estudio se utilizaron los datos meteorológicos para la estación meteorológica referida. Estos datos se procesaron para obtener la distribución conjunta de velocidad y dirección del viento por estabildades, utilizando la variabilidad en la dirección del viento (σ_q).

La tabla 7 presenta la distribución de las estabildades según la variabilidad en la dirección del viento. En ella se puede observar que la mayoría de los datos se distribuyen entre las estabildades A y F, con igual proporción. Por otro lado, el 45.7% de los datos se encuentran distribuidos entre las estabildades E y F, que no favorecen la dispersión de los contaminantes.

2.3.3. Modelación de la calidad del aire.

Las figuras 4 y 5 presentan la concentración de monóxido de carbono y partículas respirables (PM10), respectivamente, al nivel del piso para la zona de estudio con y sin la implementación del rediseño de rutas.

Las concentraciones de monóxido de carbono arrojadas por el modelo de dispersión sin la implementación del rediseño de rutas se ajustan bastante bien a los valores medidos en los diferentes puntos de muestreo (tabla 6). Estas concentraciones superan la norma octohoraria de calidad del aire (10 mg/m³) en la mayor parte de la zona de estudio.

Tabla 6. Concentración a condiciones de referencia de CO

Punto de medición	X	Y	CO (mg/m ³)
1	835000	1182747	23
2	835058	1182551	21
3	835244	1182515	27
4	835397	1182410	17
5	835498	1182599	21
6	835379	1182658	14
7	835547	1182694	15
8	835439	1182857	7
9	835336	1182924	17
10	835158	1182999	7
11	835392	1183012	13
12	835194	1183087	19
13	835784	1183197	
14	835616	1183405	17
15	835424	1183527	
16	835224	1183446	9
17	835597	1183671	7
18	835452	1183760	11
19	835000	1182747	26
20	835058	1182551	8

Fuente: elaboración propia.

Tabla 7. Distribución de las estabildades

Estabilidad	Clasificación	Porcentaje del tiempo
A	Muy inestable	33.4
B	Moderadamente inestable	3.6
C	Ligeramente inestable	6.2
D	Neutra	11.2
E	Ligeramente estable	12.5
F	Estable	33.1

Fuente: elaboración propia

En cuanto a la concentración de partículas, se tiene lo siguiente:

- Las partículas medidas en los dos sitios de la zona de estudio fueron las menores de $2.5\ \mu\text{m}$ (PM2.5).
- Las partículas simuladas por el modelo de dispersión en la zona de estudio fueron las menores de $10\ \mu\text{m}$ (PM10).
- Las partículas PM10 contienen las partículas PM2.5.
- Según el artículo “Relación entre las partículas finas (PM2.5) y respirables (PM10) en la ciudad de Medellín” en la zona del centro de Medellín, la relación PM2.5/PM10 es de 0.508 [4, 5]. Por lo tanto, la concentración de PM10 en la zona de estudio, a una altura entre 3 y 15 m, estaría entre 39 y $85\ \mu\text{g}/\text{m}^3$.
- Según la publicación “Contaminación atmosférica efectos sobre la salud pública” las concentraciones registradas en las cercanías de las fuentes móviles puede ser hasta 4 y 5 veces más altas que las que se obtienen encima de los

edificios que circundan las calles transitadas por los vehículos automotores [6].

- Por lo tanto, las concentraciones de PM10 en la zona de estudio, al nivel del suelo, estarían entre 156 y $340\ \mu\text{g}/\text{m}^3$.
- Teniendo en cuenta todo lo anterior, las concentraciones de PM10 arrojadas por el modelo de dispersión (al nivel del suelo) concuerdan con los valores de PM2.5 medidos en los diferentes puntos de muestreo (en las edificaciones).
- Las concentraciones de PM10 superan la norma anual de calidad del aire ($50\ \mu\text{g}/\text{m}^3$) en la mayor parte de la zona de estudio.

Las concentraciones de monóxido de carbono arrojadas por el modelo de dispersión con la implementación del rediseño de rutas no difieren en forma significativa con las arrojadas por el modelo sin el rediseño de rutas. Esta variación se encuentra entre -0.004% y 0.032% .

Por su parte, las concentraciones de PM10 arrojadas por el modelo de dispersión con la im-

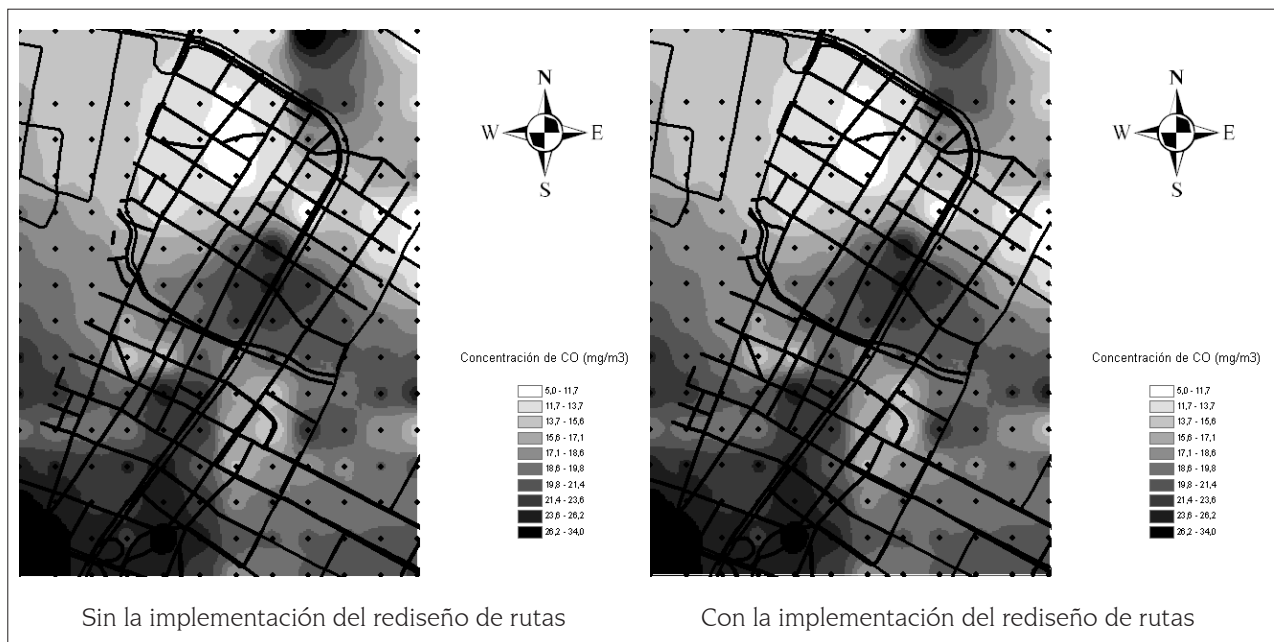


Figura 4. Concentración a condiciones de referencia de monóxido de carbono a nivel del piso (mg/m^3)

Fuente: elaboración propia

plementación del rediseño de rutas son superiores a las arrojadas por el modelo sin el rediseño de rutas. En algunos puntos, la concentración de PM₁₀ con la implementación del rediseño de rutas duplica las que hay en la actualidad sin el rediseño de rutas. Esta variación, que oscila entre 0.0 y 102%, alcanza valores en buena parte de la zona de estudio que superan la norma anual de calidad del aire (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$).

3 DISCUSIÓN

El rediseño de rutas implica eliminar o modificar ciertas rutas y reemplazarlas o fusionarlas con otras. En este caso, con el rediseño de rutas de transporte público colectivo propuesto, el recorrido de buses aumenta en 161 viajes por día en la zona de estudio, manteniendo la frecuencia de las rutas anteriores para suplir la demanda de las mismas. La redistribución de rutas hace que en las calles 53 y 55 el número de recorridos disminuya en un 77 y 84%, respectivamente, mientras que en la carrera 49 (Junín) y la Calle 56 (Bolivia) el aumento es

de 1.000 y 400%, respectivamente. La concentración de partículas en inmediaciones de las dos primeras vías aumenta considerablemente, mientras que en las dos últimas disminuye pero muy levemente.

4 CONCLUSIONES

La emisión de contaminantes proveniente de los buses, excepto las partículas, aumenta levemente con la implementación del rediseño de rutas de transporte público colectivo complementarias al sistema integrado de transporte en el Valle de Aburrá propuesto. Paradójicamente, es la concentración de partículas la que aumenta, alcanzando valores que superan la norma anual de calidad del aire (50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$) en la mayor parte de la zona de estudio.

Desde el punto de vista ambiental, el rediseño afecta la calidad del aire en las zonas aledañas a las vías en las cuales aumenta el recorrido de buses, especialmente en lo relacionado con partículas PM₁₀.

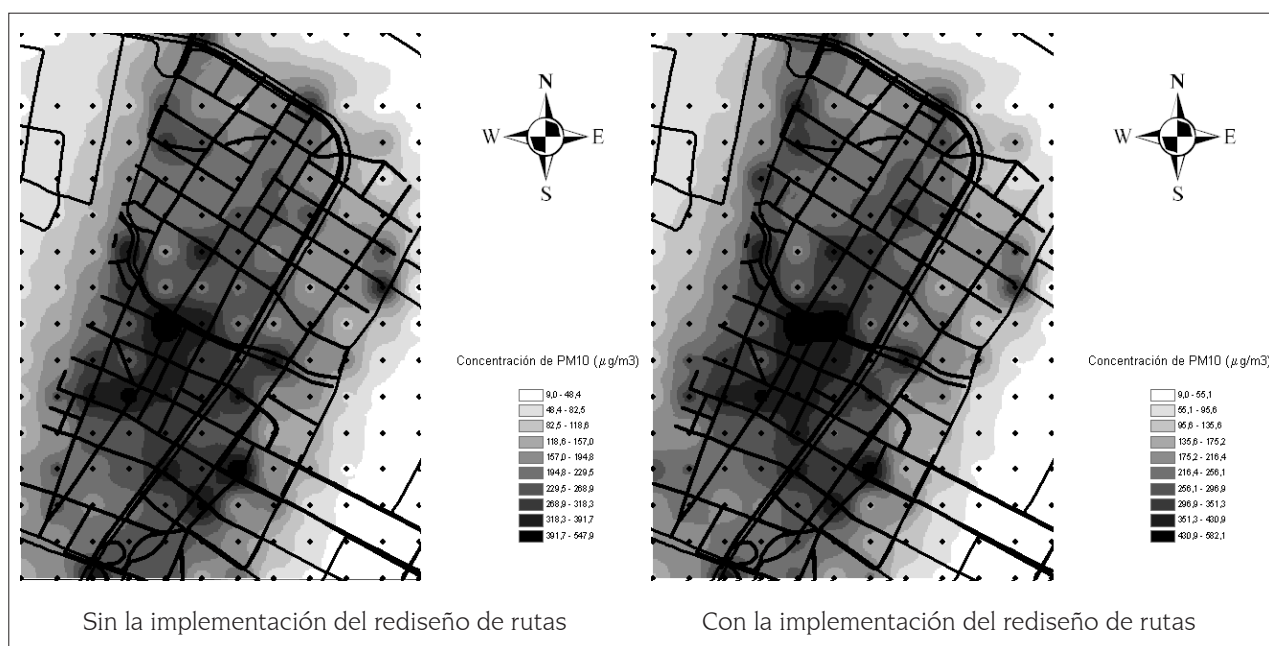


Figura 5. Concentración a condiciones de referencia de partículas respirables PM₁₀ a nivel del piso ($\mu\text{g}/\text{m}^3$)

Fuente: elaboración propia

5 RECOMENDACIONES

Con miras a generar aportes a la habitabilidad de la ciudad, las acciones de desarrollo sustentable en materia de movilidad y en especial del transporte masivo serán la base para construir en el futuro inmediato una urbe sustentable que evite la tendencia desfavorable de seguir degradando nuestro entorno. Las acciones propuestas en este artículo buscan revertir las tendencias de contaminación, escasa movilidad, precaria calidad en el servicio de transporte y desarticulación entre los sistemas. Esta metodología debe ser tenida en cuenta para evaluar el impacto ambiental sobre la calidad del aire en los proyectos de rediseño de rutas de transporte público colectivo en las principales ciudades del mundo.

REFERENCIAS

- [1] Alcaldía de Medellín. "Plan de desarrollo 2008-2011," [En línea], acceso enero 2010; Disponible: <http://www.medellin.gov.co>, 2010.
- [2] International Sustainable Systems Research Center. "Software International Vehicle Emissions Model. Los Angeles, USA," [En línea], acceso enero 2010; Disponible: <http://www.issrc.org/>, 2008.
- [3] R. W. Brode, y D. Atkinson, User's guide for the industrial source complex (ISC3) dispersion models, Washington DC: U.S. Environmental Protection Agency, Office of Air Quality Planning and Standards Emissions Monitoring and Analysis Division, 1999, 16 p.
- [4] Universidad de Medellín, y Universidad de Antioquia, "Consultoría para la evaluación de la calidad del aire, intensidad de ruido y sus efectos en la salud en 25 sitios de alto tráfico vehicular de la ciudad de Medellín," Secretaría del Medio Ambiente de Medellín, 2006.
- [5] C. Echeverri, y G. Maya, "Relación entre las partículas finas (PM2.5) y respirables (PM10) en la ciudad de Medellín," Revista Ingenierías Universidad de Medellín, vol. 7, no. 12, pp. 23-42, 2008.
- [6] E. Martínez López et al., "Diagnóstico de la contaminación atmosférica en el Valle de Aburrá," Contaminación atmosférica y efectos sobre la salud de la población. Medellín y su área metropolitana, Documento 2, Grupo de Epidemiología Universidad de Antioquia, ed., Municipio de Medellín, Municipio de Itagüí, Área Metropolitana del Valle de Aburrá y Universidad de Antioquia. Convenio interadministrativo 477/05, 2007, pp. 174-262.