

Metodología para la selección de sitios de monitoreo atmosférico en zonas urbanas afectadas por las emisiones de fuentes móviles

Methodology for selecting atmospheric monitoring sites in urban areas affected by emissions from mobile sources

V. Álvarez-Narvaez¹, E. Quiñones-Bolaños², M.E Huertas-Bolaños³,
C.Arciniegas-Suárez⁴, J. Berdugo-Arrieta⁵, D. Ramírez-Rivas⁶

¹MSc. Ing. Ambiental Unicartagena, vanesssal201@gmail.com; ²Dr. Ing. Ambiental, Docente Unicartagena, equinonesb@unicartagena.edu.co; ³Doctora en Ciencia de la Ingeniería, Docente UTB, mhurtas@unitecnologica.edu.co; ⁴MSc. Ing. Ambiental y Sanitaria, Docente FUTCO, cearsu@yahoo.es; ⁵Ing. Civil, Unicartagena, jberdugo@hotmail.com; ⁶Ing. Civil Unicartagena. dramirezr@unicartagena.edu.co

Recibido: oct 16, 2015. **Aceptado:** jun 20, 2016. **Versión final:** jun 20, 2016

RESUMEN

El monitoreo atmosférico es una de las etapas fundamentales en la identificación de estrategias para minimizar, prevenir y controlar los impactos de la dispersión de contaminantes en el aire, sobre la salud pública y el ambiente. Por tanto, el objetivo principal de este artículo consiste en proponer una metodología para la selección de sitios de monitoreo atmosférico en zonas urbanas afectadas por las emisiones de fuentes móviles. Primero se identificaron los sitios que presentaban mayor flujo vehicular y se priorizaron según los siguientes criterios de selección: seguridad, influencia de otras fuentes, facilidad del montaje de los equipos, accesibilidad al sitio, identificación de barreras y obstáculos, registro histórico de datos y grado de concentración del contaminante, en este caso monóxido de carbono, usando el software CALINE 3. La modelación agrupó datos característicos de las vías, meteorológicos y de flujo vehicular de un año típico de la zona en estudio. A cada uno de estos parámetros le es asignada una valoración cuantitativa, que define los sitios donde se realizará el monitoreo. Como resultado se desarrolló una guía para seleccionar los lugares en donde se puedan desarrollar campañas de monitoreo atmosférico, asociadas a fuentes móviles. La metodología fue aplicada en la ciudad de Cartagena de Indias haciendo uso del modelo de calidad del aire CALINE3.

Palabras Clave: CALINE 3; contaminantes atmosféricos; fuentes móviles; sitios de monitoreo atmosférico.

ABSTRACT

Atmospheric monitoring is one of the fundamental steps in identifying strategies to minimize, prevent and control the impact of the dispersion of pollutants in the air, on public health and the environment. Therefore, the main objective of this article is to propose a methodology for selecting air monitoring sites in urban areas affected by emissions from mobile sources. First, the places with the highest vehicular flow were identified and prioritized according to the following selection criteria: safety, influence of other sources, ease of assembly of equipment, accessibility to the site, identification of barriers and obstacles, historical record of data and degree concentration of the pollutant: in this case carbon monoxide, using CALINE 3 software. The modeling grouped characteristic data related with roads, meteorology and vehicular flow of a typical year of the zone under study. A quantitative assessment is assigned to each of these parameters, which defines the sites where the monitoring will be performed. As a result, it was developed a guide to select those places where atmospheric monitoring campaigns related with mobile sources can be held. This methodology was applied in the city of Cartagena de Indias by using air quality model for assessment, CALINE 3.

Keywords: air quality monitoring sites; CALINE 3; mobile sources; pollutants.

1. INTRODUCCIÓN

El monitoreo atmosférico es la base fundamental para formular estándares de calidad de aire, adelantar estudios epidemiológicos que relacionen los efectos de las concentraciones de los contaminantes con los daños en la salud, especificar tipos y fuentes emisoras y planificar estrategias de control y políticas de desarrollo, como se puede ver en [1]. La mayoría de países, a nivel mundial, tienen reglamentado por lo menos un manual con lineamientos generales para llevar a cabo un adecuado monitoreo atmosférico, tal es el caso de Estados Unidos, [2], Chile, [3], México, [4], la Unión Europea, [5] y Colombia, [6], por mencionar algunos. En Colombia, estos manuales han servido de guía para el diseño de la red de evaluación y seguimiento de la calidad de aire en ciudades como Neiva, Huila, 7, Cartagena de Indias, [8], Bogotá, [9] y Riohacha, [10]. A pesar de la gran aplicabilidad de estas guías, aún se requiere una orientación más específica para adelantar estudios ajustados a las características de las diferentes fuentes de emisión. El proceso de selección de sitios adecuados para el monitoreo atmosférico en zonas urbanas afectada por las emisiones de fuentes móviles es una de las áreas que requiere mayor orientación específica.

Blaser, en [11], estudió la dispersión de la contaminación atmosférica causada por el tráfico vehicular en Ciudad de Guatemala y San Salvador, en ellas se seleccionaron siete y cinco sitios de monitoreo distribuidos en un área urbana de 692 km² y 652.31 km², respectivamente. Singh & Gokhale, en [12], estudiaron la variación espacio temporal de la calidad del aire debido al tráfico vehicular, seleccionando tres sitios de monitoreo en las inmediaciones de un corredor vial en Guwahati, India (área urbana 216 km²). Por otra parte, en [13] se reportó la existencia de tres sitios de monitoreo atmosférico en la ciudad de Hong Kong Island (80.5 km²), con los cuales se trabajó la modelación matemática del tráfico vehicular y la emisión de contaminantes atmosféricos. En cada uno de estos estudios, el factor principal en la selección de los sitios fue su cercanía a carreteras urbanas con alto tráfico vehicular y el cumplimiento de las condiciones necesarias para aplicar el modelo matemático que tenían de referencia. En sus conclusiones, también señalan que lo ideal sería tener un mayor número de sitios de monitoreo. Sin embargo, por limitaciones económicas no siempre se hace posible. Por consiguiente, en ciudades medianas de países en desarrollo, con una malla vial donde pueden existir varios sitios (> 10) adecuados o que se pueden adecuar, se hace necesario contar con una guía que incluya las consideraciones económicas al momento de evaluar el número de sitios donde se puede adelantar un apropiado monitoreo atmosférico, manteniendo la confiabilidad técnica de los

datos y la responsabilidad sobre las implicaciones ambientales y sociales del estudio en referencia.

Existen varios procedimientos de selección de los sitios en donde se debe instalar un sistema de monitoreo atmosférico, que van desde la elaboración de una cuadrícula del área a monitorear, [14], colocando los sitios de monitoreo en las aristas de la cuadrícula, hasta el uso de complejos modelos estadísticos que proporcionan el número y la distribución óptima de los sitios de monitoreo, como se muestra en [12]. Las desventajas que presentan este tipo de modelos es que dependen estrechamente de las mediciones previas que se tengan y no optimizan el proceso en relación con las limitaciones económicas de la entidad profesional investigador. Las guías ambientales proponen algunos requerimientos prácticos al momento seguridad, la accesibilidad, la infraestructura, incidencia de otras fuentes, contaminante y grado de contaminación, entre otros. Sin embargo, no es incluido el factor económico de esos requerimientos técnicos, aunque sea de manera cualitativa como factor decisorio en la selección de los sitios.

Por todo lo anterior, el objetivo de este artículo es diseñar y aplicar una metodología que oriente a los diferentes profesionales y entidades ambientales en la selección de los sitios más adecuados en donde se pueda instalar un sistema de monitoreo atmosférico, teniendo en cuenta un nivel mínimo de inversión económica previamente establecido, que permita investigar la incidencia del tráfico vehicular en la calidad de aire de acuerdo a las características sociales, económicas y técnicas en centros urbanos en países en desarrollo.

2. METODOLOGÍA

La metodología se basa en el método de jerarquización analítica o ponderación de factores descritos en [15]. En este trabajo se tomará como referencia la ciudad de Cartagena de Indias. Las etapas del método son las siguientes:

- a) Identificar la meta: esta etapa consiste en definir el objetivo de la aplicación de la metodología. En este caso el objetivo es adelantar un monitoreo atmosférico que contabilice, principalmente, las concentraciones provenientes de las fuentes móviles de la ciudad de Cartagena. Se seleccionó como contaminante a monitorear el monóxido de carbono, dado que de acuerdo con [8], es este contaminante el que más emite el tráfico vehicular de la ciudad.
- b) Identificar las alternativas: en esta etapa se deben definir y preseleccionar el número de sectores donde posiblemente se pueda adelantar el monitoreo atmosférico. El parque automotor en Cartagena de Indias (Colombia) es, según [15], de aproximadamente 96 905 vehículos que circulan en un 90 % sobre seis vías principales: Avenida Pedro Heredia (~13 km de longitud), Transversal 54 (~13 km), Avenida San Martín-Avenida Santander

(~10.0 km), Avenida del Lago (~3.1 km), Avenida Pedro Romero (~5.5 km) y el Corredor de Carga (~4.5 km). Los sectores preseleccionados fueron: dos en la avenida Pedro de Heredia (Mercado de Bazurto y CAI María Auxiliadora), uno en la Transversal 54 (Bomba el Amparo), uno el Corredor de Carga (Peaje de Ceballos), uno en la Av. San Martín (Base Naval) y otro sobre la Avenida del Lago (EBAR).

- c) Factores en la toma de decisión: se refiere a definir los elementos o factores que contribuyan a escoger algunos de los sitios preseleccionados, teniendo en cuenta el nivel de inversión económica, la cual estaría asociada a los costos necesarios para adecuar los sitios, con el fin de adelantar un monitoreo atmosférico confiable. En este sentido fueron propuestos siete factores: (1) seguridad, (2) estudios para evaluar la incidencia de otras fuentes (e.g. fuentes fijas), (3) requerimientos de espacio para la instalación de equipos, (4) mejoras en la accesibilidad al sitio, (5) eliminación de obstáculos que interfirieran la dispersión de contaminantes, (6) la obtención de un registro de datos suficientes en tiempo para un adecuado análisis estadístico y (7) la instrumentación y equipos necesarios para el grado de contaminación detectado o previsto para el sitio de monitoreo elegido. Estos siete factores han sido propuestos, de manera independiente y no necesariamente coincidente en cada factor por [17, 18, 19, 20, 21, 22].
- d) Asignar un peso a cada factor: a cada factor se le dio un peso de 0 a 1, de acuerdo al porcentaje de participación en el presupuesto o inversión económica total planificada para adecuar un sitio de monitoreo, según los siguientes pesos: (1) seguridad = 0,10; (2) Incidencia de otras fuentes = 0,20; (3) Requerimientos de Espacios = 0,15; (4) Accesibilidad = 0,10; (5) Obstáculos = 0,10; (6) Registro histórico de datos = 0,10; y (7) Grado de Contaminación = 0,25. La sumatoria de todos los pesos es de 1 que representa el 100% de la inversión económica preestablecida. Estos porcentajes fueron establecidos en reunión de expertos, después de haber hecho un análisis de costos.
- e) Asignar un puntaje para cada una de las alternativas: el puntaje para cada uno de los sectores preseleccionados, se fijó entre 10 y 50 unidades monetarias. En esta escala, un puntaje de 50 indica que se requiere una alta inversión económica y 10 una baja inversión para adecuar el sector a las exigencias del factor evaluado. Entre más bajo sea calificado el factor, mejor es la condición económica y técnica para el monitoreo atmosférico. Una inversión económica de 50 unidades monetarias también representa la máxima inversión por sector que se puede hacer y si suponemos, por ejemplo, que se tiene un total de 75 unidades para el proyecto de

investigación, la pregunta es ¿cuántos sectores se pueden monitorear?

- f) Calcular el puntaje total de cada una de las alternativas: esta etapa consiste en aplicar un promedio ponderado que vincula cada uno los factores con los puntajes asignados a cada alternativa. El puntaje total de cada alternativa es obtenido mediante la ecuación 1:

$$S_j = \sum_i^7 w_i r_{ij} \quad (1)$$

Donde:

S = es el puntaje total para la alternativa (sitio preseleccionado) j

ω = es el peso para cada factor i

r = es el puntaje asignado a la alternativa j en función del factor i .

En coherencia con las metas establecidas en el ítem a , las tres alternativas con los puntajes totales más bajos son los sitios de monitoreo (alternativas) seleccionados.

BREVE DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

Cartagena de Indias, se localiza al noroccidente de Colombia en el departamento de Bolívar, a $10^{\circ} 26'$ latitud Norte y $75^{\circ} 33'$ longitud Oeste. La población total de la cabecera municipal es de 1 001 755 habitantes, [23], siendo la quinta ciudad más poblada del país. Con una extensión territorial de 609,1 km², Cartagena tiene una topografía plana y un clima tropical cálido-húmedo con vientos que oscilan entre 7,0 y 10,0 m/s del Norte/Noreste, para los meses entre diciembre y abril y entre 2,5 y 5,0 m/s con dirección variable para los meses de mayo a noviembre. La temperatura máxima media es de 34,0 °C (agosto), la mínima media de 22,4 °C (enero) y la media mensual 27,2 °C, con un régimen de lluvias máximo total anual de 976 mm y un promedio mensual 51,4 mm, de acuerdo con [24].

CRITERIOS PARA LA ASIGNACIÓN DE PUNTAJES

Seguridad. La puntuación fue asignada teniendo presente que 50 unidades monetarias indican la necesidad de hacer una alta inversión económica para resguardar los equipos ante la probabilidad de robos, vandalismo y por las acciones a tomar para preservar la vida del personal a cargo del monitoreo. Este factor fue determinado teniendo en cuenta un informe de la secretaria del interior del Distrito de Cartagena y un mapa de seguridad, [25], que muestra las denuncias por hurtos, presencia de grupos criminales y de violencia en las principales ciudades de Colombia.

Influencia de otras fuentes. Un puntaje de 50 unidades monetarias significa una alta inversión económica,

debido a que por la cercanía de los puntos preseleccionados a las zonas industriales de Cartagena, conformada aproximadamente por 180 grandes y medianas empresas desde las cuales se emiten contaminantes a la atmósfera, [26], habrá que implementar otros estudios complementarios para discriminar los aportes individuales de cada fuente y así poder discernir el aporte individual debido al tráfico vehicular.

Requerimiento de Espacio. Un puntaje de 50 unidades monetarias significa una alta inversión económica para adecuar los espacios disponibles en el sitio evaluado, de tal manera que se garantice el cumplimiento de los criterios descritos en [27] para el monitoreo de monóxido de carbono. Uno de los criterios es que el equipo debe tener un flujo de aire sin restricciones, 270° alrededor de la toma de muestra o un ángulo de 120° libre alrededor de un área de 10m. En este componente se adelantaron visitas de campo a cada sitio preseleccionado, haciendo un registro fotográfico y un levantamiento de distancias y espacios en cada sitio.

Accesibilidad. Un puntaje de 50 unidades monetarias significa una alta inversión económica para que el personal del estudio tenga fácil acceso, para recolectar muestras, calibrar equipos y realizar mantenimiento. También incluye las inversiones para que los equipos automáticos puedan contar con acceso a una conexión telefónica y con energía eléctrica segura, como se ve en [6].

Distancia a obstáculos. Un puntaje de 50 unidades monetarias significa que es necesario hacer una alta

inversión económica para adecuar o remover obstáculos (edificios, balcones, árboles, vías sin pavimento) que afecten el movimiento del aire en el sitio de monitoreo. Mediante una inspección de campo se determinó la existencia de obstáculos en cada uno de los estudios preseleccionados. Algunos de los criterios que se tomaron en cuenta son: la distancia del equipo al árbol más cercano, > 20 m de la circunferencia que marca el follaje o las raíces y por lo menos 10 m si los árboles actúan como un obstáculo; la distancia del equipo a obstáculos como edificios, que debe ser, mínimo, el doble de la altura en que sobresale el obstáculo por encima del equipo de medición. Se recomienda un radio libre de 10 m. La distancia a las carreteras/caminos debe ser de 2 a 10m del borde a la línea de tráfico más cercana, como se observa en [27].

Registro histórico de datos. Un puntaje de 50 unidades monetarias implica una alta inversión en tiempo, por cuanto es imprescindible reunir toda la información disponible sobre la calidad de aire de la ciudad, la magnitud y el alcance de las investigaciones llevadas a cabo para satisfacer los requerimientos apropiados de una línea base confiable. Para el caso de la ciudad de Cartagena, la información recolectada corresponde a un monitoreo de calidad de aire realizado por [28] durante dos meses sobre más de 20 sitios distribuidos en la zona urbana de la ciudad, un informe de [29] realizada en el peaje de Ceballos y por los monitoreos que adelanta actualmente el Establecimiento Público Ambiental de Cartagena en cinco sitios estratégicos de la ciudad.



Figura 1. Vías principales, sectores preseleccionados y seguridad en la ciudad.

Grado de Contaminación: un puntaje de 50 unidades monetarias significa una alta inversión económica para adquirir los equipos de monitoreo y la instrumentación con el nivel de detección, resolución y precisión aceptable para el grado de contaminación que se prevé o existe en la zona de medición. Estudios revelan que entre menor sea la concentración del contaminante, mayor es el costo de medición, [30]. El grado de contaminación en los sitios preseleccionados se determinó mediante una modelación matemática preliminar usando el modelo de calidad del aire CALINE3, debido a su simplicidad y por ser exclusivo para caracterizar la dispersión de contaminantes originados por el tráfico vehicular en vías urbanas tales como carreteras, autopistas y puentes. El modelo CALINE3 fue desarrollado por el departamento de transporte de California de los Estados Unidos de América, y está basado en el modelo de la pluma gaussiana que usa el concepto de zona de mezcla para caracterizar el contaminante que se está dispersando sobre receptores localizados hasta 500 metros de la vía, ver [31]. Los datos meteorológicos corresponden a información secundaria de datos horarios, de viento y radiación solar, obtenidos en tres estaciones (ver figura

1) durante el año 2014, [32]. La altura de capa de mezcla fue estimada mediante la parametrización de Monin-Obukov. Los factores de emisión utilizados para la calibración del modelo, con respecto a las emisiones de monóxido de carbono fueron: 24 g/km para autos, 4 g/km para Buses, 18 g/km para motos y 850 g/km para vehículos pesados, considerado por [33] como el peor escenario de emisión. Más de un receptor fue ubicado de manera paralela a las vías, con el propósito de identificar el punto de mayor concentración de CO.

El flujo vehicular basado en información secundaria, corresponde al número de vehículos que circulan por hora, por el sitio preseleccionado durante las franjas de 6:00 a.m. a 10:00 a.m. y 11:00 a.m. a 2:00 p.m., por un periodo de dos meses. El volumen vehicular que circuló fue clasificado de la siguiente manera, considerando que son las categorías típicas de circulación en la ciudad: (a) autos: automóviles, camionetas, camperos; (b) buses: busetas, microbuses, buses ejecutivos; (c) camiones: camiones con o más de cuatro llantas; y (d) motos. La tabla I presenta los datos de flujo vehicular utilizados en las modelaciones con CALINE 3 para cada uno de los sitios.

TABLA I
VOLUMEN DE FLUJO VEHICULAR POR HORA PARA CADA SITIO PRESELECCIONADO

Sitios	Motos	Automóviles	Buses y Busetas	Vehículos pesados
Base Naval	11	750	125	14
EBAR	47	93	12	5
Bomba al amparo	701	362	100	19
Mercado	128	182	128	21
Peaje de Ceballo	303	315	79	277
CAI María Auxiliadora	140	232	124	10

Fuente: IHSA Unicartagena, 2011

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Después de analizar, modelar y evaluar las características de los sitios preseleccionados con respecto a cada uno de los factores establecidos, estos son los principales resultados encontrados:

En relación con la seguridad, los sitios se pueden catalogar desde muy seguro hasta muy inseguro. El sector de la Base Naval en Cartagena se caracteriza por ser una de las zonas más seguras, por tener la presencia de una ciudadela militar con muelles, edificios de apoyo logístico, un centro habitacional para oficiales, un hospital de tercer nivel y un batallón de la infantería marina de Colombia. El CAI de María Auxiliar también es un sector seguro por la presencia de un centro de atención inmediata de la policía de Cartagena. La Bomba del Amparo y el Peaje de Ceballos son sectores donde hay empresas que tienen vigilancia privada, que de alguna forma brinda protección a la zona. Sin embargo, de acuerdo con información de la Secretaría del Interior del Distrito de Cartagena, se indica la presencia de más de 18 pandillas juveniles que pueden poner en riesgo la seguridad de los equipos. Los sectores que requieren mayor seguridad son la EBAR de la Av. del lago y el Mercado de Bazaruto, por registrar la presencia de más de 34 pandillas y por cuanto presentan el mayor número de denuncias por robos y vandalismo como lo confirma la información publicada por [25] que se muestra en la figura 1, en donde el color rojo representa la zona con el más alto nivel de peligrosidad, el amarillo un nivel intermedio y el verde el más bajo nivel. Estas condiciones deben valorarse muy bien, ya que el sitio seleccionado no debe comprometer la seguridad de los equipos, ni de los operadores, y debe contar con los suficientes resguardos contra el vandalismo, así como con el acceso limitado mediante

cerraduras y mallas de seguridad, [6]. Acorde a esta descripción, los seis sectores preseleccionados son calificados y los resultados se muestran en la Tabla III.

En relación con la influencia de otras fuentes diferentes a las del tráfico vehicular, el uso del suelo sector Base Naval de Cartagena está clasificado como institucional, donde las emisiones atmosféricas se limitan al uso de aires acondicionados. Los sectores de María Auxiliadora, Bomba del Amparo, EBAR Av. del Lago y Peaje de Ceballos son zonas clasificadas en el plan de ordenamiento territorial de la ciudad de Cartagena de Indias, vigente al 2015, como zonas mixtas de características residenciales, comerciales con instituciones educativas donde no hay fuente significativa de emisiones de monóxido de Carbono. El Mercado de Bazaruto es un sector mixto donde predomina la actividad comercial de venta de alimentos y ropa. La descomposición de los residuos orgánicos y la presencia de algunas chimeneas de asaderos son las fuentes de emisión de contaminantes a la atmósfera. En el área urbana de Cartagena existen tres parques industriales y cuatro muelles. Sin embargo, por las actividades comerciales que adelantan y la dirección del viento predominante, no generan emisiones significativas de monóxido de carbono. Es necesario mencionar que en la actualidad se adelantan algunas construcciones civiles en la ciudad tales como la pavimentación de la vía en el sector del Mercado de Bazaruto, el túnel de Crespo y algunas obras en el área del terminal de transporte, como se muestra en la figura 2.

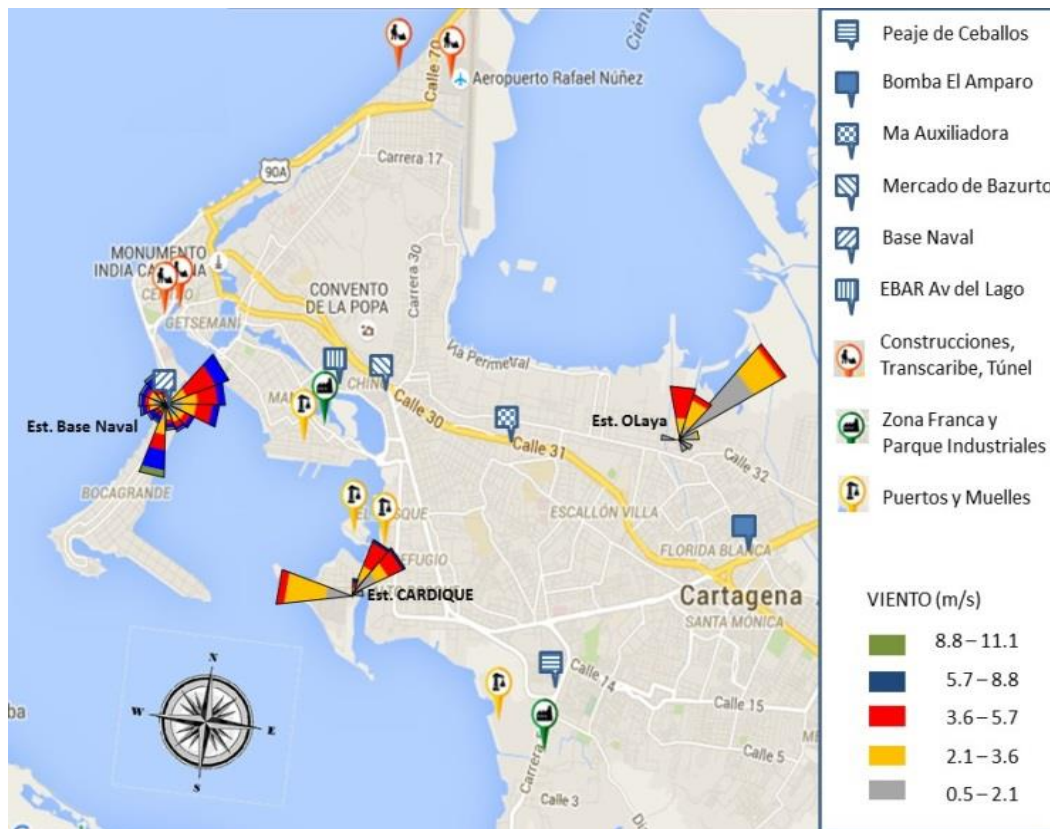


Figura 2. Influencia de otras fuentes a los sitios preseleccionados.

En relación con el tercer factor, el de requerimiento de espacios, los sectores de EBAR de Av. del lago y Mercado de Bazurto son los únicos donde se observan poco espacio por cuanto ambos tienen una gran afluencia de personas y de infraestructuras móviles que impiden la libre circulación del flujo de aire. En el resto de sectores preseleccionados, se identificaron sitios donde se pueden instalar los equipos en cumplimiento con los requisitos establecidos por [27].

En cuanto a la accesibilidad, el menor valor asignado es el del CAI de María Auxiliadora, debido a que hay disponibilidad de 24 horas para ingresar al lugar y facilidad de acceder a conexiones eléctricas. Los valores más altos se presentan para la Base Naval y el Mercado de Bazurto. Para el primero se deben tramitar las autorizaciones de ingreso, gestionar las instalaciones eléctricas y servicios que, por seguridad, demoran en aprobar; para el segundo, por ser un lugar donde confluye la mayor parte de la población de la ciudad resulta ser bastante difícil acceder. En relación al inciso de obstáculos, observamos que en el sector de la Base Naval hay una barrera natural de árboles entre el tráfico vehicular y el sector de la Base Naval que absorberían

en gran medida las emisiones de CO en el lugar (ver figura 3). Este fenómeno también se aprecia en el sector de EBAR Av del Lago.

En relación a los registros históricos de monitoreo de la calidad de aire adelantados en la ciudad de Cartagena y específicamente sobre los sitios evaluados, como se muestra en la tabla II, se encontró que existen diversas campañas de monitoreo realizadas donde se han monitoreado principalmente contaminantes criterio como PM₁₀, SO₂, NO₂, CO y PST. Sin embargo, la mayoría de estas campañas se han realizado por tiempos menores a un mes, a excepción del monitoreo que se adelanta en el sitio de la Base Naval, que es continuo desde el 2014 y hace parte de la Red de Monitoreo que viene implementando el Establecimiento Público Ambiental de Cartagena, [32]. Con base en la calidad de información y la necesidad de invertir mayores recursos económicos para complementar los estudios existentes, los seis sitios preseleccionados fueron calificados y los resultados se muestran en la tabla III.



Figura 3. Barreras y obstáculos en el Sector Base Naval.

TABLA II.
REGISTROS HISTÓRICOS DE LOS SITIOS PRESELECCIONADOS

	Base Naval	Bomba Amparo	CAI María Auxiliadora	Avenida del lago EBAR	Mercado Bazurto	Peaje Ceballo
Tipo de Monitoreo	Continuo desde 2014.	En total se han realizado ocho campañas puntuales con tiempo de monitoreo menores de un mes, en el área de influencia de estos sitios.			Dos campañas de monitoreo por año desde 2009	
Referencia Bibliográfica	[32]	[28, 29, 34]				
Principal conclusión de los estudios previos	La mayor fuente de contaminación atmosférica en la ciudad de Cartagena es el tráfico automotor sin contemplar las fuentes ubicadas en la zona industrial de Mamonal las cuales se encuentran fuera del área de influencia del proyecto.					

Los resultados de la modelación matemática con CALINE3 (ver figura 4) muestran que los sitios en que se presenta mayor concentración de CO es el Peaje de Ceballo, seguido del CAI María Auxiliadora y la EBAR de la Av. del Lago, a diferencia de la Base Naval y el Mercado de Bazurto. Quizás esto se deba a las condiciones meteorológicas de las zonas, las barreras, los obstáculos y al flujo vehicular circundante presente en cada sector. Es necesario aclarar que estos resultados únicamente consideran como fuente de emisión aquellas provenientes del tráfico vehicular. Los resultados entregados por el modelo no fueron comparados con datos experimentales, dado que el proceso de modelación tiene como propósito indicar bajo el escenario de mayores emisiones posibles de contaminantes, cuáles serían los sitios que presentan las

mayores concentraciones de dichos contaminantes, teniendo en cuenta que la experiencia indica que el proceso de calibración de los modelos es más confiable cuando se presentan altas concentraciones, como se indica en [30].

La Resolución 610 de 2010 establece los límites permisibles de calidad del aire de los contaminantes criterio en Colombia. Las máximas concentraciones anuales permitidas para CO corresponden a $10\,000\mu\text{g}/\text{m}^3$, las cuales no son excedidas de acuerdo con las concentraciones estimadas en cada sitio de monitoreo, excepto por el Peaje de Ceballos, para la categoría de vehículos pesados, como se observa en la figura 4.

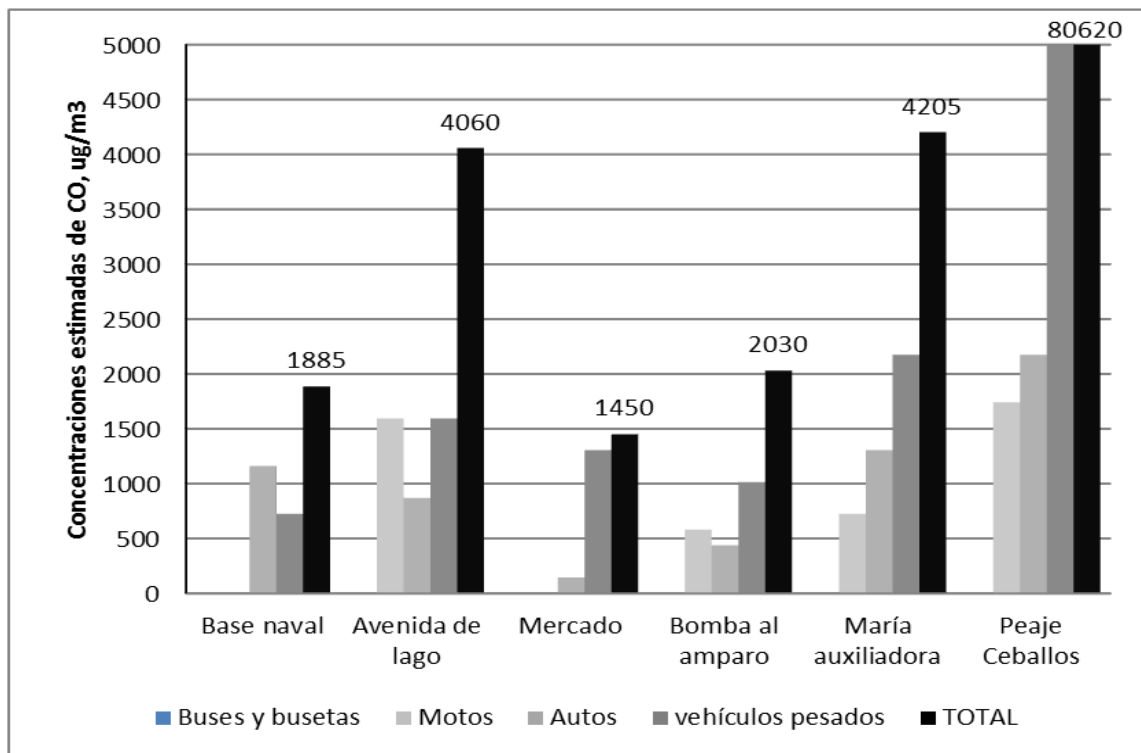


Figura 4. Concentraciones de CO µg/m³, emitidas por las distintas categorías.

TABLA III.
RESULTADOS DE LA PONDERACIÓN

Factores		Sitios preseleccionado					
Denominación	Peso	Base Naval	Bomba Amparo	CAI María Auxiliadora	Avenida del lago EBAR	Mercado Bazurto	Peaje Ceballos
Seguridad	0,10	0	30	10	50	50	30
Influencia de otras fuentes	0,20	20	30	30	40	40	40
Requerimiento de Espacios	0,15	20	20	20	40	40	20
Accesibilidad	0,10	50	20	10	30	50	20
Obstáculos	0,10	50	10	10	50	40	10
Registro histórico de datos	0,10	20	30	40	40	40	20
Grado de Contaminación	0,25	30	30	20	20	30	20
Σ		26.5	25.5	21	36	39,5	24

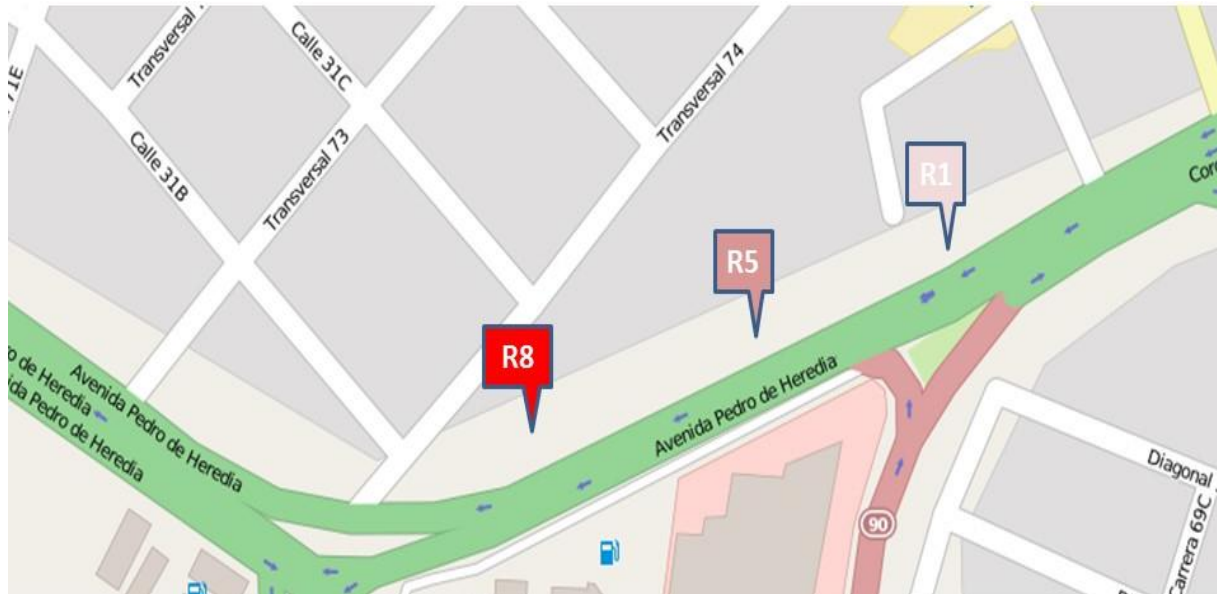


Figura 5. Selección y localización de los receptores alrededor de la vía en el sector Bomba del Amparo.

También se muestra que las concentraciones de CO provenientes de los buses y busetas son insignificantes, pues el factor de emisión asignado es el de menor valor, respecto a los demás vehículos.

La tabla III muestra los resultados finales de la ponderación de factores, la cual muestra que el orden (de menor a mayor) para el monitoreo sería: María Auxiliadora, Peaje de Ceballos, Bomba del Amparo, Base Naval, EBAR de la Av del Lago y Mercado de Bazurto. Dado que la disponibilidad es de 75 puntos, encontramos que el número de sitios en donde se podrían implementar las estaciones de monitoreo de la calidad de Aire en la ciudad de Cartagena, sería de tres, considerando que la suma de los tres sitios con los menores puntajes es de 70,5 en un área de estudio aproximada de 50km². Esto concuerda con el número de sitios recomendados por [12] en Guwahati, India (área urbana 216km²) y [13] en la ciudad de Hong Kong Island (80,5km²) con los cuales se trabajó la modelación matemática del tráfico vehicular y la emisión de contaminantes atmosféricos.

Una vez seleccionados los tres sectores que se adecuan a las condiciones técnicas y económicas, los sitios específicos de localización de los equipos fueron identificados con los resultados de la modelación matemática. La figura 5 muestra la concentración de CO alrededor de la vía en el sector de la Bomba del Amparo, la cual sigue un recorrido en la dirección del viento, donde la concentración en los receptores es de $R8 > R5 > R1$. Por lo tanto, se recomendó instalar los equipos sobre el sitio R8. Similar análisis se hizo para los demás puntos.

4. CONCLUSIONES

La metodología recomendada constituye una guía aplicable a la evaluación de sitios para la ubicación de estaciones de monitoreo. Esta metodología selecciona los sitios de monitoreo de concentraciones provenientes únicamente de fuentes vehiculares, partiendo de siete criterios: (1) seguridad, (2) influencia de otras fuentes, (3) requerimiento de equipos, (4) accesibilidad, (5) obstáculos, (6) registro de datos históricos y (7) grado de contaminación. A cada uno de estos factores se le asigna un peso ponderado y un puntaje asociado al costo económico que conlleva. Los sitios que cumplan con los requisitos económicos y técnicos son, entonces, seleccionados para el monitoreo. Esta metodología se sugiere aplicar en zonas urbanas y requiere del uso de un software de modelación de la calidad del aire que permita identificar el grado de contaminación en los sitios preseleccionados, en caso que no se cuente con esta información.

Para el caso de aplicación en Cartagena de Indias, los sectores seleccionados para llevar a cabo la campaña de monitoreo fueron los siguientes: Peaje de Ceballo, Bomba del Amparo y CAI de Maria auxiliadora. Se planea que cada muestreo se realice durante un periodo promedio de 30 días por sector, desplazando los equipos de un sitio a otro luego de cumplido el periodo.

De acuerdo con las estimaciones de concentración de CO reportadas por el modelo CALINE 3, en los seis sitios preseleccionados en la ciudad de Cartagena, no se violan los estándares anuales, según lo establecido por la norma Colombiana, a diferencia de las concentraciones para el Peaje de Ceballo.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Universidad de Cartagena, la Universidad Tecnológica de Bolívar y a Colciencias su apoyo académico dentro del desarrollo de la Maestría en Ingeniería Ambiental y la financiación de un “joven investigador” para el logro de los objetivos de esta primera fase del proyecto.

6. BIBLIOGRAFÍA

- [1] J.L Inche, *Gestión de la calidad del aire: Causas, efectos y soluciones*. Lima, Perú: Instituto de Investigación de Ingeniería Industrial-UNMSM, 2004, 118pp.
- [2] United States Environmental Protection Agency (USEPA), (jun 3, 2015). *Air Quality Planning and Standards* [En línea]. Disponible en: <http://www.epa.gov/airquality/montring.html>
- [3] Universidad de Chile, F.d., Análisis de Evaluaciones y Reevaluaciones ExPost, VI Etapa. 27, 2001.
- [4] *Principios de Medición de la Calidad del Aire*, Instituto Nacional de Ecología (INE), Mexico, 2011.
- [5] C. Guerreiro, “Air quality in Europe - 2014 report,” European Environment Agency, Luxemburgo, 2014. [En línea] Disponible en: <https://goo.gl/UqWep0>
- [6] *Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire. Manual de operación de sistemas de vigilancia de la calidad del aire*, Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial de Colombia (MAVDT), Bogotá, 2007.
- [7] M.L. Rojas, “Diseño de la red de evaluación y seguimiento de la calidad del aire para la ciudad en Neiva-Huila,” tesis de pregrado, Fac. de Ing. Amb. y Sanitaria, Univ. de la Salle, Bogotá, 2006.
- [8] J. Sánchez et al, “Niveles de Contaminantes en el aire de Cartagena, Colombia,” *Salud UIS*, vol. 45, num. 3, pp. 1-10, sep-dic 2013. Disponible en: <https://goo.gl/BVDByi>.
- [9] R.E. Medina, Control de la contaminación atmosférica, Universidad Libre Seccional Cali, 2013.
- [10] N. García, “Criterios a considerar en la planificación de una red de monitoreo atmosférico,” trabajo de ascenso docente, Esc. Ing. Química, LUZ, Maracaibo, 1999.
- [11] M. Blaser, “Dispersión de la contaminación atmosférica causada por el tráfico vehicular. Aplicación de un modelo matemático para Guatemala Ciudad y San Salvador,” SwissContact, Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación. [En línea]. Disponible en: <https://goo.gl/jAKjkG>
- [12] N.P. Singh y S. Gokhale, “A method to estimate spatiotemporal air quality in an urban traffic corridor”, *Science of the Total Environment*, vol. 538, pp. 458–467, dic. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.08.065>
- [13] L. Xia y Y. Shao, “Modelling of traffic flow and air pollution emission with application to Hong Kong Island”, *Environmental Modelling & Software*, vol. 20, num. 9 pp. 1175–1188, sep. 2005. DOI:10.1016/j.envsoft.2004.08.003
- [14] F.F. García, R.A. Agudelo y K.M. Jiménez, “Metodología para la localización de estaciones de monitoreo de material particulado a escala local (0.5 a 4 km) en la ciudad de Santa Marta”, *Gestión y Ambiente*, vol. 9, num. 2, pp. 121-136, ago. 2006. Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=169420986001>
- [15] T.L. Saaty, *The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation*. L.A., Cali.: McGraw-Hill, 1980, 287pp.
- [16] El Universal. (2015, jul.9). *Parque automotor de Cartagena aumentó junto con los niveles de accidentalidad*. [Artículo de prensa en línea] Disponible en: <https://goo.gl/PCc8q7>
- [17] H. Hung, “Toward the next generation of air quality monitoring: Persistent organic pollutants,” *Atmospheric Environment*, vol. 80, pp. 591-598, dic. 2013. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.05.067>
- [18] W. Pattinson, I. Longley y S. Kingham, “Using mobile monitoring to visualise diurnal variation of traffic pollutants across two near-highway neighbourhoods,” *Atmospheric Environment*, vol. 94, pp. 782-792, sep. 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.06.007>
- [19] Salvador, P. “Multicriteria approach to interpret the variability of the levels of particulate matter and gaseous pollutants in the Madrid metropolitan area, during the 1999–2012 period,” *Atmospheric Environment*, vol. 109, pp.205-216, may. 2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.03.008>
- [20] L.T. Padró-Martínez, “Mobile monitoring of particle number concentration and other traffic-related air pollutants in a near-highway neighborhood over the course of a year,” *Atmospheric Environment*, vol. 61, pp.253-264, dic. 2012. DOI: [10.1016/j.atmosenv.2012.06.088](http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2012.06.088)
- [21] K. Clarke, H.O. Kwon y S.D. Choi, “Fast and reliable source identification of criteria air pollutants in an industrial city,” *Atmospheric Environment*, vol.95, pp. 239-248, oct. 2014. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.atmosenv.2014.06.040>
- [22] A. Elkamel, “A heuristic optimization approach for Air Quality Monitoring Network design with the simultaneous consideration of multiple pollutants,” *Journal of Environmental Management*, vol. 88, num. 3, pp. 507-516, ago.2008. DOI:

- <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2007.03.029>
- [23] Icher, “Información turística de Cartagena de Indias–Servicios, teléfonos, oficinas de turismo”, 2009.
- [24] *Censo General*, Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE), Colombia, 2014.
- [25] ESU (2015, jun.2). *Seguridad en Línea*. (E.D. URBANA, Editor) Disponible en: <https://goo.gl/w5nYK8>
- [26] SVCA, S.d., “Diagnóstico De La Calidad Del Aire (Inventario De Emisiones) Y Diseño Del Sistema De Vigilancia De Calidad Del Aire De La Ciudad De Cartagena De Indias D.T. Y C, Departamento De Bolívar”, Cartagena: Inventario de emisiones K2.
- [27] *User’s Guide for CAL3QHC Version 2: A Modeling Methodology for Predicting Pollutant Concentrations Near Roadway Intersections*, 2a ed., USEPA, Research Triangle Park, NC, 1995, EPA –454/R-92-006, (Revised). U. S.
- [28] F.B. Padaui, *Valoración de riesgos ambientales en el distrito de Cartagena*. Cartagena de Indias, Colombia: IHSU Unicartagena, 2011.
- [29] C.A. Cardique, “Laboratorio de calidad ambiental. Evaluación de calidad de aire consorcio CCMV – Transcribe II”, 2007.
- [30] M. Maré, “Current air quality analytics and monitoring: A review,” *Analytica Chimica Acta*, vol. 853, pp. 116–126, ene.2015. DOI: <http://dx.doi.org/10.1016/j.aca.2014.10.018>
- [31] P. Benson, “CALINE3 - A Versatile Dispersion Model for Predicting Air Pollutant Levels Near Highways and Arterial Streets,” CA. DOT, L.A., CA, US, Rep. DOT/DF-80-1002A Intrm. Rpt., 1979.
- [32] EPA Cartagena, “Informe Meteorologico y de calidad de aire en la ciudad de Cartagena,” EPA, Cartagena de Indias, Colombia.
- [33] V.M. Tarapues, “Selección y Aplicación de una metodología para la estimación de los factores de emisión de los contaminantes atmosféricos provenientes de las fuentes móviles vehiculares de la ciudad de Bogotá,” tesis de maestría, Uniandes, Bogotá, 2003.
- [34] EPA Unicartagena, “Protocolo de la Red de Monitoreo de Calidad de Aire en la Ciudad de Cartagena,” en *Diseño del Sistema Inteligente de Monitoreo de Calidad Ambiental del Distrito De Cartagena*, Tomo 4, Cartagena de Indias, Colombia, 2016.