

Revisión

Modelo de proximidad espacial para definir sitios de muestreo en redes urbanas de calidad de aire

A spatial proximity model to define monitoring sites in urban air quality networks

Modelo de proximidade espacial para definir áreas de amostragem em redes urbanas de qualidade do ar

Libardo A. Londoño-Ciro¹; Julio E. Cañón-Barriga²; Julián D. Giraldo-Ocampo³

¹ Candidato Doctor en Ingeniería, Ingeniero de Petróleos. Universidad de Antioquia, Colombia. Correo: libaranto@hotmail.com. ORCID: 0000-0002-4109-2568

² Doctor en Hidrología, Ingeniero Civil. Universidad de Antioquia, Colombia.

³ Especialista en Sistemas de Información Geográfica, Ingeniero de Sistemas. Universidad de San Buenaventura, Colombia

Recibido: 12 de abril de 2016. Aprobado: 16 de noviembre de 2016. Publicado online: 23 de diciembre de 2016

Londoño-Ciro LA, Cañón-Barriga JE, Giraldo-Ocampo JD. Modelo de proximidad espacial para definir sitios de muestreo en redes urbanas de calidad de aire. Rev. Fac. Nac. Salud Pública. 2017; 35(1): 111-122. DOI:10.17533/udea.rfnsp.v35n1a12

Resumen

Este artículo presenta un modelo de proximidad espacial a vías, usos industriales del suelo y zonas verdes para determinar concentraciones de material particulado y localizar sitios de monitoreo de calidad de aire en zonas urbanas. Se utilizan datos de concentración promedio mensual de PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), medidos en nueve sitios de monitoreo en la ciudad de Medellín entre enero de 2003 y diciembre de 2008. Con estos datos se calculan mapas mensuales de concentración, usando métodos de interpolación geoestadísticos con semivariogramas J-Bessel que caracterizan espacialmente la concentración de PM10. Se calculan tres factores de proximidad espacial (a vías, a industrias y a zonas verdes) y uno combinado para multiplicarlos por los

mapas de concentración. Con este resultado, se propone una red de sitios de monitoreo para Medellín. Las técnicas de análisis espacial y el modelo de proximidad permiten inspeccionar la distribución del contaminante sobre el territorio, resaltando el efecto de las intersecciones de las vías principales y las zonas industriales donde se dan las mayores concentraciones, y el efecto amortiguador de las zonas verdes. Esto complementa las disposiciones normativas existentes en Colombia para la definición de la ubicación de sitios de monitoreo en sistemas de vigilancia de la calidad del aire.

-----*Palabras clave:* modelo de proximidad espacial, contaminación del aire.

Abstract

This paper presents a model of spatial proximity to roads, industrial uses of land and green areas, to determine concentrations of particulate matter and locate air quality monitoring sites in urban areas. The model uses monthly average concentration of PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$) measured at nine monitoring sites in the city of Medellín between January 2003 and December 2008. With these data, monthly maps were calculated using geostatistical interpolation methods with J-Bessel semivariograms to characterize the concentration of PM10. Three factors of spatial proximity (to main roads, industries and green areas) were calculated along with

one combined factor. They were then multiplied by the concentration maps. With this result, a network of monitoring sites was proposed for Medellín. The Spatial analysis techniques and the proximity model allow for the assessment of the distribution of the contaminant on the territory, highlighting the effect of intersections and industrial areas on high concentrations and the dampening effect of green areas. This work may complement the existing regulatory provisions in Colombia for locating critical monitoring sites of the air quality surveillance systems.

-----*Keywords:* Spatial proximity model, Air Pollution.

Resumo

Neste artigo se apresenta um modelo de proximidade espacial a vias, utilização industrial do solo e áreas verdes, para determinar concentrações de material particulado e localizar lugares de monitoração da qualidade do ar em áreas urbanas. Utilizam-se dados de concentração de média mensal de PM10 ($\mu\text{g}/\text{m}^3$), medidos em nove lugares de monitoração em Medellín, entre janeiro de 2003 e dezembro de 2008. Com estes dados calculam-se mapas mensais de concentração, utilizando métodos de interpolação geostatísticos com semivariogramas J-bessel, caracterizando espacialmente a concentração de PM10. Calculam-se três fatores de proximidade espacial (a vias, as industrias e a áreas verdes), e um combinado

para multiplicá-los nos mapas de concentração. Com este resultado, propõe-se uma rede de lugares de monitoração para Medellín. As técnicas de análise espacial e o modelo de proximidade permitem inspecionar a distribuição do poluente sobre o território, ressaltando o efeito das interseções das vias principais e as áreas industriais onde ficam as maiores concentrações, e o efeito amortecedor das áreas verdes. Isto complementa as disposições normativas que existem na Colômbia para a definição da localização de lugares de monitoração em sistemas de vigilância da qualidade do ar.

-----*Palavras-chave:* modelo de proximidade espacial, poluição do ar.

Introducción

La concentración de substancias contaminantes en el aire depende de las fuentes de emisión existentes y de las condiciones de dispersión. Las fuentes de emisión pueden ser de dos tipos: fijas y móviles. La emisión de contaminantes debidos a fuentes fijas puntuales se da en mayores niveles en los usos del suelo asociados con la producción de la gran empresa, la producción en consolidación y el uso industrial [1, 2, 3]. La emisión debida a fuentes móviles está asociada con la actividad del tráfico vehicular [4, 5]. Esta información puede provenir de mediciones directas, encuestas de tráfico, o modelos de transporte para una red vial predeterminada [5, 6, 7] y su procesamiento permite calcular las emisiones asociadas a la actividad del sector transporte para las distintas categorías vehiculares [7, 8].

Para evaluar la calidad del aire en una región determinada, es necesario implementar algún método de monitoreo para muestrear, analizar y procesar en forma continua durante un periodo las concentraciones de contaminantes presentes en el aire. De igual manera debe

tenerse en cuenta la normativa existente sobre la calidad del aire, lo cual implica una zonificación del área de influencia para realizar comparaciones entre las mediciones realizadas y umbrales máximos (UMax) y mínimos (UMin).

Para la toma de datos es fundamental tener una red de sitios de monitoreo y para definir la localización de los sitios es importante tener en cuenta las variables que afectan la dispersión de los contaminantes, un conocimiento de la distribución de las concentraciones de los contaminantes mediante la implementación de campañas de mediciones preliminares [9], la distancia a las fuentes de emisión [10] y condiciones y criterios de microlocalización de los sitios de monitoreo [11].

Según el Sistema de Información sobre Calidad del Aire del Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial (SISAIRE) de Colombia [11], los sitios de monitoreo se clasifican en tres niveles:

Nivel 1. Según el área en donde se encuentra el sitio de monitoreo, el área hace referencia a la distribución o densidad de las edificaciones, se clasifican en urbanas (área totalmente urbanizada), suburbana

(área parcialmente urbanizada mezclada con áreas no urbanizadas con usos agrícolas, bosque, lagos, etc.) y rurales (que no son de ninguno de los tipos anteriores).

Nivel 2. Según el tiempo de monitoreo, se clasifican en fijos (permanece en un punto fijo por más de un año) e indicativos (permanece en un punto fijo por periodos menores a un año).

Nivel 3. Según la influencia de los distintos tipos de fuentes emisoras, se clasifican en de tráfico (la fuente emisora es el tráfico rodado cercano), de punto crítico (la fuente emisora es el tráfico rodado cercano, pero están ubicadas a nivel del suelo, muy usadas en estudios epidemiológicos), industriales (la fuente emisora son las zonas industriales) y de fondo (la fuente emisora

no es directa sino la dispersión del contaminante por el régimen de vientos). Estos sitios de monitoreo a su vez pueden ser del nivel 1 y 2.

En este artículo se plantea un modelo de proximidad espacial a vías principales, usos industriales del suelo y zonas verdes para localizar sitios de monitoreo en redes urbanas de calidad de aire con base en criterios de análisis espacial. Se toma como caso de estudio la ciudad de Medellín, con los datos disponibles en nueve sitios de monitoreo de la concentración promedio mensual de PM10 [$\mu\text{gm}/\text{m}^3$] entre enero de 2003 y diciembre de 2008 (*Geographic Coordinate System: GCS MAGNA. Projected Coordinate System: MAGNA Colombia Bogotá, Projection Transverse Mercator*) [12] (Tabla 1 y Figura 1).

Tabla 1. Descripción sitios de monitoreo

ID del sitio de monitoreo	X	Y	Descripción
0	836785,411928	1191924,478836	Municipio de Bello
1	834995,210822	1183470,751388	Edificio Miguel de Aguinaga
2	832774,035375	1176575,161941	Planta de Tratamiento de Agua San Fernando
3	836221,830098	1174486,593983	Municipio de Envigado
4	833901,199034	1178597,426154	Politécnico Colombiano Jaime Isaza Cadavid
5	834995,210822	1185161,496878	Universidad de Antioquia
6	830188,189332	1180918,057218	Universidad de Medellín
7	832276,757289	1185725,078708	Universidad Nacional
8	832840,339119	1182277,283984	Universidad Pontificia Bolivariana

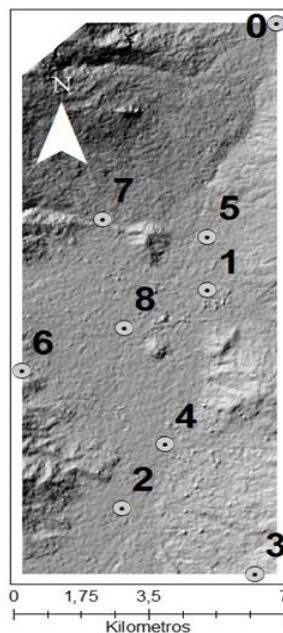


Figura 1. Localización sitios de monitoreo

Metodología y modelo de proximidad espacial

El modelo de proximidad espacial y los mapas resultantes se implementan usando la herramienta Spatial Analyst® del software ArcMap® versión 10.3 de la tecnología ESRI, y consta de los siguientes procesos:

- Entradas del modelo: inicialmente se toman los datos medidos en los sitios de monitoreo y se usan algoritmos de interpolación espacial geoestadísticos para caracterizar espacialmente mediante mapas, la concentración de PM10 en la ciudad de Medellín.
- Cálculo de distancias euclidianas y procesos de reclasificación: se calculan mapas de distancia a vías, a usos industriales y a zonas verdes. Los mapas se independizan de las unidades de longitud y se cualifica la proximidad a estos objetos espaciales mediante procesos de reclasificación.
- Cálculo de factores de proximidad: con los mapas resultantes del proceso anterior, se calculan factores de proximidad a vías, a usos industriales, a zonas verdes y uno combinado de los tres anteriores. Luego estos factores se multiplican por los mapas del primer proceso.

Entradas del modelo

Inicialmente se explora el comportamiento espacial de los datos usando métodos geoestadísticos. En un trabajo anterior de los autores [13] se encontró que el modelo

J-Bessel representaba mejor la variografía de los datos. Con este modelo se obtienen mapas de interpolación espacial con una confiabilidad de estimación promedio de 84% ($100\% - \text{RMS}_{\text{promedio}}$), en donde $\text{RMS}_{\text{promedio}}$ es el valor promedio de la raíz del error cuadrático medio de todos los meses con una desviación estándar de 1.8. Estos mapas caracterizan espacialmente el PM10 para cada mes del año y se denotarán como I_i en el modelo ($i = 1 \dots 12$). En la Figura 2, se muestra como ejemplo la caracterización de tres meses: dos con los mayores valores de concentración (marzo, octubre) y uno con los menores valores (junio). Otras entradas en el modelo son: un mapa de vías secundarias, un mapa de vías principales, un mapa de usos industriales del suelo y un mapa de zonas verdes (Figura 3).

Cálculo de distancias euclidianas y procesos de reclasificación

A partir de los mapas de vías, usos industriales y zonas verdes, mediante funciones de análisis espacial se calculan las distancias euclidianas a vías, usos del suelo y zonas verdes. Para calcular las distancias a las vías y generar corredores de proximidad a ellas, se calculó la distancia a vías principales hasta 25 m y a las vías secundarias hasta 10 m [5, 7]. Para el caso de la distancia a usos industriales, se generó un corredor de proximidad hasta una distancia máxima de 1500m [2, 3] y para las zonas verdes un corredor de proximidad hasta una distancia máxima de 250 m [9, 14]. El corredor de proximidad supone que esa es la distancia dentro de la cual se tienen efectos significativos de las vías, los usos industriales y las zonas

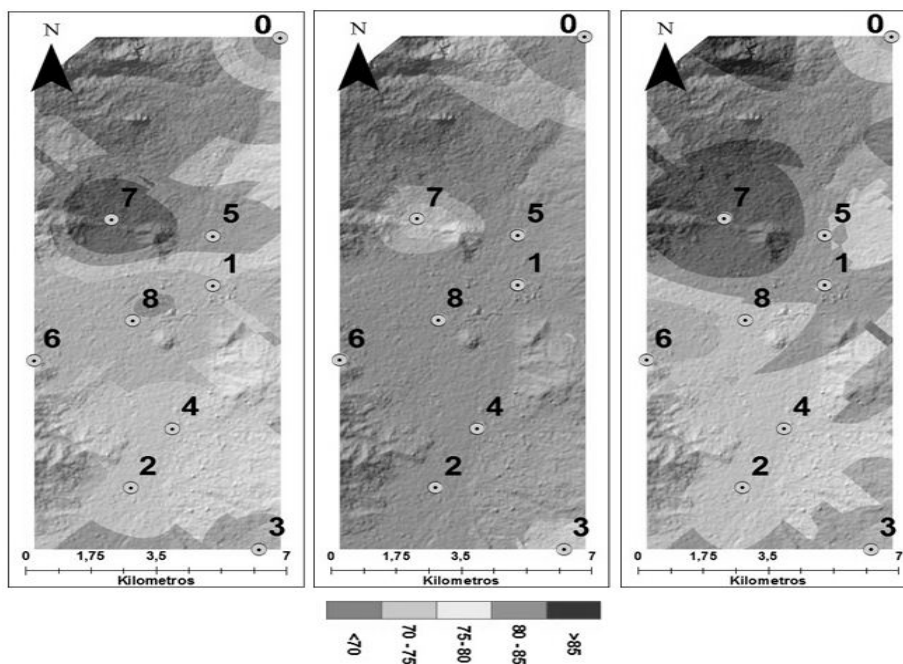


Figura 2. Caracterización espacial de PM10 (I_i) en marzo (MR), junio (JN) y octubre (OC), respectivamente

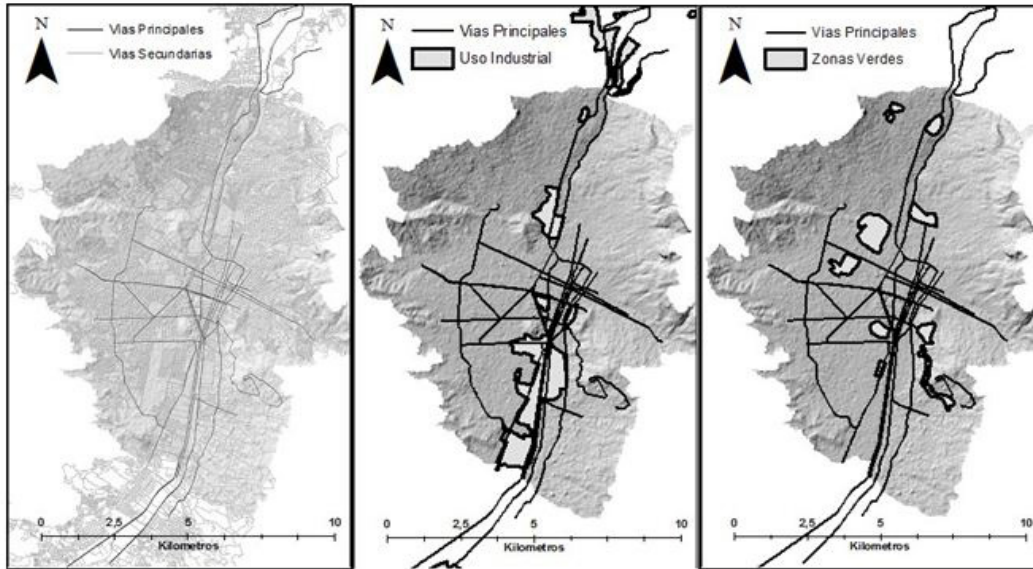


Figura 3. Vías principales y secundarias, Usos industriales y zonas verdes

verdes sobre la concentración de PM10. Con este proceso se obtienen cuatro mapas de distancias: a vías secundarias (O_1), a vías principales (O_2), a usos industriales (O_3) y a zonas verdes (O_4). Para independizar los mapas de distancia de sus unidades de longitud y cualificar la proximidad, se usan funciones de reclasificación espacial con el método “equal interval” usando la escala 1, 2, 3, 4 y 5, en la que 5 indica mayor proximidad y 1 menor proximidad para el caso de la distancia a industrias y a vías, y viceversa para el caso de la distancia a zonas verdes (Figura 4). Obsérvese que la proximidad de las zonas verdes es contraria a las otras dos, ya que su efecto es amortiguador de la contaminación.

De esta forma se obtienen cuatro mapas de distancia reclasificados respectivamente (O_{R1} , O_{R2} , O_{R3} y O_{R4}). Como ejemplo de los mapas obtenidos, en la Figura 5a se muestra simultáneamente una ampliación de los mapas O_{R1} y O_{R2} , en la Figura 5b el mapa O_{R3} y en la Figura 5c el mapa O_{R4} .

Cálculo de factores de proximidad

Se calculan tres factores de proximidad para hacer ajustes a los mapas de caracterización espacial de PM10 por proximidad a vías, usos del suelo y zonas verdes. Estos factores son la normalización porcentual de los mapas reclasificados de distancia. El primer factor (F_1) normaliza los mapas reclasificados de distancia a vías y se calcula mediante la ecuación 1.

$$F_1 = \frac{(\lambda_1 O_{R1} + \lambda_2 O_{R2})}{[\lambda_1 Max(O_{R1}) + \lambda_2 Max(O_{R2})]} \quad (1)$$

En donde λ_1 y λ_2 son los pesos ponderados de O_{R1} y de O_{R2} , calculados mediante métodos de análisis multicriterio (en este caso, se usa el proceso jerárquico analítico AHP de Saaty, referido por Gass y Fu [15]). Siendo O_{R2} más importante que O_{R1} , los pesos calculados con el algoritmo AHP fueron = 0,83 y 0,17. La función F_1 calcula el valor máximo de O_{R1} tomando en cada celda una vecindad rectangular de 3x3 celdas mediante funciones de estadística de bloque.

Los factores F_2 y F_3 normalizan los mapas reclasificados de distancia a usos industriales (O_{R3}) y zonas verdes (O_{R4}) respectivamente y se calculan mediante la ecuación 2.

$$F_2 = 0,2 * O_{R3} \text{ y } F_3 = 0,2 * O_{R4} \quad (2)$$

Con los factores F_1 , F_2 y F_3 se calcula, mediante la ecuación 3, un factor total (F_T) que incluye la proximidad combinada a vías, usos industriales y zonas verdes; siendo w_i los coeficientes de ponderación de los factores (para el caso que se presenta en este artículo $w_1=1, w_2=0,2$ y $w_3=0,2$).

$$F_T = (1 + w_1 F_1 + w_2 F_2 - w_3 F_3) \quad (3)$$

Con F_T se hacen los ajustes por proximidad (OP_i) a los mapas de caracterización espacial de PM10 (I_i) mediante la ecuación 4.

$$OP_i = F_T * I_i \quad i = 1, \dots, 12 \quad (4)$$

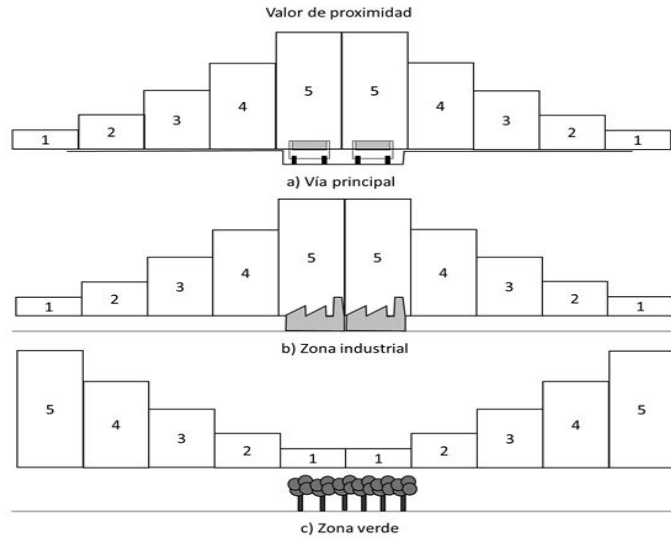


Figura 4. Esquema de valoración del efecto de contaminación por proximidad: a) a vías principales, b) a centros de zonas industriales y c) a centros de zonas verdes.

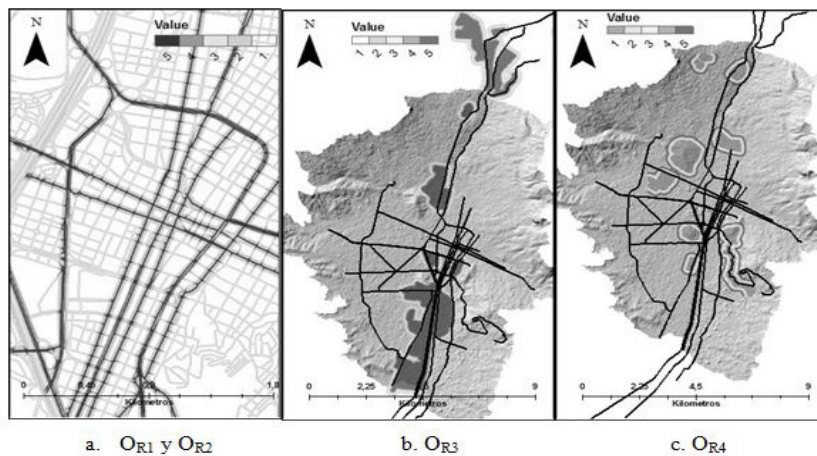


Figura 5. Mapas reclasificados de distancia a vías (a), industrias (b) y zonas verdes (c)

Análisis de resultados

En la Figura 6 se muestran los resultados obtenidos con el modelo de proximidad por efecto combinado de vías, usos industriales y zonas verdes, particularmente en los meses de marzo, junio y octubre (los mapas de los otros meses se pueden ver en la URL tesislibardolondono.aula.com.co, previa solicitud de acceso a los autores vía email).

La Figura 7 muestra un acercamiento de la Figura 6 en el centro de la ciudad, en donde se aprecia que el efecto de la proximidad a las vías principales es muy significativo. La región de la vía que tiende al color rojo representa un mayor valor de la concentración y esto se da en los lugares más cercanos al eje de la vía. También

en las intersecciones de las vías y en las rotondas, que corresponden a zonas de alto flujo vehicular.

La Figura 8 muestra un acercamiento de la Figura 6 en la zona centro sur de la ciudad entre los sitios de monitoreo 2 y 4 en donde se encuentra la mayor concentración de industrias y vías de alto flujo vehicular como la autopista sur, la avenida del río y la avenida Las Vegas. En esta zona se da un doble efecto que aumenta la concentración de PM₁₀ por proximidad a vías y proximidad a usos industriales.

La Figura 9 muestra un acercamiento de la Figura 6 en la zona de la ciudad entre los sitios de monitoreo 5, 7 y 8 en donde se encuentran zonas verdes como el jardín botánico y el cerro del Volador (polígonos con recuadro en blanco) y la zona industrial del barrio

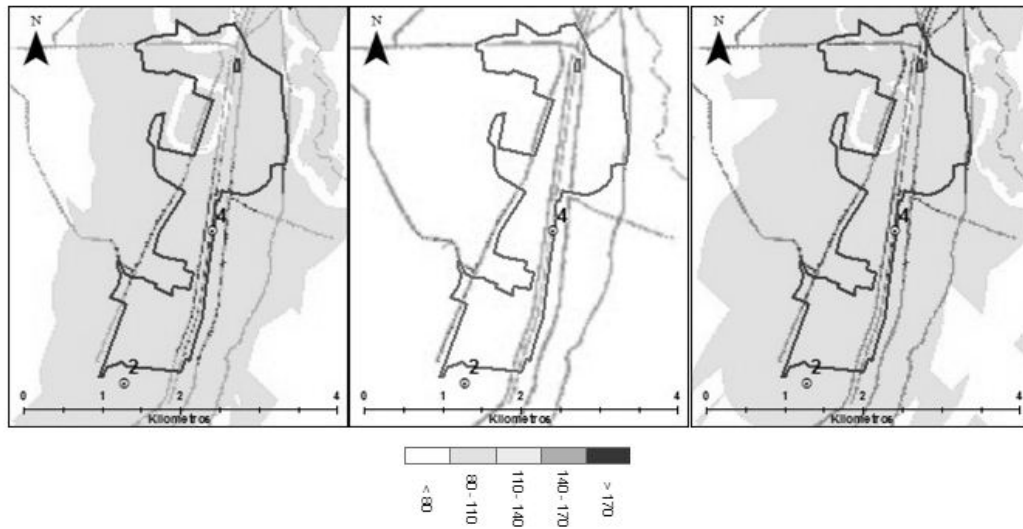


Figura 8. Concentración de PM10 en la zona centro sur de la ciudad en los meses de marzo (MR), junio (JN) y octubre (OC)

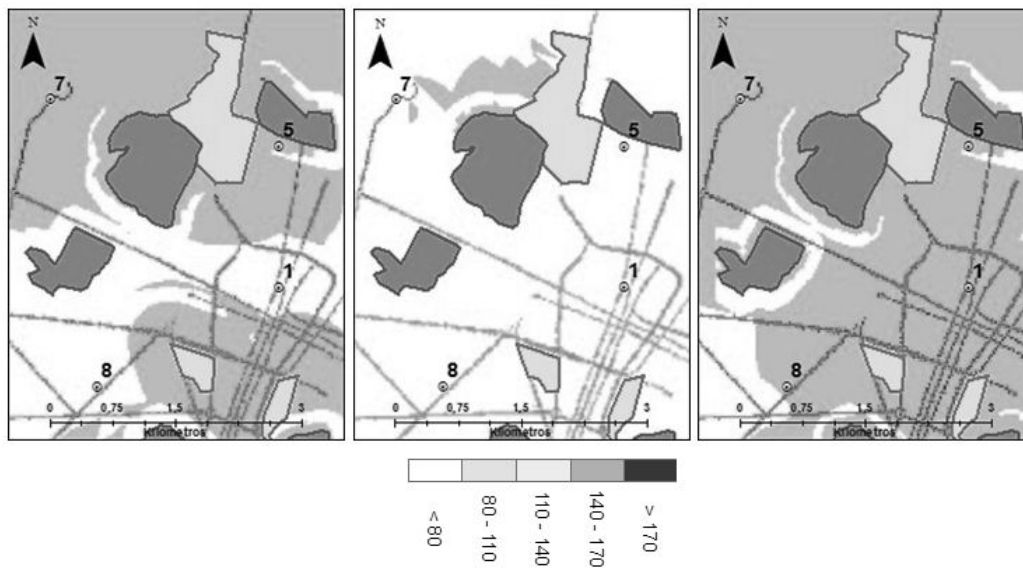


Figura 9. Concentración de PM10 en la zona entre los sitios de monitoreo 5, 7 y 8 en marzo (MR), junio (JN) y octubre (OC)

Caribe (polígono en color morado) atravesada por la autopista norte. En esta zona se da un triple efecto sobre la concentración de PM10: la proximidad a vías más la proximidad a zonas verdes y a usos industriales. Este efecto tratará de aumentar la concentración de PM10 por proximidad a vías e industrias y simultáneamente tratará de atenuarlo por proximidad a zonas verdes.

Las Figuras 7 a 9 muestran el efecto que tiene la proximidad a fuentes emisoras (que tienden a aumentar la concentración) y a fuentes disipadoras (que tienden a disminuir la concentración) al momento de localizar adecuadamente los sitios de monitoreo que midan la concentración del material particulado. Estos resultados son la base para proponer la configuración de una red de vigilancia que adicionalmente debería tener en cuenta:

- Las intersecciones de las vías principales y las rotondas en donde se podrían dar condiciones críticas para aumentar la concentración del contaminante.
- Las vías que atraviesan industrias dado que en ellas se tiene un efecto doble que aumenta la concentración.
- Las vías que atraviesan zonas verdes porque en estas vías se tiene un efecto doble que aumenta y atenúa simultáneamente la concentración.
- Las vías que atraviesan usos industriales y zonas verdes por el efecto triple que aumenta la concentración por proximidad a la vía y a

las industrias, y simultáneamente la atenúa por proximidad a las zonas verdes.

- La proximidad a usos industriales en donde aproximadamente el centro de los polígonos de usos industriales sería un buen sitio de monitoreo.
- La proximidad a zonas verdes en donde aproximadamente el centro de los polígonos de zonas verdes sería un buen sitio de monitoreo.
- La proximidad a usos industriales y zonas verdes en donde aproximadamente el centro de la intersección de los polígonos, sería un buen sitio de monitoreo con efectos dobles de aumento y atenuación simultánea.

Con base en las consideraciones anteriores, se podría definir una red de sitios de monitoreo como la que se propone en la Figura 10. La Tabla 2 muestra la tipología de los sitios de monitoreo de la Figura 10.

Con una configuración de sitios de monitoreo como la propuesta en la Figura 10, sería posible realizar campañas de mediciones preliminares de material particulado, relocalizar y complementar los sitios de monitoreo existentes y hacer mediciones para correlacionarlas con los efectos sobre la salud debidos a la exposición directa y de largo plazo a este contaminante. Adicionalmente se estimó el valor mensual en cada sitio de monitoreo de la Tabla 2 y se calculó su intervalo de confianza. En la Tabla 3 se muestran los cálculos para los meses de marzo (FTMR), junio (FTJN) y octubre (FTOC).

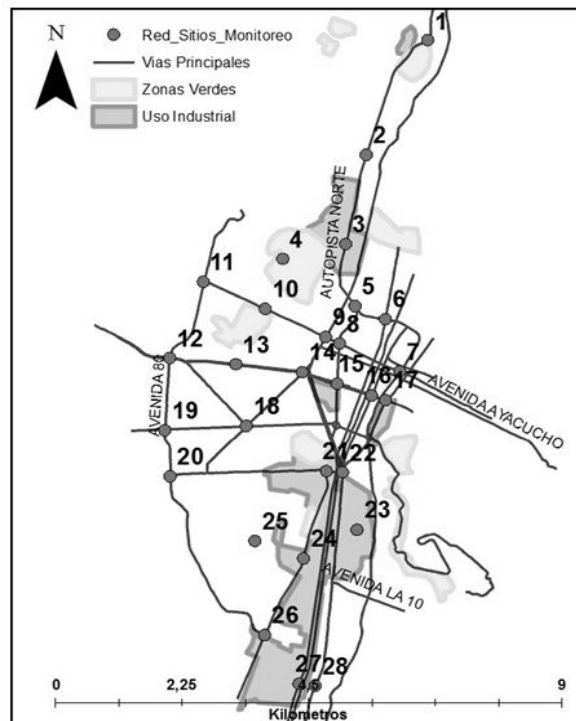


Figura 10. Propuesta de red de sitios de monitoreo para PM10 en la ciudad de Medellín

Tabla 2. Tipología de los sitios de monitoreo de la Figura 10

ID sitio de monitoreo	X	Y	Nombre vía	Tipología del sitio de monitoreo
1	835821,4600	1189056,5159	Autopista Norte con Calle 111	Punto crítico - Efecto industrial -Efecto zona verde
2	834727,8849	1186933,0582	Autopista Norte con puente Madre Laura	Punto crítico
3	834363,3883	1185282,4638	Roundpoint Punto Cero	Punto crítico - Efecto industrial
4	833245,6555	1185008,4703	Cerro Volador	Fondo - Efecto zona verde
5	834528,9797	1184135,1562	Roundpoint Plaza Minorista	Punto crítico - Fondo
6	835066,2914	1183894,6824	Av. Oriental con Carabobo	Punto crítico - Fondo
7	835323,7063	1182929,3051	Av. Oriental con Colombia	Punto crítico
8	834253,8655	1183444,3812	Av. Colombia con Av. Ferrocarril	Punto crítico
9	834006,5425	1183564,7015	Av. Colombia con Autopista Norte	Punto crítico
10	832932,4610	1184084,5628	Av. Colombia con Carrera 70	Punto crítico
11	831832,5504	1184585,3842	Roundpoint de la 80 con Colombia	Punto crítico
12	831234,0130	1183174,7061	Roundpoint de la 80 con San Juan	Punto crítico
13	832410,9776	1183060,7730	Av. San Juan con Carrera 70	Punto crítico – Efecto zona verde
14	833589,5533	1182912,8689	Av. San Juan con Av. Bolivariana	Punto crítico
15	834209,6940	1182700,7333	Av. San Juan con Av. Ferrocarril	Punto crítico - Efecto industrial
16	834824,2007	1182481,7239	Av. San Juan con Av. Palacé	Punto crítico
17	835067,7625	1182396,6045	Av. San Juan con El Palo	Punto crítico - Efecto industrial
18	832595,3343	1181918,8572	Roundpoint Av. 33 con Av. Bolivariana	Punto crítico
19	831148,9472	1181837,4766	Roundpoint Av. 33 con Av. 80	Punto crítico
20	831241,6636	1180988,9103	Roundpoint Av. 30 con Av. 80	Punto crítico
21	834021,0609	1181085,5504	Av. 30 con Av. Guayabal	Punto crítico - Efecto industrial -Efecto zona verde
22	834305,5055	1181062,6192	Av. 30 con Av. Industriales	Punto crítico - Efecto industrial
23	834562,4839	1179999,3490	Ciudad del río	Efecto industrial
24	833611,1277	1179468,0478	Roundpoint Av. Guayabal con Calle 10	Punto crítico - Efecto industrial
25	832748,5981	1179793,4145	Aeropuerto Olaya Herrera	Fondo - Efecto industrial
26	832921,9827	1178053,1046	Roundpoint Av. Guayabal con Av. 80	Punto crítico - Efecto industrial
27	833531,5713	1177153,1965	Autopista sur con la Aguacatala	Punto crítico - Efecto industrial
28	833820,5123	1177114,6665	Av. Las Vegas con la Aguacatala	Punto crítico

Tabla 3. Intervalos de confianza del PM10 estimado para los datos de la Tabla 2

ID del sitio de monitoreo	FTMR	Intervalo de confianza		FTJN	Intervalo de confianza		FTOC	Intervalo de confianza	
		Linf	Lsup		Linf	Lsup		Linf	Lsup
1	157,2	153,1	161,4	134,3	130,9	137,6	162,6	157,9	167,3
2	166,0	161,8	170,2	125,0	121,6	128,3	171,9	167,2	176,6
3	178,1	173,9	182,3	145,0	141,6	148,3	181,9	177,2	186,6
4	94,0	89,8	98,1	77,6	74,2	80,9	98,3	93,6	103,0
5	162,0	157,8	166,2	124,7	121,3	128,0	174,4	169,7	179,1
6	154,9	150,7	159,1	122,4	119,1	125,8	165,0	160,3	169,7
7	141,4	137,2	145,5	114,4	111,1	117,8	153,7	149,0	158,4
8	146,6	142,4	150,8	110,1	106,7	113,4	165,6	161,0	170,3
9	144,9	140,7	149,1	109,5	106,1	112,8	165,5	160,8	170,2
10	142,2	138,0	146,4	114,7	111,4	118,1	161,3	156,6	166,0
11	155,7	151,5	159,9	128,9	125,5	132,2	167,7	163,0	172,4
12	146,1	141,9	150,3	115,5	112,2	118,9	155,8	151,1	160,5
13	137,2	133,1	141,4	108,1	104,7	111,5	154,1	149,4	158,8
14	152,6	148,5	156,8	116,6	113,2	119,9	176,2	171,5	180,9
15	153,8	149,6	158,0	117,3	113,9	120,6	172,7	168,0	177,4
16	157,8	153,6	162,0	128,8	125,4	132,2	176,3	171,6	181,0
17	159,1	155,0	163,3	123,0	119,6	126,4	176,9	172,2	181,6
18	131,8	127,6	136,0	110,5	107,2	113,9	140,1	135,4	144,7
19	141,1	136,9	145,3	115,0	111,7	118,4	138,6	133,9	143,2
20	148,6	144,4	152,8	129,7	126,3	133,0	149,6	144,9	154,3
21	147,1	142,9	151,3	118,8	115,4	122,1	164,6	159,9	169,3
22	163,8	159,6	167,9	133,9	130,5	137,2	178,9	174,2	183,6
23	90,3	86,1	94,5	72,4	69,0	75,8	92,5	87,8	97,2
24	165,3	161,2	169,5	129,4	126,0	132,7	164,4	159,7	169,1
25	87,1	82,9	91,3	68,0	64,6	71,3	88,0	83,3	92,6
26	152,8	148,6	156,9	126,7	123,3	130,0	152,9	148,2	157,6
27	154,3	150,1	158,5	120,8	117,4	124,1	151,7	147,0	156,4
28	165,6	161,4	169,8	124,9	121,6	128,3	162,8	158,1	167,5

Conclusiones

El modelo propuesto presenta una metodología que utiliza Sistemas de Información Geográfica, procesos de interpolación geoestadísticos y herramientas de análisis espacial para estimar la concentración de material particulado PM10 por proximidad a vías, zonas industriales y zonas verdes. Esta metodología se podría utilizar en cualquier otra variable que cumpla con el principio de autocorrelación espacial y de la cual se necesite definir una red de sitios de monitoreo: se densifica con un interpolador espacial para caracterizarla espacialmente, se calculan distancias a objetos que

afecten su valor por proximidad a ellos, se calcula un factor de proximidad combinado a los objetos, se corrigen por proximidad los mapas de caracterización espacial, se hace un análisis de los mapas obtenidos y se propone la red de sitios de monitoreo.

Para el caso de los factores del modelo, en el factor F_1 se dio importancia a las vías principales por encima de las secundarias (igual a 0.83). Para el caso de los factores F_2 y F_3 se supuso una variación lineal de 0,2 a 1 con pasos de 0,2, siendo 1 la mayor proximidad a las industrias para F_2 y 0,2 la mayor proximidad a las zonas verdes para F_3 . Futuros estudios podrían

cambiar estas variaciones con modelos no lineales y analizar los resultados obtenidos.

Para el caso del factor de efecto combinado F_T , se supuso que el eje central de las vías principales contribuye el 100% sobre la concentración de PM10, las zonas industriales contribuyen con un aumento del 20% y las zonas verdes contribuyen con una atenuación del 20%. Por lo tanto, la concentración de PM10 debido al efecto de la proximidad combinada varía entre el 80% del valor estimado cuando sólo se presenta atenuación por proximidad a zonas verdes y el 120% para el caso de aumento por proximidad simultánea a industrias y vías principales con ausencia de zonas verdes. Se podrían suponer otros valores para las contribuciones y las atenuaciones de la concentración debido a la proximidad combinada y hacer análisis comparativos de resultados.

El modelo de proximidad ofrece una caracterización rápida del comportamiento del material particulado en toda el área metropolitana del Valle de Aburrá para cada mes del año y aporta criterios espaciales para localizar sitios de monitoreo cercanos a puntos críticos de emisión y de atenuación como se muestra en el mapa de la Figura 10. La tipología de los sitios de monitoreo se define en la Tabla 2 y adicionalmente se estiman datos para la concentración del material particulado en ellos (Tabla 3). Estos resultados aportan información para una gestión epidemiológica del territorio orientada a minimizar el riesgo por exposición directa y de largo plazo a este tipo de contaminantes.

Referencias

- 1 Elbir T. Comparison of model predictions with the data of an urban air quality monitoring network in Izmir, Turkey. *Atmospheric Environment* 2003; 37: 2149–2157.
- 2 Marcon A, Pesce G, Girardi P, Marchetti P, Blengio G, Sappadina S, et al. Association between PM10 concentrations and school absences in proximity of a cement plant in northern Italy. *International Journal of Hygiene and Environmental Health* 2014; 217 (2-3): 386-391.
- 3 García-Pérez J, Morales-Piga A, Gómez J, Gómez-Barroso D, Tamayo-Uría I, Pardo Romaguera P, et al. Association between residential proximity to environmental pollution sources and childhood renal tumors. *Environmental Research* 2016; 147: 405-414.
- 4 Gulliver J, Briggs D. STEMS-Air: a simple GIS-based air pollution dispersion model for city-wide exposure assessment. *Science of the Total Environment* 2011a; 409: 2419-2429.
- 5 Eeftens M, Beekhuizen J, Beelen R, Wang M, Vermeulen R, Brunekreef B, et al. Quantifying urban street configuration for improvements in air pollution models. *Atmospheric Environment* 2013; 72: 1-9.
- 6 Dionisio K, Rooney M, Arku R, Friedman A, Hughes A, Vallarino J, et al. Within-neighborhood patterns and sources of particle pollution: mobile monitoring and geographic information system analysis in four communities in Accra, Ghana. *Environment Health Perspectives* 2010; 118: 607–13.
- 7 Wang Y, Li J, Cheng X, Lun X, Sun D, Wang X. Estimation of PM10 in the traffic-related atmosphere for three road types in Beijing and Guangzhou, China. *Journal of Environmental Sciences* 2014; 26 (1): 197-204.
- 8 Clougherty J, Kheirbek I, Eisl H, Ross Z, Pezeshki G, Gorczynski J, et al. Intra-urban spatial variability in wintertime street-level concentrations of multiple combustion-related air pollutants: The New York City Community Air Survey (NYCCAS). *Journal of Exposure Science and Environmental Epidemiology* 2013; 23: 232-240.
- 9 Nejadkoorki F, Nicholson K, Hadad, K. The design of long-term air quality monitoring networks in urban areas using a spatiotemporal approach. *Environmental Monitoring and Assessment* 2011; 172 (1-4): 215-223.
- 10 Jerrett M, Potoglou D, Arain A, Kanaroglou P, Sahuvaroglu T, Beckerman B, et al. A review and evaluation of intraurban air pollution exposure models. *Journal of Exposure Analysis and Environmental Epidemiology* 2005; 15: 185–204.
- 11 Ministerio de Ambiente Vivienda y Desarrollo Territorial. Protocolo para el monitoreo y seguimiento de la calidad del aire. Bogotá: página 57; 2007 [acceso 11 de abril de 2016]. Disponible en: https://www.cortolima.gov.co/sites/default/files/images/stories/calidadAire/protocolo_monitoreo_calidad_aire.pdf.
- 12 Laboratorio de Calidad del Aire. Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín, Facultad de Minas; 2015.
- 13 Londoño L, Cañón J, Villada R, López L. Caracterización espacial de PM10 en la ciudad de Medellín mediante modelos geoestadísticos. *Revista de Ingenierías USBMED [revista en Internet]* 2015 julio-diciembre. [Acceso 11 de abril de 2016]; 6 (2): 26-35. Disponible en: <http://revistas.usb.edu.co/index.php/IngUSBmed/article/view/1728>
- 14 Chen X, Pei T, Zhou Z, Teng M, He L, Luo M, et al. Efficiency differences of roadside greenbelts with three configurations in removing coarse particles (PM10): A street scale investigation in Wuhan, China. *Urban Forestry & Urban Greening* 2015; 14(2): 354-360.
- 15 Saaty, T. Analytic Hierarchy Process. In: Gass S, Fu M. (eds) *Encyclopedia of Operations Research and Management Science*. US: Springer; 2013. p. 52-64.